

ПРАВИТЕЛЬСТВО НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И СВЯЗИ ИМ. А. С. ПОПОВА
НИЖЕГОРОДСКОЕ РЕГИОНАЛЬНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РНТОРЭС ИМ. А. С. ПОПОВА
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Р. Е. АЛЕКСЕЕВА

ТРУДЫ

II РОССИЙСКО-БЕЛОРУССКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

**«ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ:
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ» им. О. В. Лосева**



**Посвящена
70-летию Победы в Великой Отечественной войне,
70-летию образования РНТОРЭС им. А. С. Попова,
Всемирному Году Света**

17-19 ноября 2015 г., Нижний Новгород

Нижний Новгород 2015

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель Программного комитета: академик Гуляев Юрий Васильевич

Члены Программного комитета: академик Асеев А. Л., академик Бугаёв А. С., академик Гапонов С. В., академик Дианов Е. М., академик Достанко А. П., академик Кузнецов Н. А., академик Лабунов В. А., академик Орликовский А. А., академик Сигов А. С., академик Стемповский А. Л., академик Фёдоров И. Б., член-корр. Андронов А. А., член-корр. Аристов В. В., член-корр. Белоус А. И., член-корр. Гурский Л. И., член-корр. Гурьянов А. Н., член-корр. Двуреченский А. В., член-корр. Зубарев Ю. Б., член-корр. Каляев И. А., член-корр. Кведер В. В., член-корр. Комаров Ф. Ф., член-корр. Муртазаев А. К., член-корр. Никитов С. А., член-корр. Пименов Е. В., член-корр. Рогачёв А. В., член-корр. Чаплыгин Ю. А., член-корр. Черепенин В. А., д. т. н. Ашурбейли И. Р., проф. Бобрешов А. М., д. т. н. Бородин А. В., д. т. н. Быков В. А., проф. Дмитриев С. М., проф. Малинецкий Г. Г., проф. Мальцев П. П., проф. Оболенский С. В., проф. Потапов А. А., проф. Сухарев Е. М., проф. Чупрунов Е. В., проф. Шалумов А. С., к. ф.-м. н. Новиков М. А.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели Организационного комитета:

член-корр. **Кондратьев Вячеслав Васильевич**, проф. **Костюков Валентин Ефимович**

Члены Организационного комитета: д. т. н. Бобков С. Г., проф. Гейфман Е. М., проф. Зольников В. К., проф. Катин С. В., д. ф.-м. н. Панас А. И., проф. Снегирёв С. Д., проф. Сушкова Л. Т., проф. Хранилов В. П., проф. Частиков А. В., проф. Ямпурин Н. П., к. т. н. Белозёров С. Ю., к. ф.-м. н. Бритенков А. К., к. б. н. Гаврилова А. А., к. т. н. Гутин В. С., к. т. н. Ковалёв Ф. Н., к. в. н. Косяк И. В., к. ф.-м. н. Марков К. А., к. ф.-м. н. Ракуть И. В., к. т. н. Самсонов Г. А., д. т. н. Туляков Ю. М., к. т. н. Урманов Д. М., к. ф.-м. н. Шапошников Д. Е., к. ф.-м. н. Щелоков А. Н., Абросимова Н. Д., Андрианова Л. П., Булохов С. А., Каширин В. А., Нефёдов В. В., Рассадин А. Э., Федько Ю. В., Ягодкин В. Л.

МИССИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- объединение под эгидой Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова всех специалистов, заинтересованных в реальном развитии отечественной элементной базы отечественной радиоэлектроники;
- анализ современного уровня отечественных экспериментальных и теоретических исследований в области элементной базы радиоэлектроники;
- объединение усилий российских и белорусских ученых в развитии фундаментальных исследований и прикладных разработок в микроэлектронике, в внедрении отечественных инноваций из микроэлектронной области в отраслях отечественной экономики, основанных на достижениях микроэлектроники: в связи, навигации, телекоммуникациях, дистанционном зондировании Земли и т. д., а также в импортозамещении и поддержке отечественного товаропроизводителя в сфере микроэлектроники, в том числе в выходе на внешние рынки.

Под ред. А. Э. Рассадина.

Компьютерная вёрстка: А. Э. Рассадин при участии Д. Е. Шапошникова и В. Л. Ягодкина.

СОДЕРЖАНИЕ

ВКЛАД О.В. ЛОСЕВА В РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ	3
Секция 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ	7
Секция 2 РАДИАЦИОННОСТОЙКАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА	64
Секция 3 ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА	138
Секция 4 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ	223
Секция 5 ЭКОНОМИКА МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ	298
Секция 6 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	346
Секция 7 ВОПРОСЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В НАНО-, МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ	399
Секция 8 НАНО-, МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ	471
Авторский указатель	509

Информационная поддержка конференции:

- журнал «Силовая Электроника» www.power-e.ru ;
 - журнал «Технологии в Электронной Промышленности» www.tech-e.ru ;
 - журнал «Компоненты и Технологии» www.kit-e.ru ;
 - журнал «Беспроводные Технологии» www.wireless-e.ru ;
 - журнал «Полупроводниковая Светотехника» www.led-e.ru ;
 - журнал «Control Engineering Россия» www.controlengineering.ru ,
- а также проект «Премия имени О. В. Лосева» http://www.rsci.ru/losev_light/ .

ВКЛАД О.В. ЛОСЕВА В РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

к. ф.-м. н. Новиков М. А.

Институт физики микроструктур РАН

Сейчас всем очевидно, что самым главным двигателем сегодняшнего и будущего научно-технического прогресса являются достижения в области науки и техники. Особую роль играют достижения в области полупроводниковой физики, если учесть, что именно эти достижения позволили создать современное информационно-технологическое общество. Главными составляющими этих достижений считаются изобретения транзистора и лазера. Первое обычно однозначно связывают с именами американских ученых Бардином, Шокли и Братейном, а главный вклад в лазерную технику и оптоэлектронику связывают с группой американских и советских ученых. Однако, если внимательно проследить историю этих открытий, то мы придем к однозначному заключению, что вся предыстория этих достижений объективно связана прежде всего с именем выдающегося русского ученого и изобретателя Олега Владимировича Лосева, работавшего в двадцатых и тридцатых годах прошлого столетия, с начала в Нижнем Новгороде, а потом в Ленинграде. Ниже мы кратко изложим основные достижения О.В.Лосева в области полупроводниковой физики и техники.

1. В 1922-1927 годах О.В.Лосев впервые в мире создал практические приборы для приема (усиления) и генерации радиочастотных электромагнитных колебаний с использованием полупроводниковых приборов (кристадинов). Кристадин Лосева был одной из самых больших сенсаций в области радиосвязи двадцатых годов. Об этом писали журналы всего мира как о сенсационном открытии. Лишь неготовность научно-технического сообщества того времени в полной мере понять и оценить значения этих открытий О.В.Лосева существенно задержало научно-технический прогресс в области полупроводниковой электроники, который сейчас связывают с изобретением транзистора в 1948 году.

2. В 1907 году англичанин Г.Роунд в небольшой заметке кратко описал излучение, которое возникает при прохождении тока через контакт металла с карборундом. Это эффект в последствии получил название электролюминесценция. Эта заметка оставалась незамеченной до 70-х годов. В 1923 году О.В.Лосев, не зная работы британского ученого, открыл и, самое главное, физически правильно раскрыл основные физические механизмы электролюминесценции в полупроводниковых структурах, которые и в настоящее время не утратили своего значения. Так что вполне объективно можно считать Лосева основоположником современной науки об электролюминесценции. Более того, в 1928 году О.В.Лосев впервые в мире получил патент на практическое использование источника оптического излучения с применением этого явления. На современном языке это означает, что он является изобретателем полупроводникового светодиода (LED –Light Emited Diode). С современной точки зрения это, безусловно, главная заслуга О.В.Лосева, поскольку сейчас очевидно, что полупроводниковые светодиоды и лазеры на их основе уже играют, и еще большую роль будут играть в грядущем научно-техническом прогрессе. На наших глазах происходит революция в области электрического освещения, когда лампочки накаливания и даже люминесцентные лампы заменяются светодиодными источниками света. А если учесть, что светодиодные дисплеи и телевизоры успешно вытесняют другие типы таких приборов, то станет очевидным значение этого открытия. В этой связи очевидно, что О.В.Лосев должен занять почетное место среди русских ученых В.В.Петрова, П.Н.Яблочкина и А.Н.Лодыгина, внесших вклад в развитии электрического освещения с той лишь разницей, что значение достижений этих ученых это уже далекая история, а достижения О.В.Лосева это настоящее и ещё более обещающее будущее. Парадокс здесь в том, что имена и портреты этих ученых помещены даже в школьные учебники, а имя О.В. Лосева и его достижения порой неизвестны даже специалистам.

3. В литературе очень мало говорится об истории исследований свойства кремния как полупроводникового материала для фотоэлектроники. Учитывая, что в настоящее время кремний играет решающую роль в современной и будущей фотоэлектронике и солнечной энергетике (солнечные батареи), весьма интересно знать, кто же первым начал изучать фотоэлектронные свойства этого уникального материала. Оказывается и в этом деле О,В.Лосев был первым, хотя это мало кому известно. В начале тридцатых годов О.В.Лосев провел цикл очень интересных работ по фотоэлектрическим свойствам целого ряда материалов (92 материала) на предмет наличия у них фотоэлектрических свойств. В числе этих материалов был и кремний, который по его оценкам ни чем не выделялся среди этих материалов по своим фотоэлектрическим свойствам. Удивительным здесь кажется то, что именно кремнию Лосев отдал предпочтения для дальнейших исследований. Интуиция подсказывала ему, что за этим материалом большое будущее. В дальнейшем он много внимания уделял исследованиям фотоэлектронным эффектам этого материала. Характерно, что его последняя работа называлась «Метод электролитных фотоспротивлений. Фоточувствительность некоторых сплавов кремния». Он придавал этой работе очень большое значение. Достаточно сказать, что для того чтобы её закончить, он не

покинул осажденный Ленинград. Он успел подготовить публикацию к печати и послать её в журнал ЖЭТФ, но она затерялась и в настоящее время судьба этой статьи пока неизвестна. Он погиб в осажденном Ленинграде в январе 1942 года от голода. Если говорить об исследованиях фотоэлектрических свойств кремния другими авторами, то первое упоминание о таких исследованиях мне удалось найти в патенте (R.S.Ohl, Patent USA "Light-sensitive electric device", N 2,402,662, от 27 мая 1941). Об этом патенте стало известно только после войны в 1946 году, когда было принято решение выдать Олу патент на это изобретение. А реальное применение кремния для фотоэлектроники началось после работ, выполненных в Беллаб (США) в 1954 году. Неслучайно, что именно сотрудники этой лаборатории в 2009 году получили Нобелевскую премию за ССD фотоэлектрические кремниевые матрицы.

4. В начале тридцатых годов О.В.Лосев впервые в мире применил метод зондовой микроскопии для исследования свойств естественных полупроводниковых гетероструктур на поверхности карборунда кремния (SiC). Это, безусловно, прообраз целого семейства современных зондовых микроскопов, которые совершили революцию в микроскопии (наноскопии). Такие микроскопы позволяют видеть наноструктуры вплоть до отдельных атомов. Авторы таких микроскопов получили Нобелевскую премию. К сожалению, вклад О.В.Лосева в это также совсем не отражен в известной мне литературе.

5. Как хорошо известно, наиболее важным полупроводниковым элементом всей полупроводниковой электроники является P-N переход. Некоторые ученые сравнивают значение этого перехода в микроэлектронике и оптоэлектронике со значением и функцией клетки в биологии. На Западе открытие P-N перехода в полупроводниках приписывают американцу Расселу Олу (Russel Ohl), который случайно в начале сороковых годов обнаружил его в кристалле кремния (M.Riordan and L.H.Hoddeson, "The origin of the p-n junction", IEEE Spectrum, 27 June, 1997, p.46). Однако О.В.Лосев его обнаружил и детально изучил на поверхности карборунда кремния с помощью зондового метода ещё в начале тридцатых годов. Однако и сейчас находятся люди, которые утверждают, что этого недостаточно, чтобы признать приоритет Лосева в открытии P-N перехода на том основании, что он не указал, что этот переход образуется на стыке полупроводников с проводимостью разных знаков. На это можно ответить следующее. В начале тридцатых годов, когда еще не была создана зонная теория полупроводников, понятия электрона и дырки, которые ответственны за разные знаки проводимости, еще не были известны ученым. Однако в статье О.В.Лосева (Известия АН СССР, сер., физ., 1941, в.4-5, стр.494-499), описывая «запорный слой» (так в тридцатых годах называли P-N переход), он пишет -- «исследования термоэдс показало, что вещество активного слоя всегда обладает электронной (избыточной) проводимостью, тогда как проводимость в толще кристалла носит дырочный характер». Так что во второй половине тридцатых годов О.В.Лосев уже однозначно знал, что такое P-N переход. Заметим, что эта была последняя опубликованная Лосевым работа.

6. До последнего времени считалось, что приоритет изобретения транзистора принадлежит известной троице американских ученых из Беллаб (США). Оказалось, что это не совсем соответствует действительности. Сама идея создания полупроводникового усилителя подобного вакуумному триоду возникла сразу же после создания О.В.Лосевым его кристадина в 1923 году. Так уже в 1925 году Е.Лилиенфельд получил патент на устройство близкое к современным полевым транзисторам, но без реальной демонстрации его работоспособности. Кстати, этот патент серьезно ограничил патентные права американцев. Безусловно, что такие идеи были и у Лосева, но как настоящий естествоиспытатель, он признавал истинным только то, что подтверждается в эксперименте. Так в начале 30 годов он провел исследование трехэлектродного полупроводникового элемента, аналогичного современным триодам, но тогда усиления в них получить ему не удалось. Эти результаты им опубликованы. До недавнего времени считалось, что в дальнейшем он к этой теме не обращался. Однако недавно в Политехническом Музее в Москве был обнаружена рукописная автобиография О.В.Лосева, датированная 1938 годом, где он, перечисляя свои достижения последних лет, пишет -- «установлено, что с полупроводниками может быть построена трехэлектродная система аналогичная триоду, как и триод дающая характеристики, показывающие отрицательное сопротивление. Эти работы, в настоящее время, подготавливаются мною к печати». К сожалению, эта статья по неизвестной причине не появилась в печати и её судьба также пока не известна.

7. Недавно в наиболее известном английском научном журнале NATURE была опубликована очень интересная статья, посвященная истории электролюминесценции. В ней очень высоко оцениваются работы О.В.Лосева в этой области. Автор этой статьи, читая работы О.В.Лосева по электролюминесценции, обнаружил весьма любопытный факт. Оказалось, что в одной из работ О.В.Лосева, посвященный исследованию спектра электролюминесценции в карборунде кремния, О.В.Лосев обнаружил сужение спектра излучения с повышением его мощности при увеличении тока. В настоящее время подобный эффект считается прямым доказательством наличия в таком процессе явления индуцированного излучения. Этот факт показывает, что О.В.Лосев причастен даже к изобретению полупроводникового лазера.

Приведённые выше выдающиеся достижения, полученные О.В.Лосевым на протяжении его короткой, но чрезвычайно насыщенной творчеством жизни, не исчерпывают полученных им научных результатов. Так ещё предстоит оценить цикл работ О.В.Лосева, посвященных открытому им в 1925-1926 годах новому явлению в нелинейной радиотехнике, названному им трансгенерацией. Кроме того мало известно о его работах по электрокардиологии, которые он проводил на кафедре физики в Первом Ленинградском медицинском институте, где он работал в последние годы жизни. Известно в частности, что, экспериментируя на себе, он заставлял своё сердце синхронно сокращаться в такт с внешними электрическими импульсами. Сейчас это общеизвестная процедура, но не нужно забывать, что это происходило более 70 лет назад. Вообще для научного подхода О.В.Лосева было характерно браться только за нерешенные или мало разработанные проблемы и при этом практически всегда достигал блестящих результатов.

Результаты О.В.Лосева показывают, что в его лице отечественная наука имеет уникального ученого, аналогично которому трудно найти даже в истории мировой науки. Но всё же, если искать в истории физики личность, похожую на Лосева, то в первую очередь на память приходит имя знаменитого английского ученого Майкла Фарадея. Как и он, О.В.Лосев был ученым-самоучкой, и все свои исследования выполнял единолично. Как и Фарадей, Лосев обладал изумительной физической интуицией, которая его также никогда не подводила. Кроме того, оба они были виртуозами эксперимента с поразительной работоспособностью и преданностью науке. Но самое главное, наверное, в том, что они оба фактически стояли у истоков научно-технических революций. Исследования Фарадея стали фундаментом революции в области электричества, а Лосев стоял у истоков современной революции в области физики и технике полупроводников. Есть, конечно, и различия. Если Фарадей уже при жизни был признан и получил причитающиеся ему по праву почести и, кроме того, прожил вполне счастливую жизнь, то Лосев, к сожалению, не имел ни того, ни другого. Конечно, они жили в различные эпохи, но самое главное в том, что они жили и работали в различных странах, где по-разному ценят талантливых людей.

В настоящее время большой интерес к личности О.В.Лосева, связан, прежде всего, с созданием новых источников света на основе светодиодов. Речь идёт о создании источников света с широчайшими функциональными свойствами. Но, как видно из вышесказанного, значение вклада О.В.Лосева в отечественную и мировую науку значительно шире. Тем не менее, в России имя О.В.Лосева до настоящего времени известно явно не достаточно. Хотя в связи с 100-летием со дня его рождения, которое отмечалось в 2003 году, по инициативе ИФМ РАН была проведена всероссийская конференция по фотонике, посвященную О.В.Лосеву, эта инициатива не нашла до сих пор поддержки со стороны средств массовой информации. До сих пор не было никаких передач как по радио, так и на телевидении, посвященных трагической жизни и научному подвигу нашего выдающегося соотечественника. Наши обращения по этому поводу к известным телеведущим (в том числе и местным), занимающихся проблемами истории отечественной науки, до сих пор остаются без ответа.

На Западе имя О.В.Лосева хорошо известно как об изобретателе светодиода, и совсем не говорится о его существенном вкладе в другие области полупроводниковой физики. Тем не менее в англоязычной литературе, когда пишут об О.В.Лосеве довольно часто можно его называют как *russian genius Oleg Vladimirovich Losev* (Русский гений Олег Владимирович Лосев). В заключении мне бы не хотелось вдаваться в пространные объяснения причин такой исторической несправедливости по отношению к памяти О.В.Лосева и другим нашим выдающимся ученым. Эта тема отдельного разговора.

Тем не менее, эту несправедливость в отношении заслуг О.В.Лосева перед отечественной и мировой наукой нужно устранить. В частности, предполагается издание расширенного сборника трудов О.В.Лосева, в котором будут помещены также и его работы на английском и немецком языках, которые им были опубликованы в Европе. Кроме того, планируется перевести наиболее важные работы О.В.Лосева с русского на английский с тем, чтобы в полной мере познакомить Запад с научными достижениями нашего соотечественника, и тем самым утвердить российский приоритет в важнейших направлениях современной физики полупроводников. Без сомнения, имя О.В.Лосева может стать одним из символов возрождения великих традиций отечественной науки.

E-mail: mnovik@ipm.sci-nnov.ru

Литература

1. Новиков М. А. Олег Владимирович Лосев – пионер полупроводниковой электроники (К столетию со дня рождения) // Физика твердого тела, 2004. Т. 46. № 1. С. 5 - 9.
2. Опередивший время. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. Р. Г. Стронгина. — Н. Новгород: ННГУ, 2006.
3. Остроумова Е. В. На пороге эры микроэлектроники. О. В. Лосев // Труды 1-й Российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой

110-ю со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. А. Э. Рассадина. — Н. Новгород.: НИЖЕГОРОДСКАЯ РАДИОЛАБОРАТОРИЯ. 2013. В 2-х т. Т. 1. С. 6 - 9.

4. Гилёв С. А., Новиков М. А., Потапов А. А., Рассадин А. Э. О.В. Лосев и пути развития русской микроэлектроники в XXI в. // Нелинейный мир. 2015. N 4. С. 4-11.

CONTRIBUTION OF O. V. LOSEV INTO DEVELOPMENT OF MODERN SEMICONDUCTOR ELECTRONICS AND OPTOELECTRONICS

M. A. Novikov

Institute for Physics of Microstructures of RAS

The article prepared on the basis of careful study of extensive archive material claims that Russian and soviet scientist Oleg Vladimirovich Losev (1903-1942) was a pioneer of era of microelectronics. This claim is diametrically opposite to traditional point of view that American physicists Nobel Prize Winners John Bardeen, William Bradford Shockley and Walter Houser Brattain were pioneers of era of microelectronics. In the article its author describes main discoveries and inventions of O. V. Losev: kristadin, electroluminescence, light emitting diode, semiconducting laser, probe microscopy, p-n junction and transistor.

The near years promise new revolution in the sphere of electronics. A number of key problems in the development of informational technologies is expected to be solved. For instance one of them is the problem of vast increase of data rate. Another one is the problem of decrease of consumption of energy by supercomputers. It is obvious that in the 21st century there are no world powers without their own electronics. That is why at the present moment it is necessary to consolidate home radio engineers and specialists in microelectronics not only in order to solve problem of import replacement of element base for home radioelectronics but in order to organize asymmetric response on the challenge in the sphere of break-through informational technologies using the scheme of modernization without westernization too. For taking these measures it is required a symbol which would inspire Russian and Belorussian scientists and engineers to new outstanding achievements. Beyond any doubt for the solution of these problems figure of O. V. Losev has no alternative.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Электрические, оптические, структурные и химические свойства полупроводниковых материалов. Физика полупроводниковых приборов. Приборы на квантовых эффектах. Моделирование на суперЭВМ методом молекулярной динамики физических процессов в материалах и компонентах электронной техники. Наноструктуры и нанотехнологии в микроэлектронике. Моделирование сложных наносистем, в том числе на суперЭВМ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДИРАКОВСКИХ ЗОН ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.¹, к.ф.-м.н. Крылов Г.Г.², к.ф.-м.н. Крылова Г.В.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский государственный университет

1. Введение

Материалы с сильным спин-орбитальным взаимодействием перспективны для разработки нового поколения электронных приборов – наноэлектронных устройств с управлением их электрическими характеристиками магнитным полем [1]. Однако кулоновское взаимодействие в тонких пленках трехмерных (3D) полупроводников и 3D-полуметаллов делает их экситонными диэлектриками с неустойчивой зонной структурой [2]. Зонная структура биполярных двумерных (2D) графеноподобных материалов и поверхностные состояния так называемых топологических диэлектриков устойчивы и характеризуются дираковскими зонами с линейным законом дисперсии. Поэтому использование таких материалов, называемых дираковскими, позволит осуществить технологический прорыв к будущим 3D квантовым устройствам, которые могут обеспечить функциональность узлов с размерами ниже 22 нм в электрических схемах [3,4]. Сложные оксиды [5] относятся к дираковским материалам. Тонкие пленки сложных оксидов перовскитового типа, например, феррита висмута BiFeO_3 аномально высоко поляризуются ($0,6 \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2}$), на порядок превышая значения поляризации для объемных образцов ($0,061 \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2}$) (см. [6] и ссылки там). Спин-зависимая диэлектрическая поляризация наблюдается для тонкопленочных систем оксидов металлов, кристаллическая структура которых может иметь орторомбическую симметрию. Так, объемный BiFeO_3 (BFO) описывается ромбоэдрической пространственной группой симметрии $R3c$. Ромбоэдрически искаженная структура перовскито-подобного кристалла имеет параметры гексагональной решетки: $a_{\text{hex}}=5,571 \text{ \AA}$ и $c_{\text{hex}}=13,868 \text{ \AA}$ при комнатной температуре [7]. Эта группа допускает наклоны октаэдра, образованного атомами O, с атомом Fe внутри и смещения центрально-симметричных атомов в узлах кубической псевдо-решетки в противофазе вокруг и вдоль одного и того же направления [111] решетки, подобной кубической. BFO имеет антиферромагнитное упорядочение спинов G-типа со спиновой модуляцией циклоидного типа ниже температуры Нееля T_N порядка 370 C° [8]. Отсутствие слабого ферромагнетизма при наличии спиновой циклоиды делает невозможным линейный магнитоэлектрический эффект. Напротив, эпитаксиальные тонкие пленки BFO с 2% содержанием Nd на подложке MgO характеризуются орторомбической симметрией $Fm2m$ [9]. Параметры F-центрированной решетки – $a = 7,914 \text{ \AA}$, $b = 7,913 \text{ \AA}$ и $c = 7,937 \text{ \AA}$. Такая же ориентация наблюдается в ферроэлектрических пленках PbTiO_3 , также расположенных на MgO [10]. Частичное замещение Bi гадолинием индуцирует фазовый переход $R3c \rightarrow Rnma$ в орторомбическую фазу $Rnma$ с параметрами кристаллической решетки $a = 5,577 \text{ \AA}$, $b = 7,9 \text{ \AA}$ и $c = 5,527 \text{ \AA}$ для доли $x=0,15$ [7]. Переход к орторомбической фазе приводит к подавлению спирально модулированной спиновой структуре. В связи с этим представляет интерес моделирование зонной структуры одноатомного слоя (монослоя) атомов Pb.

В данной работе используется квазирелятивистскую модель дираковского материала в приближении сильной связи с учетом π -электронных орбиталей [11-14]. Эта модель допускает вейлевский тип носителей заряда, описываемых хиральными вейлевскими спинорами.

Цель работы – показать, что устойчивость зонной структуры тонкопленочных перовскитоподобных материалов с сильным спин-орбитальным взаимодействием в случае атомов тяжелых металлов, например, Pb, возникает из-за хиральности вейлевских носителей электрического заряда.

2. Квазирелятивистская 2D модель с дирак-хартри-фоковским обменом в приближении сильной связи

В работах [11-14] нами был предложен новый подход к описанию электронных свойств графена, использующий квази-релятивистское приближение самосогласованного поля Дирака–Хартри–Фока с

Физические основы микроэлектроники

дополнительным предположением о спиновом упорядочении подрешеток A, B в графене. При таком подходе двумерный дираковский материал описывается следующим стационарным уравнением для вторично-квантованного фермионного поля $\hat{\chi}_{+\sigma_B}^+$:

$$\hat{v}_F^{AB} \vec{\sigma}_{2D}^{BA} \cdot \vec{p}_{AB} \hat{\chi}_{+\sigma_B}^+ (\vec{r}) |0, \sigma \rangle = E_{qu}(p) \hat{\chi}_{+\sigma_B}^+ (\vec{r}) |0, \sigma \rangle, \quad (1)$$

где $\hat{v}_F^{AB} = \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{AB}$ – оператор скорости Ферми, $\hat{\chi}_{+\sigma_B}^+ (\vec{r}) |0, \sigma \rangle = \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{AB} \hat{\chi}_{+\sigma_B}^+ (\vec{r}) |0, \sigma \rangle$, $\vec{\sigma}_{2D}^{AB} = \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA} \vec{\sigma}_{2D} \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA}^{-1}$, $\vec{\sigma}_{2D}$ – 2D-вектор матриц Паули, $\hat{p}_{AB} = \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA} \hat{p} \left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA}^{-1}$, \hat{p} – оператор импульса, 2D матрицы преобразования $\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA}$ и $\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{AB}$ являются членами, описывающие обменное взаимодействие для подрешеток A и B гексагональной решетки, соответственно. Уравнение движения фермиона с дирак-хартри-фоковским обменом для подрешетки A описывается заменой A(B) \rightarrow B(A).

Матрицы обменного взаимодействия $\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA}$ и $\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{AB}$ были рассчитаны в приближении сильной связи:

$$\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{AB} \approx \Sigma_{AB}(\delta_i q_i) = \frac{1}{\sqrt{2}(2\pi)^3} e^{-i(\theta_{k_A} - \theta_{k_B})} \sum_{i=1}^3 \exp\{i[\vec{K}_A^i - \vec{q}_i] \cdot \vec{\delta}_i\} \int dz \int V(\vec{r}_{2D}) dx_{2D} dy_{2D} \times \begin{pmatrix} \sqrt{2} \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D}) \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D}) & \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D}) [\psi_{p_z}^*(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D})] \\ \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D}) [\psi_{p_z, \vec{\delta}_i}(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D})] & \frac{[\psi_{p_z, \vec{\delta}_i}(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D})] [\psi_{p_z}^*(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D})]}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}(2\pi)^3} e^{-i(\theta_{k_A} - \theta_{k_B})} \sum_{i=1}^3 \exp\{i[\vec{K}_A^i - \vec{q}_i] \cdot \vec{\delta}_i\} \Sigma_{AB}^{nd},$$

$$\left(\Sigma_{rel}^x \right)_{BA} \approx \Sigma_{BA}(\delta_i q_i) = \frac{1}{\sqrt{2}(2\pi)^3} e^{-i(\theta_{k_A} - \theta_{k_B})} \sum_{i=1}^3 \exp\{i[\vec{K}_A^i - \vec{q}_i] \cdot \vec{\delta}_i\} \int dz \int V(\vec{r}_{2D}) dx_{2D} dy_{2D} \times \begin{pmatrix} \frac{[\psi_{p_z, \vec{\delta}_i}(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D})] [\psi_{p_z}^*(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D})]}{\sqrt{2}} & -\psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D}) [\psi_{p_z, \vec{\delta}_i}(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D})] \\ -\psi_{p_z}(\vec{r}_{2D}) [\psi_{p_z}^*(\vec{r}_{2D}) + \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D})] & \sqrt{2} \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D}) \psi_{p_z, -\vec{\delta}_i}^*(\vec{r}_{2D}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}(2\pi)^3} e^{-i(\theta_{k_A} - \theta_{k_B})} \sum_{i=1}^3 \exp\{i[\vec{K}_A^i - \vec{q}_i] \cdot \vec{\delta}_i\} \Sigma_{BA}^{nd}.$$

Здесь мы ввели обозначение $\psi_{p_z, \pm \vec{\delta}_i}(\vec{r}_{2D}) = \psi_{p_z}(\vec{r}_{2D} \pm \vec{\delta}_i)$ и использовали атомные орбитали ψ_{p_z} p_z -электронов.

3. Расщепление реплик дираковского конуса в модели с поправками 4-го порядка к гамильтониану безмассового 2D-псевдофермиона

Перепишем уравнение (1) в импульсном представлении, приближенно полагая матричные элементы оператора скорости Ферми равными его вакуумному среднему:

$$\sum_{i,j} \langle \chi_p | q_i \rangle \Sigma_{AB}(\delta_i q_i) \vec{\sigma}_{2D} \Sigma_{AB}^{-1}(\delta_j q_j) \langle q_j | \vec{p}_{AB} | \chi_p \rangle = \langle \chi_p | E_p < 0 | \hat{v}_F | 0 \rangle | \chi_p \rangle, \quad (4)$$

где $\vec{q}_i + \vec{q}_j = 0$ в силу закона сохранения импульса. В этом приближении вектор 2D-матриц $\vec{\sigma}_{2D}^{BA}$ имеет вид

$$\vec{\sigma}_{2D}^{BA} \equiv \Sigma_{AB}(\delta_i q_i) \vec{\sigma}_{2D} \Sigma_{AB}^{-1}(\delta_j q_j) = \Sigma_{AB}^{nd} \vec{\sigma}_{2D} \left(\Sigma_{AB}^{nd} \right)^{-1} \frac{\sum_{k=1}^3 [-i\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k - \frac{1}{2}(\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k)^2 + \frac{i}{3!}(\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k)^3 - \dots]}{\sum_{k=1}^3 [i\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k - \frac{1}{2}(\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k)^2 - \frac{i}{3!}(\vec{q} \cdot \vec{\delta}_k)^3 + \dots]}. \quad (5)$$

Было проведено численное моделирование зонной структуры вышепредложенной 2D-модели монослоя атомов Pb с учетом в (5) только поправок 4-го порядка по q включительно. Рассчитанная дырочная валентная зона (электронная зона проводимости) монослоя атомов Pb, конусообразная в окрестности дираковской точки бриллюэновской зоны монослоя атомов, показана на рис. 1a. Все остальные зоны зонной структуры, моделируемой 2D-системы, симметричны относительно

Физические основы микроэлектроники

представленной на рис. 1. Поскольку согласно проведенным расчетам зонной структуры реплики дираковского конуса расщепляются на противоположно направленные конусы, то монослой атомов Рb является 2D дираковским материалом, в котором возможно возбуждение пар вейлевских безмассовых фермионов. Так как вейлевские фермионы в паре имеют противоположные по знаку, но равные по модулю значения псевдоспиральности (топологического заряда), то в силу закона сохранения топологического заряда вейлевские фермионы могут распадаться только парами, а не по отдельности. Поэтому в отличие от дираковских электронов и дырок вейлевские фермионы представляют собой долгоживущие квазичастицы

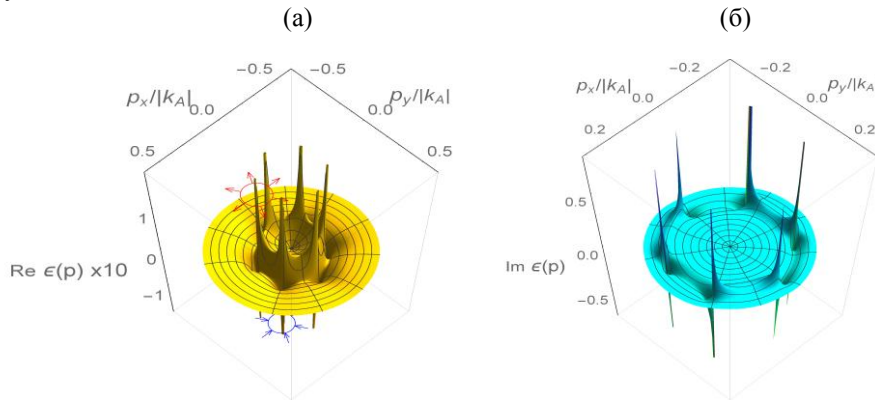


Рис. 1. Зонная структура монослоя атомов Рb, действительная (а) и мнимая часть энергии. Стрелками обозначены вейлевские мода (сток) и антимода (исток).

Чтобы установить влияние величины спин-орбитального взаимодействия на энергию рождения вейлевских пар, была рассчитана зонная структура монослоя атомов легкого элемента – углерода. Согласно рис. 2а вейлевские зоны смещаются к краю зоны Бриллюэна и их энергия резко возрастает, что делает маловероятным существование такого типа носителей электрического заряда в графене.

Недостаток предложенной модели с поправками 4-го порядка к гамильтониану безмассового 2D-псевдофермиона – это отсутствие расщепления самого дираковского конуса, а не только его реплик, и наличие сильной диссипации вейлевских пар согласно рис. 1б и 2б. Это значит, что для описания перовскитоподобных сложных оксидов существенны также поправки более высокого порядка, чем рассмотренные в данной работе.

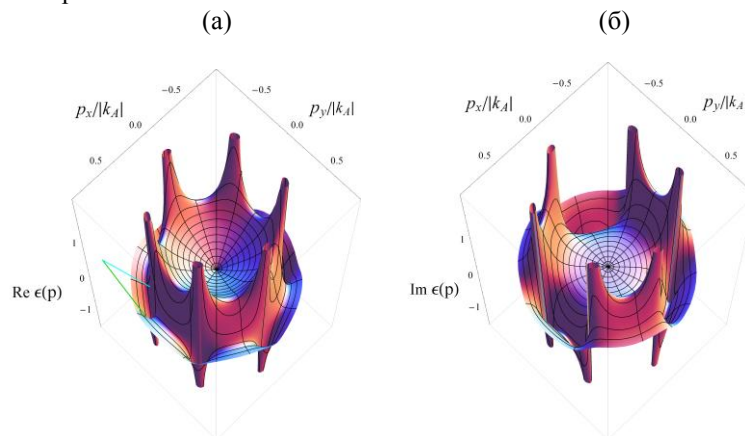


Рис. 2. Зонная структура графена, действительная (а) и мнимая часть энергии. Линии на рис.2а указывают вейлевские моду (сток) и антимоду (исток).

4. Заключение

Итак, построена квазирелятивистская модель дираковского 2D-материала, в которой возможно расщепление дираковских зон. Показано, что в графене вейлевские квазичастичные пары рождаются на краю зоны Бриллюэна и энергия этих состояний достаточно большая. Сильное спин-орбитальное взаимодействие в монослое атомов Рb приводит к смещению вейлевских мод к уровню Ферми и значительно понижает энергию, которую необходимо затратить на их рождение. Большая вероятность рождения вейлевских пар квазичастиц, объясняет хиральные свойства и, соответственно, спин-зависимую диэлектрическую поляризацию тонкопленочных сегнетоэлектриков перовскитового типа.

Литература

1. А. И. Морозов, А. С. Сигов. Фрустрированные многослойные структуры ферромагнетик-антиферромагнетик: выход за рамки обменного приближения // ФТТ, 2012, т.54, вып.2, С. 209-229.
2. Л. В. Келдыш. Кулоновское взаимодействие в тонких пленках полупроводников и полуметаллов // Письма в ЖЭТФ. -1979. - Т. 29. - С. 716.
3. G. Fiori et al. Electronics based on two-dimensional materials // Nature Nanotechnology. Vol. 9, 768-779 (2014).
4. Л. И. Гурский, Г. В. Крылова. Многозатворный 3-мерный прибор с полевым транспортом отрицательно заряженных экситонов // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. Vol.5, No. 2. С.28--32 (2014).
5. K. S. Novoselov et al. Two-dimensional atomic crystals // PNAS. {Vol. 102}, no. 30, 10451-10453 (2005)
6. А. К. Звездин, А. П. Пятаков. Фазовые переходы и гигантский магнито-электрический эффект в мультиферроиках // УФН. – 2004. – Т. 174. – С. 465 -470.
7. V. V. Lazenka et al. Structural transformation and magnetoelectric behaviour in $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$ multiferroics // J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 45, 125002 (2012). doi:10.1088/0022-3727/45/12/125002
8. G. Catalan, J.F. Scott // Adv. Mater. – 2009. – V.21. – P. 1.
9. Leontyev I. N. et al. Orthorhombic polar Nd-doped BiFeO_3 thin film on MgO substrate // J. Phys.: Condens. Matter. – 2011. – V.23, № 33. – P. 332201
10. B. S. Kwak et al. Phys. Rev. B Vol.49,14865 (1994)
11. H. V. Grushevskaya, G. G. Krylov. Charge Carriers Asymmetry and Energy Minigaps in Monolayer Graphene: Dirac-Hartree-Fock approach. J. Nonlin. Phenom. in Complex Sys. **16**, 189 (2013).
12. H. V. Grushevskaya, G.G. Krylov. Partially Breaking Pseudo-Dirac Band Symmetry in Graphene. Int. J. Nonlin. Phen. in Complex Sys. Vol.17, 86 (2014).
13. H. V. Grushevskaya, G. G. Krylov. Graphene: Beyond the Massless Dirac's Fermion Approach. In: Nanotechnology in the Security Systems. Eds. J. Bonca, S. Kruchinin. (Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2015). Pp. 21-31.
14. H. V. Grushevskaya, G. G. Krylov. Quantum Field Theory of Graphene with Dynamical Partial Symmetry Breaking. J. Mod. Phys. Vol.5, no. 10, 984-994 (2014).

**SIMULATION OF DIRAC BANDS SPLITTING FOR THIN FILMS
OF PEROVSKITE-TYPE COMPLEX OXIDES**

L.I. Gursky¹, G.G. Krylov², H.V. Krylova²

¹Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarussian State University

Quasi-relativistic model of 2D Dirac material has been proposed for which the Dirac bands splitting is possible. It has been shown that in graphene Weyl quasi-particle pairs are created at the edge of the Brillouin zone and the energy of these states is sufficiently high. Strong spin-orbit interaction in a monolayer of Pb atoms leads to a shift of Weyl modes to the Fermi level and significantly diminish the energy that should be spend on their creation. High probability of pairs creation of Weyl quasiparticles explains chiral properties and, respectively, the spin-dependent dielectric polarization of the perovskite-type ferroelectric thin films.

КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА НА КВАДРАТНОЙ РЕШЕТКЕ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ СЛЕДУЮЩИХ БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ

член-корр. РАН Муртазаев А.К.^{1,2}, к. ф.-м. н. Рамазанов М.К.¹, к. ф.-м. н. Бадиев М.К.¹

¹Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН

²Дагестанский государственный университет

Для количественного описания фазовых переходов (ФП) и критических явлений (КЯ) в современной физике конденсированного состояния используются различные решеточные модели. Следует отметить, что с помощью теоретических методов на простых решеточных моделях удалось точно решить лишь очень ограниченное количество задач. Одним из таких моделей является двумерная модель Изинга. Модель Изинга с взаимодействиями ближайших соседей хорошо исследована различными методами и подходами [1-4]. Модель Изинга на квадратной решетке с ферромагнитными взаимодействиями ближайших и следующих ближайших соседей достаточно хорошо изучена и не представляет интереса для дальнейших исследований. Однако учет антиферромагнитных взаимодействий следующих ближайших соседей в классической двумерной модели Изинга приводит к возникновению эффектов фрустрации, что сопровождается вырождением основного состояния и появлением различных фаз и фазовых переходов. Кроме того, учет взаимодействия следующих ближайших соседей может также влиять на критическое поведение модели, в частности появляются различные аномалии критических свойств [5,6].

В работах [2,7,8] показано, что в антиферромагнитной модели Изинга на квадратной решетке с взаимодействиями следующих ближайших соседей имеет место ФП второго рода и эта модель может обладать «аномальными» критическими индексами. При нулевой температуре модель имеет два упорядоченных состояния. Ферромагнитная фаза, когда $0 \leq r < 0.5$ и суперантиферромагнитная, когда $r > 0.5$, где $r = J_2/J_1$ (J_1 и J_2 - константы обменного взаимодействия ближайших и следующих ближайших соседей соответственно). Но все же, сценарий, непрерывного фазового перехода, был под вопросом, после расчетов теорией среднего поля, который показал фазовый переход первого рода [9].

Результаты исследований, полученные в последние годы в работах [10,11] показывают, что в области от $0.5 < r < 0.67$ в системе происходит фазовый переход первого рода, а в интервале от $0.67 \leq r \leq 1.0$ наблюдается ФП второго рода близкий переходу первого рода с псевдоуниверсальным критическим поведением.

В настоящей работе нами предпринята попытка по возможности с максимальной точностью, с соблюдением единой методики, использованием надежной и проверенной схемы, на основе репличного алгоритма метода МК изучить критическое поведение и вычислить полный набор статических критических индексов для антиферромагнитной модели Изинга на квадратной решетке с учетом взаимодействий следующих ближайших соседей для всех значений r , где наблюдается ФП второго рода.

Антиферромагнитная модель Изинга на квадратной решетке с учетом взаимодействий следующих ближайших соседей описывается следующим гамильтонианом [12].

$$H = -J_1 \sum_{\langle ij \rangle} (S_i \cdot S_j) - J_2 \sum_{\langle\langle il \rangle\rangle} (S_i \cdot S_l) \quad (1)$$

где $S = \pm 1$ – изинговский спин. Первый член в формуле (1) учитывает обменное антиферромагнитное взаимодействие ближайших соседей ($J_1 < 0$), а второй - обменное антиферромагнитное взаимодействие следующих ближайших соседей ($J_2 < 0$). Учет антиферромагнитных взаимодействий следующих ближайших соседей в этой модели приводит к возникновению фрустрации.

Исследование ФП фрустрированных спиновых систем традиционными теоретическими, экспериментальными и численными методами сталкиваются с рядом трудно преодолимых проблем. Это связано с тем, что для таких систем характерна проблема многочисленных долин локальных минимумов энергии. Строго и последовательно на основе микроскопических гамильтонианов такие системы могут быть изучены методами Монте-Карло [13-17], но обычные методы МК плохо справляются с решением этих проблем. Поэтому в последнее время разработано много новых вариантов алгоритмов метода МК, которые позволяют преодолеть эти проблемы. Наиболее мощными и эффективными в исследовании ФП и КЯ в фрустрированных системах оказались репличные алгоритмы метода МК [18]. Расчеты проводились для систем с периодическими граничными условиями и линейными размерами $L \times L = N$, $L = 20 \div 150$. Соотношение обменного взаимодействия следующих и ближайших соседей менялось в интервале $0.1 \leq r \leq 1$. Для вывода системы в состояние термодинамического равновесия отсекался неравновесный участок длиной $\tau_0 = 4 \times 10^5$ МК-шагов/спин, что в несколько раз больше длины неравновесного участка. Усреднение термодинамических параметров проводилось вдоль марковской цепи длиной до $\tau = 500\tau_0$ МК-шагов/спин.

Физические основы микроэлектроники

Для наблюдения за температурным ходом теплоемкости и восприимчивости использовались выражения [12-15]:

$$C = (NK^2) \left(\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2 \right), \quad (2)$$

$$\chi = \begin{cases} (NK) \left(\langle m^2 \rangle - \langle |m| \rangle^2 \right), & T < T_C, \\ (NK) \langle m^2 \rangle, & T \geq T_C \end{cases}, \quad (3)$$

где $K = |J|/k_B T$, N – число частиц, U – внутренняя энергия, m – параметр порядка.

Параметр порядка системы m вычислялся, используя следующие выражения:

$$m_\lambda = \frac{4}{N} \sum_{i \in \lambda} S_i, \quad \text{где } \lambda = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

$$m^a = [m_1 + m_2 - (m_3 + m_4)]/4, \quad (5)$$

$$m^b = [m_1 + m_4 - (m_2 + m_3)]/4, \quad (6)$$

$$m = \sqrt{(m^a)^2 + (m^b)^2}, \quad (7)$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – параметры порядка по подрешеткам.

Для определения критической температуры T_C , нами использовался метод кумулянтов Биндера U_L четвертого порядка, который имеет вид [19]:

$$U_L = 1 - \frac{\langle m^4 \rangle_L}{3 \langle m^2 \rangle_L^2}, \quad (8)$$

Согласно теории конечно-размерного скейлинга точка пересечения всех кривых $U_L(T)$ является критической точкой. Выражение (8) позволяет определить критическую температуру T_C с большой точностью.

Для расчета статических критических индексов теплоемкости α , восприимчивости γ , намагниченности β и радиуса корреляции ν применялись соотношения теории конечно-размерного скейлинга. Из теории КРС следует, что в системе с размерами $L \times L$ при $T=T_C$ и достаточно больших L выполняются следующие выражения [12]:

$$m \sim L^{-\beta/\nu}, \quad (9)$$

$$\chi \sim L^{\gamma/\nu}, \quad (10)$$

$$V_n \sim L^{\nu} g_{V_n}, \quad (11)$$

где g_{V_n} – некоторая постоянная, а в качестве V_n могут выступать:

$$V_n = \frac{\langle m^n E \rangle}{\langle m^n \rangle} - \langle E \rangle, \quad (n=1, 2, 3, 4). \quad (12)$$

Эти выражения были нами использованы для определения β , γ и ν . Для аппроксимации температурной зависимости теплоемкости от L использовалось выражение:

$$C_{\max}(L) = A_1 - A_2 L^{\alpha/\nu}, \quad (13)$$

где A_1 и A_2 – некоторые коэффициенты.

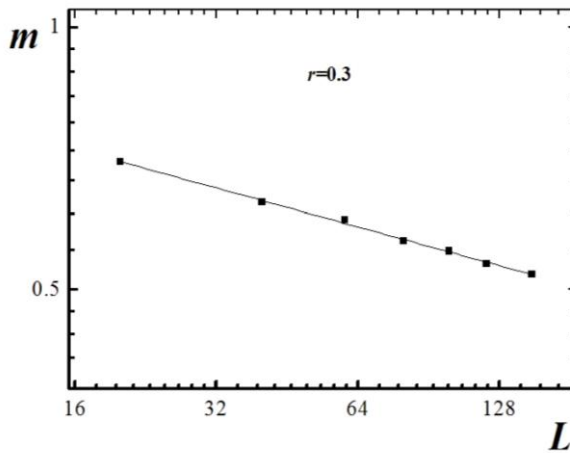


Рис.1. Зависимость параметра порядка m от линейных размеров решетки L при $T=T_C$ для линейная зависимость, все точки в пределах погрешности ложатся на прямую. Угол наклона этой прямой определяет значения β/ν . По этой схеме было определено значения восприимчивости и γ/ν и для

Физические основы микроэлектроники

теплоемкости α/ν . Имея данные по ν , вычислялись все основные статические магнитные критические индексы α , β и γ .

Эта процедура использовалась для расчета критических индексов при значениях $r=1; 0.95; 0.9; 0.8; 0.7; 0.4; 0.3; 0.2$ и 0.1 . Все значения статических критических индексов, полученные таким образом, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения критических параметров для антиферромагнитной модели Изинга на квадратной решетке

r	T_N	ν	α	β	γ	η	$\alpha+2\beta+\gamma=2$
1.0	2.081(1)	0.830(1)	0.35(1)	0.09(1)	1.45(1)	0.25(1)	1.98
0.95	1.955	0.82	0.36	0.09	1.44	0.24	1.98
0.9	1.829	0.80	0.41	0.09	1.43	0.22	2.02
0.8	1.567	0.78	0.46	0.10	1.37	0.24	2.03
0.7	1.289	0.74	0.51	0.10	1.28	0.26	1.99
0.4	0.873	1.01	0.01	0.11	1.75	0.25	1.98
0.3	1.258	0.99	0.01	0.12	1.76	0.23	2.01
0.2	1.612	0.99	0.01	0.11	1.76	0.23	1.99
0.1	1.952	1.01	0.01	0.12	1.76	0.26	2.01

Как видно из таблицы критическая температура T_N уменьшается с уменьшением величины взаимодействия вторых соседей вплоть до значения $r=0.4$. При дальнейшем уменьшении r критическая температура начинает расти. Численные значения критических индексов, приведенные в таблице, свидетельствуют, что в интервале $r 0.7 \leq r < 1.0$ все критические индексы меняются с изменением r , кроме β . В интервале $r 0.1 \leq r < 0.4$ все индексы совпадают с данными Онзагера, и не зависят от величины r .

Литература

1. Barber M.N. // J. Phys. A 1979. V.12. P. 679.
2. Landau D.P., Binder K. // Physical Review B. 1985. V.31. Article Number: 5946.
3. Plascak J.A. // Physica A. 1992. V. 183. P. 563.
4. Ising E. // Phys Z. 1925. V. 31. P. 253.
5. Landau D.P. and Binder K. // Monte Carlo Simulations in Statistical Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
6. Kassan-Ogly F.A., Filippov B.N., Murtazaev A.K., Ramazanov M.K., Badiyev M.K. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. P. 3418.
7. Nightingale M.P. // Phys. Lett. A. 1977. V. 59. P. 486.
8. Binder K. and Landau D.P. // Physical Review B. 1980. V. 21, Article Number: 1941.
9. Moran-Lopez J.L., Aguilera-Granja F., Sanchez J.M. // Physical Review B. 1993. V. 48. Article Number: 3519.
10. Kalz A., Honecker A. // Physical Review B. 2012. V. 86. Article Number: 134410.
11. Jin S., Sen A. and Sandvik A.W. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108 Article Number: 045702.
12. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиёв М.К. // ФНТ. 2011. Т. 37, С. 1258.
13. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиёв М.К. // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, С. 1152.
14. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиёв М.К. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78, С. 455.
15. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиёв М.К. // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1557.
16. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиёв М.К. // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 1004.

17. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиев М.К. // ФНТ. 2009. Т. 35. С. 663.
18. Mitsutake A., Sugita Y., Okamoto Y. // Biopolymers (Peptide Science) 2001. V. 60. P. 96.
19. Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиев М.К. // ЖЭТФ. 2012. Т. 142. С. 338.

THE CRITICAL PROPERTIES OF ANTIFERROMAGNETIC ISING MODEL IN SQUARE LATTICE WITH ACCOUNT OF INTERACTIONS OF SECOND NEAREST NEIGHBORS

A. K. Murtazaev^{1,2}, M. K. Ramazanov¹, M. K. Badiev¹

¹ H. I. Amirhanov Institute of physics of Dagestan Scientific Center of RAS

² Dagestan State University

The critical properties of two-dimensional antiferromagnetic Ising model in square lattice are investigated using the replica Monte-Carlo method with account of interactions of second nearest neighbors. Static critical exponents of the heat capacity α , susceptibility γ , magnetization β , and correlation radius ν are calculated for this model using the finite-size scaling theory.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДАМИ ЯКР И ЯМР В ЛОКАЛЬНОМ ПОЛЕ

к. ф.-м. н. Погорельцев А.И., к. ф.-м. н. Гавриленко А.Н.,
д. ф.-м. н. Матухин В.Л., к. ф.-м. н. Шмидт Е.В.

Казанский государственный энергетический университет

1. Введение

В состав многих полупроводниковых соединений входят атомы, имеющие квадрупольные ядра, т.е. ядра со спином $I > 1/2$ (Cu, In, Ga, Al, As). В таких соединениях возможно существование ядерных квадрупольных взаимодействий (ЯКВ). Исследования полупроводниковых соединений с помощью магнитного резонанса в этом случае имеют целый ряд особенностей, связанных с использованием двух основных методов: метода ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) и метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) квадрупольных ядер. Однако в отличие от широко известных методов ЯМР и ЭПР, методы ЯКР и ЯМР в локальном поле лишь в последние годы начинают активно использоваться в изучении физико-химических свойств полупроводниковых соединений. Параметры ЯКВ, характеризующие пространственную конфигурацию электрического внутрикристаллического поля вокруг резонансных ядер, отличаются чрезвычайной чувствительностью к электронному распределению, особенностям дефектной структуры соединений и динамическим характеристикам. Среди физических методов исследования ядерных квадрупольных взаимодействий указанные методы занимают особое место, поскольку являются прямыми и наиболее точными методами измерения параметров ЯКВ и не требуют приложения внешних магнитных полей. В предлагаемом сообщении обобщены основные результаты по применению методов ЯКР и ЯМР в локальном поле в изучении перспективных полупроводниковых соединений.

2. Ядерные квадрупольные взаимодействия и ЯКР

Ядерные квадрупольные взаимодействия представляют собой взаимодействия электрических квадрупольных моментов ядер eQ с градиентами электрических полей (ГЭП) в месте расположения квадрупольных ядре q , создаваемых зарядовым распределением в кристалле. Гамильтониан ядерного квадрупольного взаимодействия может быть записан следующим образом [1]

$$\hat{H}_Q = (eQ/2I(I-1)) \sum_{\alpha} V_{\alpha\alpha} I_{\alpha}^2,$$

где $V_{\alpha\alpha}$ - вторые производные электрического потенциала (тензор ГЭП) в системе главных осей $\alpha = X, Y, Z$. Три квадрупольные частоты

$$\nu_{\alpha} = 3eQV_{\alpha\alpha}/2I(2I-1)h$$

связаны уравнением Лапласа

$$\sum_{\alpha} V_{\alpha\alpha} = \sum_{\alpha} \nu = 0$$

Поэтому для характеристики ядерных квадрупольных взаимодействий используют два параметра-квадрупольную частоту $\nu_Q = \nu_Z$, соответствующую наибольшей компоненте тензора ГЭП V_{ZZ} , и параметр

Физические основы микроэлектроники

асимметрии $\eta = (V_{XX} - V_{YY}) / V_{ZZ}$ (где главные компонентф тензора ГЭП: $V_{ZZ} \geq |V_{YY}| \geq |V_{XX}|$). Часто для характеристики ядерных квадрупольных взаимодействий используют величину, называемую константой ядерных квадрупольных взаимодействий Q_{CC} (Quadrupole coupling constant):

$$Q_{CC} = e^2 Qq / h = (1/3) 2I(2I-1) \nu_Q,$$

где градиент электрического поля $eq = V_{ZZ}$. Параметры ядерных квадрупольных взаимодействий: Q_{CC} и η полностью описывают в системе главных осей тензор ГЭП в месте расположения резонансных ядер.

Особенности спектров ЯМР квадрупольных ядер в кристаллах существенным образом зависят от соотношения величины ядерных квадрупольных взаимодействий и зеемановского взаимодействия - ν_0 / ν_Q ($\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \gamma B_0$, γ - гиромагнитное отношение). Наше рассмотрение начнем со случая нулевого внешнего магнитного поля. Эта область радиоспектроскопии известна как ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР).

Эффект ЯКР заключается в резонансном поглощении электромагнитной энергии в кристаллах, обусловленном переходами между энергетическими уровнями, образующимися в результате взаимодействия электрического квадрупольного момента ядра с ГЭП в месте расположения ядра. Спектры ЯКР были впервые получены Г. Демельтом и Г. Крюгером в 1950 г. [2], а первый обзор по теории и технике ЯКР был опубликован Т. Дасом и Е. Ханом в 1958 г. [3].

3. Спектры ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ в полупроводниковом соединении CuAlO_2

Спектр ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ в образце полупроводникового соединения CuAlO_2 при комнатной температуре представлен на рисунке 1 [4]. Он состоит из двух линий, отнесенных к сигналам ЯКР от двух изотопов меди ^{63}Cu и ^{65}Cu , с разной естественной распространенностью ($^{65}\text{NA}/^{63}\text{NA} = 0,45$). Ядерные спины обоих изотопов меди одинаковы ($I = 3/2$), но гиромагнитные отношения γ_N и квадрупольные моменты Q различны: $\gamma_N = 7,11 \cdot 10^7$ и $7,60 \cdot 10^7$ рад \cdot с $^{-1}$ Гл $^{-1}$, а $Q = -22 \cdot 10^{-30}$ и $-20,4 \cdot 10^{-30}$ м 2 для ^{63}Cu и ^{65}Cu , соответственно [5]. Выяснилось, что отношение резонансных частот изотопов меди (ν_Q) равно отношению их ядерных квадрупольных моментов: $^{63}\nu_Q / ^{65}\nu_Q = ^{63}Q / ^{65}Q = 1,08$. Измеренный спектр ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ имеет достаточно простую структуру, состоящую из двух линий и соответствует единственной кристаллографической позиции атомов меди в кристаллической структуре соединения CuAlO_2 , которая относится к кристаллической структуре минерала делафоссита (CuFeO_2).

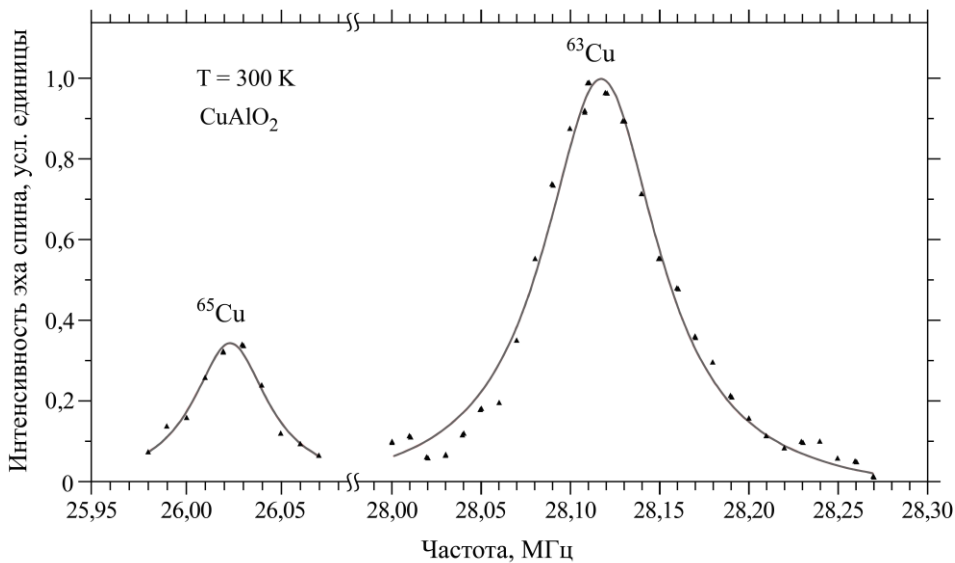


Рис. 1. Спектр ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ делафоссита CuAlO_2

Полученные значения параметров ядерных квадрупольных взаимодействий оказались равными: $\nu_Q = 28,12$ МГц, $\eta \sim 0$, $Q_{CC} = 2\nu_Q = 56,24$ МГц. Оценочные расчеты градиентов электрического поля на ядрах меди сделаны *ab initio* методами с использованием кластерного подхода с “опорой” на экспериментально полученные квадрупольные параметры. С учетом корреляционных эффектов выполнены расчеты в рамках приближения *теории функционала плотности* (DFT) с использованием различных корреляционных функционалов (VWN1RPA, VWN5, PW91LDA, CPW91, B3LYP1). Для каждого функционала проводились расчеты с вариацией заряда кластера и отбирался кластер с наилучшим соответствием экспериментальным данным (ν_Q и η). Использование функционала VWN1RPA позволило получить наилучшее согласие для кластера $\text{Cu}_7\text{Al}_6\text{O}_{14}^{-1}$. При этом рассчитанные величины квадрупольных параметров $\nu_Q \sim 28,12$ МГц и $\eta \sim 0$ (10^{-4}), а также значение щели LUMO – НОМО

($\Delta \sim 3,33$ эВ) максимально соответствуют экспериментальным данным. Построенные для кластера $\text{Cu}_7\text{Al}_6\text{O}_{14}^{-1}$ карты распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра меди проявили заметные различия в распределении электронной плотности для “металлической” плоскости и плоскости связи Cu-O-Al, которые позволяют предположить пространственную анизотропию распределения электронной плотности (аксиальная симметрия тензора градиента электрического поля), что в свою очередь может привести к анизотропии проводимости. Выполненный в рамках теории Р. Бейдера анализ особенностей распределения электронной плотности $\rho(r)$ привел к заключению, что в делафоссите атомы меди связаны с соседними атомами благодаря концентрации электронной плотности внутри бассейна каждого атома и не относятся к типу чисто ковалентных [4].

4. ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в полупроводниковых соединениях со структурой халькопирита

Проведенные исследования резонансных спектров в полупроводниковых соединениях халькопирите CuFeS_2 и кубаните CuFe_2S_3 на ядрах $^{63,65}\text{Cu}$ [6] обнаружили их сложную структуру (рис. 2).

Анализ спектров позволил предположить, что наблюдаемые спектры являются спектрами ЯМР во внутреннем магнитном поле. Величины квадрупольной частоты ν_Q и параметра асимметрии тензора градиента электрического поля η были получены методом численного моделирования наблюдаемых спектров (кубанит: $\nu_Q \approx 7,3$ МГц, $\eta \approx 0,82$, халькопирит: $\nu_Q \approx 1,29$ МГц, $\eta \approx 0,34$).

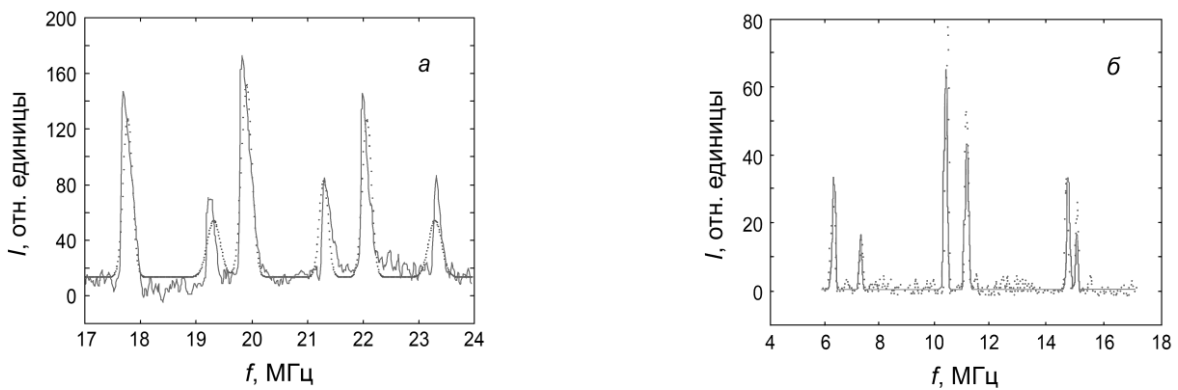


Рис. 2. Спектры ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в халькопирите CuFeS_2 (а: сплошная линия – эксперимент, прерывистая линия – численное моделирование) и кубаните CuFe_2S_3 (б: точки – эксперимент, сплошная линия – численное моделирование) при 77 К

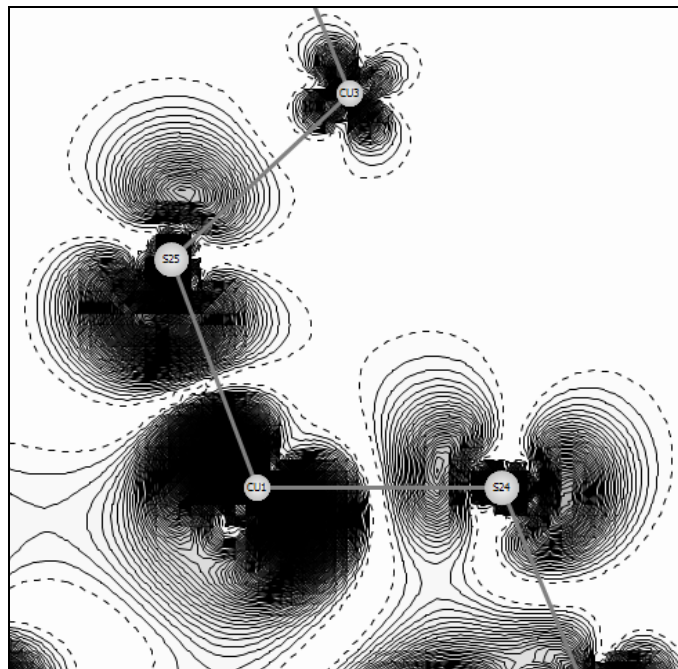


Рис. 3. Распределение спиновой плотности в области Cu1 в плоскости S24-Cu1-S25 для кубанита CuFe_2S_3

Физические основы микроэлектроники

Для расчетов электронной структуры и построения карт распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра развита методика *ab initio*, основанная на кластерном подходе с использованием квадрупольных параметров ν_Q и η , вычисленных из анализа экспериментальных спектров, что необходимо при установлении природы химической связи и расчете физико-химических свойств исследуемых веществ [7].

На рисунке 3 приведена карта распределения спиновой плотности в области квадрупольного ядра меди Cu1 в плоскости S24-Cu1-S25, рассчитанная для кластера $\text{Cu}_7\text{Fe}_{14}\text{S}_{29}^{10}$ (кластер из 50 атомов радиусом $R \sim 6 \text{ \AA}$, заряд кластера $n = 10$). Видно, что спиновая плотность, как и электронная плотность, локализуется в бассейнах своих атомов.

Анализ в рамках теории Р. Бейдера, включающий построение карт распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра меди, показал, что как в халькопирите CuFeS_2 [8], так и в кубаните CuFe_2S_3 [9] электронная плотность максимальна внутри бассейна каждого атома, что указывает, что связь атомов меди с атомами серы не является ковалентной, а образуется по типу взаимодействия закрытых оболочек.

Рассчитанные диаграммы энергетических уровней халькопирита CuFeS_2 и кубанита CuFe_2S_3 характеризуются относительно большой энергетической щелью, на фоне которой проявляется малая энергетическая щель LUMO–HOMO, имеющая значение $\Delta \sim 0,56 \text{ эВ}$ для кубанита CuFe_2S_3 [9] и $\Delta \sim 0,133 \text{ эВ}$ для халькопирита CuFeS_2 [8], что позволяет отнести халькопирит к полупроводникам бесщелевого типа. Показано, что наибольший вклад в сверхтонкие взаимодействия кубанита CuFe_2S_3 вносит контактное ферми-взаимодействие.

5. Заключение

В результате применения методов ЯКР и ЯМР в локальном поле для изучения полупроводниковых соединений халькопирита CuFeS_2 , кубанита CuFe_2S_3 и соединения CuAlO_2 со структурой дельтафосфита были получены параметры ЯКВ ядер меди в их составе. В рамках приближения теории функционала плотности рассчитаны распределения электронной и спиновой плотностей вокруг их ядер, установлена природа химической связи в этих соединениях, оценен вклад различных составляющих в сверхтонкие взаимодействия, рассчитаны их физико-химические свойства.

Литература

1. A. Abragam, The Principles of Nuclear Magnetism. Oxford: Oxford University Press, 1961.
2. H. G. Dehmelt, H. Kruger, Naturwiss. 37, 111 – 112 (1950).
3. T. P. Das, E. L. Hahn. Solid State Supplement 1: Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy. - N.Y., Academic Press, 1958.
4. А. И. Погорельцев, С. В. Шмидт, А. Н. Гавриленко, Д. А. Шульгин, Б. В. Корзун, В. Л. Матухин, "Особенности распределения электронной плотности в дельтафосфите CuAlO_2 ". Журн. прикл. спектр., 82, № 3, 411 – 416 (2015).
5. P. Ruukkö. Mol. Phys., 99, 1617 – 1629 (2001).
6. А. И. Погорельцев, В. Л. Матухин, С. П. Невзоров. "Особенности электронной структуры кубанита по данным ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ ". Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Т.17, 178 – 182 (2004).
7. Н. Н. Сирота, Физико-химическая природа фаз переменного состава. Минск: Наука и техника, 1970. 244 с.
8. А. И. Погорельцев, А. Н. Гавриленко, В. Л. Матухин, Б. В. Корзун, Е. В. Шмидт. Журн. прикл. спектр., 80, № 3, 362 – 367 (2013).
9. А. И. Погорельцев, В. Л. Матухин, Б. В. Корзун, А. Н. Гавриленко. Бутлеровские сообщения. Т.35. №8., 126 – 132 (2013).

Автор для связи: к. ф.-м. н. Гавриленко Андрей Николаевич, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: ang_2000@mail.ru

RESEARCH OF SEMICONDUCTOR COMPOUNDS BY NMR IN THE LOCAL FIELD AND NQR METHODS

A. I. Pogoreltsev, A. N. Gavrilenko, V. L. Matukhin, E. V. Schmidt

Kazan State Power University

Parameters of nuclear quadrupole interactions of copper nucleus as a part of semiconductor compounds chalcopyrite CuFeS_2 , cubanite CuFe_2S_3 and delafossite structure compound CuAlO_2 have been determined experimentally. NMR in a local field and NQR methods were applied to research of these compounds. Calculations of the electron density distribution and spin density distribution round their nucleus have been

carried out in the framework of the density functional theory, and the chemical bond nature in these compounds has been determined, the contribution of various components to hyperfine interactions has been evaluated, their physicochemical properties have been calculated.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННОСТОЙКОЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ

член-корр. НАНБ Рогачев А.В.¹, к.ф.-м.н. Колос В.В.², д. т. н. Турцевич А.С.³,
к. ф.-м. н. Гайшун В.Е.¹, к. ф.-м. н. Семченко А.В.¹, Сидский В.В.¹

¹Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины

²ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ»

³Министерство промышленности Республики Беларусь

Золь-гель методом возможно синтезировать SBT-плёнки для последующего изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью, использования в качестве материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств, сегнетоэлементов в счетно-вычислительной технике, в качестве ячеек памяти в устройствах энергонезависимой памяти и т.д. Физические и структурные свойства покрытий существенно зависят от состояния ее поверхности, стехиометрии, плотности, микроструктуры и кристаллографической ориентации. Эти свойства покрытий, в первую очередь, зависят от технологии получения пленки. Проблема усложняется также необходимостью высокотемпературного нагрева (600 - 1000°C) для кристаллизации пленок, при наличии в их составе химически активных и летучих компонентов (например, висмута).

Свежеприготовленный раствор (золь), как правило, недостаточно чист вследствие неизбежного загрязнения исходных препаратов нерастворимыми примесями, которые могут быть мелкодисперсными и обуславливать общую мутность золя. Для получения чистого золя нерастворимые примеси удаляют центрифугированием, процеживанием или фильтрованием через плотную фильтровальную бумагу. Очистку золя от случайных технологических примесей и частиц, проводили в два этапа:

- 1 центрифугирования золя при 2500 об/мин в течение 20 минут;
- 2 фильтрования золя через плотную фильтровальную бумагу.

После фильтрования проводится контроль чистоты золя. Это осуществляется путем легкого встряхивания и просматривания укупоренного флакона с раствором в прямом и отраженном свете. В случае обнаружения взвешенных частиц золь фильтруют повторно.

Для созревания золя его выдерживают при температуре окружающей среды (22 – 25 °C) в течение 2 - 3 дней. По изменению вязкости в зависимости от времени созревания определяли стабильность золя и его пригодность для последующего процесса нанесения пленок.

После 25 дней, в результате прохождения необратимой химической реакции, в золе происходит процесс поликонденсации, зарождения последующий рост в золе коллоидных частиц: в результате в золе образуется осадок (пептизация) и гелеобразованием.

С течением времени в золе образуется дисперсная фаза. Которая состоит из частиц очень малых размеров, поэтому суммарная поверхность всех частиц S очень велика. В золе самопроизвольно протекают процессы, направленные на снижение поверхностной энергии ($G_s < 0$) и проявляющиеся в стремлении коллоидных частиц объединяться в более крупные частицы [1].

Как видно из таблицы 1, вязкость золя в течение двух недель практически не меняется. Полученный золь обладает устойчивой дисперсной системой, сохраняет свое состояние в течение двух недель, при температуре хранения 20 °C. Устойчивость дисперсных систем объясняется тем, что на поверхности частиц образуется заряд (причем одинакового знака у всех частиц), препятствующий их слипанию [2]. Происходит это из-за малого размера частиц в коллоидной фазе, в результате происходит уменьшение или полное исчезновение электрического заряда на поверхности частицы, являющегося в этом случае основным фактором устойчивости.

При понижении температуры на 5-10 °C, время хранения можно увеличить до одного месяца. Перед нанесением на подложку золь подогревается до комнатной температуры (20-22 °C).

Золь наносили в производственных условиях на установке SEMIX TR 6171 UD методом центрифугирования. Перед нанесением поверхность подложки подвергалась адгезионной обработке для улучшения смачиваемости поверхности нижнего электрода. В случае платинового электрода, хороший результат дает низкотемпературная обработка (около 400 °C) в атмосфере кислорода [3].

Нанесение золь-гель-композиции представляет собой многостадийный процесс. Золь наносится на пластину, вращающуюся с небольшой скоростью, до 500 об/мин так, чтобы полностью покрыть раствором поверхность пластины. После нанесения, скорость пластины увеличивается до 500-4000

Физические основы микроэлектроники

об/мин. На этом этапе скорость вращения выбирается таким образом, чтобы получить необходимую толщину и равномерность пленки [3,4]. Толщина пленки зависит как от скорости вращения, так и от вязкости раствора.

После нанесения золь пластины прошли ступенчатую термообработку 80 - 150 °С, 200 - 250 °С, 300 - 350 °С по 60 с, а затем отжиг в атмосфере кислорода при температуре 500 - 750 °С в течение двух часов и 1000 °С в течение 20 минут. В ходе термообработки происходит испарение растворителя и усиление поликонденсационных процессов, образование пространственной структуры полимера с последующим уплотнением. Однородное SBT-покрытие получается только при равномерном прогреве подложки. В качестве подложки использовали монокристаллический кремний и монокристаллический кремний с платиновым слоем. При необходимости получения толстых пленок стадии нанесения, сушки и пиролиза повторяются до достижения желаемой толщины. В результате получены одно-, двух- и трёхслойные SBT-покрытия. Синтезированные покрытия имеют высокую адгезию к поверхности подложки, высокую сплошность.

Исследования толщины полученных покрытий проводили методом сканирующей электронной микроскопии. Толщина пленок является важным параметром оказывающим влияние на сегнетоэлектрические свойства SBT-покрытий. Начиная с некоторого критического значения толщины пленки, которое зависит от температуры отжига, величина спонтанной поляризации сегнетоэлектрика начинает понижаться с уменьшением толщины пленки, что приводит к резкому снижению выхода годных пленок [5]. Уменьшение толщины пленки состава $Sr(Bi_xTa_x)O_9$ или размеров образующих ее гранул приведёт к изменению сегнетоэлектрических свойств формируемого материала, а именно: температуры Кюри, спонтанной поляризации, диэлектрической проницаемости.

В таблице 1 приведены параметры получения однослойных, двухслойных и трёхслойных SBT-плёнок, полученных золь-гель методом.

Таблица 1 – Технические параметры золь-гель методом получения SBT-плёнок

Номер образца	Параметры нанесения золя, об/мин, в течение 15 с			Количество слоёв	толщина до отжига, нм	толщина после отжига, нм	Показатель преломления
	300	500	1500				
1	300	500	1500	1	109,0	49,6	1,734
2	300	500	1500	2	179,0	63,5	1,762
3	300	500	1500	3	409,0	306,0	1,769

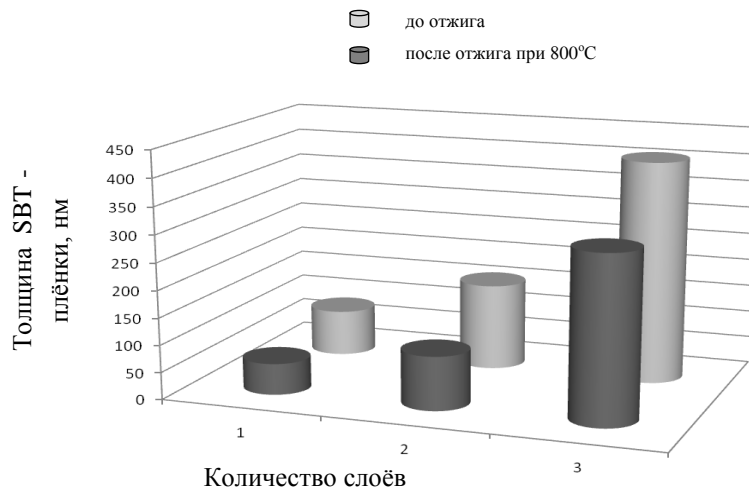


Рис. 1. Диаграмма усадки сегнетоэлектрических плёнок в зависимости от температуры отжига и количества наносимых слоёв

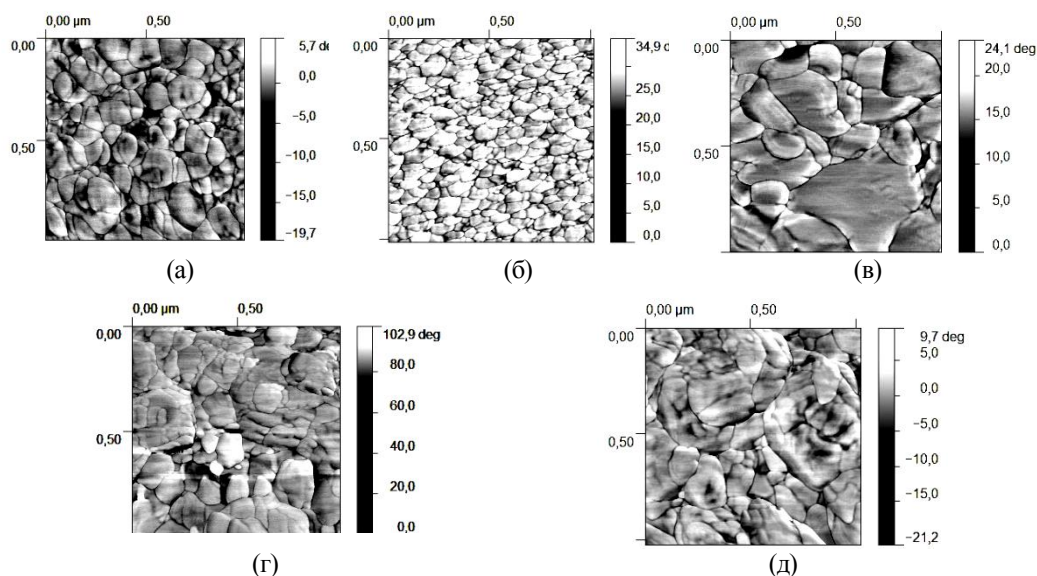
При нанесении второго слоя толщина SBT-плёнки увеличивается незначительно и составляет 63,5 нм, по сравнению с однослойной SBT-плёнкой после отжига 49,6 нм. Очевидно, причина связана с повторным растворением ранее нанесенных пленок и излишним «сбросом» материала в процессе центрифугирования. Усадка трехслойных пленок меньше, чем усадка одно- и двухслойных, что приводит к увеличению толщины до 306 нм. Этот эффект связан с заполнением пор предыдущих двух пленок, что ведет к уплотнению плёнки и уменьшению «сброса» материала в процессе центрифугирования. Усадка пленки связана с выгоранием органических примесей в SBT – плёнках. При

Физические основы микроэлектроники

повторении циклов можно добиться нужной толщины. Для наглядности построена диаграмма усадки сегнетоэлектрических плёнок (рис. 1).

Из рисунка и таблицы видно, что при увеличении температуры до 800 °С, происходит уплотнение (усадка) плёнки на 25-40 % по сравнению с плёнкой отожжённой при температуре 400 °С. Усадка трехслойных пленок меньше, чем усадка одно- и двухслойных. Усадка пленки связана с выгоранием органических примесей в SBT-плёнках. При повторении циклов можно добиться нужной толщины.

Результаты исследования структуры и сегнетоэлектрические свойства полученных образцов приведены на рисунке 2 и в таблице 2.



Sr:Bi:Ta – (а) 1,2:2,2:2,0; (б) 1,4:2,2:2,0; (в) 1:2,4:2,0; (г) 1,2:2,3:2,0; (д) 0,8:2,2:2,0

Рис. 2. АСМ – изображения SBT – плёнок, полученных золь-гель методом

Как видно из рисунка 2 и таблицы 2, увеличение размера зерна в образце 5 (116 нм) приводит к ухудшению диэлектрических свойств в слоях танталата висмута – стронция.

Таблица 2. Параметры плёнок танталата висмута – стронция, полученных золь - гель методом с использованием пентахлорида тантала с разным мольным соотношением Sr:Bi:Ta

Параметры	На основе TaCl ₅ , с мольным соотношением Sr:Bi:Ta				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
	1,4:2,2:2,0	1,2:2,2:2,0	1:2,4:2,0	1,2:2,3:2,0	0,8:2,2:2,0
Остаточная поляризация, P _{ост} , мкКл/см ²	5,9	2,3	2,4	2,4	1,6
Коэрцитивная сила E _{коэр} , кВ/см	7,2	6,3	6,9	6,5	3,3
Диэлектрическая проницаемость, ε	1280	910	1140	960	940
Температура Кюри, T _к , °С	378	330	352	338	310
Субшероховатость, Ra, нм	12	5	5	11	13
Средний размер зерна, нм	85	105	109	103	116

В результате нарушения стехиометрии плотность упаковки уменьшается, что приводит к увеличению размера зерна и ухудшению сегнетоэлектрических свойств. SBT - пленка с соотношением Sr:Bi:Ta 1,4:2,2:2,0 формируется однородной, плотной с гладкой поверхностью и с выраженной кристаллической структурой, с размером частиц порядка 80 нм. Данный сегнетоэлектрик обладал наилучшими электрофизическими свойствами в экспериментальной серии (остаточная поляризация P_{ост} = 5,9 мкКл/см², коэрцитивная сила E_{коэр} = 2,6 кВ/см).

Увеличение остаточной поляризации (P_{ост}), и коэрцитивной силы (E_{коэр}) в полученных золь-гель методом SBT – плёнках происходит при приближении стехиометрического соотношения между компонентами к расчетному, что ведёт к увеличению плотности упаковки при переходе кристаллической решётки в

структуру перовскита. Вследствие этого размер зерна уменьшаются. «Рабочим» ионом, обеспечивающим поляризационные свойства SBT-структур, является ион стронция. При снижении его содержания ниже теоретически рассчитанного значение остаточной поляризации $P_{\text{коэр}}$ резко падает, а размер частиц увеличивается до 116 нм (образец №5), что делает неэффективным использование SBT-структур данного состава в качестве конденсаторных пленок в энергонезависимой памяти. Образец, имеющий состав № 3, имеет большую по сравнению с остальными площадь петли гистерезиса, которая, как известно, равна работе, затрачиваемой на единичный цикл записи информации. Поэтому его использование в качестве элемента энергонезависимой памяти также менее эффективно, чем образцов 1, 2, 4.

Все SBT-плёнки имеют пик диэлектрической проницаемости при температуре Кюри T_k , что свидетельствует о сегнетоэлектрических переходах в парафазе. Из рисунка 3.12 видно, что все SBT-плёнки характеризуются максимальной диэлектрической проницаемостью на частоте 100 Гц. Кроме того, пики диэлектрической проницаемости для SBT – плёнки с молярным соотношением Sr:Bi:Ta 1,2:2,3:2,0 слегка расширены. Характер кривых для образца № 5 свидетельствует о нарушении фазового состава, увеличении размера частицы, приводящей к ухудшению сегнетоэлектрических свойств и снижению температуры Кюри T_k с 380 °С до 300 °С. Снижение температуры Кюри T_c является показателем уменьшения стабильности сегнетоэлектрической фазы. Расширение пиков диэлектрической проницаемости в полученных SBT – плёнках с молярным соотношением Sr:Bi:Ta 0,8:2,2:2,0 (образец №4) может быть также связано с изменением состава SBT. SBT – плёнка (образец №4) может иметь участки с нарушением фазового состава, что ведет к увеличению размера зерна. Эти данные согласуются с потерей сегнетоэлектрических свойств, выражающихся в уменьшении размера петли гистерезиса для SBT-плёнки с молярным соотношением компонентов 0,8:2,2:2,0.

Литература

1. Подденежный Е.Н., Бойко А.А. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла. – Гомель: УО «ПТУ им. П.О. Сухого», 2002. – 208 с.
2. Лекции 17-18. ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.msmsu.ru/userdata/manual/images/news/himii/L-17-18.doc> - Дата доступа: 15.10.2015.
3. Провести исследования и разработать технологию формирования сегнетоэлектрических конденсаторов: отчет по заданию 1.1.17. ГНТП «Микроэлектроника» (заключительный) / Министерство промышленности РБ. УП «Завод полупроводниковых приборов»; рук. темы В.В. Колос. - Минск, 2011. – 105 с. - № ГР 2011-5206.
4. Effect of Annealing Method to Crystalize on Sr_{0,9}Bi_{2,3}Ta_{209+a} Thin Film Properties Formed from Alkoxide Solution / Ichiro Koiwa [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 1998. - V. 37. - P. 192-197.
5. D. Morrison, Y. Luo, I. Szafraniak ed. al. Ferroelectric nanotubes Rev. Adv. Mater. Sci. – 2003. – №4 – P. 114 – 122

APPLICATION OF SOL-GEL METHOD FOR MANUFACTURING OF RADIATION RESISTIVE FERROELECTRIC CERAMIC

A. V. Rogachev¹, V. V. Kolos², A. S. Turtsevich³,
V. E. Gaishun¹, A. V. Semchenko¹, V. V. Sidsky¹

¹ Gomel State University n. a. Francisk Scorina

² JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" holding company

³ Ministry of industry of Republic of Belarus

This paper discusses the possibility of synthesis of SBT sol-gel films for use as active layers for non-volatile memory (FRAM). SrBi₂Ta₂O₉ thin films are synthesized by sol-gel method on Pt/ TiO₂/BPSG/SiO₂/Si substrates. Achieved ferroelectric parameters suggest the possibility of using synthesized SBTL sol-gel films in non-volatile memory devices.

**КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$
ДЛЯ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ ПАМЯТИ**

д.х.н. Козюхин С.А.¹, д.т.н. Шерченков А.А.², к.ф.-м.н. Чигиринский Ю.И.³,
Бабич А.В.², к.т.н. Лазаренко П.И.², д.т.н. Тимошенко С.П.², к.х.н. Бойцова О.В.¹

¹ Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

² Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

³ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время рынок энергонезависимых запоминающих устройств динамично развивается. При этом наибольшую его долю занимает флэш-память, которая находит широкое применение в относительно недорогих устройствах массового потребления: цифровых фото- и видеокамерах, мобильных телефонах, плеерах и т. д.

Однако, несмотря на высокие объемы производства, флэш-память обладает рядом недостатков. Относительно небольшое количество циклов записи и стирания (от 10^4 до 10^5) привело к тому, что потребители, интенсивно использующие данный тип запоминающих устройств, столкнулись с проблемой потери информации. Низкая скорость обработки данных существенно ограничивает возможности ее использования, например, в качестве оперативной памяти, а невысокая радиационная стойкость - в космической и военной отраслях. Наконец, к настоящему времени флэш-технология практически подошла к физическому пределу уменьшения размера ячеек памяти, что препятствует дальнейшему увеличению плотности записываемой информации.

В связи с этим в последнее время повышенный интерес вызывают работы по созданию устройств энергонезависимой памяти нового поколения. Одним из наиболее перспективных видов запоминающих устройств в настоящее время считается фазовая память, которая по ряду показателей либо уже превосходит, либо в перспективе может превзойти существующие и разрабатываемые виды памяти. Более того, она претендует на то, чтобы стать универсальной памятью, сочетающей в себе достоинства энергонезависимой и быстродействующей динамической памяти, обладающей к тому же повышенной радиационной стойкостью.

За последние несколько лет в технологии фазовой памяти достигнут заметный прогресс. Исследования в области РСМ активно ведут ряд компаний, в частности, концерны Intel, IBM, Samsung, Philips, ElpidaMemory, STMicroelectronics, Ovonyx. Компания Samsung объявила о производстве микросхем РСМ емкостью 512 Мбит для мобильных телефонах. По оценкам, переход от использования флэш-памяти типа NOR на РСМ позволит на 30 % снизить уровень энергопотребления и на 40 % – занимаемое пространство [1]. В связи с тем, что в России РСМ технология заметно отстает, актуальным является ускорение исследований и разработок, направленных на создание отечественной технологии фазовой памяти.

Однако, несмотря на успехи, электрическая фазовая память не стала широко распространенной. Связано это с тем, что совершенствование технологии затруднено наличием специфических требований к материалам фазовой памяти. Например, с одной стороны, материал должен обладать низкой температурой кристаллизации аморфной фазы для обеспечения быстрого (порядка наносекунд) переключения во время операция стирания. А с другой стороны, высокой температурой кристаллизации для обеспечения высокой стабильности аморфной фазы при комнатной температуре и, следовательно, большой длительности хранения информации (в течение не менее 10 лет). Разница в скорости кристаллизации при этом должна превышать 7 порядков.

В результате, лишь ограниченный круг материалов пригоден для устройств фазовой памяти, в частности, это халькогенидные полупроводники и наиболее перспективный среди них состав $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225).

Одна из проблем технологии фазовой памяти связана с необходимостью повышения скорости обработки данных, до уровня, сравнимого с оперативной памятью. Время записи в устройствах фазовой памяти в настоящее время оценивается в 100 нс [2], в то время как в оперативной памяти (Random Access Memory (RAM)) оно составляет ~10-50 нс [3]

Три операции могут определять скорость обработки данных в устройствах фазовой памяти: операция считывания (READ), операция записи (RESET) – это переход материала из низкоомного кристаллического в высокоомное аморфное состояние, и операция стирания (SET) – это переход из высокоомного аморфного в низкоомное кристаллическое состояние.

Время операции считывания определяется схематическими возможностями и составляет ~1-10 нс. Кинетика кристаллизации значительно, как минимум на порядок медленнее, чем формирование аморфного состояния [3]. Таким образом, именно процесс кристаллизации, т.е. операция SET, определяет достижимую скорость обработки данных в устройствах фазовой памяти. Поэтому

Физические основы микроэлектроники

исследование термических свойств материалов фазовой памяти, процесса, механизма и кинетики их кристаллизации имеет важное практическое значение для отработки технологии фазовой памяти.

В связи с вышесказанным, целью данной работы являлось изучение кинетики и механизмов кристаллизации в тонких пленках на основе материалов системы Ge-Sb-Te.

Тонкие пленки GST225 формировались с помощью вакуум-термического испарения предварительно синтезированного материала. Давление в рабочей камере во время осаждения составляло 10^{-4} Па, а температура подложки не превышала 50°C .

Структура синтезированного материала и осажденных тонких пленок исследовалась с помощью рентгенофазового анализа (РФА, D8 Advance и Rigaku). Состав тонких пленок определялся с помощью Резерфордского обратного рассеяния (РОР) и ренгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием энергодисперсионного спектрометра (растровый электронный микроскоп JOELJSM 7001F с энергодисперсионной приставкой для элементного анализа InkaOxford).

Атомно-силовая микроскопия (NT-MDTSolverPro) применялась для исследования особенностей морфологии поверхности тонких пленок.

Прямыми методами исследования процессов, сопровождающихся поглощением или выделением тепла, являются термические методы анализа, такие как термогравиметрия, дифференциальный термический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия. Они получили широкое распространение при исследовании термических свойств, механизмов и кинетики кристаллизации тонких пленок материалов фазовой памяти. При этом при исследовании механизмов и кинетики кристаллизации используют изотермические и неизотермические условия. В первом случае температура образца очень быстро повышается до заданной, при которой проводится выдержка и измерение. Во втором случае производится измерение при постоянной скорости нагрева образца. В наших исследованиях использовалась дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC-50, Shimadzu), а измерения проводились в неизотермических условиях (при 8 различных скоростях нагрева в диапазоне $5 - 90^{\circ}\text{C}/\text{мин}$).

Исследование химического состава показало, что составы осажденных слоев близки к составам испаряемых синтезированных материалов.

Согласно рентгенофазовому анализу исходный синтезированный материал представлял собой тригональную модификацию GST225. Осажденные пленки являлись аморфными. Отжиг пленок при температуре выше 150°C сопровождается кристаллизацией с образованием кубической и тригональной модификаций GST225.

На ДСК сканах исходных тонких пленок наблюдается целый ряд тепловых эффектов (рис. 1). Экзотермический пик в диапазоне $130-190^{\circ}\text{C}$ обусловлен кристаллизацией аморфной фазы, что согласуется с данными РФА.

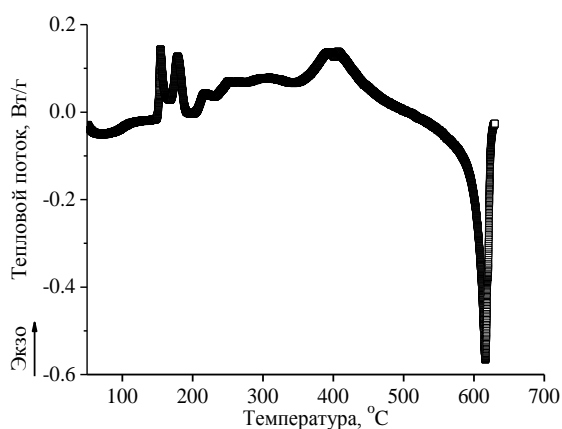


Рис. 1. ДСК исходных тонких пленок GST225

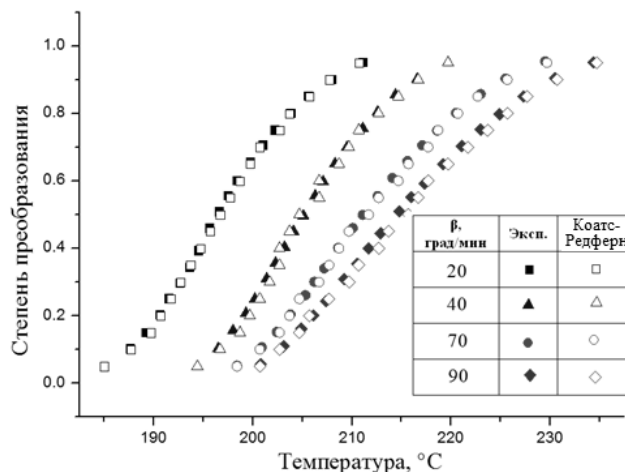


Рис. 2. Зависимости степени преобразования от температуры для тонких пленок GST225

Для исследования кинетики кристаллизации тонких пленок нами предложена методика, включающая одновременное применение изоконверсионных безмодельных и модельных методов [4]. В данном исследовании применялся безмодельный метод Озавы-Флинна-Уолла [5,6] и модельный метод Коатса – Редферна [7]. Такое совместное использование безмодельного и модельного методов позволило нам оценить энергию активации и предэкспоненциальный множитель в зависимости от степени преобразования, и найти модель реакции. Согласно полученным результатам наиболее адекватно описывают процесс кристаллизации тонких пленок GST225 модели реакций второго и третьего порядка.

По результатам ДСК измерений были найдены температурные зависимости степени преобразования (рис. 2). Все полученные кривые имеют S-образный вид, что связано с характером процесса кристаллизации. Вид кривых указывает на то, что кристаллизация GST – комплексный процесс и описывается не одной стадией [8]. Наиболее вероятно двумя стадиями – зародышеобразования и роста кристаллитов.

Начальный участок соответствует индукционному периоду. Это время, необходимое, чтобы зародыш превысил критический размер, после чего вероятность его роста становится больше вероятности диссоциации. Далее следует период ускорения, когда происходит рост зародышей. Понижение скорости начинается, когда растущие кристаллиты соприкасаются. Это обусловлено уменьшением поверхности фронта кристаллизации из-за слияния кристаллитов и поглощением потенциальных центров зародышеобразования.

На рис. 3 представлена рассчитанная по результатам ДСК измерений зависимость энергии активации кристаллизации от степени преобразования.

Как видно, энергия активации постепенно уменьшается с увеличением степени преобразования. Это согласуется с предположением о том, что общий ход процесса кристаллизации определяется двумя параллельно протекающими процессами – зародышеобразования и роста кристаллитов. При этом вклад первого процесса постепенно уменьшается, а второго увеличивается. Тогда энергия активации в начальный момент соответствует энергии активации зародышеобразования, а в конечный – роста кристаллитов.

В классической теории зародышеобразования и роста кристаллов разница между энергией активации скорости зародышеобразования и скорости роста кристаллитов соответствует энергетическому барьеру формирования зародыша критического размера [9]. Для исследованных пленок GST225 этот барьер меньше 1 эВ. Такая малая величина указывает на заметную роль гетерогенного зародышеобразования на границах разделов. Такими границами в нашем случае могут быть граница с подложкой и поверхность пленки.

Полученные значения энергии активации кристаллизации, предэкспоненциального множителя и найденная модель процесса кристаллизации далее использовались для оценки возможных времен хранения и обработки данных в ячейке фазовой памяти. Было сделано предположение, что логические «0» и «1» различаются по величине проводимости не менее чем на 1-2 порядка. Это позволило нам оценить степень преобразования α , при которой происходит переход от «0» к «1» и обратно [10]

$$\alpha = (\ln\sigma - \ln\sigma_a) / (\ln\sigma_c - \ln\sigma_a),$$

где σ , σ_a , σ_c – проводимости материала при степени преобразования α , аморфной и кристаллической фаз соответственно

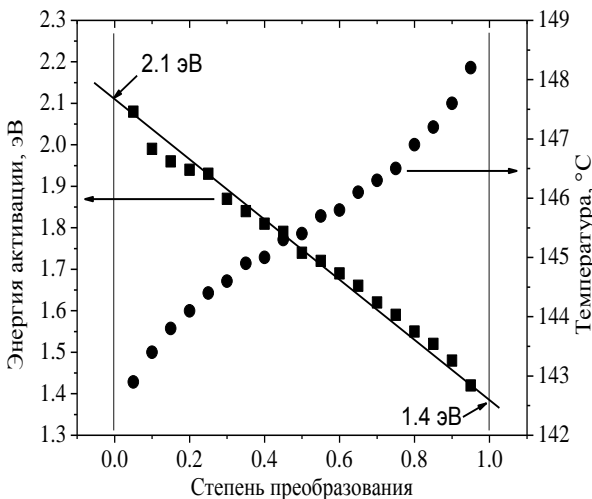


Рис. 3. Зависимость энергии активации кристаллизации от степени преобразования для тонких пленок GST225

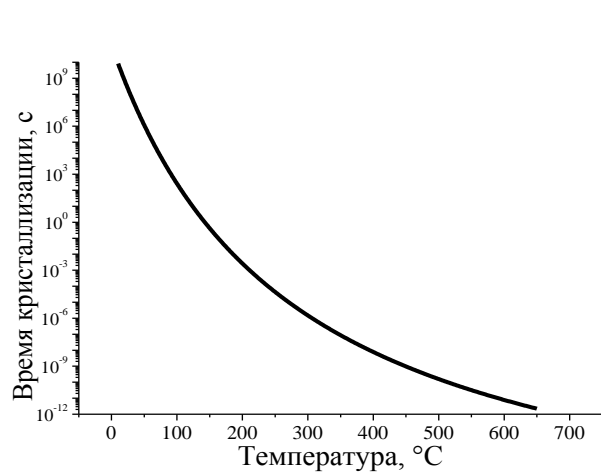


Рис. 4. Зависимость времени кристаллизации от температуры для тонких пленок GST225

Степень преобразования, при которой происходит переход между логическими «0» и «1» оказалась равной 0,45. После этого были оценены возможные времена обработки и хранения информации в РСМ ячейке как времена кристаллизации при различных температурах (рис. 4). При этом время кристаллизации рассчитывалось по формуле [11]

$$t = g(\alpha) / [A \exp(-E_a/kT)],$$

где $g(\alpha)$ – найденная модель процесса кристаллизации, A – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации кристаллизации.

Из рисунка видно, что время кристаллизации существенно уменьшается с ростом температуры кристаллизации. При температурах кристаллизации более 300 °С время операции SET становится менее 50 нс, что сопоставимо с временем обработки данных в оперативной памяти. С другой стороны, расчет времени кристаллизации при комнатной температуре, т.е. времени хранения информации, показал, что оно превышает 10 лет.

Таким образом, исследования с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии позволяют прогнозировать время хранения и обработки данных в ячейках фазовой памяти, и дают возможность оптимизировать температурный режим работы фазовой памяти.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП, проект № 14.578.21.0085, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57814X0085).

Литература

1. <http://www.EETimes.com> (22/09/2009).
2. Kryder, M.H. After hard drives – what comes next?/ M.H. Kryder, C.S. Kim. // IEEE Transactions on Magnetics.– 2009. – Vol. 45(10). – P.3406-3413.
3. Burr, G.W. Phase change memory technology. / G.W. Burr, M.J. Breitwisch, M. Franceschini, D.Garetto, et al. // Journal of Vacuum Science and Technology B. – 2010. – Vol.28(2). – P. 223-262.
4. Sherchenkov, A. Estimation of kinetic parameters for the phasechange memory materials by DSC measurements. / A. Sherchenkov, S. Kozyukhin, A. Babich. // J. Therm. Anal. Calorim.– 2014. – Vol.117(3). – P. 1509-1516.
5. Flynn, J.H. A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data. / J.H. Flynn, L.A. Wall. // Polym. Lett.– 1966. – Vol. 4. – P. 323–328.
6. Ozawa, T. A new method of analyzing thermogravimetric data. / T. Ozawa. // Bull. Chem. Soc. Jpn. – 1965. – Vol. 38(11). – P. 1881–1886.
7. Coats, A.W. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data. / A.W. Coats, J.P. Redfern. // Nature.– 1964. – Vol. 201. – P.68-69.
8. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. - М.: Химия, 1978. 360 с.
9. Privitera, S. Crystal nucleation and growth processes in Ge₂Sb₂Te₅. / S. Privitera, C. Bongiorno, E. Rimini, R. Zonca. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84. - N 22. – P. 4448-4450.
10. Mehta, N. Studies of crystallization kinetics in a-Se_{80-x}Te₂₀Cd_x and a-Se_{80-x}Te₂₀Ge_x alloys using D.C. conductivity measurements. / N. Mehta, A. Kumar // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2006. – Vol. 83. – P. 669-673.
11. Abu El-Oyoun, M. An investigation of the kinetic transformation mechanism of Ge_{12.5}Te_{87.5} chalcogenide glass under non-isothermal regime. / M. Abu El-Oyoun. // Journal of Non-Crystalline solids. - 2011. – Vol. 357. – P. 1729-1735.

KINETICS OF CRYSTALLIZATION OF THIN FILMS Ge₂Sb₂Te₅ FOR PHASE MEMORY DEVICES

S. A. Kozyukhin¹, A. A. Sherchenkov², Yu. I. Chigirinsky³,
A. A. Babich², P. I. Lazarenko², S. P. Timoshenkov², O. V. Boitsova¹

¹ N.S. Kurnakov Institute of general and inorganic chemistry of RAS

² National Research University of Electronic Technology

³ Research Institute for Physics and Technology of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Currently active investigations of phase change memory (PCM) are carried out. One of the problems of the PCM technology is connected with the necessity of decreasing the data processing time to the level comparable with that of the Random Access Memory. Crystallization process determines the data processing rate of the PCM cell which strongly motivates investigation of the mechanism and kinetics of crystallization. The main purpose of this study was to investigate the thermal properties, mechanism and kinetics of crystallization for GST225 thin films. The model of GST film crystallization is proposed which indicates that crystallization of GST225 film is a complex process consisting of two parallel processes – nucleation and crystalline growth. Determined kinetic triplet was used for the estimation of possible data processing and storage times of the PCM cell. It was found that GST225 films can provide the data processing time of the PCM cell about nanoseconds.

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕВЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

к.ф.-м.н. Попов Е.О., к.ф.-м.н. Колосько А.Г.,
Филиппов С.В., Романов П.А., Федичкин И.Л.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Введение

Открытие в начале двадцатого века квантового эффекта полевой эмиссии (вылет электронов из веществ под воздействием электрических полей высокой напряжённости) позволил разработать ряд опытных энергосберегающих устройств (дисплеи высокого быстродействия, рентгеновские трубки, клистроны, лампы бегущей волны, терагерцовые усилители и т.д.) [1]. Однако до сих пор заменить энергетически невыгодные термокатоды на автокатоды (полевые эмиттеры) в электронике не удаётся. Проблема связана с тем, что достижение необходимого уровня эмиссионного тока на остриях автокатодов зачастую приводит к их взрывному разрушению [2].

Разрушающее воздействие токовой нагрузки можно существенно уменьшить, распределив её по разным, отстоящим друг от друга эмиссионным центрам, поэтому одним из направлений современной науки является разработка многоострижных полевых систем (т.н. эмиттеры большой площади). Основными задачами этого направления являются понижение пороговых напряжений эмиссии и увеличение стабильности работы катода. Решению этих задач противостоит ряд малоизученных явлений: характер взаимной экранировки неориентированных эмитирующих острий, влияние адсорбционно-десорбционных процессов, локальный термический разогрев эмитирующих центров и т.д. Изучение физических механизмов работы автокатодов должно открыть дорогу к их технологическому совершенствованию и внедрению в современную электронику.

Основным инструментом исследования свойств материалов, перспективных для создания полевых катодов, на сегодняшний день является запись и обработка вольтамперных характеристик (ВАХ). На Рис.1а показана типичная ВАХ нанокompозитного эмиттера на основе полимера и многостенных углеродных нанотрубок, записанная в режиме сканирования высоким напряжением [3]. Основными методами обработки эмиссионных характеристик являются ВАХ, ВАХ переведённая в полулогарифмические координаты Фаулера-Нордгейма (ФН-ВАХ, см. Рис.1б) и SK-диаграмма, построенная на основании коэффициентов линейной аппроксимации ФН-ВАХ (Рис.1в).

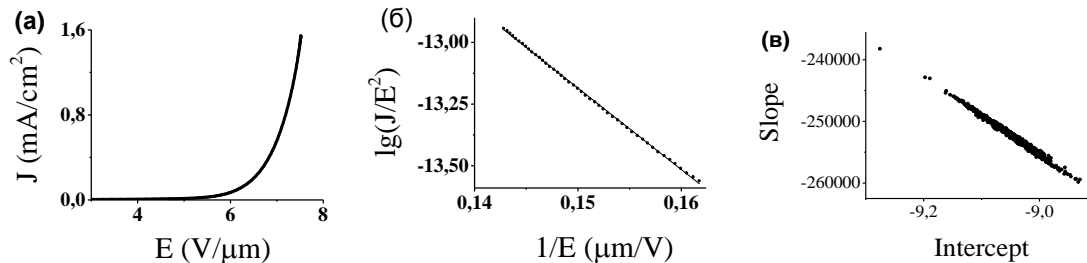


Рис. 1. Запись и обработка вольтамперных характеристик нанокompозитного эмиттера: а) исходная ВАХ; б) ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма; в) диаграмма наклон-отсечка (SK-диаграмма)

Дополнительную сложность при изучении эмиссионных свойств автокатодов представляет их временная нестабильность, связанная с изменением самого эмиттера, а также его окружающей среды. В данном контексте вместе с регистрацией уровней тока и напряжения необходима одновременная регистрация давления остаточной атмосферы в рабочей камере и температуры катода. Особый интерес представляет также регистрация сопутствующих явлений, таких как излучение эмиттера в различных диапазонах длин волн, перераспределение токовой нагрузки по поверхности эмиттера, десорбция с поверхности электродов различных веществ и т.д. Применение многоканальных систем записи экспериментальной информации в ходе полевого эксперимента должно открыть дополнительные возможности изучения автокатодов.

Методика комплексного исследования полевых нанокompозитных эмиттеров

С 1998 года в Физико-техническом институте им.А.Ф. Иоффе РАН разрабатывается методика изучения свойств многоострижных полевых эмиттеров [4,5]. В настоящий момент она включает в себя: регистрацию ВАХ, онлайн обработку полученных данных на основании закона Фаулера-Нордгейма,

Физические основы микроэлектроники

вывод статистического распределения эмиссионных центров, получение и обработку данных с масс-спектрометра. Данная методика позволяет эффективно изучать различные автоэмиссионные процессы в реальном времени и проверять теоретические модели, а также получать косвенную информацию о свойствах эмиттера, посредством регистрации сопутствующих физических явлений: нагрев электродов, десорбция и адсорбция газов на поверхности электродов, образование на аноде вторичных наноструктур, деградация эмиссионной поверхности катода и т.д.

Для получения ВАХ полевого эмиттера использовалось высокое напряжение синусоидальной формы с частотой питающей сети (50 Гц), так что каждый период напряжения давал один график (так называемый "быстрый режим"). В "медленном" режиме используется блок питания FID Technology (Санкт-Петербург, Гжатская улица, 27). Скорость изменения напряжения задаётся программным способом с помощью компьютерной платы, содержащей ЦАП. Сравнение двух режимов питания можно найти в работе [6]. На Рис.2 приведены некоторые блок-схемы измерительного комплекса.

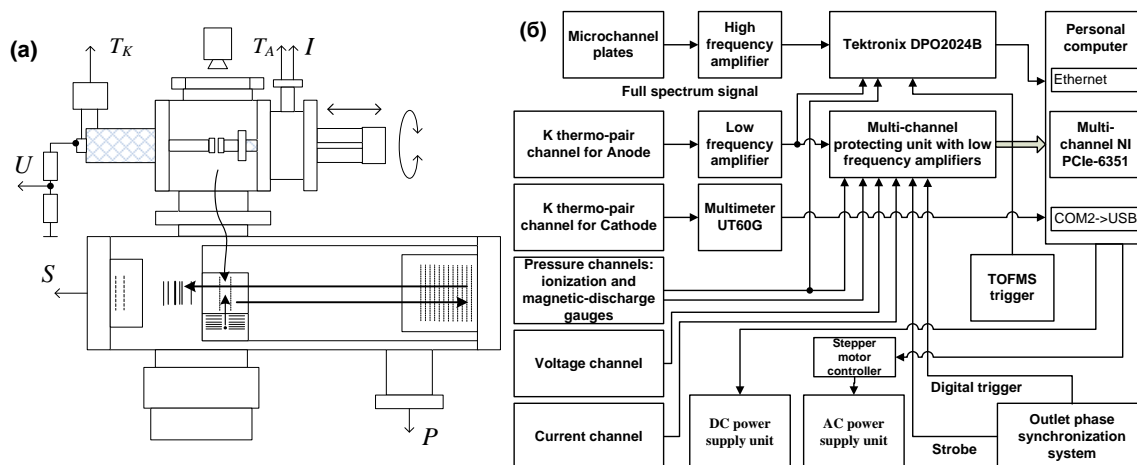


Рис. 2. Блок-схемы измерительного комплекса: камера для исследования полевых эмиссионных свойств и масс-спектрометр отражательного типа (а), многоканальная методика сбора данных (б)

Для записи и обработки экспериментальных данных используется специальная программа, написанная нами на базе платформы LabView 2013. Программа включает в себя два независимых, но синхронно работающих модуля: модуль записи и обработки ВАХ (здесь также регистрируются температура катода и уровень вакуума) и модуль обработки масс-спектрометрических данных.

На Рис.3 представлены некоторые окна программного интерфейса для онлайн управления и обработки данных эмиссионного эксперимента.

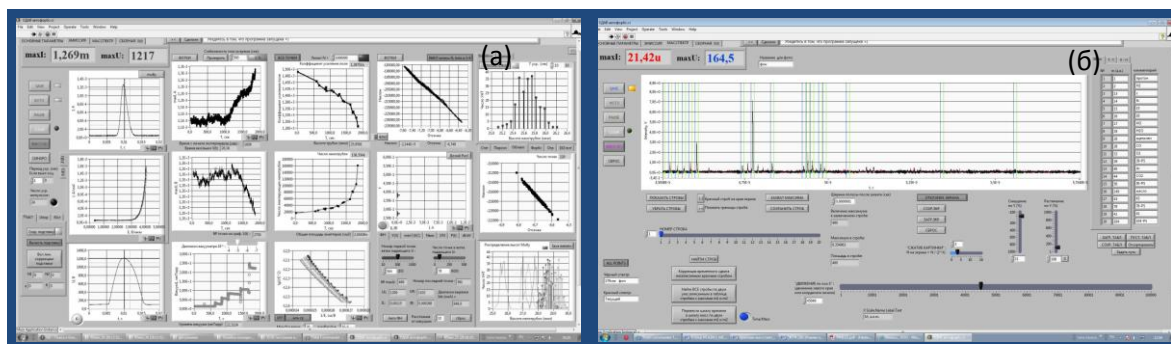


Рис. 3. Пример программного интерфейса онлайн управления экспериментом: окно для наблюдения и обработки ВАХ (а) и окно настройки стробов масс-спектрометрических данных (б)

Примеры применения методики

Большинство эмиттеров исследованных с помощью вышеуказанной методики были созданы на основе нанокompозитов полимер / углеродные нанотрубки (метод создания образцов подробно описан нами в [7]). Использование нанокompозиционных материалов в качестве эмиссионной поверхности является очень перспективным. Концы выступающих над поверхностью нанокompозита нанотрубок представляют собой наноострия, которые фокусируют на себе силовые линии электрического поля, создавая тем самым условия для возникновения туннельного автоэмиссионного тока. Углеродные нанотрубки как наполнитель обладают высокими эмиссионными характеристиками, химической

стойкостью и простотой получения, что выгодно отличает их от других материалов. Полимер же способствует лучшей адгезии нанотрубок к металлической подложке.

Научно-исследовательские возможности разработанного стенда можно условно разделить на несколько направлений:

1. Регистрация ВАХ эмиттера в быстром режиме.
2. Получение временных зависимостей тока и напряжения.
3. Визуализация эмиссионного процесса.
4. Изучение эмиттера в переменном режиме.
5. Регистрация ВАХ эмиттера в медленном режиме.
6. Получение микроскопических параметров методом онлайн обработки.
7. Получение статистических распределений эмиссионных наночентров.
8. Проверка нормальности полученного распределения наночентров по эффективным высотам.
9. Регистрация эмиссионных свойств вторичных наноструктур на аноде.
10. Регистрация уровня вакуума и парциальных давлений летучих продуктов.
11. Изучение кинетики летучих продуктов в рабочем объёме.
12. Проверка соответствия измеряемых ВАХ классической теории методом онлайн обработки.

В ходе эксперимента автоматически строятся зависимости ВАХ, а также временные зависимости следующих величин: уровня вакуума – $P(t)$ (см. Рис.4), амплитуд напряжения и тока – $U_{max}(t)$, $I_{max}(t)$. Программный интерфейс также позволяет наблюдать в реальном времени формы импульсов $U(t)$ и $I(t)$, ВАХ в стандартных координатах – $I(U)$, в координатах Фаулера-Нордгейма, в координатах наклон-отсечка, зависимость плотности тока от значения приложенного электрического поля - $J(E)$ (например, см. Рис.1а, б).

На основании данных ФН-ВАХ считается коэффициент усиления электрического поля в области острий – $\beta(t)$ (Рис.4а), эффективная высота эмитирующих нанотрубок – $h(t)$, их общего числа – $N(t)$. Для расчета эффективной высоты эмитирующих нанотрубок используется выражение $h \approx \beta r$, где r – радиус нанотрубки. Полученный за определенный промежуток времени массив эффективных высот h подвергается статистической обработке и строится его гистограмма. Это позволяет оценить распределение эмиссионных центров на поверхности катода и проследить его эволюцию при изменении макроскопических параметров эксперимента. На рисунке 4б представлены результаты статистических расчетов [8].

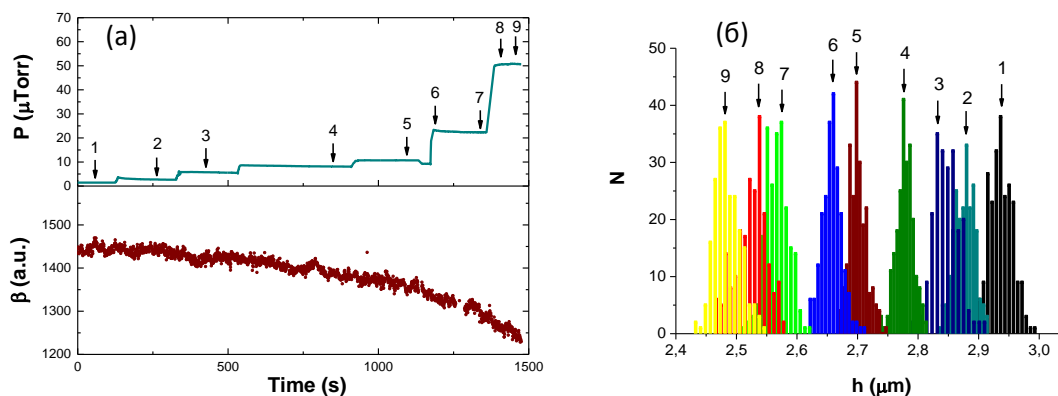


Рис.4. Зависимость параметров эмиттера от уровня вакуума: изменение коэффициента усиления поля (а), гистограммы распределения эффективных высот (б)

Созданная нами методика позволяет производить запись спектра летучих веществ, образующих в процессе автоэмиссии (Рис.5). Наблюдая за интенсивностью пиков в масс-спектре и за зависимостью вакуума от времени, можно получить ответы, необходимые для разрешения проблем, связанных с работой многоострийных наноконпозиционных автокатодов. Для оцифровки и записи масс-спектров использовался скоростной осциллограф DPO2024В.

Изучалась работа эмиттера при высоких токах эмиссии (порядка 10 mA). Парциальные давления в рабочей камере демонстрируют достаточно сложную картину (см. Рис.5). Сравнение с каталогом масс-спектров пиков с массой 104 (стирола) и 26 (ацетилена) показало, что основными летучими продуктами являются составляющие полимера, появившиеся вследствие его деструкции (а затем диссоциированные электронным ударом 70-150 eV ионного источника в масс-спектрометре). Причём деструкция происходит либо в момент увеличения тока, либо вследствие вакуумных разрядов, вызванных мгновенным перегревом эмитирующих наночентров [9]. Удалось выяснить, что стабильность катодной системы значительно повышается при замене анода на новый. Это объясняется образованием на

противоположном электроде структур (вискеров), которые искажают силовые линии и приводят к пробое между электродами. Несмотря на то, что анод был отполирован и проходил ультразвуковую очистку в ацетоне, масс-спектр показал, что в условиях электронно-стимулированной десорбции наблюдается испускание этана, а затем и аммиака с небольшой задержкой (см. Рис.5б).

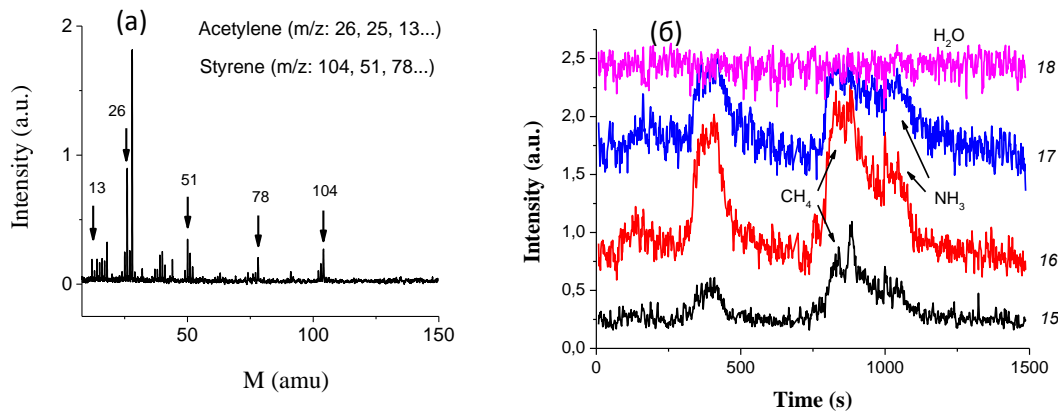


Рис.5. Мгновенный спектр летучих продуктов при работе нанокompозитного эмиттера (а), кинетика выбранных масс-спектрометрических пиков при больших токах эмиссии (б)

Выводы

Мы создали уникальный инструмент для исследования полевых и термических свойств многоострижных полевых эмиттеров, в том числе перспективных нанокompозитных эмиттеров. Измерительный комплекс позволяет записывать ВАХ эмиттера, получать из ВАХ различные микроскопические эмиссионные параметры в онлайн режиме и регистрировать летучие продукты, выделяющиеся с поверхности эмиттера.

Используемая в работе многоканальная методика компьютеризированной регистрации и онлайн обработки вольтамперных характеристик, а также масс-спектрометрических данных позволила провести ряд экспериментов, направленных на изучение базовых свойств многоострижных полевых эмиттеров.

Литература

1. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: "Интеллект", 2011. 704 с.
2. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия. СПб: Лань, 2012. 322 с.
3. Kolosko A.G., Popov E.O., Filippov S.V., Romanov P.A. Statistical dispersion of nanocomposite emission parameters. JVSTB, 33, 2015, p. 03C104-1.
4. Коровин О.П., Попов Е.О., Шредник В.Н., Каратецкий С.С. Многоострижный жидкометаллический автоэлектронный эмиттер. Письма в ЖТФ, т. 25 (8), 1999, с. 39.
5. Popov E.O., Popov S.O., Korovin O.P. The software for field emission investigation. ICCP5, Kanazawa, Japan, 1999, p. 1-04.
6. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Fedichkin I.L. Comparison of the data about thin IVC structure of multi-tip field emitters using a high voltage scanning method in different power supply mode and the data of the mass spectrometer analysis. IVNC, Guangzhou, China, 2015, p. 18.
7. Колоско А.Г., Ершов М.В., Филиппов С.В., Попов Е.О. Эволюция характеристик полевого эмиттера на основе композита нитроцеллюлоза-углеродные нанотрубки. ПЖТФ, т. 39 (10), 2013, с. 72.
8. Kolosko A.G., Popov E.O., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I. Further investigation of statistical parameters of nanocomposite multi-tip emitters. IVNC, Guangzhou, China, 2015, p. 40.
9. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A. Mass-spectrum investigation of the phenomena accompanying field electron emission. JVSTB, 33, 2015, p. 03C109-1.

MASS SPECTROMETER COMPLEX METHODS OF INVESTIGATION OF FIELD AND THERMIC PROPERTIES OF NANOCOMPPOSITE MATERIALS

E. O. Popov, A. G. Kolosko, S. V. Filippov,
P. A. Romanov, I. L. Fedichkin

The Ioffe Institute of RAS

The multiplex field emitters investigation method based on TOF reflective type mass spectrometer and the multi-channel data acquisition and online processing of voltage characteristics allowed us to conduct a complex study of the emission properties of any type flat nanocomposite emitters. The statistics distribution of effective heights of emission centers on the cathode surface and its basic laws were revealed. The data on the composition and kinetics intensity of volatile products arising in interelectrode gap during field emission were collected. The sources of different volatile products arising during field emission, such as oxide, carbon dioxide, water and methane were determined.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОДЛОЖЕК ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО SiC В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ДО 450 ГГц

К. ф.-м. н. Вьюгинов В.Н.¹, Волков В.В.¹, Ребров А.Н.¹, Травин Н.К.¹,
Венедиктов О.В.¹, д.ф.-м.н. Григорьев А.Д.¹, Козырева О.А.¹, Коровкина М.М.¹,
д.т.н. Паршин В.В.², Серов Е.А.², д.т.н. Гарин Б.М.³

¹ ЗАО «Светлана-Электронприбор»

² Институт прикладной физики РАН

³ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Подложки являются критическими компонентами для изделий сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники и микросистемной техники. СВЧ приборы (диоды, транзисторы) и монолитные интегральные схемы (МИС) с высокой удельной мощностью и напряжением в настоящее время производятся на основе подложек карбида кремния (SiC). Использование SiC дает возможность создавать СВЧ приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений [1].

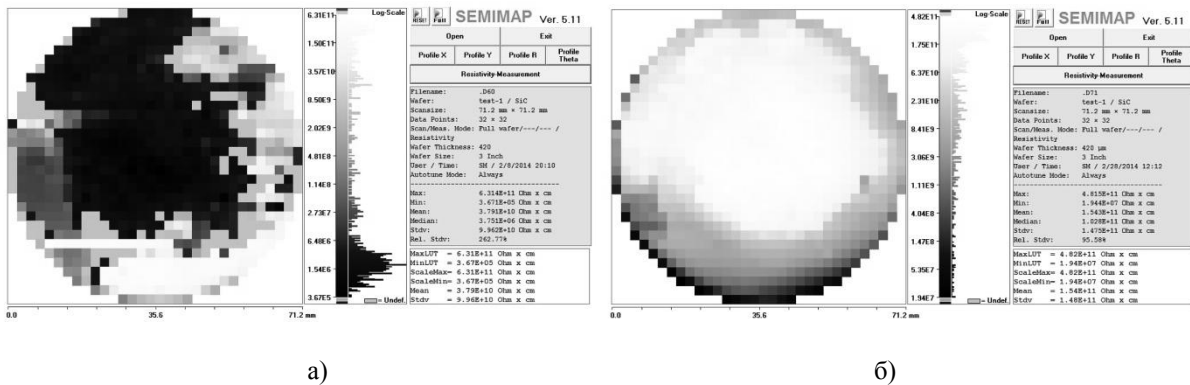


Рис. 1. Распределение удельного сопротивления на подложках SiC а) до отжига, б) после 95 часов отжига

В ОАО «Светлана» в 2011÷13 гг. была разработана базовая технология производства подложек полуизолирующего карбида кремния политипа 6H-SiC для СВЧ применений [2].

В 2014÷15 гг. на предприятии были продолжены работы, направленные на оптимизацию технологии роста монокристаллов и производства подложек полуизолирующего SiC, по направлениям синтеза некомпенсированных монокристаллов SiC политипа 6H (6H-SiC) с высоким удельным сопротивлением и по оптимизации технологии обработки подложек для достижения качества «epi-ready» [3].

Результаты разработки технологии роста HEMT гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках SiC отечественного производства для последующего изготовления СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем были описаны в [4].

Подложки SiC являются основой, на которую наносят эпитаксиальную структуру. При изготовлении транзисторов с высокой подвижностью электронов p-проводимости на основе GaN (p-HEMT GaN) подложки с эпитаксиальными слоями подвергаются кратковременному нагреву до температуры 950÷1000°C на операции отжига омических контактов истока и стока. При этом у подложек, изготовленных из монокристаллов SiC с компенсацией донорной примеси азота акцепторной примесью ванадия, могут измениться электрические свойства. Это повлияет на характеристики транзисторов. В работе [5] было изучено влияние отжига при температуре около 1000°C в среде инертного газа на распределение удельного сопротивления ρ по площади подложки с донорно-акцепторной компенсацией. Исследования показали, что до и после температурной обработки удельное сопротивление на исследованных подложках подчиняется распределению Гаусса. Однако после отжига среднеквадратическое значение удельного сопротивления на подложке возрастает примерно в 1,5 раза, а

Физические основы микроэлектроники

дисперсия сокращается почти в три раза. В дальнейшем распределение удельного сопротивления на подложке сохраняется в нормальных условиях ($T=25^{\circ}\text{C}$) без изменений.

В процессе эксплуатации транзисторов р-HEMT GaN подложка может нагреваться до температуры порядка 150°C за счет рассеяния тепла из активной области транзистора. Для определения влияния этого нагрева на свойства подложки с донорно-акцепторной компенсацией был поставлен эксперимент, в котором изучалось распределение удельного сопротивления по площади подложки в процессе длительного нагрева при указанной температуре. На Рис. 1 приведены типичные карты удельного сопротивления (ρ) для партии подложек. Исходные подложки имели две характерные области – с удельным сопротивлением порядка $10^9\div 10^{11}$ Ом·см и 10^6 Ом·см с примерно одинаковыми площадями. В первой области имеет место глубокая компенсация донорной примеси акцептором, во второй – частичная.

Через 25 часов нагрева распределение удельного сопротивления практически не изменилось. Через 95 часов нагрева карта удельного сопротивления изменилась кардинально: область глубокой компенсации заняла большую часть подложки, а область частичной компенсации исчезла.

Можно предложить следующее объяснение описанным экспериментальным результатам. В процессе нагрева происходит изменение электрического поля из-за термомеханической деформации подложки.

Это вызывает перемещение заряда (электронов донорной примеси) в область несвязанной акцепторной примеси и последующий их захват акцепторной примесью. Характерное для этого процесса время

$t \sim 100$ часов свидетельствует о слабости электрических полей и, вследствие этого, низкой скорости $v \approx 10^{-1}$ мкм/с движения электронов донорной примеси.

В процессе изготовления подложек измерение карты удельного сопротивления производится с целью технологического контроля параметров. На Рис. 2 приведены результаты контроля удельного сопротивления для типичной отечественной подложки 6H-SiC с донорно-акцепторной компенсацией и для подложки 4H-SiC фирмы CREE inc. (США, Северная Каролина). Сравнение этих данных показывает, что достигнутая величина и равномерность удельного сопротивления по площади у отечественной подложки соответствует мировому уровню.

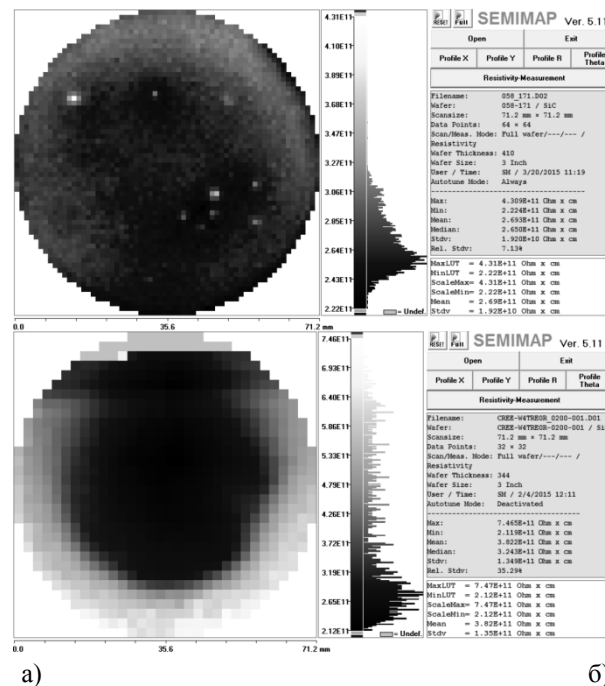


Рис. 2. Распределение удельного сопротивления на подложках SiC
а) отечественной подложки б) подложки CREE.

При эксплуатации транзисторов р-HEMT GaN сама подложка тоже находится в СВЧ поле, поэтому ее электрические свойства на этих частотах, прежде всего величина диэлектрической проницаемости и тангенс угла потерь, имеют большое значение. Для контроля на СВЧ нами используется высокоточный резонаторный метод [6], регламентированный ГОСТ [7] и резонатор, позволяющий производить измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь высокоомных SiC подложек на частоте 6,375 ГГц. Методика измерений диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ и расчета удельного сопротивления ρ подложек на СВЧ описаны в [8]. Подложка устанавливается в центре

Физические основы микроэлектроники

цилиндрического резонатора, и занимает все его сечение. Поскольку объем подложки составляет малую долю от объема резонатора, для определения ϵ по смещению частоты резонанса и $\text{tg}\delta$ по изменению добротности резонатора с подложкой применяется метод малых возмущений. Выбранный метод обеспечивает относительную погрешность измерения не более 0,5% для величины диэлектрической проницаемости и не более 20% для тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$, что позволяет, измеряя выборочно параметры подложек, также контролировать технологический процесс. В работе [8] получено типичное значение потерь на этой частоте для отечественных и импортных подложек $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$. Эти результаты были подтверждены измерениями $\text{tg}\delta$ в АО «НИИ Феррит-Домен» на частоте 7 ГГц в резонаторе аналогичной конструкции.

Измерения электрических параметров подложек на более высоких частотах указанным выше резонаторным методом на целых подложках затруднено, а измерения на «кусочках» подложек не имеют практического смысла. Поэтому, с целью сравнения свойств отечественных и импортных подложек на более высоких частотах был предложен другой метод измерений, в котором подложки помещаются между фланцами волноводов, и затем производятся измерения S-параметров тракта передачи. На обоих образцах измерялись коэффициент стоячей волны (КСВ) и модуль коэффициента передачи (потери). Метод не дает возможности определения ϵ и $\text{tg}\delta$ по причине трудно учитываемых потерь на излучение через края подложки, но позволяет оценить качественную картину в одинаковых условиях для отечественных и импортных подложек.

Анализ результатов измерений на Рис. 3 показывает, что в диапазоне частот от 12 ГГц до 40 ГГц потери в тракте с отечественными образцами на $1 \div 2$ дБ превосходят потери в тракте с образцами CREE. Из этого можно сделать вывод, что их удельные сопротивления отличаются не более 1,5 раз. Отличие КСВ для отечественных и импортных образцов вызвано различием их диэлектрической проницаемости из-за разного политаипа – 6H-SiC и 4H-SiC, соответственно.

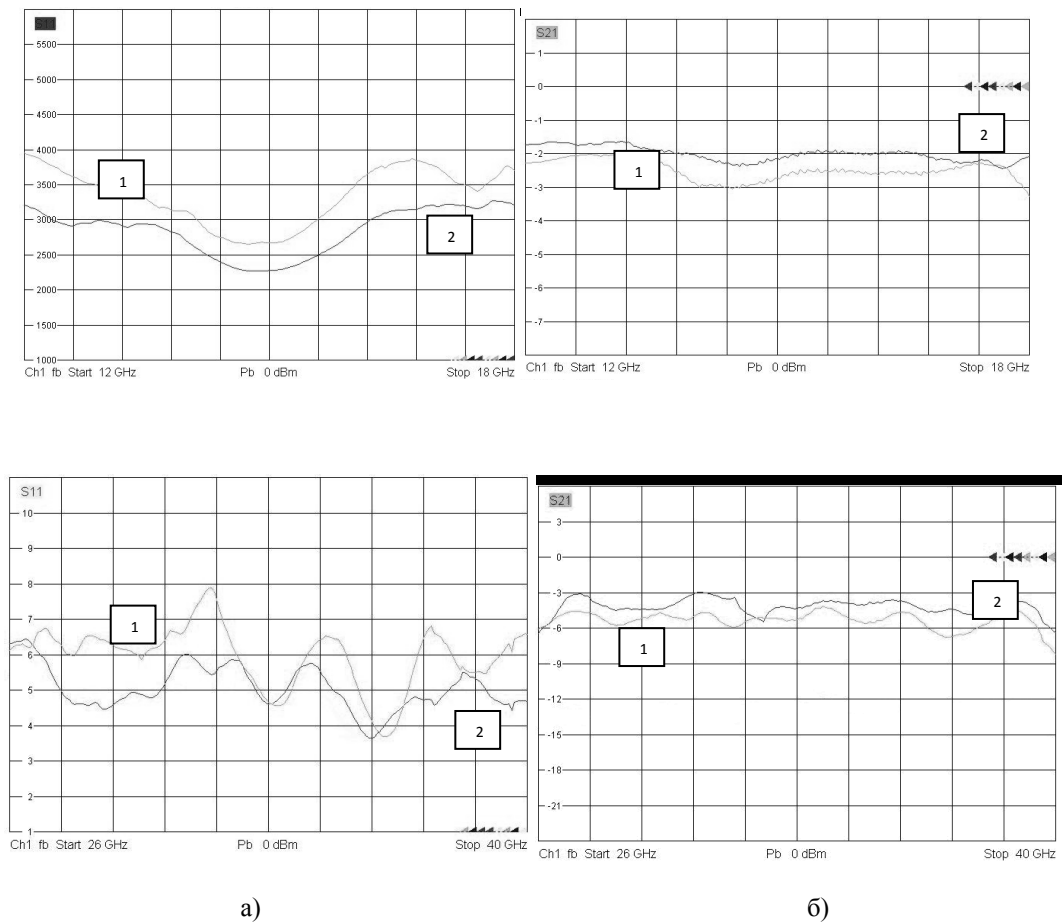


Рис. 3. Измерения в тракте с отечественной (1) и импортной (2) подложкой в диапазоне частот $12 \div 18$ ГГц и $26 \div 40$ ГГц; а) КСВ, б) потери

Для исследования электрических параметров отечественных подложек на частотах в субмиллиметровом диапазоне нами был использован метод измерений с помощью открытого резонатора

Физические основы микроэлектроники

Фабри-Перо с добротностью $Q \sim 10^6$ [9-11]. Измерения проводились на резонансной частоте, при которой толщина подложки кратна целому числу полувольт. Измерения дублируются в двух положениях образца относительно стоячей волны в резонаторе, а именно, когда поверхность подложки совпадает с минимумом стоячей волны в резонаторе и с ее максимумом (Рис. 4а), и в обоих положениях образца дают одинаковые результаты. По результатам измерений сдвига резонансной частоты и увеличения ширины резонансной кривой резонатора с образцом относительно пустого резонатора по известным формулам [11] рассчитываются электрические параметры подложки ϵ и $\text{tg}\delta$, соответственно.

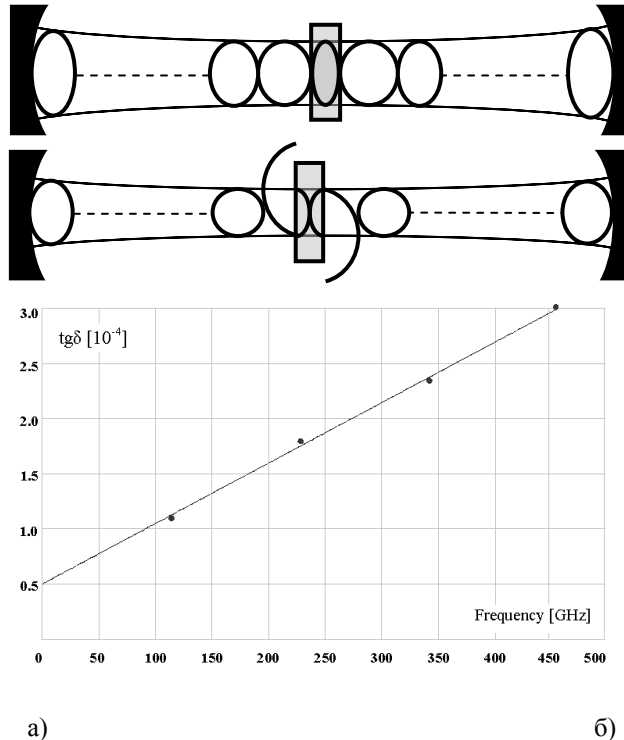


Рис. 4. а) схема резонатора Фабри-Перо с образцом подложки, б) зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты

График частотной зависимости потерь отечественной подложки приведен на рис. 4б. В диапазоне частот от 110 ГГц до 450 ГГц эту зависимость можно аппроксимировать прямой линией. На верхней частоте диапазона $\text{tg}\delta \leq 3 \times 10^{-4}$. Однако измеренные резонаторным методом на частоте 6,375 ГГц потери составили $\text{tg}\delta = 1,8 \times 10^{-4}$ [8], что выходит за аппроксимацию, которая на низких частотах стремится к величине $\text{tg}\delta = 0,5 \times 10^{-4}$.

Рассмотрим модель потерь в подложке SiC. Известно, что существуют два основных механизма, обуславливающие поглощение энергии СВЧ колебаний. Первый из них – это электропроводность материала, обусловленная наличием в нем свободных носителей заряда. В полупроводниках в качестве носителей выступают как электроны, несущие отрицательный заряд (донорная примесь), так и дырки, несущие положительный заряд (акцепторная примесь). Задача донорно-акцепторной компенсации при производстве подложек SiC состоит в том, чтобы обе примеси N_d и N_a имели одинаковую концентрацию. В этом случае омическая электропроводность в подложке будет отсутствовать. На практике достичь этого затруднительно по технологическим причинам из-за невозможности обеспечить одинаковые условия сублимации во всей области роста. В результате в подложке с донорно-акцепторной концентрацией будет присутствовать как область с глубокой компенсацией, в которой $N_d \approx N_a$, так и область частичной компенсации, в которой $N_d \neq N_a$.

Известно, что подвижность дырок существенно ниже подвижности электронов, вследствие этого вклад электронов донорной примеси в электропроводность σ превышает вклад дырок. Поэтому, с целью гарантированной компенсации всей донорной примеси на практике добавляют в реактор роста акцепторную примесь с запасом. Однако и в этом случае не удается обеспечить полную компенсацию во всей области роста по вышеназванной причине. В поле СВЧ омическая электропроводность вызывает появление мнимой части диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_1 r \sigma^{1n} = \sigma / (\omega \epsilon_1 0) ,$$

которой обычно характеризуют омические потери.

Физические основы микроэлектроники

Другой механизм – это поляризация материала подложки под воздействием электрического поля. На СВЧ диполи в SiC меняют свою ориентацию, поворачиваясь вслед за полем. При этом от СВЧ поля отбирается часть энергии, уходящая на тепловое рассеяние, что и приводит к потерям. Для характеристики диэлектрических потерь воспользуемся моделью Дебая. Определим из нее действительную и мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости. Добавим к мнимой части член, обусловленный омическими потерями в подложке, и вычислим тангенс угла потерь в нем как отношение суммарной мнимой части к действительной части. В результате этих вычислений получим зависимость тангенса угла потерь от частоты:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\left\{ \frac{\omega\tau(k_0 - k_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \right\}}{\left\{ 1 + k_\infty + \frac{(k_0 - k_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} \right\}},$$

где k_0 и k_∞ - восприимчивость SiC на низких и высоких частотах соответственно, τ – постоянная времени диэлектрической релаксации SiC.

Анализ полученной зависимости показывает, что на низких частотах ($\omega\tau \ll 1$) тангенс угла потерь убывает с ростом частоты. На другом пределе по частоте ($\omega\tau \gg 1$) тангенс угла потерь пропорционален частоте. Это объясняется тем, что на низких частотах основной вклад дают омические потери, а с ростом частоты – релаксационные потери.

Для подтверждения сделанных выводов о механизме потерь в полученное выражение были подставлены измеренное резонаторным методом для подложки 6H-SiC значение $k_0 = \epsilon_r - 1$ и проводимость σ , полученные из данных измерений на низкой частоте [8]. Значения τ и k_∞ были подобраны так, чтобы результаты оценки по вышеприведенной зависимости соответствовали результатам измерений в резонаторе Фабри-Перо. В результате расчета получено, что на частотах ниже 50 ГГц график $\operatorname{tg}\delta(f)$ отклоняется от линейной зависимости, и с дальнейшим уменьшением частоты наблюдается рост потерь. При этом расчетное значение $\operatorname{tg}\delta$ на частоте 6,375 ГГц близко к значению, экспериментально измеренному резонаторным методом.

Таким образом, проведенные исследования показали, что у подложек полуизолирующего 6H-SiC, производимых в ЗАО «Светлана-Электронприбор», тангенс угла потерь в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах не превышает $3 \cdot 10^{-4}$. Это говорит о том, что отечественные подложки могут быть использованы в производстве приборов СВЧ диапазона вплоть до 450 ГГц.

Литература

1. Куэй Р., пер. с англ. Концевой Ю.А., Митрофанов Е.А. Электроника на основе нитрида галлия / М.: Техносфера, 2011.
2. Лебедев А.А., Белов С.В., Лебедев С.П., Литвин Д.П., Никитина И.П., Васильев А.В., Макаров Ю.Н., Нагалюк С.С., Стрельчук А.М., Попов В.В., Вьюгинов В.Н., Шифман Р.Г., Кузмичёв Ю.С., Травин Н.К., Венедиктов О.В. Начало промышленного выпуска SiC подложек и приборов на их основе // Труды 1-й российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой 110-ю со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. А. Э. Рассадина. — Н. Новгород.: НИЖЕГОРОДСКАЯ РАДИОЛАБОРАТОРИЯ. 2013. В 2-х т. Т. 1. С. 23-24
3. В.Н. Вьюгинов, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов, М.М. Коровкина, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин. Развитие базовой технологии производства подложек полуизолирующего карбида кремния. Сборник статей Четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», с. 79-81, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, ISBN 978-5-7629-1634-9.
4. А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, А.В. Сахаров, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов, В.П. Иванова, Я.М. Парнес, В.Е. Земляков, В.В. Волков, В.Н. Вьюгинов, М.А. Яговкина, В.Р. Тихомиров, М.Н. Мизеров. Рост HEMT гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках SiC отечественного производства. Тезисы докладов 10-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы", с. 129-130, СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2015, ОК 005-93, т.2; 953004.
5. Попов В. В. Влияние температуры на электрические свойства подложек карбида кремния / Машиностроитель. - 2014. - № 10. - С. 38-43. - Библиогр.: с. 41-43 (36 назв.). - ISSN 0025-4568.
6. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматлит, 1963.
7. ГОСТ Р 8.623-2006 ГСИ Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики выполнения измерений в диапазоне сверхвысоких частот.
8. Вьюгинов В. Н., Уланова Т. А., Григорьев А. Д. Измерение параметров карбид кремниевых подложек на СВЧ // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. №3. С. 80.

9. V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, E.A. Serov. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. IEEE Sensors Journal. V.13, №1, pp. 18-23, 2013. DOI 10.1109/JSEN.2012.2215315.
10. В.В. Паршин, Е.А. Серов, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков. “Криовакуумный резонаторный комплекс”. Изв. ВУЗ-ов, «Радиофизика». Том LVI, № 8-9, с. 614 - 621, 2013.
11. Паршин В.В., Серов Е.А. Прецизионные резонаторные методы исследований диэлектриков и металлов в диапазоне частот 40 ГГц-500 ГГц и в интервале температур 4 К -900 К // Сборник статей Четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», с. 34-39, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, ISBN 978-5-7629-1634-9. INV.

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF DOMESTIC SEMI-INSULATING SiC SUBSTRATES IN MICROWAVE FREQUENCY REGION IN THE BANDWIDTH UP TO 450 GHz

V. N. Vyuginov¹, V. V. Volkov¹, A. N. Rebrov¹, N. K. Travin¹,
O. V. Venediktov¹, A. D. Grigoriev¹, O. A. Kozireva¹, M. M. Korovkina¹,
V.V. Parshin², E. A. Serov², B. M. Garin³

¹ CJSC "Svetlana-Electronpribor"

² Institute of Applied Physics of RAS

³ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (Fryazino Branch)

The results of the researches on applicability of domestic semi-insulating silicon carbide substrates in microwave frequency region, performed at CJSC "Svetlana-Electronpribor", are described in the article. The measurement results of dielectric loss tangent and other characteristics in the bandwidth up to 450 GHz using different cavity methods are discussed.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ/ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПОЧКИ БОЛОМЕТРОВ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ПЕРЕКРЕСТНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ

к.ф.-м.н. Гордеева А.В.^{1,2}, Мухин А.С.¹, Ревин Л.С.^{1,2,3}, Абашин А.Е.¹,
д.ф.-м.н. Панкратов А.Л.^{1,2,3}, PhD Махашабе С.⁴, д.ф.-м.н. Кузьмин Л.С.^{1,4}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Институт физики микроструктур РАН

⁴ Чалмерский Университет Технологии (Швеция)

В работе проведен теоретический и экспериментальный анализ болометров на холодных электронах (БХЭ) [1,2], интегрированных с перекрестно-щелевой антенной [3]. Цель работы – определить вольт-ваттную чувствительность болометров, мощность эквивалентную шуму (МЭШ) и эффективность поглощения падающего излучения. Поглощенная мощность найдена двумя способами, что повышает достоверность результатов. Первый способ состоит в сравнении экспериментальных вольт-амперных характеристик с уравнением теплового баланса. Второй способ - моделирование электромагнитных свойств системы, включающей антенну, линзу, оптический стакан, полосовой фильтр и чернотельный источник излучения. Различие между двумя методами составило не более 30%.

Болометры на холодных электронах являются очень перспективными детекторами для космологических приложений из-за их высокой чувствительности к терагерцовому излучению и устойчивостью к воздействию космических лучей [4].

Болометры были изготовлены в Чалмерском Технологическом Университете и измерены в Нижегородском Государственном Техническом Университете. Болометры и антенна создаются методом напыления тонких пленок на кремниевую подложку. Для изучения отклика болометров с обратной стороны на подложку приклеивается кремниевая линза, собирающая излучение. Во время эксперимента болометры с линзой находятся в стакане, на одном торце которого расположены фильтры, отсекающие излучение вне полосы приема. Излучение на болометры подается с помощью черного тела, температура которого регулируется.

Обработка экспериментальных результатов начинается с оценки эффективности поглощения антенны путем моделированием электродинамики системы. Затем экспериментальные данные накладываются на теоретическую модель болометра на основе уравнения теплового баланса.

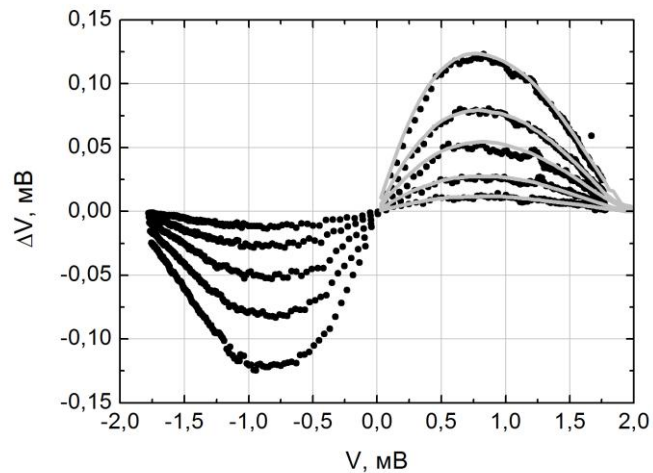


Рис. 1. Отклик болометров на различные температуры черного тела: 3; 3,8; 4,8; 5,9 и 7,1К (снизу-вверх). Точки – эксперимент, линии – теория.

В результате сравнения эксперимента с моделью [5] было обнаружено, что наилучшее совпадение с экспериментом получается, если кроме нагрева абсорбера учесть нагрев сверхпроводящих электродов. Были найдены параметры, важнейший из которых - поглощенная мощность, при которых модель [5] и эксперимент совпадают (рис.1). Обнаружено, что в проведенном эксперименте поглощенная мощность ниже уровня, на который были рассчитаны болометры. В данном режиме фотонный шум ниже шума приемной системы примерно в шесть раз и поэтому не наблюдаем экспериментально. Разрабатываются следующие эксперименты по увеличению поглощаемой мощности для наблюдения режима детектирования, ограниченного фотонным шумом.

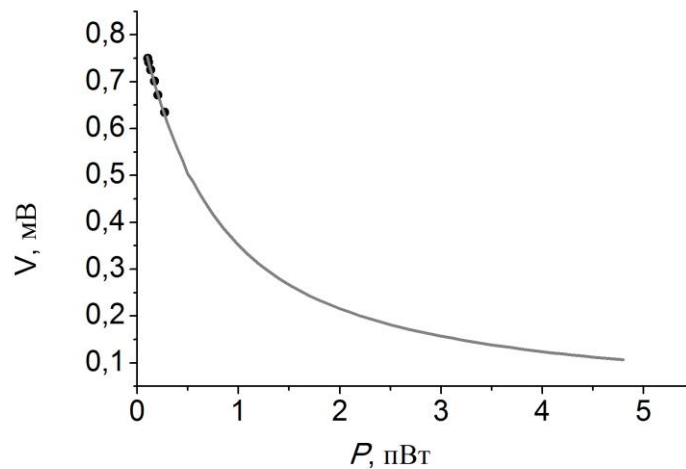


Рис. 2. Напряжение на болометрах как функция поглощенной мощности. Точки - эксперимент, линия - теория.

Образец находился при температуре 300 мК. Черное тело (ЧТ) нагревалось от 300 мК до 7 К. На рисунке 1 можно видеть насколько изменились вольт-амперные характеристики (ВАХ) болометров при нагреве черного тела. Изменение напряжения на болометрах при фиксированном токе от температуры черного тела называется оптическим откликом ΔV . При нагреве черного тела выше 7 К начинался нагрев всего образца. Чтобы различать оптический отклик и тепловой, на образце сделаны термометры, изготовленные в одном технологическом цикле с болометрами.

ВАХи болометров были наложены на теоретические кривые, рассчитанные в рамках уравнения теплового баланса для абсорбера [5] и для сверхпроводящих электродов. Как видно на рисунке 1, модель хорошо совпадает с экспериментом. Сравнение модели и эксперимента позволило найти такие важные параметры болометров, как поглощенная мощность P , вольт-ваттная чувствительность S и мощность эквивалентная шуму (МЭШ):

$$S = dV/dP, \quad \text{МЭШ} = V_n/S, \quad (1)$$

Физические основы микроэлектроники

здесь V_n - шум напряжения на болометрах.

На рисунке 2 показано, как меняется напряжение на болометре при поглощении мощности. Можно наблюдать качественное и количественное совпадение между измеренными и рассчитанными результатами. При нагреве черного тела с 0,3 до 7 К болометрами поглощается около 0,2 пВт мощности. При этом 0,1 пВт фоновой мощности присутствует изначально, до нагрева ЧТ.

Также при моделировании были использованы следующие параметры: критическая температура алюминиевых электродов 1,46 К, объем абсорбера $0,02 \text{ мкм}^3$, постоянная электрон-фононного взаимодействия абсорбера $1,25 \text{ нВт/К}^5/\text{мкм}^3$ и параметр Дайнса, отвечающий за подщелевую плотность состояний сверхпроводника, 10^{-5} .

На рисунке 3 показана МЭШ болометров, нормированная на уровень фотонного шума $MЭШ_{\text{фот}}$, посчитанная для трех разных моделей. Для удобства уровень фотонного шума равный 1 отмечен линией.

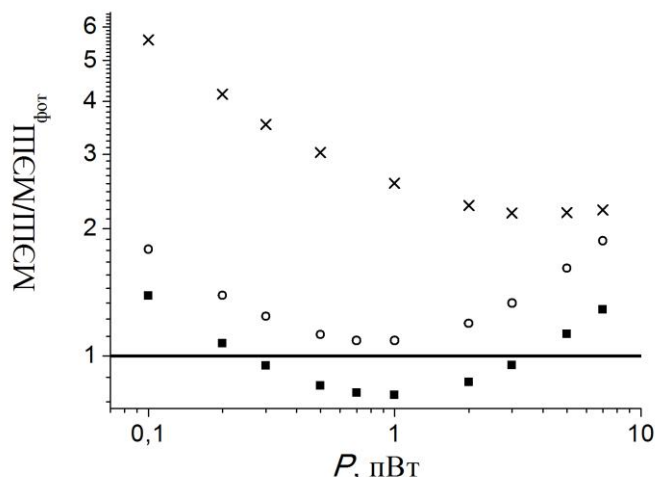


Рис. 3. МЭШ/МЭШ_{фот} как функция мощности. Квадратные маркеры – модель [5], круглые маркеры – модель [4] с дополнительным слагаемым, кресты – модель с двумя уравнениями теплового баланса.

На рисунке 3 видно, что оптимальной нагрузкой болометров с точки зрения наблюдения фотонного шума является область от 2 до 6 пВт для модели с двумя уравнениями теплового баланса, которая наиболее точно описывает эксперимент. На настоящий момент измерена МЭШ для нагрузки 0,1 пВт, она составила $3 \times 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Следующие эксперименты будут направлены на то, чтобы увеличить поглощенную мощность, и, следовательно, уровень фотонного шума так, чтобы он стал основной составляющей шумов на болометрах.

Таким образом, протестированные болометры обладают вольт-ваттной чувствительностью $7,8 \times 10^8 \text{ В/Вт}$ при температуре 300 мК и МЭШ $3 \times 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при фотонной нагрузке $7 \times 10^{-18} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$.

Работа выполнена при поддержке МОН (грант 3.2054.2014/К) и РФФИ (грант 15-47-02552).

Литература

1. L.S. Kuzmin. "Cold-Electron Bolometer," in book: BOLOMETERS, ed. A.G.U.Perera, intechweb.org, ISBN 978-953-51-0235-9, pp. 77-106 (2012).
2. M. A. Tarasov et al, IEEE TRANS. ON APPL. SUPERCOND., VOL. 21, NO. 6, DECEMBER (2011)
3. Goutam Chattopadhyay, David Miller, Henry G. LeDuc, and Jonas Zmuidzinas, Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques, 48, NO. 10, pp. 1680-1686 (2000).
4. M. Salatino, P. de Bernardis, L.S. Kuzmin, S. Mahashabde, S. Masi, Journ. Low. Temp. Phys., 176, 323 (2014).
5. D. Golubev, and L. Kuzmin, Journal Of Applied Physics, 89, NO. 11, pp. 6464-6472 (2001).

PARALLEL/SERIES ARRAYS OF COLD-ELECTRON BOLOMETERS WITH A CROSS-SLOT ANTENNA

A.V. Gordeeva^{1,2}, A.S. Mukhin¹, L.S. Revin^{1,2,3}, A.E. Abashin¹,
A.L. Pankratov^{1,2,3}, S. Mahashabde⁴, and L.S. Kuzmin^{1,4}

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

³ Institute for Physics of Microstructures of RAS

We perform experimental and theoretical study of the parallel-series arrays of Cold-Electron Bolometers (CEBs) integrated into a cross-slot antenna and composed with an immersion silicon lens. The CEBs are proven to be quite insensitive to cosmic radiation. The purpose is to determine the absorption efficiency, the responsivity and the noise equivalent power (NEP) of the bolometers. The absorbed power has been found in two independent ways. The comparison of two approaches gives better understanding of the system and secures from misinterpretations. The first approach is fitting of the bolometer IV curves with solutions of heat-balance equations. The second approach is modelling of electromagnetic properties of the system, including an antenna, lens, optical can, band-pass filters and black body source. The difference between both methods does not exceed 30%. The optimization of experimental setup is proposed to approach the photon limited detection mode.

РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ФОТОТИРИСТОРА СО ВСТРОЕННОЙ ЗАЩИТОЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

к. ф.-м.н. Падеров В.П., Силкин Д.С.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

Известно, что облучение протонами позволяет создавать глубокие тонкие слои n-типа проводимости в кремниевой пластине [1]. Такие слои можно использовать, например, для создания элементов самозащиты от перенапряжения в силовых тиристорах [2]. Для создания таких элементов локально облучают центральную часть структуры, создавая в слаболегированной n-базе N'-слой с повышенной концентрацией легирования. При этом напряжение пробоя облученного участка уменьшается, и в случае возникновения перенапряжений пробой происходит именно в центральной части, гарантируя безопасное включение тиристора. При этом важно подобрать энергию и дозу облучения так, чтобы после облучения напряжение пробоя уменьшилось на заданную величину.

При протонном облучении помимо термодоноров возникают также дефекты кристаллической решетки, способные выполнять роль акцепторов [3]. В слаболегированной n-области эти акцептороподобные дефекты способны практически скомпенсировать донорную примесь, приближая полупроводник к состоянию собственного. Напряжение пробоя p-n перехода в этом случае можно рассчитать аналитически.

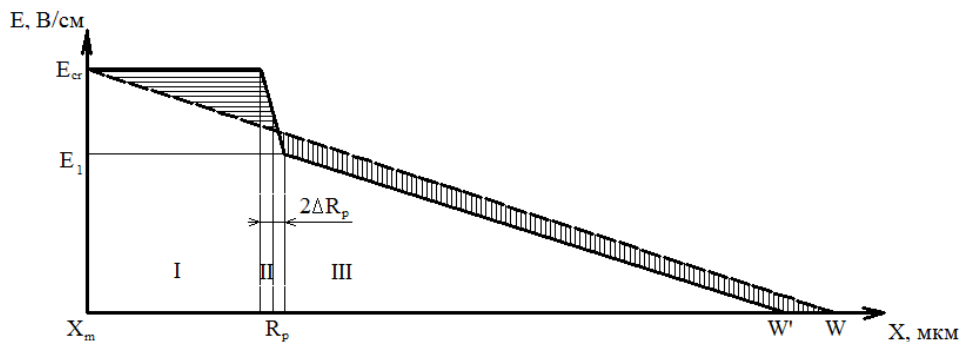


Рис. 1. Профиль легирования и распределение напряженности электрического поля в облученном протонами p⁺-n переходе

На рис. 1 изображена упрощённая зависимость напряженности электрического поля для такого p-n перехода. В области III концентрация легирования соответствует исходной пластине. В области II находятся водородсодержащие доноры, а уменьшение эффективной концентрации примеси в области I обусловлено эффектом компенсации донорной примеси акцептороподобными дефектами. В области I, заполненной акцептороподобными дефектами, наклон зависимости $E(x)$ очень мал, и напряженность поля можно с малой погрешностью считать постоянной величиной. В области II концентрация примеси, а, следовательно, и наклон зависимости $E(x)$, существенно больше, чем в области III. Пунктирной линией на этом рисунке показана зависимость $E(x)$ для необлученного p⁺-n перехода.

Напряжение пробоя перехода V_b равно интегралу от напряженности электрического поля или же, иначе говоря, площади под зависимостью $E(x)$. Протонное облучение дает два эффекта, которые по-разному воздействует на V_b . С одной стороны, наличие акцептороподобных дефектов приводит к росту

V_b на величину, численно равную площади фигуры с горизонтальной штриховкой на рис. 1. С другой – увеличение наклона зависимости $E(x)$ в области II, при достаточной дозе донорной примеси, приводит к уменьшению напряжения пробоя р⁺-п перехода на величину, численно равную площади фигуры с вертикальной штриховкой на рис. 1.

Напряжение пробоя облученного р⁺-п перехода численно равно сумме площадей прямоугольника I, трапеции II и треугольника III. Параметры W – ширина области пространственного заряда структуры до облучения, W' – ширина области пространственного заряда после облучения и E_1 – напряженность поля на границе областей II и III, можно выразить через максимальную напряженность электрического поля, при которой происходит лавинный пробой E_{cr} , по известным соотношениям [4]. Тогда напряжение пробоя можно рассчитать по формуле, приняв за начало отсчёта по оси X положение металлургической границы необлученного р-п перехода ($X_m = 0$):

$$V_b = E_{cr}(R_p - \Delta R_p) + (2E_{cr} - a_2 \Delta R_p) \cdot \Delta R_p + \frac{(E_{cr} - 2a_2 \Delta R_p)^2}{2a_1}, \quad (1)$$

где R_p – глубина залегания водородсодержащих доноров; ΔR_p – полуширина слоя водородсодержащих доноров; $a_1 = qN_d'(\epsilon_0 \epsilon_s)$, $a_2 = qN_d(\epsilon_0 \epsilon_s)$ – угловые коэффициенты в зависимости $E(x)$; N_d , N_d' – концентрации доноров в областях III и II, соответственно; q – заряд электрона; $\epsilon_0 \epsilon_s$ – диэлектрическая проницаемость кремния.

Для расчета напряжения пробоя р⁺-п перехода по формуле (1) необходимо знать параметры профиля примеси и критическую напряженность электрического поля E_{cr} , при которой начинается пробой. Значение E_{cr} будет зависеть от глубины залегания R_p . Это связано с тем, что процессы ударной ионизации сильнее всего протекают в относительно небольшой области, вблизи металлургической границы р-п перехода, где напряженность электрического поля наиболее высока. Эта, так называемая, область ударной ионизации занимает до 30% от области пространственного заряда высоковольтных р-п переходов и уменьшается с увеличением напряжения пробоя [5]. Водородсодержащие доноры, попадая в область ударной ионизации, понижают напряженность поля, что при достаточной дозе приводит к ограничению ширины области ударной ионизации. Для выполнения условия лавинного пробоя при этом должна возрастать E_{cr} .

Рассчитать E_{cr} можно из условия лавинного пробоя, вычислив интеграл ионизации. Это можно сделать аналитически, если использовать приближение эффективного коэффициента ударной ионизации и степенную аппроксимацию зависимости этого коэффициента от напряженности электрического поля [6]. Тогда условие лавинного пробоя можно записать в виде:

$$\int_0^W C \left(\frac{E(x)}{E_0} \right)^n dx = 1, \quad (2)$$

где $n = b_{eff}/E_0$, $C = a_{eff} \cdot e^{-n}$; E_0 – параметр, обычно принимаемый 0,9 от критической напряженности поля в необлученной структуре; a_{eff} , b_{eff} – эмпирические коэффициенты в законе Чиновеса (Chynoweth) [7]. Интеграл в условии (2) можно разбить на три части, по числу областей на рис. 1. Тогда, с учетом зависимости $E(x)$ в каждой области, условие лавинного пробоя можно переписать в виде:

$$\int_0^{R_p - \Delta R_p} C \left(\frac{E_{cr}}{E_0} \right)^n dx + \int_{R_p - \Delta R_p}^{R_p + \Delta R_p} C \left(\frac{E_{cr} - a_2 x}{E_0} \right)^n dx + \int_{R_p + \Delta R_p}^W C \left(\frac{E_1 - a_1 x}{E_0} \right)^n dx = 1, \quad (3)$$

где $E_1 = E_{cr} - 2a_2 \Delta R_p$ – напряженность электрического поля в точке, соответствующей началу области III на рис. 1. Такой интеграл можно вычислить аналитически, придя к трансцендентному уравнению:

$$C \left(\frac{E_{cr}}{E_0} \right)^n (R_p + \Delta R_p) + \frac{E_0 C}{a_2(n+1)} \left[\frac{E_{cr}(1 + 2a_2 \Delta R_p)}{E_0} \right]^{n+1} + \frac{E_0 C}{a_1(n+1)} \left(\frac{E_{cr} - 2a_2 \Delta R_p}{E_0} \right)^{n+1} - 1 = 0 \quad (4)$$

Уравнение (4) можно решить численными методами, получив значение E_{cr} для разных величин R_p , ΔR_p , N_d и N_d' .

Проверка адекватности такой модели была осуществлена путем сравнения результатов расчётов критического значения напряженности электрического поля и напряжения пробоя р⁺-п перехода по формулам (4) и (1) с результатами физико-топологического моделирования аналогичного перехода в программе Synopsys TCAD. При расчетах были взяты следующие значения параметров: $\Delta R_p = 5$ мкм, $N_d = 1.13 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $N_d' = 1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $E_0 = 1.62 \cdot 10^5$ В/см. При моделировании использовалась модель ударной ионизации Оверстраттена [8] с коэффициентами a_{eff} , b_{eff} , приведенными в [6]. На рис. 2 приведены графики зависимости $E_{cr}(R_p)$ и $V_b(R_p)$, полученные с помощью уравнений (1), (4) и с помощью моделирования в Synopsys TCAD. На графиках начало отсчета R_p соответствует металлургической границе р-п перехода X_m . Сравнение полученных зависимостей показывает, что предложенные формулы при определении напряжения пробоя дают погрешность не более 1.5%.

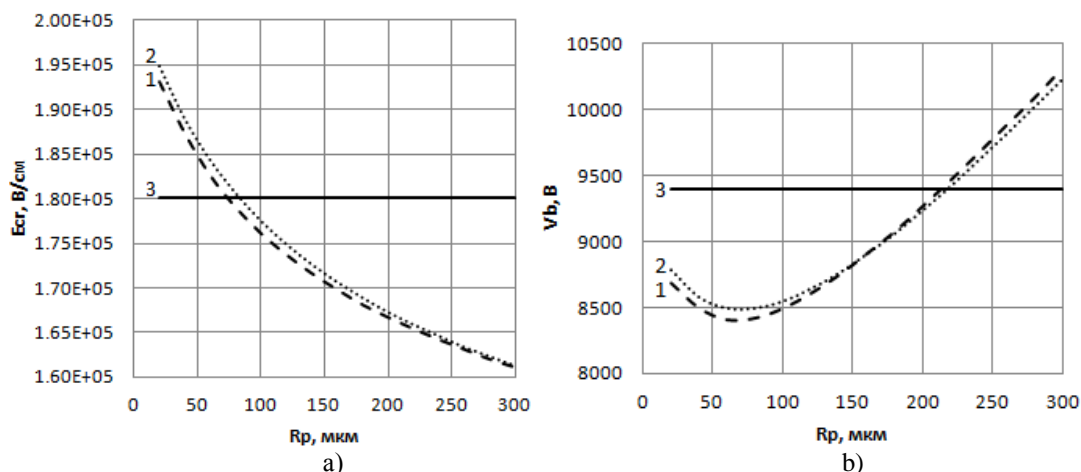


Рис. 2. Зависимости критической напряженности поля (а) и напряжения пробоя (б) р-п перехода от положения слоя водородсодержащих доноров: 1 – рассчитанные из уравнения (4); 2 – полученные из результатов моделирования; 3 – значения, полученные из результатов моделирования необлученного р-п перехода.

Из рис. 2(б) видно, что существует такое значение $R_{pmin} = 70$ мкм, при котором значение $V_b(R_p)$ минимально. Помимо этого видно, что при значении $R_p \approx 215$ мкм напряжение пробоя р⁺-п перехода становится больше, чем напряжение пробоя структуры без облучения. Этот эффект можно объяснить с помощью рис. 1. По мере удаления слоя водородсодержащих доноров от металлургической границы, площадь фигуры с горизонтальной штриховкой, обусловленной акцептороподобными дефектами и дающей увеличение напряжения пробоя, будет расти, а площадь фигуры с диагональной штриховкой, обусловленной водородсодержащими донорами и дающей спад напряжения пробоя – уменьшаться. При некотором значении R_p , при заданной дозе, влияние акцептороподобных дефектов на напряжение пробоя р-п перехода станет определяющим, и напряжение пробоя облученной структуры превысит напряжение пробоя структуры без облучения.

Таким образом, показано, что напряжение пробоя зависит от глубины залегания N'-слоя в слабелегированной области р-п-перехода, а также существует глубина залегания N'-слоя, на которой напряжение пробоя р-п минимально. Приведены соотношения, позволяющие рассчитать зависимость напряжения пробоя р-п перехода от глубины залегания N'-слоя аналитически, не прибегая к помощи программ физико-топологического моделирования. Показано хорошее соответствие результатов аналитических расчётов с результатами моделирования.

Литература

1. Ohmura Y., Zohta Y., Kanazawa M. // Solid State Communications. 1972. Vol. 11. №1. P. 263.
2. N. Klug, J. Lutz, J. B. Meijer. N-type doping of silicon by proton implantation // Proc. Conf. «EPE 2011», Birmingham, 2011. Publisher: IEEE, Piscataway, 2011.
3. Дерменжи П.Г., Сурма А.М., Чибиркин В.В., Кавтун В.И. Силовой полупроводниковый прибор с регулируемым напряжением переключения. Патент на изобретение № 2009128410/28. Оpubл. 27.07.09, Бюл. № 3. 11 с.
4. Зи. С. Москва. Мир. 1984.
5. Ю.Н. Сережкин, А.А. Шестеркина. // Межвуз. сб. науч. труд. «Естественно-технические исследования: теория, методы, практика». Саранск: Ковылк. тип. 2003.
6. Lutz J., Schlengenotto H., Scheuermann U., Doncker R.D. Heidelberg. Springer. 2011.
7. Chynoweth A.G. // Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1537.
8. Van Overstraeten R., De Man H. // Solid-St. Electron. 1970. Vol. 13. №5. – P. 583.

CALCULATION AND MODELING OF THE BREAKDOWN VOLTAGE FOR LIGHT TRIGGERED THYRISTOR WITH BUILDED IN DEFENCE AGAINST OVERVOLTAGE OBTAINED BY MEANS OF PROTON IRRADIATION

V. P. Paderov, D. S. Silkin

Mordovskiy State University n. a. N.P. Ogarev

Developed analytical model of the effect of a proton irradiation on the breakdown voltage of light triggered thyristor. The dependence of breakdown voltage on the position of the layer of hydrogen-related donors is calculated. The results of the analytical model are compared with the results of the two-dimensional simulation in the program Synopsys TCAD.

ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ ЭРБИЕМ МЕТОДОМ ИМПЛАНТАЦИИ АТОМОВ ОТДАЧИ. ДЕФЕКТЫ ИМПЛАНТАЦИИ

к.ф.-м.н. Феклистов К.В.

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН

Эрбий считается перспективным легирующим элементом для создания интегрированных опто-электронных приборов на кремнии. Его оптический переход $Er^{+3}: 4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ на длине волны 1.54 мкм попадает в диапазон наименьших потерь оптоволоконных линий. Несмотря на длительные и обширные исследования, представленные в обзорах [1-3], задача создания эффективного источника излучения в кремнии или сопряженного с кремниевой технологией остается нерешенной. Одной из ключевых нерешенных задач является научно-технологическая задача сильного легирования кремния атомами эрбия в оптически активном состоянии. Традиционными методиками здесь являются ионная имплантация и Молекулярно-Лучевая Эпитаксия [1-3]. В более ранней работе [4], была предпринята оригинальная попытка создать мелкое сильное приповерхностное легирование кремния методом имплантации атомов отдачи эрбия. В этом методе через тонкую пленку эрбия на поверхности проводилась имплантация ионами аргона с энергией 250 кэВ, в результате чего выбитые из пленки атомы эрбия внедрялись в кремний (рис.1). Для формирования стабильных и оптически активных комплексов ErO_n дополнительно было выполнено внедрение атомов отдачи кислорода.

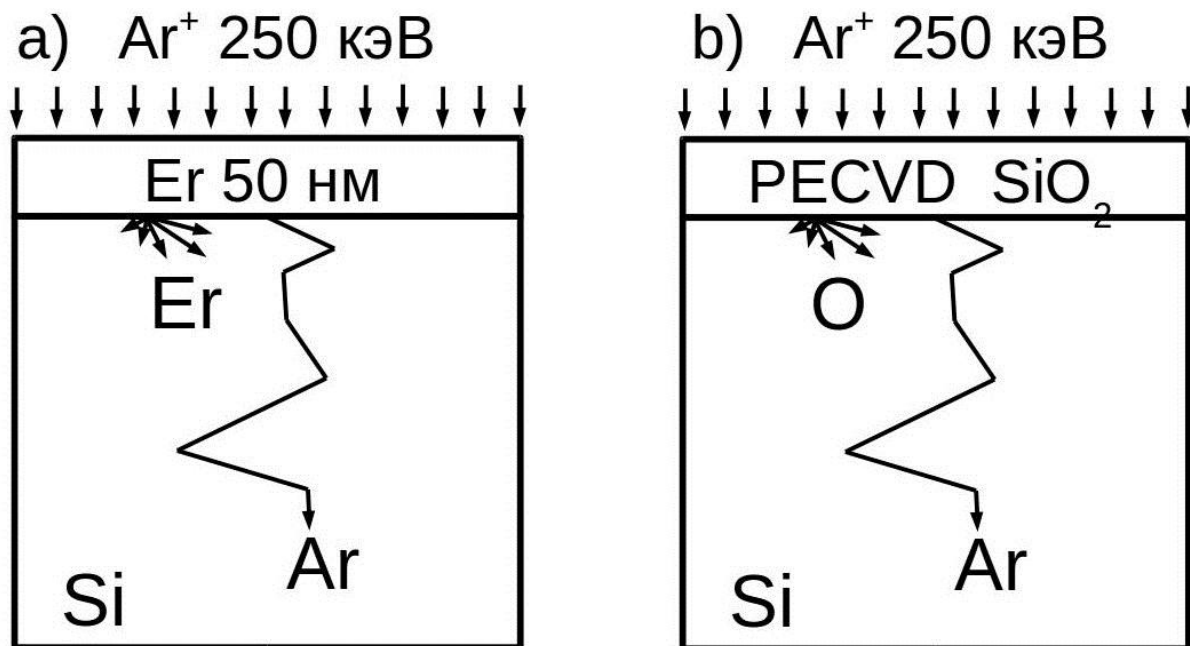


Рис. 1 Иллюстрация метода имплантации атомов отдачи Er (a) и O (b) с помощью имплантации ионов Ar^+ через тонкую пленку осажденного Er и SiO_2 соответственно

Таким способом было проведено внедрение эрбия до концентрации $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ на глубину чуть более десяти нанометров. (рис.2) Однако, в процессе последующей термообработки около половины дозы внедренного эрбия переходит в SiO_2 на поверхности. Кроме того, основная доля эрбия, оставшаяся в кремнии после термообработок, является оптически неактивной [4]. В качестве основной причины было предположено влияние дефектов, сформировавшихся после имплантации и отжига. С целью прояснить этот вопрос в данной работе проведено исследование остаточных после имплантации и отжига протяженных дефектов методом просвечивающей электронной микроскопии.

Для этого были подготовлены следующие образцы. В пластины кремния Чохральского КДБ-10 Ом·см с ориентацией поверхности (100) через пленку 50 нм напыленного Er были имплантированы ионы Ar^+ с энергией 290 кэВ с дозой $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 1,а). При этом ионы Ar^+ — первичные — передают часть своей

энергии атомам эрбия и те — атомы отдачи, проникают в подложку кремния вблизи поверхности. Сами атомы Ag проникают примерно на 200 нм в подложку. После чего пленка эрбия снималась и затем осаждалась пленка 50 нм PECVD SiO₂. Далее, имплантацией ионов Ar⁺ с энергией 250 кэВ и дозой 1x10¹⁶ см⁻² через пленку SiO₂, была проведена имплантация атомов отдачи O (рис. 1,b). Это дополнительное внедрение атомов отдачи кислорода было выполнено для формирования стабильных и оптически активных комплексов ErO_n (см пояснения и ссылки в [4]). Все образцы отжигались при температуре 950°C в течение 1 часа в атмосфере N₂. Были исследованы образцы после имплантации и после отжига как со снятой, так и с сохраненной пленкой SiO₂ на поверхности. Структурные исследования поперечных срезов в сечении (110) и планарных в плоскости (100) образцов были выполнены с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), включая высокое разрешение (ВРЭМ), на микроскопе JEM-4000EX с приставкой локального рентгеновского анализа с опцией сканирования (EDS).

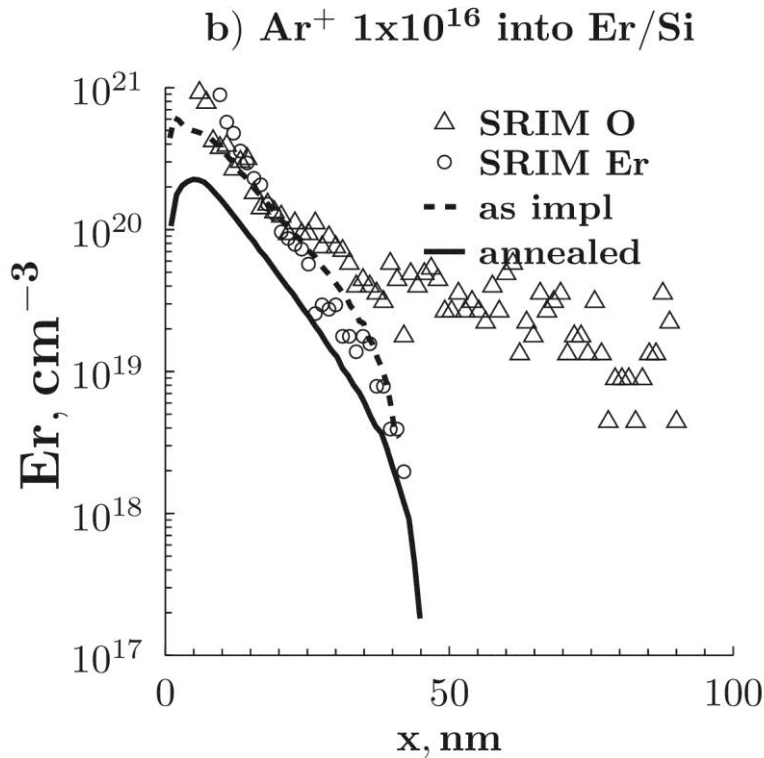


Рис. 2. МСВИ профили эрбия после имплантации (as impl) и отжига (annealed) в образцах с внедренными атомами отдачи эрбия и кислорода. (SRIM Er) и (SRIM O) — расчетные профили имплантации атомов отдачи эрбия и кислорода соответственно

В образцах после имплантации вторичных ионов эрбия и кислорода (суммарная доза имплантации Ag 2x10¹⁶ см⁻²) формируется сплошной аморфный слой от поверхности на глубину 290 нм. Это соответствует пробегу ионов Ar⁺ с энергией 290 кэВ в кремнии 297 нм (TRIM) с учетом поверхностной пленки эрбия. Внедренные атомы эрбия находятся в пределах 10 нм поверхностного слоя кремния. Внедренные атомы кислорода проникают на 2-3 нм глубже.

После отжига происходит рекристаллизация аморфного слоя и формируются присущие этому процессу дефекты [5,6]. За границей аморфизованного слоя формируются дислокационные петли Франка междуузельного типа, т.н. End of Range (EOR) дефекты (дефекты за границей пробега) или дефекты категории II [6]. От границы аморфного слоя не доходя до поверхности простираются V-образные (т.н. hairpin) дефекты. У поверхности большая плотность микродвойников. Они представляют из себя симметричный (зеркальный) дефект упаковки в плоскости встречи двух фронтов рекристаллизации от соседних блоков. Установлено, что в результате сильного поверхностного легирования эрбием и кислородом рекристаллизация не доходит до самой поверхности, а останавливается на этом слое. По видимому, на поверхности образуется аморфная фаза Er:Si:O. Это определяет низкую интенсивность фотолуминесценции от этого слоя. Согласно данным работы [4], в этом случае возбуждение эрбия происходит не через рекомбинацию сгенерированных электронно-дырочных пар, а за счет прямого фотовозбуждения внутреннего уровня Er, эффективность которого значительно ниже. Кроме того, большая плотность приповерхностных дефектов дает значительные безызлучательные потери ФЛ.

Литература:

1. Соболев Н.А. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1153.
2. A. Polman // J. Appl. Phys. 1997. V 82. P. 1.

3. Kenyon A.J. // Semicond. Sci. Technol. 2005. V. 20 P. R65
4. Феклистов К. В., Абрамкин Д. С., Ободников В. И., Попов В. П. Легирование кремния эрбием методом имплантации атомов отдачи // ПЖТФ, 2015, том 41, выпуск 16 С. 52-60
5. Соболев Н. А. Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией. ФТП, 2010, том 44, выпуск 1 стр. 3
6. K. S. Jones, S. Prussin, and E. R. Weber. A Systematic Analysis of Defects in Ion Implanted Silicon. Appl. Phys. A 45, 1-34 (1988).

E-mail: kos@isp.nsc.ru

ERBIUM RECOILS IMPLANTATION INTO SILICON. DEFECTS OF IMPLANTATION

K.V. Feklistov

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of RAS

Er recoils implantation was applied in order to get shallow high Er doping in Si. Er followed by O recoils implantation was done by means of subsequent Ar^+ 250-290 keV implantation through 50 nm deposited films of Er and then SiO_2 , accordingly. O co-implantation was aimed to create stable and optically active clusters ErO_n . Er and O recoils implantation provide Er doping up to $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ to the depth of over 10 nm. About a half of the Er implanted atoms segregates into surface SiO_2 during post-implantation annealing at 950°C 1 hour in N_2 ambient. The rest of the Er atoms retains in the Si, but the most of it is optically inactive. The purpose of this paper is to clarify the structural defects by means of transmission electron microscopy (TEM).

The investigation shows, that after implantation the deep amorphous layer was created till the depth of Ar^+ ions range. The recrystallization of amorphous layer during the annealing creates set of extended defects. They are: End of Range (EOR) defects behind the amorphous layer, V-shaped hairpin dislocations from amorphous-crystalline interface toward surface, and a lot of microtwins adjacent the surface. It looks like the recrystallization doesn't reach the surface, but the high Er and O doped surface layer forms amorphous Er:Si:O compound.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ В СОСТОЯНИИ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ

к.т.н. Беспалов Н.Н., к.т.н. Капитонов С.С., к.т.н. Ильин М.В., Евишев А.В.

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва

Устройства силовой электроники (УСЭ) реализуются на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП) к которым относятся и силовые полупроводниковые диоды (СПД). Надёжность УСЭ при эксплуатации в основном предопределяется надёжностью СПП, которая во многом определяется величиной температуры T_j их полупроводниковых структур (ПС), а также её перепадами.

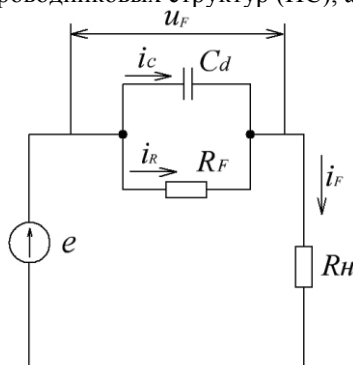


Рис. 1. Схема однофазного однопulse выпрямителя с активной нагрузкой с эквивалентной схемой замещения СПД в СВП

При эксплуатации СПП периодически находится в состояниях низкой проводимости и высокой проводимости (СВП). При этом в СВП в ПС выделяется электрическая энергия, приводящая к наибольшему её перегреву. Для объективной оценки тепловых режимов необходимо правильно

Физические основы микроэлектроники

оценивать электрические потери в ПС. СПП в СВП, в частности СПД, может быть представлен эквивалентной схемой, состоящей из параллельно соединённых диффузионной ёмкости C_d и активного нелинейного резистора R_F [1].

На рис. 1 представлена эквивалентная схема СПД в СВП в цепи однофазного однократного выпрямителя с активной нагрузкой R_H с питанием от источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц. При таком состоянии при протекании тока нагрузки i_F через СПД этот ток разделяется на реактивную ёмкостную составляющую i_C и активную составляющую i_R , величина которой и будет предопределять активную мощность потерь, выделение которой в ПС СПД будет перегревать её.

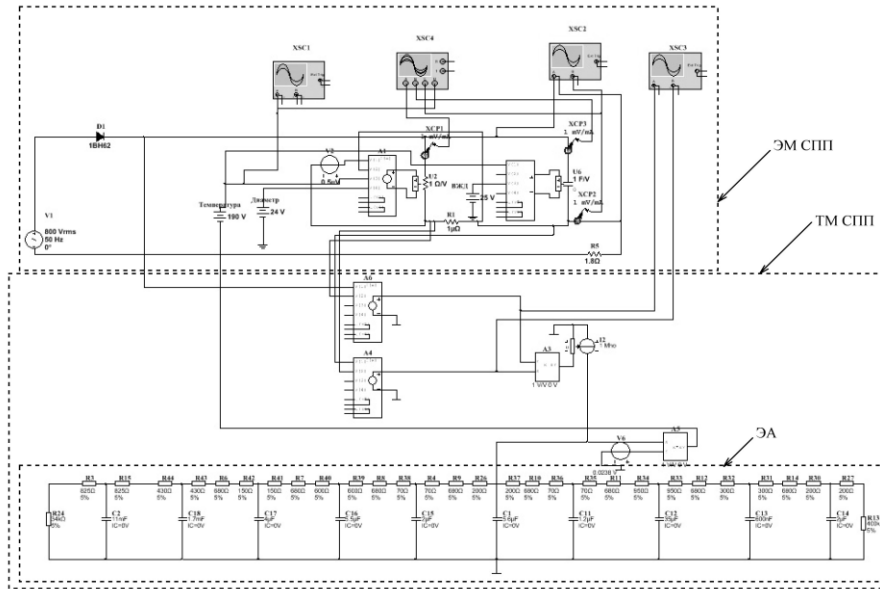


Рис. 2. Визуализация СПД в СВП с электрической и тепловой моделями, разработанные в программной среде Multisim

Для оценки электрических временных процессов в ПС СПД в СВП проведено их моделирование в схеме однофазного однократного выпрямителя с активной нагрузкой R_H при однократном воздействии импульса тока i_F . В качестве исследуемого прибора применялась эквивалентная схема замещения СПД типа Д161-200. Для исследования данной цепи применялась электротепловая модель СПД, изображённая на рис. 2, разработанная нами ранее в программной среде Multisim [2-5] на базе теории электротепловых процессов в СПД [1].

На рис. 2 представлены: ЭМ – электрическая модель СПП и ТМ – тепловая модель СПП, которые содержат:

ЭА – электронный аналог конструкции СПП, позволяющий моделировать тепловые процессы, протекающие в приборе на основе метода электротепловой аналогии;

R_F – нелинейное сопротивление СПП в СВП, управляемое напряжением;

C_d – диффузионная ёмкость СПП в СВП, управляемая напряжением;

A1 – блок управления нелинейным сопротивлением R_F ;

A2 – блок управления нелинейной ёмкостью C_d ;

A3 – множитель, предназначенный для определения значения активной мощности P_{tot} ;

A4 – вычитатель, предназначенный для определения сигнала с ТШ;

A5 – множитель, предназначенный для пересчёта напряжения в температуру ПС СПП;

A6 – вычитатель, предназначенный для определения напряжения на СПП.

Разработанные в программной среде Multisim ТМ вместе с ЭМ образуют электротепловую модель СПП, с помощью которой возможно проведение исследований электрических и тепловых процессов, протекающих в силовых диодах в СВП. Принцип работы схемы рассмотрен нами ранее, например, в [5]. Достоинством такого моделирования является применение аналитических зависимостей электрических процессов в ПС СПД в СВП с учётом воздействия на эти процессы тепловых воздействий.

На рис. 3-5 представлены результаты моделирования электрических процессов в ПС СПД исследуемого типа при протекании через него в СВП однократного импульса тока i_F полусинусоидальной формы длительностью 10 мс и амплитудой равной $3,14I_{пред} = 628$ А, где $I_{пред} = 200$ А есть величина предельного тока для данного типа СПД. Моделирование осуществлялось при начальных значениях температуры ПС равных: $T_{j1} = -40^{\circ}\text{C}$, $T_{j2} = +20^{\circ}\text{C}$ и $T_{j3} = +190^{\circ}\text{C}$.

Физические основы микроэлектроники

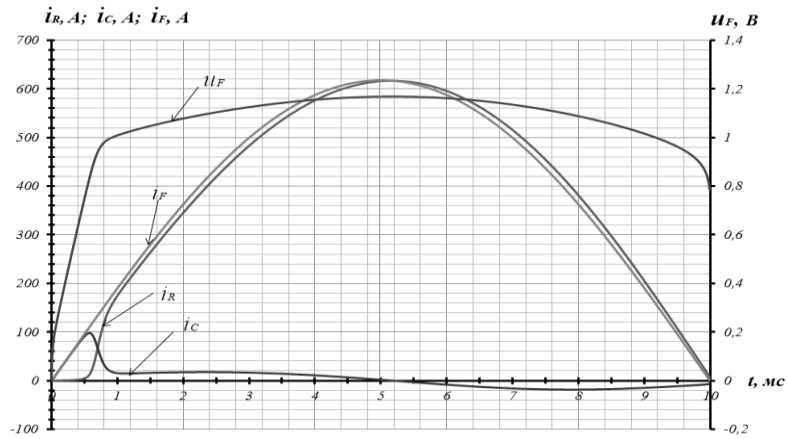


Рис. 3. Временные зависимости токов i_R , i_C , i_F через диод и падения напряжения на диоде u_F в СВП при $T_{j1} = -40^\circ\text{C}$

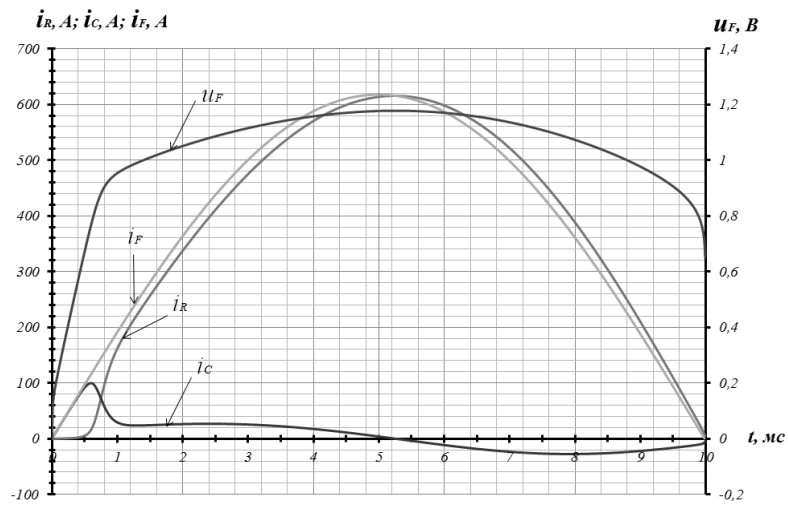


Рис. 4. Временные зависимости токов i_R , i_C , i_F через диод и падения напряжения на диоде u_F в СВП при $T_{j2} = +20^\circ\text{C}$

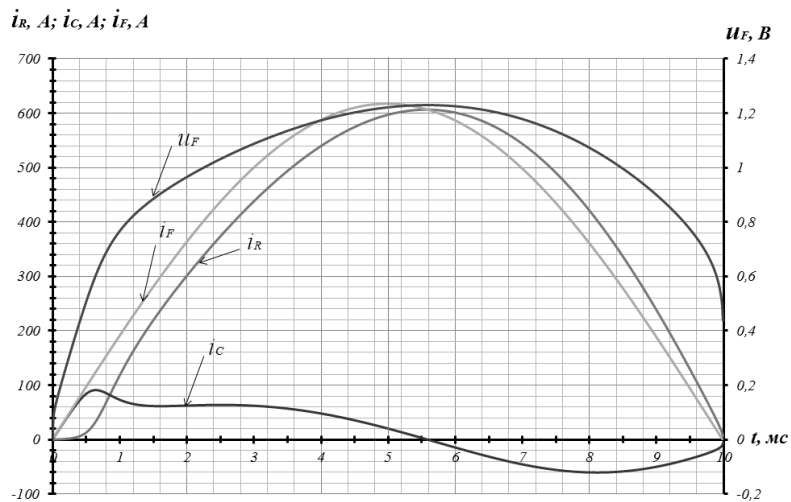


Рис. 5. Временные зависимости токов i_R , i_C , i_F через диод и падения напряжения на диоде u_F в СВП при $T_{j3} = +190^\circ\text{C}$

Представленные результаты моделирования, прежде всего, показывают существенное влияние на формирование временных зависимостей токов через диод и напряжения на нём при различных начальных значениях температуры T_j ПС. При этом наблюдается то, что амплитуда I_{RM} активной

составляющей i_R полного тока i_F не совпадает во времени с амплитудой полного тока I_{FM} , которая при полусинусоидальной форме тока формируется во временной точке 5 мс от начала его протекания. При этом переход ёмкостной составляющей i_C полного тока i_F через нулевое значение всегда сдвинут относительно этого момента на некоторый интервал времени, величина которого зависит от начального значения температуры T_j . ПС. Этот факт свидетельствует о том, что при снятии статической вольт-амперной характеристики СПД в СВП, по которой в дальнейшем определяются активные потери в СПД, а также в соответствии со стандартом [6] осуществляется определение их важнейших параметров, требуется учитывать этот эффект. Для точного определения активной энергии потерь в СПД необходимо объективно определять только активную составляющую тока i_R полного тока i_F .

Литература

1. Расчет силовых полупроводниковых приборов / П. Г. Дерменжи, В. А. Кузьмин, Н. Н. Крюкова, В. И. Мамонов. Под ред. В. А. Кузьмина. М.: Энергия, 1980. – 184 с.
2. Беспалов Н. Н. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов, С. В. Лебедев // Электроника и электрооборудование транспорта. – Томилино: Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод», 2012. – Вып. № 4. – С. 30–35.
3. Беспалов Н. Н. Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов, А. В. Капитонова // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – Вып. № 1. – С. 65–68.
4. Беспалов Н. Н. Описание модели силового диода в состоянии низкой проводимости. / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов // Вопросы образования и науки: теоретические и методические аспекты: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.- практич. конф. – Тамбов, 2015. – С. 20–23.
5. Беспалов Н. Н. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов, С. В. Лебедев // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2011. – Вып. №6. – С. 405–412.
6. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний: ГОСТ 24461-80. – Введ. 1980–12–18. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 62 с.: ил.

MODELING OF TEMPORARY ELECTRICAL PROCESSES IN POWER SEMICONDUCTOR DIODES IN A STATE OF HIGH CONDUCTIVITY UNDER VARIOUS VALUES OF THE TEMPERATURE OF THEIR SEMICONDUCTING STRUCTURE

N. N. Bespalov, S. S. Kapitonov, M. V. Il'in, A. V. Evishev

Mordovskiy State University n. a. N.P. Ogarev

This article explores the features and characteristics of power semiconductor devices in a state of high conductivity. Are graphs time dependences of current and voltage on the diode D161-200. The dependences of active and reactive components of the total current for different values of the temperature structure in a state of high conductivity.

ИЗБИТОЧНЫЕ ТОКИ В ДИОДАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

к. ф.-м.н. Стрельчук А. М.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

В 20е-40е годы 20-го века, благодаря работам О.В.Лосева, СССР имел мировой приоритет в исследовании диодных структур на основе карбида кремния, причем этот приоритет, в некоторых отношениях, касался полупроводников и полупроводниковых структур в целом. В 50е-80е годы исследования SiC активизировались в ряде других стран, в первую очередь США, ФРГ, Японии, однако и в это время по многим направлениям СССР имел приоритет. В частности, если говорить о диодных структурах, это приоритет в изготовлении и исследовании диффузионных SiC pn структур в первой половине 60х годов (когда был изготовлен корпусированный 6H-SiC диод с напряжением пробоя 800В); в выращивании слаболегированных кристаллов SiC (с легированием до 10^{16} см⁻³) также в 60е годы, на базе которых в первой половине 80х годов был изготовлен диод с напряжением пробоя около 1.5кВ (при этом впервые использовались специальные методы защиты периферии SiC pn меза-структур); в развитии эпитаксиальных технологий роста SiC (варианта сублимационной, а также бесконтейнерной жидкофазной эпитаксии) и имплантации, а также в разработке реактивного ионно-плазменного травления SiC, позволивших получить pn структуры с напряжением пробоя до 500 В и малым прямым

падением напряжения в середине 80х годов. ...С конца 80х начала 90х годов во всем мире резко возросла активность исследования SiC, что вывело технологию карбида кремния на уровень, почти сравнимый с кремниевой технологией по размеру подложек, минимальному и максимальному уровням легирования слоев n- и p-типа проводимости, дефектности (в то же время в СССР, а затем в России и других республиках бывшего СССР (в первую очередь, на Украине, где, наряду с Россией, наиболее активно занимались исследованием карбида кремния) произошел спад исследований SiC). Однако выявилась проблема деградации структур на основе карбида кремния. В настоящей работе мы приводим некоторые наблюдения, относящиеся к исходно неидеальным или к деградировавшим диодным структурам на основе карбида кремния.

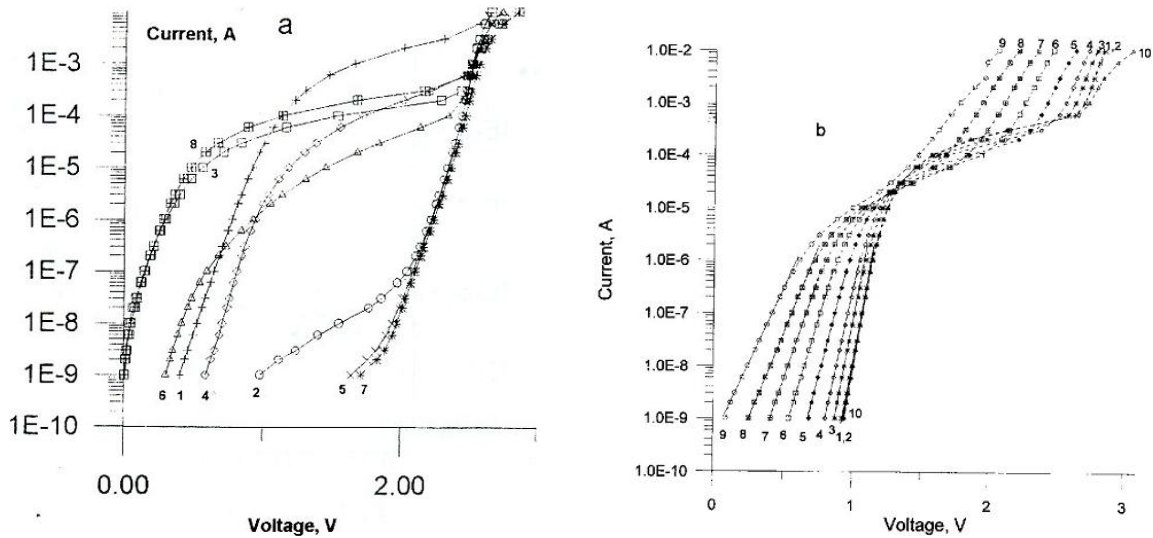


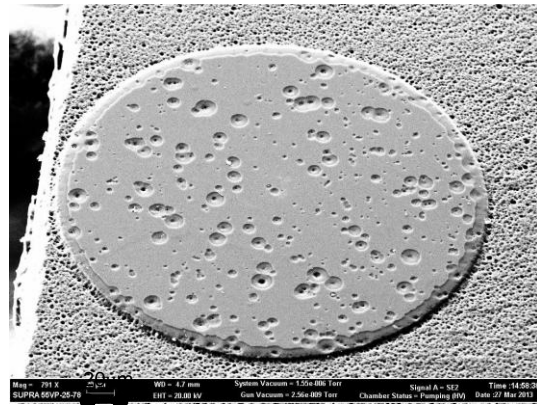
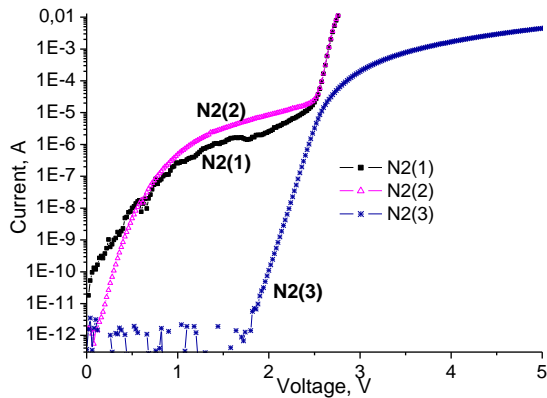
Рис. 1. Прямые I-V характеристики (а) восьми различных 6H-SiC pn структур на одной подложке при комнатной температуре; структуры 5 и 7 наиболее близки к идеальным [5]; (б) 4H-SiC pn структуры при различных температурах от 290 К (кривые 1, 2) до 684 К (кривая 9) и после охлаждения (кривая 10) [3]

Известно, что в pn структурах на основе узкозонных полупроводников (Ge) ток определяется рекомбинационно-генерационными процессами в квазинейтральных областях pn структуры. В широкозонных полупроводниках (Si) появляется ток, обусловленный рекомбинационно-генерационными процессами в области объемного заряда pn перехода [1]. Указанные токи, определяются фундаментальными объемными параметрами полупроводника, неизменными (такими, как ширина запрещенной зоны, эффективные плотности состояний в зонах), или трудно изменяемыми (времена жизни неравновесных носителей заряда). Pn структуры, в которых наблюдаются такие токи, можно назвать идеальными. Токи же, превышающие описанные, можно рассматривать как избыточные (в значительной степени связанные с какими-либо «избыточными» дефектами полупроводника). Данный подход можно использовать и для pn структур на основе различных политипов SiC, в которых экспериментально обнаружен и описан ток, описывающийся моделью [1] (параметры прямого тока, обусловленного рекомбинацией в области объемного заряда pn перехода, установлены для 6H-, 4H-, 3C-SiC pn структур (см., например, [2-4]).

Итак, среди SiC pn структур на основе любого из указанных политипов обнаруживаются структуры с прямыми токами, превышающими токи идеального pn перехода, т.е. с избыточными токами. Эти токи могут быть разного вида и не всегда поддаются систематизации, однако среди них оказалось возможным выделить и проанализировать характерный избыточный ток при прямом смещении [3-6]. Речь идет о случае, когда при малом смещении наблюдается избыточный ток, а при увеличении смещения при некотором достаточно большом токе вольт-амперная (I-V) характеристика таких структур переходит в I-V характеристику идеального перехода и, т.о., избыточный ток может рассматриваться как «утечка», работающая параллельно основному (идеальному) pn переходу, т.е. существует шунт основного перехода (Рис.1). Во многих случаях такой шунт является нелинейным шунтом, или шунтом барьерного типа (паразитным диодом). В значительном диапазоне токов I-V характеристика такого шунта является экспоненциальной: $I=I_0 \exp[qU/(nkT)]$; при дальнейшем увеличении тока в I-V зависимости наблюдается участок «насыщения». Наконец, среди шунтов барьерного типа удалось выделить шунты с коэффициентом идеальности n I-V характеристики близким единице, определить параметры I-V характеристики таких шунтов, на основании чего оценить высоту барьера и характерный размер паразитного диода. Высота барьера оказалась находящейся в пределах 1-1.5 эВ, а характерный размер по-видимому может изменяться от долей до единиц мкм.

Физические основы микроэлектроники

Описанный выше вид шунтов обнаруживается в рп структурах непосредственно после их изготовления и до каких-либо воздействий. Особый интерес представляют случаи возникновения шунтов такого же вида как результат функционирования рп структуры в каких-либо жестких условиях (вероятно, близких к экстремальным по какому-либо критерию). Примерами ситуаций, провоцирующих появление шунтов, являются: а) пропускание через рп структуру достаточно больших прямых токов: сотни A/cm^2 постоянного тока, или 5-10 kA/cm^2 и более импульсного тока, б) частичная деградация рп структуры после приложения достаточно большого обратного напряжения, в) функционирование структуры при повышенных температурах (в частности, пропускание большого прямого тока при температурах 700-800 К, или приложение больших обратных напряжений) (примеры см. в [3, 5, 6]). В 6H-SiC рп структурах [5] фактором, провоцирующим появление шунтов, был, по-видимому, высокотемпературный отжиг, использовавшийся для создания омических контактов.



а

б

Рис.2. а) Исходные прямые I-V характеристики 4H-SiC рп структуры N2 (кривые N2(1) и N2(2) – два последовательных измерения) и прямая I-V характеристика рп структуры N2 после удаления Al контакта к р-слою (кривая N2(3)); б) SEM изображение поверхности 4H-SiC рп структуры после удаления Al контакта к р⁺-слою.

В работе [3] было высказано предположение, что с учетом возможного варьирования площади и «качества» шунта значительная часть наблюдаемых экспериментально вариантов шунтирования может быть сводима к идеальному шунту барьерного типа с высотой барьера 1.3-1.4 эВ, и этот шунт является характерным для рп структур на основе α -SiC. В первой работе ([5]) было высказано предположение, что роль шунта может выполнять анизотипный гетеропереход на основе включений 3C-SiC в области рп перехода в 6H-SiC, однако исследование свойств 3C-SiC рп перехода [4] показало, что такой гетеропереход не может объяснять экспериментальные результаты и более вероятно наличие гетероперехода Si (или C) / α -SiC, также не исключался и шунт в виде диода Шоттки [3].

Некоторые доводы в пользу последней гипотезы (шунт в виде диода Шоттки) представлены в работе [6], где исследовались 4H-SiC рп структуры, изготовленные методом ионной имплантации. Но более убедительное подтверждение данная гипотеза получила в работах [7, 8], где продолжено исследование 4H-SiC рп структур, изготовленных методом ионной имплантации и где впервые удалось провести исследования дефектов структур прямыми методами. I-V характеристики большинства рп структур характеризовались наличием значительных избыточных токов, иногда нестабильных. После удаления с поверхности рп структуры алюминия, выполнявшего роль омического контакта к сильно легированному эмиттерному р⁺-слою, избыточные токи исчезли, а на поверхности структуры стали видны ямки разных размеров (Рис.2). Самые большие ямки имели размер около 3 мкм и гексагональную форму. Методами сканирующей электронной микроскопии, микроанализа, измерением тока, индуцированного электронным зондом, было показано, что глубина ямок, по крайней мере в случае ямок большого размера, превосходит толщину р⁻ слоя. Т.о., можно предположить, что при напылении металла (Al, в данном случае) на поверхность SiC наряду с омическим контактом к р⁻ слою через ямки в р⁺ слое образуется барьер Шоттки к слаболегированному п-слою (Рис.3). Причина появления ямок не ясна, но наиболее вероятным представляется появление ямок в результате высокотемпературного послеимплантационного отжига, который может рассматриваться, как сублимационное (термическое) травление. Кроме того, известно, что сублимация карбида кремния сопровождается графитизацией

Физические основы микроэлектроники

поверхности из-за нестехиометричности испарения SiC (данное явление лежит в основе активно используемого способа получения графена на поверхности SiC). Можно предположить, что в тех случаях, когда ямки (микротрубки) имеют малый размер и металл, напыляемый на поверхность SiC не достигает n-слоя через ямку, то, тем не менее, паразитный барьер Шоттки может образоваться, если на поверхности ямки присутствует тонкий (возможно не непрерывный) проводящий слой углерода. Затрудненный электрический контакт между поверхностью и n-слоем в случае дефекта в виде ямки малого размера или сложной формы может приводить к нестабильности избыточного тока.

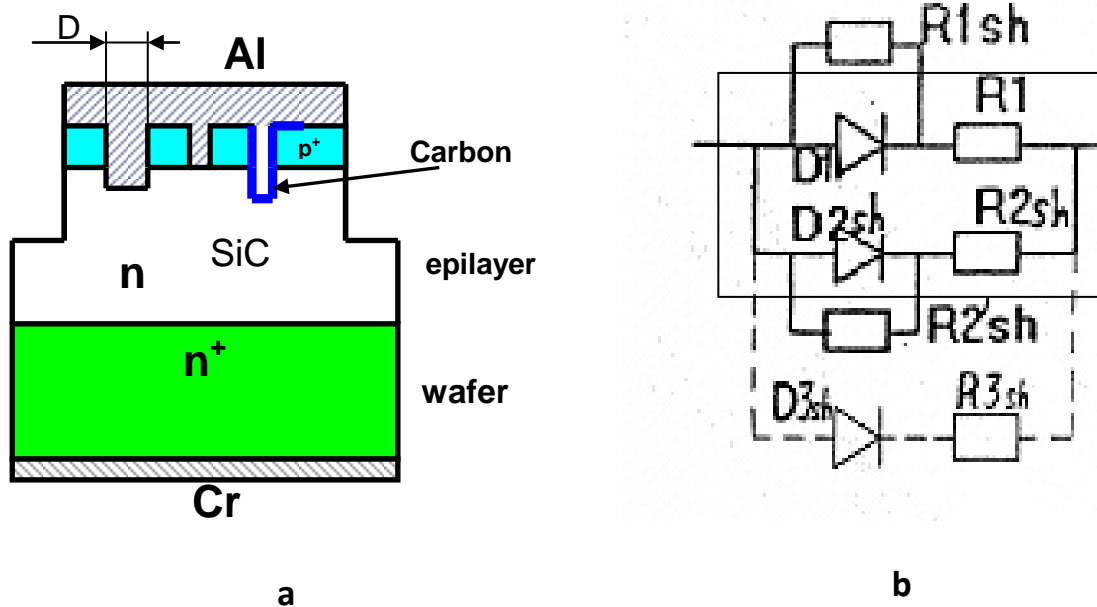


Рис.3. Схематический поперечный разрез (a) и эквивалентная схема (b) исследованных 4H-SiC pn структур; D1 и R1 - основной 4H-SiC pn переход и последовательное сопротивление pn структуры, D2sh и R2sh – шунт барьерного типа и его последовательное сопротивление, R1sh и R2'sh – сопротивления, шунтирующие основной pn переход и шунт барьерного типа соответственно, D3sh и R3sh – возможный третий шунт; прямоугольная рамка выделяет простейший вариант шунтирования с участием шунта барьерного типа.

Если для диодов на основе карбид кремниевых pn структур задача вычленения избыточного тока достаточно легко формализуема, то в случае диодов на основе барьеров Шоттки на SiC эта задача гораздо сложнее. Известно, что рассчитываемая по разности работ выхода величина контактной разности потенциалов барьера Шоттки не соответствует экспериментально определяемой величине практически для всех полупроводников. В случае контакта металл/поверхность SiC параметры диода Шоттки могут изменяться при использовании разных металлов, ориентации подложки, уровня легирования SiC, методов подготовки поверхности и способов напыления металла. Но, более того, оказывается, что такие характеристики диода Шоттки, как высота барьера, напряжение пробоя, последовательное сопротивление могут существенно различаться даже для соседних диодов на одном кристалле SiC [9, 10, 6]. Само по себе данное наблюдение наводит на мысль, что свойства диодов Шоттки зависят от каких-то локальных особенностей полупроводника в месте контакта с металлом. Аргумент в пользу существенности такого предположения дало исследование Ni/4H-SiC диодов Шоттки до и после облучения ионами He⁺ [10]. До облучения >90% диодов Шоттки можно считать почти идеальными по такому признаку, как близость к 1 коэффициента идеальности I-V характеристики. Однако отдельные диоды Шоттки демонстрируют избыточный ток (с коэффициентом идеальности также близким 1), по внешним проявлениям аналогичный вышеописанному в SiC pn структурах, в том числе иногда нестабильный. Кроме того, для некоторых диодов последовательные измерения I-V характеристик одного и того же диода с первоначально (при первом измерении) почти идеальными I-V характеристиками демонстрируют появление и постепенное увеличение избыточного тока при каждом последующем измерении и этот избыточный ток стремится к некоторому пределу. Облучение диодов Шоттки ионами He⁺ относительно малыми дозами привело к ожидаемому эффекту роста последовательного сопротивления и к неожиданному эффекту значительного разброса величин этого последовательного сопротивления у разных диодов. Ясность внесло облучение большой дозой, приведшее к полной компенсации эпитаксиального слоя. Разброс последовательного сопротивления при этом достиг 12 порядков (20·10¹³ Ом). Максимальное сопротивление (>10¹² Ом) характеризует идеальные диоды

Шоттки, остальные диоды характеризуются сопротивлением, находящимся в основном в пределах 10^2 - 10^5 Ом, определяемым сопротивлением шунта и подложки. Роль шунта в данном случае выполняет второй, паразитный диод Шоттки меньшей площади и меньшей высоты барьера, чем основной диод Шоттки, и образуемый за счет контакта Ni с сильно-легированной подложкой SiC с участием какого-то дефекта эпитаксиального слоя.

Таким образом, в диодах на основе карбида кремния обнаружены и описаны избыточные токи, обусловленные наличием шунта барьерного типа, т.е. паразитного диода, включенного параллельно основному диоду. В некоторых случаях паразитный диод присутствует уже в исходных структурах и в этом случае его наличие обусловлено, возможно, высокотемпературными операциями при изготовлении диодов. В других случаях паразитный диод появляется в процессе эксплуатации диода и, по-видимому, его появление может быть обусловлено как повышенной температурой, так и токопротеканием. Оцениваемая высота барьера паразитного диода лежит в пределах 1-1.5 эВ, а его характерный размер («диаметр») D порядка 1 мкм. В двух случаях удалось установить, что паразитный диод является скорее всего естественным, непреднамеренно получившимся диодом Шоттки, шунтирующим в случае pn структуры эмиттерный p^+ -слой, а в случае диода Шоттки, - эпитаксиальный слаболегированный слой.

Литература

1. C.-T. Sah, R.N. Noyce, W. Shockley, Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics, Proc.of the I.R.E. 45 (1957) 1228-1243.
2. А.М. Стрельчук, Времена жизни и диффузионные длины неравновесных носителей заряда в SiC pn структурах // ФТП 29 (1995) 1190-1206.
3. А.М. Strel'chuk, N.S. Savkina, Ideal 4H-SiC pn junction and its characteristic shunt, Mater. Sci. Eng. B80 (2001) 378-382.
4. А.М. Strel'chuk, V.S. Kiselev, S.F. Avramenko, Thermal injection current in 3C-SiC pn structures, Mat. Sci. & Ing. B61-62 (1999) 437-440.
5. А.М. Strel'chuk, V.V. Evstropov, M.G. Rastegaeva, E.P. Kuznetsova, Shunting patterns occurring in epitaxial 6H-SiC p-n structures for high-voltage rectifiers, Mat. Sci. & Ing. B46 (1997) 231-235.
6. А.М. Strel'chuk, E.V. Kalinina, Recombination and excess currents in 4H-SiC structure with low-doped n-region, Mater. Sci. Forum 740-742 (2013) 565-568.
7. А.М. Strel'chuk, E.V. Kalinina, A.A. Lebedev, I.K. Boricheva, V.V. Pavshukov, Variant of excess current in 4H-SiC pn structures, Mat. Sci. Forum 778-780 (2014) 859-862.
8. А.М. Strel'chuk, E.B. Yakimov, A.A. Lavrent'ev, E.V. Kalinina, A.A. Lebedev, Characterization of 4H-SiC pn structures with unstable excess current, Mat. Sci. Forum 821-823 (2015) 648-651.
9. А. М. Strel'chuk, M. G. Rastegaeva, Characterization Schottky barriers occurring at the metal-6H-SiC contact based on results of studies of current-voltage characteristics, Mat. Sci. & Ing. B46 (1997) 379-382, см. также А. М. Strel'chuk, E. V. Kalinina, G. A. Onushkin, A. O. Konstantinov, A. Hallén, Features of current-voltage characteristics of Cr Schottky diodes based on low-doped 4H-SiC, V International seminar on Silicon Carbide and Related Materials (ISSCRM-2004), Abstracts, Velikiy Novgorod, Russia (2004) 116-117.
10. А.М. Strel'chuk, A.V. Davydov, J. Tringe, T. Felter, A.A. Lebedev, V.V. Zelenin, A.N. Kuznetsov, C.G. Stevens, Characteristics of He^+ - irradiated Ni Schottky diodes based on 4H-SiC epilayer grown by sublimation, Solid State Phys. 6 (2009) 2876-2878.

THE EXCESS CURRENTS IN THE DIODES BASED ON SILICON CARBIDE

A. M. Strelchuk

The Ioffe Institute of RAS

In the diodes based on silicon carbide the excess currents due to the presence of a barrier type shunt (i.e., due to a parasitic diode connected in parallel to the principal diode) were found. In some cases, a parasitic diode exist already in the original structures, and in this case its presence is due, perhaps, high temperature operations in the manufacture of diodes. In other cases, the parasitic diode appears in the process of operation of the diode and, apparently, its appearance can be due to both increased temperature and current passing. Estimated barrier height of the parasitic diode is in the range 1-1.5 eV, and the characteristic size (diameter) is about 1 μ m. In two cases it was possible to establish that a parasitic diode most likely is natural, unintentional Schottky barrier, shunted emitter p^+ - layer in the case of pn structures, , and low-doped epitaxial layer in the case of Schottky diode.

РАСШИРЕНИЕ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ЧАСТОТ ФОТОПРИЕМНИКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЗОЛОТОМ, ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

к.ф.-м.н Никишин Е.В., к.ф.-м.н. Гришаев В.Я., Пескова Е.Е.

Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева

В случае быстрого изменения интенсивности светового импульса J , когда для большей области временного интервала справедливо неравенство $J(t) \left/ \left| \frac{dJ(t)}{dt} \right| \ll \max(\tau_n, \tau_p) \right.$ (τ_n, τ_p – времена жизни электронов и дырок соответственно), зависимость тока от времени в полупроводниковом датчике существенно отличается от временной зависимости интенсивности оптического сигнала [1, 2]. Возникающие при этом искажения приводят к потере информации. В работах [1, 2] показана возможность восстановления зависимости $J(t)$ импульсов произвольной формы по электрическому отклику, возникающему в полупроводниковом фотоприемнике, при выполнении указанного выше условия. Для восстановления временной зависимости оптического сигнала в области высоких частот можно использовать фотоэлектрические элементы (ФЭУ). Это приводит к необходимости применения высоких напряжений и, соответственно, к громоздкости установки. В работах [3 – 6] исследована возможность получения зависимости интенсивности света от времени ($J = J(\omega t)$), изменяющейся с частотой ω , по зависимости фототока в полупроводниковом фоторезисторе от времени ($j = j(\omega t)$). В [7] исследованы искажения, возникающие при применении предложенного способа в области высоких частот, когда справедливо условие $\omega \gg \max(\tau_n^{-1}, \tau_p^{-1})$. В [1, 3 – 5, 7] теоретически исследованы модели фотоприемника изготовленного на основе кремния с рекомбинационными центрами индия. Использование полупроводниковых материалов позволяет миниатюризировать фотодатчики, предназначенные для получения зависимостей $J = J(\omega t)$. Кроме того, предложенный способ позволяет существенно расширить частотную область работы фотодатчика.

В данной работе проведен анализ модели фоторезистора, изготовленного на основе кремния, легированного золотом с целью его использования для получения зависимостей $J(t)$ или $J(\omega t)$ в области высоких частот. Проведено исследование искажений при различных концентрациях акцепторных центров золота. Определена область частот, для которой справедлив способ восстановления оптических импульсов. Золото – хорошо изученная глубокая примесь в кремнии. Она образует в запрещенной зоне глубокие уровни: донорный ($E_c - 0.35$ eV; $(0/+)$) и акцепторный ($E_v + 0.55$ eV; $(-/0)$) [8], концентрации которых N_d и N_a соответственно. В [8] показано, что в кремнии n-типа за эти уровни отвечают разные центры. Там же приведены параметры рекомбинационных центров. Вероятности захвата электронов и дырок на акцепторные и донорные уровни золота соответственно равны: $\sigma_{na} = 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{pa} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{nd} = 6,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{pd} = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

При рекомбинации через глубокие центры возникает необходимость учитывать их разные зарядовые состояния и разную глубину залегания в запрещенной зоне. При возбуждении полупроводника, например, светом происходит изменение вероятности нахождения электрона на глубоком центре. Все это приводит к существенным нелинейностям кинетических уравнений [9 – 14]. Уравнения, описывающие кинетику неравновесных носителей заряда – в работе представлены в работе [3, 6]. При составлении кинетических уравнений следует учитывать медленную реакцию захвата электронов незаряженными донорными центрами, которая может существенно изменять зарядовые состояния центров при длительном возбуждении полупроводника светом [14].

Проведено исследование искажений, возникающих при восстановлении зависимости интенсивности оптического излучения от времени [7]. Коэффициент нелинейных искажений рассчитывался по формулам:

$$K = \frac{1}{|c_1|} \sqrt{\sum_i |c_k|^2}, \text{ здесь } c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} j'_t(\tau) \cdot e^{-i \cdot k \cdot \omega \cdot \tau} d\tau, \quad (1)$$

Частотные искажения оценивали, используя коэффициент $Y(\omega_i)$, равный отношению амплитуды восстановленного сигнала для фиксированной частоты $j'_t(\omega_i)$ к максимальной амплитуде восстановленного сигнала $\max(j'_t)$ в рабочей области частот ω :

$$Y(\omega_i) = \max \left| j'_t(\omega_i \cdot t) \right| / \max \left[j'_t(\omega \cdot t) \right], \quad \omega_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (2)$$

Для оценки фазовых искажений определяли угол β сдвига между восстановленным гармоническим импульсом и импульсом интенсивности от частоты. Восстановленный импульс отстает по фазе от импульса возбуждения.

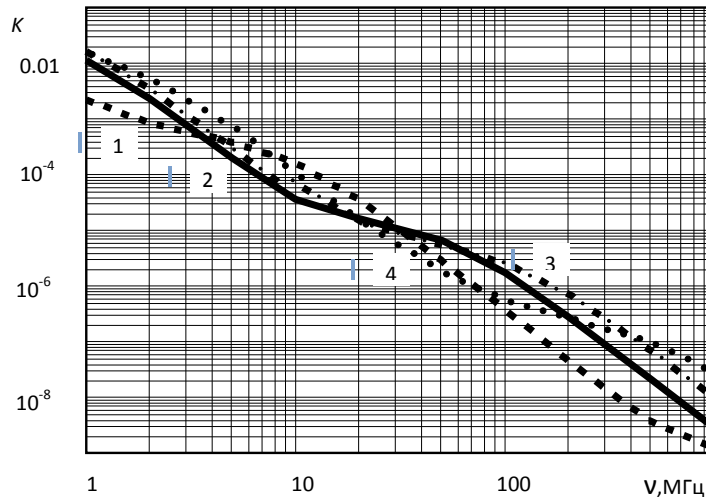


Рис. 1. Зависимости коэффициента K , характеризующего нелинейные искажения оптического сигнала, от частоты следования гармонических импульсов света

Для практического использования предложенного способа восстановления формы оптического сигнала по электрическому с минимальными искажениями необходимо иметь относительно большую глубину амплитудной модуляции фототока M :

$$M = (j_{\max} - j_{\min}) / (j_{\max} + j_{\min}) \quad (3)$$

При расчетах использованы следующие параметры: переменная составляющая темпа генерации изменялась по гармоническому закону – $g(\omega t) = 10^{20}(1 - \cos(\omega t)) \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; концентрация донорных центров золота равна $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; концентрация равновесных электронов – $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Концентрация рекомбинационных (акцепторных) центров золота при расчетах кривых рис. 1 – 4: для кривой 1 – $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; для кривой 2 – $N_a = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; для кривой 3 – $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; для кривой 4 – $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

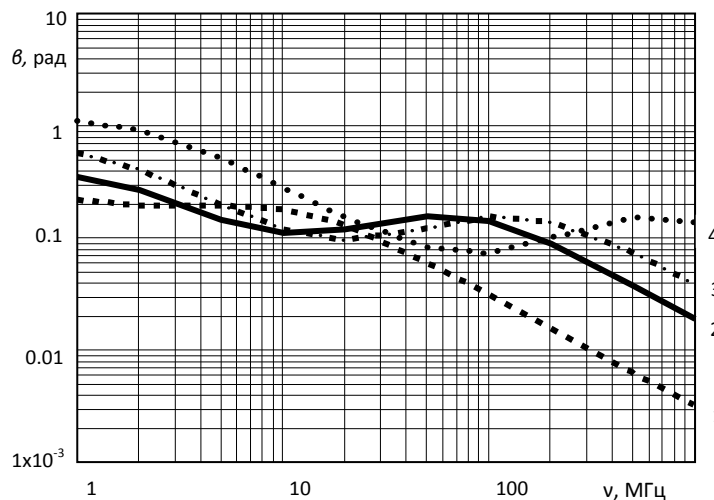


Рис. 2. Зависимости угла сдвига фаз восстановленного сигнала от частоты следования гармонических импульсов света

На рис. 1 изображены зависимости $K = K(\omega)$. Практически во всей области частот не зависимо от концентрации рекомбинационных центров влиянием нелинейных искажений на форму гармонического

восстановленного импульса можно пренебречь. Для частот, где осуществляется восстановление импульсов $\omega \gg \max(\tau_n^{-1}, \tau_p^{-1})$ $K < 10^{-3}$.

Неодинаковый сдвиг во времени отдельных гармонических составляющих сложного сигнала приводит к фазовым искажениям. Фазовыми искажениями часто можно пренебречь, если сдвиг фаз в интересующей области частот относительно мал. Результаты исследований зависимости сдвига фаз от частоты при различных концентрациях рекомбинационных центров представлены на рис. 2. Сдвиг фаз существенно может повлиять на искажения сложных периодических импульсов возбуждения, поскольку величина β значительна вплоть до частот 200 МГц. Увеличение концентрации рекомбинационных центров золота сдвигает область применения способа восстановления оптических импульсов в область больших частот. На кривых $\beta = \beta(\omega)$ имеет экстремумы: минимум, затем максимум. С увеличением N_a экстремумы сдвигаются в область больших частот.

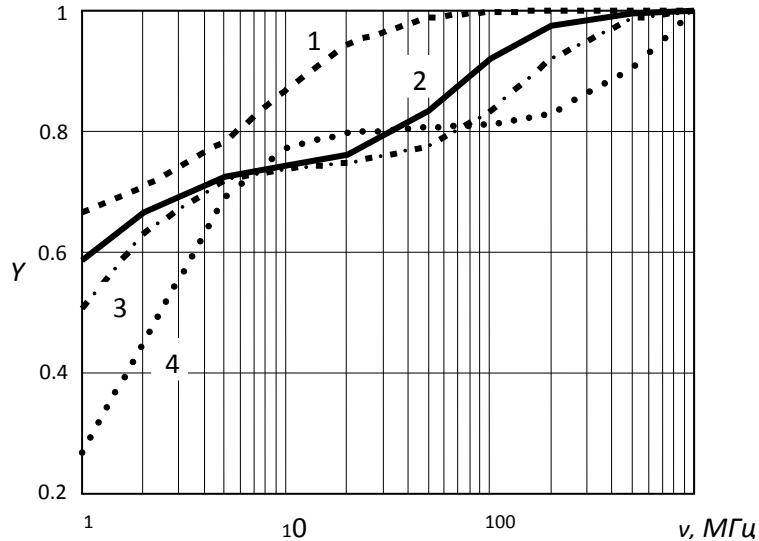


Рис. 3. Зависимости линейных (амплитудных) искажений сигнала от частоты следования гармонических импульсов света

Зависимости $Y(\omega)$ представлены на рис. 3. С увеличением концентрации акцепторных центров область применения исследуемого способа сдвигается в сторону больших частот. Однако, при больших концентрациях N_a появляется достаточно широкая область частот, где $Y(\omega) = \text{const}$ (кривая 4 рис. 3). В этой области частотными искажениями можно пренебречь.

Восстановление формы оптического сигнала по электрическому требует достаточно большую глубину амплитудной модуляции фототока. Это необходимо для практического использования предложенного способа. Глубина модуляции определяется параметрами полупроводника, параметрами центров захвата, центров рекомбинации и частотой следования импульсов возбуждения. На рис. 4 представлена зависимость глубины амплитудной модуляции силы тока от частоты. Увеличение концентрации рекомбинационных центров золота приводит к увеличению глубины модуляции, что может скомпенсировать искажения связанные со сдвигом фаз. То есть это дает возможность использования предложенного метода в области больших частот. Глубина модуляции практически линейно уменьшается с увеличением частоты. В области высоких частот значение M становится малым, что неизбежно приводит к трудностям применения данного метода.

При исследовании зависимости искажений от концентрации акцепторных уровней, было выявлено, что с увеличением концентрации рекомбинационных центров увеличивается величина коэффициента нелинейных искажений. Дополнительно появляется достаточно широкая область частот, где частотные искажения малы $Y(\omega) = \text{const}$. Увеличение N_a увеличивает фазовые искажения и величину глубины модуляции. Последнее дает возможность использования предложенного метода в области больших частот. Фотоприемник, изготовленный на основе кремния, легированного золотом можно использовать для восстановления зависимостей $J(t)$ в области частот 0,01 – 1 ГГц.

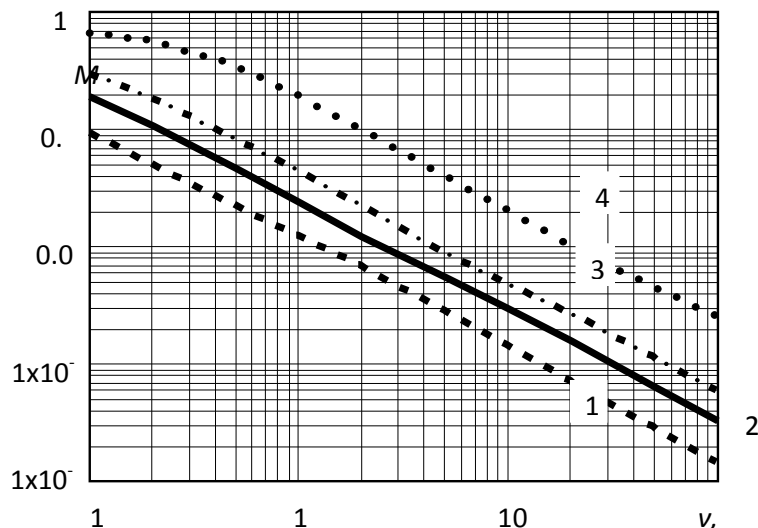


Рис. 4. Зависимости глубины модуляции электрического сигнала от частоты следования гармонических импульсов света

Литература

1. Горюнов В.А., Гришаев В.Я., Никишин Е.В., Пескова Е.Е. Использование фотоприемников, изготовленных на основе кремния, для восстановления временной формы оптических сигналов малой длительности // Труды 4 Всероссийской конференции (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации», – 2014 г, – С.175 – 179.
2. Мхитарян В. М., Партамян Х. В. Скоростные фотоприемники импульсного излучения на основе «инерционных» фоторезисторов и фотодиодов // ЖТФ. – 1982. –Т. 52. – № 9, С. 1900 – 1902.
3. Горюнов В.А., Гришаев В.Я., Никишин Е.В. Кинетика фотопроводимости при возбуждении высокочастотными импульсами.// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2012. –№ 4. – С. 242 – 250.
4. Гришаев В.Я., Никишин Е.В. Пескова Е.Е. Способ восстановления формы оптических сигналов с длительностью меньшей постоянной времени фотоприемника // Труды 1-й российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой 110-ю со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. А. Э. Рассадина. — Н. Новгород.: НИЖЕГОРОДСКАЯ РАДИОЛАБОРАТОРИЯ. 2013. В 2-х т. Т. 1. С. 42 – 45.
5. Гришаев В.Я., Никишин Е.В. Фотоэлектрический преобразователь высокочастотного оптического сигнала.// Патент №132287. 2013. – С. 1526 – 1529.
6. Мурюмин С.М., Никишина А.Е., Никишин Е.В. Использование кремния легированного золотом для определения формы оптического сигнала.// Журнал Средневолжского математического общества. – 2014. – Т. 16. – № 1. – С. 140 – 144.
7. Никишин. Е.В. О границах применимости способа восстановления временной формы модулированных оптических сигналов с частотой выше граничной частоты фоторезистора.//ФТП. – 2014. – Т. 48. – № 11.
8. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977. 568 с.
9. Lang D.V., H.G. Grimmeiss H.G., Meijer E., Jaros M. Complex nature of gold-related deep levels in silicon. // Phys. Rev. – 1980. – В. 22, С. 3917 – 3925.
8. Горюнов В.А., Гришаев В.Я., Никишин Е.В. Об изменении времен жизни носителей заряда при импульсном фотовозбуждении в кремнии с глубокими примесными центрами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. - №4. – С. 118-126
10. Денисов Б.Н., Никишин Е.В. Исследования кинетики неравновесных носителей в полупроводнике по среднему значению фотопроводимости при периодическом оптическом возбуждении // ФТП. 2014, – Т. 48. – №52. – С.175 – 178
11. Каражанов С. Ж. Свойства точно компенсированных полупроводников // ФТП. – 2000. – Т. 34(8). – С. 909 – 916.
12. Холоднов В.А. Влияние концентрации рекомбинационных центров на фотоэлектрический отклик полупроводников.// Успехи прикладной физики. – 2015. – Т.3. – №8. С. 254 – 280.
13. Серебренников П. С., Холоднов В. А. Характер зависимости времен жизни электронов и дырок от концентрации основной рекомбинационной примеси при наличии побочных центров захвата носителей.// Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – № 24. – С. 58 – 63.

14. Баграев Н.Т., Машков В.А. Туннельные центры с отрицательным U и фотостимулированные реакции в полупроводниках. // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Т. 39(5), – С. 211 – 213.

nikishin57@mail.ru

EXPANSION OF WORKING AREA OF FREQUENCIES OF THE PHOTODETECTORS MADE ON THE BASIS OF THE SILICON ALLOYED BY GOLD AT THEIR USE FOR RESTORATION OF TEMPORARY DEPENDENCE OF HIGH-FREQUENCY OPTICAL IMPULSES

E. V. Nikishin, V. Y. Grishaev, E. E. Peskova

Mordovskiy State University n. a. N.P. Ogarev

Investigated the distortions that arise when restoring high-frequency optical signals. In the calculations we used the parameters, which are specific to the photodetector, made on the basis of silicon with recombination centers of gold. Increase in ω reduces nonlinear, frequency and phase distortions. The photodetector made on the basis of the silicon alloyed by gold can be used for restoration of dependences of $J(t)$ in the field of the frequencies of 0,01 - 1 GHz.

КРИОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСХЕМЫ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТРОЛОГИИ

д.ф.-м.н. Клушин А.М.^{1,2}, Хоршев С.К.², Рогожкина Н.В.²,
к.ф.-м.н. Пестов Е.Е.¹, к.ф.-м.н. Левичев М.Ю.¹

¹ Институт физики микроструктур РАН

² ОАО «ФНПЦ «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» им. А.П. Горшкова»

Решение многих задач в области разработки перспективных как аналоговых, так и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники связывается в настоящее время с использованием многоконтактных джозефсоновских структур. Среди них особое место занимают когерентно осциллирующие цепочки джозефсоновских контактов, которые используются как при разработке генераторов джозефсоновского излучения, так и в эталонах напряжения. Основой использования эффекта Джозефсона [1] в метрологии является тот факт, что под воздействием внешнего электромагнитного поля с частотой f на вольтамперной характеристике (ВАХ) контакта возникают ступени тока при напряжениях:

$$V_J = nf / K_J, \quad (1)$$

где $K_J = 483,5979$ ГГц/мВ – постоянная Джозефсона, а n – номер ступени, целое число. Справедливость соотношения (1), его независимость от условий эксперимента (материалов, температуры, типа контактов) является фундаментальным условием для использования джозефсоновских контактов в метрологии. В наиболее точных экспериментах было показано, что K_J в различных металлических сверхпроводниках совпадает с относительной неопределённостью лучше, чем 3×10^{-19} [2]. Таким образом, величина постоянного напряжения V_J определяется только квантовыми константами и частотой облучения.

Джозефсоновские эталоны с выходным напряжением 1 В и 10 В и относительной неопределённостью около $(1-5) \times 10^{-9}$ используются в качестве национальных эталонов во многих странах мира. Их основу составляет криоэлектронная микросхема, которая содержит около 70000 ниобиевых джозефсоновских контактов и имеет выходное напряжение до 10 В. Государственный эталон вольта, основанный на эффекте Джозефсона и воспроизводящий единицу при напряжениях 1 В и 10 В находится в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. С.Петербург [3]. Вторичные джозефсоновские эталоны напряжения с относительной неопределённостью выходного напряжения $(1-3) \times 10^{-7}$ были введены в метрологическую практику в ФГУП «ВНИИМС», г. Москва, (выходное напряжение 10 В) [4], а также в ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Менделеево Московской области (выходное напряжение 1 В) [5] и Восточносибирском филиале, г. Иркутск (выходное напряжение 1 В) [6]. В эталонах напряжения этих организаций используются многоконтактные джозефсоновские микросхемы, изготовленные из ниобия либо в метрологическом центре ФРГ [7], либо в фирмах ФРГ [8] или США [9]. В связи с этим отметим два обстоятельства, которые, по нашему мнению, сдерживают широкое применение таких приборов в России, например, в региональных центрах стандартизации, метрологии и испытаний (ЦСМ). Во-первых,

Физические основы микроэлектроники

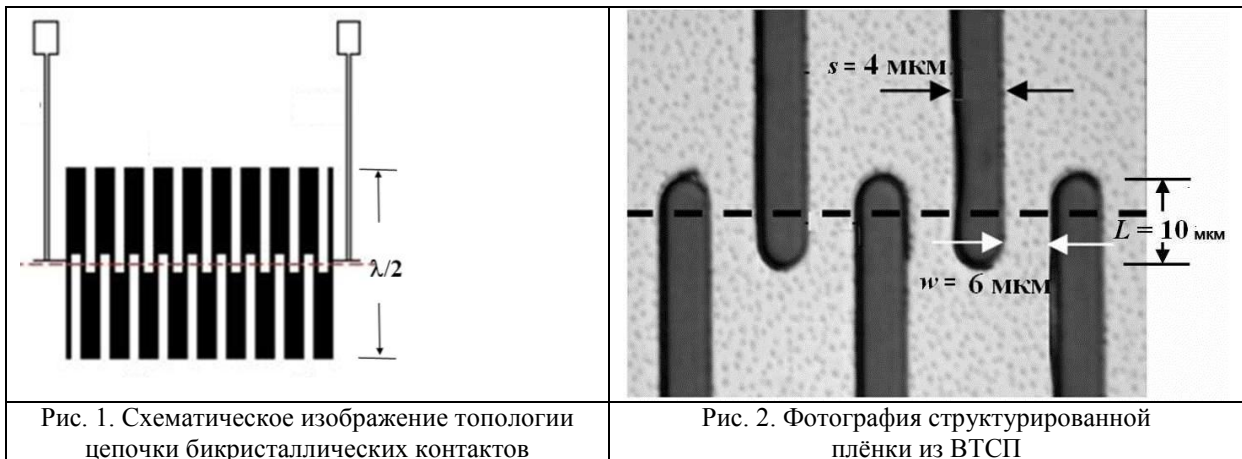
в настоящее время в России такие микросхемы не изготавливаются. Во-вторых, для работы ниобиевых микросхем необходимо применение жидкого гелия, что обуславливает большие эксплуатационные расходы.

В настоящее время в состав эталонов единицы электрического напряжения включены меры напряжения на стабилитронах фирмы Fluke [10]. Эти приборы имеют выходные напряжения 1 В и 10 В. Относительная нестабильность за год выходного напряжения не нормируется, а нестабильность 10 В равна $\pm 2 \times 10^{-6}$. Таким образом, по своим параметрам меры напряжения на стабилитронах не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам, но широко используются в ЦСМ в качестве рабочих эталонов 1-ого разряда. Конкурентоспособными с полупроводниковыми приборами могут стать меры напряжения с встроенными микросхемами на джозефсоновских контактах из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с азотным уровнем охлаждения и выходным напряжением от 0 до 10 В и относительной неопределённостью порядка 5×10^{-8} .

Для применения в эталонах напряжения используют многоконтактные джозефсоновские схемы. Это связано с тем, что квантованное напряжение (1), возникающее на одном контакте под воздействием внешнего электромагнитного поля, обычно мало и не превышает 150 мкВ. Для увеличения выходного напряжения микросхемы V джозефсоновские контакты соединяют последовательно и пропускают через них общий ток смещения. Параметры контактов и условия их работы выбираются таким образом, чтобы на каждом контакте возникало напряжение (1), а суммарное напряжение было равно:

$$V = NV_J, \quad (2)$$

где N – количество джозефсоновских контактов. Условие (2) накладывает жесткие ограничения на разброс параметров контактов и высокие требования к равномерности их облучения внешним сигналом с частотой f . Как было показано ранее [11], выполнение условия (2) возможно при работе на первой суммарной ступени тока ($n = 1$), если использовать джозефсоновские контакты с примерно одинаковыми нормальными сопротивлениями R и характерной частотой $f_c \leq f$, где $f_c = K_J I_c R$, а I_c – критический ток контакта. Выводы, полученные в [11] для контактов из ниобия были подтверждены позднее при изучении цепочек джозефсоновских контактов из ВТСП [12].



На современном этапе технология, основанная на использовании бикристаллических контактов, позволяет изготавливать цепочки джозефсоновских контактов на основе высокотемпературных сверхпроводников с требуемыми параметрами. Проведенные ранее исследования [13] показали перспективность использования подложек из окиси циркония, стабилизированной иттрием (YSZ), для создания многоконтактных джозефсоновских схем с целью их применения в метрологии. Основные этапы технологии включают в себя выбор подходящей бикристаллической подложки, выращивание на этой подложке эпитаксиальной тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника, формирование рисунка схемы методами фотолитографии и ионного травления.

В последнее время в ИФМ РАН и ННИПИ «КВАРЦ» была разработана технология изготовления таких микросхем. Для напыления используются бикристаллические подложки из YSZ с углом разориентации кристаллических осей $2 \times 12^\circ$. На этих подложках размером 10×10 мм и толщиной 0.5 мм выращивается при температуре 665°C эпитаксиальная пленка из высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) толщиной 120 нм, которая покрывается затем тонким слоем золота, толщиной 30 нм [14]. Плёнка золота напыляется при температуре около 100°C в одном вакуумном цикле с YBCO, что гарантирует низкие удельные контактные сопротивления порядка 10^{-8} Ом \times см² между двумя слоями. Двухслойная пленочная структура используется для создания цепочек шунтированных бикристаллических контактов. Шунтирование контактов необходимо для уменьшения разброса их нормальных сопротивлений, что, как отмечалось ранее, является одним из условий реализации условия

Физические основы микроэлектроники

(2). Микросхема изготавливается с помощью фотолитографии и последующего травления пленок Au и YBCO ионами Ag⁺. В результате формируется цепочка джозефсоновских контактов в виде меандра, схематически изображенная на рис. 1. На рис. 2 приведена в увеличенном масштабе фотография центральной части схемы. Бикристаллическая граница отмечена пунктирной линией. Контакты Джозефсона образуются в месте пересечения бикристаллической границы тонкоплёночными мостиками из ВТСП шириной $w = 6$ мкм и длиной $L = 10$ мкм. Топология микросхемы (рис.1) была разработана с учётом оптимизации взаимодействия массива джозефсоновских контактов с внешним электромагнитным полем. Для этого высота меандра, т.е. размер меандра в направлении перпендикулярном вектору электрического поля, была выбрана равной $\lambda_{\text{eff}} / 2 = 0,48$ мм, где λ_{eff} – эффективная длина волны в подложке. Таким образом, каждый полосок меандра образует полуволновой резонатор на частотах порядка 75 ГГц с максимумом тока в его центре в области джозефсоновского контакта.

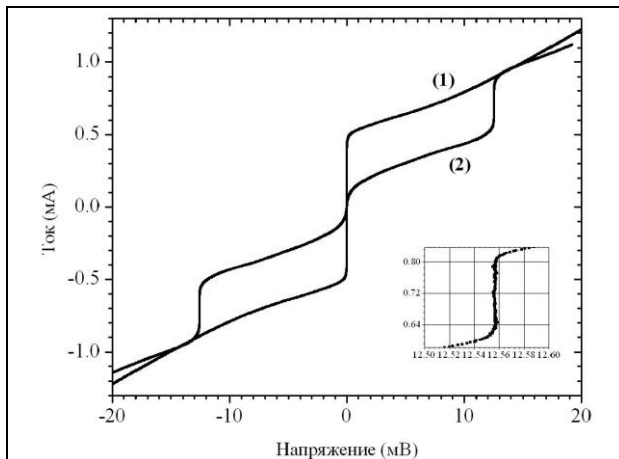


Рис. 3. ВАХ 81 джозефсоновского контакта без (1) и при облучении (2) сигналом на частоте $f = 74965,6$ МГц. На вставке показана в увеличенном масштабе ступенька тока при напряжении 12,556 мВ

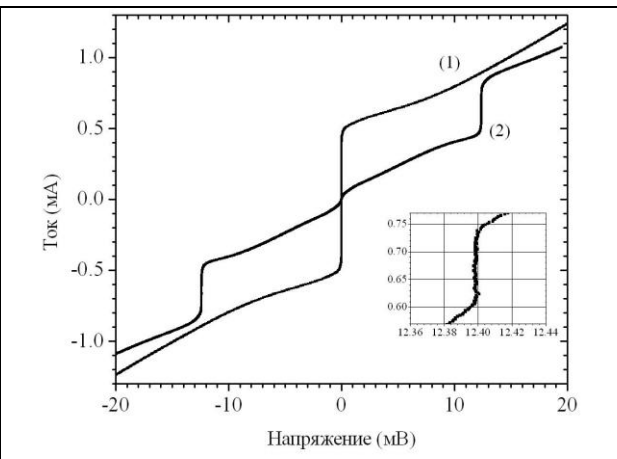


Рис. 4. ВАХ 80 джозефсоновских контактов без (1) и при облучении (2) сигналом на частоте $f = 74965,6$ МГц. На вставке показана в увеличенном масштабе ступенька тока при напряжении 12,401 мВ



Рис. 5. Внешний вид меры напряжения

Микросхема состоит из восьми сегментов, число контактов в которых включает попеременно 81 и 80 контактов. Последовательное соединение двух сегментов позволяет получить суммарное напряжение $V \cong 25$ мВ и использовать его в качестве опорного при калибровке делителя напряжения, а разностное напряжение, равное $V_J \cong 150$ мкВ используется, во-первых, для измерения вертикальности ступени, а во-вторых, для определения коэффициента усиления нановольтметра. На рис. 3 и рис. 4 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ) двух секций микросхемы, включающие 80 и 81 джозефсоновских контактов из ВТСП и работающие при температуре кипения жидкого азота. Всего на подложке изготавливалось 4 пары таких секций. Среднее значение критического тока было равно $I_c = 0,4$ мА, стандартное отклонение среднего $\Delta I = 16$ мкА или 4%. Среднее значение нормального сопротивления цепочек было равно $R = 0,23$ Ом, а $\Delta R = 2,7 \times 10^{-3}$ Ом или около 1,5%. Таким образом, разбросы параметров контактов, полученные на схемах из 640 бикристаллических контактов приближаются к лучшим результатам, которые достигнуты в настоящее время в технологии изготовления

Физические основы микроэлектроники

многоконтактных джозефсоновских схем из низкотемпературных сверхпроводников, таких как ниобий или нитрид ниобия.

Характерное напряжение контактов $V_c = I_c R = 110$ мкВ при температуре 75-77 К было оптимально для получения суммарных ступеней тока при облучении контактов на частоте близкой к 75 ГГц. Как показано на рис. 3 и рис. 4 под воздействием сигнала на частоте $f = 74965,6$ МГц на ВАХ цепочек возникали суммарные ступени тока при напряжениях 12,556 мВ и 12,401 мВ соответственно. Рабочие точки на серединах ступеней тока задавались от двух независимых источников смещения. Измерения показали, что размах ступеней по току составлял примерно 100 мкА на ВАХ обеих секций. При последовательном соединении этих секций суммарное квантовое выходное напряжение примерно равно 25 мВ использовалось в квантовой мере напряжения.

В результате тесного научно-технического сотрудничества ИФМ РАН и ОАО "ФНЦП "ННИПИ "Кварц" имени А.П.Горшкова" на основе этой микросхемы в ННИПИ «Кварц» был впервые создан промышленный образец многозначной меры напряжения Н4-21, которая по своим параметрам удовлетворяет требованиям, предъявляемым к эталонным средствам измерения. Мера напряжения имеет выходное напряжение от 0 до 10 В, шаг изменения выходного напряжения 0.1 В и относительную нестабильность за межповерочный интервал $\pm 5 \times 10^{-8}$.

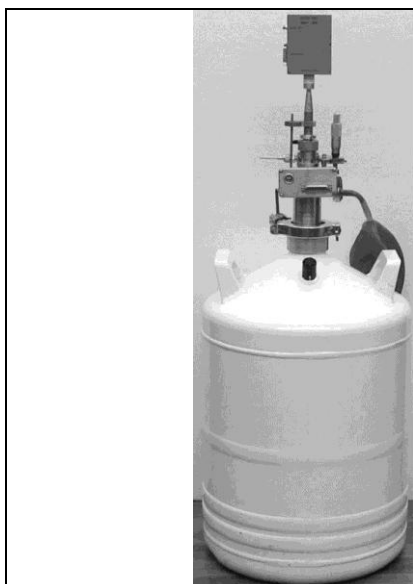


Рис. 6. Сосуд Дьюара с криогенным зондом

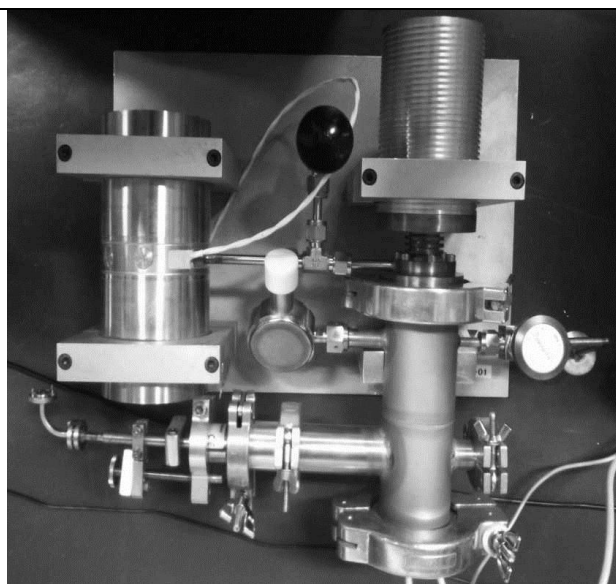


Рис. 7. Малогабаритный криоохладитель замкнутого цикла

Необходимое выходное напряжение эталона, задаваемое оператором, формируется от источника опорного напряжения на стабилизаторе с помощью делителя на прецизионных резисторах. Бесперебойная работа источника опорного напряжения обеспечивается наличием встроенных аккумуляторных батарей, зарядка которых осуществляется автоматически. Высокая точность выходного напряжения обеспечивается за счёт калибровки делителей относительно квантового напряжения джозефсоновской микросхемы. Величина выходного квантового напряжения определяется точностью задания частоты синтезатора частот, определяемой точностью и стабильностью опорного сигнала подключённого рубидиевого стандарта частоты. Для охлаждения микросхемы до рабочей температуры применяются либо сосуд дьюара с жидким азотом (рис.6), либо малогабаритный криоохладитель замкнутого цикла (рис. 7). Прибор предназначен для использования в национальных метрологических институтах в составе эталонов вольта, в центрах стандартизации, метрологии и испытаний, а также аналогичных организациях зарубежных стран, метрологических лабораториях предприятий и фирм, в научных учреждениях и метрологических службах Министерства обороны. Мера напряжения может также применяться для калибровки прецизионных цифровых вольтметров и калибраторов постоянного напряжения.

Разработанная технология многоконтактных джозефсоновских систем из ВТСП и появление новых эталонов Вольта с азотным уровнем охлаждения расширяют сферу использования квантовых эффектов в фундаментальной и прикладной метрологии, а также прецизионной радиоизмерительной технике.

Работа финансировалась Минпромторгом России в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008 - 2015 годы. Авторы также благодарят за частичную поддержку гранты РФФИ № 15-02-05793, № 15-42-02469 и грант (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ). АК благодарит также грант РФ № 15-12-10020.

Литература

1. Josephson B.D. Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251–253.
2. J.-S. Tsai, A. K. Jain, J. E. Lukens, Phys. Rev. Lett. – 1983. – V. 51 – P. 316–319.
3. Александров В.С., Катков А.С., Телитченко Г.П., Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 6–9.
4. Краснополин И. Я., История науки и техники. – 2010. – № 9. – С. 50.
5. Васильев Д. Р., Карпов О. В., Крутиков В. Н., Измерительная техника. – 2003. – № 3. - С. 25–29.
6. <http://www.vniiftri-irk.ru/category/etalony/vtoricniy-etalon-edinici-postoyannogo-naprazeniya>
7. J. Niemeyer, Supercond. Sci. Technol., vol. 13, pp. 546-560, 2000.
8. Hypres Inc., <http://www.hypres.com>
9. Supracon GmbH, <http://www.supracon.com>
10. 732B/734A DC Reference Standard Instruction Manual Rev. 3, 11/97, Fluke Corporation, 1997.
11. А. М. Клущин, Т.Б. Коротина, А.Е. Парийский, С.К. Хоршев, П.А. Шишарин, Письма ЖТФ. – 1985. – Т. 11 – № 11. – С. 663–667.
12. А.М.Клущин, W. Prusseit, E. Sodtke, S.I. Borovitskii, L. Amatuni, H. Kohlstedt // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 69. – P. 1634–1636.
13. А. М. Клущин, R. Behr, K. Numssen, M. Siegel J. Niemeyer, Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 80. – P. 1972–1974.
14. Ceraco GmbH, www.ceraco.de

CRYOGENIC MICROCIRCUITS FROM HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS AND THEIR APPLICATION IN METROLOGY

A.M. Klushin^{1,2}, S.K. Khorshev², N.V. Rogozhkina²,
E.E. Pestov¹, M.Yu. Levitchev¹

¹Institute for Physics of Microstructures of RAS

²Institute of Electronic Measurements KVARZ

Arrays of Josephson junctions fabricated from high temperature superconductors (HTS) are described. The fabrication technology of bicrystal junctions is presented. The presented experimental results documented the applicability of the developed arrays in voltage standard applications. A practical automated DC voltage standard based on an array of HTS Josephson junctions suitable for metrological, scientific and industrial applications has been developed and its performance has been characterized. In the new instrument the quantum voltage equal to 25 mV of the cryocooled up to liquid nitrogen temperatures HTS array is converted by a resistive divider into an output voltage up to 10 V with a relative uncertainty smaller than $\pm 5 \times 10^{-8}$. The results of the comparison with 10 V niobium Josephson DC voltage standard will be presented at the Meeting. The work has been supported by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (Minpromtorg Russia) and in part by the grant of the Russian Foundation for Basic Research N15-02-05793.

ГЕНЕРАТОРЫ ТГЦ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ

д.ф.-м.н. А.Л. Панкратов^{1,2,3}, Л.С. Ревин^{1,2,3}, к.ф.-м.н. А.В. Чигинев^{1,2}, к.ф.-м.н. Е.А. Вopilкин¹,
к.ф.-м.н. Д.В. Мастеров¹, к.ф.-м.н. А.Е. Парафин¹, С.А. Павлов^{1,3}, А.Н. Тропанова¹,
И.Ю. Шулешова¹, А.Д. Шовкун⁴, к.ф.-м.н. А.Б. Кулаков⁴, д.ф.-м.н. Л.С. Кузьмин^{2,5}

¹ Институт физики микроструктур РАН

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

⁴ Институт физики твердого тела РАН

⁵ Чалмерский Университет Технологии, Швеция

В работе исследовались образцы джозефсоновских контактов на основе высокотемпературных сверхпроводников. Образцы были изготовлены из двух различных материалов: YBCO пленки на бикристаллических подложках, а также BSCCO меза-структуры. Для бикристаллических джозефсоновских контактов на основе предыдущих экспериментов [1] было принято решение об увеличении толщины пленки до 0.6 мкм. В результате удалось увеличить плотность критического тока до значений 93 - 230 кА/см², а отношение $I_c R_n$ до 0.8 - 1.96 мВ (для температуры $T = 6$ К). Таким образом, увеличение толщины пленки позволило приблизиться к лучшим мировым значениям плотности критического тока [2,3].

Физические основы микроэлектроники

Кроме того были предприняты исследования, направленные на изготовление одиночной меза-структуры из слоистого высокотемпературного сверхпроводника $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO), предназначенной для создания генератора субТГц диапазона частот.

Использование сверхпроводниковых генераторов ТГц диапазона частот в качестве источников для высокочувствительных гетеродинных приёмников и спектрометров критически важно для различных космических миссий и при создании комплексов экологического мониторинга атмосферы на самолётах и воздушных шарах. Естественные частоты генерации сверхпроводниковых устройств от 0.1 до 3ТГц, а также рекордно низкий уровень шумов таких устройств, делает их идеальными кандидатами для различных высокочувствительных приёмников ТГц диапазона частот.

Для экспериментального исследования образцы распределенных джозефсоновских контактов на основе YBaCuO плёнок на бикристаллических фанитовых подложках были изготовлены с помощью магнетронного напыления [4]. На рисунке 1 показаны вольт-амперные характеристики для образца длиной 350 микрон при различных значениях внешнего магнитного поля, создаваемого током I_{CL} через соленоид. На графике виден резонансный режим, определяемый "ступенями" тока различной высоты и положения V_{vs} по напряжению. Эти ступени возникают вследствие распространения цепочки магнитных вихрей (флаксонов) от одного края контакта к другому, и их положение напрямую определяется соотношением равенства скоростей: $u = (V_{dc} / cd\mu_0 H_e)c$, где V_{dc} - это напряжение на контакте, H_e - внешнее магнитное поле перпендикулярное границе кристалла, c - скорость распространения электромагнитных волн в контакте, d - эффективная магнитная толщина барьера. В таком случае напряжение, соответствующее вершине ступени, определяется выражением $V_{vs} \approx (cd\mu_0)H_e \approx (cd\mu_0)nI_{CL}$, где n - число витков катушки на единицу длины.

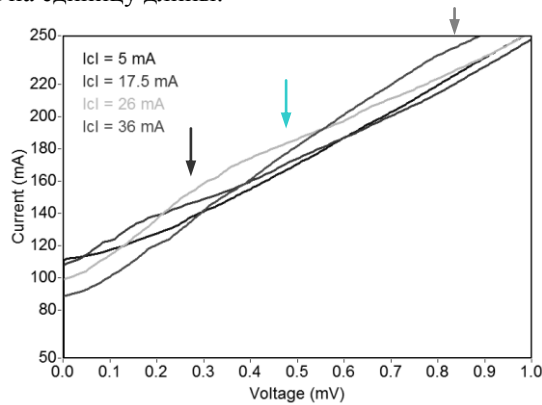


Рис. 1. Режим бегущих волн в джозефсоновском контакте в зависимости от тока в катушке. Стрелками отмечены вершины ступеней генерации

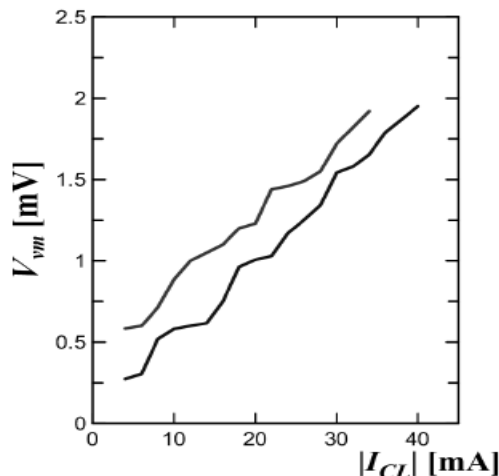


Рис. 2. Зависимость положения резонансных ступеней от внешнего поля (тока через катушку) для различного направления движения волны

На рисунке 2 построена зависимость положения ступеней генерации V_{vs} от магнитного поля для различного направления движения флаксонов, определяющегося знаком тока питания и внешнего поля. Видно, что кривые смещены по напряжению. Это объясняется внутренней асимметрией исследуемых структур, связанной с анизотропией кристаллов [1,5].

Физические основы микроэлектроники

Другой показательной характеристикой является зависимость дифференциального сопротивления на вершине ступени от положения ступени, поскольку для низкотемпературных контактов было показано, что наклон ступени (сопротивление) напрямую связано с излучаемой мощностью [6,7]. На рисунке 3 видно, что для различных направлений движения вихрей зависимость R_d от V_{vs} различна, что говорит об асимметричных излучательных свойствах образца, определяемых внутренними особенностями бикристаллических контактов, а также геометрией образца.

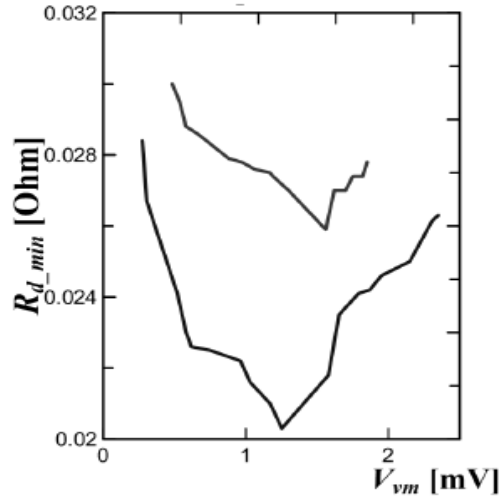


Рис. 3. Дифференциальное сопротивление на вершине ступени в зависимости от положения ступени для температуры $T = 6$ К

Для изготовления генераторов одиночных меза-структур были использованы отдельные чешуйки BSCCO с примесью свинца, размерами в несколько мм. Чешуйки были получены путем раскалывания монокристаллического куска BSCCO, выращенного методом зонной плавки. Чешуйки приклеивались проводящим клеем к кремниевым подложкам, предварительно запыленным золотом. По литературным данным, для изготовления меза-структур BSCCO обычно используется ионное травление [8-10]. Исследование показало, что данный метод плохо подходит для изготовления меза-структуры глубиной в несколько микрон, так как требует слишком долгого времени травления.

Поэтому были предприняты эксперименты по жидкостному травлению BSCCO [11]. Для этого на поверхности чешуйки была методом фотолитографии создана фоторезистивная маска, с помощью которой осуществлялось травление BSCCO в соляной кислоте. Травление контролировалось визуально и прекращалось при исчезновении большей части чешуйки, не закрытой фоторезистом. В этом случае глубина подтравки составляет порядка 40 мкм. Травление было сквозным не везде из-за неоднородности толщины чешуйки. На большей части поверхности получились отдельно стоящие мезы, но были также места, где травление было не сквозным. На этих мезах была измерена высота с помощью интерферометра белого света Talysurf 2000 и составила 7 мкм (рисунок 4). Таким образом, видно, что травление идет анизотропно: подтрав 40 мкм при глубине травления в 7 мкм.

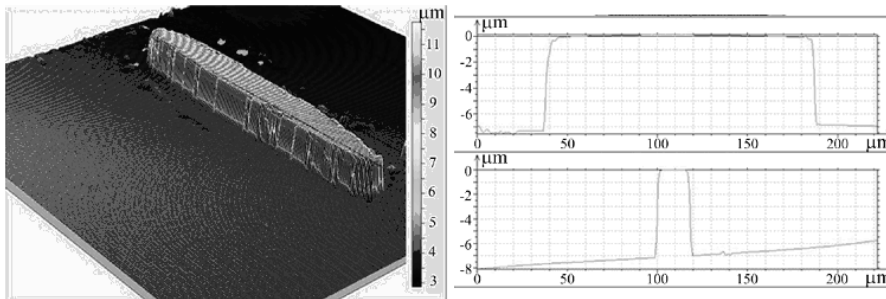


Рис. 4. Рисунки одиночной меза-структуры, полученные на интерферометре белого света Talysurf 2000

Фоторезист был успешно растворен в диметилформамиде без применения ультразвуковой ванны. Как оказалось, проводящий клей также может быть растворен, после чего отдельную мезу можно двигать. Это позволяет приклеить проводящим клеем к покрытой золотом подложке отдельную мезу диаметром

450 мкм в любом месте (рисунок 5а). Далее, на ее поверхности проводящим клеем приклеивается второй контакт (рисунок 5б). Такая конфигурация позволяет измерить ВАХ вдоль оси С кристалла BSCCO.

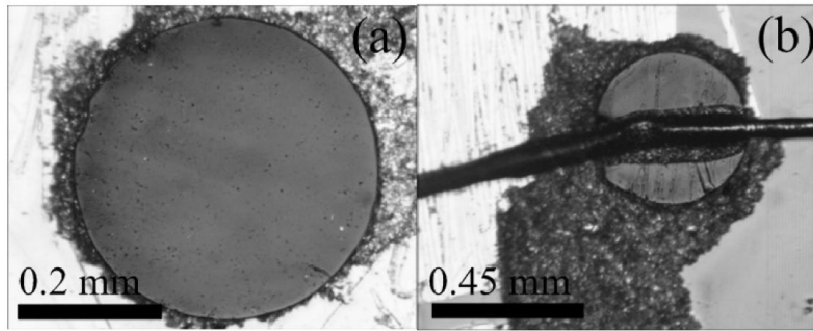


Рис. 5. Образец после травления, перемещения (а) и крепления второго провода (б)

Далее были проведены эксперименты по измерению вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученной структуры для различных температур, рисунок 6а. Для сравнения с результатами других групп удобно вычесть из графиков добавочное сопротивление $R_{add} = 760 \text{ Ohm}$ (рисунок 6б), связанное с сопротивлением проводов (использовалась трехточечная схема подключения), дефектами на верхнем и нижнем слоях меза-структуры, а также несверхпроводящими слоями слабой связи. В этом случае мы наблюдаем эффект "горячего пятна", связанный с джоулевым нагревом, ранее наблюдавшийся в других группах на подобных структурах [12-14].

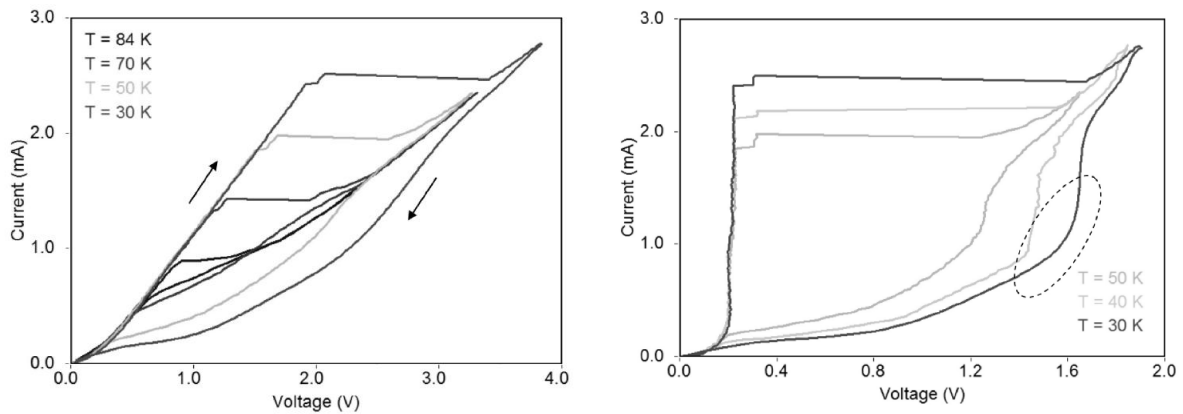


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики образца одиночной меза-структуры для разных температур (а) и с вычетом добавочного сопротивления R_{add} (б)

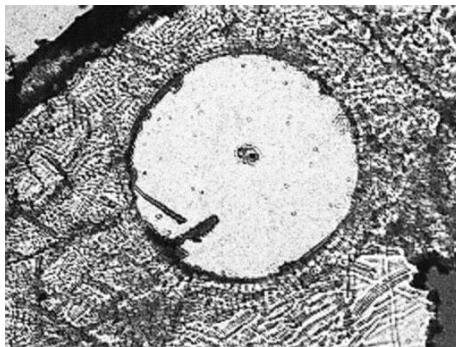


Рис. 7. Одиночная меза-структура, покрытая золотом с двух сторон

Дальнейшее усовершенствование технологии позволило изготавливать одиночные меза-структуры, покрытые золотом с двух сторон. Пример такой структуры изображен на рисунке 7.

Таким образом, были проведены исследования транспортных свойств генераторов высокотемпературных джозефсоновских контактов на основе YBCO бикристаллических контактов, а так же BSCCO меза-структур. В результате для бикристаллических контактов обнаружена асимметрия ступеней генерации на ВАХ для различных длин джозефсоновских контактов при различной температуре.

Физические основы микроэлектроники

Исследование меза-структур BSCCO позволило отработать технологию, позволяющую получать за разумное время одиночные структуры большей толщины (от 0.5 до 20 мкм), чем для случая традиционных методов изготовления. Это потенциально позволит получать большую мощность генерации. Кроме того, время, необходимое для изготовления структур толщиной порядка 1 микрона, может быть значительно сокращено.

Анализ результатов и сравнение с литературой свидетельствуют о джозефсоновской природе полученных структур.

Работа выполнена при поддержке МОН (грант 3.2054.2014/К) и РФФИ (грант 15-02-05869).

Литература

1. Revin L.S., Chiginev A.V., Pankratov A.L., Masterov D.V., Parafin A.E., Luchinin G.A., Matrozova E.A., and Kuzmin L.S. 2013 J. Appl. Phys. 114 243903.
2. Zhang Y.M., PhD thesis 1993 ISBN 91-7032-888-9.
3. Winkler D., Zhang Y.M., Nilsson P.A., Stepantsov E.A., and Claeson T. 1994 Phys. Rev. Lett. 72, 1260.
4. Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Дроздов Ю.Н. 2007 ЖТФ т. 77, вып. 10, 109-113.
5. Kupriyanov M.Yu., Khapaev M.M., Divin Y.Y. and Gubankov V.N. 2012 JETP Letters, 95 (6), 289.
6. Matrozova E.A., Pankratov A.L., and Revin L.S. 2012 J. Appl. Phys. 112, 053905.
7. Yoshida K., Nagatsuma T., Sueoka K., Enpuku K., and Irie F. 1985 IEEE Trans. Magn. 21 899.
8. Ozyuzer L, Koshelev A E, Kurter C, Gopalsami N, Li Q, Tachiki M, Kadowaki K, Yamamoto T, Minami H, Yamaguchi H, Tachiki T, Gray K E, Kwok W-K and Welp U 2007 Science 318 1291.
9. Kashiwagi T, Tsujimoto M, Yamamoto T, Minami H, Yamaki K, Del-fanazari K, Deguchi K, Orita N, Koike T, Nakayama R et al. 2012 Jpn. J. Appl. Phys. 51 010113.
10. Kaur D and Gupta A K 2002 J. Phys. D: Appl. Phys. 35 729.
11. Vopilkin E.A., Chiginev A.V., Revin L.S., Tropanova A.N., Shuleshova I.Yu., Okhapkin A.I., Shovkun A.D., Kulakov A.B. and Pankratov A.L. 2015 Superconductor Science and Technology 28 045006.
12. Li M, Yuan J, Kinev N, Li J, Gross B, Gu'enon S, Ishii A, Hirata K, Hatano T, Koelle D, Kleiner R, Koshelets V P, Wang H and Wu P 2012 Phys. Rev. B 86 060505(R).
13. Wang H B, Gu'enon S, Yuan J, Iishi A, Arisawa S, Hatano T, Yamashita T, Koelle D and Kleiner R 2009 Phys. Rev. Lett. 102(1) 017006.
14. Yurgens A 2011 Phys. Rev. B 83 184501.

THZ GENERATORS BASED ON HIGH TEMPERATURE JOSEPHSON JUNCTIONS

A.L. Pankratov^{1;2;3}, L.S. Revin^{1;2;3}, A.V. Chiginev^{1;2}, E.A. Vopilkin¹,
D.V. Masterov¹, A.E. Parafin¹, S.A. Pavlov^{1;3}, A.N. Tropanova¹,
I.Yu. Shuleshova¹, A.D. Shovkun⁴, A.B. Kulakov⁴, L.S. Kuzmin^{2,5}

¹ Institute for Physics of Microstructures of RAS

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

³ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

⁴ Institute of Solid State Physics of RAS

⁵ Chalmers University of Technology

The samples of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Josephson junctions fabricated by magnetron sputtering on $24^\circ[001]$ -tilt bicrystal substrate were investigated. The improved technology has allowed the significant increase of critical current density and the $I_c R_n$ product. The asymmetry of generation steps at current-voltage characteristics for the opposite magnetic field directions of the YBCO samples was observed.

The technology of wet etching allowing fabrication of stand-alone BSCCO mesa structures was proposed. The produced mesas can be made much thicker than ones usually being studied. The time required for the fabrication by the proposed method is much smaller in comparison with the standard ion milling method. The IV characteristics of the sample showing intrinsic Josephson effect were observed.

РАДИАЦИОННОСТОЙКАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Радиационностойкая и высоконадёжная микроэлектроника. Космические электронные компоненты и вопросы их сертификации. Доминирующие эффекты в полупроводниковой электронной компонентной базе при воздействии импульсных и стационарных ионизирующих излучений. Математические модели электронной компонентной базы при воздействии ионизирующих излучений. Проектирование современных радиационностойких интегральных схем и радиационностойкой радиоэлектронной аппаратуры. Имитационное моделирование на суперЭВМ при проектировании современных радиационностойких интегральных схем

МИКРОЭЛЕКТРОННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ХОЛДИНГА «ИНТЕГРАЛ» – СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Шведов С.В., Кетько А.В., Панфиленко А.К., Солодуха В.А.

ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск

В настоящее время холдинг «ИНТЕГРАЛ» является лидером электронной отрасли Республики Беларусь – это один из крупнейших научно-производственных комплексов на территории СНГ и Восточной Европы, специализирующийся на микроэлектронике. За более чем 50 лет работы в данной сфере предприятием накоплен значительный опыт проектирования и производства электронной компонентной базы (ЭКБ) – интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов.

По общепринятой мировой классификации холдинг «ИНТЕГРАЛ» относится к классу IDM – так как реализует весь комплекс работ, включающий проектирование, производство, маркетинг и сопровождение конечной продукции у потребителя по широкой номенклатуре микроэлектронных изделий и законченных товаров (медицинские приборы, электронные табло, блоки управления бытовой, промышленной, автомобильной и сельскохозяйственной техники и др.).

Номенклатура выпускаемой холдингом «ИНТЕГРАЛ» продукции насчитывает более 2000 типов интегральных микросхем (ИС), 500 типов полупроводниковых приборов (ППП), 200 типов жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ), и модулей, 150 изделий электронной техники. Изделия холдинга «ИНТЕГРАЛ» нашли широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства: вычислительной технике и системах управления, системах информатики, авиационно-космической и атомной промышленности, энергосберегающей технике и др.

Продукция поставляется в 27 стран мира, однако крупнейшим потребителем выступает Российская Федерация. Отгружаемая продукция - преимущественно микросхемы и полупроводниковые приборы.

Особое место в продукции холдинга «ИНТЕГРАЛ» занимает ЭКБ специального и двойного назначения, устойчивая к воздействию внешних специальных дестабилизирующих факторов, поставляемая на рынок Российской Федерации в больших объёмах и пользующаяся на нём устойчивым спросом из-за высокого качества и надёжности в сочетании с приемлемой ценой. Главное преимущество белорусских ИС и полупроводниковых приборов – новые конструктивно-технологические решения, запатентованные, в том числе и в России, безупречная работоспособность в условиях воздействия повышенной радиации, что исключительно важно для электронных систем управления космической техники, систем управления и обеспечения безопасности атомных электростанций. Наиболее востребованная номенклатура ЭКБ холдинга «ИНТЕГРАЛ» сертифицирована на воздействие факторов космического пространства. Высокий уровень качества ЭКБ холдинга «ИНТЕГРАЛ» подтверждён национальными и международными стандартами, том числе и ИСО 9001, а также сертификатами Министерства обороны Российской Федерации.

В последние годы позиция холдинга «ИНТЕГРАЛ» на рынке РФ, в частности по интегральным микросхемам (ИС) специального назначения, постоянно усиливались (в настоящее время ИС специального назначения используются более чем в 120 системах вооружений и военной техники, их модификациях и составных частях в более чем 300 компаниях). Это связано с разработкой и освоением ряда новых высоконадёжных компонентов, их успешным тестированием у потребителей.

Развитие микроэлектронных технологий для аналоговой, силовой и радиационно-стойкой электроники в холдинге «ИНТЕГРАЛ» идет по следующим основным направлениям:

- Технология «Кремний на Изоляторе» (КНИ) (SOI) имеет преимущества перед объёмным кремнием в уменьшении влияния паразитных эффектов по периметру границы прибора и в надёжной изоляции рабочего объёма прибора от остальной схемы и подложки, что приводит к её повышенной стойкости к

Радиационнотойкая микроэлектроника

внешним воздействиям и радиационной стойкости, также это делает пригодным данную технологию для создания высоковольтных изделий силовой электроники.

- 0,35 мкм радиационно-стойкий КМОП. Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием при проектировании систем военного и космического применения. Известно, что в системах военного назначения приборы должны выдерживать облучение нейтронами, гамма-излучением и рентгеновским излучением, а также воздействие электромагнитного импульса, создаваемых ядерным взрывом. В космическом пространстве полупроводниковые устройства также должны функционировать в условиях жесткой радиации, обусловленной облучением ионами, присутствующими в космических лучах и солнечном ветре, а также захваченных в радиационных поясах вокруг Земли.

- Развитие технологий многокристальной сборки для сверхкомпактных систем управления, основанных на 3D системах сборки, представляющих по своей сути 3-х мерную интеграцию интегральных схем. При 3-D интеграции используется ряд расположенных друг над другом полупроводниковых пластин, которые соединяются между собой путём формирования сквозных отверстий в кремнии и создания в них нанотехнологическими методами медных токопроводящих микропроводников.

Можно выделить следующие основные направления технического развития ОАО «ИНТЕГРАЛ» на 2015-2020 гг.:

1) **Силовая электроника** (-КМОП с высоковольтными выходами, БиКДМОП с высоковольтными выходами и питанием 42В, Дискретные приборы для ДМОП-преобразователя, Приборы с «канавочной» вертикальной изоляцией).

2) **Технологии для специальных применений:** а) КМОП в радиационнотойком варианте; б) КНИ-технология; в) КМОП технология радиационнотойкой памяти на основе ферромагнитных и сегнетоэлектронных материалов на кремнии, (типа FRAM).

3) **Высокочастотная электроника:** а) SiGe +КМОП-структур; б) SiGe +БиКМОП -структур.

4) **Новые типы памяти на основе КМОП:** а) многократно перепрограммируемая КМОП память со встроенными опциями EEPROM; б) многократно перепрограммируемая КМОП память со встроенными опциями FLASH; в) многократно перепрограммируемая КМОП память со встроенными FRAM ЭСППЗУ; г) память КМОП + ЭСППЗУ на квантовых точках.

5) **Оптоэлектроника и фотоника:** а) новый класс СБИС-матрицы на основе КМОП-ПЗС; б) фотодиоды, фотопреобразователи на основе базового КМОП-процесса; в) СБИС для микробалометров.

Для изготовления современных микросхем и полупроводниковых приборов силовой электроники разработчики холдинга «ИНТЕГРАЛ» используют практически все известные типы технологий: биполярную, КМОП, БиКМОП, ДМОП, КДМОП, БиКДМОП, КНИ. Выбор того или иного конкретного типа технологии определяется исходя из совокупности технических требований, предъявляемых заказчиком к проектируемой схеме. Важной особенностью современных технологий проектирования силовых интегральных схем и полупроводниковых приборов является возможность сочетания на одном кристалле высоковольтных и низковольтных элементов интегральных схем.

Силовые дискретные полупроводниковые приборы холдинга подразделяются на силовые диоды (диоды Шоттки, диоды Зенера, стабилитроны), силовые дискретные транзисторы (биполярные, Дарлингтона, MOSFET, IGBT, интеллектуальные MOSFET), многпереходные структуры (тиристоры, динисторы, симисторы) и мощные силовые модули на основе.

В свою очередь все интегральные микросхемы (ИМС) для силовой электроники производства холдинга в зависимости от их назначения и особенностей применения разделены на пять основных групп:

- ИМС для источников питания (наиболее значимая по составу номенклатуры серия ИМС);
- ИМС для управления различными электродвигателями (коллекторными, шаговыми, вентильными);
- силовые ИМС для автомобильной электроники (их также используют в электронных системах управления сельскохозяйственной техникой – в тракторах, зерно- и кормоуборочных комбайнах, грузовых и карьерных автомобилях, автопогрузчиках, мотоциклах и пр.);
- ИМС для управления осветительным оборудованием (бытовыми и промышленными лампами дневного света, мощными промышленными светильниками, светильниками для освещения улиц и т.п.);
- ИМС управления мощными силовыми дискретными полупроводниковыми приборами (MOSFET, IGBT и модули на их основе).

В условиях глобализации мировой экономики именно микроэлектроника демонстрирует яркий пример международного разделения труда. Созданная у нас электронная компонентная база используется в научных проектах разных стран, что прекрасно демонстрирует возможности белорусской науки и микроэлектронной промышленности. Специалистами ОИЯИ - НЦ ФЧВЭ БГУ и – холдинга «ИНТЕГРАЛ» совместно были успешно разработаны и массово произведены восьмиканальные заказные аналоговые интегральные микросхемы: трансимпедансного усилителя-формирователя Аmр1-8.3 и

Радиационностойкая микроэлектроника

компаратора Disc-8.3. Эти ИМС предназначались целевым образом для 50 тысяч каналов мюонной системы эксперимента D0 на коллайдере «Тэватрон» - наиболее мощном ускорителе в мире на то время – в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (г. Батавия, США). прошел успешную апробацию и безотказно работает в проектах GEM (суперколлайдер SSC, США); DØ на коллайдере «Тэватрон» Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США); CMS (LHC, ЦЕРН); PiBeta (Швейцария); ПАНДА на ускорительном комплексе FAIR (Германия); «Многочастичный спектрометр» и «Универсальный калориметрический детектор», (г. Дубна); в установке СВД-2 спектрометра с вершинным детектором; установке ОКА на ускорителе У-70 (Россия). Успех такой деятельности обусловлен меньшей по сравнению с зарубежными стоимостью разработок, их высокой надежностью, стабильными техническими параметрами, приемлемой ценой, хорошо организованным коммерческим сотрудничеством.

В итоге их применение оказалось настолько успешным, что они стали использоваться в других больших проектах по физике частиц: COMPASS (CERN, г.Женева, Швейцария), PiBeta (PSI, г. Виллиген, Швейцария), СВД-2 (ИФВЭ, г. Протвино, Московская обл.), E-184 (НИИ ЯФ МГУ, Институт физики высоких энергий (ИФВЭ)).

Постоянное обновление номенклатуры выпускаемой микроэлектронной продукции (около 150 типов изделий) позволяет холдингу «ИНТЕГРАЛ» сохранить завоеванные ниши на мировом рынке в условиях жесткой конкуренции и в значительной степени удовлетворить потребности предприятий ОПК РФ в высоконадежной ЭКБ.

MICROELECTRONIC ELEMENT BASE OF "INTEGRAL" HOLDING COMPANY – STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT

S. V. Shvedov, A. V. Ketko, A. K. Panfilenko, V. A. Solodukha

ISC "INTEGRAL", Minsk

Constant updating & extending of the list of microelectronic products allows to "INTEGRAL" holding company to keep the won niches in the world market in the conditions of a strong competition and to satisfy significantly requirements of companies from defence-industry complex of the Russian Federation in highly reliable electronic components.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ КОДИРОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

д.т.н. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., академик РАН Стемпковский А.Л.

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Введение

По мере роста степени интеграции и уменьшения технологических размеров возрастает роль повышения надежности и отказоустойчивости комбинационных схем под воздействием различных источников помех и сбоев. Вместе с тем, несмотря на бурное развитие современных технологий, для обеспечения требуемой отказоустойчивости микросистем в основном используются широко известные методы многократного дублирования [1], ведущие часто к неоправданной избыточности. Поэтому актуальной задачей является разработка концептуальных основ и методов построения микросистем, обеспечивающих достижение требуемой надежности функционирования за счет введения управляемой структурной избыточности [2, 3].

В основе предлагаемой методики лежит новый подход в проектировании отказоустойчивых комбинационных схем, основанный на синтезе схем защиты в базисе конечных полей Галуа (GF) с булевыми коэффициентами. Это обеспечивает возможность оптимального сочетания требований к минимизации аппаратных затрат и обеспечению требуемого (заданного) уровня отказоустойчивости. В качестве концептуальной основы реализации схемы защиты предложено разделение выходного вектора (результатов работы комбинационной схемы) на подмножества разрешенных и запрещенных кодовых комбинаций, формируемых путем добавления к выходному вектору (имеющему размерность k) проверочного вектора (имеющего размерность r). При этом процедурой формирования проверочного вектора (контрольных разрядов), а также принадлежностью текущего вектора к разрешенным или запрещенным кодовым комбинациям является процедура деления данных кодовых комбинаций на двоичный многочлен $G(x)$, принадлежащий двоичным полям Галуа. В основе данного подходы лежат

корректирующие свойства схемы декодирования, позволяющей обнаружить ошибки, возникающие в схеме кодирования. При этом корректирующие способности оцениваются как 2^{-r} .

На основе оценки корректирующих свойств схемы кодирования был предложен вариант объединения исходной схемы со схемой кодирования, обеспечивающий поиск итогового оптимального решения (по критерию «минимизация структурных затрат» при заданной корректирующей способности). При этом объединение схемы кодирования с исходной схемой не уменьшает корректирующих способностей итоговой схемы, позволяя для ряда случаев получить сокращение структурных затрат.

1. Синтез схемы защиты

В рамках данной работы предложен алгоритм структурного синтеза схемы контроля для произвольной комбинационной схемы, зависящий от выбора образующего многочлена $G(x)$, размерности выходного вектора (числа информационных разрядов k) и схемы коммутации, обеспечивающей формирование соответствия между выходом исходной схемы и входом синтезируемой схемы контроля. Структура разработанного алгоритма синтеза описана ниже.

Для описания синтеза схемы контроля будут использоваться следующие обозначения:

- $g^r(x)$ – образующий многочлен;
- r – степень образующего многочлена;
- y – вектор выходных сигналов комбинационной схемы $y=y_1, \dots, y_i, \dots, y_k$, где k – количество выходов;
- z – вектор выходных сигналов схемы контроля $z = z_1, \dots, z_r$;
- ZM – матрица остатков от деления вектора выходных сигналов на образующий многочлен;
- y' – вектор, состоящий из вектора выходных сигналов схемы y и вектора выходов схемы контроля $z = z_1, \dots, z_r$;
- z' – вектор выходных сигналов схемы декодирования $z' = z'_1, \dots, z'_r$.

Основная идея предлагаемого метода повышения надежности и отказоустойчивости комбинационных схем состоит в том, чтобы «свернуть» вектор выходных сигналов комбинационной схемы $y_1, \dots, y_i, \dots, y_k$, где k – количество выходов и получить итоговую сигнатурную свертку: z'_1, \dots, z'_r , где r – длина (число двоичных разрядов) итоговой сигнатуры.

В качестве примера рассмотрим синтез схемы контроля для случая:

- комбинационная схема с 5ю выходами: y_1, \dots, y_5 .
- в качестве образующего выбран примитивный многочлен $g^3(x)=x^3+x+1$. При этом остаток от деления y на полином 3-ей степени $G(x)$ имеет 3 разряда и будет обозначаться как z'_1, \dots, z'_3 .

Функциональная схема деления вектора, состоящего из вектора выходных сигналов схемы и вектора выходов схемы контроля $y_1, \dots, y_i, \dots, y_5, z_1, \dots, z_3$, на образующий многочлен $g^3(x)=x^3+x+1$ и формирования остатков z'_1, \dots, z'_3 показана ниже на рис. 1. При этом знак \oplus обозначает суммирование по модулю 2.

$$\begin{array}{cccccccc|cccc}
 y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & z_1 & z_2 & z_3 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 \hline
 y_1 & 0 & y_1 & y_1 & & & & & y_1 & A1 & B1 & C1 & D1 \\
 \oplus & & A1 & A2 & A3 & y_5 & & & & & & & \\
 \hline
 & & A1 & 0 & A1 & A1 & & & & & & & \\
 \oplus & & & B1 & B2 & B3 & z_1 & & & & & & \\
 \hline
 & & & B1 & 0 & B1 & B1 & & & & & & \\
 \oplus & & & & C1 & C2 & C3 & z_2 & & & & & \\
 \hline
 & & & & C1 & 0 & C1 & C1 & & & & & \\
 \oplus & & & & & D1 & D2 & D3 & z_3 & & & & \\
 \hline
 & & & & & & D1 & 0 & D1 & D1 & & & \\
 \hline
 & & & & & & & E1 & E2 & E3 & & &
 \end{array}$$

Рис. 1. Функциональная схема деления выходного вектора на образующий полином $g(x)$

Рассмотрим формирование остатка $E1, E2, E3$ от деления вектора $y_1, \dots, y_i, \dots, y_5, z_1, \dots, z_3$ на образующий полином $g^3(x)=x^3+x+1$. При делении вектора $y_1, \dots, y_i, \dots, y_5, z_1, \dots, z_3$ на образующий полином формируются следующие промежуточные остатки, представленные на рис.1:

$$\begin{aligned}
 A1, A2, A3 &\Rightarrow A1=y_2; A2=y_1 \oplus y_3; A3=y_1 \oplus y_4; \\
 B1, B2, B3 &\Rightarrow B1=y_1 \oplus y_3; B2=y_1 \oplus y_2 \oplus y_4; B3=y_2 \oplus y_5; \\
 C1, C2, C3 &\Rightarrow C1=y_1 \oplus y_2 \oplus y_4; C2=y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5; C3=y_1 \oplus y_3 \oplus z_1; \\
 D1, D2, D3 &\Rightarrow D1=y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5; D2=y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus z_1; \\
 &D3=y_1 \oplus y_2 \oplus y_4 \oplus z_2; \\
 E1, E2, E3 &\Rightarrow E1=y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus z_1; E2=y_3 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus z_2; \\
 &E3=y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5 \oplus z_3;
 \end{aligned}$$

2. Суперпозиция с помощью BDD

В качестве одного из инструментов для эффективного построения схем защиты предложен модифицированный метод преобразования булевых функций на основе упорядоченных диаграмм двоичных решений (BDD) [4, 5]. В целях повышения эффективности процедуры построения схем защиты, разработаны алгоритмы генерации схемы кодирования на основе модифицированных диаграмм двоичных решений (BDD). Стандартная модель BDD расширена дополнительным аппаратом поиска эквивалентных фрагментов на основе сбалансированного двоичного дерева.

Оптимизация проводится для схем кодирования за счет совместной оптимизации дублирующей схемы и кодирующей схемы. Одним из путей оптимизации схемы является построение логических функций на основе применения аппарата BDD. Предлагаемое при этом использование синтеза булевых функций в конечных полях Галуа на основе редуцированных диаграмм двоичных решений (ROBDD) позволяет снять существующее в настоящее время ограничение на размерность проектируемых комбинационных схем (число входов и выходов). Применение методики ре-синтеза полученных решений за счет учета базиса конечных полей Галуа (преобразований по модулю 2) обеспечивает достижение оптимального структурного решения. Использование предлагаемой методики обеспечивает управляемость и предсказуемость процесса проектирования схем при достижении оптимального сочетания заданных требований по отказоустойчивости и минимизации структурных затрат.

Проведенные исследования показали, что на качество результата в терминах занимаемой площади существенное влияние оказывает не только переупорядочивание входов, как в случае стандартной BDD, но и порядок коммутации выходов в схеме кодирования.

3. Учет логических корреляций

Для выбора оптимального варианта коммутации предлагается использовать оценочную функцию, вычисленную на основе расчета взаимных корреляций между выходами [6-10]. Для демонстрации предлагаемого подхода рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.

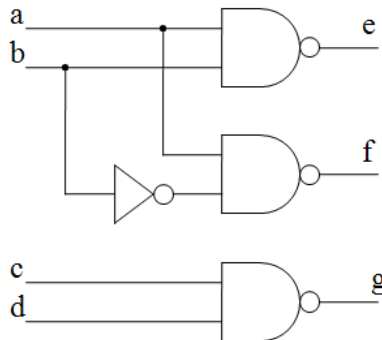


Рис. 2. Пример логической схемы с корреляциями между выходами e и f

Схема (рис. 2) имеет три выхода, если в качестве образующего полинома выбрать полином второй степени (x^2+x+1) , то кодирования схема будет выглядеть следующим образом:

$$y = x_1 \oplus x_2;$$

$$z = x_2 \oplus x_3.$$

где \oplus сложение по модулю два.

Существует $N!$ вариантов коммутации выходов комбинационной схемы и входов схемы кодирования, где N – число выходов. Для комбинационной схемы с тремя выходами, число комбинаций равно 6. Если рассмотреть полученную схему кодирования, можно заметить, что от перестановки x_1 и x_3 местами результат не изменится, т.о. из 6-ти возможных комбинаций остается 3:

- 1) $x_1=e, x_2=f, x_3=g$;
- 2) $x_1=f, x_2=g, x_3=e$;
- 3) $x_1=g, x_2=e, x_3=f$;

От выбора коммутирования зависит размер схемы контроля. Варианты BDD схемы контроля для схемы, взятой в качестве примера, изображены на рис. 3. BDD, изображенная на рис. 3а, соответствует первому варианту коммутации, рис. 3б соответствует второму варианту и рис. 3в соответствует третьему варианту. Из рисунка видно, что в первом и третьем случае количество промежуточных узлов равно 4, во втором 6.

У комбинационной схемы может быть десятки или сотни выходов, перебор всех возможных вариантов коммутаций выходов неосуществим. Для выбора оптимального варианта коммутации предлагается учитывать логические корреляции между выходами. В данном примере существуют

логические корреляции между выходами e и f . Для снижения структурных затрат при синтезе схемы контроля выходы, имеющие корреляции должны входить в одно выражение.

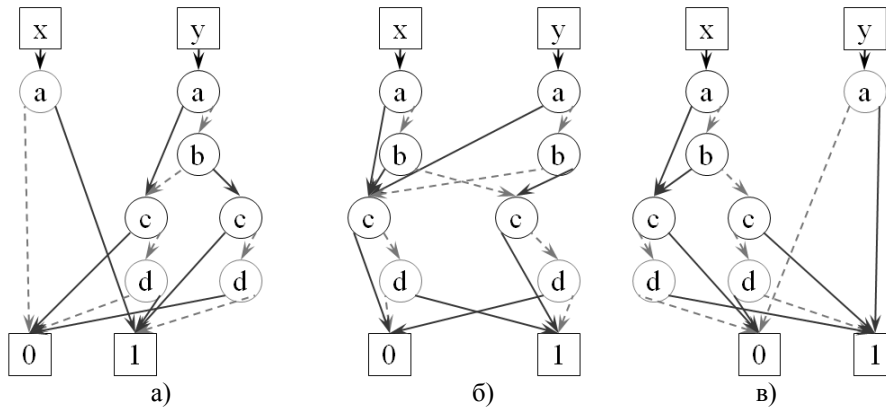


Рис. 3. Варианты BDD схемы кодирования, построенной для схемы изображенной на рис. 2.

Для поиска логических корреляций между выходами можно воспользоваться методом распространения логических корреляций на основе правила резолюций.

Метод резолюций – это метод вывода новых булевых соотношений из заданного множества булевых соотношений [11, 12].

Пусть задана пара (V, R) , где $V = \{a, b, \dots\}$ – множество булевых переменных; а R – множество булевых соотношений типа $A=B$; A, B – выражения на множестве V . Множество R преобразуется в одно соотношение $g=0$, где g – это ДНФ (дизъюнктивная нормальная форма, т.е. сумма произведений литералов).

Для вывода новых ограничений предлагается использовать следующее правило резолюции:

$$a \cdot B = 0, \bar{a} \cdot C = 0 \mapsto B \cdot C = 0,$$

где B, C – произведения литералов.

Логические корреляции распространяются вдоль схемы от входов до выходов. Для выбора оптимального варианта коммутации следует учитывать логические корреляции, имеющие в своем составе хотя бы один из выходов. Корреляции разной степени оказывают разное влияние на оптимизацию схемы, поэтому для учета корреляций различных степеней предлагается следующая эвристическая формула:

$$S^*(o_i, o_j) = \sum_{k=1} n_k(o_i, o_j) \cdot 2^{-k}, \quad (1)$$

где $S^*(o_i, o_j)$ – функция учета логических корреляций между i -м и j -м выходами схемы; n_k – количество корреляций k -го порядка.

На основе оценок упорядочиваются выходы схемы. Наибольший эффект от оптимизации схемы кодирования достигается при условии вхождения в одну формулу схемы кодирования выходов схемы, имеющих взаимные корреляции. Для всех выходов дублирующей схемы применяют предложенные методы анализа логических корреляций в цифровой схеме для получения весовых функций. На основе полученных весовых функций выбирается порядок коммутации выходов дублирующей схемы.

Заключение

В рамках данной работы разработан алгоритм синтеза устройства кодирования в базе полей Галуа. Предложены методы преобразования булевых функций в базе операций по модулю 2 на основе упорядоченных диаграмм двоичных решений. Предлагается вариант оптимизации схем кодирования за счет выбора варианта коммутирования выходов дубликата основной схемы на основе результатов анализа логических корреляций.

Литература

1. Шишкевич А.А. Оценка показателей надежности вычислительных устройств с трехкратным мажорированием при отказах и сбоях // Изв. ВУЗов. Электроника. №4, 2013, С. 84-88.
2. Соловьев А.Н., Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М. В. Моделирование возникновения неисправностей для оценки надежностных характеристик логических схем // Информационные технологии– 2014, №11, С. 30-36.
3. Соловьев А.Н., Стемпковский А.Л. Методы повышения отказоустойчивости работы устройства управления микросистемы за счет введения структурной избыточности // Информационные технологии. – 2014, № 10, С. 17-22.

4. Bryant R.E., Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation // IEEE Transactions on Computers. 1986. vol. 35. № 8. P. 677 – 691.
5. Gavrilov S.V., Glebov A.L. BDD-based circuit level structural optimization for digital CMOS. 1-st Intern. Workshop "Multi-Architecture Low Power Design". Moscow, 1999. P. 45-49.
6. Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемповский А.Л. Методы логического и логико- временного анализа цифровых КМОП СБИС. – М.: Наука, 2007, 223 с.
7. Гаврилов С.В. Методы анализа логических корреляций для САПР цифровых КМОП СБИС. – М., Техносфера, 2011, 136 с.
8. Gavrilov S.V., Glebov A.L., Soloviev Roman, Becer M., etc Delay Noise Pessimism Reduction by Logic Correlations // In Proc. of ICCAD, 2004, P.160-167.
9. Гаврилов С.В., Рыжова Д.И., Стемповский А.Л. Методы повышения точности оценки пикового тока на логическом уровне на основе анализа логических корреляций // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014, № 7, С. 66-75.
10. Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Северцев В.Н. Интервальный статический временной анализ КМОП-схем с учетом логических корреляций // V Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012": сб. научн. тр. / под общей ред. А.Л. Стемповского. М.: ИПИМ РАН, 2012, С. 113-118.
11. Glebov A.L., Gavrilov S.V., Vlaauw D. False-noise analysis using resolution method. ISQED-2002.
12. Стемповский А.Л., Гаврилов С.В., Глебов А.Л. Анализ помехоустойчивости цифровых схем на основе метода резолюций // Электроника, Известия ВУЗов, 2004, № 6, С. 64-71.

OPTIMIZATION OF CODER CIRCUIT IN ORDER TO INCREASE NOISE IMMUNITY OF INTEGRATED CIRCUITS UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL DESTABILIZING FACTORS

S.V. Gavrilov, G.A. Ivanova, A.L. Stempkovsky

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS

This article is dedicated to research and develop methods for increasing the microelectronic circuits' noise immunity.

The role of improving the reliability and noise immunity of designed devices under the influence of various sources of interference and disruption is increases. At present time, the noise immunity factor in microelectronics is becoming critical condition of reliability and working capacity of the developed electronic equipment. Thus one of the key components are combinational circuits. Therefore, research and development of methods for noise immunity improving of microelectronic combinational circuits is actual problem.

The operation of division by the polynomial generator in binary Galois field is proposed to use to ensure the necessary level of noise immunity (error detection with a predetermined degree of multiplicity) for the synthesis of the coder circuit. Optimization of coder circuit is proposed by choosing variant of outputs commutation basic circuit duplicate based on the results of logical correlations analysis.

ПРОГРАММА ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЧАСТИЧНОГО АЛГОРИТМА МОНТЕ-КАРЛО

Забавичев И.Ю., Потехин А.А., к.ф.-м.н. Пузанов А.С., д.т.н. Оболенский С.В.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Введение

Разработка современных изделий микроэлектроники невозможна без применения систем автоматизированного проектирования на всех этапах проектирования [1]: физико-технологическом, физико-топологическом, схемотехническом и функционально-логическом (системном). Преимущества численного моделирования полупроводниковых приборов заключаются в следующем [2]:

1. Параметры. Используемые параметры в любом численном моделировании точно известны, поскольку они определяются используемыми входными данными. В противоположность этому такие параметры, как уровень и профиль легирования, имеющиеся в любом лабораторном приборе, известны только приблизительно из-за трудности измерений.

2. Диапазон параметров. Диапазон параметров (например, расстояние между электродами), доступный для лабораторного измерения, ограничен существующей промышленной технологией. Однако в численном моделировании могут использоваться существенно более широкие диапазоны параметров. Исследование диапазонов параметров на компьютере, которые невозможно достичь в настоящее время в лаборатории, может указать области, в которых следует проводить инвестирование для развития лучших лабораторных методов. С другой стороны, вычислительные эксперименты могут указать области параметров, для которых нецелесообразно развитие новых лабораторных методов.
3. Скорость. Если лабораторное измерение на приборе нуждается в каком-либо технологическом процессе, как, например, изготовление маски, то почти обязательно характеристики прибора могут быть получены существенно быстрее с помощью численного моделирования, чем в лаборатории.

При этом следует отметить, что численное моделирование не является полной заменой и альтернативой лабораторным измерениям, а расширяет и дополняет полученные результаты измерений, использует их в качестве входных данных.

В нашем предыдущем докладе [3] и последующем обзоре [4] рассмотрена физико-топологическая модель переноса носителей заряда в полупроводниковых приборах с учетом радиационного воздействия на основе диффузионно-дрейфового и квазигидродинамического приближений, ее численная и программная реализация на основе параллельных вычислений на видеокартах при помощи технологии CUDA компании NVidia [5], результаты вычислительного эксперимента и тесты производительности. В данной работе рассмотрена физико-топологическая модель переноса носителей заряда с учетом радиационного воздействия при помощи метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло решения кинетического уравнения Больцмана.

Под алгоритмом Монте-Карло в широком смысле понимают любой численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин. Развитие метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло длительное время сдерживалось как высокой ресурсоемкостью, так и отсутствием потребности детального моделирования характеристик субмикронных полупроводниковых приборов. Ситуация изменилась в 90-е годы, когда характерные размеры полупроводниковых приборов: канала полевых транзисторов и базы биполярных транзисторов – уменьшились до характерных длин релаксации энергии и импульса электронно-дырочного газа. Рост производительности электронных вычислительных машин позволяет в настоящее время проводить анализ характеристик изделий микроэлектроники при помощи метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло на персональных компьютерах и рабочих станциях. В данной работе рассмотрена параллельная версия алгоритма.

Математическая модель

Классические одночастичные функции распределения $f_i(p, r, t)$ в координатно-импульсном (r, p) фазовом пространстве удовлетворяют кинетическим уравнениям [6]

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{\partial W_i}{\partial p} \frac{\partial f_i}{\partial r} - \frac{\partial \psi_i}{\partial r} \frac{\partial f_i}{\partial p} = S_i. \quad (1)$$

Здесь $W_i = W_i(p)$ – закон дисперсии носителей заряда i -го сорта, $\psi_i = q_i\varphi + \Delta_i$, где q_i – заряд носителей заряда i -го сорта (положительный для дырок, отрицательный для электронов), $\varphi = \varphi(r, t)$ – потенциал самосогласованного электрического поля, $\Delta_i = \Delta_i(r)$ – изменение ширины запрещенной зоны, приходящееся на соответствующий тип носителей заряда. Интегралы столкновений в правых частях (1) описывают взаимодействие электронов и дырок с примесями, акустическими, оптическими и междолинными фононами, парные кулоновские столкновения, а также процессы генерации и рекомбинации. Потенциал φ удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\varepsilon_0 \operatorname{div}(\varepsilon \nabla \varphi) + \sum_i q_i \int f_i dp + \rho = 0, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала, $\rho = \rho(r)$ – объемный заряд заряженных примесей. В ситуациях, когда существенны процессы перезарядки примесей величина ρ может зависеть также и от времени и определяться из уравнений, описывающих пространственно-временную эволюцию заселенностей уровней примеси.

В зависимости от типа решаемой задачи выделяют одночастичный и многочастичный алгоритмы Монте-Карло. Так, для определения электрофизических параметров материала (например, зависимостей средней энергии и скорости носителей заряда от напряженности электрического поля) для нахождения функций $f_i(p)$ достаточно длительного «блуждания» одной модельной частицы i -го сорта в фазовом пространстве. Тогда среднее значение вычисляемой величины A в расчете на одну частицу будет равно [7]

$$\langle A \rangle = \frac{\int A(p) f_i(p) dp}{\int f_i(p) dp}. \quad (3)$$

На практике, однако, достаточно знать значения вычисляемой величины A модельной частицы в процессе численного моделирования

$$\langle A \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt. \quad (4)$$

При расчете характеристик полупроводниковых приборов при помощи метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло одновременно моделируется движение большого числа частиц. Для обеспечения расчета самосогласованного электрического поля периодически происходит временная синхронизация и решается уравнение Пуассона. Так как взаимодействие модельных частиц друг с другом осуществляется через электрическое поле, то эффективность параллельного алгоритма многочастичного метода Монте-Карло достаточно высока. Усреднение вычисляемой величины A для многочастичного метода Монте-Карло проводится по ансамблю модельных частиц

$$\langle A \rangle = \frac{1}{N} \sum_i A_i, \quad (5)$$

где N – число модельных частиц в ансамбле.

Основная идея метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло заключается в том, что непрерывное движение модельных частиц в координатно-импульсном фазовом пространстве периодически прерывается процессами рассеяния с мгновенным изменением их импульсов. Выбор времени между актами рассеяния τ осуществляется с помощью случайного числа r , равномерно распределенного в интервале от 0 до 1 и генерируемого датчиком случайных чисел, по формуле

$$\tau = -\frac{1}{\Gamma} \ln(r), \quad (6)$$

$$\Gamma = \lambda_0(W) + \sum_i \lambda_i(W) = const. \quad (7)$$

Здесь λ_i – частота i -го механизма рассеяния, λ_0 – частота «саморассеяния» - «фиктивного» механизма рассеяния, вводимого для обеспечения $\Gamma = const$.

В течение времени между актами рассеяния траектории модельных частиц рассматриваются как баллистическое движение во внешнем электрическом поле [8]

$$\frac{dr_i}{dt} = \frac{\partial W_i}{\partial p}, \quad (8)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\partial \psi_i}{\partial r}, \quad (9)$$

где индекс i по-прежнему относится к сорту частиц.

После этапа баллистического движения выбор процесса рассеяния проводится с помощью случайного числа r , равномерно распределенного в интервале от 0 до 1. Процесс с номером m выбирается, если [7]

$$\sum_{i=0}^{m-1} \lambda_i(W) < r < \sum_{i=0}^m \lambda_i(W). \quad (10)$$

Правила выбора конечного состояния модельной частицы в импульсном пространстве после рассеяния определяются механизмом рассеяния и широко представлены в литературе [7, 8]. Так, для любого механизма рассеяния азимутальный угол считается равномерно распределенным в интервале от 0 до 2π . Для рандомизирующих актов рассеяния, обычно соответствующим неупругим процессам, все состояния на энергетической поверхности, соответствующей конечному состоянию, равновероятны. В этом случае полярный угол θ определяется по формуле [7]

$$\cos \theta_{rand} = 1 - 2r, \quad (11)$$

где r – случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1.

Сделаем акцент на рассеянии на радиационных дефектах. Известно [9], что в зависимости от типа дефектообразующего излучения образуются либо точечные дефекты – при воздействии гамма-излучения или электронного потока, либо кластеры радиационных дефектов – при воздействии потока нейтронов или ионов.

Рассеяние на заряженных точечных дефектах аналогично рассеянию на ионах легирующей примеси, то есть частота рассеяния и угол рассеяния определяются либо по формуле Брукса-Херринга [7]

$$\lambda_{BH} = \frac{\pi N_{def} q^4}{\varepsilon^2 W_\beta^2} \sqrt{\frac{32W}{m}} \frac{1}{1 + \frac{4W}{W_\beta}}, \quad (12)$$

$$\cos \theta_{BH} = 1 - \frac{2(1-r)}{1 + \frac{4W}{W_\beta} r}, \quad (13)$$

$$W_\beta = \frac{\hbar^2 \beta^2}{2m}, \quad \beta = \sqrt{\frac{4\pi q^2 n_0}{\varepsilon k_B T}}, \quad (14)$$

либо Конуэлла-Вайскопфа [7]

$$\lambda_{CW} = \pi N_{def} b^2 \sqrt{\frac{2W}{m}}, \quad (15)$$

$$\cos \theta_{CW} = \frac{\left(\frac{W}{W_b}\right)^2 r - 1}{\left(\frac{W}{W_b}\right)^2 r + 1}, \quad (16)$$

$$W_b = \frac{q^2}{2\varepsilon b}, \quad b = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi N_{def}}}. \quad (17)$$

Здесь N_{def} – концентрация заряженных точечных дефектов, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, n_0 – концентрация носителей заряда.

В отличие от точечных дефектов, кластеры радиационных дефектов являются полностью непрозрачными включениями, окруженными слоями пространственного заряда. Поэтому их поперечное сечение должно зависеть от энергии носителей заряда [10]

$$\Sigma_{cl} = \frac{16}{3} \sqrt{\pi} \int_0^\infty r^2 \varepsilon k_B T W^{\frac{3}{2}} e^{-W} dW, \quad (18)$$

а угол рассеяния определяется по формуле (11). Здесь r – характерный радиус кластера радиационных дефектов, зависящий от материала, типа излучения и его энергетического спектра. Средний радиус кластера для Si, Ge и GaAs при облучении мгновенными нейтронами спектра деления составляет порядка 10 нм [11]. Частота рассеяния на кластерах радиационных дефектах определяется по формуле

$$\lambda(W) = v(W) \Sigma_{cl} N_{cl}, \quad (19)$$

где v – скорость модельной частицы, $N_{cl} = (0,20 \pm 0,04) \cdot F_n$ – концентрация кластеров (см^{-3}), F_n – интегральный поток мгновенных нейтронов спектра деления (н/см^2).

Результаты расчетов и их обсуждение

В качестве тестовой задачи рассмотрим перенос неосновных носителей заряда (электронов) через тонкую базу гетеробиполярного транзистора [12]. Как отмечалось выше, в многочастичном методе Монте-Карло происходит попеременный расчет уравнений движения модельных частиц в электрическом поле с учетом рассеяний и формируемого ими электрического поля. Максимальная энергия частиц была ограничена величиной 1 эВ, что позволяет принять $\Gamma = 8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Среднее время между рассеяниями, включая саморассеяние, составило 12,5 фс, время между расчетами уравнения Пуассона задавалось равным 40 фс. На два порядка большее время между расчетами поля по сравнению с работой [8] позволило усреднить плазменные осцилляции, приводящие в ряде случаев к развитию вычислительной неустойчивости, а также ускорить время работы программы без существенной потери точности. Общее число модельных частиц совпадало с числом узлов расчетной сетки.

Анализ производительности показал, что основное время вычислений тратится на расчет уравнений движения модельных частиц, которое составляет около 5 минут на сетке 4096×4096 узлов в расчете на одну итерацию алгоритма (40 фс) на ноутбуке с процессором Intel Core 2 Duo T6500 2.1 GHz и видеокартой NVidia GeForce 120M 512 Mb. При этом применялась простейшая явная схема Эйлера интегрирования системы дифференциальных уравнений (8)-(9). При использовании более сложных схем время расчета существенно увеличивалось.

Заключение

Разработана компьютерная программа физико-топологического моделирования переноса носителей заряда в полупроводниковых приборах с учетом радиационного воздействия при помощи метода частиц на основе алгоритма Монте-Карло решения кинетического уравнения Больцмана. Для анализа производительности проведен набор тестовых расчетов. Показано, что основное время вычислений тратится на расчет уравнений движения модельных частиц. Планируется реализация вычислительного алгоритма на суперкомпьютере «Лобачевский».

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
2. Хокни Р., Иствуд Д. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
3. Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. Программа физико-топологического моделирования процессов в перспективных полупроводниковых приборах с учетом радиационного воздействия с распараллеливанием вычислений // в кн.: Труды I Российско-Белорусской конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники» (г. Нижний Новгород, 11-14 сентября 2013 г.) / под ред. А.Э. Рассадина. В 2-х томах. Т.2. С.17-20.
4. Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. Параллельные вычисления в задачах физико-топологического моделирования физических процессов в перспективных полупроводниковых приборах с учетом радиационного воздействия // Журнал радиоэлектроники. 2014. Вып.2. С.1-31.
5. Электронный ресурс <http://www.nvidia.ru>.
6. Рыжий В.И., Баннов Н.А. Математическое моделирование субмикронных элементов интегральных микросхем: состояние и проблемы // Микроэлектроника. 1987. Т.16, Вып.6. С.484-496.
7. Jacoboni C., Reggiani L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials // Rev. Mod. Phys. 1983. Vol.55, No.3. P.645-705.
8. Fischetti M.V., Laux S.E. Monte Carlo analysis of electron transport in small semiconductor devices including band-structure and space-charge effects // Phys. Rev. B. 1988. Vol.38, No.14. P.9721-9745.
9. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Физматгиз, 1963. – 264 с.
10. Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. – М.: Атомиздат, 1975. – 128 с.
11. Оболенский С.В. Моделирование структуры кластера радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном облучении // Известия ВУЗов: Электроника. 2003. №4. С.49-55.
12. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2015. Т.49, Вып.1. С.71-75.

PROGRAM OF PHYSICAL TOPOLOGICAL MODELING OF CHARGE TRANSPORT IN SEMICONDUCTOR DEVICES WITH RADIOACTIVE IMPACT, BASED ON SELF-CONSISTENT ENSEMBLE MONTE CARLO APPROACH

I.Yu. Zabavichev, A.A. Potehin, A.S. Puzanov, S.V. Obolensky

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Computer program of physical topological modeling of processes in modern micro- and nanoelectronic's semiconductor devices with radioactive impact was developed with using CUDA computing technology on NVIDIA graphics processors. Solutions of test problems shown, that the most of the computing time spent on calculations of particle motion equations. The implementation of computational algorithm on "Lobachevsky" supercomputer is under discussion.

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

д.т.н. Гейфман Е.М.¹, к.т.н., Чибиркин В.В.², к.т.н., Гарцев Н.А.¹,
Солонин С.А.¹, Исайкин А.В.¹

¹ АО НПК «Электровыпрямитель», Саранск

² Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

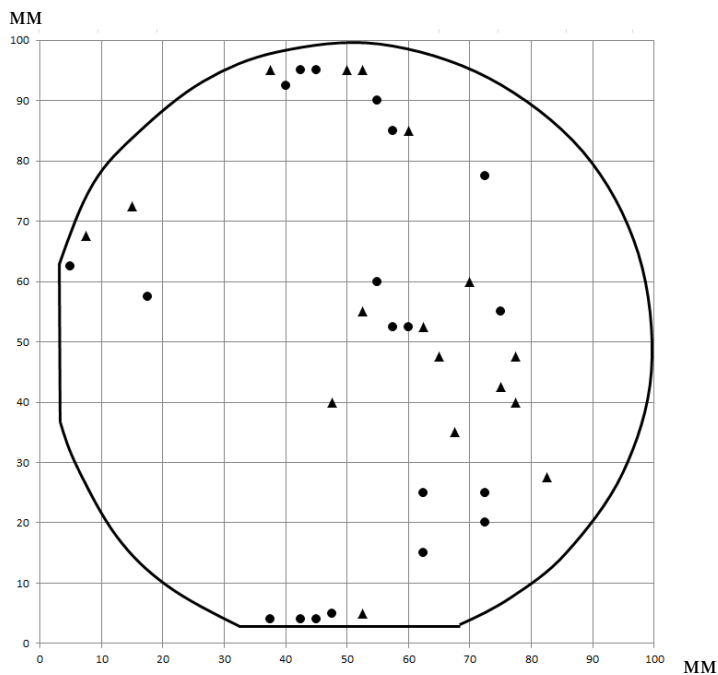
Карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для производства современных полупроводниковых приборов [1]. Ключевой технологией, на основе которой создаются полупроводниковые приборы на SiC, является технология производства эпитаксиальных структур SiC (ЭС).

В настоящее время на АО НПК «Электровыпрямитель» (ЭВ) (Россия) создана современная технологическая линия на основе эпитаксиальной установки фирмы Aixtron (Германия) и разработана технология производства ЭС SiC высокого качества.

При разработке технологии было проведено комплексное исследование влияния основных технологических факторов на параметры ЭС, в том числе, качества исходной подложки, режимов предварительной подготовки поверхности подложек SiC, режимов роста буферных и эпитаксиальных слоев SiC, коэффициента эпитаксиального роста C/Si, количества хлороводорода и др. На основе проведенных экспериментов выработаны оптимальные режимы технологического процесса изготовления ЭС.

Для оценки качества ЭС и подложек SiC в ЭВ создана лаборатория контроля параметров ЭС и разработаны неразрушающие методики контроля их качества [2].

Типичные результаты измерения основных параметров ЭС приведены на рис. 1-3.



- ▲ - Эпитаксиальный дефект в виде «треугольника»
- - Эпитаксиальный дефект в виде «частицы» и «микропоры»



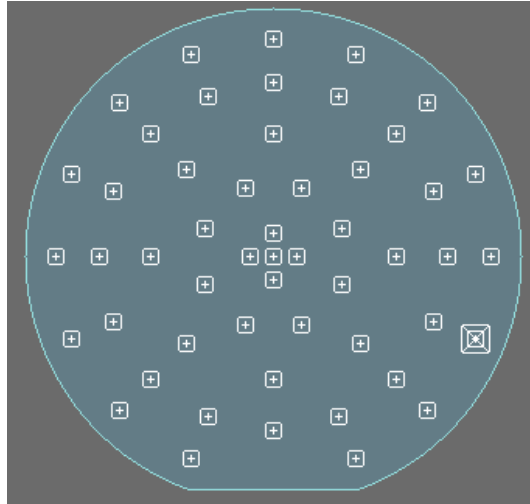
а)



б)

Рис. 1. Распределение эпитаксиальных дефектов по поверхности эпитаксиальной структуры № JH0555-05 диаметром 100,0 мм (а - Эпитаксиальный дефект в виде «треугольника», б - Эпитаксиальный дефект в виде «частицы» или «микропоры»)

а)



б)

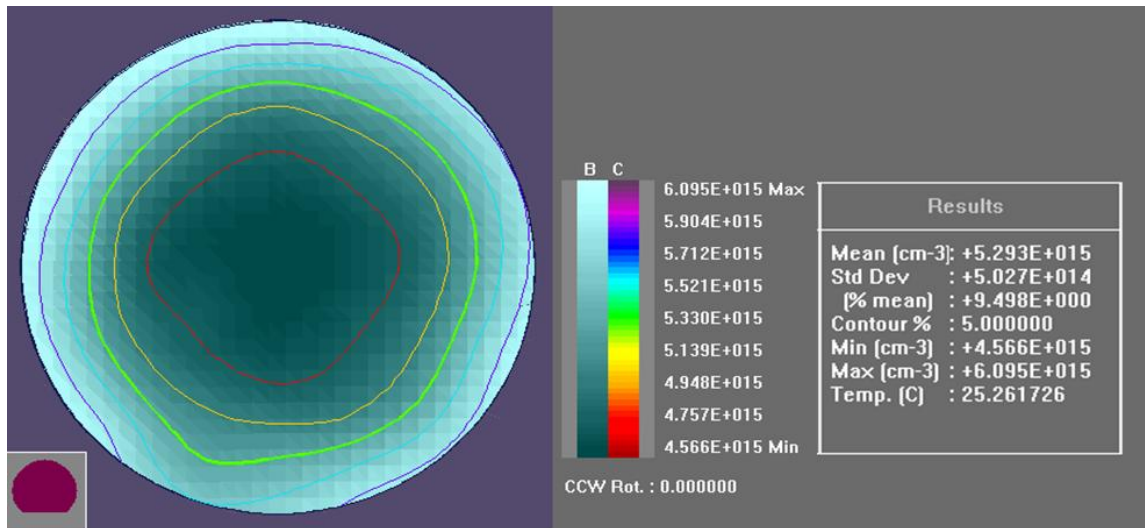
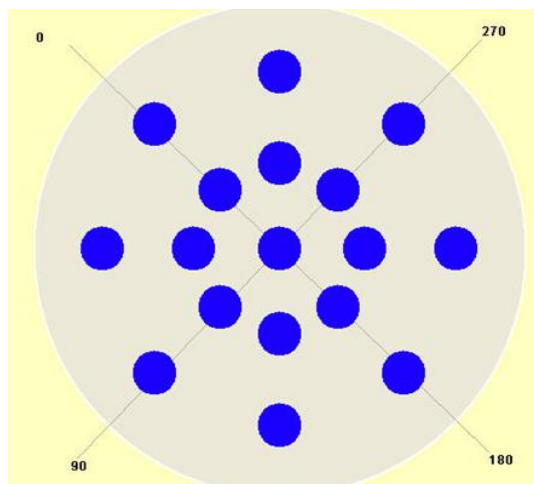


Рис. 2. Измерение концентрации легирующей примеси:

- а) карта областей, в которой проводились измерения концентрации легирующей примеси (концентрации) в эпитаксиальном слое. Режимы измерения: частота генератора 10 кГц, напряжение 0-24,5 В,
 б) результат измерения средней концентрации по эпитаксиальной структуре и карта измеренной концентрации в эпитаксиальном слое

а)



б)

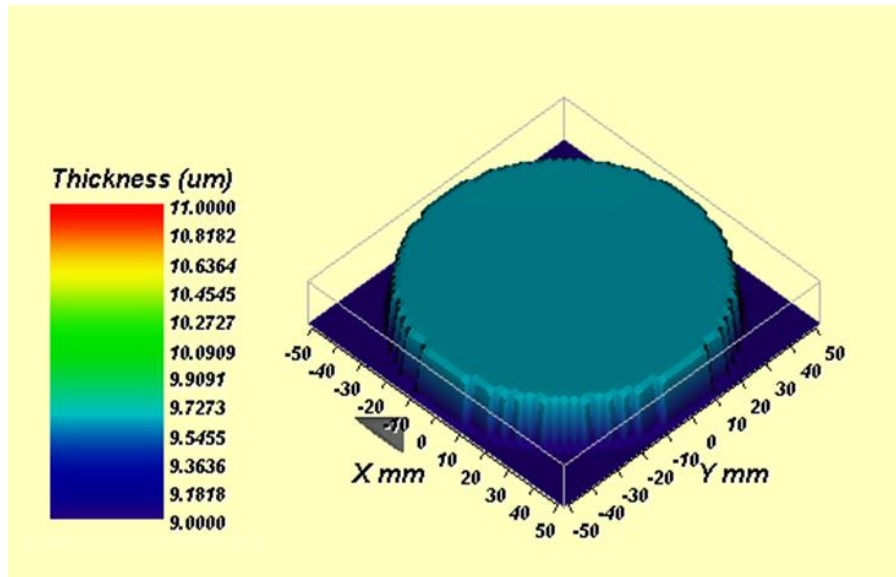


Рис. 3. Измерение толщины эпитаксиального слоя:

а) карта областей, в которой проводилось измерение толщины эпитаксиального слоя, б) типичный результат измерений (толщина – MN: 9,94 мкм; толщина – MAX: 10,01 мкм; толщина – СРЕДН.: 9,98 мкм; толщина – СТАНД.ОТКЛ.: -0,25 %)

Значения основных параметров ЭС, выпускаемых в ЭВ, в сравнении с параметрами ЭС других фирм производителей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения основных параметров ЭС, выпускаемых на ЭВ, в сравнении параметрами ЭС других фирм производителей

Компания-производитель (Страна)	Cree (США)	АО НПК «Электро-выпрямитель» (Россия)	EpiWorld (Китай)	Norstel (Швеция)	TYSiC (Китай)	РАМ-Хиамен (Китай)	Global Power (Китай)
Основной параметр							
Политип	4Н	4Н	4Н	4Н	4Н	4Н	4Н
Разориентация относительно оси <1120>	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis	4 ⁰ off-axis
Тип проводимости	n-тип	n-тип	n-тип	n-тип	n-тип	n-тип	n-тип
Концентрация примеси	9*10 ¹⁴ -10 ¹⁹ см ⁻³	9*10 ¹⁴ -10 ¹⁹ см ⁻³	9*10 ¹⁴ -10 ¹⁹ см ⁻³	-	1*10 ¹⁴ -10 ¹⁹ см ⁻³	5*10 ¹⁵ -2*10 ¹⁸ см ⁻³	2*10 ¹⁵ -2*10 ¹⁷ см ⁻³
Погрешность (tolerance)	±25%	±15%	±15%	-	±20%	±25%	<10%
Однородность	-	<10%	≤10%	-	≤15%	<20%	<10%
Толщина	0.2-50 мкм	0,2-50 мкм	0.2-50 мкм	5-30 мкм	0.5-30 мкм	5-15 мкм	1-20 мкм
Погрешность (tolerance)	±10%	±5%	±10%	-	±10%	±10%	<5%
Однородность	-	<2%	≤10%	<5%	<5%	3''<7% 4''<10%	<5%
Эпитаксиальные дефекты	<25см ⁻²	<0.5см ⁻² < 1 см ⁻²	<1см ⁻²	<2см ⁻²	≤1см ⁻²	≤20см ⁻²	-
Шероховатость	-	≤1 нм	<0.3 нм	-	≤1.0 нм	≤2.0 нм	-

Примечание: Ряд компаний, в частности SiCrystal (Германия), WideTronix (США), Dow Corning (США), Ascatron (Швеция) и другие осуществляют опытное производство SiC ЭС по заказу

Радиационнотойкая микроэлектроника

Из приведенных данных следует, что ЭС, производимые на ЭВ, по своим параметрам соответствуют лучшим мировым аналогам, в частности, обеспечивается малая плотность эпитаксиальных дефектов ($<0.5\text{см}^{-2}$), малая погрешность ($\pm 5\%$) и разброс по толщине (типичные значения 0,4%) у производимых на ЭВ ЭС SiC.

По заказу китайской компании Global Power Technology Co., Ltd. (GPT) ЭВ была изготовлена и поставлена партия ЭС SiC в соответствии с заявленными параметрами. На основе ЭС SiC ЭВ GPT изготовила Junction Barrier Shottky на токи 2 А и 10 А с напряжением 1200 В и провела их испытания.

На рис. 4 представлено полученное распределение годных и не годных чипов GW1-S12002 (а) и GW1-S12010 (б). Темным цветом закрашены кристаллы не соответствующие техническим требованиям. Из рисунка видно, что процент выхода годных чипов находится в пределах от 81% до 88%, что свидетельствует о высоком качестве ЭС SiC изготовленных ЭВ.

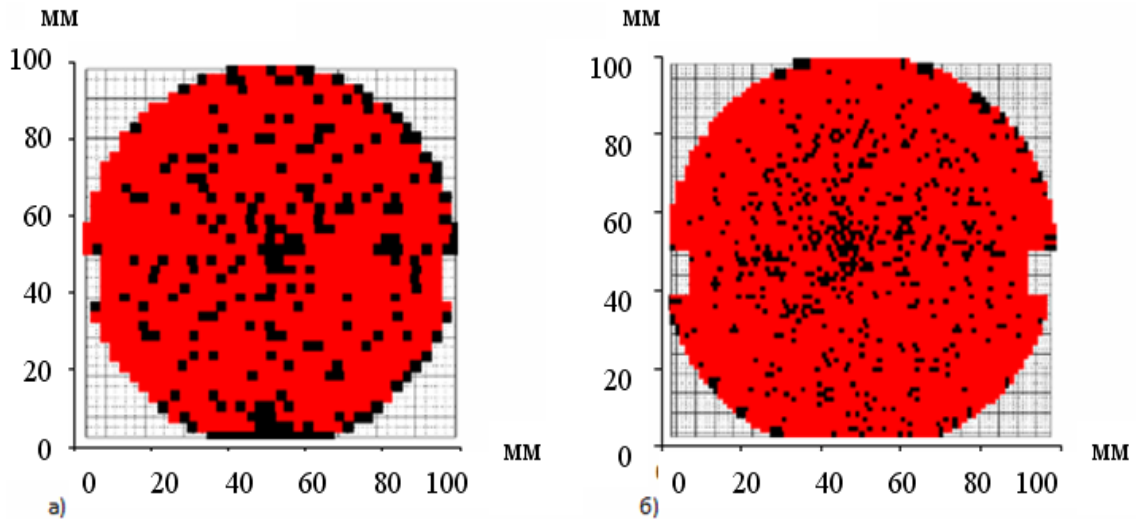


Рис. 4. Распределение годных и не годных чипов изготовленных на ЭС SiC ЭВ (а) 10 А 1200 В. Процент выхода годных чипов 81.31 % и (б) 2 А 1200 В. Процент выхода годных чипов 88.86%

Литература

1. Н. Okumura, Н. Harima, Т. Kimoto and at. Silicon Carbide and Related Materials (2013)
2. Е.М. Geifman, V.V. Chibirkin and at. Complex study of SiC epitaxial films / Silicon Carbide and Related Materials (2012), p. 593-596

ELABORATION AND PRODUCTION OF HOME SILICONE CARBIDE EPITAXIAL STRUCTURES FOR ELEMENT BASE OF RADIOELECTRONICS OF NEW GENERATION

Е. М. Geifman¹, V. V. Chinirkin², N. A. Gartsev¹,
S. A. Solonin¹, A. V. Isaikin¹

¹ SC SPC "Elektrovipryamitel", Saransk

² Mordovskiy State University n. a. N.P. Ogarev

The measurement results of main characteristics of silicon carbide (SiC) epitaxial structures produced by the authors are presented. The results show, that the SiC epitaxial structures are produced with a high quality and correspond to the highest world standards.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Федичкин И.Л., к.ф.-м.н. Попов Е.О., Тюкальцев Р.В.,
Романов П.А., Филиппов С.В., к.ф.-м.н. Колосько А.Г.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Введение

Экстремальные условия космической среды: глубокий вакуум, радиация, значительные перепады температур, механические и химические факторы, - могут оказывать деструктивное влияние на функционирование космических аппаратов [1]. С целью повышения надёжности и долговечности работы бортовой аппаратуры на этапе приёмочных испытаний предъявляются более жесткие требования к составляющим ее электронным компонентам [2-4].

Важнейшим направлением улучшения качества производимой микроэлектронной продукции является контроль содержания влаги в подкорпусном пространстве интегральных схем и модульных изделий, а также идентификация и определение количества микропримесей, находящихся в конструкционных элементах. Наличие влаги и других микропримесей может вызывать коррозию в подкорпусном пространстве электронных изделий.

Первые работы по тестированию продукции электронной промышленности на содержание подкорпусной влаги появились уже в 60-х гг. прошлого века [5]. На рис.1 представлены возможные источники влаги в микросхемах.

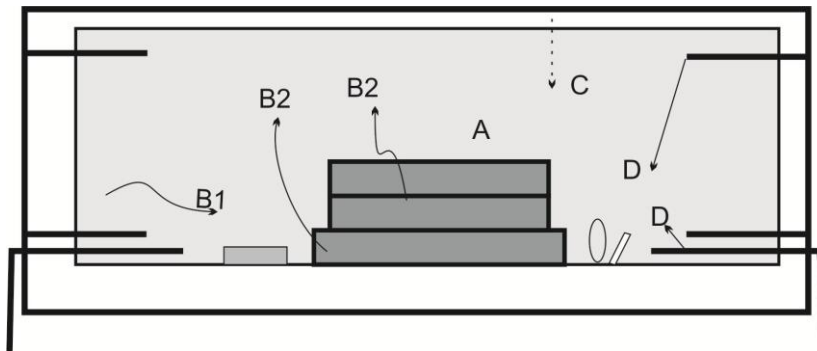


Рис.1. Источники влаги в микросхеме: А – газ, заполняющий микросхему; В1 – материал корпуса микросхемы; В2 – материалы, использованные в микросхеме (клеи и др.); С – диффузия через мембраны; D – течи

Наличие воды в устройствах нежелательно еще и потому, что она обеспечивает перенос имеющихся загрязнений, которые могут вызывать коррозию и сбои в работе микросхем. Многочисленные упоминания о таких механизмах коррозии и сбоях приведены в работах [6-8], а подробное описание – в статье [9]. В работе [10] описываются механизмы коррозии и экспериментальные способы выявления её причин. Примеси, вызывающие коррозию, воздействуют посредством отрицательных и/или положительных ионов, использующих воду в качестве носителя. Процесс коррозии усиливается и наличием электрического тока в цепи работающей микросхемы. Наиболее распространенными загрязнениями являются остатки кислот или щелочей, используемых в технологии изготовления продукции (Cl^- , F^- , NO_3^- , SO_4^- , PO_4^- , Na^+ , K^+). Приведем примеры агрессивных химических реакций:



Коррозия может происходить и без водного носителя при наличии гидроксильного радикала OH^\cdot [11] или радикалов хлора, фтора, йода, образованных из галогенизированных органических растворителей, которые часто применяются при обработке поверхностей корпусов и кристаллов микросхем. Например, в [12] наблюдались значительные колебания содержания фтора в примесях алюминия, вызванные различиями в процессе плазменной обработки.

Методика эксперимента

В модернизированном комплексе МКМ-1 используется времяпролётный масс-спектрометр, разработанный с учётом специфики требований ОСТ 11 073.013-2008 и ГОСТ РВ 5962-004.2-2012 по

Радиационностойкая микроэлектроника

анализу паров воды и микроконцентраций активных примесей, находящихся в подкорпусном пространстве микросхем, изготавливаемых для бортового оборудования.

Основополагающим принципом работы прибора МКМ-1 является то, что подготовка, дегазация поверхности, вскрытие образца и выпуск из него анализируемого газа происходит при масс-спектрометрическом контроле газовой фазы. Это позволяет перед вскрытием корпуса проконтролировать минимизацию паров воды и газовых примесей, идущих с поверхности микросхемы и являющихся нежелательным фоном при проведении прецизионных измерений. Схема, реализованная в МКМ-1, позволяет наблюдать в режиме реального времени за процессом десорбции влаги и примесей с поверхности образца перед вскрытием и тем самым свести до минимума их фоновый уровень. На рис.2 представлена функциональная схема комплекса МКМ-1. Процесс проведения измерений является двухстадийным: испытуемая микросхема помещается в шлюзовую камеру, и после откачки до высокого вакуума перемещается в камеру вскрытия, в которой находится ионный источник масс-спектрометра. Скорость замены образцов увеличивается также и за счёт полной автоматизации процесса измерения от загрузки корпуса до выдачи протокола замера. Это повысило производительность работы приборного комплекса в 2 раза, а число проведенных анализов до 16 образцов за смену.

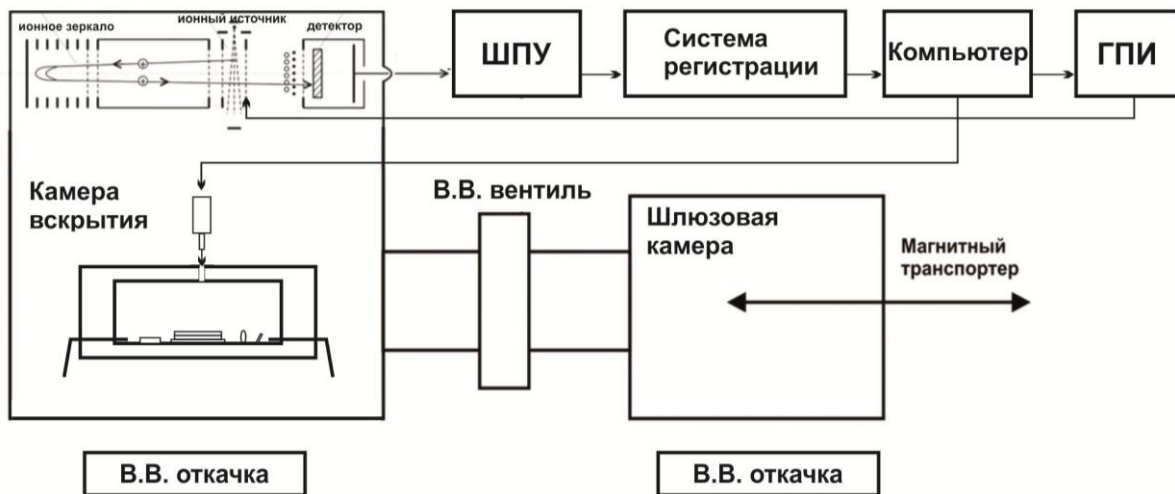


Рис. 2. Блок-схема измерительного комплекса МКМ-1: камера вскрытия и шлюзовая камера с высоковакуумной откачкой

Одной из ключевых особенностей комплекса является применение автоматизированного устройства пошагового микровскрытия. По достижении необходимого уровня фона прокалывающее устройство создаёт микротечь в корпусе микросхемы. Парогазовая смесь через полученное отверстие попадает в область ионизации масс-спектрометра заранее рассчитанным потоком, который зависит от величины образовавшегося отверстия и скорости откачки вакуумного насоса.

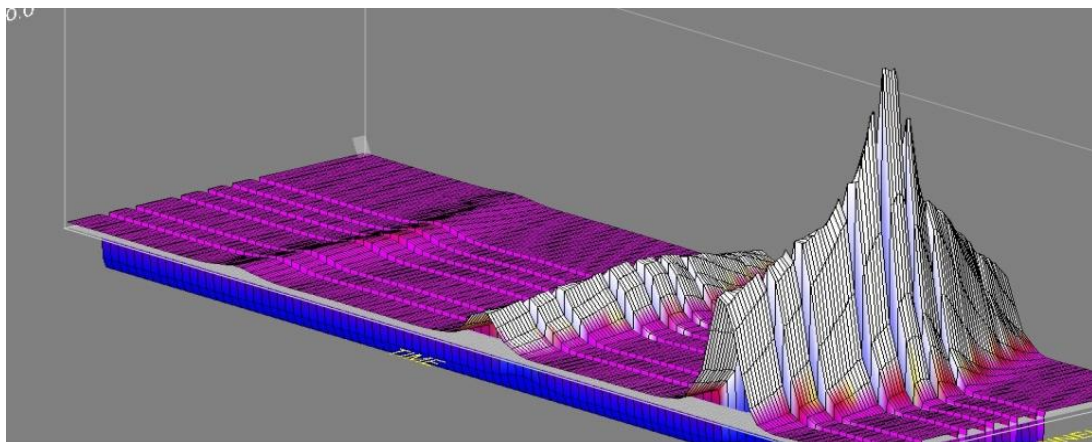


Рис. 3. Кинетика концентрации паров воды в зависимости от температуры микросхемы

Программное обеспечение МКМ-1 предоставляет полное управление источниками питания масс-спектрометрической установки, а ее графический интерфейс позволяет наблюдать в режиме реального

Радиационностойкая микроэлектроника

времени как мгновенные спектры, так и кинетику выбранных масс по заданным временным stroбам. Интерфейс управляющей комплексом программы позволяет строить временные и температурные зависимости относительных концентраций паров воды и других газовых компонент. На рис.3 представлен 3D масс-спектр, иллюстрирующий изменение концентрации паров воды с ростом температуры микросхемы в режиме реального времени.

Примеры применения методики

1. На масс-спектрометрическом комплексе МКМ-1 была выполнена работа для ЗАО «Светлана-Полупроводники» по определению причин повышенного содержания паров воды в подкорпусном пространстве некоторых типов микросхем. В таблице 1 представлены результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве. Из пунктов 2 и 3 таблицы видно, что отсутствие термообработки и вакуумной сушки приводит к повышенному содержанию влаги по сравнению с пустыми корпусами (п.1). Пункты 4-7 указывают на то, что в отличие от посадки кристаллов микросхемы на клей, посадка на эвтектику не увеличивает содержание влаги в подкорпусном пространстве.

Таблица 1. Результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве микросхем, изготовленных по технологиям предприятия «ЗАО «Светлана-Полупроводники»

Тип корпуса		Технология	Содержание газов, %				Объём корп., мм ³
			№	N ₂	ОН	H ₂ O	
1	402.16-18	Пустой корпус	1	99,37	0,04	0,13	48,1
			2	99,38	0,03	0,10	48,1
2	H04.16-2B	Без термообработки	1	78,01	0,07	1,56	26,23
			2	78,65	0,05	2,11	26,23
3	H04.16-2B	Без вакуумной сушки	1	99,24	0,05	0,80	26,23
			2	99,04	0,06	0,63	26,23
4	402.16-18	Эвтектика, полн. цикл	1	99,81	0,13	0,12	48,1
			2	99,47	0,11	0,07	48,1
5	401-14-5M	Эвтектика, полн. цикл	1	99,70	0,07	0,08	23,03
			2	99,01	0,08	0,07	23,03
6	401-14-5M	Клей, полн. цикл	1	99,41	0,06	0,43	23,03
			2	99,65	0,07	0,15	23,03
7	402.16-18	Клей, полн. цикл	1	99,55	0,09	0,35	48,1
			2	99,01	0,08	0,84	48,1

2. Для компании AS «ALFA RPAR» (г. Рига) было проведено исследование содержания влаги в корпусах микросхем, которые были обработаны по технологии дополнительной инфракрасной сушки при повышенных температурах. Идея заключается в удалении влаги из микрокапилляров, которые были обнаружены в работе [14]. В указанной работе с помощью растровой электронной микроскопии определялась структура керамики корпуса, а также клея, используемого для монтажа кристаллов. Были выявлены капиллярные каналы (поры) размером от 0,2 до 3,9 мкм. Расчёты показывают, что внутри капилляра диаметром 0,2 мкм расчётное давление может составлять 1,4 МПа, а температура кипения воды может достигать до 250°C.

Исследования на масс-спектрометре показали, что при стандартной термической обработке содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем находится в диапазоне 0,25 - 0,35%, а при инфракрасной обработке – в диапазоне 0,10 - 0,20 (см. табл. 2).

Таблица 2. Данные о влиянии дополнительной ИК сушки

Тип технологического процесса	Процентное содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем			
	Серийная технология	0,29	0,32	0,25
Серийная технология с ИК сушкой	0,12	0,17	0,14	0,09

Выводы

После проведенной модернизации, комплекс МКМ-1 стал превосходить по многим параметрам иностранные аналоги и в настоящее время позволяет:

- быструю смену образцов и проведение полного масс-спектрометрического анализа до 16 образцов за смену.

Радиационностойкая микроэлектроника

- минимизировать фоновые концентрации паров воды и газовых примесей, идущих с поверхности микросхемы, непосредственно перед вскрытием корпуса, что позволяет проводить прецизионные измерения.

- обеспечивать доставку газовой пробы и паров воды из подкорпусного пространства объекта непосредственно в измерительную область масс-спектрометра, что на порядок повышает точность и воспроизводимость результатов.

- расширить линейный и объёмный диапазон измеряемых корпусов в 20 раз, что позволяет проводить замеры микросхем с внутренними объёмами от 0,01мм³ до 500 см³ и с линейными размерами от 0,1 мм до 100 мм.

Проведены исследования изделий ЗАО «Светлана-Полупроводники» и AS «ALFA RPAR», выявлены факторы, вызывающие снижение надёжности интегральных микросхем.

Модернизированный комплекс МКМ-1 позволяет проводить целенаправленный отбор материалов и технологических процессов, применяемых при изготовлении изделий микроэлектронной промышленности.

Литература

1. А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов, Космическая электроника. В 2-х книгах, Техносфера, Москва, 2015, 696 с.
2. В.И. Орлов, В.В. Федосов, О принципе равнопрочной комплектации электронной компонентной базой аппаратуры космических аппаратов, 13-я Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2014», Санкт-Петербург, (2014).
3. R.K. Lowry, R.C. Kullberg, D.J. Rossiter, Harsh environments and volatiles in sealed enclosures, Proceedings of Surface Mount Technology Association International Technical Conference, Orlando, (2010).
4. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.31.001.A № 50950. Анализаторы влажности МКМ-1, 2013, №554.
5. P.H. Eisenberg, G.V. Brandewie, R.A. Meyer, Effect of ambient gases and vapors at low temperature on solid state devices, Seventh New York Conference on Electronic Reliability, IEEE, (1966).
6. R.W. Thomas, Moisture myths and microcircuits, Proceedings 26th Electronic Components Conference, San Francisco, (1976).
7. K.L. Perkins, J.J. Licari, R.L. Buckelew, Investigation of moisture effects on selected microelectronic devices, Proc. ISHM Symposium (1978).
8. R.K. Lowry, Microcircuit corrosion and moisture control, Microcontamination, (1985).
9. D.T. Somerville, The role of hybrid construction techniques on sealed moisture levels, Proceedings IRPS, Las Vegas (1987).
10. D. Kane, H. Domingos, Nondestructive moisture measurements in microelectronics, Final Report, RADC-TR-87-210 (1987).
11. И.Л. Федичкин Р.В. Тюкальцев, Т.А. Никитина, Масс-спектрометрический метод определения концентрации паров воды в подкорпусном пространстве. Комплекс МКМ-1 // в кн.: Труды I Российско-Белорусской конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники» (г. Нижний Новгород, 11-14 сентября 2013 г.) / под ред. А.Э. Рассадина. В 2-х томах. Т.1. С. 217-220.
12. J.F Graves, W. Gurany, Reliability effects of fluoride contamination of aluminum bonding pads on semiconductor chips, Solid State Technology (1983).
13. D. Stroehle, On the penetration of gases and water vapor into packages with cavities and maximum allowable leak rates, Proceedings International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, (1977).
14. В.А. Солодуха, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев, А.А. Довженко, Е.П. Самцов, Обеспечение надёжности интегральных схем на стадии производства, МНПК Современные информационные и электронные технологии, (2013).

MASS SPECTROMETER METHODS FOR TESTING THE RELIABILITY OF THE MICROELECTRONIC PRODUCTS FOR SPACE SYSTEMS

I. L. Fedichkin, E. O. Popov, R. V. Tyukaltsev,
P. A. Romanov, S. V. Filippov, A. G. Kolosko

The Ioffe Institute of RAS

A realization of a new methodological approach for testing the reliability of the microelectronics products for space industry was proposed. The factors affecting the reliability of integrated circuits (IC) and modular constructs in extreme space conditions were reviewed. The instrumental and methodological tool - mass spectrometric complex MSC-1 designed to conduct research to determine the moisture content depending on the concentration of active radicals and the temperature inside the package cavity of products was created. The

products of microelectronics companies and aerospace industry manufactured at different technological processes were analyzed.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ГАММА И ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ n⁺/n⁻ GaAs СТРУКТУРЫ

Тарасова Е.А., Хананова А.В.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Для проведения корректного численного физико-топологического моделирования параметров полупроводниковых приборов до и после радиационного воздействия необходимо иметь исходные экспериментальные данные, полученные с низкой погрешностью. Наиболее важными параметрами для проведения моделирования параметров транзисторов квазигидродинамическим методом, являются толщины и уровни легирования слоев, а так же распределение концентрации электронов [1]. Эти параметры экспериментально получают путем дифференцирования вольт-фарадных характеристик [2]. Облучение нейтронами и гамма-квантами оказывает большое влияние на распределение электронов в структуре и их подвижность, так как в структурах образуется большое количество точечных дефектов и их скоплений – кластеров радиационных дефектов [3-9].

Для определения положения дефектов в n⁺/n⁻ GaAs структурах после облучения гамма-квантами с энергией 1 МэВ и дозой от 10⁵ до 10⁷ рад применялась специальная методика анализа повторяемости результатов измерений вольт-фарадных характеристик. Предполагалось, что накопление точечных дефектов возможно зафиксировать в ходе проведения эксперимента.

Вольт-фарадные характеристики на одной и той же структуре измерялись 6 раз подряд в течение одного дня в отсутствие фонового освещения. Эксперимент проводился как до, так и после облучения гамма-квантами. Одно измерение занимало 30 минут. Временной промежуток между измерениями характеристик составлял не более 5 минут. В ходе измерений характеристик для каждого напряжения смещения производилось 30 отсчетов емкости, затем эти значения усреднялись. Повторное шестикратное измерение характеристик проводилось не ранее чем через сутки после первой серии измерений – результаты эксперимента полностью повторялись. Из-за того, что характеристики визуально близки, была построена разница между ними для анализа их отличий (Рис. 1).

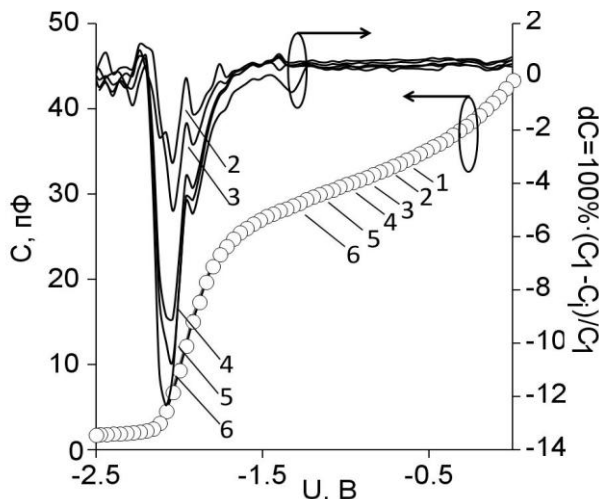


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики GaAs структур, облученных гамма-квантами дозой 10⁷ рад, и их повторяемость при проведении последующих измерений. Цифрами указан номер i-го измерения.

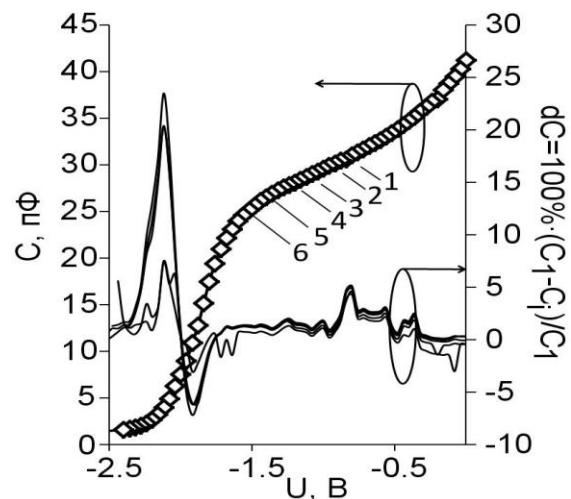


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики GaAs структур, последовательно облученных гамма-квантами дозой 10⁷ рад и нейтронами флюенсом 0.8 · 10¹⁵ н/см² и их повторяемость при проведении последующих измерений. Цифрами указан номер i-го измерения.

Разница в полученных по характеристикам профилей распределения доноров трактовалась как концентрация дефектов. Для структур, которые не подвергались облучению, эта разница была минимальной – отличие в измерениях не превышало 3 – 4 % для всех напряжений смещений. Надежно регистрируемое отличие вольт-фарадных характеристик структур, облученных гамма-квантами, на 10-

15 % свидетельствовало о наличии в исследуемых структурах слоев, содержащих большую, по сравнению с другими слоями, концентрацию дефектов около 10^{14} см^{-3} . Дефекты дозаряжались в ходе каждого измерения, так что вольт-фарадные характеристики незначительно смещались. Было выявлено, что максимальная концентрация дефектов находится на глубине 100 – 300 нм на границе раздела слоев «легированный - нелегированный GaAs» и имеет величину $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Следующим этапом эксперимента было облучение данных структур нейтронами флюенсом $1.2 \cdot 10^{13}$ – $0.8 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$. После облучения была проведена повторная серия измерений вольт-фарадных характеристик. В результате данного эксперимента было зафиксировано наличие небольшого провала в области скопления точечных дефектов и большой рост отличия при значении емкости 1.5-2 пФ (рис. 2).

На рисунке 3 приведено итоговое сравнение зависимостей значения минимума функции $dC(U)$ от номера проводимого измерения для трех случаев: 1) до облучения; 2) после облучения гамма-квантами; 3) после облучения гамма-нейтронами. Видно, что отличие характеристик необлученных структур минимально.

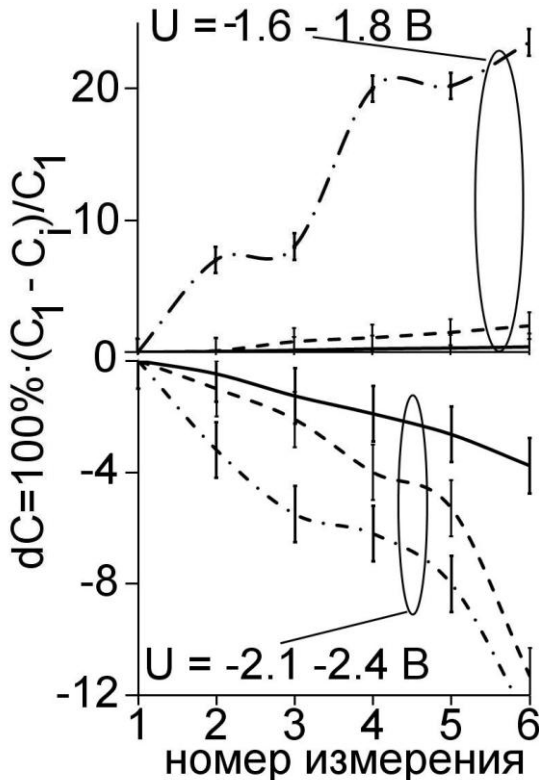
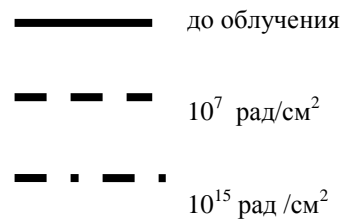


Рис. 3 Повторяемость измерений для n+/n- GaAs структуры для двух диапазонов смещений



Для структур, облученных гамма-квантами, отличие вольт-фарадных характеристики 6-го измерения от первого было более чем на 20 % для диапазона напряжений смещений 1.5-1.8 В. Этим напряжениям соответствуют слои структуры, залегающие на глубине 100 –300 нм, где расположена граница раздела «легированный - нелегированный эпитаксиальные слои». После облучения структуры нейтронами, на графике повторяемости появился дополнительный всплеск (рис. 2) для диапазона напряжений смещений 2.1 – 2.4 В. Эта область соответствует слоям структуры, залегающим на глубине порядка 1 мкм. Предполагается, что указанная граница на глубине 300 мкм является местом сбора радиационных дефектов и атомов доноров после облучения. Дефектообразование в нелегированном слое на глубине порядка 300 - 1000 нм может быть связано с сильными механическими напряжениями кристаллической решетки полупроводника.

Таким образом, разработанная методика позволяет определять положение наиболее дефектного слоя и концентрацию дефектов в нем как в структурах, так и в готовых приборах, до и после облучения гамма-квантами и нейтронами.

Литература

1. Пузанов А.С., Волкова Е.В., Оболенский С.В., Петров С.Г. Применение квазигидродинамической модели для анализа электронного транспорта в полевых и биполярных транзисторах в условиях импульсного ионизирующего излучения с учетом повышенных температур / Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 286-292.

2. Оболенская Е.С., Тарасова Е.А., Оболенский С.В. Особенности анализа вольт-фарадных характеристик транзисторов Шоттки при оценке уровня радиационной стойкости // Вопросы атомной науки и техники, 2012, №4, с. 9-11.
3. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. Минск: Университетское, 1992.
4. Цулег Р. Радиационные эффекты в ИС на GaAs // Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Айнспрука Н., Уиссмана У. - М.: Мир, 1988.
5. Китаев М.А., Оболенский С.В., Демарина Н.В., Киселев В.К. Баллистический транспорт носителей заряда в полевом транзисторе с затвором Шоттки на основе n-GaAs // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела. 2000. № 1. С. 137-140.
6. Kiseleva E.V., Obolenskii S.V. Structure of neutron-induced defect clusters in GaAs MESFETs // Russian Microelectronics. 2006. Т. 35. № 5. С. 322-328.
7. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Особенности стимулированного излучением пробоя р-п перехода с неоднородным легированием // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. № 2. С. 126-135.
8. Громов В.Т., Журавлев К.С., Киселева Е.В., Китаев М.А., Козлов В.А., Оболенский С.В., Ткачев О.В., Торопов А.И., Трофимов В.Т., Шукайло В.П. Сравнение радиационной стойкости полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями гетеробуферов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. № 1-2. С. 58-61.
9. Obolensky S.V., Shashkin V.I., Murel A.V., Vostokov N.V. Simulation of the electron transport in a Mott diode by the Monte Carlo method / IEEE Transactions on Electron Devices. 2011. Т. 58. № 8. С. 2507-2510.

ANALYSIS OF GAMMA AND SERIAL GAMMA-NEUTRON RADIATION ON C-V CHARACTERISTICS OF n⁺/n⁻ GaAs STRUCTURES

Tarasova E.A., Hananova A.V.

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Methodology of analysis C-V characteristics of structures, based on GaAs, before and after gamma-neutron irradiation has offered.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ ИНДИКАТОР ДЛЯ САМОСИНХРОННОЙ СХЕМЫ

Плотникова А.Ю.

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет

Развитие отечественной элементной базы является актуальной проблемой в современных политических реалиях. Одним из перспективных направлений является создание элементной базы на основе самосинхронного подхода. Используя такой подход на практике можно столкнуться со сложностями внедрения ввиду малоизученности такой схмотехники и до конца не раскрытым потенциалом отказоустойчивости самосинхронных схем.

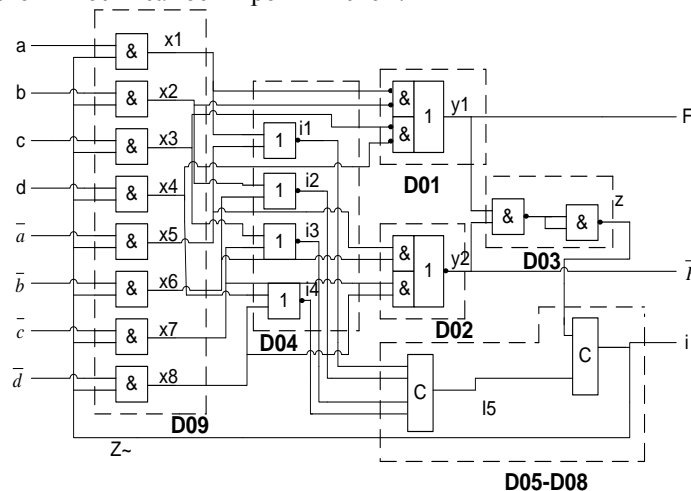


Рис.1. Функциональная схема предложенного элемента [1]

На сегодняшний день проведен ряд исследований отказоустойчивой цифровой аппаратуры, построение которой велось на основе самосинхронного базисного элемента. Известно, что в отличие от синхронного подхода синхронизация схемы в самосинхронном подходе происходит после окончания всех переходных процессов в отдельных блоках схемы. Окончание переходных процессов в этих блоках фиксируются при помощи индикаторов.

В статье [1] предлагается использовать в качестве базиса для построения схем самосинхронный функционально-полный толерантный элемент (рис.1).

Как видно из рисунка 1, в схеме присутствуют индикаторы входа, выделенные в блок D04 и индикатор выходов D03. Далее в статье речь пойдет об индикаторе выходов, выполненном на логических элементах 2И-НЕ и НЕ. Предложенный индикатор весьма прост в исполнении и не обладает свойствами отказоустойчивости, поэтому при его отказе схема оказывается в неработоспособном состоянии. Надежность работы устройства является важнейшим параметром схем. Учеными было выявлено, что переключательные свойства элементов со временем ухудшаются из-за влияния на них радиации или температуры, а также естественного старения элементов. Но данную проблему удалось решить, заменив базовые элементы на их аналоги в самосинхронном базисе. Быстродействие такого базиса остается максимальным при воздействии радиации и/или температуры, благодаря тому, что скорость работы зависит только от окончания переходных процессов в блоках схемы. Как было сказано ранее, окончание переходных процессов фиксируется индикаторами, поэтому важно повысить отказоустойчивость индикатора.

Аналогом базового индикатора был выбран самосинхронный базисный элемент (СБЭ), реализующий логику 2ИЛИ-4И-НЕ. Данный аналог характеризуется меньшим потреблением энергии, низким уровнем перекрестных наводок и электромагнитного излучения. СБЭ имеет большую стойкость к технологическому разбросу параметров температуры, радиации и напряжения питания [2].

Итак, на основе самосинхронного базисного элемента необходимо получить исходную логику работы индикатора 2И-НЕ и инвертора НЕ. Для получения логики 2И-НЕ из логики 2ИЛИ-4И-НЕ, необходимо на первый, третий, пятый, седьмой входы подать выход с основного канала (D01 рис.1), а на второй, четвертый, шестой, восьмой подать выход с инверсного канала (D02 рис.1). Исходная функция элемента 2ИЛИ-4И-НЕ представлена в формуле 1.

$$f(x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee x_5 x_6 x_7 x_8 \quad (1)$$

где x_1 - вход первой комплементарной пары,
 $x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$

входы второй, третьей, четвертой, пятой, шестой, седьмой, восьмой комплементарных пар соответственно.

Если в формуле 1 провести соответствующие замены, то получим следующее выражение, которое реализует логику 2И-НЕ:

$$f(x_1 x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2 x_1 x_2 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \quad (2)$$

Для того чтобы из выражения 1 получить логику НЕ потребуется подать x_1 на все входы базисного элемента:

$$f(x_1) = \bar{x}_1 \bar{x}_1 \bar{x}_1 \bar{x}_1 \vee x_1 x_1 x_1 x_1 = \bar{x}_1 \quad (3)$$

На основании полученных функций на вентильном уровне получен индикатор вида, представленного на рис. 2.

Очевидно, что используя самосинхронный базис сложность схемы увеличивается, что может привести к нарушению свойств самосинхронной схемы в целом. Таким образом, необходимо проверить полученную схему на полумодулярность (semimodular), используя для проверки специализированные системы моделирования. Полумодулярность – свойство схемы, в диаграмме переходов которой отсутствуют конфликтные переходы [3]. Для проверки схемы на данное свойство был использован САПР "Forsage" с подсистемой анализа Tnal.

Подсистема Tnal предназначена для проверки корректности самосинхронной схемы, в независимости от задержек элементов. За основу описания схемы в подсистеме принята модель Маллера. Схема работоспособна, если происходит переход из одного состояния в другое. Наглядным представлением переходов состояний является представление их в виде графов переходов.

В подсистеме Tnal происходит преобразование описания схемы в виде системы уравнений во внутреннее представление графа переходов.

Результатом анализа является констатация факта полумодулярности схемы. По факту окончания процесса моделирования на экран выводятся наиболее существенные характеристики схемы, такие как:

число проанализированных состояний, число слоев, их ширина и пр. Пользователю предоставляется возможность управления процедурой моделирования. Он может задать нужные параметры для схемы, которые влияют на эффективность оценки схемы. Результат моделирования в САПР представлен на рис. 3.

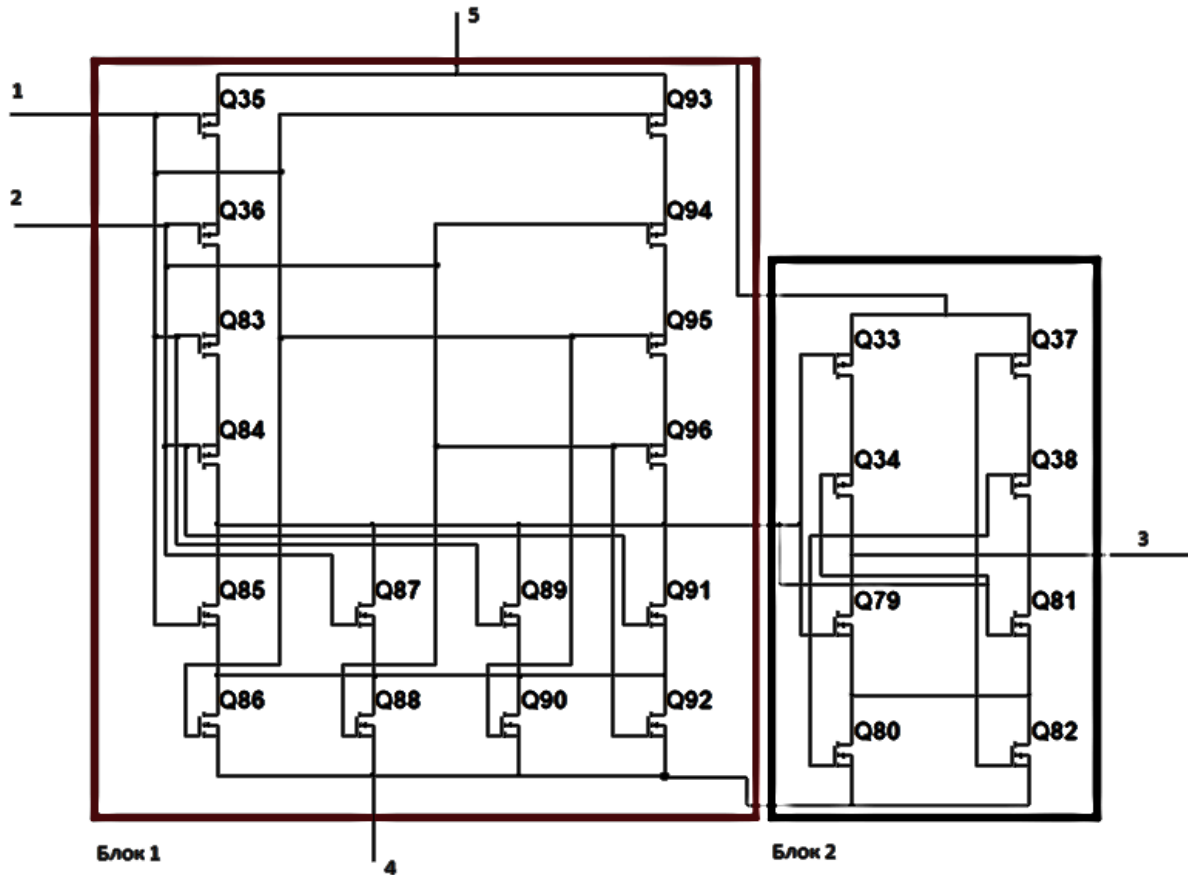


Рис.2. Схема электрическая принципиальная индикатора

```

C:\ D:\TRANAL.EXE
Working
FPT-8
A=0;C=0;
B=1;D=1;
A0=1;C0=1;
B0=0;D0=0;
X1=2*A;
X2=2*B;
X3=2*C;
X4=2*D;
X5=2*A0;
X6=2*B0;
X7=2*C0;
X8=2*D0;
I1=X1;X5;
I2=X2;X6;
I3=X3;X7;
I4=X4;X8;
I5B=I1*I2*
I5=I5B;
Y1=X1^X2^I
Y2=X5^X6^I
K=Y1*Y2*Y1
ZB=K*K!K*K
Do you want to analyze this circuit with a new initial state? [y/n]_
Are the a priori circuit parameters set? [y/n]Y
Is the circuit CYCLE? [y/n]Y
Is the circuit LIVE? [y/n]Y
Are the operational cycle boundaries (in layers) set?[y/n]Y
The operational cycle length boundaries: the LOWER - 1
the UPPER - 999
CIRCUIT Name: D:\FPT-8-MI.
The number of the analyzed STATES: 507 LAYERS: 33
Analysis TIME: 0. 0s.
The Circuit PARALLELISM Degree: 5
The Circuit is SEMIMODULAR
The Circuit PARAMETERS:
In the OPERATIONAL CYCLE: STATES - 506 LAYERS - 32
LAYER LENGTH in the cycle: MIN - 1 MAX - 58
Press Y - Yes or N - Not
    
```

Рис.3. Результат моделирования

Как видно из рисунка 3, предложенный вариант реализации не нарушает полумодулярность схемы. Таким образом, сохраняются требующиеся параметры для самосинхронных схем.

Радиационностойкая микроэлектроника

В САПРе NIMultisim исследуем влияние изменение напряжения питание на быстродействие и энергопотребление схемы. Результаты моделирования схем будут сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты анализа схем

Питание	Индикатор на логике			Индикатор на СБЭ		
	I, mA	U, В	Быстродействие схемы, нс	I, mA	U, В	Быстродействие схемы, нс
5	146,55	2	171,533	95,807	1,973	352,19
4,9	135,914	1,999	195,255	88,859	1,929	364,964
4,8	125,797	1,956	205,292	81,951	1,867	383,212
4,7	116,114	1,872	222,628	78,921	1,824	419,708
4,6	106,508	1,836	240,876	69,897	1,781	419,708
4,5	97,603	1,775	264,599	61,971	1,757	510,949
4,4	92,232	1,78	883,212	56,438	1,702	629,562
4,3	79,937	1,745	321,168	50,575	1,66	693,431
4,2	71,067	1,702	383,212	44,805	1,622	812,044
4,1	64,44	1,66	390,511	44,055	1,585	885,036
4	56,993	1,622	445,255	34,523	1,561	1013
3,9	49,473	1,6	540,146	33,818	1,515	1241
3,8	40,773	1,5	1011	21,34	1,499	1381
3,7	37,406	1,4	1013	16,995	1,4	2489
3,6	34,393	1,3	1253,66	22,623	1,342	3697
3,5	22,084	1,2	1624	19,791	1,2	4852
3,4	-	-	-	17,193	1,099	5962
3,3	-	-	-	11,649	0,999	6321
3,2	-	-	-	11,6	0,729	7367
3,1	-	-	-	10,008	0,663	8942

Из таблицы 1 видно, что предложенный вариант индикатора обладает наилучшими свойствами, поскольку снижая напряжение питания на транзисторах на 38%, общее энергопотребление схемой уменьшается на 66%.

Самосинхронные базисные элементы (СБЭ) сохраняют свою работоспособность при понижении напряжения питания транзисторов до 3,1 В, когда исходный вариант реализации индикатора позволяет понизить его только до 3,5 В. Дальнейшее понижение напряжения влечет за собой прекращение работы всей схемы.

Известно, что самосинхронная схема сохраняет свою работоспособность при однократных отказах и полностью теряет ее только когда происходит отказ по выходу. Данный отказ может произойти и при отказе индикатора, который подтверждает работоспособность схемы. Таким образом, рассчитаем вероятность безотказной работы (ВБР) индикатора.

Будем считать, что вероятность отказов каждого транзистора не зависит от того сколько было отказов до этого и как они распределялись. Поэтому для расчетов может быть использована формула 4.

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (4)$$

где $P_n(t)$ - вероятность безотказной работы, λ - интенсивность отказа транзистора, n - количество отказов за время t , t - время эксплуатации транзисторов.

В нашем случае, вероятность отказа каждого транзистора не зависит от предыдущих отказов, то $n=0$, тогда формула 4 примет вид:

(5)

Поскольку рассматриваемый индикатор, вероятность работы которого будет оценена, состоит из 2-х последовательно соединенных блоков, то суммарная вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

где P_i вероятность безотказной работы i -го блока.

Для исходного индикатора справедлива следующая формула:

Для расчёта ВБР предложенного варианта получена формула:

(7)

(8)

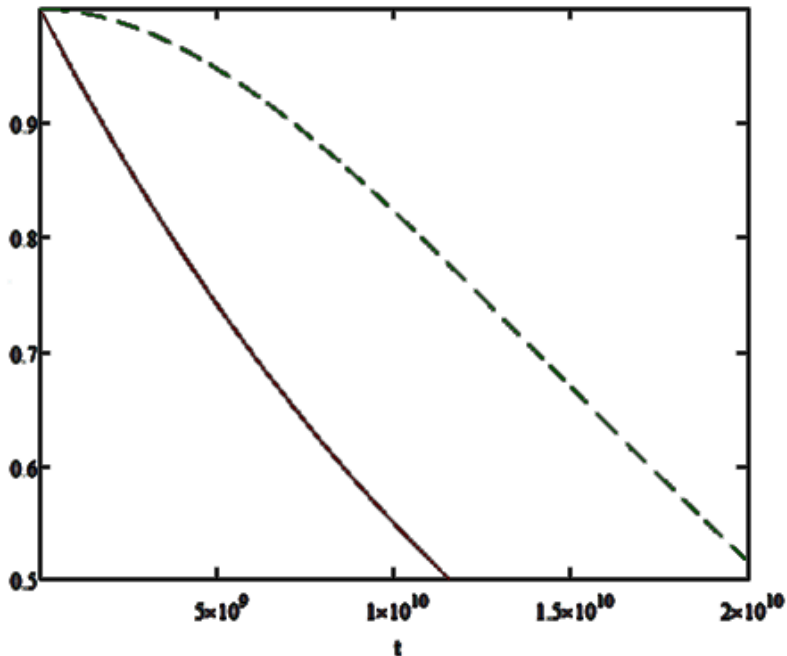


Рис. 4. Сравнительный анализ индикаторов, при интенсивности отказов $\lambda=10^{-11}$, где сплошная линия – ВБР исходного индикатора; пунктирной линией показана ВБР предложенного индикатора

Используя самосинхронный аналог, удалось повысить время наработки на отказ на 5000 часов, что является неплохим результатом.

В результате исследования был получен самосинхронный аналог индикатора, который обладает лучшими свойствами, по сравнению с исходным. Индикатор обладает стойкостью к радиации, низким энергопотреблением и большей вероятностью безотказной работы.

Литература

1. Kamenskih A.N., Ponurovskiy I.S., Tyurin S.F. Syntesis and analysis of self-timed functionally complete tolerant element // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. 2013. № 5 (64). С. 162-167
2. Бумагин А. Самосинхронные схемы. Особенности и преимущества. Электронный ресурс - URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2189/doc/49789> (дата обращения 15.05.2014)
3. Основы самосинхронных электронных схем [Электронный ресурс] / Л.П. Плеханов – Эл.изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 208 с.

E-mail: juris-plot@mail.ru

RADIATION-RESISTANT INDICATOR FOR SELF-TIMED CIRCUITS

A.Yu. Plotnikova

Perm National Research Polytechnical University

The paper presents radiation-resistant indicator based on the self-timed basis element. The author proposes to replace the original indicator 2AND-NOT and NOT based on the logical elements with the self-timed basis analog 2OR-4AND-NOT. The purpose of this paper is to study the characteristics obtained as a result of changes of the indicator and compare them to the original element. Special attention is paid to conservation of the self-timing properties, as well as to influence of voltage variation on the circuit operation.

Using CAD software "Forcage" and NIMultisim, the proposed indicator characteristics are estimated, also probability of the fault-free operation is calculated. While maintaining the original behavior, this indicator has the self-timing properties: resistance to radiation, temperature, surge voltage and large time between failures.

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАНАРНЫХ ДИОДАХ ГАННА

Оболенская Е.С.

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Введение и постановка задачи

Диодом Ганна называют тип полупроводниковых диодов, использующихся для генерации и преобразования электромагнитных колебаний в СВЧ диапазоне. Такие диоды находят широкое применение в современной микроэлектронике, измерительной технике и средствах связи. Традиционная конструкция диодов Ганна [1] представляет собой GaAs структуру, где транспорт электронов осуществляется по нормали к границам слоев полупроводника, а сами контакты в этом случае расположены на верхней и нижней гранях кристалла.

Концентрация доноров в активной области таких диодов обычно составляет $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При радиационном облучении из-за возникновения комплексов дефектов с примесными атомами концентрация электронов уменьшается, что ведет к потере мощности диодов. Согласно данным [2] уровень стойкости «объемных» диодов Ганна составляет $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для быстрых нейтронов.

Такому диоду соответствует домен Ганна, в котором электрическое поле направлено вдоль направления движения домена. Величина критического поля возникновения домена в GaAs составляет 4 кВ/см, т.е. определяет критическое напряжение, для данной длины диода. Движение домена от анода к катоду порождает колебания электрического тока, т.е. генерацию СВЧ сигнала.

В настоящее время идет активная разработка планарных диодов Ганна [2], которые можно было бы использовать в качестве элементов монолитных интегральных схем. Последнее важно при работе в КВЧ диапазоне частот (более 100 ГГц), где гибридные технологии использовать затруднительно. В [2] экспериментально показано, что предельные частоты планарных диодов могут составлять более 300 ГГц.

В данной работе экспериментально исследовались планарные диоды. Конструкция диодов, состав и параметры слоев приведены на рис.1. Контакты диода изготавливались с помощью литографии, зазор между катодом и анодом исследуемых диодов составлял от 2 до 10 мкм. Подвижность в исследуемом дельта-легированном слое 4 составляла от 700 до 1300 $\text{см}^2/\text{В}$ с в зависимости от уровня легирования, а в нелегированных слоях 3 и 5 около 7000 $\text{см}^2/\text{В}$.

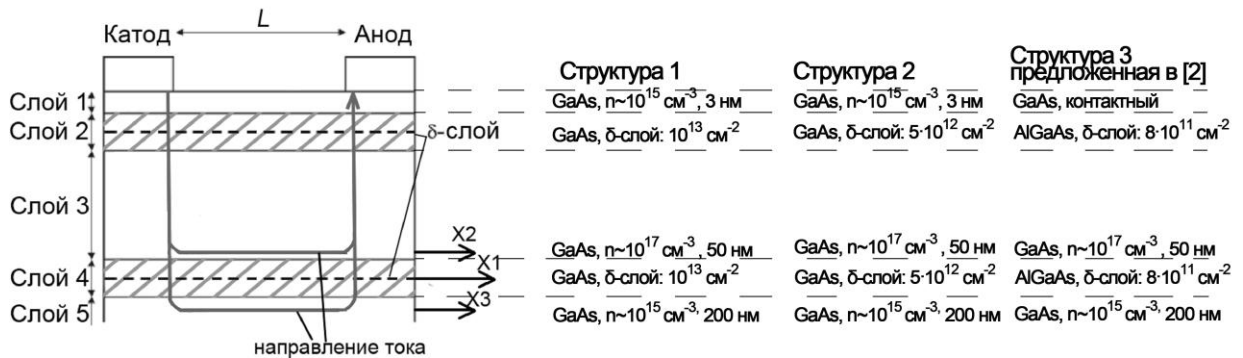


Рис. 1. Структура исследуемого планарного диода Ганна. Верхний дельта легированный слой необходим для компенсации заряда возникающего на поверхности кристалла из-за контакта с атмосферой. Этот слой не принимает участия в работе прибора, так как является обедненным. Рабочей областью является слой № 4 и области слоев 3 и 5 прилегающие к нему. Стрелкой показано направление электрического тока в структуре – большая часть тока протекает по границе слоев 4-3 и 4-5, т.е. там, где много электронов и высока их подвижность из-за малого рассеяния на ионах доноров δ -слоя.

При увеличении уровня легирования влияние радиационного облучения сказывается меньше [7]. При воздействии радиации, будут формироваться комплексы дефектов с примесными атомами, а это приводит к увеличению частоты рассеяния электронов, так что снижается выходная мощность и КПД. Данные о радиационной стойкости объемных диодов Ганна, приведенные в [6] согласуются с нашими выводами.

Из [7] известно, что концентрация электронов и доноров оптимальная для создания объемных диодов Ганна $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ с высокими предельными частотами генерации $\sim 100 \text{ ГГц}$ [1].

В планарных диодах Ганна наличие дельта-легированных слоев (слой 4, рис.1), создает высокую проводимость структуры, а транспорт электронов организуется вдоль границ полупроводниковой структуры в примыкающем слое (слои 3, 5, рис.1) с низкой концентрацией доноров. Таким образом создаются условия, когда есть много электронов и отсутствуют рассеивающие электроны центры, препятствующие образованию домена Ганна. Поэтому в таких диодах реализуется максимально возможная для GaAs отрицательная дифференциальная проводимость, связанная с междолинными переходами электронов. Соответственно КПД и предельные частоты генерации для таких приборов выше, что и доказывают данные [2].

Мы предположили, что в отличие от традиционной конструкции, в планарных диодах уровни радиационного воздействия должны быть значительно выше. Отчасти это предположение подтверждает тот факт, что у транзисторов с двумерным электронным газом (HEMT), использующих сходные полупроводниковые гетероструктуры с дельта-легированными слоями, имеющими концентрацию примеси $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, уровень радиационной стойкости составляет более $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для нейтронного облучения спектра деления [8], что существенно выше чем у объемных диодов Ганна имеющих стойкость на уровне $10^{12}-10^{13} \text{ см}^{-2}$ [6]. Иными словами, чем меньше концентрация примеси, тем меньшая концентрация радиационных дефектов сможет существенным образом влиять на концентрацию электронов, величину электрического тока и выходную мощность диода. В исследуемых нами δ -легированных структурах концентрация примеси и электронов проводимости велика, поэтому ожидается высокая радиационная стойкость изготовленных планарных диодов Ганна.

Задачи данной работы - экспериментально определить наличие междолинных переходов и измерить критическое напряжение образования домена Ганна, а также теоретически предсказать уровень радиационной стойкости КВЧ диодов Ганна, которые могли бы быть изготовлены на указанных структурах.

Эксперимент

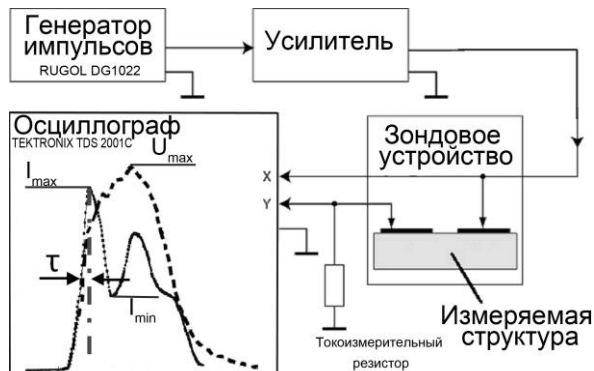


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки и типичный вид зависимости напряжения и тока диода от времени для структуры 2: τ - длительность фронта импульса, измеряемая на полувысоте. От генератора импульсов на диод подавались импульсы длительностью 50 нс с периодом 100 мкс и длительностью фронта импульса менее 10 нс на иглах контактного зондового устройства.

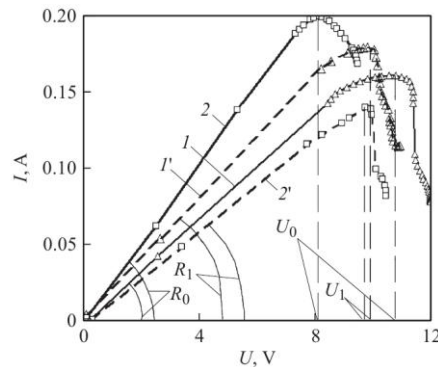


Рис. 3. Вид импульсных вольт-амперных характеристик диодов на структурах 1 (1, 1') и 2 (2, 2') до (1, 2) и после (1', 2') облучения нейтронами со средней энергией 14 МэВ. Обозначения: U_0 и U_1 - напряжения соответствующие максимальным токам диодов до и после облучения, R_0 и R_1 - сопротивления диодов на начальном участке ВАХ до и после облучения соответственно

Для изготовления генераторов на основе диодов Ганна прежде всего необходимо обнаружить области отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперной характеристике данных структур. Важно то, что механизм, приводящий к отрицательной дифференциальной проводимости, должен быть быстрым, порядка 1 пкс, чтобы частоты генерации были около 300 ГГц. Отрицательная дифференциальная проводимость, связанная с разогревом структуры, будет давать частоты генерации порядка единиц МГц, что нам не интересно. Поэтому было необходимо экспериментально доказать, что в рассматриваемых структурах отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) вызвана междолинным переходом электронов (т.е. эффектом Ганна), а генераторы на таких планарных структурах перспективны.

Измерялись на структуры № 1 и 2 с разной концентрацией доноров (рис.1). На рис.2 показана блок-схема экспериментальной установки и типичный вид зависимости импульсов тока и напряжения для структуры № 2. На образец с генератора подавался гаусообразный импульс напряжения, осциллографом

регистрировались падение напряжения на диоде и токоизмерительном резисторе, пропорциональное току диода. Видно, что зависимость импульса тока от времени, соответствующая переднему и заднему фронтам импульса напряжения, отличаются. Это связано с нагревом диода.

Был оценен нагрев. Для структуры № 1 он составил 145 °С, № 2 - примерно на 33 градуса, что мало влияет на параметры диода. Провал в верхней части импульса тока соответствует возникновению отрицательной дифференциальной проводимости, которая чувствительна к температуре структуры. Структура № 2, имеющая больший провал больше подходит для умножения и генерации сигнала.

Были получены импульсные вольт-амперные характеристики диодов до и после облучения нейтронами (рис.3) со средними энергиями 1 и 14 МэВ и флюенсами $4.1 \cdot 10^{14}$ и $1.4 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно. Наблюдался как нормальный, т.е. известный из литературы [6] характер поведения ВАХ диодов, когда сопротивление поле облучения увеличивалось, так и аномальный характер, когда сопротивление диодов снижалось, т.е. параметры структур, с точки зрения перспективности изготовления КВЧ диодов Ганна, улучшались. Полученные данные в целом согласуются с результатами исследований радиационной стойкости δ -легированных слоев GaAs, проведенными в [3] для ионного облучения.

Результаты компьютерного моделирования и сопоставление с экспериментом

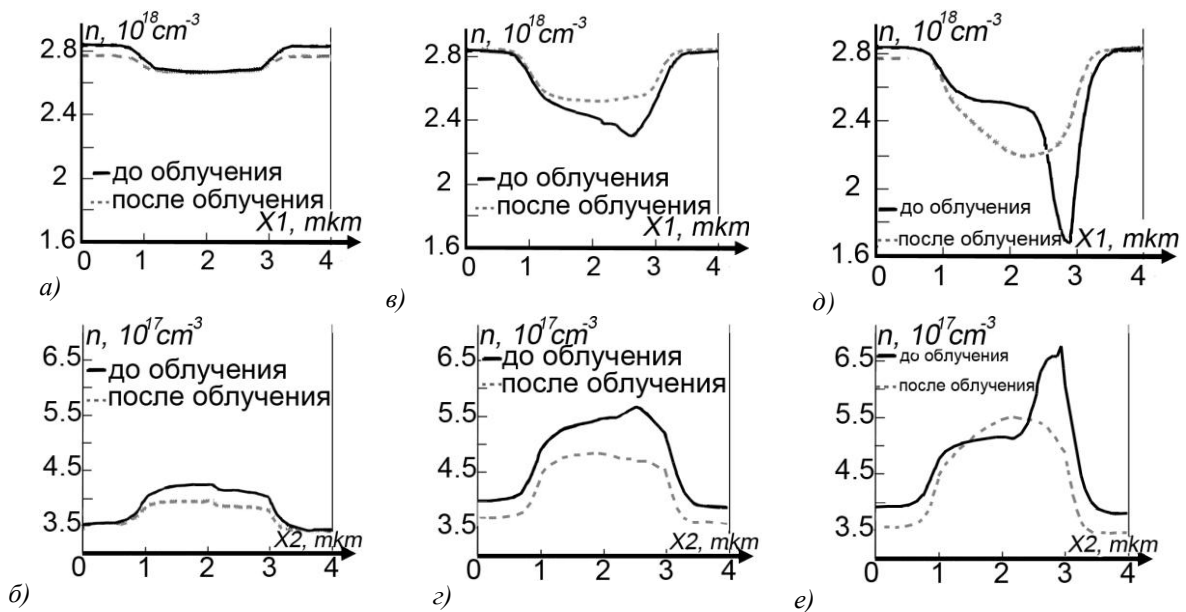


Рис. 4. Расчетная зависимость концентрации электронов в зависимости от продольной координаты вдоль оси X1 и X2 до и после облучения в структуре 2. Напряжение на аноде: а, б - 0.7 В; в, г - 1.7 В; д, е - 2 В.

Моделирование транспорта электронов в полупроводниковой структуре осуществлялось в двумерном приближении с помощью квазигидродинамической модели [1, 7]. Основными уравнениями являются: уравнения Пуассона, непрерывности, баланса энергии и импульса носителей заряда, а также выражения для плотности тока и потока энергии электронов.

Зависимость скорости, времен релаксации энергии и импульса электронов от их энергии задавалась согласно данным, полученным методом Монте-Карло [7, 11]. Решение этой системы уравнений осуществлялось стандартными сеточными методами. Для моделирования процессов в диодах использовались граничные условия смешанного типа – на границах контактов задавались значения потенциала, концентрации и энергии носителей. На остальных поверхностях расчетной области поддерживались нулевыми градиенты потенциала, концентрации и энергии электронов так, что нулевыми были значения плотностей тока электронов и потока энергии электронного газа через эти границы.

Для моделирования радиационного воздействия уровень легирования слоев структуры уменьшали согласно данным [12], также учитывались изменения подвижности и скорости насыщения электронов [7]. Для учета радиационного влияния на динамику формирования домена Ганна в модель вводилась зависимость времен релаксации энергии и импульса электронов от флюенса нейтронного облучения, полученная нами ранее путем моделирования процессов переноса электронов в GaAs структурах методом Монте-Карло [7, 11] с учетом рассеяния электронов на радиационных дефектах различной структуры и размера [10].

В результате расчетов (рис.4) были получены двумерные распределения потенциала, энергии электронов, плотности тока и модуля напряженности электрического поля, а также одномерные графики концентрации электронов вдоль осей X1 и X2, указанных на рисунке 1, приблизительно соответствовавших направлениям движения электронов в активной области структур (см. стрелку на рис. 1).

Из расчета видно, что распределение концентрации электронов в домене Ганна после облучения изменяется – его величина становится меньше, сам домен расплывается, а при уровнях облучения выше 10^{15} см⁻² перестает образовываться. Причиной этого является подавление междолинных переходов электронов вызванное увеличением их рассеяния на радиационных дефектах.

Результаты расчетов показывают, что пороговое значение уровня нейтронного облучения, при котором значение генерируемой диодом мощности уменьшается на 10 %, составляет $2-3 \cdot 10^{14}$ см⁻², что 1.3-1.5 раза ниже уровня, определенного по экспериментальным данным, приведенным выше. Таким образом погрешность предложенной в работе модели составляет 30-50 % и может быть существенно улучшена путем введения поправок, полученных на основе детального моделирования процесса междолинных переходов методом Монте-Карло.

Аномальное поведение структур, соответствующее снижению сопротивления после облучения, прототипично данным компьютерного моделирования. Скорее всего указанное объясняется изменением контактного сопротивления металл – полупроводник, а также влиянием облучения нейтронами с энергией 14 МэВ на характер протекания тока между контактами и слоем № 4.

Расчет, проведенный для GaAs/GaAlAs структуры показал, что в целом процессы формирования домена Ганна подобны процессам в наших структурах, но наличие потенциального барьера гетероперехода повышает эффективность формирования домена Ганна. В связи с этим радиационная стойкость GaAs/GaAlAs структуры выше в 1.5-2.5 раза.

Заключение

Показано, что пороговое значение уровня нейтронного облучения, при котором значение генерируемой диодом мощности изменяется на 10 %, составляет $2-3 \cdot 10^{14}$ см⁻². Из сравнения с литературными данными видно, что для планарных диодов Ганна уровень радиационной стойкости на **1-2 порядка больше**, чем для объемных диодов Ганна традиционной конструкции [6, 12].

Разработанная физико-топологическая модель позволяет проводить расчеты вольт-амперных характеристик, распределения плотности тока, концентрации, электрического поля и средней энергии электронов в планарных диодах Ганна до и после радиационного облучения

Полученные результаты говорят о перспективности применения планарных диодов Ганна в аппаратуре специального назначения.

Работа частично поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ), а также Государственным заданием Минобрнауки России (код проекта 2183).

Литература

1. М. Шур. Современные приборы на основе арсенида галлия (Москва, Мир, 1991).
2. A.Khalid, N.J.Pilgrim, G.M.Dunn. Electron Device Letters, 28 (10), 849(2007)
3. I.Danilov, J.P.deSouza, H.Boudinov, A.V.Murel, V.M.Daniltsev, V.I.Shashkin Appl. Phys. Lett. v. 75, N 13, 1999, p. 1917-1919
4. А.В. Германенко, Г.М. Миньков, С.А. Негашев, О.Е. Рут, О.И. Хрыкин, В.И. Пашкин, В.М. Данильцев. В сб.: Материалы совещания "Нанопотоника" (Нижний Новгород, 2000), 20-23 марта, с. 78
5. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Лапин В. Г.1 Голант Е. И., Капралова А.А. В сб.: 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Sevastopol CriMiCo'2013 Organizing Committee, CrSTC. ISBN: 978-966-335-395-1, 2013), с.122
6. Е.А. Ладыгин. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники (Москва, Сов. радио, 1980).
7. С.В. Оболенский. Изв. ВУЗов: Электроника, 6, 31 (2003).
8. Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Дюков Д.И., Фефелов А.Г., Демидова Д.С. ФТП, 46 (12), 1587 (2012).
9. Е.В.Волкова, С.В.Оболенский. Физика и химия обработки материалов, 3, 29 (2005).
10. Оболенский С.В. Изв. ВУЗов: Электроника, 4, 49 (2003).
11. Н.В.Демарина, С.В.Оболенский. ЖТФ, 72 (1), 66 (2002).
12. Цулэг Р. Радиационные эффекты в ИС на GaAs (М., Мир, 1988) с. 501-547.
13. S. V. Obolensky, A. V. Murel, N. V. Vostokov and V. I. Shashkin. IEEE Transaction on Electron Device, 58 (8), 2507 (2011)
14. Гурьянова В.Г., Оболенский С.В., Скупов В.Д., Фефелов А.Г. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 7. С. 49-52.

EVALUATION OF RADIATION RESISTANCE AND ELECTRON TRANSPORT IN PLANAR GUNN DIODE

E. S. Obolenskaya

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The radiation resistance and electron transport of planar Gunn diodes was investigated. Based on the results of measurements of pulsed current-voltage characteristics and computer simulations it was shown the use of delta doping layers contributes to higher radiation resistance of planar diodes order of magnitude compared to conventional Gunn diodes. Also, it has been experimentally indicated the presence intervalley transitions.

The results of the work allowed us to formulate methodical guidelines that reduce the amount of computational and experimental researches, without reducing their information significantly.

МЕТОДИКА РАЗНЕСЕНИЯ РЕГИСТРОВ КМОП СБИС ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ МНОГОКРАТНЫХ СБОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ

Скоробогатов А. П.

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

При проектировании интегральных схем (ИС), используемых в космических аппаратах, одной из основных задач является обеспечение их стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Наиболее вероятными событиями при воздействии ТЗЧ являются одиночные сбои (single event upset, SEU), заключающиеся в переключении отдельных логических элементов ИС. При одиночном сбое ИС остается исправной, и работоспособность может быть в дальнейшем восстановлена [1]. В современных высокопроизводительных СБИС с ростом степени интеграции увеличивается вероятность многократных сбоев.

При прохождении ТЗЧ через полупроводник происходит образование электрон-дырочных пар. В результате за счет дрейфового и диффузионного процессов сбора заряда с трека ТЗЧ на элементе ИС возникает ионизационный ток [2], [3]. Механизм формирования ионизационного тока в структуре на объемном кремнии показан на рис. 1 [4].

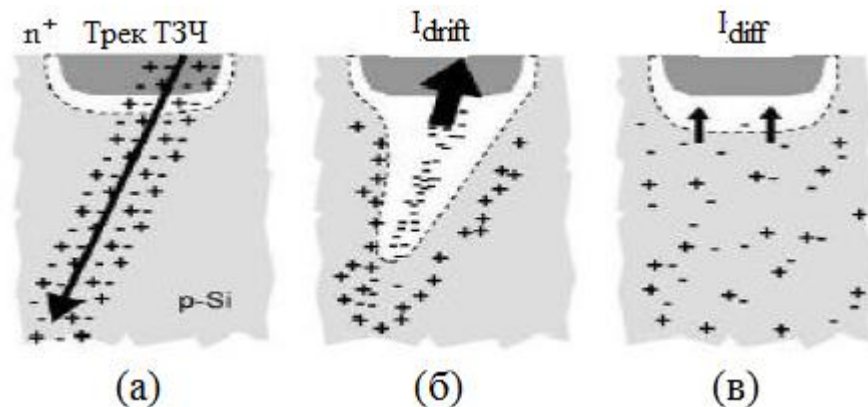


Рис. 1. Механизм формирования ионизационного тока в структуре на объемном кремнии: (а) – трек ТЗЧ, (б) – дрейфовая компонента тока, (в) – диффузионная компонента тока

В технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) наибольшее значение будет иметь дрейфовый процесс сбора заряда в области $p-n$ перехода, поскольку паразитные емкости периферийных областей крайне малы для диффузионного процесса. В объемной комплементарной технологии «металл-оксид-полупроводник» (КМОП) значение будут иметь обе компоненты с преобладанием диффузионного процесса сбора заряда в чувствительном объеме полупроводника (рис. 2).

Одним из способов преодоления многократных сбоев является пространственное разнесение компонентов, относящихся к различным логическим модулям, на расстояние, превышающее размер чувствительной области. Под размером чувствительной области понимается максимальное расстояние от трека ТЗЧ, на котором накопленный вследствие диффузионного процесса заряд способен вызвать сбой в работе логического элемента. Область сбора заряда в этом случае рассматривается в виде цилиндра радиусом R и высотой Z_0 , равными размеру чувствительной области и длине трека ТЗЧ соответственно

(рис. 3). Однако при разнесении важно не допустить существенного снижения плотности упаковки элементов на кристалле.

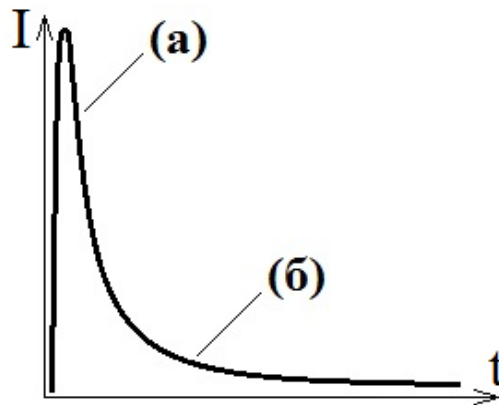


Рис. 2. Характерная форма импульса ионизационного тока: (а) – дрейфовая компонента, (б) – диффузионная компонента

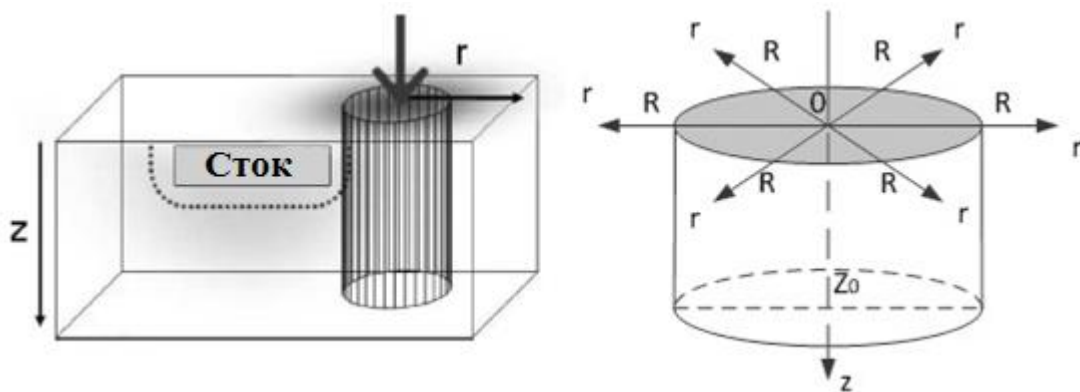


Рис. 3. Модельное представление чувствительного объема при пролете ТЗЧ

Наиболее распространенным решением в области разнесения элементов СБИС является выделение логических блоков ИС и размещение их элементов в строго определенных местах или в рамках специальных регионов (рис. 4). Такой подход не удобен по причине наличия ручных правок в топологии и снижения частотных характеристик схемы по сравнению со схемой со свободным расположением элементов.

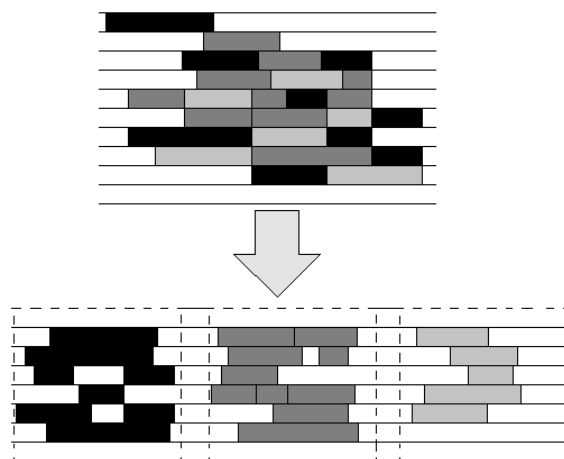


Рис. 4. Разнесение топологически смещенных ячеек полужаказной ИС в рамках выделенных регионов

Для размещения ячеек в рамках разработки одного из процессоров НИИСИ РАН с проектными нормами КМОП 65 нм была разработана методика, позволяющая проводить размещение элементов ИС без ручных правок в рамках стандартного функционала средств автоматизированного проектирования

(САПР). В данном проекте целевыми элементами ИС, разнесение которых требовалось для повышения сбоеустойчивости схемы, были выбраны регистры. Для реализации метода было создано дополнение к библиотеке стандартных элементов, содержащее увеличенные геометрические размеры регистров. В результате на этапе размещения элементов в САПР расстояние между регистрами учитывает величину заложенного пространственного резерва. После подключается библиотека ячеек без резервирования, поставляемая фабрикой, и проводится размещение остальных ячеек.

Данная методика хорошо применима к блокам с небольшой плотностью заполнения регистрами. Из-за особенности задания в САПР пространственного резерва, заключающейся в кратности выделяемого пространства технологическому шагу размещения фабрики, происходит значительное увеличение площади, выделяемой на размещение регистра. Отношение площадей до и после резервирования будет равно:

$$\frac{S1}{S0} = \frac{(H + 2H_r)(L + 2L_r)}{HL}, \quad (1)$$

где L и H – длина и высота стандартной ячейки, H_r и L_r – величины пространственного резерва по вертикали и горизонтали соответственно. Технологичность КМОП 65 нм, используемая в данном проекте, имеет технологический шаг 0,24 мкм по горизонтали и 2 мкм по вертикали. Путем анализа литературы сделан вывод о достаточности разнесения регистров на 2 мкм [5-7]. С учетом размера регистровых ячеек на данной технологии, величина отношения $S1/S0$ находится в пределах от 4,5 до 5,7. Следовательно, для данной технологии плотность заполнения регистрами не должна превышать 17,5%. Важно перед началом размещения провести необходимые расчеты и убедиться в наличии достаточного количества свободных мест для ячеек.

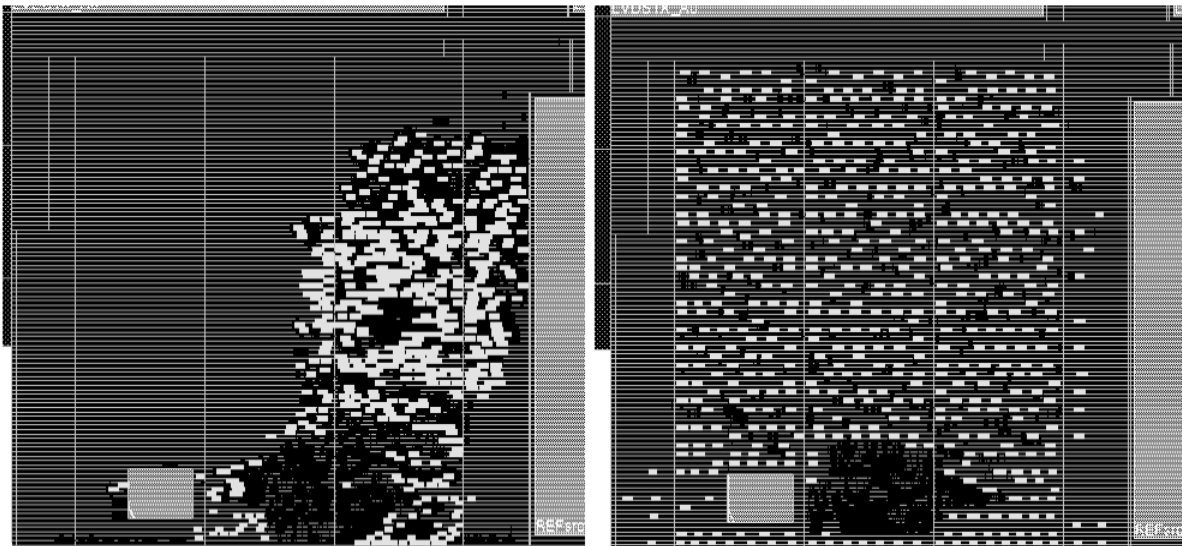


Рис. 5. Часть топологии трансмиттера стандарта LVDS до (слева) и после (справа) применения методики

Таблица 1. Данные по применению методики резервирования пространства

Блок	Число регистров данных	Плотность заполнения регистрами, %	Число и кратность потенциальных сбоев					
			2-кратные		3-кратные		4-кратные	
			До	После	До	После	До	После
LVDS трансмиттер	535	5,01	251	41	110	25	3	0
DVI трансмиттер	432	7,25	203	87	102	49	6	0
Графическое ядро	104215	18,80	46835	38831	19707	16448	525	204

В качестве примера использования данной методики для снижения вероятности возникновения многократных сбоев была проведена оценка числа потенциальных сбоев в регистрах данных. Были рассмотрены блоки трансмиттеров стандартов LVDS (low-voltage differential signaling, низковольтная дифференциальная передача сигналов) и DVI (digital visual interface, цифровой видеоинтерфейс), а также блок графического ядра. Число и кратность сбоев оценивались геометрическими методами с использованием экспортированных из блока координат. На рис. 5 приведена часть топологии трансмиттера стандарта LVDS с наиболее плотным расположением регистров данных до и после

применения рассматриваемой методики. Регистры выделены белым цветом. Сводные данные приведены в таблице 1.

На рис. 6 приведен график зависимости эффективности σ предложенной методики для преодоления многократных сбоев от плотности заполнения регистрами ρ . Под эффективностью понимается снижение числа мест потенциальных сбоев, выраженное в процентах.

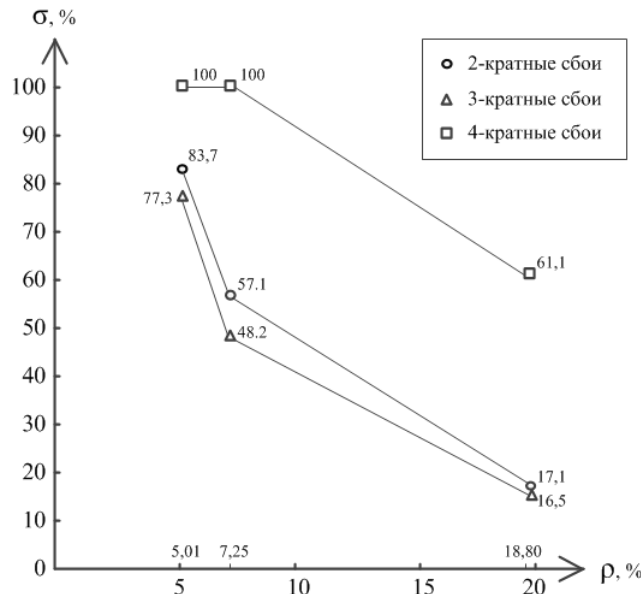


Рис. 6. График зависимости эффективности применения методики от плотности заполнения регистрами

Как видно из представленных результатов, применение методики дает наилучший результат для блоков с низкой плотностью заполнения регистрами. Применение методики к большим блокам с более плотным заполнением приведет к неоправданному ухудшению частотных характеристик схемы на фоне не высокого относительного снижения числа потенциальных сбоев. Для таких блоков необходимо выделять наиболее критичные области для применения методики непосредственно на них.

Основным преимуществом представленной методики по сравнению с другими, рассмотренными в данной статье, является отсутствие большого числа ручных правок для получения желаемого результата. Это позволяет получить хорошую эффективность по снижению числа многократных сбоев при существенной экономии времени разработки ИС. В целом, представленная методика показала свою эффективность, следующей задачей будет ее использование на других проектах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), договор № 14-29-09268.

Литература

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. 320 с.
2. M. Raine, G. Hubert, M. Gaillardin, L.t Artola et al. Impact of the Radial Ionization Profile on SEE Prediction for SOI Transistors and SRAMs Beyond the 32-nm Technological Node// IEEE Transactions Nuclear Science, VOL. 58, NO. 3, JUNE 2011
3. Зольников К.В., Таперо К.И., Смерек В.А., Беляева Т.П. Модель радиационных эффектов воздействия тяжелых ядерных частиц в КМОП-элементах микросхем// Программные продукты и системы. 2011. №3. С. 17-21.
4. Морозов С.А., Соколов С.А. Радиационные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц на КНИ БИС и способы их моделирования// Труды НИИСИ РАН, Том 1, № 2, 2011, С. 47-51
5. O.A. Amusan. Analysis of Single Event Vulnerabilities in a 130 nm CMOS Technology// M. S. Thesis, December, 2006
6. L. Entrena, A. Lindoso, E. S. Mill'an, S. Pagliarini et al. Constrained Placement Methodology for Reducing SER under Single-Event-Induced Charge Sharing Effects// Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2011 12th European Conference on
7. Боруждина А.Б., Григорьев Н.Г., Уланова А.В. Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ТЗЧ// Микроэлектроника. - 2014. - Т. 43, № 2. - С. 88-93

PROCEDURES OF SPATIAL DIVERSITY OF REGISTERS OF VLSI FOR OVERCOMING MULTIPLE FAILURES UNDER ACTION OF HCP

A. P. Skorobogatov

Scientific Research Institute for System Analysis of RAS

The rationale of spatial diversity of registers for very large integrated circuits (VLSI) is presented to reduce the frequency of multiple failures when exposed to heavy charged particles. The results of failure multiplicity modeling for modules under our research and development work are presented. The technique of separation of sensitive VLSI elements within standard functional of modern CAD systems and results of its applying are presented in this paper.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ЕМКОСТИ

Забавичев И.Ю.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Введение

Для анализа характеристик полупроводниковых структур может использоваться CV метод, который позволяет определить профиль легирования по вольт-фарадным характеристикам. Так как восстановление профиля включает в себя численное дифференцирование, которое является математически неустойчивым к погрешности исходных данных, то чем точнее измерена емкость, тем точнее можно рассчитать профиль легирования структуры, а, следовательно, точнее определить последствия радиационного поражения. Для того чтобы измеренная барьерная емкость диода приближалась к реальной, амплитуда измерительного сигнала должна быть достаточно малой. На результаты таких измерений оказывают большое влияние различного рода шумы [1-5]. Для минимизации этого эффекта можно увеличить амплитуду измерительного сигнала, но при этом уменьшится точность вычисления профиля легирования.

С другой стороны измерения емкости являются неотъемлемой частью метода спектроскопии глубоких уровней (DLTS), для которого необходимо исследовать зависимость емкости полупроводниковой структуры от частоты измерительного сигнала. На подобного рода измерения так же оказывают влияние многочисленные шумы и наводки.

Целью данной работы является исследование параметров измерительного сигнала на погрешность измерений емкости полупроводниковых приборов. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- определение функции распределения результатов измерений и её повторяемости;
- оценка среднеквадратичного отклонения результатов измерений для различных наборов параметров;
- определение зависимости погрешности измерений от амплитуды измерительного сигнала;
- определение зависимости погрешности измерений от амплитуды измерительного сигнала.

Общие положения

Одной из разновидностей погрешности является случайная погрешность. Она представляет собой результат влияния многих случайных и независимых факторов, поэтому исходя из центральной предельной теоремы должна иметь нормальное распределение. Основным свойством случайной погрешности является возможность уменьшения искажения искомой величины путем усреднения данных. Уточнение оценки искомой величины при увеличении количества измерений (повторных экспериментов) означает, что среднее измеряемой величины при увеличении объема данных стремится к математическому ожиданию по закону больших чисел. Среднеквадратичное отклонение (СКО) в этом случае можно интерпретировать как погрешность измерений. Поэтому необходимо исследовать функцию распределения результатов измерения емкости, её повторяемость, оценить погрешность измерений и эффективность процедуры усреднения для разного числа усредняемых за раз отсчетов.

Для определения профилей концентрации и подвижности электронов в полупроводниковой структуре вначале измеряются зависимость ёмкости C структуры от напряжения смещения U . Профиль распределения концентрации N по глубине определяется с помощью следующих выражений [1]:

$$N(d) = -\frac{c^3}{\epsilon\epsilon_0(S)^2} \left(\frac{dC}{dU}\right)^{-1} \quad d = \frac{\epsilon\epsilon_0}{c} S \quad (1)$$

где d - координата, относящаяся к измеренному значению, S - площадь перехода, e – заряд электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Производная вольт-фарадной характеристики получается с помощью численного дифференцирования. Как показано в [6], численное дифференцирование является неустойчивым по отношению к малым изменениям входных данных. В действительности исходная вольт-фарадная характеристика имеет погрешность, которая экспоненциально связана с погрешностью вычисления производной. Другими словами, малые изменения в измеренной вольт-фарадной характеристике приведут к большим ошибкам расчета профиля концентрации. Как было отмечено ранее, погрешность измерений можно снизить, если использовать для измерений сигналы с большей амплитудой. Но тогда выражение (1) для глубины будет определять толщину слоя в полупроводниковой структуре, что значительно затрудняет интерпретацию восстановленного значения концентрации примеси. Поэтому необходимо проводить измерения с амплитудой, соответствующей малосигнальному приближению, и использовать математическую обработку для аппроксимации.

Измерение вольт-фарадных характеристик сигналами с разными частотами позволяет исследовать динамику профилей концентрации носителей заряда. Такой подход позволяет получить информацию, подобную результатам DLTS измерений, но не требует специализированного стенда. При исследовании спектров емкости необходимо учитывать влияние фликкер-шума и комбинационных и кратных частот, которые увеличивают погрешность результатов измерений.

Эксперимент и результаты измерений

Для уменьшения погрешности измерений емкости, необходимо пользоваться процедурой усреднения, при этом желательно уменьшить дисперсию в выборке результатов измерений. На основе общеизвестной практики это число выбирается из диапазона 10-100 отсчетов – чем больше число усредняемых отсчетов тем меньше погрешность, но и больше время, затрачиваемое на измерения. Для определения оптимального числа отсчетов была проведена серия измерений емкости серийных полупроводниковых диодов Д223 и Д226. Для различного набора параметров измерений: смещения, амплитуды и частоты измерительного сигнала определялись параметры зависимости, описывающей характер распределения результатов измерений. Для каждого из диодов были проведены измерения с усреднением по 3, 10, 30 и 100 отсчетам для каждого записанного измерения.

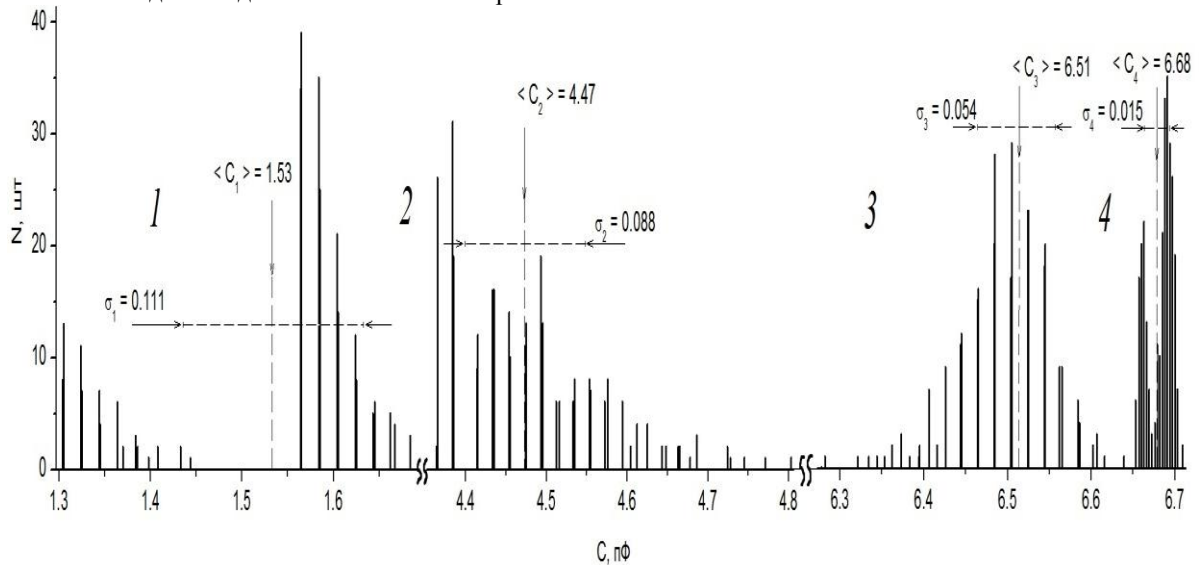


Рис. 1. Распределения результатов измерений для различных условий 1) Диод Д223, смещенный на $U_{cm} = -1.6$ В, с амплитудой измерительного сигнала $U = 0.4$ В; 2) Диод Д223, смещенный на $U_{cm} = -0.5$ В, с амплитудой измерительного сигнала $U = 0.25$ В; 3) Диод Д226, смещенный на $U_{cm} = -4$ В, с амплитудой измерительного сигнала $U = 0.5$ В; 4) Диод Д226, смещенный на $U_{cm} = -1.6$ В, с амплитудой измерительного сигнала $U = 0.4$ В; Масштаб в горизонтальных осях одинаковый для всех графиков; Каждое распределение построено по выборке из 300 отсчетов

В большинстве экспериментов полученные результаты измерений имеют нормальный закон распределения, но для некоторого набора параметров измерительного сигнала распределение имеет вид близкий к райсовскому или бимодальному. Это зависит от соотношения смещение/амплитуда измерительного сигнала, а также от величины смещения. Чем ближе значение смещения к нулю, тем больше вероятность получить распределение, отличное от гауссовского. Также райсовское и бимодальное распределение наблюдалось при измерениях с помощью низкочастотных сигналов ~ 10 кГц. Получившиеся распределения представлены на рис 1.

Радиационнотойкая микроэлектроника

Подобные распределения являются результатом влияния наводок в сети или факторов окружающей среды, так как при одинаковых параметрах измерительного сигнала не всегда повторяются.

Результаты расчета среднеквадратичного отклонения внутри выборки результатов измерения емкости показали большой разброс значений для негауссовских распределений чем для нормального распределения, поэтому далее проводилась оценка эффективности процедуры усреднения. Методика заключалась в следующем: в каждом эксперименте изменялось количество используемых для усреднения отсчетов – от 1 до 100, другими словами проводилось n измерений, где $n=1,10,30$ или 100, рассчитывалось среднее и так повторялось 100 раз. После этого для каждой эксперимента оценивалось среднеквадратичное отклонение (СКО). Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Оценка эффективности процедуры усреднения

Число используемых для усреднения отсчетов / СКО	СКО для Д223, %	СКО для Д226, %	СКО для конденсатора, %
1x100	7	0.37	0.064
10x100	3	0.131	-
30x100	1.4	0.067	-
100x100	0.6	0.035	-

При увеличении числа усредняемых отсчетов для каждого измерения отклонение внутри выборки уменьшается и распределение результатов измерений стремится к нормальному закону. В связи с этим число усредняемых отсчетов выбирается 30 для стандартных измерений и 100 для измерений с высокой точностью, что значительно уменьшает разброс измеренных значений и вероятность того, что закон распределения будет отличен от гауссовского, но увеличивает время проведения эксперимента.

Далее исследовалась зависимость измеренной емкости и погрешности от частоты измерительного сигнала. Результаты представлены на рис. 2.

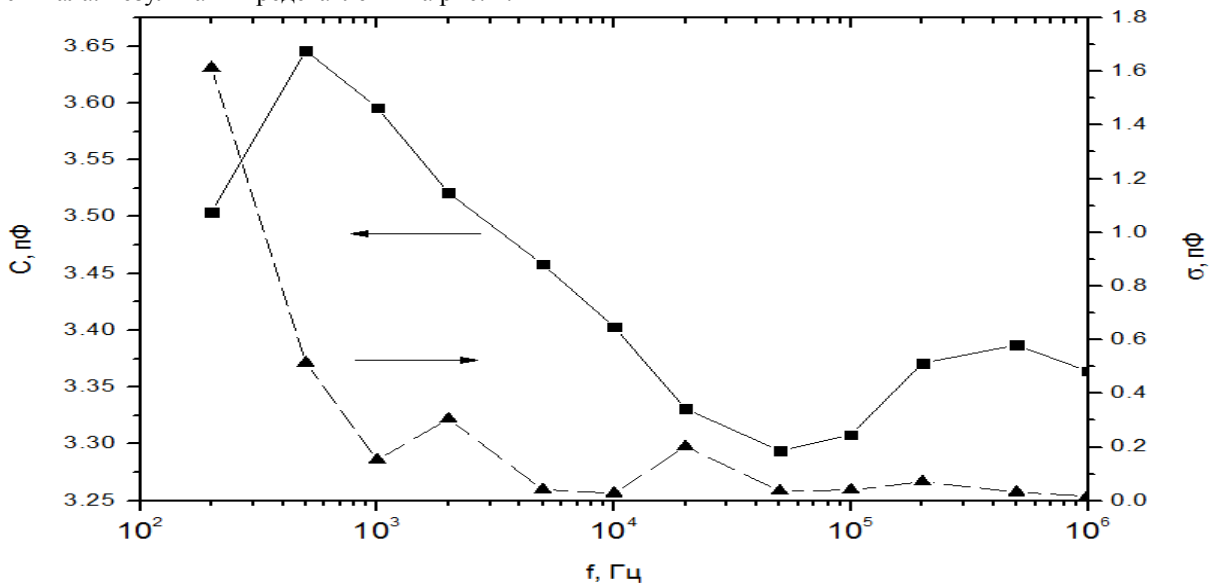


Рис. 2. Зависимость емкости диода Д223 и среднеквадратичного отклонения результатов измерений от частоты измерительного сигнала

Для каждой частоты среднее и среднеквадратичное отклонение оценивалось по результатам 100 измерений по формулам несмещенной оценки. На графике зависимости погрешности от частоты имеются максимумы, связанные с переключением прибора на другой диапазон сопротивлений, а следовательно и точности. На графике также можно выделить участки минимальной погрешности: 5-10 кГц, 500-1000 кГц, 0.5-1 МГц. В этом случае погрешность составляет 1.2-0.8%, 1.1-1.2%, 0.9-0.5%. Хотя в этом случае распределения результатов измерения имеет близкий к гауссовскому вид, в целом среднеквадратичное отклонение внутри выборки уменьшается с увеличением частоты. Поэтому для высокоточных измерений необходимо выбирать частоту измерительного сигнала около 1 МГц. Если же необходимо исследовать зависимость профиля концентрации носителей заряда, то частоту

измерительного сигнала следует выбрать из указанных выше диапазонов так образом, чтобы она не являлась кратной или комбинационной.

Вольт-фарадные характеристики, измеренные с высокой точностью, необходимы для анализа электрофизических параметров диодов и транзисторов. Результаты измерений емкости аппроксимируются полиномиальными функциями, чтобы минимизировать влияние шумов и сделать профиль более гладким. Критерием правильности аппроксимации считалось совпадение исходной характеристики и аппроксимирующей функции с ошибкой, не превышающей погрешность измерений. Исходя из этих же соображений можно ввести критерий для сравнения исходных данных с результатами расчета вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур в классическом приближении на основе одномерного уравнения Пуассона. Данные о профиле легирования считались корректными при совпадении вольт-фарадных характеристик с ошибкой не более погрешности измерений.

Заключение

В работе проведена оценка влияния параметров измерительного сигнала на погрешность измерений емкости полупроводниковых приборов. Предложены меры по уменьшению погрешности измерений - определены параметры измерительного сигнала, для которых распределение результатов измерений имеет отличный от гауссова вид. Определены диапазоны частот, для которых погрешность измерений минимальна. Продемонстрировано влияние погрешности измерений на восстановление распределения носителей заряда и предложен критерий аппроксимации исходной вольт-фарадной характеристики.

Работа частично поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ), а также Государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки России, в сфере научной деятельности, «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)», код проекта 2183.

Литература

1. Н.Б. Горев, И.Ф. Коджеспирова, Е.Н. Привалов «Вольт-фарадные измерения в гетероструктурах AlGaAs/GaAs с селективным легированием // Вестник харьковского университета им. В.Н. Каразина, №853, вып. 14, 2009
2. Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г.Фефелов, Д.И.Дюков «Моделирование полевого транзистора с двумерным электронным газом при радиационном облучении» / Сборник тезисов докладов всероссийской конференции «Стойкость-2012», г. Лыткарино, 5-6 июня 2012 г., с. 61-62
3. Е.А.Тарасова, Д.С.Демидова, Е.С.Оболенская, С.В.Оболенский, А.Г.Фефелов, Д.И.Дюков «Радиационная стойкость гетеронаноструктур с двумерным электронным газом» / Сборник тезисов докладов всероссийской конференции «Стойкость-2012», г. Лыткарино, 5-6 июня 2012 г., с. 59-60
4. Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский «Моделирование тепловых полей в мощных InAlAs / InGaAs полевых транзисторах 0.1...0.3 тгц диапазона частот» // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №5, 2011, 348-353
5. Басаргина Н.В., Ворожцова И.В., Дубровских С.М., Ткачѳ О.В., Шукайло В.П., Тарасова Е.А., Чуринов А.Ю., Оболенский С.В. «Влияние гамма-нейтронного излучения на GaN-транзисторы с двумерным электронным газом» // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 3-1. С. 61-65.
6. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989.

IMPACT OF PARAMETERS OF THE MEASURING SIGNAL ON THE ERROR OF MEASURING THE CAPACITANCE

I.Yu. Zabavichev

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Range of measured values of semiconductor diodes capacitance, associated with the hardware error, was determined. Actions were suggested to reduce measurement error. The parameters of the measuring signal, for which the distribution of measurement data has different view from Gaussian, were determined.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ СИСТЕМЫ ЧТЕНИЯ РЕГИСТРОВОГО ФАЙЛА НА ОДИНОЧНОЕ СОБЫТИЕ

Балбеков А.О.

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

Основной причиной сбоев в работе электроники в космосе является попадание отдельных ядерных частиц в чувствительные области транзисторов, приводящее к Single Event Transient (SET).

Для моделирования SET можно использовать схемотехнические и технологические программные средства, первые наиболее удобны для разработчика схем. В данной статье описана методика характеристики вклада каждого отдельного узла комбинационной схемы в общую сбоеустойчивость блока. Методика использует инструменты моделирования и средства автоматизации доступные разработчику схем (UltraSim, Python, SKILL) и не требует использования технологических САПР.

Для характеристики комбинационной схемы необходимо вычислить критический заряд каждого из элементов схемы в зависимости от момента появления тестового воздействия, а так же наглядно визуализировать полученные результаты. Моделирование переходных процессов вследствие тестового воздействия производится при помощи подключения к транзистору источника тока с импульсом специальной формы [1], [2].

Детектор сбоев состоит из эталонной схемы, исследуемой схемы и системы сравнения состояния их выходов (рисунок 1), исследуемая схема и эталонная схема – две одинаковые схемы. В систему сравнения входят элементы исключающее-ИЛИ, RS-триггеры и сигнал сброса.

Т.к. исследуемая схема не отличается от эталонной схемы, без тестового воздействия их реакция на шаблон входных сигналов будет одинаковая. Если при подаче тестового воздействия произойдет сбой, реакции тестовой и эталонной схемы будут различаться, это будет записано в соответствующие триггеры. Система автоматизации повторяет тестовое воздействие для каждого транзистора в разные моменты времени, собирает и обрабатывает результаты моделирования.

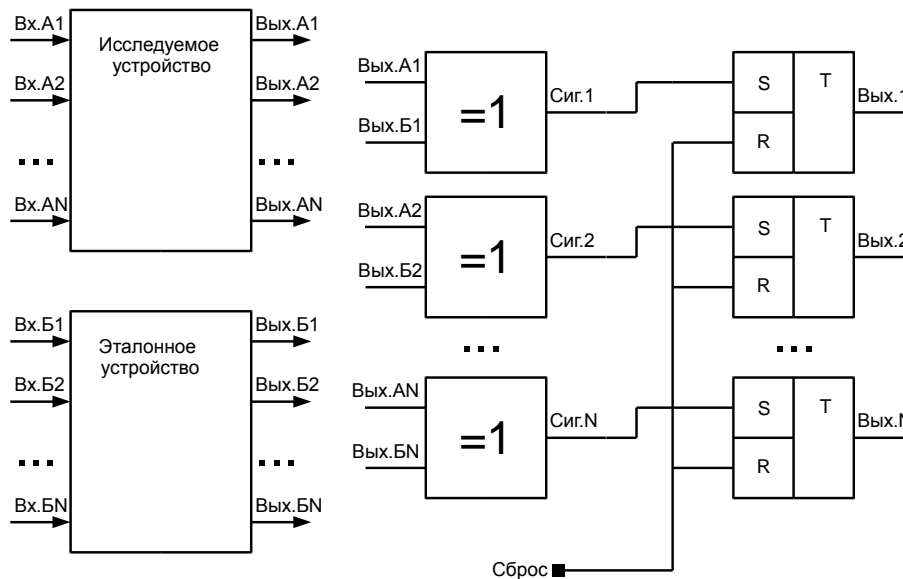


Рис. 1. Детектор сбоев

Входными значениями для этой методики являются: собранный заряд, форма импульса, время появления тестового воздействия. Форма импульса является характерной для используемой технологии, соответственно варьируемыми параметрами становятся собранный заряд и время появления воздействия.

Для наглядного представления полученных результатов при помощи SKILL было разработано дополнение для Cadence Virtuoso. Система визуализации собирает данные характеристики и выводит их в схемный редактор в виде цветowych меток рядом с каждым отдельным устройством. Разработчику доступны данные попадания частиц в транзисторы в разные моменты времени. Если критический заряд узла при поражении схемы в разное время (например: до/во время/после прихода тактового импульса) разный, то цвет метки этого узла будет меняться (пример изображен на рисунке 2).

При помощи данной методики было проведено исследование мер повышения сбоеустойчивости пути чтения регистрового файла. Регистровый файл представляет собой блок SRAM (статическая память с произвольным доступом) малого объема. Требования, предъявляемые к регистровым файлам: высокая скорость работы, сбоеустойчивость, наличие нескольких портов чтения/записи, эти требования

позволяют пожертвовать площадью и потреблением для увеличения скорости работы. В ячейку памяти встраиваются буферы, применяются усилители считывания. Данные системы могут быть уязвимы для поражения одиночными частицами. Меры, предпринимаемые для повышения сбоеустойчивости: дублирование/троирование логических устройств и путей (блоки управления, дешифратор), сбоеустойчивые ячейки памяти.

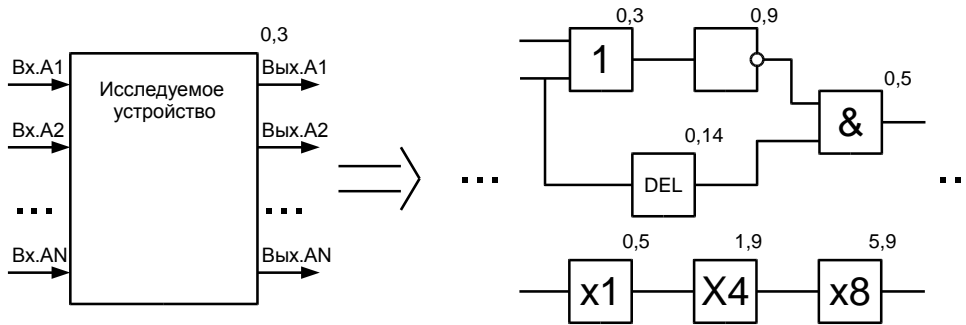


Рис. 2. Визуализация результатов характеристики.
Цветовые метки были заменены относительными единицами

Усилители чтения используются в SRAM памяти для ускорения чтения. Для усилителя чтения достаточно дифференциального сигнала в 150-200 мВ, что бы принять решение о значении считываемых данных. Структура системы чтения с усилителем представлена на рисунке 3а, на рисунке отмечены полученные значения чувствительности к воздействию одиночных событий.

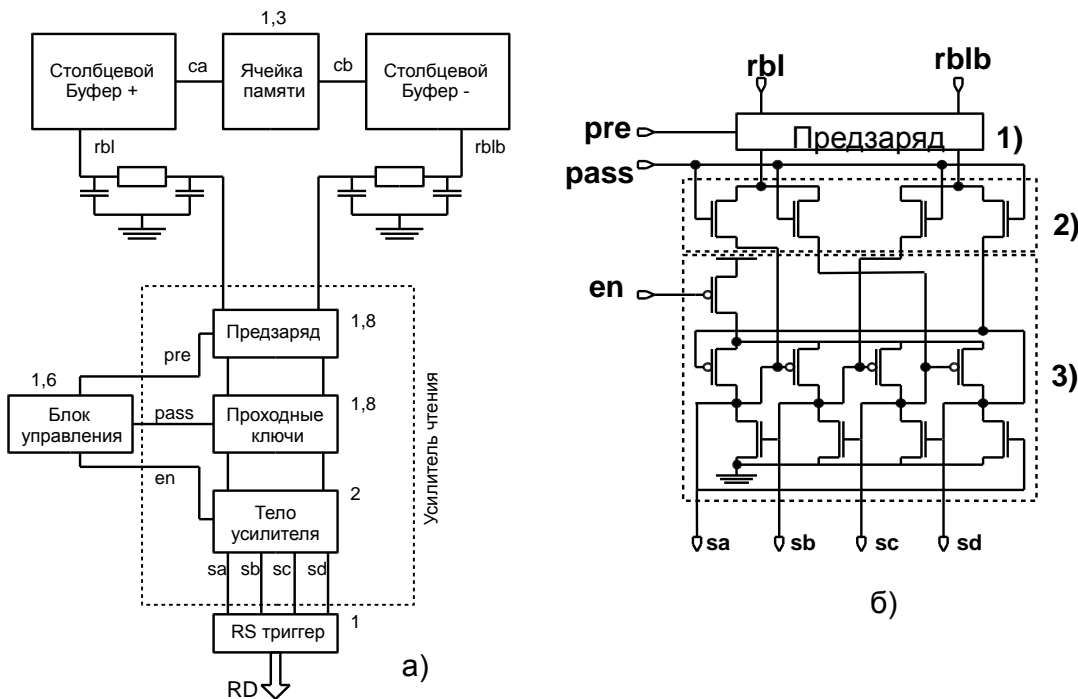


Рис. 3. а) Структура системы считывания с усилителем чтения. Цветовые метки были заменены относительными единицами; б) Схема усилителя чтения на основе ячейки DICE:

- 1) схема презаряжающая дифференциальные линии данных (in и pin) до потенциала земли,
- 2) проходные ключи, 3) тело усилителя чтения

Перед процедурой чтения линии данных презаряжаются до потенциала земли (блок 1) на рисунке 3б), проходные ключи (блок 2) на рисунке 3б) открыты, питание усилителя чтения выключено (посредством сигнала en блока 3) на рисунке 3б). В начале процедуры чтения презаряд отключается, буферы в ячейках памяти начинают тянуть линии данных к потенциалу питания. Когда на линиях данных будет дифференциальный сигнал в 70-80 мВ, сигнал en включит усилитель чтения, бистабильная ячейка начнет переходить в состояние, соответствующее разности потенциалов на дифференциальных линиях. При дифференциальном сигнале в 150-200мВ сигнал pass закрывает проходные ключи, т.к. нагрузка усилителя от длинных битовых линий пропадает, он быстро переключается в выбранное

состояние, записывая данные в триггер в блоке ввода/вывода. Усилитель чтения, исследованный в данной статье, основан на ячейке DICE [3], данная ячейка регенерирует свое состояние при попадании в нее одиночной частицы, это должно защитить данные во время операции чтения. Выходы усилителя подключаются к выходам четырехходового RS-триггера на основе DICE (рисунок 4).

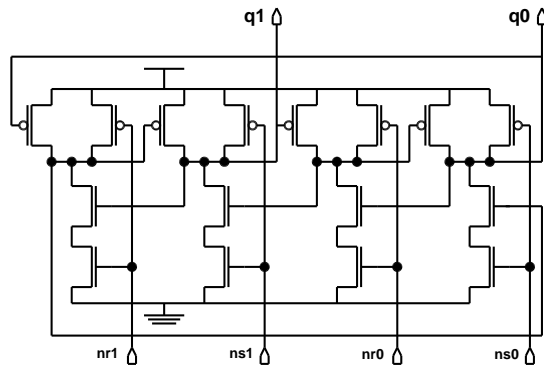


Рис. 4. Четырехходовой RS-триггер на выходе блока ввода/вывода

Далее будут рассмотрены переходные процессы, вызвавшие срабатывание детектора сбоев. На рисунке 5 показаны события, происходящие при попадании частицы в буферы чтения ячейки памяти. Процесс 1 не приводит к сбою, изменяется только время появления данных на выходе блока ввода/вывода. Процесс 2 наоборот приводит к сбою т.к. уменьшает значение дифференциального сигнала на входе усилителя чтения, из-за чего тот может сработать не корректно.

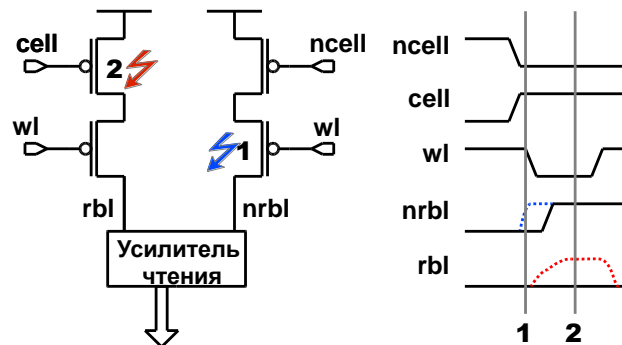


Рис. 5. Влияние SET в буфере чтения ячейки памяти на чтение через усилитель

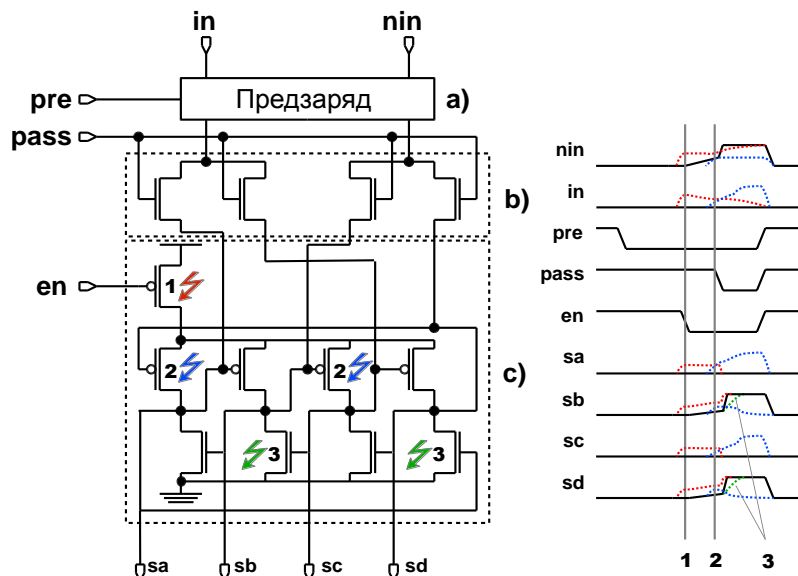


Рис. 6. Влияние SET в усилителе чтения на считывание данных

Процессы в усилителе чтения на основе DICE представлены на рисунке Рис. 6, моделируется чтение "1" из ячейки памяти. Процесс 1, в отличие от предыдущей схемы, не приведет к сбою, измениться

только задержка вывода данных. Процесс 2 – открытые проходные ключи закоротили sa/sc и sb/sd, создав условия, когда DICE превратился в 2 параллельные защелки. Сбой происходит из-за одновременного появления помехи на 2-х чувствительных узлах, что привело к усилению и сохранению неверных данных. Процесс 3 не приводит к сбоям, изменяется только задержка получения данных на выходе.

Благодаря структуре DICE триггера на выходе попадание в нее частиц вызовет только кратковременную помеху, после рассасывания которой, на выходе восстановится корректное значение.

На рисунке 7 показан блок управления усилителем чтения и процессы, происходящие в нем. Процесс 1 задевает сигнал включения усилителя и по своему влиянию аналогичен процессу 1 на рисунке 6. Процесс 2 задевает одновременно сигнал включения усилителя и сигнал, закрывающий проходные ключи. Процесс 2 заставляет усилитель чтения сработать раньше расчетного времени, если на битовых линиях не накопился достаточный сигнал, это может привести к сбою, иначе только изменяет время появления данных на выходе блока ввода/вывода. Процесс 3 аналогичен процессу 2, только увеличивает длительность чтения. Процесс 4 аналогичен процессу 1, но выключает усилитель чтения, из-за чего необходимый сигнал на его узлах может не накопиться, что приведет к сбою.

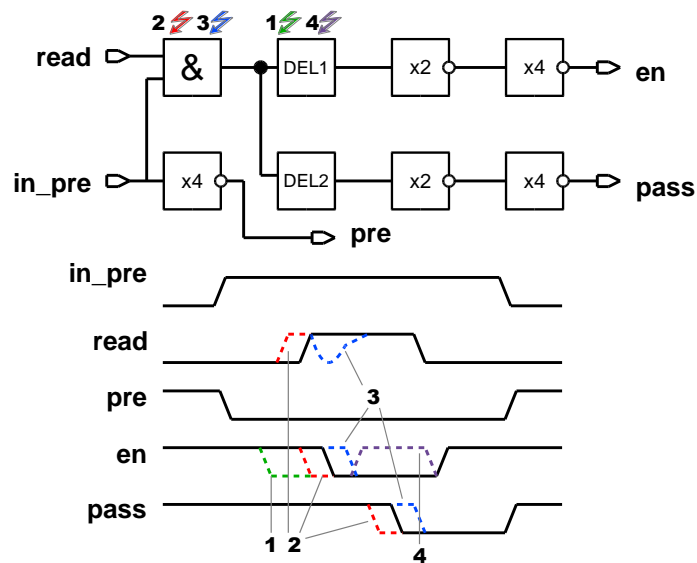


Рис. 7. Влияние SET на блок управления усилителем чтения

Разработанная методика позволяет характеризовать сбоеустойчивость комбинационных блоков, получить полные данные по критическим зарядам отдельных узлов, выяснить зависимость величины критического заряда от времени поражения узла одиночной частицей. Система визуализации встроена в инструмент разработчика и дает возможность наглядно отобразить результаты характеристики. Разработчик получает возможность визуально оценить критичность каждого узла схемы и выбрать оптимальную стратегию повышения ее сбоеустойчивости. Представленная схема с усилителем чтения на основе DICE не показала выдающихся результатов, ее сбоеустойчивость находится на уровне стандартных решений. Уязвимым местом такой структуры является блок управления, собранный из стандартных комбинационных логических элементов. Если применить к блоку управление троирование, то можно добиться значительно лучших результатов: число процессов, приводящих к сбоям, сократится до двух, однако придется пожертвовать потреблением и занимаемой площадью. Другим уязвимым местом является момент усиления, когда узлы усилителя закорачиваются через проходные ключи. При радикальном увеличении занимаемой площади можно дублировать буферы в ячейках памяти, таким образом, каждый узел усилителя будет принимать сигнал от отдельного буфера, исключается ситуация, когда усилитель становится уязвим.

Литература

1. Zebrev G. I. et al. Physical modeling and circuit simulation of hardness of SOI transistors and circuits for space applications //Proceed. of RADECS. – 2006.
2. Данилов И.А. Метод автоматизированного схемотехнического моделирования эффектов воздействия тяжелых заряженных частиц на современные КМОП ИМС / Данилов И.А., Василегин Б.В., Осипенко П.Н. // Вопросы атомной науки и техники.– г. Лыткарино: ФГУП "НИИП".– 2011.– Выпуск 4.– с. 13-16.
2. Calin T., Nicolaidis M., Velazco R. Upset hardened memory design for submicron CMOS technology //IEEE-Transactions-on-Nuclear-Science. – 1996. – С. 2874-8.

SIMULATION REGISTER FILE READ PATH REACTION ON SINGLE EVENT EFFECTS

A.O. Balbekov

Scientific Research Institute for System Analysis of RAS

This paper describes characterization technique of each node contribution to the overall SET tolerance of combinational circuit. The technique implies using the tools that are available to a circuit designer (UltraSim, Python, SKILL) and does not require technology CAD. First step is to calculate critical charge for each node at each possible SET occurrence time. Next step is to visualize gathered on the first step and processed information in designer's CAD. Presented technique was used to analyze SET tolerance of the read path of register file. The read path includes a DICE-like sense amplifier and a DICE output latch. Simulation showed that simple substitution of the DICE-like sense amplifier in place of a conventional amplifier does not make design SET tolerant. There needed more aggressive ways to force redundancy (ex.: to add double differential bit lines) which will cost large area and power consumption.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Потехин А.А

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Введение

Несмотря на значительные успехи реинжиниринга интегральных схем на системном уровне [1-3], на данный момент не существует единой методики определения электрофизических параметров полупроводниковых структур отдельных диодов и транзисторов с целью получения достаточного объема исходных данных для проведения двух- и трехмерного физико-топологического моделирования. Различные, но связанные между собой параметры структур и конструкции полупроводниковых приборов приходится рассчитывать в разных пакетах программ, причем опираться на весьма ограниченный объем экспериментальных данных и справочной информации, особенно если речь идет о серийно изготавливаемых корпусных полупроводниковых приборах. В связи с этим возникает задача построения комплексного аппаратно-программного комплекса измерения и моделирования полупроводниковых структур и приборов, который предназначен для проектирования элементов интегральных схем и блоков радиоэлектронной аппаратуры в сжатые сроки. При этом существует необходимость не только измерения параметров перспективных материалов для построения физико-топологической модели полупроводниковых приборов на их основе, но и реинжиниринга уже существующих элементов, что особенно важно для анализа радиационной стойкости, т.к. входные данные о конструкции таких компонентов в объеме, необходимом для физико-топологического моделирования, отсутствуют.

Физико-топологическое моделирование – это метод расчета параметров полупроводниковых приборах, основанный на характеристиках материалов, из которых изготовлен прибор, а также сведениях о конструкции этого прибора. При анализе радиационной стойкости изделий микроэлектроники указанное моделирование выгодно тем, что появляется возможность применения известных из литературы данных о величине изменения параметров полупроводников во время и после радиационного воздействия. Другие методы расчета, например, метод эквивалентной схемы, не позволяют использовать указанную информацию в полном объеме. Для проведения моделирования методом эквивалентной схемы, необходимо иметь измеренные данные как до, так и после облучения. В то же время, физико-топологический метод позволяет существенно сократить объем испытаний прибора для получения результатов его радиационной стойкости, так как изменение параметров материала, связанные с облучением, известны.

Важно, что для проведения моделирования параметров полупроводниковых структур с использованием физико-топологического подхода необходимо знать определенный объем информации о конструкции элемента, который, в основном, касается площадей переходов и параметров слоев, т.е. концентрации и подвижности носителей заряда в них. Для определения указанных неизвестных применяют итерационную процедуру уточнения, когда измеренные данные могут выступать как средство контроля адекватности модели, так и являться входными данными для моделирования. При проведении таких работ не требуется высокая точность измерений. Практика показывает, что погрешности исходных данных не должны превышать 5%, тогда погрешности расчета вольтамперных и вольтфарадных характеристик, при правильно настроенной модели, не будут превышать 20% [4].

Особый интерес представляет обратное проектирование серийных приборов, так как для таких приборов зачастую отсутствуют необходимые для физико-топологического моделирования данные. Также стоит отметить, что необходимо использовать неразрушающие методы обратного проектирования, так как в ином случае будет отсутствовать возможность дополнительных тестов прибора, в том числе и гамма-нейтронного облучения.

Для различных типов моделей приборов соотношение времени расчета и времени измерений будут разными. В случае использования численной модели, основное время моделирования будет занимать расчет, поэтому в условиях ее использования основную роль играет оптимизация программного кода расчетного блока. В случае использования аналитической модели, наоборот, основное время моделирования будет занимать измерение входных данных для модели. Поэтому, при итерационном обратном проектировании с использованием аналитической модели прибора необходимо измерять не все ветви вольтамперных и вольтфарадных характеристик, а только те, которые необходимы на данном этапе моделирования.

При проектировании и оптимизации приборов, а оценки их радиационной стойкости с использованием физико-топологического моделирования, необходимо учитывать температуру, так как параметры полупроводникового материала, такие как, проводимость и концентрация основных носителей заряда, существенно зависят от температуры. Поэтому для каждой итерации моделирования необходимо пересчитывать температуру прибора и соответствующие ей параметры. Например, при моделировании протекания тока через структуру, необходимо учитывать влияние разогрева на характеристики структуры. Подобный расчет может быть проведен путем итераций с использованием двух независимых пакетов программ.

При оценке радиационного поражения структуры стоит выделить два возможных варианта изменения температуры. При ионизации структуры возможен рост значений токов, протекающих через нее и, как следствие, увеличение рабочей температуры прибора. Во втором случае, при облучении возможно образование кластеров радиационных дефектов, что снижает ток через структуру и вызывает понижение рабочей температуры прибора.

Целью работы являлось, в рамках единого подхода к проектированию и реинжинирингу полупроводниковых структур, создание инженерной методики, позволяющей проводить оценку тепловых полей в полупроводниковых структурах в условиях ограниченного объема исходных данных при условии использования неразрушающей методики и проводить оценку радиационной стойкости серийно изготавливаемых корпусированных полупроводниковых приборов.

Методика оценки зависимости параметров приборов от температуры

В случае неразрушающего реинжиниринга полупроводниковых элементов приходится довольствоваться лишь известными табличными данными о структуре, а также ограниченным числом измеренных данных. Использование физико-топологической модели для оценки радиационной стойкости в этом случае зачастую, является единственно возможным вариантом, так как данный подход позволяет построить модель полупроводникового прибора, основываясь на измеренных входных данных, а также известных из литературы данных. Но, в случае серийно изготавливаемых изделий микроэлектроники данная информация отсутствует. Поэтому необходима методика, позволяющая по измерениям вольтамперной и вольтфарадной характеристик, а также табличных данных о приборе, определить необходимые для модели параметры. В нашем случае, подобная методика строилась для диодов.

1. Найдем из литературы [5] ширину обедненного слоя при пробое р-п перехода $d_{пробоя}$ и, измерив емкость диода при пробое $C_{пробоя}$, получим площадь перехода S

$$S = \frac{C_{пробоя} d_{пробоя}}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

2. Используя формулу для расчета сопротивления базы $R_{базы}$, выразим произведение подвижности носителей заряда μ и их концентрации n

$$\mu \cdot n = \frac{d_{пробоя}}{qSR_{базы}}. \quad (2)$$

3. Для того, чтобы мы могли использовать формулу для расчета сопротивления базы диода, нам необходимо знать, что даны прибор не является р-и-п диодом или диодом с более сложной конфигурацией полупроводниковых слоев. Для этого необходимо провести измерение вольтфарадной характеристики диода и исходя из ее общего вида, определить возможность использования данного упрощения.

Радиационностойкая микроэлектроника

4. Используя известную зависимость $\mu = \mu(n)$ [5] и данные (2), графическим методом находим значения концентрации и подвижности.

5. Зная подвижность и концентрацию носителей заряда, с помощью графика зависимости подвижности от температуры для материала, из которого изготовлен диод, можно получить температуру рабочей области элемента.

6. Далее, с помощью полученных данных, на основе физико – топологической модели были получены данные о примерном уровне радиационной стойкости приборов по отношению к флюенсу нейтронов со средней энергией 1 МэВ.

7. Проводим численное моделирование вольт-амперных характеристик с учетом уже известных конструктивных особенностей прибора.

Пример использования методики

В качестве исследуемого прибора был выбран германиевый серийный корпусной диод Д9Г. Для этого прибора были сняты вольтамперные характеристики разных скважностей (рисунок 1), измерены ёмкость пробоя и сопротивление пробы. Используя методику, приведенную в разделе 2, получаем:

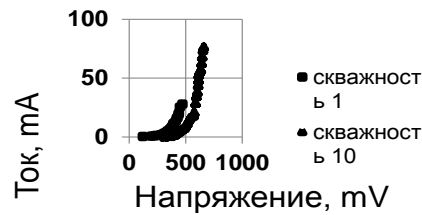


Рис. 1. Вольтамперные характеристики диода Д9Г с различной скважностью измерительного сигнала

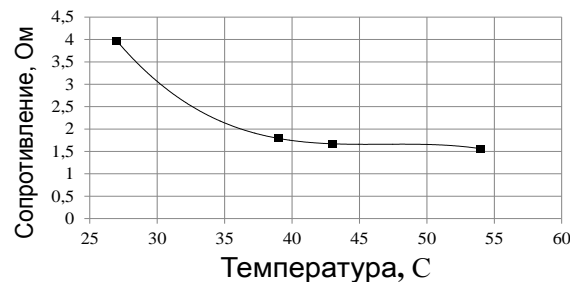


Рис. 2. Зависимость сопротивления базы от температуры для диода Д9Г

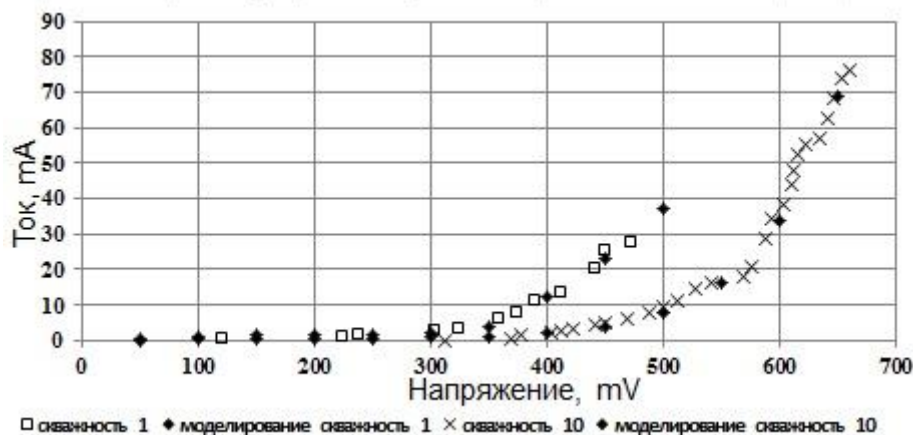


Рис. 3. Сравнение измеренной вольт-амперной характеристики с результатом моделирования

Из данных графиков были получены сопротивления базы и контактная разность потенциалов, которая составила 360 мВ и 542 мВ для скважностей 1 и 10, соответственно.

Также дополнительно получены данные о напряжении пробоя ($U_{\text{пробоя}} = 30$ В) и емкости пробоя ($C_{\text{пробоя}} = 1$ пФ).

В результате применения приведенной выше методики была получена зависимость, приведенная на рис. 2.

С использованием полученных данных было проведено численное моделирование вольтамперной характеристики прибора. Сравнение с измеренной вольтамперной характеристикой приведено на рисунке 3. Хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными доказывает адекватность предложенной инженерной методики.

Для оценки радиационной стойкости был выбран диод Д9Г, используемый в прямом смещении, в качестве стабилизатора тока базы для мощного биполярного транзистора. Критерием отказа сборки будем считать отклонение значения тока диода от номинального значения на 10%, что вызовет значительное смещение рабочей точки транзистора. Так как при прочих равных после облучения гамма-нейтронным облучением ток прямо ветви диода будет зависеть от сопротивления полупроводникового материала, то исходя из данных, приведенных в [8], данный критерий будет выполняться для флюенсов нейтронов вплоть до 5×10^{13} нейтронов/см².

Моделирование тепловых полей с помощью суперкомпьютерных технологий

Для решения задачи детального моделирования стационарных тепловых полей в полупроводниковых приборах в рамках итерационного подхода их оптимизации приборов была разработана программа для расчета тепловых полей путем решения уравнения Пуассона с соответствующими граничными условиями. В качестве решения поставленной задачи был выбран метод последовательной точечной релаксации с параметром релаксации в диапазоне от 1 до 2, что обеспечило избыточную коррекцию данных в каждой точке. Основной особенностью данного программного продукта является возможность использования параллельного кода на базе технологий OMP и MPI. При этом, стоит отметить, что специализированное программное обеспечение, отличается от своего предшественника [6] уменьшением времени решения задачи примерно в 40 раз. В случае расчета 3D-структуры размером $1000 \times 1000 \times 40$ узлов расчетной сетки, при использовании одного вычислительного узла суперкомпьютера «Лобачевский», время расчета составило приблизительно 10 минут. При этом, производительность вычислений на одном узле кластера достигла значений 9.5 Гфлоп/с.

Заключение

Разработана инженерная методика реинжиниринга диодных структур. На примере серийно изготавливаемого германиевого диода Д9Г проведена апробация методики, получены исходные данные для проведения физико-топологического моделирования. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными доказывает адекватность предложенного подхода. Проведена оценка радиационной стойкости диода Д9Г в рамках выбранного критерия.

Разработана программа расчета стационарных тепловых полей в полупроводниковых структурах с использованием высокопроизводительных вычислений. Достигнут 40-кратный прирост производительности программного модуля при работе на суперкомпьютере «Лобачевский».

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. В.В. Лучинин, И.М. Садовая. Реинжиниринг кристаллов интегральных схем // Петербургский журнал электроники. 2009. Вып.2. С.5-40.
2. В.В. Лучинин, А.П. Сазанов, М.Н. Серкова, М.А. Усикова. Препарирование кристаллов интегральных схем // Петербургский журнал электроники. 2009. Вып.3-4. С.5-27.
3. Е.В. Красник, В.В. Лучинин, А.М. Спивак, В.В. Трушлякова. Восстановление топологии кристаллов интегральных схем по ее фрагментам // Петербургский журнал электроники. 2009. Вып.3-4. С.5-24.
4. Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г. Фефелов, Д.И. Дюков. Моделирование полевого транзистора с двумерным электронным газом при радиационном облучении / Сборник тезисов докладов всероссийской конференции «Стойкость-2012», г. Лыткарино, 5-6 июня 2012 г., С.61-62.
5. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
6. Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский. Моделирование тепловых полей в мощных InAlAs/InGaAs полевых транзисторах 0.1...0.3 ТГц диапазона частот // Вестник ННГУ. 2011. Вып.5(3). С.348-353.

7. Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г. Фёфелов, Д.И. Дюков Моделирование мощных HEMT при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников. 2012. Т.46, Вып.12. С. 1587-1592.

8. М.В. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцов и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники // М.: Сов. Радио, 1980. С 47.

E-mail: potehinrf@gmail.com

PROCEDURES OF ESTIMATION OF THERMAL FIELDS FOR ANALYSIS OF RADIATION RESISTANCE OF SEMICONDUCTOR DIODES

A. A. Potekhin

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The features of the composition of the input data for physical and topological modeling of radiation resistance of semiconductor devices are discussed. A program for calculating thermal fields in semiconductor devices are created and discusses the features of its application in conjunction with physical and topological model. A technique of obtaining the heating temperature from the device current-voltage characteristics of different duty cycle and tabular data about the serial device are created and tested. The evaluation of the radiation resistance of the serial diode Д9Г are estimated.

ЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Вихорев Р.В.

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет

Программируемые логические интегральные схемы ПЛИС (FPGA) выполнены на конфигурируемых логических блоках КЛБ (или Логический элемент ЛЭ). Наиболее широкое распространение получили ЛЭ на LUT (Look Up Table просмотрная таблица – таблица истинности). LUT выполнен на основе мультиплексора, который строится в виде дерева из элементарных мультиплексоров 2-1. Дерево элементарных мультиплексоров реализовано на базе передающих МОП транзисторов, входы данных которого настраиваются так называемыми ячейками памяти статического оперативного запоминающего устройства SRAM [1]. Загружая в SRAM значения таблицы истинности необходимой логической функции n переменных можно реализовать любые логические функции, включая константы. Стандартное число входов таблицы соответствия как правило, равно четырём, однако современные «продвинутые» ПЛИС имеют сложные, перестраиваемые LUT с числом входов 6,7 [2-4]. Имеются сообщения о LUT с числом входов равным 8. Однако недостатком таких КЛБ являются большие аппаратные затраты количества транзисторов на реализацию систем логических функций, так как для реализации M логических функций необходимо M LUT.

Предлагается LUT реализующий систему из m логических функций – DC-LUT, при чем реализация дизъюнкций конститuent обеспечивается структурами, аналогичными структурам межсоединениям. Предлагаемый DC –LUT изображён на Рис.1.

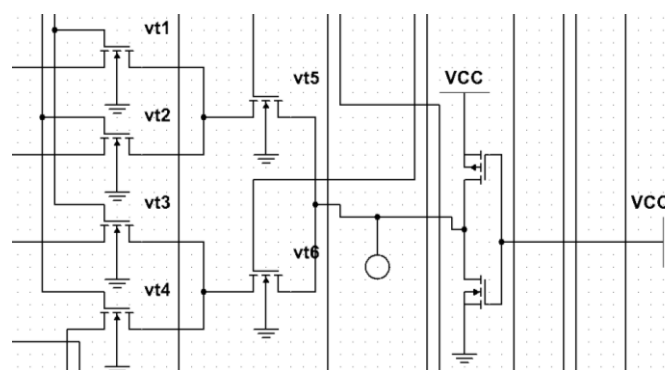


Рис. 1. Логический элемент DC-LUT

Выполним моделирование логического элемента для реализации систем логических функций с уточнённой схемой блока дизъюнкций конститuent логической функции для $n=2$ (Рис.1) в системе

схмотехнического моделирования NI Multisim 10 фирмы National Instruments Electronics Workbench Group. На Рис.2 ключи X1, X2 моделируют переменные. На Рис.3 ключи S1- S4 моделируют настройку Н.

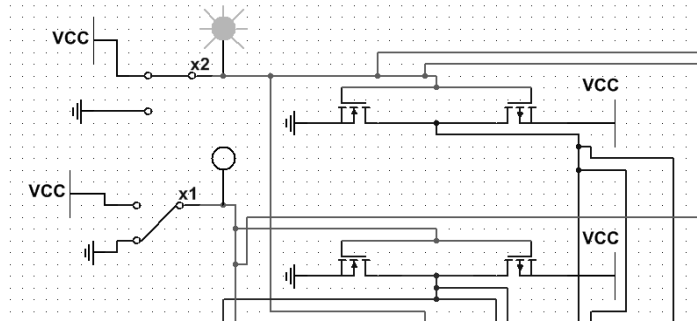


Рис. 2. Моделирование входных переменных

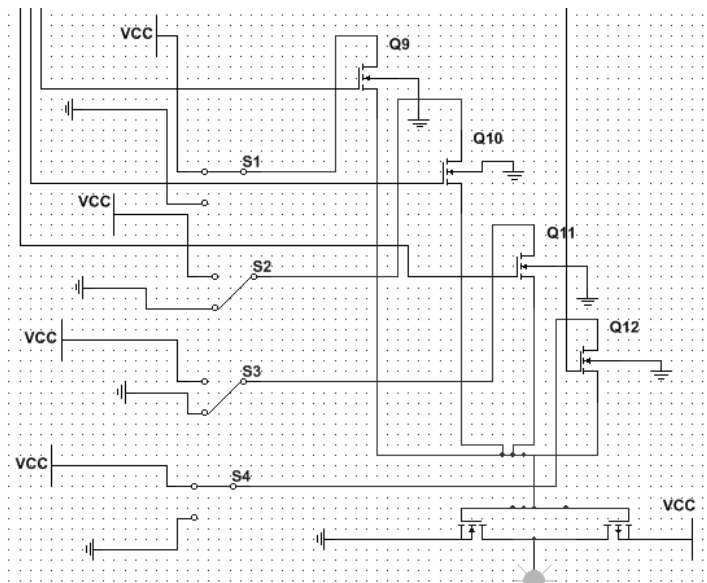


Рис. 3. Блок настройки

Управление затворами транзисторов блока дизъюнкций осуществляется инверторами, установленными на выходах «развёрнутого», по отношению к классическому LUT, дерева транзисторов Рис. 1. Причём альтернативные цепочки при не активации путей в дереве обеспечивают подачу логической единицы. На Рис.3 указана настройка на реализацию функции «Исключающее ИЛИ» - горит светодиод на выходе блока ИЛИ так как переменные X1,X2 имеют различное значение.

Выполненное моделирование подтверждает работоспособность предлагаемого уточнённого технического решения блока дизъюнкций конститuent DC-LUT, подана заявка на выдачу патента.

Сравним по сложности L известное программируемое устройство - LUT L(n) и предложенное - DC LUT (Ldc). Сложность КЛБ LUT ПЛИС, реализующего одну функцию определяется выражением (1):

$$L_{LUTn} = 2^{n+1} + 2n + 2 \cdot 2^n \quad (1)$$

где $2^{n+1} - 2 + 2 = 2^{n+1}$ - количество транзисторов в дереве передающих транзисторов + два транзистора в выходном инверторе, $2n$ - количество транзисторов в группе инверторов входных переменных, $2 \cdot 2^n$ - количество транзисторов в группе инверторов которые находятся на выходе настроечных входов.

Сложность предлагаемого DC LUT, реализующего m функций от n переменных определяется выражением (2):

$$L_{DC-LUTn} = 2^{n+1} + 2n + n2^n + m2^n + 2m \quad (2)$$

где $2^{n+1} - 2 + 2 = 2^{n+1}$ - количество транзисторов в дереве передающих транзисторов + два транзистора в входном инверторе, $2n$ - количество транзисторов в группе инверторов входных переменных, $2 \cdot 2^n$ -

количество транзисторов в группе выходных инверторов, $m2^n + 2 \cdot m$ - количество транзисторов в m блоках вычисления функций, $n \cdot 2^n$ - количество транзисторов в блоках конститuent нуля.

Таким образом, получаем выигрыш по формуле (3) на рис.5:

$$\delta = \frac{(2^{n+1} + 2n + 2 \cdot 2^n) \cdot m}{2^{n+1} + 2n + n2^n + m2^n + 2m} \quad (3)$$

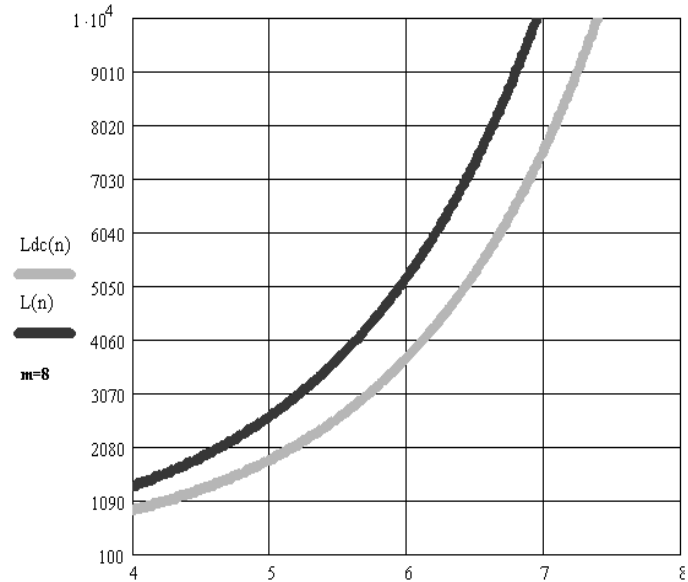


Рис. 5. Сравнение сложности LUT и DC-LUT

Выводы

Таким образом предложена структура логического элемента дешифратора - DC LUT для реализации систем функций в ПЛИС, который основан на схеме в виде дерева передающих МОП транзисторов. Уточняется структура блоков дизъюнкций конститuent с учётом требования активирования только одного пути в схеме.

В предложенной схеме сигналы с модифицированного дерева транзисторов DC поступают на затворы МОП транзистора блока дизъюнкций, а настроечная информация из конфигурационной памяти поступает на стоки этих транзисторов.

Выполненное моделирование в системе схемотехнического моделирования NI Multisim 10 фирмы National Instruments Electronics Workbench Group подтверждает работоспособность предлагаемых новых решений.

По сравнению с M LUT, каждый из которых реализует одну логическую функцию, DC-LUT позволяет получить выигрыш δ порядка 35%. При этом быстродействие уменьшается незначительно. Подана заявка на выдачу патента.

Целесообразно рассмотреть в дальнейшем вопросы эффективного сочетания КЛБ двух типов LUT и DC-LUT в ПЛИС для различных параметров систем функций.

Литература

1. С. Цыбин. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения 16.12.2014)
2. Е. Самкова. Stratix IV против Virtex-5. Точка не поставлена. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2189/doc/46576/> (Дата обращения 16.01.15 г.)
3. Arria II GX. Altera. [Электронный ресурс]. – URL: <http://icgamma.ru/linecard/altera/arria2gx/> (Дата обращения 16.01.15 г.)
4. An Ultra-Low-Energy, Variation-Tolerant FPGA Architecture Using Component-Speci_c Mapping [Электронный ресурс]. – URL: <http://thesis.library.caltech.edu/7226/> (Дата обращения 11.11.14 г.)
5. Тюрин С.Ф. Логические элементы для реализации систем функций в ПЛИС FPGA. Проектирование и технология электронных средств. 2013. № 4. С. 33-37.
6. Тюрин С.Ф., Городилов А.Ю., Громов О.А., Сулейманов А.А. Системная реализация логики в ПЛИС FPGA. Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2013. № 4. С. 85-90.

7. Дж. Д. Ульман. Вычислительные аспекты СБИС. Пер. с англ.: А.В. Неймана. Под редакцией П.П.Пархоменко. - М.: Радио и связь, 1990. - 480 с. ISBN 5-256-00253-8.
8. Tyurin S.F., Grekov A.V., Gromov O.A. The principle of recovery logic FPGA for critical applications by adapting (3) P. 328–332. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.26.03.13474
9. Tyurin S.F., Gromov O.A. A residual basis search algorithm of fault-tolerant programmable logic integrated circuits // Russian Electrical Engineering. – 2013. – 84 (11). – P. 647–651. DOI: 10.3103/S1068371213110163

LOGIC CELL FOR REALISATION OF SYSTEMS OF LOGICAL FUNCTIONS

R. V. Vikhorev

Perm National Research Politechnical University

Proposed LUT implements a system of M Boolean functions – DC-LUT, and the implementation of disjunctions constituents is provided by structures similar to the structures of configuration of interconnects. Compared to the M LUT, each of which implements only one logic function, DC-LUT allows to obtain the gain δ of the order of 35%. In this case, the performance decreases slightly.

Modeling of the proposed logic cells for the implementation of systems of logical functions DC-LUT in the system of circuit simulation NI Multisim, which confirms the efficiency of the proposed technical solutions of the application for the grant of a patent.

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ РФЯЦ-ВНИИЭФ «РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ»

д. ф.-м. н. Завьялов Н.В., к. ф.-м. н. Воронцов С.В., Девяткин А.А.,
д. ф.-м. н. Гордеев В.С., Тарасова Е.Ю., Щеглов В.Н.,
к. ф.-м. н. Грунин А.В., к. ф.-м. н. Лазарев С.А., д. ф.-м. н. Донской Е.Н.,
к. ф.-м. н. Залялов А.Н., Киселёв Ф.К., Кротова О.С., Музюкин К.М.

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр -
Всероссийский НИИ экспериментальной физики»

Введение

Для тестирования режимов функционирования радиоэлектронной аппаратуры космической техники и работоспособности микросхем в условиях действия частиц космического пространства широко используются установки РФЯЦ-ВНИИЭФ. Использование установок осуществляется в режиме Центра коллективного пользования «Радиационные исследования и испытания - ВНИИЭФ». Сокращённое название – ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ». Центр функционирует в интересах предприятий Роскосмоса, министерства образования и науки и министерства промышленности и торговли.

Деятельность ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» осуществляется в соответствии с положением о ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ», а также «Регламентом взаимодействия при предоставлении услуг ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» в соответствии с годовым координационным планом работы.

Развитие специализированных установок РФЯЦ-ВНИИЭФ для исследований физики радиационных взаимодействий частиц и излучений космического пространства продолжается и в настоящее время.

Организационная структура ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» функционирует на базе структурного подразделения РФЯЦ-ВНИИЭФ. ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» возглавляет руководитель, который осуществляет непосредственное руководство всей его деятельностью и несет персональную ответственность за результаты деятельности ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ», целевое использование испытательного и измерительного оборудования.

Основные задачи ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

В результате воздействия ионизирующих излучений естественных радиационных поясов земли (ЕРПЗ) (протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучения) в применяемых в космической отрасли интегральных схемах возникают дозовые эффекты, приводящие к деградации характеристик микросхем - радиационное повреждение материалов и изменение их функциональных параметров.

Задачи ЦКП:

Радиационностойкая микроэлектроника

- проведение радиационных испытаний микросхем, приборов и аппаратуры космической техники по дозовым эффектам;
- разработка, сопровождение и совершенствование методологии проведения испытаний (исследований), формирование предложений по совершенствованию методической и экспериментально-испытательной базы, в том числе методического, аппаратного и программного обеспечения, применяемого при обработке экспериментальной информации;
- метрологическое сопровождение испытаний, включая аттестацию измерительного и испытательного оборудования;
- повышение эффективности использования приборов и научного оборудования ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ», участие в развитии новых методов исследований и интерпретации их результатов.

Методология ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Методология испытаний основана на:

- детализации характеристик полей ионизирующего излучения космического пространства;
- определении основных радиационных эффектов и контролируемых параметров электронной компонентной базы и аппаратуры;
- эквивалентном воспроизведении дозовых ионизационных и структурных повреждений в радиационно-чувствительных элементах;
- переносе результатов на заданные характеристики излучения космического пространства;
- формировании заключения о стойкости.

Экспериментально-испытательная база ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Для моделирования воздействия ионизирующего излучения электронов, протонов и тормозного излучения КП по дозовым эффектам в состав испытательного оборудования ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» входят:

А. Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-7-2 [1]

Ускоритель ЛУ-7-2 (рисунок 1) предназначен для генерации электронного и тормозного излучения в течение длительного времени в широком диапазоне мощности экспозиционной дозы тормозного излучения: от 0.1 Р/с до 250 Р/с, на площади 800 см² с неоднородностью не хуже 30%. Энергия ускоряемых электронов – 6.5 МэВ. Производительность – трехсменный режим работы.

Б. Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [2]

Ускоритель ЛУ-10-20 предназначен для моделирования эффектов дозового воздействия ионизирующего-излучения космического пространства, общий вид показан на рисунке 2.



Рис. 1. Общий вид ускорителя ЛУ-7-2



Рис. 2. Общий вид ускорителя ЛУ-10-20

Характеристики ускорителя ЛУ-10-20: энергия ускоренных электронов (регулируемая) - 5÷9 МэВ; длительность импульсов – 3.5 мкс; частота повторения импульсов - 10÷1000 Гц; мощность экспозиционной дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени на площади $\varnothing 0,2 \text{ м}^2$ с неоднородностью не хуже 30% - до 500 Р/с. Система развёртки электронного пучка и транспортировочная линия позволяют проводить ускоренные испытания с площадью облучения до 1 м².

Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура (длина кабелей) – 30 м. Производительность – трехсменный режим работы.

В. Установка рентгеновская статическая (УРС)

Радиационстойкая микроэлектроника

УРС предназначена для изучения дозовых эффектов при радиационных исследованиях и испытаниях.

Дозовое поле формируется с помощью трех излучателей, независимо перемещаемых в пространстве. Силовая часть установки создана на базе серийных рентгеновских аппаратов РАП-300 и РУП-300. Энергия квантов рентгеновского излучения – $5\div 120$ кэВ; номинальный ток трубок $10\div 13$ мА; угловая расходимость пучка каждого излучателя – 40° ; максимальная мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения при максимальном приближении к выходному окну трубки – 15 Р/с.

Излучатели и генераторы напряжения размещены на двух стендах с габаритами $3\times 2.9\times 1$ м³ и $2\times 1.6\times 1$ м³. Время непрерывной работы 24 часа. Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура – 20 м.

Общий вид установки приведен на рисунке 3.

Г. Нейтронный генератор НГ-150М [3], [4]

Установка предназначена для моделирования структурных повреждений в ЭКБ от протонов и атмосферных нейтронов. Режим работы статический с энергией нейтронов 14 МэВ. Плотность потока нейтронов $d\Phi_{n\max}/dt = 1\cdot 10^9$ н/(см²·с). Данная установка является эталоном II разряда для воспроизведения единиц плотности потока и флюенса нейтронов. Минимальная длина измерительной линии – 5 м. Внешний вид установки показан на рисунке 4.



Рис. 3. Общий вид установки УРС Рис. 4. Общий вид установки НГ-150М

Д. Ядерный реактор БР-1М [5]

БР-1М - реактор с металлической активной зоной. Материал активной зоны - сплав высокообогащенного урана с молибденом. Внешний вид установки показан на рисунке 5.

Средняя энергия спектра нейтронного излучения в центральном канале – 1.26 МэВ, на поверхности АЗ – 1.29 МэВ. Доля нейтронов с энергией $E > 0.1$ МэВ в спектре утечки и в центральном канале – 95.5%. Средняя энергия спектра γ -излучения в центральном канале – 1.10 МэВ, на поверхности – 1.25 МэВ.

В настоящее время в ЦКП, кроме БР-1М [5] функционируют ещё 2 ядерных реактора: БР-К1 [5], ВИР-2М [5]. Данные установки различны по конструкции, составу топлива и своим основным параметрам. Установки оснащены различными экспериментальными устройствами, позволяющими изменять соотношение нейтронной и гамма-составляющих ионизирующих излучений для целей расширения экспериментальных возможностей.



Рис. 5. Общий вид установки БР-1М

Е. Водный реактор ВИР-2М [5]

Вид планировки здания с установкой ВИР-2М, а также её экспериментальные каналы в корпусе реактора из нержавеющей стали показаны на рисунках 6, 7.

Радиационстойкая микроэлектроника

Облучение возможно в центральном канале (ЦК) диаметром 142 мм и полусферическом (ПСК) радиусом 300 мм, а также в любой точке нижнего зала размером 10×10×2.5 м в поле излучения ПСК. Средняя энергия нейтронов в экспериментальных каналах – 0.7 МэВ, γ -квантов-1.5 МэВ. Возможна длительная работа на статической мощности.

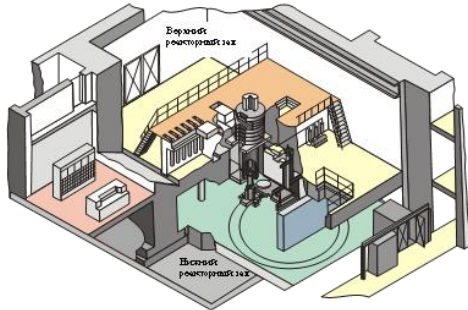
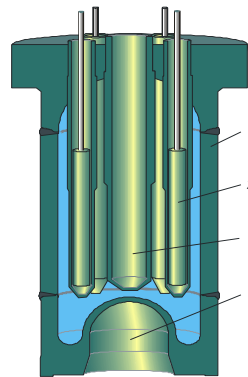


Рис. 6. Вид планировки здания с установкой ВИР-2М



- 1 Корпус активной зоны.
- 2 Стержень управления реактивностью.
- 3 Центральный экспериментальный канал, диаметр 142 мм.
- 4 Полусферический экспериментальный канал, диаметр 300 мм.

Рис. 7. Экспериментальные каналы установки ВИР-2М

Ж. Ядерный реактор БР-К1 [5]

Общий вид реактора представлен на рисунке 8. Реактор представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначенную как для калибровок детекторов в моделирующих опорных полях нейтронов (МОП-К2), пространственно совмещенных с аттестованным источником γ -излучения, так и для проведения облучений ЭКБ и приборов космической техники.



Рис. 8. Общий вид установки БР-К1

Для загрузки исследуемых объектов в облучательную полость используется контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), который закреплен на стенде загрузки реактора. Этот стенд обеспечивает загрузку контейнера в активную зону реактора и его удаление на расстояние ~6 метров от поверхности АЗ. Конфигурации КГЗ в двух практически значимых вариантах: пустой КГЗ (КГЗ-П) и с n - γ конвертором (КГЗ-НГК). Конвертор используется для трансформации нейтронного излучения реактора и представляет собой шестигранный «стакан» из пресс материала. Параметры: полость для облучения $\varnothing 308 \times 360$ мм. Параметры полей излучения при работе установок БР-1М, БР-К1, ВИР-2М в статическом режиме представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики излучения при 3 часовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов 10^{10} см^{-2}

Установка	Размер зоны облучения в мм	Доза, мощность дозы гамма излучения	
		Р	$\text{Р} \cdot \text{с}^{-1}$
БР-1М ЦК	$\varnothing 94 \times 180$	3.7	$3.4 \cdot 10^{-4}$
Поверхность АЗ	200×200	2.9	$2.7 \cdot 10^{-4}$
БР-К1 КГЗ-П	$\varnothing 310 \times 360$	0.15	$1.4 \cdot 10^{-5}$
ВИР-2М ПСК	$\varnothing 300 \times 300$	10.0	$9.3 \cdot 10^{-4}$

Радиационностойкая микроэлектроника

Таблица 2. Характеристики излучения при 30 часовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Установка	Размер зоны облучения, мм	Доза, мощность дозы гамма излучения	
		P	P·с ⁻¹
БР-1М ЦК	Ø94×180	$1.85 \cdot 10^4$	0.17
Поверхность АЗ	200×200	$3.6 \cdot 10^3$	0.033
БР-К1 КГЗ-П	Ø310×360	740	0.007
ВИР-2М ПСК	Ø300×300	$5.0 \cdot 10^4$	0.46

Дозиметры гамма излучения перед применением их в опытах калибруются в поле гамма-излучения источника Co^{60} . Передача размера единицы мощности экспозиционной дозы производится от установки «Эталон 3» из состава вторичного рабочего эталона экспозиционной дозы ВЭТ 8-12-91 в соответствии с поверочными схемами. Паспортное значение начальной активности источника, известное с погрешностью 10%, на 27.07.1989г составляет 432 Ки. [6] Общий вид установки Эталон-3 показан на рисунке 9.



Рис. 9. Общий вид установки Эталон-3

Методическое оснащение ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Установки ЛУ-7-2, ЛУ-10-20, УРС, БР-1М, ВИР-2М, БР-К1 аттестованы в качестве испытательного оборудования для проведения испытаний стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Аттестация проведена в соответствии со стандартом ГОСТ Р 8.568-97 аттестационной комиссией.

В целях обеспечения моделирования эквивалентных радиационных нагрузок в чувствительных областях ЭКБ, приборах и РЭА проводятся расчеты ионизационного действия проникающей радиации на данные элементы и корпуса сложных технических систем по методикам:

- «Триада» - методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса гамма-излучения и электронов в цилиндрической геометрии (от 0.1 кэВ до 1 ГэВ) [7]
- «С-007» - методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса нейтронов, гамма-излучения, электронов и позитронов в сложной трехмерной геометрии (от 1 кэВ до 100 МэВ) [8]

В соответствии с действующими нормативными документами в области обеспечения единства измерений, ЦКП "РИИ-ВНИИЭФ" оснащен методиками и средствами измерений характеристик полей ионизирующих излучений применяемых установок во всем диапазоне их возможных значений. Методическое обеспечение моделирующих установок и комплексов ЦКП "РИИ-ВНИИЭФ" включает в себя комплекты детекторов, измерительных кабельных линий, современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения для проведения измерений характеристик излучений в широком диапазоне значений.

Для измерений радиационной реакции испытываемых объектов рабочие места хорошо оснащены измерительными средствами современного уровня. Предпочтение отдано программно-аппаратным комплексам на базе интеллектуальных крейтов. Использование такого оборудования позволяет оптимизировать процесс испытаний ЭКБ, включая автоматизацию управления экспериментом, проводить эксперименты одновременно с большим количеством исследуемых образцов и изучать большое количество функциональных блоков в каждом образце.

Примеры испытаний

В качестве примера приведены результаты испытаний нескольких микросхем:

Радиационнстойкая микроэлектроника

1) Испытания интегральных микросхем по дозовым эффектам:

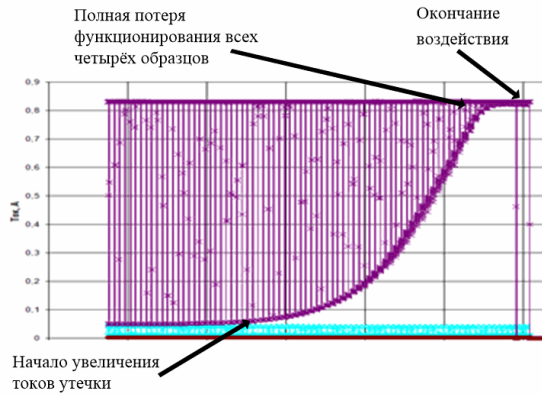


Рис. 10. Испытания микросборки с функцией реле

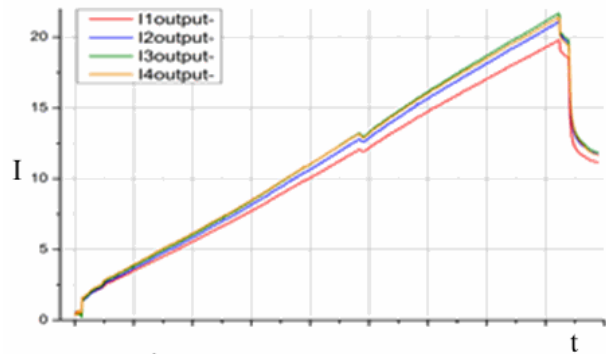


Рис.11. Рост тока потребления ИМС

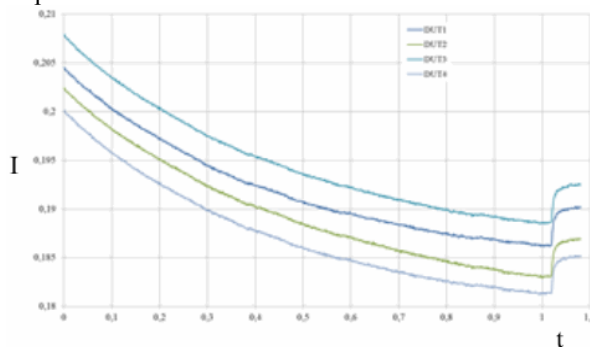


Рис. 12. Снижение тока потребления ИМС

2) Моделирование атмосферных нейтронов с использованием нейтронного генератора:

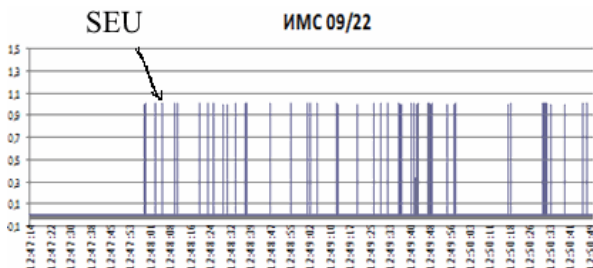


Рис. 13. Испытания ОЗУ

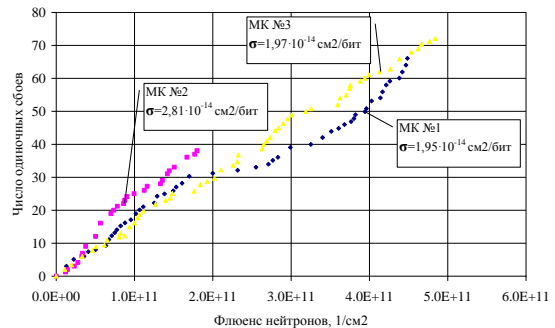


Рис. 14. Накопление ошибок в памяти ОЗУ в процессе облучения в зависимости от флюенса нейтронов

Заключение

РФЯЦ-ВНИИЭФ обладает квалифицированным персоналом, типовыми методиками проведения испытаний стойкости к воздействию ИИ КП, аттестованными установками.

РФЯЦ-ВНИИЭФ обеспечивает моделирование воздействия протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучений по структурным и ионизационным эффектам от воздействия ИИ КП.

Проведение испытаний, исследований в ЦКП РИИ-ВНИИЭФ осуществляется на основании заключенного договора (заключается от имени РФЯЦ-ВНИИЭФ).

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» обеспечивает объективность, достоверность, точность и воспроизводимость результатов испытаний. Испытательный центр РФЯЦ-ВНИИЭФ соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2009.

Для проведения радиационных исследований и испытаний в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» имеются лицензия Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

№ 77.99.15.002.Л.000056.03.10 от 05.03.12 на осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения.

Литература

1. Шориков И.В., Завьялов Н.В., Хохлов Ю.А. и др. Малогабаритный линейный ускоритель электронов для гаммаграфии крупногабаритных объектов. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, выпуск 3, 2002. – С.142.
2. Завьялов Н.В., Тельнов А.В., Хохлов Ю.А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20 // Материалы XV Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. - ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. - Вып. 2,3 (29, 30), 1997.
3. Abramovich S.N., Nefedov Y.Y., Semenov V.I., et al. Benchmark Experiments on Measurement of Neutron and Gamma-Ray Leakage Spectra and Yields from Three Vanadium Spheres // Fusion Engineering and Design, 2001, vol.58-59, P.601-606.
4. Кирьянов Г.И. Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии: Научное издание. – В 2-х выпусках. Выпуск 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – С.140.
6. Установка поверочная ЭТАЛОН-3, технические условия, e01.287.035.ТУ.
7. Грунин А.В., Шмаров А.Е. Программирование монте-карловских задач с визуализацией процесса расчета. VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. - С.53-59.
8. Житник А.К., Донской Е.Н., Огнев С.П., Горбунов А.В. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С.17-24.

**RFNC-VNIIEF MULTI-ACCESS CENTER
«RADIATION RESEARCH AND TESTING»**

N.V.Zavyalov, S.V.Vorontsov, A.A. Devyatkin, V.S.Gordeev,
Ye.Yu. Tarasova, V.N. Shcheglov, F.V.Grunin, S.A.Lazarev,
Ye.N.Donskoj, A.N. Zalyalov, F.K. Kiselev, O.S. Krotova, K.M. Muzyukin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

The test facilities of the Center of radiation research and testing of Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF) is considered in the given paper. The paper considers the test methodology for simulating dose ionization and structural damages in electronic components and devices caused by proton, electron and secondary radiation, caused this interaction with the structure of spacecraft and Earth atmosphere.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИСПЫТАНИЙ МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ
ОТДЕЛЬНЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

к. ф.-м. н. Гаганов В.В.¹, к. ф.-м. н. Грунин А.В.¹, Дроздов И.Ю.¹, Игнатов К.А.¹, Киселев Ф.К.¹,
Крылевский Е.Н.¹, Кудрявцев Ю.Г.¹, к. ф.-м. н. Лазарев С.А.¹, Музюкин К.М.¹, Силаев А.В.¹,
Цыганков Б.В.¹, д. т. н. Петричкович Я.Я.², Гусев В.В.², Мироненко Л.П.²

¹ ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр -
Всероссийский НИИ экспериментальной физики»

² ОАО НПЦ «ЭЛВИС», Зеленоград

Введение

Для оценки частоты одиночных радиационных эффектов в ИМС широко применяется интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель). В ее основе, как и в ранней RPP-модели, лежат семь простых предположений [1]:

1 – энерговыделение в чувствительной области равно потере энергии проходящего через нее иона (ЛПЭ);

2 – ионы с одинаковыми значениями ЛПЭ создают одинаковый эффект;

3 – изменением ЛПЭ вдоль трека иона в чувствительном объеме можно пренебречь;

Радиационностойкая микроэлектроника

4 – величина сгенерированного заряда неравновесных носителей пропорциональна произведению ЛПЭ на сумму длины трека в чувствительной области, длины «воронки» и длины области диффузии;

5 – длина области сбора заряда не зависит от ЛПЭ;

6 – чувствительный объем представляет собой замкнутую область;

7 – поток частиц в микросхеме изотропен и, соответственно, ЛПЭ-спектр не зависит от направления воздействия.

В обоих методах форма чувствительного объема – параллелепипед. Для согласования с результатами измерений зависимости сечения сбора от ЛПЭ в IRPP-модели вводится дополнительное предположение о разбросе характеристик чувствительных объемов в соответствии с распределением Вэйбулла [1]. На наш взгляд последнее предположение является избыточным и необходимого согласования с экспериментальными результатами можно добиться изменением формы чувствительной области в соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе V. Это также исключает необходимость экспериментальной оценки длины «воронки» и длины области диффузии неравновесных носителей.

Для обработки экспериментальных данных и получения параметров распределения Вэйбулла, как правило, применяется метод наименьших квадратов с коррекцией исходных данных на закон косинуса угла падения частиц и оценки длины области диффузии. В этом случае не учитывается гетероскедастичность исходных данных количества зарегистрированных сбоев и измерений флюенса ионов. Более адекватным в этом случае является применение метода максимума правдоподобия, приведенное в разделе III.

Методика экспериментальных исследований

А. Объект испытаний

Объектом испытаний являлись образцы интегральной микросхемы (ИМС) статической асинхронной памяти 1657PY1Y, распаянные на модули. Основные характеристики микросхемы представлены в Таблице I.

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМС 1657PY1Y

Название параметра	Значение параметра
Разработчик и производитель	ОАО НПЦ «ЭЛВИС», Россия
Тип памяти	статическая асинхронная 8-разрядная
Объем	4 Мбит (8x512кбайт)
Степень интеграции	VII
Тип корпуса, исполнение	LCC44, выполнен в виде керамического носителя без выводной рамки с выводами в виде контактных площадок
Технология изготовления	0.25 мкм

Б. Условия проведения эксперимента

Моделирование воздействия атмосферных нейтронов проводилось в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с использованием источника нейтронов с энергией 14.7 МэВ на основе нейтронного генератора НГ-150М, допущенного к применению в качестве рабочего эталона второго разряда в соответствии с ГОСТ 8.105-80. Испытания на воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) проводилось на испытательном стенде Роскосмоса БИС ОИ-А (400М) (ОАО «НИИ КП») на базе изохронного циклотрона У-400М (ОИЯИ, г. Дубна Московской области) [2].

Энергия ионов (76 МэВ ^{22}Ne , 156 МэВ ^{40}Ar , 282 МэВ ^{84}Kr , 393 МэВ ^{136}Xe) для проведения испытаний выбиралась из условия необходимости обеспечения заданных ЛПЭ на поверхности кристаллов облучаемых ИМС в диапазоне от 5 до 70 МэВ·см²/мг [Si] и пробега ионов в кремнии не менее 30 мкм. Облучение проводилось при углах падения ионов 0°, 30°, 45° (Ne, Ar, Kr, Xe) и 0°, 30°, 45°, 60° (Kr) на кристалл микросхемы.

Перед проведением испытаний образцы микросхемы 1657PY1Y декапсулировались (удалялась крышка корпуса для обеспечения воздействия ТЗЧ непосредственно на кристалл облучаемых образцов ИМС).

В. Методика регистрации обратимых одиночных сбоев (Single Event Upset – SEU)

Критерием возникновения эффекта SEU являлось изменение состояния одной ячейки памяти ИМС 1657РУ1У. Регистрация возникновения эффекта SEU при облучении в образцах ИМС 1657РУ1У проводилась при проведении процедуры функционального контроля.

Обработка экспериментальных данных

Для аппроксимации и интерполяции полученных зависимостей сечения SEU от угла и значения ЛПЭ использована зависимость

$$\sigma(L, \theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } L/\cos(\theta) \leq L_0 \\ \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\left(\frac{L/\cos(\theta) - L_0}{\beta}\right)^\alpha}) \cdot \cos(\theta), & \text{при } L/\cos(\theta) > L_0 \end{cases} \quad (1)$$

где σ_0 - сечение насыщения; L - значение ЛПЭ; L_0 - пороговое значение ЛПЭ по одиночным сбоям; θ - угол падения ТЗЧ относительно нормали к поверхности кристалла; β - параметр масштаба; α - параметр формы распределения.

Результаты предварительной обработки экспериментальных данных показали, что полученные зависимости сечения SEU от угла и ЛПЭ аппроксимируются зависимостью (1) при значениях параметра масштаба β порядка 10^9 . При таких значениях параметра масштаба β в выражении (1) может быть использовано разложение экспоненциальной функции по малому параметру и выражение (1) упрощается

$$\sigma(L, \theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } L/\cos(\theta) \leq L_0 \\ \Sigma \cdot (L/\cos(\theta) - L_0)^\alpha \cdot \cos(\theta), & \text{при } L/\cos(\theta) > L_0 \end{cases} \quad (2)$$

где $\Sigma = \sigma_0 / \beta^\alpha$ - нормировочный множитель.

С учетом наличия эффекта гетероскедастичности в измерениях флюенса и числа сбоев, обработка экспериментальных данных проводилась с использованием выражения (2) методом максимума правдоподобия. Использовалась функция правдоподобия Π в виде

$$-\ln(\Pi) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\Phi_i - \Phi_i^0)^2}{2 \cdot (a \cdot \Phi_i^0)^2} + \ln(|a \cdot \Phi_i^0|) \right) + \quad (3)$$

$$\frac{(M_i - \sigma(L_i, \theta_i) \cdot \Phi_i^0)^2}{2 \cdot |\sigma(L_i, \theta_i) \cdot \Phi_i^0|} + \frac{1}{2} \cdot \ln(|\sigma(L_i, \theta_i) \cdot \Phi_i^0|),$$

где N - количество экспериментов; $\Phi_i, L_i, \theta_i, M_i$ - значения флюенса, ЛПЭ, угла падения ТЗЧ и количества зарегистрированных одиночных сбоев в i -том эксперименте; Φ_i^0 - оцененные значения флюенса ТЗЧ в i -том эксперименте; a - оценка относительной погрешности измерения флюенса ТЗЧ.

Оптимизация функции (3) выполнялась по параметрам Σ, L_0, α (выражение(2)) и a, Φ_i^0 (выражение (3)). Оценка интервала неопределенности по каждому параметру проводилась путем расчета матрицы ошибок используемых параметров оптимизации. Как известно [3], матрица ошибок является обратной по отношению к матрице вторых производных (матрицы Гессе) функции (3) по набору используемых параметров.

Результаты эксперимента

Полученные в результате обработки значения параметров зависимости сечения SEU при воздействии ТЗЧ приведены в таблице II.

ТАБЛИЦА II. ОЦЕНЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАВИСИМОСТИ (2) СЕЧЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ ИМС 1657РУ1У

Параметр	Значение параметра и интервал неопределенности
$\Sigma, \text{см}^2/\text{бит}$	$(0.72 \pm 0.16) \cdot 10^{-8}$
$L_0, \text{МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)$	3.9 ± 1.2
α	0.460 ± 0.054
	- - - -

Также в таблице II приведены значения интервалов неопределенности при значении доверительной вероятности 95%. Сравнение полученных зависимостей с экспериментальными данными приведено на рисунке 1. В качестве экспериментальных данных на рисунке 1 использованы средние значения по всем экспериментам с данными значениями ЛПЭ и угла падения.

Для сечения SEU ИМС 1657РУ1У при воздействии нейтронов с энергией 14.7 МэВ получено значение $(1.02 \pm 0.11) \cdot 10^{-14} \text{см}^2/\text{бит}$.

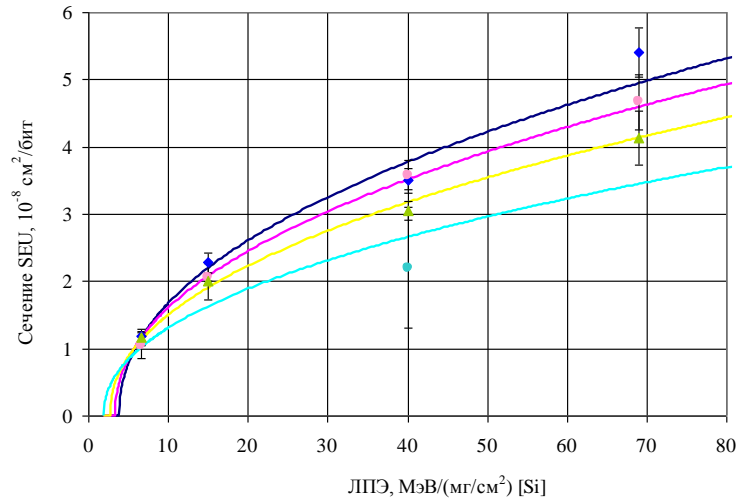


Рис. 1. Зависимости сечения SEU от ЛПЭ ионов при T=25°C для углов падения 0° (синий), 30° (красный), 45° (жёлтый) и 60° (голубой)

Результаты численного моделирования

Численное моделирование проведенных экспериментов по измерению сечений одиночных сбоях при воздействии ТЗЧ выполнялось методом Монте-Карло по программе, разработанной на основе библиотек GEANT4 [4]. С использованием этой программы рассчитывались распределения энерговыделений в чувствительных областях микросхемы при воздействии ионов Ne, Ar, Kr и Xe с энергиями, указанными выше. Общая геометрия моделирования воздействия ТЗЧ на микросхему 1657PY1Y показана на рисунке 2. Пассивные слои микросхемы моделировались двенадцатью слоями с однородными распределениями вещества в каждом слое. Состав и весовые соотношения элементов (Al, SiO₂ и т.д.) в каждом слое определялся на основе данных о топологии этих слоев.



Рис. 2. Сечение геометрической модели микросхемы 1657PY1Y (кристалл - желтый, корпус - серый, крышка корпуса - черный)

В геометрической модели кристалл микросхемы разбивался на 2048×2048 элементов (в соответствии с общим количеством ячеек памяти) и в каждом элементе выделялась чувствительная область, геометрические характеристики которой рассчитывались с использованием зависимости сечения сбоя при воздействии ТЗЧ по следующим соотношениям:

$$\text{радиус } R = \sqrt{\frac{\sigma(L,0)}{\pi \cdot N}} \text{ и глубина } H = K \cdot \frac{L_0}{L},$$

где $\sigma(L,0)$ - зависимость сечения от ЛПЭ (2) при нормальном падении ТЗЧ на кристалл, $N=2$ - количество независимых чувствительных областей в пределах одной ячейки памяти, K - глубина чувствительной области, значения которого варьировались от 0.08 мкм до 4 мкм.

Геометрическая модель чувствительной области и зависимость ее высоты от радиуса приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

При проведении расчетов поток частиц моделировался плоским мононаправленным источником площадью, равной площади микросхемы и углом падения 0°, 30° и 45° относительно нормали к поверхности кристалла. В результате расчетов методом Монте-Карло для ионов были получены распределения энерговыделений в чувствительных областях микросхемы. Расчет зависимостей сечений эффекта SEU от значения порогового энерговыделения проводился с использованием соотношения

$$\sigma_{SEU}(E_0) = \frac{S_0 \cdot N \cdot n_w(> E_0)}{M} \quad (4)$$

Радиационностойкая микроэлектроника

где $\sigma_{SEU}(E_0)$ - сечение эффекта SEU ($\text{см}^2 \cdot \text{бит}^{-1}$); $n_w(>E_0)$ - доля событий с энерговыделением более E_0 (МэВ); M - число ячеек памяти, S_0 - площадь источника.

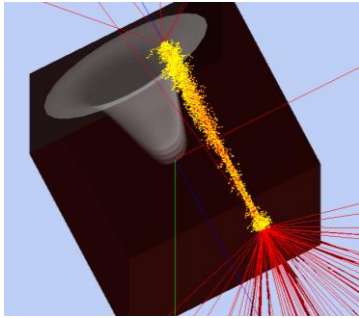


Рис. 3. Геометрическая модель чувствительной области (траектории частиц: ионы (сверху вниз) - синий, электроны - красный, точки взаимодействия - желтый)

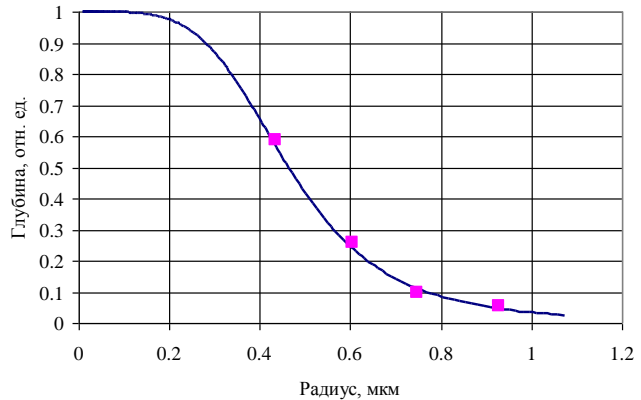


Рис. 4. Зависимость высоты чувствительной области от радиуса (точки - расчёт по экспериментальным сечениям)

На рисунке 5 приведен пример полученных расчетных зависимостей сечений эффекта SEU от значения порогового энерговыделения при воздействии ТЗЧ. Для определения параметров расчетной модели сечений SEU при воздействии протонов проведена обработка полученных данных методом наименьших квадратов

$$Q^2(M, E_0) = \sum_{i=1}^N (\sigma_{SEU}^{\text{exp}}(L_i, \theta_i) - \sigma_{SRE}^{MK}(E_0, L_i, \theta_i))^2 \quad (5)$$

где $\sigma_{SEU}^{\text{exp}}(L_i, \theta_i)$ - средние, по всем экспериментам, значения сечений эффекта SEU для значений ЛПЭ L_i и угла падения ионов θ_i ; $\sigma_{SRE}^{MK}(E_0, L_i, \theta_i)$ - рассчитанные по (4) значения сечений эффекта SEU для значений ЛПЭ L_i и угла падения ионов θ_i .

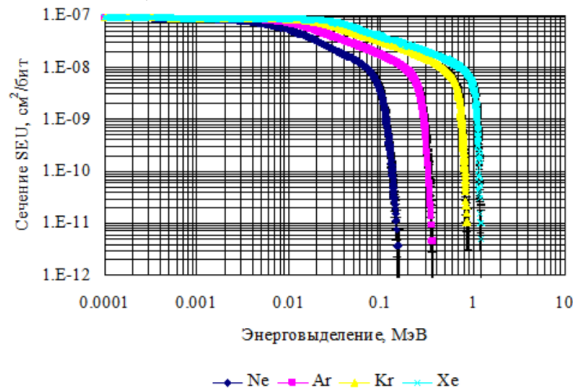


Рис. 5. Расчетные зависимости сечений эффекта SEU от величины энерговыделения при воздействии ионов при нормальном падении

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что описанным методом при имеющемся наборе экспериментальных данных можно выделить только диапазон возможных значений глубины чувствительной области от 0.08 мкм до 0.4 мкм. Значения параметров расчетной модели сечений SEU при этом находятся в диапазоне: E_0 от 0.067 до 0.31 МэВ, объем чувствительной области V от 0.0726 до 0.363 мкм³, тем не менее пороговая плотность энерговыделения w изменяется незначительно от $9.8 \cdot 10^{11}$ МэВ/см³ до $9.5 \cdot 10^{11}$ МэВ/см³. В качестве иллюстрации корректности проведенных расчетов на рисунке 6 приведено сопоставление экспериментальных данных, расчетных зависимостей (2) с параметрами из таблицы II и результатов расчетов методом Монте-Карло сечения SEU микросхемы 1657PY1Y от ЛПЭ ТЗЧ при $T=25^\circ\text{C}$ для углов падения 0° (синий), 30° (красный) и 45° (голубой).

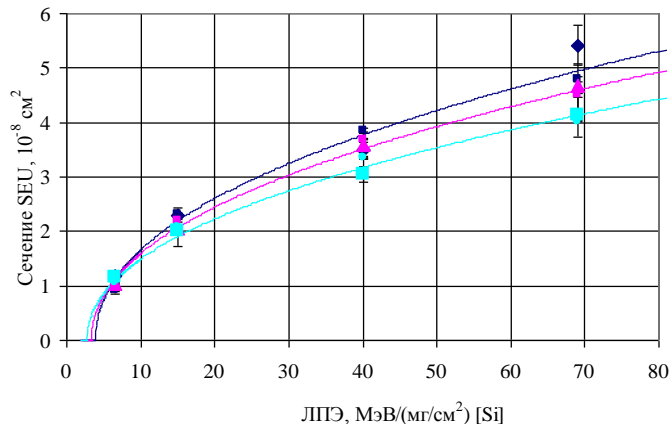


Рис. 6. Сечения SEU микросхемы 1657PY1U от ЛПЭ ТЗЧ при $T=25^{\circ}\text{C}$ для углов падения 0° (синий), 30° (красный) и 45° (голубой) (линии - расчет по (2) с параметрами таблицы 2, крупные точки – эксперимент, мелкие точки - расчёт Монте-Карло)

С использованием предложенной модели проведены расчеты зависимостей сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ для двух случаев облучения: при нормальном падении ионов ^{40}Ar с энергией от 1.4 МэВ/нуклон до 5 ГэВ/нуклон и ^{197}Au с энергией от 0.4 МэВ/нуклон до 2.5 ГэВ/нуклон, а также для ионов ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{84}Kr , ^{136}Xe , ^{197}Au и ^{238}U с энергиями 125, 162, 238, 286, 330 и 336 МэВ/нуклон, соответственно, под углом 90° к нормали. В последнем случае энергии выбирались из условия превышения пробега ионов массовой толщины ИМС в направлении распространения. В первом случае расчеты проводились для значения глубины чувствительной области 0.4 мкм, а во втором для значений глубины 0.4 мкм и 4 мкм. Результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке 7.

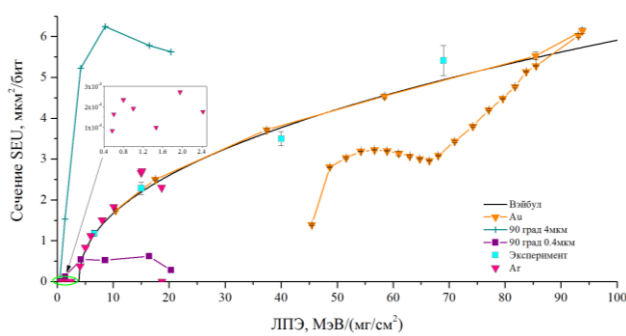


Рис. 7. Зависимости сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ при различном направлении распространения

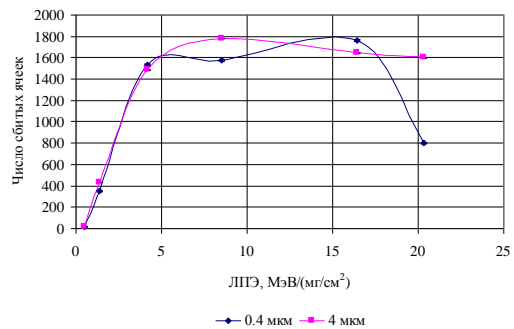


Рис. 8. Зависимости числа сбитых ячеек от начального ЛПЭ иона для двух значений глубины чувствительной области

Одним из интересных результатов проведенных расчетов является прогнозирование наличия одиночных сбоев при энергии ионов ^{40}Ar более 40 МэВ/нуклон, для которых значения начальной ЛПЭ ниже измеренного порога.

Численные значения сечения SEU при распространении ионов под углом 90° к нормали позволяют прогнозировать о наличие в этом случае эффекта массовых сбоев (Multiple Bit Upset - MBU). Отметим пропорциональность значения сечения высоте чувствительной области. Зависимости среднего значения количества одновременно сбитых ячеек от начального значения ЛПЭ иона приведены на рисунке 8. Они получены как отношения сечения сбоя к площади сечения чувствительной области в плоскости перпендикулярной направлению распространения.

Используя полученные зависимости сечения SEU от ЛПЭ ионов в модели расчета сечения SEU при

воздействии 14 МэВ нейтронов [5] получено расчетное значение этого сечения $0.67 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{бит}$. Сравнение этого значения с приведенным выше экспериментальным значением $(1.02 \pm 0.11) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{бит}$, с учетом погрешностей обоих экспериментов, говорит об их достаточно хорошем согласии.

Обсуждение

Использование для обработки результатов измерений зависимости сечения SEU метода максимума правдоподобия позволяет провести корректный учет наличия эффекта гетероскедастичности в измерениях флюенса и числа сбоев. Кроме того, использование этого метода позволяет, помимо оценки интересующих параметров, получить корректную оценку их интервалов неопределенности и, с учетом оценки неопределенности измерений флюенса, оценить качество проведенного эксперимента.

Модель, основанная на предположении о существовании в ИМС чувствительных областей, ионизация в которых пропорциональна ЛПЭ иона и длине трека, с одинаковой пороговой энергией и формой, рассчитанной с использованием зависимости сечения SEU от ЛПЭ, позволяет достаточно точно описать зависимость сечения сбоев в широком диапазоне углов падения (до 60°). Эта модель позволяет оценить пороговую плотность энерговыделения, необходимого для возникновения сбоя.

Для оценки высоты чувствительной области можно рекомендовать проведение измерений сечения одиночных сбоев при энергиях ионов 150-300 МэВ/нуклон с направлением облучения под углом 90° к нормали. В этом случае должен наблюдаться эффект массовых сбоев вдоль трека иона. Анализ таких событий, «треков одиночных сбоев», с учетом изменения энергии иона вдоль трека, может дать дополнительную информацию о характере зависимости сечения сбоя от ЛПЭ.

Хорошее согласие между собой данных измерений зависимости сечения SEU от ЛПЭ ионов, сечений SEU при воздействии 14 МэВ нейтронов и модели из работы [5] позволяет рассмотреть возможность использования этой модели при совместной обработке данных измерений. Это может позволить улучшить точность и достоверность измерений сечений одиночных сбоев.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.С. Анашину (филиал ОАО «ОРКК» - «НИИ КП») за помощь в организации и проведении экспериментов на стенде Роскосмоса в ОИЯИ, г. Дубна.

Литература

1. T.L. Petersrn, J.C. Pickel, J.H. Adams, Jr., E.C. Smith, "Rate prediction for single event effects," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 39, pp. 1577–1599, Dec. 1992.
2. S. M. Barbero, S. K. Höffgen, G. Berger, H. Guerrero, Compendium of international irradiation test facilities (1st edition). RADECS 2011, Sevilla, Spain, September 19/23 2011, pp. 41–42.
3. W. Lederman, Handbook of applicable mathematics, vol. VI, part A. New York: John Wiley & Sons, 1984, ch. 6.
4. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, i.e., "Geant4—a simulation toolkit", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 506, Issue 3, Pages 250–303, 1 July 2003
5. A. Haran, J. Barak, L. Weissman, D. David, E. Keren, "14 MeV neutrons SEU cross section in deep submicron devices calculated using heavy ion SEU cross section," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 58, pp. 848–854, Jun. 2011.

METHODOLOGICAL PECULIARITIES OF PROCESSING THE RESULTS OF MEMORY CHIP TESTS FOR EXPOSURE OF HEAVY IONS

V.V. Gaganov¹, A.V. Grunin¹, I.Yu. Drozdov¹, K.A. Ignatov¹, F.K. Kiselev¹, E.N. Krylevskii¹,
Yu.G. Kudryavtsev¹, S.A. Lazarev¹, K.M. Muzyukin¹, A.V. Silaev¹, B.V. Tsygankov¹,
Ja.Ja. Petrichkovich², V.V. Gusev², L.P. Mironenko²

¹ Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

² JSC SPC "ELVIS"

The present paper reports the methodological peculiarities of processing and analysis of test results for effect of atmospheric neutrons and heavy ions of chip samples of static asynchronous CMOS memory 1657RU1U.

To estimate single radiation effects frequency in a chip, an integral rectangular parallelepiped model (IRPP-model) is widely used. As in the early RPP-model, 7 simple assumptions form the foundation for it:

1 – The energy deposited in a sensitive volume is equal to the energy loss of an energetic ion passing through that volume as calculated using its LET;

2 – Ions with the same linear energy transfer (LET) have the same effect;

3 – The change in LET along an ion track in the sensitive volume is negligible;

- 4 – The charge of generation is equal to the product of the LET of the ion and a chord of the region augmented by a funnel region, and perhaps a diffusion region;
- 5 – The charge collection path is independent of the LET;
- 6 – The sensitive volume is a convex body;
- 7 – The particle flux is isotropic at the device and therefore the LET spectrum is the same for all directions.

In both methods a sensitive volume form is parallelepiped. To agree with measurement results of upset cross-section dependence from LET, in IRPP-model there is introduced an additional assumption on characteristic spread of sensitive volumes in accordance with Weibull distribution. In our opinion, the last assumption is excessive and one can reach the required agreement with experimental results by the changing the sensitive area form in accordance with the algorithm, given in the paper. This also excludes the need for experimental evaluation of lengths of «funnel» and diffusion region of nonequilibrium carriers.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ УСКОРИТЕЛИ АРСА ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭКБ

к.т.н. Эльяш С.Л., Пухов С.П., Родигин А.В., Юрьев А.Л.

Российский Федеральный Ядерный Центр -Всероссийский НИИ экспериментальной физики

В настоящее время резко возрос объём испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения (ИИ). В соответствии с требованиями нормативных документов радиационная стойкость (РС) современных полупроводниковых приборов и ИС (микропроцессоров, ПЛИС, ЦАП, АЦП и т.д.) должна определяться по наиболее чувствительным к воздействию ИИ параметрам в критических режимах работы изделий при заданном диапазоне температур окружающей среды. Решение подобных задач с использованием только мощных моделирующих установок (МУ) не представляется возможным ввиду значительных временных и материальных затрат. Результаты исследований, проведенных в последнее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФГУП НИИП и других организациях [1], показали, что оптимальное сочетание малогабаритных высокопроизводительных ускорителей типа АРСА и мощных МУ позволит существенно уменьшить сроки и затраты на проведение радиационных испытаний, повысить достоверность и информативность получаемых результатов.

Не менее важным направлением использования малогабаритных высокопроизводительных установок в испытаниях изделий электронной техники представляется применение ускорителей типа АРСА для оперативного контроля ионизационного отклика ИМС в процессе их технологической разработки и производства в составе рабочего места в испытательных центрах системы Военэлектронсерт. В отличие от имитационных методов испытаний ИМС с использованием лазерного излучения применение ускорителя АРСА позволит приблизить условия технологического контроля к реальным условиям [2].

АРСА – это малогабаритный импульсный ускоритель электронов прямого действия с масляной изоляцией [3], см. рисунок 1.

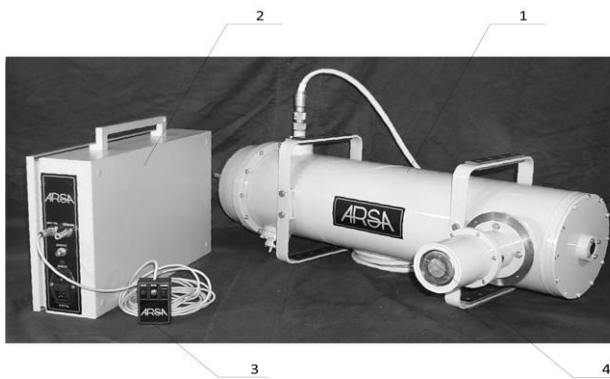


Рис. 1. Малогабаритный импульсный ускоритель АРСА

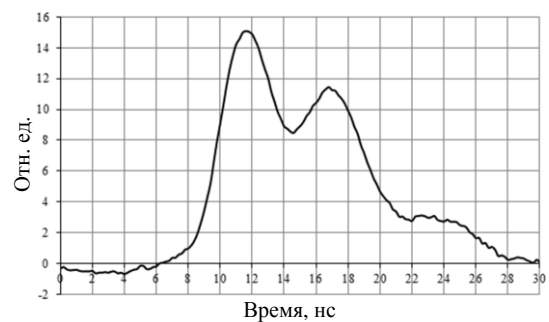


Рис. 2. Форма рентгеновского импульса ускорителя АРСА

Он состоит из высоковольтного блока 1 с ускорительной трубкой 4, расположенной в герметичном корпусе, зарядного устройства 2 и пульта управления 3. Особенностью использованного в ускорителе десятикаскадного генератора Маркса является импульсная зарядка накопительных конденсаторов. Коммутация тока в каскадах осуществляется при помощи металлокерамических разрядников высокого давления [4].

Радиационностойкая микроэлектроника

Отпаянная ускорительная трубка с прострельной мишенью представляет собой вакуумный диод с взрывоэмиссионным катодом и титановым анодом. Анод толщиной 50 мкм является выходным окном для пучка электронов. Для генерации тормозного излучения на наружную поверхность окна трубки устанавливается мишень из танталовой фольги толщиной 50 мкм и фильтр из алюминия толщиной 2 мм для поглощения электронов, прошедших окно и мишень. Катод лезвийного типа диаметром 10 мм обеспечивает однородное пятно излучения.

Доза тормозного излучения измерялась термолюминесцентными детекторами ПСТ на основе стекла ИС-7 в стандартных контейнерах. Измерения проводились по методу дозиметрии ИКС с помощью стандартных детекторов для экспериментальных работ и измерительного прибора – дозиметра гамма-излучения ИКС-А. Диапазон регистрируемых доз от 0,5 до 10^3 Р, при этом погрешность измерений не превышала $\pm 20\%$ при доверительной вероятности $p=0,95$.

Поглощенная доза электронного излучения с погрешностью 12-15 % измерялась аттестованными полимерными пленочными дозиметрами типа СО ПД(Ф)Р-5/50.

Временные характеристики импульсов тормозного излучения ускорителя АРСА (длительность импульса излучения на полувысоте амплитуды) измерялись с помощью детектора СППД11-04 (чувствительность – $1,5 \cdot 10^{-17}$ Кл·см²/квант в диапазоне энергий гамма-квантов от 0,06 до 10 МэВ).

Для регистрации сигналов с детектора использовался осциллограф Tektronix TDS 3032В. Рентгеновский импульс ускорителя АРСА приведен на рисунке 2.

На рисунках 3 и 4 представлены измеренные в эксперименте радиационные поля ускорителя АРСА в виде поверхностей равной дозы в воздухе.

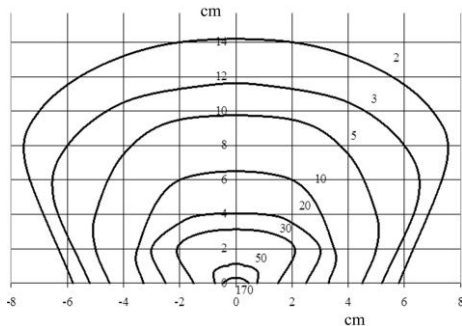


Рис. 3. Поверхности равной дозы (сГр/имп.) рентгеновского излучения ускорителя АРСА

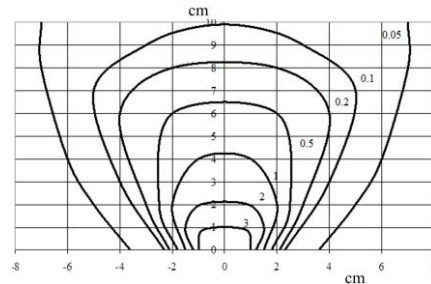


Рис. 4. Поверхности равной дозы (кГр/имп.) электронного излучения ускорителя АРСА

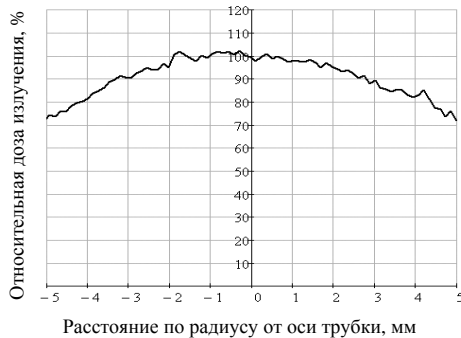


Рис. 5. Распределение дозы рентгеновского излучения на окне трубки ускорителя АРСА



Рис. 6. Волоконно-оптический монитор-дозиметр, совмещенный с пультом управления ускорителя АРСА

Регистрация рентгеновского пятна ускорительной трубки производилась на измерительном стенде, содержащем сцинтиллирующий экран, перископ и цифровую фотокамеру, подключенную к персональному компьютеру. Экран располагался непосредственно на окне трубки и обеспечивал линейное преобразование дозы излучения в видимый свет, интенсивность которого регистрировалась фотокамерой. Распределение дозы по пятну (структура пятна) определялось путем компьютерной обработки полученных изображений пятна при помощи программы обработки изображений и программы математических вычислений Mathcad 14. Распределение дозы рентгеновского излучения на окне трубки приведено на рисунке 5.

Измерения показали, что уменьшение дозы рентгеновского излучения на краях области диаметром 10 мм не превышает 28% от ее максимального значения.

Для оперативного контроля дозы малогабаритных импульсных ускорителей типа АРСА разработан волоконно-оптический монитор–дозиметр (МД) [5], см. рисунок 6. Он конструктивно объединён и используется совместно с пультом управления ускорителем. Для МД предусмотрена также возможность автономной работы в режиме контроля дозы.

МД представляет собой комбинированное устройство, включающее:

- волоконно-оптический импульсный измеритель дозы рентгеновского излучения;
- счётчик количества импульсов с энергонезависимой памятью для контроля ресурса установки;
- устройство запоминания значений дозы для каждого импульса;
- сумматор дозы импульсов в серии;
- порт для считывания накопленных данных в компьютер.

Волоконно-оптический импульсный дозиметр имеет ряд преимуществ:

- мгновенное получение результата измерений по сравнению с термолюминесцентным дозиметром;
- высокую помехоустойчивость, малую деградацию детектора по сравнению с измерителями на основе полупроводниковых диодов;

Детектором излучения в устройстве является «точечный» сцинтиллятор CsI(Tl) сечением около 1 мм². Передача света от детектора к фотоприёмнику осуществляется по пластмассовому оптоволокну диаметром 1 мм. В качестве фотоприёмника используется рpн-фотодиод. Особенностью конструкции МД является неразъёмная сборка «сцинтиллятор-оптоволокну-фотоприёмник», что повышает стабильность измерений по сравнению с разъёмной.

Исследовалась зависимость показаний МД от дозы рентгеновского излучения ускорителя АРСА. Из рисунка 7 видно, что полученная зависимость является линейной и может использоваться для градуировки шкалы МД в сГр.

С целью мониторингирования формы рентгеновских импульсов длительностью от единиц наносекунд в составе комплекта МД имеется быстродействующий волоконно-оптический сцинтилляционный детектор. Детектор обладает повышенной помехоустойчивостью к электромагнитным наводкам от импульсных физустановок и не требует применения высоковольтных источников питания. Он содержит субнаносекундный сцинтиллятор СПС-Б18 [6] с диаметром и высотой 50 мм, сдвоенный пластмассовый волоконно-оптический кабель с диаметром жил 1 мм, рpн-фотодиоды типа ФД-271 и субнаносекундный усилитель на GaAs-полевых транзисторах. «Черенковская» наводка на кабель, доходящая до 16% от полезного сцинтилляционного светового сигнала, регистрируется отдельно при помощи параллельного волоконно-оптического канала (без сцинтиллятора) и вычитается из детектируемого сигнала на входе усилителя. Выход усилителя подключается к регистратору. Осциллограмма рентгеновского импульса ускорителя АРСА, зарегистрированная на осциллографе LeCroy Wavemaster-8500А при помощи волоконно-оптического детектора, приведена на рисунке 8.

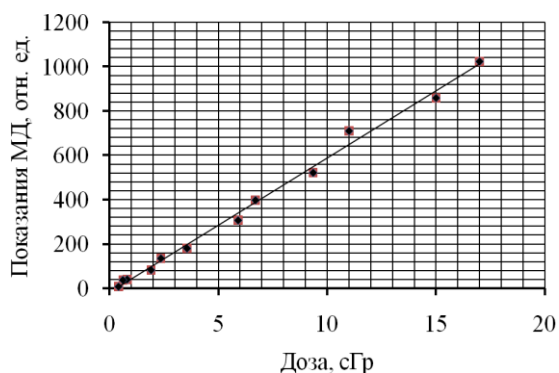


Рис. 7. Зависимость показаний МД от дозы рентгеновского излучения ускорителя АРСА

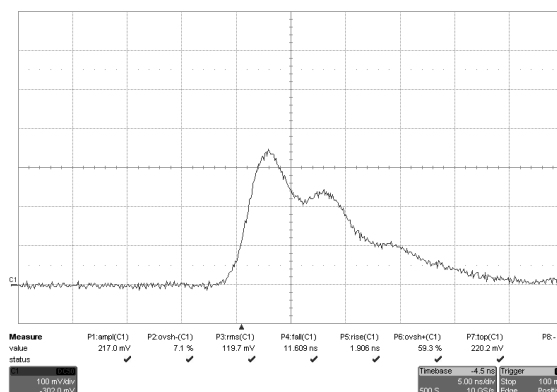


Рис. 8. Форма рентгеновского импульса ускорителя АРСА, зарегистрированная при помощи волоконно-оптического сцинтилляционного детектора

По данным работы [7] радиационная стойкость оптоволокну достаточна для долговременной работы МД и детектора формы импульса в условиях совместной работы с ускорителем АРСА.

Энергетические спектры и энерговыделение в облучаемых объектах рассчитывались методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА [7]. Исходными данными для расчета служили осциллограмма тока и спектр электронов, падающих на мишень трубки, измеренный с помощью полукругового магнитного спектрометра [8]. Ток электронов измерялся с помощью цилиндра Фарадея и малоиндуктивного шунта.

Рисунки 9 и 10 демонстрируют типичные расчетные спектры электронного и рентгеновского излучения ускорителя АРСА.

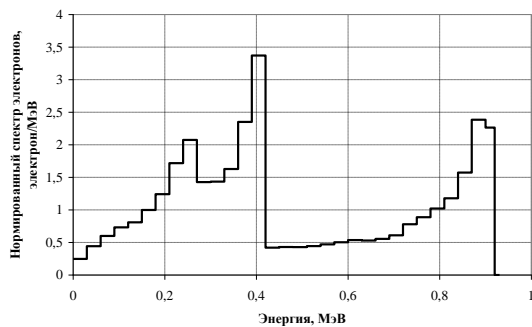


Рис. 9. Спектр электронного излучения ускорителя АРСА за выходным окном трубки

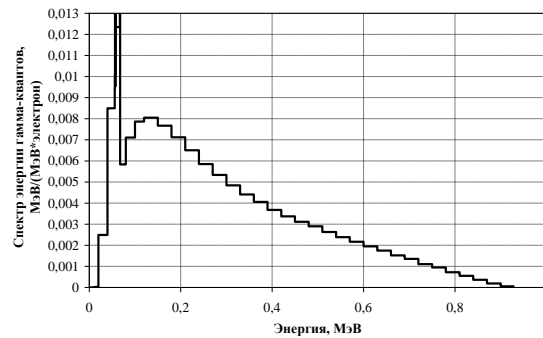


Рис. 10. Энергетический спектр рентгеновского излучения ускорителя АРСА

Результаты расчетов энерговыделения в термолюминесцентных детекторах и пленочных дозиметрах хорошо согласуются с результатами дозиметрических измерений.

Экспериментальное и расчетно-теоретическое обоснования амплитудно-временных и спектральных характеристик излучения ускорителя АРСА позволяют проводить расчетные оценки реакции элементов ИМС с использованием современных 2D и 3D методик Монте-Карло по совместному переносу тормозного и электронного излучений в геометрии реальной топологии ИМС.

Многолетний опыт эксплуатации ускорителей АРСА выявил ряд их преимуществ по отношению к другим подобным устройствам:

- высокая мощность дозы (до $5 \cdot 10^{10}$ Р/с для рентгеновского излучения и до $1 \cdot 10^{14}$ Р/с для электронного излучения),
- компактность и мобильность,
- простота эксплуатации и технического обслуживания,
- хорошая воспроизводимость дозовых характеристик ($\pm 10\%$),
- расчет распределения поглощенной дозы в облучаемом объекте,
- варьирование типа и параметров излучения путем замены отпаянной трубки,
- высокий ресурс – до 10^5 пусков,
- интенсивность работы – сотни пусков в день,
- электромагнитная совместимость с электронной аппаратурой (уровень электромагнитных помех на сигнальные кабели без специальных мер экранирования – не более 0,2 В).

Литература

1. Членов А.М., Мордасов Н.Г., Иващенко Д.М. Направление развития экспериментальной базы по моделированию импульсного гамма-излучения в технологии радиационных испытаний. Вопросы атомной науки и техники. Выпуск 1, с. 5-10, 2010.
2. Эльяш С.Л., Профе Л.П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативного контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию импульсного ионизирующего излучения, ВАНТ Физика радиационного воздействия Выпуск 3, с.132-136, 2002
3. Эльяш С.Л., Калиновская Н.И., Гончарова В.Ф., Королев В.Н., Пухов С.П., Моренко С.А., Авилов Э.А., Юрьев А.Л.. Малогабаритный импульсный ускоритель электронов АРСА для радиационных исследований. Доклад на 7-ой международной конференции по электронно-пучковым технологиям ЕВТ 2003 (Болгария, Варна, 1-6 июня 2003). Труды конференции ЕВТ, с.591, 2003.
4. Авилов Э.А., Юрьев А.Л. Газонаполненные металлокерамические разрядники высокого давления // ПТЭ, № 2, с. 78, 2000.
5. Патент РФ на полезную модель № 90575 «Волоконно-оптический дозиметр» от 31.08.2009. Авторы: Эльяш С.Л., Родигин А.В., Пикарь В.А.
6. T. Zoufal 1, K. Wick. The damaging process in irradiated light guides and scintillating fibers.// Nucl. Phys. B 208 (2003) 471-475, 2003.
7. Донской Е.Н. Методика и программа ЭЛИЗА для решения задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. Выпуск 1. с.25, 1993.
8. Моренко С.А., Пухов С.П., Эльяш С.Л. Магнитный спектрометр для оперативного измерения спектра импульсных пучков электронов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Выпуск 3-4, с.91-93, 2007.

**SMALL-SIZE HIGH-PERFORMANCE ACCELERATORS ARSA:
ON-LINE TESTING OF ECB FOR RADIATION HARDNESS**

S.L. Elyash, S.P. Pukhov, A.V. Rodigin, A.L. Yuryev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

A small-size high-performance pulsed accelerator ARSA with the voltage up to 1.3MeV is developed. The accelerator is distinguished for stability of characteristics (spread no more than $\pm 10\%$), high dose rate of bremsstrahlung (up to $1.5 \cdot 10^{10}$ R/s in a spot 1 cm in diameter), potentiality of intense operation (hundreds of shots a day), electro-magnetic compatibility with radio electronics.

There is developed a fiber-optic monitor-dosimeter functionally connected with ARSA control panel ensuring pulse measurement of bremsstrahlung, accumulation of the prescribed dose, reading of data to the computer. To monitor the shape of bremsstrahlung pulses a separate channel is provided.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ
НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Панченко А.Н., Копкин А.Ю., Тетеревков А.В.

Российский Федеральный Ядерный Центр -Всероссийский НИИ экспериментальной физики

Исследования влияния длительности наносекундного импульса ионизирующего излучения на некоторые показатели радиационной стойкости (ПРС) КМОП микросхем на объемном кремнии проводились в рамках создания автоматизированного рабочего места (АРМ) на основе малогабаритных импульсных ускорителей (МИУ) АРСА [1], АРГУМЕНТ-1000 [2] и программно-аппаратной измерительной системы (ПАИС). Измерения типовых ПРС были проведены с применением современного оборудования фирмы National Instruments и Tektronix, для которого было разработано специализированное программное обеспечение с применением среды программирования LabVIEW 2010 [3].

В большинстве микросхем на объемном кремнии время жизни свободных носителей в подложке составляет $\tau_0=0,5...10$ мкс [4]. Длительность импульса тормозного излучения (ТИ) ускорителя АРСА – $t^{0.5}=8$ нс, длительность импульса ТИ ускорителя АРГУМЕНТ-1000 – $t^{0.5}=1,5$ нс. Поэтому следует ожидать, что при воздействии импульсов ТИ с длительностью гораздо меньшей времени жизни неравновесных носителей показатели радиационной стойкости КМОП микросхем, определяемые ионизацией подложки, будут слабо зависеть от длительности импульса ТИ.

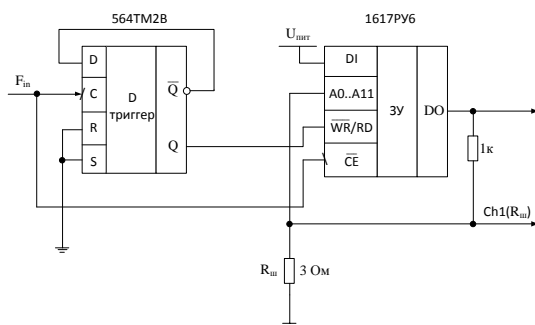
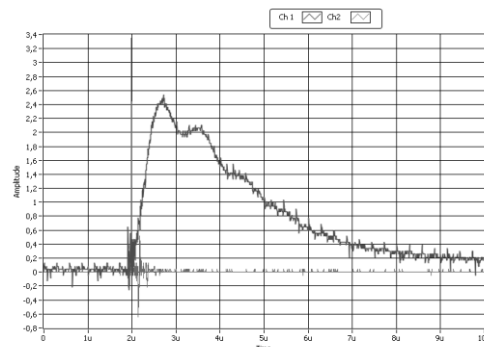


Рис. 1. Схема включения ИМС 1617PY6 при измерении импульсного ионизационного тока потребления I_{cc}



Ch1 – напряжение на $R_{ш}$; Ch2 – синхроимпульс. $D=397$ P; $\Delta I_{cc \text{ макс}}=800$ мА; развертка 1 мкс/дел

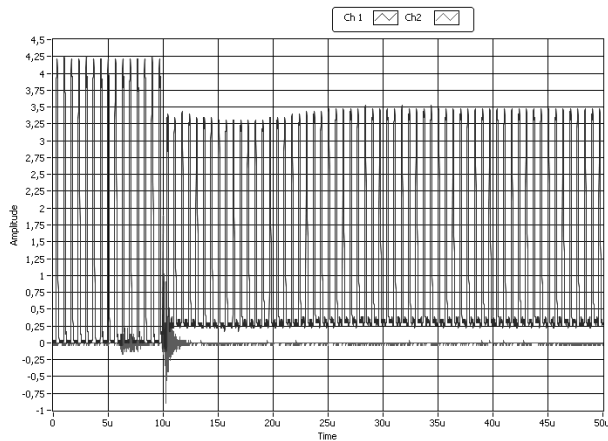
Рис. 2. Осциллограмма импульса тока потребления ИМС 1617PY6 при воздействии ТИ ускорителя АРСА

Для подтверждения этого предположения были проведены измерения импульсного ионизационного тока потребления, уровня возникновения тиристорного эффекта (ТЭ), уровня бессбойной работы (УБР) и времени потери работоспособности (ВПР) КМОП микросхем на объемном кремнии при воздействии импульсов ТИ МИУ АРСА, АРГУМЕНТ-1000. В измерениях были использованы инвертор 564ЛН1, D-триггер 564ТМ2В, ОЗУ 537PY6 и 1617PY6. Для дозиметрии ТИ использовались термолюминесцентные детекторы ИС-7 метода ИКС [5].

Радиационстойкая микроэлектроника

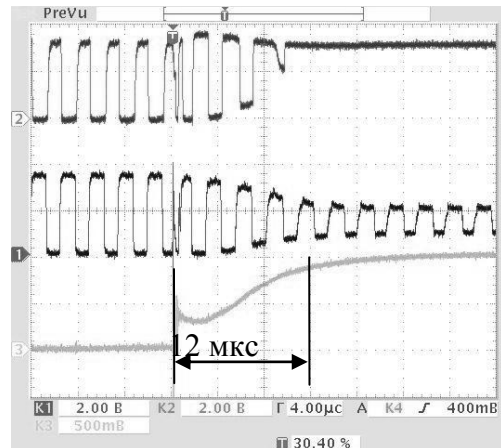
При измерении импульсного ионизационного тока потребления микросхема 1617РУ6 функционировала в динамическом режиме записи и считывания данных. Схема включения ИМС 1617РУ6 представлена на рисунке 1. Характерная осциллограмма импульса напряжения, возникающего на сопротивлении шунта $R_{ш}$ при воздействии импульса ТИ, изображена на рисунке 2.

В экспериментах по определению уровня ТЭ микросхемы 537РУ6 и 564ЛН1 находились в динамическом режиме. Схема включения ИМС 537РУ6 аналогична схеме, представленной на рисунке 1. Инверторы, содержащиеся в ИМС 564ЛН1, были включены последовательно. На рисунках 3 и 4 представлены осциллограммы выходных сигналов ИМС 537РУ6 и 564ЛН1 при возникновении ТЭ после воздействия ТИ ускорителей АРСА и Аргумент-1000.



ОЗУ 537РУ6, Ch1 — выход данных;
Ch2 — импульс синхронизации, $D=78 P$

Рис. 3. ТЭ при воздействии ТИ ускорителя АРГУМЕНТ-1000



Инвертор 564ЛН1; K1—выход Q_2 , K2 — выход Q_4 ; K3 — ток потребления; $D=44 P$

Рис. 4. ТЭ при воздействии ТИ ускорителя АРСА

В эксперименте определения ВПР КМОП микросхема 1617РУ6 находилась в динамическом режиме. На рисунке 5 приведена характерная осциллограмма выходного сигнала ИМС 1617РУ6 при временной потере работоспособности, вызванной действием ТИ.

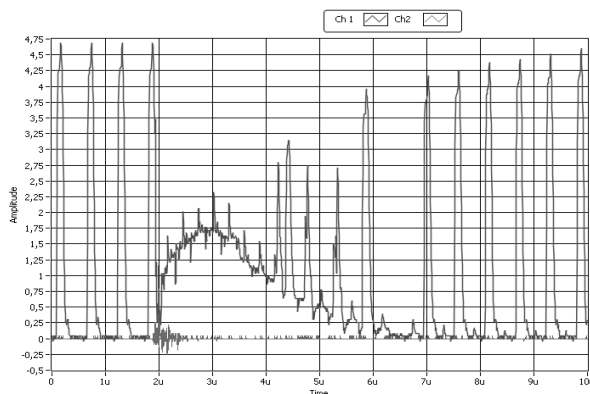


Рис. 5. Временная потеря работоспособности ИМС 1617РУ6 при воздействии ТИ ускорителя АРСА, $D=420 P$, $t_{впр}=5 мкс$, развертка 1 мкс/дел

Для измерения УБР D_1 -триггера 564ТМ2В на его основе был создан двухразрядный синхронный счетчик. На рисунках 6 и 7 представлены осциллограммы выходного напряжения счетчика при воздействии импульса ТИ.

На рисунке 7 зарегистрировано сбой-переключение счетчика в другое, предпочтительное, логическое состояние. Предпочтительное состояние — это состояние, которое триггер стремится занять после дестабилизирующего воздействия, превышающего значение УБР. Для счетчика, состоящего из двух D -триггеров, предпочтительным состоянием оказался «0».

Для оценки возможного влияния длительности импульса ТИ МИУ АРСА и АРГУМЕНТ-1000 на результаты испытаний стойкости ИМС на рисунках 10, 11 построены зависимости ВПР и максимального тока потребления ОЗУ 1617РУ6 от дозы, а в таблице 1 приведены результаты измерения УБР и уровни ТЭ.

Радиационностойкая микроэлектроника

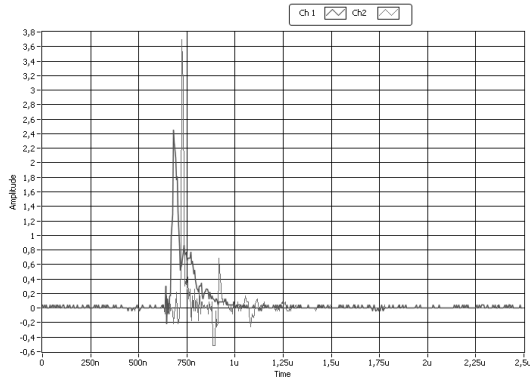


Рис. 6. Реакция счетчика при воздействии импульса ТИ ускорителя АРСА. D=415 P, развертка 250 нс/дел, исходное состояние D₁-триггера «0», сбоя нет

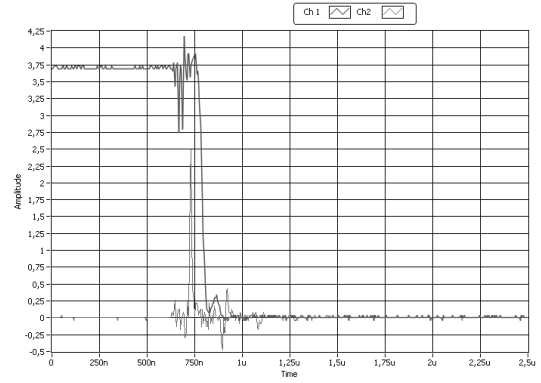


Рис. 7. Сбой счетчика при воздействии импульса ТИ ускорителя АРСА. D=105 P, развертка 250 нс/дел, исходное состояние D₁-триггера «1»

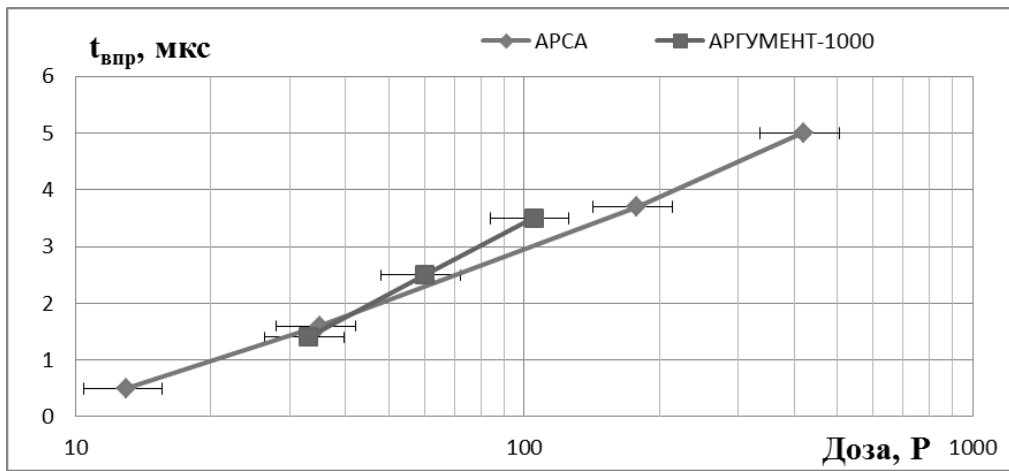


Рис. 8. Зависимость ВПР ОЗУ 1617РУ6 от дозы

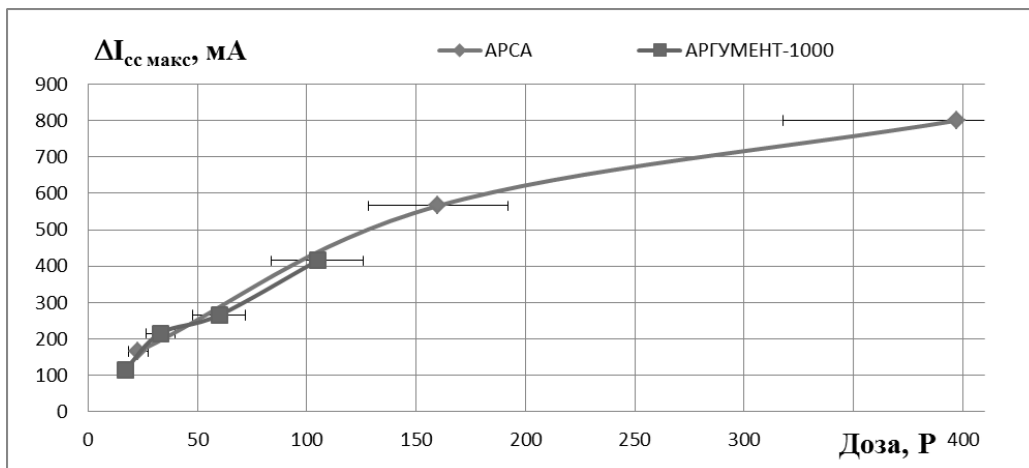


Рис. 9. Зависимости ΔI_{сс макс} от дозы

Таблица 1. Результаты измерения УБР и уровня ТЭ КМОП микросхем 564ТМ2В, 537РУ6 и 564ЛН1

№	Исследуемая ИМС	ПРС	Доза, P	
			АРСА	АРГУМЕНТ-1000
1	564ТМ2В	УБР	80	100
2	537РУ6	ТЭ	12	9,4
3	564ЛН1	ТЭ	23	28

ВПР микросхемы 1617РУ6 монотонно возрастает с увеличением дозы в соответствие с хорошо известной логарифмической зависимостью $\ln(D)$.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что ВПР, ток потребления, УБР, уровень ТЭ, измеренные при воздействии ТИ МИУ АРСА, АРГУМЕНТ-1000, имеют совсем небольшие отличия, укладывающиеся в погрешность дозиметрии 20%. Это означает, что эти показатели стойкости не зависят от длительности и мощности дозы импульса ТИ и определяются дозой, которая остается неизменной в исследованном диапазоне длительностей (1.5÷8)нс. Такая закономерность полностью согласуется с результатами измерений длительности ионизационной реакции КМОП микросхем, которая оказалась значительно больше, чем длительность импульсов ТИ. Так, на осциллограмме, представленной на рисунке 2, длительность импульса ионизационного тока на полувысоте составляет ~3 мкс. Характерное время формирования ТЭ ~12 мкс, рисунок 4. Время потери работоспособности ~5мкс, рисунок 5.

Различие длительностей импульсов ТИ ускорителей АРСА и АРГУМЕНТ-1000 не оказывают влияния на определение показателей радиационной стойкости микросхем на объемном кремнии.

Литература

1 Эльяш С.Л., Профе Л.П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативного контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию импульсного ионизирующего излучения. // ВАНТ Физика радиационного воздействия на РЭА, выпуск 3, 2002г – С.132-136.

2 Завьялов Н.В., Канунов И.М., Полиенко Г.А., Хорошайло Е.С. Переносные импульсные рентгеновские аппараты “Аргумент-700” и “Аргумент-1000” с газовой изоляцией высоковольтных блоков // ISBN 5-9515-000-2 Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. – Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, выпуск 10, 2005. С. 80–87.

3 Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

4 Никифоров А.Ю. и др. Радиационные эффекты в КМОП ИС/ А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 1994. – С. 125.

5 Бочвар И.А., Гимадова Т.И., Кеирим-Маркус и др. Метод дозиметрии ИКС – Москва: Атомиздат, 1977.-221 с.

Панченко Алексей Николаевич, e-mail: panchenko@expd.vniief.ru

EXPLORATIONS OF THE WIDTH OF THE NANoseconds EMISSION IMPULSES UP TO THE RESISTANCE OF THE RADIATION INDEXES OF THE INTEGRAL MICROCIRCUITS

A.N. Panchenko, A.U. Kopkin, A.V. Teterevkov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

The width of the deceleration emission (DE) impulses up to the results of the radiation indexes of the integral microcircuits at the solid silicon in 1.5÷8 ns range was explored. It is shown, that radiation indexes like continuous work level, the level of thyristor consumption appearance, impulsive ionization current consumption of CMOS microcircuits at the solid silicon do not depend on the width and dose rate DE and they are determined by the non-changeable in the explored range dose. Differences in the widths of the accelerators ARSA and Argument-1000 do not influence the results of the radiation experiments of the microcircuits at the solid silicon.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ТИПА БМК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕАКТОРА

Тетеревков А.В., Панченко А.Н., Пикарь В.А.

Российский Федеральный Ядерный Центр -Всероссийский НИИ экспериментальной физики

Широкая номенклатура изделий ЭКБ, и особенно, БИС и СБИС, отличающихся схмотехническим построением и функциональным назначением, а также требования повышения информативности и сокращения сроков проведения радиационных испытаний, определяют необходимость их автоматизации. С этой целью на ряде моделирующих установок разработаны и смонтированы автоматизированные рабочие места (АРМ) (рисунок 1) на базе оборудования National Instruments. АРМ обеспечивает

Радиационностойкая микроэлектроника

генерацию и передачу на исследуемый объект заданной программным путём последовательности управляющих сигналов, осуществляет прием информации от объекта испытаний, сохранение и анализ большого числа цифровых и аналоговых сигналов. Тестирует и конфигурирует измерительные каналы перед экспериментом, визуализирует регистрируемые сигналы на экране монитора и записывает данные в файл непосредственно во время проведения эксперимента. Реализует возможность дистанционного доступа к измерительному и управляющему оборудованию.

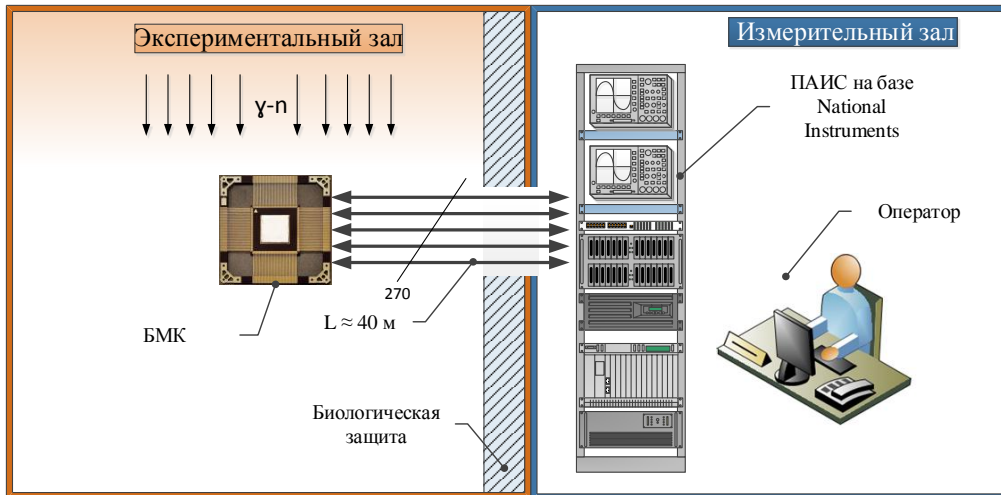


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного рабочего места

В большинстве случаев функциональных возможностей имеющихся АРМ достаточно для проведения испытаний различных типов изделий ЭКБ, но бывают исключения. Так в 2014 году для проведения радиационных испытаний поступил базовый матричный кристалл (БМК) производства ФГУП "ФНПЦ НИИИС". Особенности его функционирования не позволяют провести радиационные испытания в стандартном режиме, поскольку для анализа его функционирования необходимо использовать 270 линий связи, произвести функциональный контроль по 25-ти тестам, каждый из которых содержит более миллиона строк векторной последовательности, а так же задания высокой тактовой частоты при условии, что длина линий связи достигает 40 м. Возможности ранее разработанных АРМ не достаточны для выполнения данных условий.

В рамках данной работы проведены исследования, направленные на расширения возможностей созданного АРМ, отработку схем тестирования БМК по длинной линии связи, а так же создания универсального ПО для тестирования сложнофункциональные микросхемы класса БМК.

Для автоматизации и повышения информативности испытаний радиационной стойкости БИС, СБИС [1] и других ЭКБ на установках разработано специализированное многоканальное АРМ, в состав которого входит программно-аппаратная измерительная система (ПАИС).

В основу ПАИС заложен высокопроизводительный контроллер. Каждый функциональный блок реализует требуемую функцию (АЦП, ЦАП, цифровой ввод/вывод, модуль ПЛИС и т.д.). Обмен данными между функциональными блоками и контроллером производится по высокоскоростной параллельной шине. Дополнительные интерфейсы в контроллере обеспечивают возможности расширения измерительной системы через подключение внешних устройств.

АРМ задаёт режим функционирования микросхемы, проводит тестирование, измеряет критериальные параметры, сохраняет полученные результаты в файл для последующей обработки и внесения в протокол. Рабочее место оператора позволяет в реальном времени оценивать состояние микросхемы и при необходимости вносить коррективы.

ПАИС размещается в стойке находящейся в измерительной комнате и соединяется с объектом испытаний, находящимся в облучательном зале, с помощью проложенных кабелей длиной 25 и 40 метров.

Критериальными параметрами для оценки работоспособности исследуемого БМК являются: динамический ток потребления, выходное напряжение логического «нуля» и «единицы». Также, работоспособность БМК оценивалось по результатам проведения функционального контроля. Для этого разработчиками были представлены 25 тестов, каждый из которых содержал более миллиона строк.

Разработанная схема измерений обеспечивает проведение постоянного функционального контроля образца БМК и измерение критериальных параметров в течение всего сеанса облучения.

Контрольно-измерительная аппаратура построена на модульном измерительном оборудовании компании National Instruments, что позволило на базе существующих АРМ создать ПАИС с

необходимыми характеристиками. В состав оборудования входят: программируемый источник питания NI PXI-4110 и шесть цифровых генераторов – анализаторов NI PXIe-6556 с возможностью измерения напряжения «на выводе». Оборудование размещено в восемнадцатислововом шасси NI PXIe-1085. Источник NI PXI-4110 питает исследуемый образец и с высокой частотой (порядка 1 кГц) измеряет ток потребления. Генераторы – анализаторы NI PXIe-6556 воспроизводит тестовые последовательности на БМК, регистрирует ответные сигналы и сравнивает с эталоном. Также, NI PXIe-6556 реализуют функцию измерения уровней логических «нуля» и «единицы». У одного образца БМК 240 выводов. Из них 58 применяются для электропитания. 133 вывода используются для функционального тестирования. Остальные 49 выводов не задействованы.

Один генератор – анализатор NI PXIe-6556 содержит 24 канала ввода-вывода данных. Для обеспечения полного функционального тестирования БМК необходимо использовать не менее 6-ти таких генераторов. При этом всё контрольно-измерительное оборудование должно работать синхронно. Для удовлетворения условий синхронизации подходит шасси NI PXIe-1085 в которое можно установить источник питания и генераторы-анализаторы. Шасси NI PXIe-1085 обеспечивает 100 МГц шину синхронизации между модулями и возможность установки до 8-ми генераторов-анализаторов одновременно.

Проведения длительных испытаний БМК, подразумевает постоянный функциональный контроль и измерение критериальных параметров на всё протяжении эксперимента. Для исследуемого макетного образца БМК необходимо получить как можно больше информации, по результатам испытаний, для внесения изменения в следующие модели микросхемы. ПО для автоматизированного управления и контроля позволяет безостановочно проводить измерения, сохранять результаты и исключить человеческий фактор. Программное обеспечение разработано в среде LabView [2,3] и выполняет следующие функции: загрузка hws файлов в память генераторов; настройка, запуск и управление процессом тестирования; регистрация отказов и подсчёт количества ошибок; считывание данных об уровнях «нуля» и «единицы» и тока потребления; парирование падения напряжения питания на линиях связи; сохранение полученных в процессе эксперимента данных в файл.

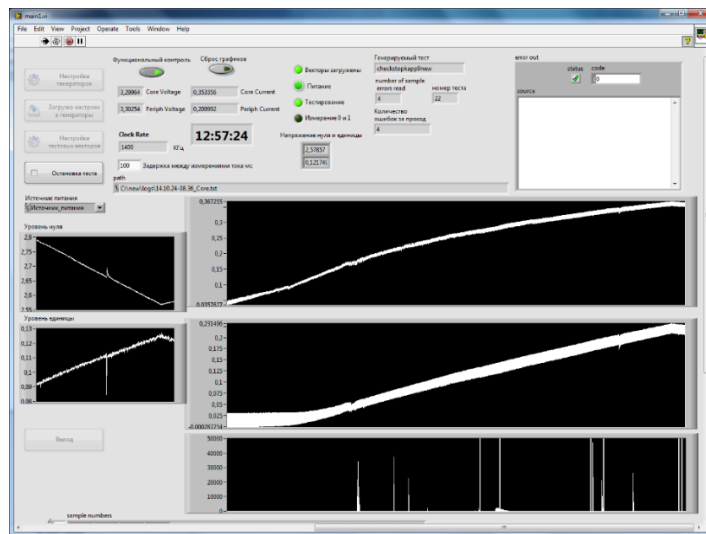


Рис. 2. Внешний вид главного окна управляющей программы

С помощью разработанной ПАИС произведены испытания нескольких макетных образцов БМК. Типовые зависимости критериальных параметров от времени облучения представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приведена зависимость динамического тока потребления БМК от времени облучения для образцов №1 и №2. У образца №2 во время эксперимента наблюдалось постепенное возрастание тока потребления и выход за установленные пределы.

На рисунке 4 приведена зависимость возникновения ошибок при функциональном тестировании БМК образец №2 от времени облучения. Название графика соответствует тесту, в котором возникла ошибка.

Разработанная ПАИС выполняет следующие функции в автоматизированном режиме: генерация управляющих векторов, считывание ответных сигналов с БМК и сравнение с эталонными; измерение уровней логических «нуля» и «единицы»; измерение динамического тока потребления отдельно для каждого теста; парирование падения напряжения на линиях связи. Проведённые испытания макетных образцов БМК показали возможность использования ПАИС для испытаний сложнофункциональных микросхем типа БМК.

Радиационнстойкая микроэлектроника

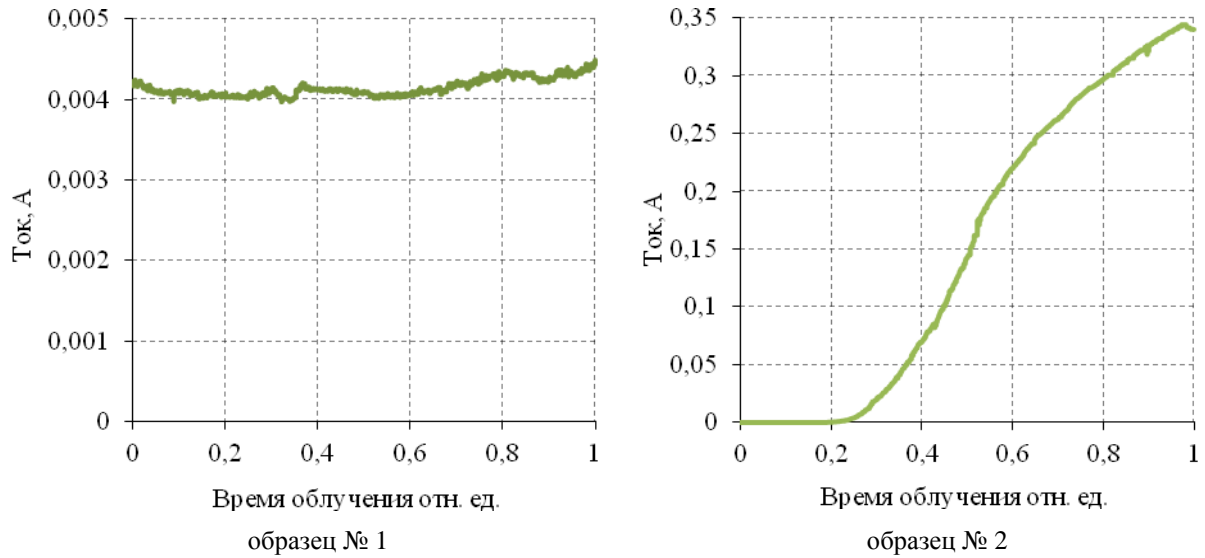


Рис. 3. Зависимость динамического тока потребления БМК от времени облучения

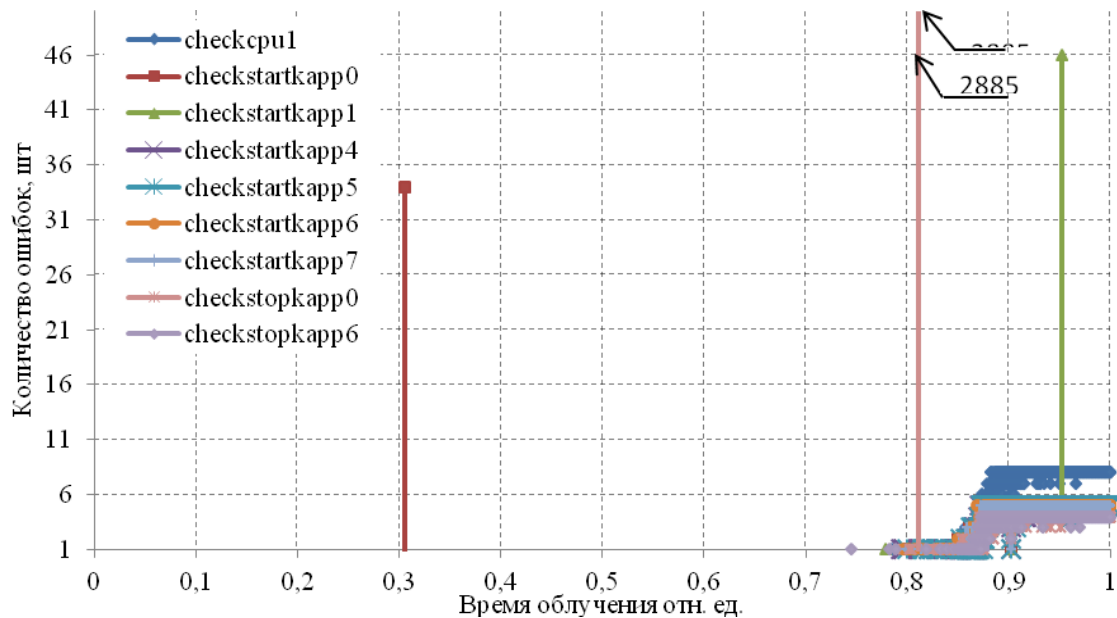


Рис. 4. Зависимость возникновения ошибок во время функционального тестирования БМК образец № 2 от времени облучения

Литература

- 1 Лысенков С.В., Осадчий А.Б., Платунов В.Н. Методический подход при исследовании многозарядных БИС на моделирующих установках // IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006г. – С.110-123.
- 2 Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Каратаева В.В. и др. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 – ДМК пресс, 2005. -264с.
- 3 Федосова В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW – ДМК Пресс, 2007. -456с.

**HARDWARE-SOFTWARE MEASURING SYSTEM FOR TESTING
OF COMPLEX FUNCTION MICROCIRCUITS OF FPGA TYPE
ON EXPOSURE TO STATIC REACTOR RADIATION**

A.V. Teterevko, A.N. Panchenko, V.A. Pikar

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

This work presents development results for hardware-software measuring system (HSMS) to register criterion parameters of digital microcircuits of FPGA type on exposure to static reactor radiation. HSMS has been developed on the basis of National Instruments' technologies. The hardware complex comprises a power source and several digital analyzer generators. A developed speciality application-dependent software, permits a hands-off functional check; registering of logical «0» and «1» levels and dynamic current consumption (summed current and individually by each test).

The developed hardware-software complex allows employment of tests in avc format of the sum length up to 64 Mbit per channel, it compensates a voltage drop on feed lines in the automatic mode, provides a remote operation at a distance from the microcircuit up to 40 m.

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Оптоэлектроника, в том числе оптоэлектронные приборы на гетероструктурах, гетероструктурная СВЧ-электроника, акустоэлектроника, волоконная оптика, фотоника, спинтроника, фрактальные радиоэлементы, пассивная элементная база: устройства и материалы, в том числе магнитные материалы и метаматериалы. Квантовые компьютеры.

**ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ НА ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Цымбал В.С.¹, к. т. н. Залесский В.Б.², Солодуха В.А.¹, Шведов С.В.¹

¹ ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск

² Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ

В последние годы ОАО «ИНТЕГРАЛ» ведет активный поиск новых перспективных направлений развития. Одно из этих направлений - разработка и изготовление изделий фото- и оптоэлектроники и технологических процессов для их изготовления. К настоящему времени в объединении разработаны и выпускаются кремниевые фотодиоды, включая ЛФД и Si-ФЭУ, а также ИМС для управления различными исполнительными устройствами со встроенными фотодиодами. Для спутников дистанционного зондирования Земли разработаны матричные ПЗС с режимом временной задержки и накопления зарядов (ВЗН) и фокальные плоскости космических телескопов на основе многокристалльных сборок из этих ПЗС. Разработаны и изготавливаются ряд СБИС матричных аналоговых мультиплексоров для микроболометров и для охлаждаемых приемников, на основе которых российские партнеры разрабатывают целую гамму устройств тепловизионной техники широкого применения.

Кремниевые фотодиоды

В ОАО «ИНТЕГРАЛ» в последние годы разработан ряд конструкций кремниевых фотодиодов на основе базовых КМОП и биполярных процессов с просветляющим покрытием на основе пленок нитрида кремния. Разработанные фотодиоды имеют высокую чувствительность в диапазоне длин волн от 400 до 1100 нм. Максимум спектральной чувствительности на длине волны 850÷860 нм имеет значение 0,5÷0,6 А/Вт. Кристаллы фотодиодов имеют низкие уровни темновых токов ($10\div 100$ рА), малую емкость р-п перехода. Разработанные фотодиоды могут отгружаться потребителю как корпусированные, так и в бескорпусном варианте. Основное применение разработанные фотодиоды находят в многокристалльных фотодиодных сборках (с присоединенным к каждому фотодиоду скинтиллятором) для рентгеновских сканеров контроля багажа, грузов и т.п.

В медицинской технике, в технике оптической связи, в лазерных дальномерах и других сферах находят применение лавинные фотодиоды (ЛФД). Так как в последние годы на пространстве СНГ сократились предложения по поставкам ЛФД, то в ОАО «ИНТЕГРАЛ» разработана конструкция и технология их изготовления. Разработанные ЛФД имеют диаметр фоточувствительной области 200/500/1200 мкм, собираются в корпус КТ-1. Типовой коэффициент умножения ЛФД $M=100$, диапазон спектральной чувствительности от 400 до 1000 нм, максимум спектральной чувствительности 850 нм, светочувствительность при $M=1$ составляет 0,45 А/Вт, при $M=100$ 45А/Вт, диапазон рабочих напряжений 250-380 В.

В последнее время широкое применение находят применение ЛФД, работающие в гейгеровском режиме. при котором ЛФД работает в запробойных полях и осуществляются измерения количества и амплитуды темновых и световых импульсов за определённый период времени (метод счёта фотонов). За счет внутреннего усиления лавинные детекторы обладают высоким отношением сигнала к шуму и поэтому могут быть использованы для регистрации малых интенсивностей света. В режиме Гейгера устройство может вызывать более сильный лавинный процесс с усилением сигнала более чем в 10^5 раз. Для работы ЛФД в режиме Гейгера разработана специальная конструкция. Конструкция и технология изготовления ЛФД, работающих в гейгеровском режиме с высокими коэффициентами усиления ($10^5\div 10^6$) была реализована на 0,35 мкм технологической линии ОАО «ИНТЕГРАЛ». Такие коэффициенты усиления сопоставимы с усилением фотоэлектронных умножителей, поэтому эти ЛФД иногда называют кремниевыми фотоэлектронными умножителями (Si-ФЭУ).

Матрицы ПЗС и сборки ПЗС

Исследование Земли из космоса проводится во всех спектральных диапазонах. Наиболее

распространенный вид аппаратуры спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – для наблюдения и фотографирования в диапазоне видимого и ближнего ИК излучения. Такие спутники имеют разрешение на поверхности Земли вплоть до 30 см, большую полосу захвата и протяженность маршрута фотографирования, большой объем памяти для сохранения видеoinформации и аппаратуру кодирования и передачи данных. Одним из главных составляющих целевой аппаратуры таких спутников является телескоп с фокальной плоскостью на основе больших сборок ПЗС матриц. Так как съемка поверхности Земли ведется при больших скоростях движения спутника, то матрицы ПЗС могут работать только при очень коротких выдержках. При этом, количество зарядов в пикселях ПЗС матрицы недостаточно для качественной картинки. Для улучшения качества изображения в матрицах ПЗС реализуют специальный режим ВЗН, при котором заряды в матрице, накопившиеся после предыдущей выдержки, смещают синхронно со смещением изображения на поверхности матрицы ПЗС и многократно (от 4 до 128 раз в зависимости от освещенности) повторяют съемку одного и того же фрагмента. После получения нужной величины заряда изображение запоминается.

Для применения в целевой аппаратуре спутников ДЗЗ в ОАО «ИНТЕГРАЛ» были разработаны матрицы ПЗС для панхроматического (ПК) и многозонального (МК) съемочного канала. Матрица ФПЗС ПК имеет формат 1664×196 пикселей, разделенных на 4 фоточувствительных зоны, и 4 выходных усилителя, по одному на каждую зону. Это позволяет реализовать частоту считывания информации 4×20 МГц и строчную частоту 25 кГц. Размер пикселя 8×8 мкм, зарядовая вместимость не менее 150 ке⁻, динамический диапазон не менее 4000. Матрица ФПЗС МК имеет 4 фоточувствительных зоны форматом 832×64 (3 шт.) и 832×96 пикселей. Частота считывания информации до 15 МГц, строчная частота 12,5 кГц. Размер пикселя 16×16 мкм, зарядовая вместимость не менее 400 ке⁻, динамический диапазон более 4000.

Разработанные микросхемы ФПЗС будут применяться в перспективных спутниках ДЗЗ высокого разрешения в составе многокристалльных (интегральных) сборок в фокальных плоскостях космических телескопов. ОАО «ИНТЕГРАЛ» имеет опыт разработки конструкций и технологии изготовления фокальных плоскостей. В целевой аппаратуре российского спутника ДЗЗ «Канопус В» и белорусского спутника БКА установлены сборки ПЗС разработанные и изготовленные в ОАО «ИНТЕГРАЛ». Такие сборки требуют высочайшую геометрическую точность установки кристаллов ПЗС в фокальной плоскости. Точность расположения крайних пикселей соседних кристаллов относительно друг друга не должна быть хуже 2-3 мкм, разброс по высоте расположения плоскостей фоточувствительных зон всех матриц ПЗС в интегральной сборке должна быть не больше 10-15 мкм. Микросхемы ПЗС и их сборки должны иметь высокую надежность и устойчивость к воздействующим факторам космического пространства, с тем, чтобы обеспечить срок службы аппаратуры не менее 10-12 лет.

Тепловизионные мультиплексоры

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений техники является тепловидение. Принцип действия тепловизионных приборов основан на преобразовании естественного теплового излучения от объектов в видимое изображение. Обязательным условием его формирования является наличие температурного контраста между отдельными элементами объекта. Современные тепловизионные приборы способны воспринимать температурные контрасты 0,02°K и менее. Основные достоинства тепловизионных приборов, определяющие их широкое применение в настоящее время – большие дальности видения независимо от уровня естественной освещенности; возможность работы в условиях интенсивных световых помех и при пониженной прозрачности атмосферы.

Для качественного детектирования инфракрасного излучения в различных участках спектра необходимы разные устройства. В коротковолновом диапазоне (0,76 ÷ 2,5 мкм) применяют охлаждаемые приемники с фотоэлектрическим эффектом – энергии кванта достаточно, чтобы под воздействием излучения электроны перешли в зону проводимости. Охлаждаемые ФПУ используют в качестве детекторов матрицу фотодиодов. Сигналы элементарных фотоприёмников (пикселей) матрицы приёмника излучения поступают на мультиплексор, где они обрабатываются и формируют видеоданные. Далее сигналы поступают в блок обработки информации для формирования изображения. Информация выдается либо в виде видеосигнала, на монитор, либо в цифровой форме для формирования сигналов управления, например, для системы сопровождения цели. В длинноволновой области (8 ÷ 14 мкм) спектра ИК – излучения гораздо чаще применяют болометры, так как обнаруживать излучение в этом участке проще при помощи терморезистивного эффекта. - микроболометрические.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» имеет технологическую линию для изготовления изделий по 0,35 мкм КМОП технологическому процессу на пластинах диаметром 200 мм. Для этой линии Филиалом НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» были разработаны 4 мультиплексора для охлаждаемых ФПУ Их параметры приведены в таблице 1.

Для неохлаждаемых ФПУ в ОАО «ИНТЕГРАЛ» разработаны мультиплексоры форматов 384×288, 160×120, 320×240 и 640×480 по 0,35 мкм проектным нормам (5В опция) с 4 уровнями металлизации и

двумя уровнями поликремния. Размер пикселя – 25 мкм. В структуре микроболометрических ФПУ используется Мост Уинстона. Мост состоит из четырех болометров: два болометра термозакороченные (один в столбец и один в массив), их температура фиксирует температуру подложки. Два других болометра — теплоизолированные мембраны. Один пиксель располагается в основе матрицы и постоянно облучается сценой и внутренними частями корпуса. Другой изолированный элемент изображения (один в строку) экранируется от любого излучения сцены и, следовательно, называется «слепым».

Таблица 1. Параметры мультиплексоров для охлаждаемых ФПУ

Размер пикселя, мкм	Формат	Технология	Размер кристалла, мм
30	320×256	0,6 мкм, КМОП, 2Met, 1poly	11,35×10,55
25	384×288	0,6 мкм, КМОП, 2Met, 2poly	11,35×10,55
20	384×288	0,35 мкм, КМОП, 5В, 2Met, 2poly	9,15×8,58
20	640×512	0,35 мкм, КМОП, 5В, 2Met, 2poly	16,32×14,9

Дальнейшее развитие данного направления направлено в сторону уменьшения размеров пикселя и увеличение формата матрицы.

E-mail: office@bms.by

OPTOELECTRONIC DIRECTION ON JSC "INTEGRAL" – STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT

V.S. Tsimbal ¹, V. B. Zalessky ², V. A. Solodukha ¹, S. V. Shvedov ¹

¹ JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company, Minsk

² B.I. Stepanov Institute of Physics of NASB

JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company designs and produces articles of photo- and optoelectronics, develops the technological processes for their fabrication. By the present time the Association has developed and fabricates the silicon photodiodes, including the avalanche photodiodes and Si-photoelectronic multipliers, as well as ICs to control various actuators with the embedded photodiodes. For the distant earth probing satellites the matrix couple-charge devices with the time delay mode and charge accumulation have been developed, as well as the phocal planes of the space telescopes, based on the chip-cluster assemblies of these charge-couple devices. A range of VLSIs are developed and in mass production for the matrix analogue multiplexors for the microbolometers and the cooled thermal vision receivers.

СОЗДАНИЕ НАПРЯЖЕННЫХ И СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ ГЕРМАНИЯ ДЛЯ КРЕМНИЕВОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

к.ф.-м.н. Баталов Р.И.¹, д.ф.-м.н. Баязитов Р.М.¹, к.ф.-м.н. Ивлев Г.Д.²

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН

² Белорусский государственный университет

Введение

Объемный германий (Ge) является непрямозонным полупроводником, поскольку в его зонной структуре непрямая *L*-долина имеет меньшую ширину оптической щели ($\Delta E_L = E_g = 0.664$ эВ), по сравнению с прямой *Γ* -долиной ($\Delta E_\Gamma = 0.8$ эВ). В работах последних 10 лет было показано, что разница в энергиях между долинами (0.136 эВ) может быть уменьшена за счет введения в пленку Ge растягивающей деформации (0.2-0.3%), обусловленной различием в коэффициентах теплового расширения пленки Ge и подложки Si. Также при легировании пленки Ge донорной примесью (P, As, Sb) с высокой концентрацией ($> 10^{18}$ см⁻³) происходит заброс электронов из заполненной непрямой *L*-долины в прямую *Γ* -долину и их дальнейшая излучательная рекомбинация с дырками из валентной зоны [1].

К настоящему времени методами газофазного осаждения и молекулярно-лучевой эпитаксии с *in-situ* легированием получены эпитаксиальные пленки Ge на подложках Si, с величиной деформации до 0.3% и

уровнем легирования до 10^{20} см⁻³. Такие гетероструктуры Ge/Si показывают прямозонную фото- и электролюминесценцию в ближней ИК-области (1.5-1.6 мкм)[2,3]. Отличительными особенностями люминесценции пленок Ge является рост интегральной интенсивности излучения с ростом уровня легирования и с температурой [1]. Большим достижением, демонстрирующим перспективу пленок Ge для оптоэлектроники, является получение лазерной генерации при оптической и электрической накачке [4,5]. Тем не менее остаются вопросы, связанные с понижением пороговой плотности тока для лазерной генерации (~ 500 кА/см²), повышением квантовой эффективности излучения гетероструктур Ge/Si ($\sim 0.1\%$), а также с ростом пленок Ge на других подложках (кварц, сапфир), широко применяемых в микро- и оптоэлектронике. Также актуальной задачей микроэлектроники является получение сильно легированных ($>10^{20}$ см⁻³) примесями n-типа (P, As, Sb) пленок Ge [6].

С целью создания напряженных и сильно легированных пленок Ge нами была предложена методика ионно-лучевого распыления композитной мишени <Sb/Ge> на различные подложки (Si, SiO₂, Al₂O₃) с последующим импульсным (наносекундным) лазерным отжигом (ИЛО) осажденных пленок в жидкофазном режиме. По данным динамики отражения $R(t)$ изучены фазовые переходы (аморфное состояние-расплав-кристалл) в пленках Ge в зависимости от их толщины, типа подложки и плотности энергии импульса [7]. Данная методика позволяет получать поликристаллические пленки Ge с различной степенью растягивающей деформации ($\epsilon = 0.5-1\%$)[8], высоким уровнем легирования примесью сурьмы (~ 1 ат.%) и электрической активации примеси (до 100%).

Эксперимент

В качестве подложек использовались монокристаллы p-Si и c-Al₂O₃, а также пластины плавленого кварца (SiO₂) с двухсторонней полировкой. Выбор подложек обусловлен их различными теплофизическими и оптическими свойствами. Осаждение пленок Ge проводилось в вакууме (2×10^{-4} Торр) путем распыления мишени <Sb/Ge> низкоэнергетичным ($E=1.3$ кэВ) пучком ионов He⁺ при плотности тока $j = 150$ мкА/см². В процессе осаждения держатель подложки вращался (2 мин⁻¹) для улучшения однородности пленки по толщине. Толщина пленок Ge составляла 200-400 нм. Для кристаллизации аморфных пленок Ge применялся ИЛО излучением рубинового лазера ($\lambda=0.69$ мкм, $\tau=70$ нс, $W=0.2-1.4$ Дж/см²). Для структурной и оптической характеристики пленок применялись методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ), комбинационного (Рамановского) рассеяния света (КРС), оптической спектроскопии и фотолюминесценции (ФЛ). Распределение атомов Ge, Si и Sb по глубине пленки изучалось методом время-пролетной вторичной ионной масс-спектропии (ВП-ВИМС). Электрофизические свойства пленок Ge исследовались путем измерения типа проводимости методом термо-ЭДС, слоевого сопротивления и концентрации носителей методом Ван-дер-Пау в пределах облученного лазером пятна диаметром 4 мм.

Результаты и обсуждение

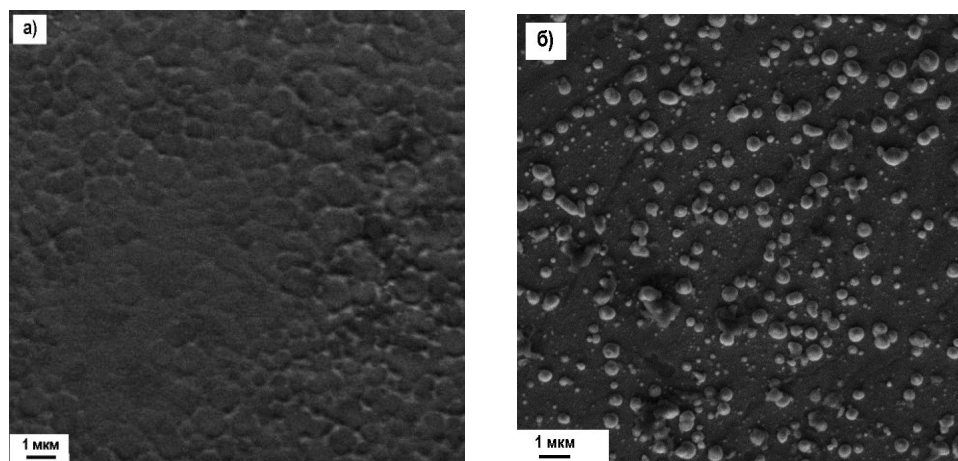


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности образца Ge/Al₂O₃ после ИЛО с $W = 0.6$ Дж/см² (а) и $W = 1.0$ Дж/см² (б)

После осаждения изучался атомный состав образцов Ge:Sb/Si методом электронного микроанализа на СЭМ. Энергия электронного пучка ($E=10$ кэВ) соответствовала глубине зондирования $d \sim 500$ нм. Анализ показал наличие Ge и Si с близким содержанием (~ 50 ат.%), а также высокое содержание Sb (~ 1 ат.%). Морфология поверхности пленок Ge изучалась методами АСМ и СЭМ. По данным АСМ исходная

поверхность аморфных пленок Ge была гладкой и неструктурированной, а ее среднеквадратичная шероховатость (RMS) была ~1 нм. В результате ИЛО с плотностью энергии $W=0.2-0.6$ Дж/см², соответствующей неполному по глубине плавлению пленки Ge ($T_{\text{плав}}=690^{\circ}\text{C}$), наблюдалось образование ячеистой структуры с развитым микрорельефом поверхности (Рис. 1а). Размер ячеек составлял ~1 мкм, а параметр RMS - 3-10 нм. В случае ИЛО с повышенной плотностью энергии ($W=0.8-1.2$ Дж/см²), соответствующей полному плавлению пленки Ge, структура пленки становилась островковой с размерами 50-500 нм. Образование островковой структуры происходит при достижении полного плавления пленки Ge и разрыве расплава на отдельные капли с последующим отверждением при отсутствии смачивания с подложкой (Al_2O_3 и SiO_2).

По данным метода РДСЛ (Рис. 2а) исходная пленка Ge была аморфной. Термический отжиг ($400^{\circ}\text{C}/30$ мин) приводил к образованию поликристаллической пленки с величиной растяжения $\epsilon=0.26\%$. Лазерная обработка также сопровождалась кристаллизацией, однако приводила к значительно большему растяжению пленки ($\epsilon=0.8\%$), вызванному быстрым плавлением и затвердением. Метод КРС также подтверждал кристаллизацию Ge при ИЛО (Рис.2б). Результаты оценки растягивающей деформации в пленке Ge по сдвигу линии относительно объемного монокристалла Ge (300 см^{-1}) приведены в Табл. 1 для всех подложек. Наибольшая величина растяжения наблюдается для Ge на подложке SiO_2 (~ 1%), что связано с ее наименьшим (среди всех подложек) коэффициентом линейного теплового расширения.

Таблица 1. Данные метода КРС для определения степени растягивающей деформации в пленках Ge на различных подложках

Образец	$\omega(\text{Ge-Ge}), \text{ см}^{-1}$	$\Delta\omega, \text{ см}^{-1}$	$\epsilon, \%$
Ge(200 нм)/ Al_2O_3			
W = 0.2	296.02	3.98	0.96
W = 0.4	296.77	3.23	0.78
W = 0.6	296.77	3.23	0.78
W = 0.8	297.05	2.95	0.71
Ge(200 нм)/Si			
W = 0.2	295.90	4.1	0.99
W = 0.4	296.65	3.35	0.81
W = 0.6	296.65	3.35	0.81
W = 0.8	297.03	2.97	0.71
Ge(400 нм)/ SiO_2			
W = 0.2	294.4	5.6	1.35
W = 0.4	296.02	3.98	0.96

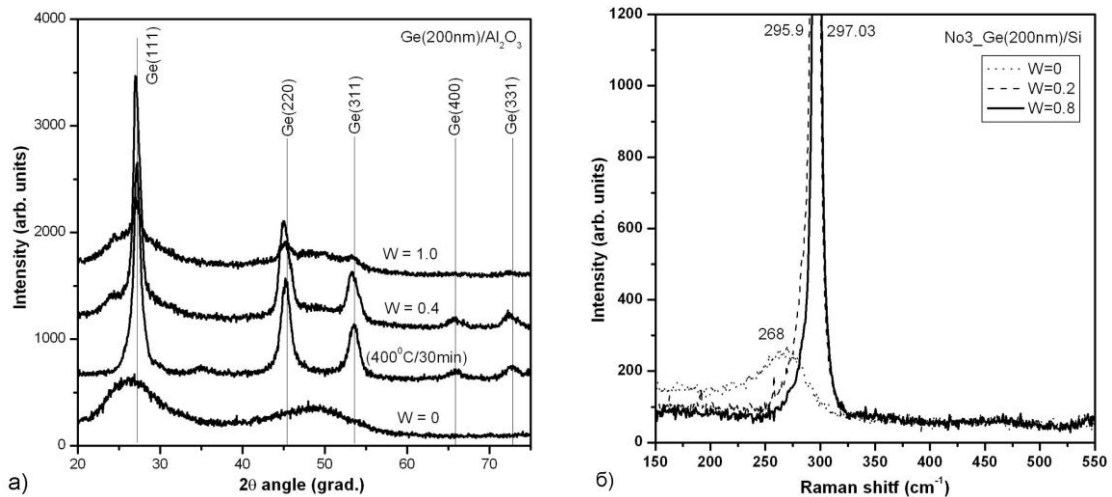


Рис. 2. (а) Спектры РДСЛ ($\varphi = 1^{\circ}$) для образца Ge/ Al_2O_3 после осаждения ($W = 0$), а также после термического и лазерного отжига. (б) Спектры КРС образца Ge/Si после осаждения ($W = 0$) и после ИЛО с плотностью энергии $W = 0.2$ и 0.8 Дж/см².

С использованием метода ВП-ВИМС с высоким глубинным разрешением было изучено распределение атомов Ge, Si и Sb путем послойного ионного травления. Измерения показали однородное распределение атомов Ge и Sb в пределах осажденной пленки толщиной 180-200 нм после ИЛО (Рис. 3). Атомная концентрация Sb в пленке $N(\text{Sb})=(5-6)\times 10^{20}\text{ см}^{-3}$, что соответствует 1 ат.% по отношению к Ge. Это согласуется с данными электронного микроанализа. Примечательно, что профиль атомов Sb после

осаждения имеет четкую периодичность (~ 5 нм), связанную с неравномерным размещением таблеток Sb на мишени Ge и с вращением подложки во время осаждения. После ИЛО периодичность Sb исчезает, а атомы Si проникает в пленку Ge на глубину до 40 нм. Это связано с быстрой диффузией атомов Sb и Si в расплаве Ge. Оценка коэффициента диффузии за время существования расплава Ge ($t = 180$ нс) [7] дает величину $D \sim 10^{-4}$ см²/с.

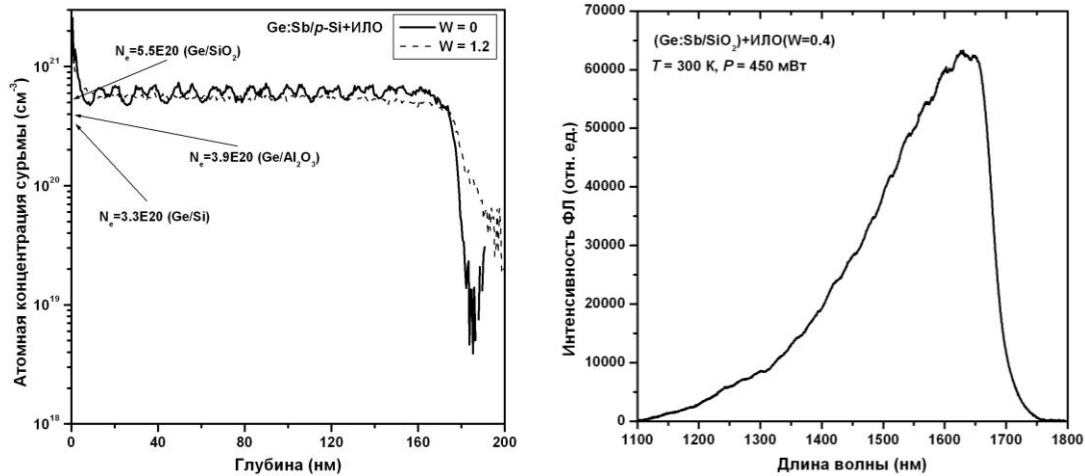


Рис. 3. Глубинные профили атомов Sb в пленке Ge на подложке Si до и после ИЛО с $W = 1.2$ Дж/см². Стрелки указывают на значения концентрации носителей (N_e) в пленках Ge на различных подложках.

Рис. 4. Спектр ФЛ ($T = 300$ К) пленки Ge:Sb на подложке SiO₂ после ИЛО с $W = 0.4$ Дж/см².

Слоевое сопротивление (ρ_s) пленок в исходном аморфном состоянии на изолирующих подложках составляет 60-70 кОм/□. В результате ИЛО в режиме полного плавления величина ρ_s резко падала до 40-60 Ом/□. Наименьшие значения ρ_s были получены на подложке кварца. Концентрация носителей тока в пленках Ge:Sb на всех подложках измерялась методом эффекта Холла в магнитном поле $B = 0.35$ Тл. Уровень концентрации электронов проводимости (N_e) в пленках Ge на различных подложках указан на Рис. 3 стрелками. Видно, что в случае подложки кварца величина N_e (5.5×10^{20} см⁻³), равная концентрации активированной донорной примеси, сравнима с атомарной концентрацией атомов Sb в пленке Ge (100 % электрическая активация Sb) и больше чем в 50 раз превышает равновесную растворимость Sb в Ge ($\sim 1 \times 10^{19}$ см⁻³). Такой результат существенно превышает значения, приведенные в литературе для ИЛО имплантированных монокристаллов Ge [6]. Повышенный уровень активации примеси Sb на кварце, по-видимому, связан с меньшим оттоком тепла в подложку и повышенной длительностью фаз плавления и кристаллизации. Это повышает вероятность атомам примеси занять электрически активную (узельную) позицию в решетке Ge по мере движения фронта кристаллизации к поверхности пленки ($V \sim 1$ м/с).

Измерения пленок Ge на пропускание и отражение также подтвердили их аморфное состояние после осаждения и их кристаллизацию в результате ИЛО. Измерения ФЛ пленок Ge:Sb при 300 К показали наличие наиболее интенсивного сигнала с максимумом при 1630 нм (0.76 эВ) на подложке кварца (Рис. 4). Данный факт коррелирует с данными Рамановской спектроскопии и Холловских измерений и отражает наибольший уровень растяжения (до 1 %) и максимальной концентрации электронов (5.5×10^{20} см⁻³), достигнутый на подложке кварца. Природа интенсивной полосы ФЛ связана с прямыми межзонными переходами из Γ -долины, уровень энергии которой смещен на 40 мэВ относительно объемного кристалла Ge (0.8 эВ), вследствие растяжения пленки Ge и ее сильного легирования примесью Sb. Необходимо отметить, что достижение интенсивной ФЛ на сильно легированных поликристаллических пленках Ge на кварце получено впервые.

Заключение

Показана перспектива получения светоизлучающих структур на основе напряженных и сильно легированных слоев Ge для оптоэлектроники. Описана методика получения таких слоев, включающая ионно-лучевое распыление пленок Ge:Sb на подложки кремния, сапфира и кварца и их кристаллизацию импульсным лазерным излучением. Установлены оптимальные параметры осаждения и отжига, которые приводят к образованию напряженных (0.5-1 %) сильнолегированных (до 5×10^{20} см⁻³) поликристаллических пленок Ge, излучающих при 300 К на длине волны 1.65 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-02-00348.

Литература

1. J. Liu, L.C. Kimerling, J. Michel. Monolithic Ge-on-Si lasers for large-scale electronic–photonic integration // *Semicond. Sci. Technol.* 27, 094006 (1-13) (2012).
2. X. Sun, J.F. Liu, L.C. Kimerling and J. Michel. Room-temperature direct bandgap electroluminescence from Ge-on-Si light-emitting diodes // *Opt. Lett.* 34 1198–1200 (2009).
3. M. Schmid, M. Oehme, et al. Effect of heavy doping and strain on the electroluminescence of Ge-on-Si LEDs // *Thin Solid Films* 557, 351-354 (2014).
4. Liu J.F., Sun X., Camacho-Aguilera R., Kimerling L.C. and Michel J. Ge-on-Si laser operating at room temperature // *Opt. Lett.* 35 679–81 (2010).
5. Camacho-Aguilera R., Cai Y., et al. An electrically pumped germanium laser // *Opt. Express* 20 11316–20 (2012).
6. Shayesteh M., O’Connell D., Gity F. et al. Optimized Laser Thermal Annealing on Germanium for High Dopant Activation and Low Leakage Current // *IEEE Trans. Elect. Dev.* 2014. V.61. P.4047.
7. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М. и др. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках германия на кремнии, сапфире и кварце // *ЖТФ*, 85(№3), 89-95 (2015).
8. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М. и др. Импульсная модификация пленок германия на подложках кремния, сапфира и кварца: структура и оптические свойства // *ФТП*, 49(№6), 746-752 (2015).

E-mail: batalov@kfti.knc.ru

CREATION OF STRAINED AND HIGHLY DOPED GERMANIUM LAYERS FOR SILICON BASED OPTOELECTRONICS

R.I. Batalov¹, R.M. Bayazitov¹, G.D. Ivlev²

¹E.K. Zavoyskii Kazan Physical-Technical Institute of RAS

²Belarussian State University

The present article reviews the current status and our progress on creation of tensile strained and highly doped Ge layers on different substrates for Si-based optoelectronics. The results of investigation on structural, optical and electrical properties of Ge films deposited on different substrates and subjected to pulsed laser annealing (PLA) are given. It is shown that PLA of amorphous Ge films in liquid-phase regime leads to its crystallization accompanied by introducing of high tensile strain (up to 1%), creation of highly doped n-Ge:Sb layers with uniform Sb-dopant distribution, high electron concentration ($5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) and intense photoluminescence at 300 K.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СБИС ПО КРИТЕРИЮ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

к.т.н. Пугачёв А.А.¹, Иванова Г.А.¹, Пузырьков Д.В.²,
к.ф.-м.н. Щелоков А.Н.¹, д.т.н. Гулякович Г.Н.¹, д.т.н. Северцев В.Н.¹

¹Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Введение

Разрешающая способность (РС) является одним из главных показателей качества оптико-электронной системы и зависит, в первую очередь, от разрешающей способности фоточувствительной интегральной микросхемы (ФЧ СБИС). Однако, в качестве критерия качества спроектированного изделия разрешающая способность не используется. Это обусловлено тем, что традиционные математические модели РС ФЧ СБИС не связывают РС с реальными конструктивно-технологическими параметрами микросхемы, которые оптимизируются разработчиком в ходе проектирования. Разработанный метод моделирования позволяет максимизировать РС путем подбора реальных параметров технологического процесса и конфигурации топологии фотоприемных элементов ФЧ СБИС.

Математическое моделирование РС имеет специфические особенности, обусловленные самой спецификой функционирования и проектирования ФЧ СБИС. В микроэлектронике математическое моделирование с применением ЭВМ началось еще в 60-е годы прошлого века. Ускоренное развитие оно получило в начале 80-х годов с достижением ЭВМ мощностей, достаточных для решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. Наряду с аналитическими, стали появляться так называемые физико-топологические модели элементов электронных компонентов [1], основанные на

различных вариантах решения фундаментальной системы уравнений полупроводника (ФСУ). В рамках дрейфово-диффузионного приближения данная система состоит из уравнения Пуассона и уравнений непрерывности для электронов и дырок, к которым при необходимости добавляется уравнением теплопроводности. Исходной информацией в физико-топологических моделях являются электрофизические параметры полупроводникового материала, его объемная структура и топология, а также статические или изменяющиеся во времени управляющие напряжения или токи. На начальном этапе развития физико-топологического моделирования из-за «слабости» ЭВМ для решения ФСУ приходилось вводить много физических и геометрических ограничений. Ограничения позволяли упростить систему до двух или даже одного уравнения и решить задачу на ЭВМ в приемлемое для практических целей время. Зачастую, такие модели имели узкое применение: только для одного варианта структуры прибора или только одного электрического режима работы [1]. При этом первостепенной задачей при построении упрощенных физико-топологических моделей становилось обеспечение их физической адекватности.

В настоящее время коммерческие САПР приборно-технологического моделирования (например, Sentaurus TCAD (Synopsys) [2]), установленные на мощных рабочих станциях, позволяют решать полную систему уравнений полупроводника с числом узлов пространственного разбиения вплоть до миллиона. Следует отметить, что проблемы обеспечения физической адекватности моделей полупроводниковых приборов, выстраиваемых даже в таких развитых САПР, а также и вопросы достижения времен моделирования, приемлемых для практического проектирования, не снимаются.

Фоточувствительные СБИС относятся к тем изделиям микроэлектроники, при проектировании которых физико-топологическое моделирование является обязательным. Это обусловлено следующими особенностями процесса их проектирования:

- во-первых, технологическое моделирование и последующие физико-топологическое моделирование являются необходимыми средствами проектирования фотоприемного элемента и фоточувствительной СБИС в целом. Это обусловлено тем фактом, что проектирование фоточувствительных СБИС – это, в первую очередь, технологическое проектирование отдельного фотоприемного элемента, при котором разрабатывается технологический маршрут его изготовления. Главные фотоэлектрические характеристики фотоприемного элемента – чувствительность, квантовая эффективность, функция передачи модуляции - очень чувствительны к его объемной структуре (профилю легирующей примеси). Эту структуру требуется оптимизировать в процессе проектирования, подбирая параметры операций технологического процесса, топологии и электрических режимов управления.

- во-вторых, для моделирования фотоприемника необходим двух- или трехмерный подход, так как его работа основана на объемном взаимодействии областей пространственного заряда (ОПЗ) соседних элементов. Даже в фоточувствительных СБИС с элементами, имеющими размеры более 10x10 мкм, объемные распределения потенциала и заряда трехмерны. Протяженности областей пространственного заряда (ОПЗ) в них могут достигать значений 50 мкм и более по каждой из координат, причем в любом направлении будут иметь место изменения электрического поля, потенциала и распределения заряда. Дополнительной задачей при двух- и трехмерном моделировании фотоприемных элементов является выбор положения границ области моделирования для исключения искажений распределения потенциала и носителей заряда на границах области моделирования [3].

- в-третьих, разрешающая способность не является чисто электрической характеристикой ФЧ СБИС и для ее расчета необходимо моделировать процессы прохождения и поглощения света в полупроводнике и диэлектриках.

Функция передачи модуляции и РС

Разрешающая способность ФЧ СБИС определяется с помощью Функции Передачи Модуляции – ФПМ. Согласно определению, ФПМ – это частотная зависимость отношения максимальной модуляции выходного сигнала матрицы фотоприемных элементов на заданной пространственной частоте к модуляции при входном сигнале с нулевой пространственной частотой [4]:

$$\text{ФПМ}(u) = M(u) / M(0) . \quad (1)$$

Модуляция согласно на каждой пространственной частоте равна [1]:

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} . \quad (2)$$

Разрешающая способность определяется как пространственная частота для заданного значения ФПМ. Для фоточувствительных СБИС, применяющихся в оптико-электронных системах видимого диапазона, это значение равно 0,2 – 0,3.

Традиционно для теоретического исследования разрешающей способности применяются аналитические модели ФПМ. В аналитических моделях ФПМ структура фотоприемного элемента

представляется со значительными упрощениями. Несмотря на эти упрощения, для матриц с элементами, имеющими непрямоугольную топологию и многослойную структуру примеси аналитические выражения для ФПМ становятся очень громоздкими [5-6]. Основные подходы, применяемые при построении аналитических моделей ФПМ, подробно освещены в [7]. Следует отметить, что традиция исследования ФПМ с помощью аналитических моделей настолько укоренилась, что они продолжают разрабатываться даже во втором десятилетии нашего века, например [8]. Полученные в этой работе выражения потеряли наглядность зависимости ФПМ от параметров структуры и фактически непригодны для целей практического проектирования.

Очевидно, что избежать недостатков аналитических моделей, связанных с упрощениями объемной структуры и физической картины электрофизических процессов, позволит модель ФПМ, построенная на основе моделирования реальных процессов генерации, переноса и накопления фотогенерированных носителей заряда в фотоприемных элементах с применением профилей примеси, смоделированных с высокой точностью средствами технологического моделирования. Такой подход может быть реализован именно в рамках физико-топологических моделей.

Построение физико-топологической модели ФПМ

Таким образом, для того, чтобы связать физико-топологические параметры фотоприемной матрицы с ФПМ, необходимо [9]:

во-первых, максимальную A_{\max} и минимальную A_{\min} амплитуды сигналов пикселей определять путем численного интегрирования (минимум, двумерного) объемных (минимум, двумерных) распределений фотогенерированных носителей заряда по фоточувствительным областям фотоприемных пикселей матрицы;

во-вторых, данные распределения должны быть получены путем решения фундаментальной системы уравнений полупроводника в двух- или трехмерном приближении при непринципиальных ограничениях на структуру прибора; и,

в-третьих, структура прибора для расчета распределений фотогенерированных носителей должна быть получена с помощью двух- или трехмерного моделирования технологических процессов.

Такие модели, в которых модуляция вычисляется путем интегрирования величин фотогенерированных зарядов, называются также «моделями прямого вычисления ФПМ» - MTF Direct calculation model. Очевидно, что по сравнению с аналитическими моделями, модели прямого вычисления могут потребовать значительных вычислительных затрат. Это с лихвой компенсируется тем фактом, что в моделях прямого вычисления ФПМ ограничения на топологию и структуру пикселей с точки зрения практического проектирования отсутствуют или очень незначительные.

Как известно, ФПМ является произведением геометрической и диффузионной составляющих [4]:

$$\hat{O}P(u) = \hat{O}P_{\text{geom}}(u) \cdot \hat{O}P_{\text{diff}}(u), \quad (3)$$

где u – пространственная частота, ФПМ – полная ФПМ, ФПМ_{геом} – геометрическая составляющая, ФПМ_{дифф} – диффузионная составляющая. Геометрическая составляющая ФПМ характеризует так называемую «геометрическую выборку» изображения и зависит только от топологии фотоприемного элемента, а диффузионная составляющая характеризует диффузионное растекание носителей в объеме матрицы, ведущее к нежелательному обмену носителями между пикселями, и зависит от объемной структуры ее фотоприемных элементов, электрического режима работы других факторов, влияющих на объемные распределения фотогенерированных носителей заряда..

Так как диффузионная составляющая зависит от перемещения фотогенерированных носителей заряда из освещенных областей в теневые, то перепад сигнала фотоприемных элементов, находящихся на границе теневых и освещенных участков уменьшается. Именно для учета влияния на ФПМ данных объемных эффектов необходимо объемное физико-топологическое моделирование.

Диффузионную ФПМ можно рассчитать, зная общую ФПМ и её геометрическую составляющую:

$$\hat{O}P_{\text{diff}}(u) = \hat{O}P(u) / \hat{O}P_{\text{geom}}(u). \quad (4)$$

Геометрическая ФПМ рассчитывается с помощью двумерного интегрирования мощности входного сигнала по площади пиксела с построением круговой диаграммы ФПМ. Круговая диаграмма строится путем полного поворота вектора направления сигнала в плоскости матрицы с некоторым дискретным шагом по углу поворота. ФПМ геометрическая моделируется независимо от полной и диффузионной ФПМ. Полная ФПМ рассчитывается с помощью физико-топологического моделирования фрагмента матрицы в плоскости сечения, которое проходит вдоль столбца или вдоль строки матрицы.

Таким образом, модель разрешающей способности на основе физико-топологического моделирования ФПМ будет включать следующие этапы:

- моделирование ФПМ_{геом} без применения приборно-технологического моделирования;
- моделирование полной ФПМ с применением приборно-технологического моделирования;
- расчет ФПМ_{дифф} по формуле (4).

Метод физико-топологического моделирования РС

Метод основан на физико-топологическом моделировании отклика двумерного фрагмента фотоприемной матрицы на входной оптический сигнал, заданный в виде полосатой миры или в виде одиночной черно-белой ступени (т.н. «черно-белый перепад») с направлением их вдоль строки или вдоль столбца матрицы. Отклик матричного фотоприемника $e(l)$ (где l - координата, нормальная к границе ступени) на такой сигнал называется «краевой функцией рассеяния» (КФР, ESF - Edge Spread Function). Известно, что КФР несет полную информацию о частотном спектре выходного сигнала [4]. Пространственная производная КФР $e'(l)$ будет представлять собой Функцию Рассеяния Точки (ФРТ) $h(l)$. Функция передачи модуляции ФПМ(u) пространственного сигнала в направлении нормали к ступени тестового входного сигнала получается как модуль преобразования Фурье:

$$\Phi_{ПМ}(u) = |F[h(l)]|, \quad (5)$$

где u - пространственная частота в направлении нормали l .

Отклик на входной сигнал определяется из распределений фотогенерированных носителей заряда, которые получают путем физико-топологического моделирования фрагмента фоточувствительной СБИС в двумерном приближении. Исходными данными являются: двумерные профили легирующих примесей, рассчитанные с помощью двумерного технологического моделирования; геометрическая модель структуры поверхностных покрытий (диэлектрики, металлические и поликремниевые шины и т.д.); диаграммы управляющих воздействий на электродах. Двумерные профили примеси моделируются с использованием реальных параметров технологического процесса: доз и энергий легирования, параметров термоопераций, параметров материала и т.д. Таким образом, модель позволяет прямо связать ФПМ с параметрами техпроцесса, топологией и структурой прибора и режимом управления.

Предлагается следующий метод расчета диффузионной составляющей ФПМ через полную ФПМ.

Шаг 1. Задание входного сигнала: входную мощность P_{max} , начальное положение ступени X_0 .

Шаг 2. Задание фрагмента сечения матрицы в направлении вдоль столбца либо вдоль строки.

Шаг 3. Расчет объемного распределения фотогенерированных носителей заряда $n(x,y,t)$.

Шаг 4. Расчет величин накопленных зарядовых пакетов каждом фотоприемном элементе.

Шаг 5. Построение краевой функции для координат $X_0 \pm n \cdot L_0$, где n – число пикселей вправо и влево от пикселя, в котором располагается ступень, L_0 – длина элемента в направлении разложения.

Шаг 6. Изменение начального положения ступени на заданную величину d и замена X_0 на $X_1 = X_0 + d$.

Шаг 7. Повторение шагов 3 – 5 заданное число раз (порядка 5 – 8).

Шаг 8. Построение КФР по полученным значениям величин накопленных зарядов.

Шаг 9. Дифференцирование КФР

Шаг 10. Построение полной ФПМ согласно (1).

Шаг 11. Расчет РС для заданного значения ФПМ.

Шаг 12. (По необходимости) Построение диффузионной составляющей ФПМ согласно (4).

Реализация метода моделирования РС

Разработанные методы и алгоритмы моделирования ФПМ реализованы в виде: программного модуля в среде MATLAB [10], набора алгоритмов моделирования и набора файлов исходных данных к пакету приборно-технологического моделирования Sentaurs TCAD (Synopsys) и программы типа «SPICE», применяемой для схмотехнического моделирования (текстовые файлы).

Примеры применения метода

С помощью разработанного метода было произведено:

- проектирования ФЧ СБИС на приборах с зарядовой связью (ПЗС) с утоненной подложкой для засветки со стороны подложки, свободной от малопрозрачных электродов (ПЗС «с обратной засветкой»). При засветке с «обратной» стороны подложки возрастает фоточувствительность, однако разрешающая способность может упасть из-за диффузии в нейтральной области со стороны засветки в случае, если ее толщина будет слишком велика. Поэтому задача выбора толщины подложки и уровня ее легирования по критерию достижения заданной РС является крайне актуальной для ПЗС данного класса. Был определен оптимальный уровень легирования подложки при различных ее толщинах и проведено сравнение полученной ФПМ с ФПМ данного прибора при засветке его с лицевой стороны.

- анализа РС фотоприемной матрицы с устройством, обеспечивающим защиту от локальных пересветок на изображении. Данные ФЧ СБИС имеют фотоприемные ячейки очень сложной объемной конструкции, и анализ их РС с помощью аналитических моделей в принципе невозможен.

- оптимизации топологии фотоприемного пикселя КМОП-фотодиодной СБИС;

- оптимизация расположения элементов в перспективной линейной КМОП-фотодиодной СБИС для сканирующих систем;

- оптимизация массива микролинз для ПЗС ФЧ СБИС по критерию РС.

Анализ РС с помощью двумерного физико-топологического моделирования для всех приведенных случаев проведен впервые.

Заключение

Разработан метод проектирования ФЧ СБИС, основанный на физико-топологическом моделировании основанные на физико-топологическом моделировании ее разрешающей способности. Данный метод позволяет установить прямые связи между разрешающей способностью фоточувствительной СБИС и ее реальными конструктивно-технологическими параметрами, режимами управления и внешними условиями.

Метод применен в процессе реального проектирования различных фоточувствительных СБИС.

Литература

1. Носов Ю.Р., Петросянц К.О., Шилин В.А. Математические модели элементов интегральной электроники. - М.: «Сов. Радио», 1976,- 304 с.
2. <http://www.synopsys.com/TOOLS/TCAD/>
3. Пугачев А.А., Тубаев А.А. Двумерные модели структур фотоприемных ячеек с устройством антиблуминга // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА/ Материалы научно-технической конференции. -М.:МНТОРЭС им. А.С.Попова. -2010. -С.141-142
4. Holst G. Electro-optical Imaging System Performance. - 2nd ed.– Washington.: A Publication of SPIE. – 2000. – 438 P.
5. Yadid-Pecht O. The Geometrical Modulation Transfer Function (MTF) for different pixel active area shapes // Optical Engineering. – 2000. - V. 39. - №4. - P. 859-865.
6. Stevens E., Lavine J. An Analytical, Aperture, and Two-Layer Carrier Diffusion MTF and Quantum Efficiency Model for Solid-State Image Sensors // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1994. – V. 41. - №10. – P. 1753 – 1760.
7. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. - М.: Наука, 1986. – 320 с.
8. Djite I., Estriebeau M., Magnan P., Rolland G., Petit S., Saint-Pe O. Theoretical Models of modulation Transfer Function, Quantum Efficiency and Crosstalk for CCD and CMOS Image Sensors // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. - V. 59. - №3. - P. 729-739.
9. Иванова Г.А., Пугачёв А.А., Пузырьков Д.В., Щелоков А.Н. Физико-топологическое моделирование разрешающей способности фотоприемных СБИС// Известия ЮФУ. Технические науки.-2015.-№2. - С. 246 – 254.
10. Иванова Г.А., Пугачёв А.А. Алгоритм вычисления функции передачи модуляции матричных фотоприемников и его реализация в среде MATLAB // Материалы научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. – С.147 – 150.

COMPUTER-AIDED IMAGE SENSORS DESIGN THROUGH RESOLUTION CRITERION

A.A. Pugachev¹, G.A. Ivanova¹, D.V. Puzyrkov²,
A.N. Schelokov¹, G.N. Gulyakovich¹, V.N. Severcev¹

¹Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

The resolution is the main parameter of image sensors, but this parameter is not the criterion for computer-aided design. The modulation transfer function (MTF) is main figure of merit of resolution. The resolution method modeling includes direct calculation of pixels output signal modulation for different shapes of test input signals for geometrical MTF and technological-device modeling for diffusion and full MTF component.

For some practical cases of pixel topologies the behavior of MTF on some directions was calculated. The investigations confirm the universal character of the MTF calculation method.

The method was applied for practical design of numerous CCD image sensors.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

Малышев В.С.¹, Солoduха В.А.¹, Цымбал В.С.¹,
Шведов С.В.¹, к.т.н. Залесский В.Б.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ

В последние годы в мире наблюдается интенсивный рост разработок и производства изделий электронной техники с оптоэлектронными компонентами, как для широких гражданских применений, так и узкоспециализированного назначения. Среди оптоэлектронных приборов лавинные фотодетекторы обеспечивают внутреннее усиление регистрируемого сигнала в десятки и сотни раз. Использование таких приборов кардинально улучшает массогабаритные характеристики соответствующей аппаратуры, их пороговую чувствительность, и позволяет существенно упростить сопряженные электронные системы регистрации и обработки сигналов.

Настоящая работа посвящена созданию конструкции и технологии кремниевого лавинного фотодетектора, работающего в диапазоне длин волн λ от 0.4 до 1.1 мкм, причём в основном ближнего ИК диапазона, производство которых в странах СНГ не налажено.

Лавинный фотодиод (ЛФД) представляет собой полупроводниковый прибор (чаще всего диод), на который подается электрическое смещение, близкое к напряжению пробоя, так что заряд, генерированный в результате поглощения падающего фотона в виде электронов и дырок, усиливается в самом ЛФД в результате каскадного эффекта, когда заряд ускоряется высокой разностью потенциалов, приложенной к р-п переходу прибора.

Лавинное умножение фототока наблюдается при напряженностях электрического поля в р-п переходе, достаточных для того, чтобы генерированные светом носители заряда при пролете через ОПЗ р-п перехода приобрели энергию, обеспечивающую ударную ионизацию нейтральных атомов полупроводника и генерацию вторичных электронно-дырочных пар. Скорость генерации электронно-дырочных пар пропорциональна коэффициентам ионизации.

Коэффициенты ионизации α_n и α_p определяются как число электронно-дырочных пар, генерируемых электроном (дыркой) на единице пути перемещения. Коэффициенты α_n и α_p сильно зависят от величины электрического поля, как показано на рисунке 1.

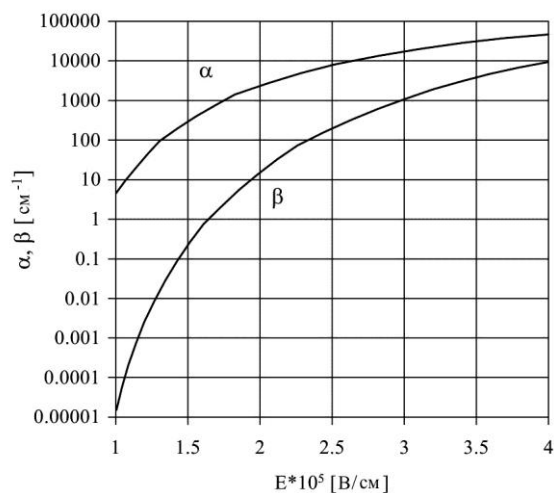


Рис. 1. Коэффициенты ионизации α и β в зависимости от величины электрического поля E в кремнии [1]

Поскольку генерация носителей заряда сопровождается последующей рекомбинацией, которая приводит к уменьшению числа свободных носителей, следует выбрать величину электрического поля в ОПЗ р-п перехода, при которой коэффициент ионизации электронов намного превосходит коэффициент ионизации дырок.

В этом и состоит основная задача проектирования ЛФД. Так как электрическое поле в обратносмещённом переходе связано с профилем примесей, составляющих переход, законом Пуассона, то необходимо подобрать такие режимы формирования легированных областей n+ и р- типа, которыми реализуется значение поля E в районе $(1 \div 2) \cdot 10^5$ в/см при напряжении пробоя.

Величина максимального электрического поля должна быть однородна по всей площади p-n перехода, а не в какой-нибудь его части, например у края перехода вблизи поверхности, иначе пробой возникнет только в этой области и именно только здесь будет лавинный процесс, а все основные генерированные фотонами носители не будут умножаться, что снижает все оптоэлектронные характеристики прибора. Это достигается использованием слаболегированных n- областей по краям основного p+ p- перехода, снижающих краевое электрическое поле, вследствие чего пробой происходит в донной области. Типовая структура представлена на рисунке 2.

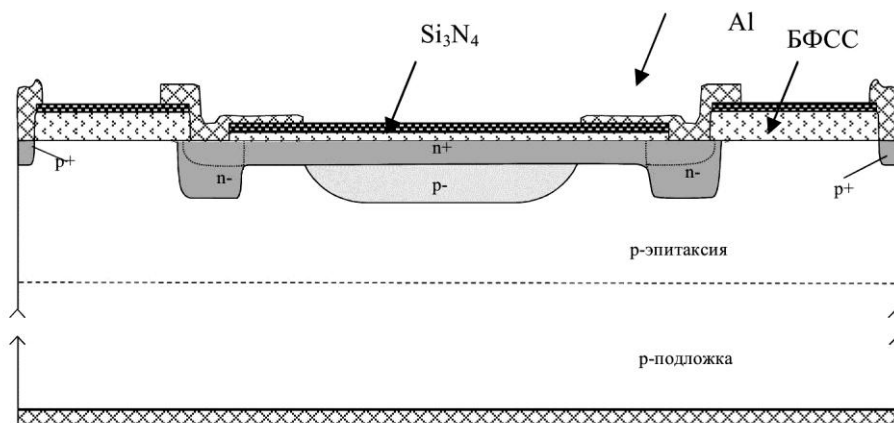


Рис. 2. Типовая вертикальная структура лавинного фотодиода типа диода Рида

И, наконец, глубина ОПЗ должна также определяться длиной волны падающего излучения. Наиболее предпочтительно, чтобы фоточувствительный прибор (обеднённая область p-n перехода) был способен поглощать 100% падающего излучения. Расстояние x , мкм, необходимое для поглощения 50% падающего излучения, можно определить путем подстановки $I/I_0=0,5$ в уравнение Бугера-Ламберта

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \quad (2.2)$$

где α – коэффициент поглощения, см^{-1} , и это расстояние x соответствует $0,7/\alpha$ (рисунок 3.).

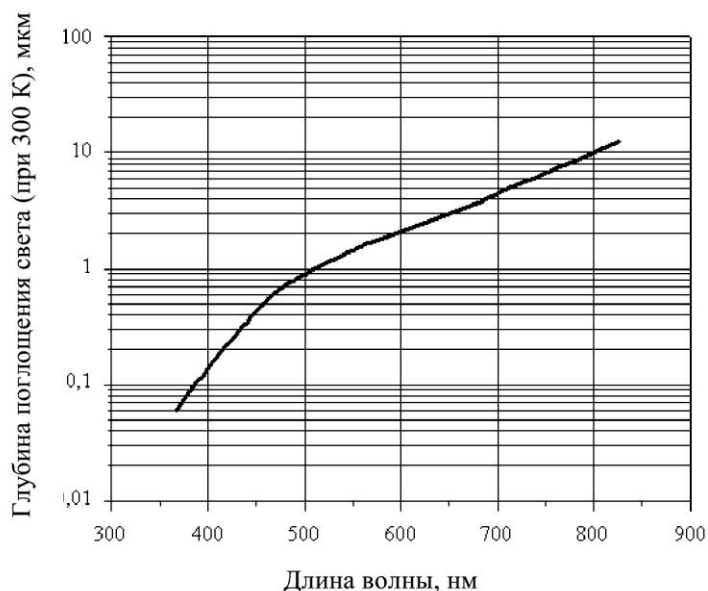


Рис. 3. Зависимость глубины поглощения света в кремнии от длины волны излучения λ [2]

Из рисунка 3 следует, что для обеспечения эффективного поглощения и усиления на длинах волн λ от 800 до 1000 нм ОПЗ должна быть растянута от 10 до 100 мкм, что достигается выбором достаточно высокоомной эпитаксиальной p- плёнки ($50 \div 60$) Ом*см, толщиной ($50 \div 60$) мкм, выращенной на высоколегированной подложке p+ типа.

Как показал расчет, выполненный с использованием программного обеспечения TSuprem4 ф. Synopsys, необходимая величина напряженности электрического поля достигается при дозе имплантации

бора в р-область $Q=5,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и разгонке примеси при $T=1200^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов, как показано на рисунке 4.

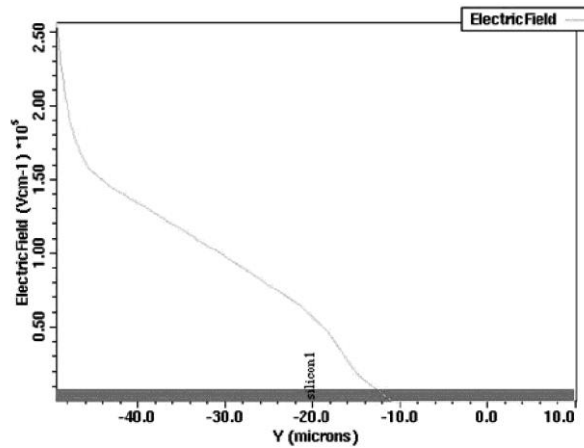


Рис. 4. Расчёт электрического поля при пробое в n+p переходе при дозе в Р-карман бора $Q=5.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

При этом пробой перехода происходит именно по дну структуры, показанной на рисунке 2.

Важно отметить, что коэффициент отражения принимает минимальные значения ~ 4% при использовании в качестве антиотражающего покрытия Si_3N_4 , толщиной $d=0,11 \text{ мкм}$ (рисунок 2), лежащего на термическом SiO_2 , толщиной 70 нм .

Получаемые на такой структуре характеристики светочувствительности фотоприёмника с размером светочувствительно области 1200 мкм показаны на рисунке 5.

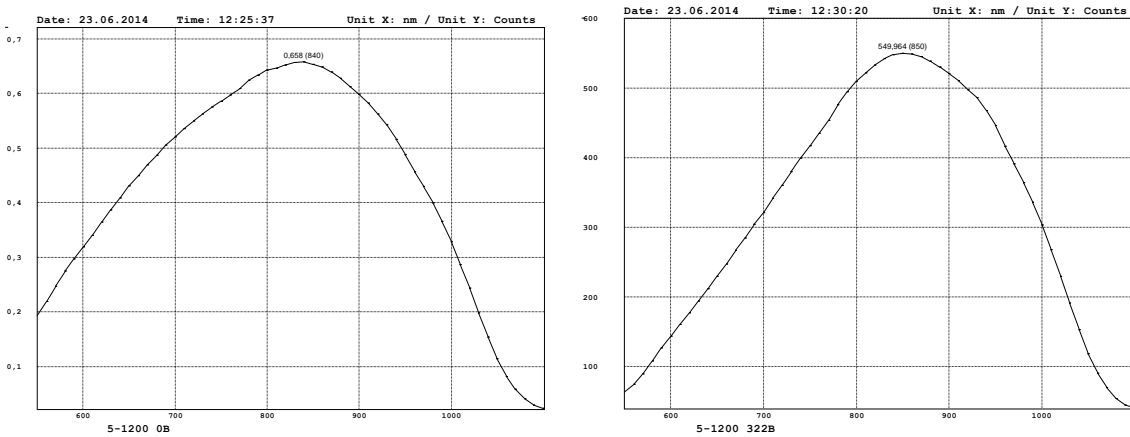


Рис. 5. Характеристики спектральной чувствительности $S \text{ (A/W)}$ от длины волны $\lambda \text{ (нм)}$ при напряжении на диоде $U=0\text{В}$ (слева) и $U= 320\text{В}$ (справа)

Экспериментальная вольтамперная характеристика фотоприёмника выглядит как показано на рисунке 6.



Рис. 6. Вольтамперная обратносмещённого фотодиода (световая и темновая)

Гетероструктуры и оптоэлектроника

Основные характеристики фотодетектора с размером фоточувствительной области 1200 мкм приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры ЛФД с размером светочувствительной области 1200 мкм при температуре $T=25^\circ\text{C}$

Наименование параметра	Значение
Коэффициент умножения M (ед)	60 ± 150
Напряжение лавинного пробоя, В	300 ± 40
Коэффициент температурного изменения напряжения лавинного пробоя, В/град	0,92
Максимум спектральной фоточувствительности, нм	850
Светочувствительность S (А/Вт) в максимуме спектральной чувствительности при $M=1$	≥ 0.5
Емкость при работе в режиме усиления, пФ	≤ 37
Частота отсечки при нагрузке 1 кОм, МГц	$\geq 14,0$
Квантовая эффективность при $\lambda=\lambda_{\text{max}}$ и $M=1, \%$	≥ 90
Эквивалентная мощность шума, нВт	$\leq 1,0$

Таким образом, определены важнейшие элементы при создании эффективной конструкции лавинного фотоприёмника и особенности его изготовления. Показано, что правильная конструкция фотодиода должна обеспечивать величину электрического поля в лавинном режиме в пределах $E=1,5 \cdot 10^5$ в/см, область электрического пробоя - только по дну диода специальной конструкции и состояние антиотражающего покрытия, обеспечивающего минимальное отражение при спектральном максимуме фоточувствительности. Приведены основные характеристики кремниевого ЛФД с размером фоточувствительной области 1200 мкм.

Литература

1. Y. Musienko Simple model for EG&G APD // CMS NOTE 1998/000. - March 25, 1999
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – Т.2. – 456 с.

E-mail: zalesski@inel.bas-net.by

FEATURES OF DESIGN AND PRODUCTION OF CHIPS OF AVALANCHE PHOTORECEIVERS OF THE NEAR INFRARED RANGE

V.S. Malyshev¹, V. A. Solodukha¹, V.S. Tsimbal¹,
S. V. Shvedov¹, V. B. Zalessky²

¹ JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company, Minsk

² B.I. Stepanov Institute of Physics of NASB

The results of features design and production avalanche photodiode (APD) developed on open joint stock company «Integral» are presented. It is shown that the correct design photodiode has to provide the size of electric field in the avalanche mode limits $1,5 \cdot 10^5$ V/cm, area of electric breakdown - only on a bottom of the diode of a special design and condition of the antireflecting covering providing the minimum reflection at a spectral maximum of photosensitivity.

ОДНО- И МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ СРЕДНЕВОЛНОВЫЕ ИК ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР p-InAsSbP/n-InAs(Sb)

к.ф.-м.н. Н.Д. Ильинская¹, С.А. Карандашев¹, Н.Г. Карпухина², А.А. Лавров¹,
д.ф.-м.н. Б.А. Матвеев^{1,2}, к.ф.-м.н. М.А. Ременный^{1,2}, Н.М. Стусь¹, к.ф.-м.н. А.А. Усикова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

² ООО «ИоффеЛЕД», Санкт-Петербург

Введение

Области применения оптических методов анализа постоянно расширяются благодаря появлению новых и совершенствованию уже известных компонент оптоэлектроники, главным образом, источников и приемников излучения. Среди таких компонент особенно динамично развиваются свето- (СД) и

фотодиоды (ФД) средневолнового ИК диапазона спектра, уже нашедшие применение в трассовых и портативных газоанализаторах углеводородов и углекислого газа [1, 2], в медицинской лазерной технике [3] и в пирометрах, измеряющих быстро меняющуюся температуру [4]. Наряду с одиночными ФД все более востребованными становятся фотоприёмные линейки и матрицы с плотноупакованными элементами, позволяющие регистрировать пространственное распределение излучения от удаленного объекта в области спектра 3-5 мкм. Такие линейки легко встраиваются в спектрометры, например, в спектрометр с дифракционной решеткой, что позволяет проводить спектрометрические измерения, не прибегая к механическому перемещению его оптических элементов. В работе [5] было показано, что при использовании одиночной гетероструктуры p-InAsSbP/n-InAs можно создать малоформатные матрицы, позволяющие не только эффективно регистрировать излучение в области 3 мкм в фотовольтаическом режиме, но и имитировать как положительный, так и отрицательный тепловой контраст на площади 2x2 мм при соответствующем смещении p-n перехода. Для области длин волн вблизи полос поглощения окислов углерода ($\lambda=4.3$ мкм для CO₂ и $\lambda=4.7$ мкм для CO) наименьшие собственные шумы при работе вблизи комнатной температуры были достигнуты в фотодиодах (ФД) на основе гетероструктур с активной областью из твердого раствора n-InAsSb и контактным слоем P-InAsSbP при облучении со стороны подложки n⁺-InAs (ФД типа BSI [6]) или при облучении широкозонного слоя P-InAsSbP с развитым анодом (ФД типа FSI [7]). В этой связи можно ожидать, что диодные линейки на основе указанных выше структур, чувствительные в области длин волн вблизи 3 - 4 мкм, могли бы составить конкуренцию линейкам и матрицам на основе «объемных» твердых растворов КРТ (МСТ) и/или на основе квантовых ямам. В последнем случае низкая токовая чувствительность обусловлена неэффективным поглощением ИК излучения из-за небольшой толщины фоточувствительных (активных) областей. Насколько нам известно, в литературе, в частности, в обзорах [8], сведения о линейках на основе «объемного» твердого раствора InAsSb отсутствуют.

В докладе мы обобщаем результаты наших предыдущих исследований касательно одиночных ФД для области спектра 3-5 мкм и матрицы ФД 3x3 ($\lambda_{\max}=3.4$ мкм), а также приводим предварительные данные, основанные на результатах исследований фотоэлектрических свойств монолитной диодной линейки 1x64 на основе двойной гетероструктуры P-InAsSbP/n-InAsSb/n⁺-InAs, освещаемой со стороны подложки n⁺-InAs (т.е. ФД типа BSI).

1. Образцы и методы исследований

Гетероструктуры P-InAsSbP/n-InAsSb, в которых фоточувствительным являлся слой из n-InAs_{1-x}Sb_x ($x=0.08-0.1$) толщиной 3-10 мкм, а контактным (ограничивающим) был широкозонный слой P-InAsSbP толщиной 2-3 мкм, выращивались на нелегированных или легированных оловом подложках n⁺-InAs (100) ($n^+=2\div4\cdot 10^{18}$ см⁻³), имеющих сдвинутый в коротковолновую область край поглощения из-за эффекта Мосса-Бурштейна. Подложки из InAs имели большую, чем в активной области, ширину запрещенной зоны, что в сочетании с электрическим ограничением на границе P-InAsSbP/n-InAsSb позволяло отнести исследованные структуры к классу двойных гетероструктур.

Методами многостадийной стандартной фотолитографии и «мокрого» химического травления на эпитаксиальной стороне были изготовлены структуры с составом в активной области n-InAs_{0.92}Sb_{0.08}, в которых элементы линейки размером 20x220 мкм, глубиной ~10 мкм и шагом 50 мкм имели общий катод (см. Рис.1 и Рис.2 с обозначениями). При этом общая длина линейки составляла 3.2 мм. Для одиночных ФД на основе n-InAs_{0.9}Sb_{0.1} диаметр мезы составлял 190 мкм. Сборка осуществлялась методом флип-чип, при этом часть одиночных ФД сопрягалась с иммерсионными линзами, имеющими рабочий диаметр 3.2 мм.

Для измерения спектральных характеристик ФД применялся монохроматор с призмой из LiF, источником излучения служил Глобар. Для определения токовой чувствительности применялась модель черного тела T = 573 К. Сопротивление, в нуле смещения (R_0) измерялось при напряжении $|U_{\text{bias}}| < 2$ мВ, расчет удельной обнаружительной способности (D^*) проводился по формуле Джонса: $D(\lambda_{\max})^* = S(\lambda_{\max}) \cdot (R_0 A_{p-n} / 4kT)^{1/2}$, где A_{p-n} – площадь p-n перехода в активной области, k – постоянная Больцмана, T – температура, $S(\lambda_{\max})$ – токовая фоточувствительность.

2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 3 показано ИК изображение обращенной к источнику поверхности n⁺-InAs при смещении одного из элементов линейки в обратном направлении (постоянный ток I = - 0.3 мА, 300 К). Справа и сверху от ИК изображения показано соответствующее распределение интенсивности излучения в «вертикальном» по отношению к рисунку и в «горизонтальном» направлениях. Помимо обычного для режима отрицательной люминесценции (ОЛ) понижения излучательной способности в электрически активной части p-n перехода отметим также и пониженную излучательную способность в области общего катода (слева на рисунке), свидетельствующую о том, что металл на границе раздела металл/полупроводник в указанной области является отражающим. При увеличении модуля обратного

Гетероструктуры и оптоэлектроника

тока интенсивность ОЛ возрастала и достигала своего максимума при токах $|I| = 0.3-0.5$ мА, что является характерным свойством приборов ОЛ [9].

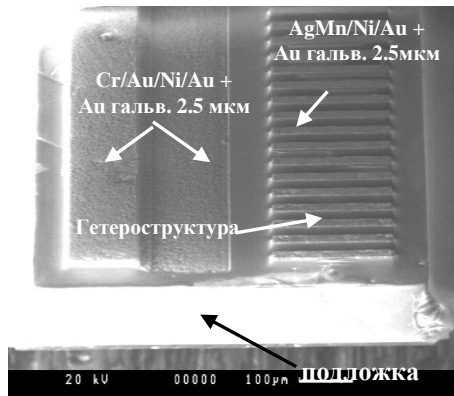


Рис. 1. Внешний вид чипа с линейкой ФД (справа на снимке) и общим катодом (слева на снимке) со стороны эпитаксиальных слоев.

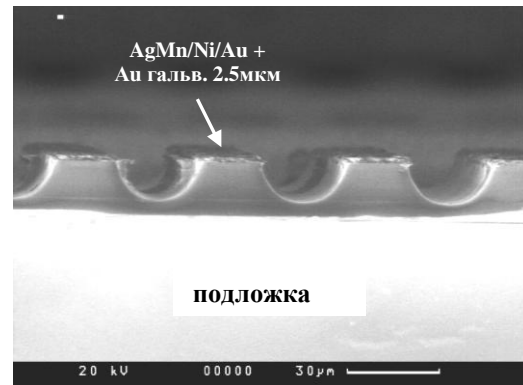


Рис. 2. Фото чипа со стороны скола (110). Белый фон в области подложки обусловлен морфологическими особенностями.

Как видно из рис. 3, поперечный размер области поглощения (темная прямоугольная область в центре рис. 3) несколько больше, чем поперечный размер мезы, и составляет по предварительной оценке около 33 мкм. Это не противоречит нашим прежним представлениям об увеличении площади сбора излучения в мезах с наклонными стенками, выполняющими роль внутренних концентраторов излучения [6, 10]. Тот же вывод о размере оптически активной зоны следует и из анализа пространственного распределения электролюминесцентного излучения при прямом смещении (см. рис. 4). При этом при токе 3.2 мА интенсивность излучения была эквивалентна интенсивности от черного тела с температурой 68 град.С.

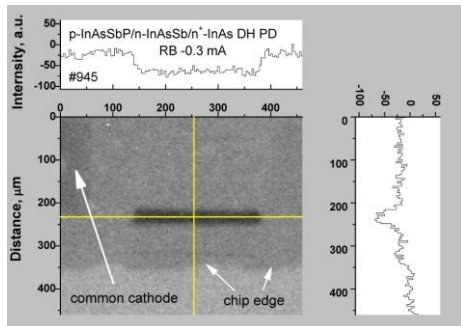


Рис.3. ИК изображение (460x460 мкм) поверхности чипа (n^+-InAs) с одним активированным элементом линейки ФД ($I = -0.3$ мА)

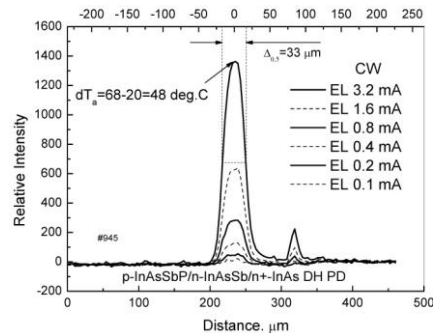


Рис. 4. Распределение интенсивности электролюминесценции вдоль «вертикального» (на рис.2) направления

На рис. 5 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) одного из элементов линейки, полученная при 297 и 77 К. В полулогарифмическом масштабе прямая ветвь ВАХ при комнатной температуре в области больших токов линеаризуется в соответствии с формулой Шокли для идеального диода ($\beta=1$), что свидетельствует о диффузионном характере токопрохождения. При температуре жидкого азота фактор идеальности β в модифицированной формуле Шокли $I = I_0 \exp(eU/\beta kT)$ близок к 3, что дает основания предполагать туннельный механизм протекания тока. Значение сопротивления в нуле смещения R_0 с учетом расчетного значения тока I_0 в точке пересечения теоретической зависимости с осью ординат и с учетом известного соотношения $R_0 = \beta kT / eI_0$ составило 0.23 (297 К) и 66374 (77 К) кОм, что соответствует значениям $R_0 \cdot A = 0.01$ и 2920 Ом·см². В то же время, прямые измерения значения динамического сопротивления при «нулевом смещении», произведенные при использовании малых смещений ($|U| < 0.002$ В), показали несколько меньшее значение, например, $R_0 = 130$ Ом ($R_0 \cdot A = 0.007$ Ом·см², 297 К). Из сопоставления значений R_0 , полученных вышеуказанными способами при 297 К, можно сделать предположение, что при малых смещениях р-п перехода существенными становятся туннельные токи. В области низких температур в области малых токов, как видно из Рис.4, также имеют место особенности, отличающие данные образцы от идеального диода Шокли, однако для детального их обсуждения данных пока недостаточно.

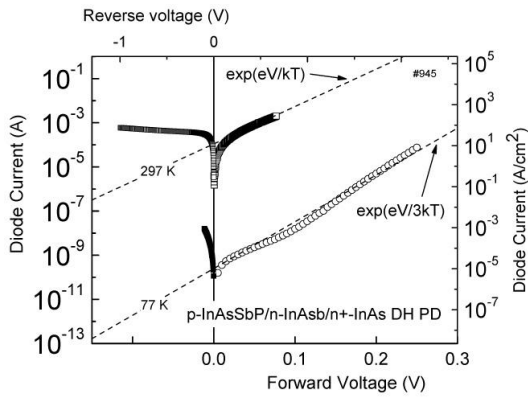


Рис. 5. ВАХ одного из элементов линейки при 77 и 297 К

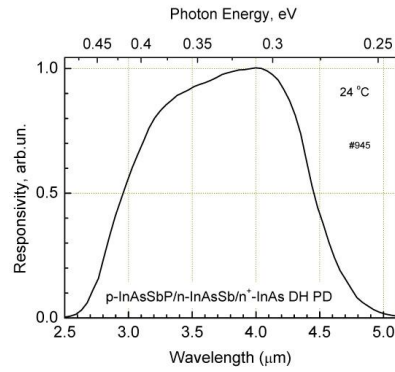


Рис. 6. Спектральная зависимость чувствительности $S(\lambda)$ при 297 К

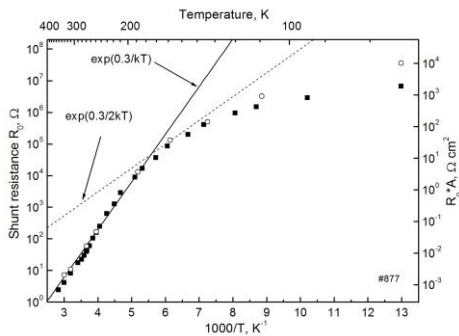


Рис. 7. Зависимость R_0 от температуры в ФД на основе $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$

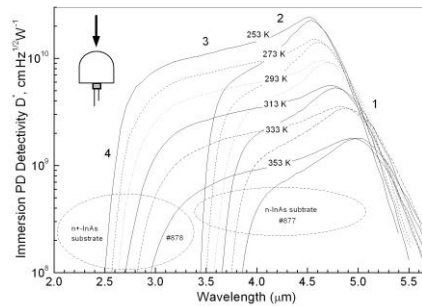


Рис. 8. Спектр обнаружительной способности иммерсионного ФД на основе $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ с подложками двух типов ($n\text{-InAs}$ и $n^+\text{-InAs}$) при разных температурах.

На рис. 6 представлена спектральная зависимость токовой фоточувствительности элемента линейки $S(\lambda)$, повторяющая таковую для одиночных ФД, описанных в [6]. Как и в [6], коротковолновый край спектра фоточувствительности определяется оптическим пропусканием подложки $n^+\text{-InAs}$, а потому может быть изменён путем предварительного выбора степени легирования последней. Значение токовой фоточувствительности типичного элемента линейки в максимуме спектральной кривой при засветке целиком всей её поверхности и в предположении о том, что $A_{\text{опт}}=A_{\text{мезы}}$, составило $S(\lambda_{\text{max}}) \sim 4 \text{ A/Вт}$. Наиболее вероятной причиной достаточно высоких значений $S(\lambda_{\text{max}})$, как это уже обсуждалось нами ранее (см., например, [10]), является влияние фотонов, входящих в чип вдалеке от исследуемого элемента и однократно или многократно отраженных внутри кристалла. Такое отражение и последующее поглощение в фоточувствительной области ФД дает дополнительный вклад в фототок и может эффективно происходить в тех частях чипа, где удален слой InAsSb . К таким частям относятся, например, канавки разделения элементов, имеющих сравнимую с фоточувствительными элементами оптическую площадь. Помимо этого в общий «блуждающий» по кристаллу радиационный фон вносят свою лепту и области вблизи краев чипа, а также часть катода в месте его электрического контакта с подложкой $n^+\text{-InAs}$. Разумеется, «истинная» токовая фоточувствительность, относящаяся к засветке только одного элемента меньше, чем вышеуказанные значения $S(\lambda_{\text{max}})$. Исходя из геометрии чипа и соотношения площадей, занятых элементами линейки и катодом, мы полагаем, что реальная токовая фоточувствительность при затенении катода и межмезовых канавок разделения составит около 50% от заявленной выше величины. С учетом этого допущения, а также имея в виду преобладание теплового Джонсоновского шума в наших ФД, обнаружительная способность в максимуме спектральной кривой составила $D(\lambda_{\text{max}})^* \approx 10^9 \text{ см Гц}^{-1/2} \text{ Вт}^{-1}$, что сопоставимо с полученными ранее значениями для одиночных ФД на основе InAsSb большой площади [6, 7, 8], а значения темновых токов при низких температурах сопоставимы с токами в диодах на основе сверхрешеток InAs/GaSb [11].

ВАХ одиночных ФД, имеющих в активной области $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0.1$), был аналогичен ВАХ, приведенным на рис. 5; фактор идеальности для прямой ветви увеличивался от 1 до 3 при уменьшении температуры от 300 до 77 К. На рис.7 представлена температурная зависимость сопротивления в нуле смещения, которая при $T > 200 \text{ К}$ имеет наклон, соответствующий диффузионному характеру прохождения тока. Спектры фоточувствительности, как и в ФД на рис.6, имели затянутое в коротковолновую область плечо, максимум соответствовал длине волны 4.7 мкм (300 К) (см. рис. 8).

Благодаря незначительному снижению токовой чувствительности (с 1.5 до 1 А/Вт) с понижением температуры обнаружительная способность существенно возросла, что подтверждает разумность и важность использования термоэлектрического охлаждения для применения подобных ФД в аналитической аппаратуре.

3. Заключение

Таким образом, разработаны методы создания диодной линейки 1x64 на основе двойной гетероструктуры P-InAsSbP/n-InAsSb/n⁺-InAs, для регистрации двумерного распределения излучения на поверхности размером 0.2x3.2 мм, при этом показана возможность получения эквивалента как положительного, так и отрицательного теплового контраста и регистрации потоков излучения с высокой обнаружительной способностью при комнатной температуре в спектральной области вблизи 4 мкм.

Авторы выражают благодарность Петрову А.С. (ОАО «ЦНИИ Электрон») за полезные обсуждения, а также Закгейму А.Л. и Чернякову А.В. (Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН) и Поповой Т.Б. (ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях») за помощь в проведении измерений. Работа, выполненная в ООО «ИоффеЛЕД», поддержана проектом ФЦП "Разработка технологии получения полупроводниковых фоточувствительных материалов для матричных инфракрасных фотоприемников и тепловизоров"(код контракта 14.576.21.0057). Работа в части проведения оптических измерений (Лавров А.А.) поддержана проектом РНФ № 14-12-00255.

Литература

1. Б.А. Матвеев, «Светодиоды средневолнового ИК-диапазона на основе гетероструктур A^3B^5 в газоаналитическом приборостроении. Возможности и применения», 2014, Фотоника, №6 (48), стр.80-90.
2. M. Köhring, S.Böttger, U. Willer, W. Schade, «LED-Absorption-QEPAS Sensor for Biogas Plants», Sensors (Basel). 2015 May; 15(5): 12092–12102. Published online 2015 May 22. doi: 10.3390/s150512092.
3. S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, G.Yu. Sotnikova, A.L. Ter-Martirosyan, “Fiber tip temperature controlling system for fiber output laser modules in medical equipment”, Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 129–134.
4. G.Yu. Sotnikova, S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov et al, «Radiometric temperature measurements using In(Ga)As(Sb) backside illuminated photodiodes», Abstract of the 42-th Freiburg Infrared Colloquium, 3-4 March 2015, pp.89-90.
5. Н.Д. Ильинская, С.А.Карандашев, Н.Г.Карпукхина и др., «Диодные матрицы формата 3x3 на основе одиночных гетероструктур p-InAsSbP/n-InAs», Прикладная физика, № 6, стр. 47-51(2014).
6. А.Л. Закгейм, Н.В.Зотова, Н.Д.Ильинская и др., «Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ($\lambda_{\text{cut off}}=4.5$ мкм)», ФТП, том 43, №3, стр. 412-417 (2009).
7. Н.Д. Ильинская, А.Л. Закгейм, С.А. Карандашев и др., «Поверхностно облучаемые фотодиоды на основе InAsSb (длинноволновая граница $\lambda_{0,1} = 4.5$ мкм), работающие при температурах 25–80°C», ФТП, том 46, №5, стр. 708 -713 (2012).
8. Antony Rogalski, Infrared Detectors, 2-nd edition, International Standard Book Number: 978-1-4200-7671-4, CRC press, Taylor and Francis group, 2012,
9. В.И. Иванов-Омский, Б.А. Матвеев, «Отрицательная люминесценция и приборы на ее основе (обзор)», ФТП, том 41, №3, стр. 257-268 (2007).
10. Б. Матвеев, “К вопросу о терминологии в средневолновой инфракрасной оптоэлектронике”, Фотоника, №3 (51), стр. 152-164 (2015).
11. L. Zhang, W. Sun, Y. Xu et al, “Growth and electrical characterization of type II InAs/GaSb superlattices for midwave infrared detection”, Infrared Physics and Technology, v.65, pp. 129-133 (2014).

Контакт: Матвеев Б.А., ioffeled@mail.ru , www.mirdog.spb.ru

MID-IR SINGLE AND MATRIX PHOTODIODES BASED ON p-InAsSbP/n-InAs(Sb) HETEROSTRUCTURES

N. D. Il'inskaya¹, S. A. Karandashev¹, N.G. Karpukhina², A. A. Lavrov¹,
B. A. Matveev^{1,2}, M. A. Remennyi^{1,2}, N. M. Stus'1¹, A.A.Usikova¹

¹ The Ioffe Institute of RAS
² “IoffeLED” LLC., St Petersburg

Here we present an overview of mid-IR (3-5 μm) single and matrix photodiodes developed at Ioffe Institute and IoffeLED company (both in St.Petersburg, RF) with emphasis on new 1x64 array based on p-InAsSbP/n-InAsSb double heterostructure sensitive in the 4 μm range. Under discussion are spectral and spatial response, I-V characteristics and current flow mechanisms in the 77-300 K temperature range as well as detectivity.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОРГАНИЧЕСКИЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ ДИОД КРУГОВОГО RGB ИЗЛУЧЕНИЯ

д. ф.-м. н. А. М. Бобрешов, Е.В. Золотухин, к. т. н. А. Г. Кошелев

Воронежский государственный университет

Предложен объемный органический светоизлучающий диод (воксел) с многоканальным круговым RGB излучением информации, обеспечивающий повышение основных технических характеристик (скорости передачи данных, степени защиты информации от не санкционированного доступа и пр.), а также расширяющий границы его применения, в частности, в области создания дисплея трехмерного изображения. В работе представлены некоторые результаты исследований, проводимые в области передачи информации с помощью троичного счисления и оптической приемо-передающей системы.

Прогресс в развитии технологий производства органических полупроводниковых светоизлучающих диодов, обеспечивающих, по сравнению с жидкокристаллическими и плазменными (пассивными) излучателями, более высокие конструктивно-технологические, электрические и энергетические характеристики [1], привел к бурному росту их применения в современных устройствах отображения видеoinформации, включая мобильные телефоны, телевизоры, мониторы и пр.

Другой аспект актуальности использования данных светоизлучающих диодов заключается в возможности их использования в перспективных устройствах формирования реального трехмерного изображения [2, 3], обеспечивающих, по сравнению с двумерными изображениями, более высокую степень достоверности и качества.

Наконец, анализ современного состояния органических светоизлучающих диодов показывает, что обладая большой яркостью излучения (> 5000 кд/м²), малым временем отклика (< 1 мкс) и низким энергопотреблением, данные приборы, могут найти широкое применение в приемо-передающих системах оптического диапазона электромагнитных волн, в частности, в устройствах передачи кодированного сигнала изображения, обладающего высокой степенью защиты от не санкционированного доступа.

В процессе исследований, проводимых на физическом факультете Воронежского государственного университета, авторами настоящего доклада была разработана и запатентована конструкция объемного многоканального органического светоизлучающего диода (воксела) [4], направленная на расширение технических и функциональных характеристик органических светодиодов.

На рис.1, 2 представлена в упрощенном виде конструкция светоизлучающего диода с круговым многоканальным (многоцветным) излучением основных независимых RGB цветов [4]. Воксел содержит общий катод и прозрачные аноды (их число может различаться в зависимости от поставленной задачи), между которыми расположены полупроводниковые материалы (эмиссионные слои), способные при подаче напряжения на их электроды соответственно излучать красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue) цвета.

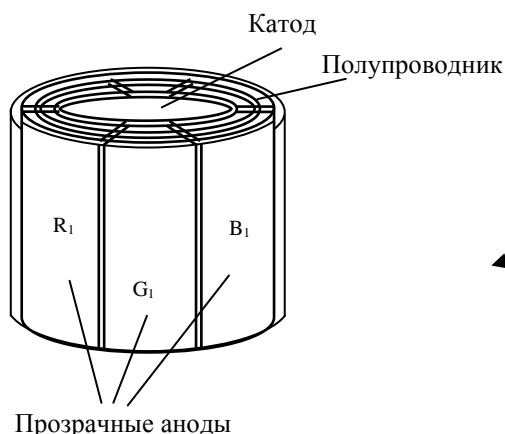


Рис.1. Упрощенная конструкция многоканального органического RGB воксела

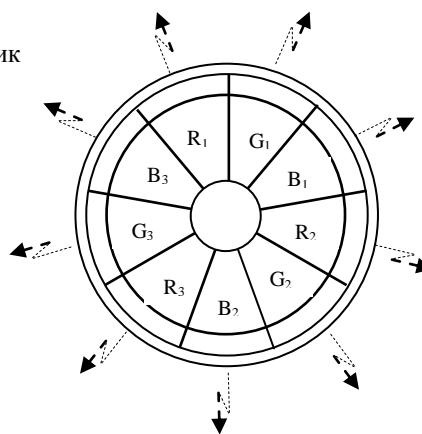


Рис.2. Упрощенная конструкция многоканального органического RGB воксела вид сверху в разрезе

Многоканальный воксел способен излучать одновременно наборы из цветов нескольких длин волн: красный, синий и зеленый. Его особенность состоит в том, что цвета $R_1, G_1, B_1, \dots, R_n, G_n, B_n$ излучения,

чередуются по окружности, формируя, например, направление белого цвета, исходя из колориметрического уравнения:

$$E_Y = 0,3E_R + 0,59E_G + 0,11E_B..$$

Одним из перспективных направлений применения воксела – это возможность передачи и кодирования информации с помощью троичного счисления, присваивая, например, каждому базовому цвету соответствующий тритовый символ, например, красному – (1), зеленому – (0), синему (-1). Троичный передатчик, который позволит передавать троичный код, содержащий информацию, можно построить на устройстве передачи информации, основанном на объемном многоканальном RGB излучающем вокселе [4].

Рассмотрим это на примере кодирования изображения по стандарту JPEG. Он относится к методам сжатия изображений с потерями и используется в основном при записи неподвижных изображений с целью экономии объема запоминающих устройств. Последовательность операций при кодировании, поясняемая структурной схемой на рис.3, включает:

- разбиение изображения на блоки 8x8 пикселей;
- выполнение быстрого ДКП (БДКП) в каждом блоке;
- квантование полученных коэффициентов ДКП с использованием таблицы коэффициентов квантования (таблица Q);
- энтропийное кодирование квантованных коэффициентов ДКП каждого блока изображения.

При этом развертка каждого блока 8x8 происходит построчно – слева направо и сверху вниз

Последняя операция выполняется кодером Хаффмана с использованием таблицы кодирования (таблица кодов). Вместо кодера Хаффмана может использоваться арифметический кодер.

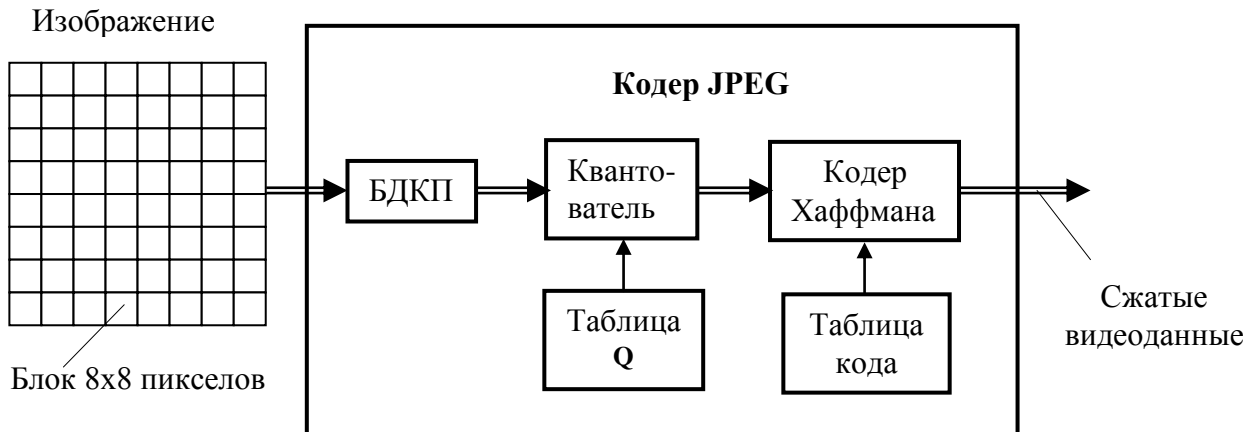


Рис. 3. Структурная схема кодирования по стандарту JPEG

По стандарту JPEG блок 8x8 пикселей развертывается построчно. Цветное изображение представлено в формате RGB, когда для каждого пикселя заданы значения трех цветов. В этом случае каждый блок 8x8 пикселей представлен тремя блоками 8x8 чисел, и каждый из них развертывается построчно [5]. Соответственно повышается время передачи информации об изображении. Многоканальность воксела и использование троичного кодирования делают возможной одновременную передачу всех цветов каждого пикселя, а построчная развертка заменяется одновременной разверткой сразу всех восьми строк из восьми пикселей (рис.4). Каждый RGB-сегмент воксела отвечает за конкретный пиксел в соответствующей строке блока. Это позволяет существенно сократить время, требуемое для передачи изображения.

В данном случае используется RGB воксел, содержащий по 8 RGB сегментов направленных равномерно по окружности к соответствующим фотоприемникам, преобразующим свет определенного цвета и интенсивности в электрический сигнал. Далее производится троичная кодировка сигналы в соответствии с определенными цветами, например, для красного цвета (R) – (-1), для зеленого цвета (G) – (0), для синего цвета (B) – (+1). Затем каждый кодированный сигнал подается на вход соответствующего кодера, например, кодера JPEG. Причем, все кодированные сигналы подаются на соответствующие кодеры одновременно.

Таким образом, скорость развертки блоков кадра возрастает в 8 раз.

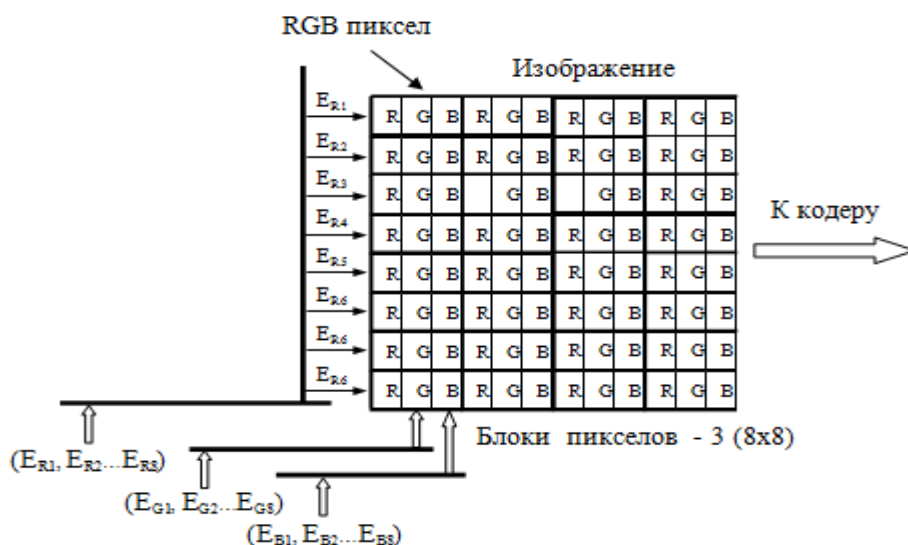


Рис. 4. Одновременная развертка 8 строк каждого блока RGB пикселей

Другим применением многоканального светоизлучающего вокселя – это использование его для передачи информации на расстояние с помощью оптической приемо-передающей системы.

Одним из направлений оптической передачи данных является передача данных по атмосферному оптическому каналу связи (FSO – Free Space Optics). Импульс светового излучения при прохождении в атмосфере практически не испытывает дисперсионных искажений фронтов, характерных для любых оптических волокон. Это принципиально позволяет передавать поток данных со скоростями до нескольких терабит в секунду. К основным преимуществам такого способа передачи информации можно отнести: высокие скорости передачи, простота установки, а также работа в свободной области частотного диапазона. В настоящее время технология FSO обеспечивает передачу цифровых потоков до 10 Гбит/с.

Современное состояние FSO технологии позволяет создавать надежные каналы связи на расстояниях от 100 до 1500-2000 м в условиях атмосферы и до 100 000 км в открытом космосе, например для связи между спутниками. Являясь альтернативным решением по отношению к оптоволокну, атмосферные оптические линии передачи данных (АОЛП) позволяют сверхоперативно сформировать беспроводный оптический канал связи (мобильные системы с автонаведением обеспечивают установление связи за 10-15 минут) при значительно меньших затратах [6]. На основе технологии FSO выполнены изделия ARTOLINK серии M1, предназначенные для беспроводной полнодуплексной передачи цифровых данных между двумя точками с активным оборудованием. В настоящее время данная серия включает в себя модели, обеспечивающие сопряжение с наиболее популярными в России протоколами передачи данных - E1, Ethernet и Fast Ethernet. Изделия серии M1 применяются при организации телекоммуникационных сетей интегрированного обслуживания, локальных вычислительных сетей, обеспечении доступа в Интернет, соединении базовых станций сотовой связи, АТС и в других случаях, когда нужно высокоскоростное и экономичное решение для передачи информации между пространственно разнесенными объектами (зачастую разделенными естественными и искусственными преградами - реками, мостами, эстакадами, автотрассами и т.д.) [6]. Использование приемо-передающего устройства на основе вокселя [4] для осуществления передачи данных по оптическому атмосферному каналу позволяет усовершенствовать устройство ARTOLINK. Многоканальность вокселя позволяет передавать данные не в каком-то одном фиксированном направлении, а в диапазоне 360 градусов. Также появляется возможность отправлять и получать несколько параллельных потоков данных в каждом направлении.

Исходя из полученных выше результатов анализа многоканального органического светодиода кругового RGB излучения можно заключить следующее.

Конструктивно-технологические и выходные электрические характеристики многоканального органического светодиода кругового RGB излучения (его многоканальность и круговое одновременное излучение разных длин световых волн в заданной последовательности), позволяет:

1. Обеспечить в оптических приемо-передающих устройствах высокую скорость передачи данных и высокую степень ее защиты от несанкционированного доступа.
2. Использовать их, как в беспроводной передаче данных на расстояние по оптическому каналу связи, так и по каналам межблочной связи.

3. Использовать их для передачи данных по атмосферному оптическому каналу связи (FSO – Free Space Optics), так как импульс светового излучения при прохождении в атмосфере практически не испытывает дисперсионных искажений фронтов, характерных для любых оптических волокон. Это принципиально позволяет передавать поток данных со скоростями до нескольких терабит в секунду.

4. К основным преимуществам такого способа передачи информации можно отнести: высокие скорости передачи, простота инсталляции, а также работа в свободной области частотного диапазона. В настоящее время технология FSO обеспечивает передачу цифровых потоков до 10 Гбит/с.

Использование троичное кодирование в указанном устройстве повышает скорость и объем передаваемой информации, а также упрощает само устройство. Особенно это видно при передаче информации о цвете изображения. Открывается возможность уйти от координат цветности к более простой троичной кодировке, а также применять ее для обработки объемных изображений. Если воксел, лежащий в основе этого устройства, адаптировать к работе с троичной логикой, то можно добиться перехода от построчной развертки изображения к одновременной развертке трех и более строк. При этом основные константы троичной системы счисления 0, 1 и -1 должны кодироваться зеленым, красным и синим цветом соответственно. Таким образом, в перспективе можно получить системы передачи изображения, превосходящие современные по скорости и объему передаваемой информации.

Литература

1. Самарин А.В. Жидкокристаллические дисплеи. Схемотехника, конструкция и применение/А.В.Самарин – М.: СОЛОН-Р, 2002. с. 188 - 195..
2. Митилин С. Трёхмерные дисплеи: обзор технологий. Компьютерное обозрение. 35, 12 – 18 сентября 2001
3. Патент РФ №2366005, опубл. 27.08.2009. Бюл.№ 24. Устройство формирования изображения.
4. Бобрешов А.М., Кошелев А.Г., Золотухин Е.В. Патент РФ №2548603 «Органический светоизлучающий диод» от 23.03.2015г.
5. Бобрешов А.М., Кошелев А.Г. Цифровая обработка ТВ сигналов, часть 2, Учебное пособие по специальности «Радиофизика и электроника», ВГУ, Воронеж, 2004 г.
6. Зеленюк Ю.И.; Огнев И.В.; Поляков С.Ю.; Широбакин С. Заявка «Устройство двусторонней оптической связи» № 99113518/09 от 21.06.1999г. Положительное решение о выдаче патента от 27.08.2000

THE OLED DIODE WITH CIRCULAR MULTICHANNEL RGB RADIATION

A. M. Bobreshov, E. V. Zolotukhin, A. G. Koshelev

Voronezh State University

An organic light emitting diode (voxel) with multichannel circular radiation of the information is offered. It provides increase of simple OLED diode's basic technical characteristics (speed of data transmission, degree of protection of the information from unapproved access), and also expands borders of its application, in particular, in the field of creation of the three-dimensional displays. Some results of researches in area of information transfer by means triple coding and optical transmitting system are presented.

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕТЕРОЛАЗЕР С УВЕЛИЧЕННОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ И УЗКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

к.ф.-м.н. Звонков Б.Н., к.ф.-м.н. Байдусь Н.В.¹, к.ф.-м.н. Некоркин С.М.¹,
д.ф.-м.н. Алешкин В.Я.², к.ф.-м.н. Дубинов А.А.², Рыков А.В.¹, Колпаков Д.А.¹

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им Н.И. Лобачевского

² Институт физики микроструктур РАН

Одной из основных задач при создании мощных инжекционных лазеров является увеличение выходной оптической мощности без существенного ухудшения диаграммы направленности излучения. Лазеры с узкой диаграммой направленности необходимы для оптических систем, которые используются в медицинских приборах; в целом актуальны для создания схем, требующих заведения лазерного излучения в оптическое волокно (например, в сетях передачи данных); находят применение в системах локации и целеуказания. Диаграмма направленности типичных полупроводниковых лазеров обычно имеет угловые размеры около 10° в параллельной и 30° в перпендикулярной р-п-переходу плоскостях, и такая форма пятна требует дополнительной фокусировки для практического применения. Однако существуют методы обужения диаграммы направленности полупроводниковых лазеров при помощи использования специального дизайна гетероструктур, среди которых можно выделить вывод излучения через подложку или использование сверхширокого волновода.

Стоит отметить, что авторами данной работы ранее были проведены детальные исследования многоямных полупроводниковых лазеров с выходом значительной части излучения через подложку [1-3]. Также особого внимания заслуживает работа Б.Н. Звонкова [4], в которой впервые в России был создан и продемонстрирован лазер с выходом излучения через подложку на системе материалов InGaAs/GaAs/InGaP, выращенный методом МОС-гидридной эпитаксии в НИФТИ ННГУ.

В данной работе приводится результат исследования, в ходе которого авторами выявлен новый механизм обужения диаграммы направленности многоямного гетеролазера. Исследованные гетероструктуры выращены в НИФТИ ННГУ на установке AIX200RF методом МОС-гидридной эпитаксии. Исследуемые гетеролазеры содержат в активной области 5 квантовых ям InGaAs и работают в ближнем ИК - диапазоне около длины волны $\lambda = 985$ нм. Конструкция лазера представляет собой промежуточное решение между лазером с выходом излучения через подложку [1] и лазером со сверхшироким волноводом [5]. В допороговом режиме работы отмечена конкуренция выхода излучения через подложку и из волноводного слоя, однако у большинства образцов с различными длинами резонатора и зеркалами отмечено устойчивое формирование диаграммы в 0° при увеличении тока до 10А и более (импульсный режим, $t_{\text{имп}} = 180$ нс, $f = 1,43$ кГц), что соответствует выходу излучения из волноводного слоя.

В исследуемой лазерной гетероструктуре обужение диаграммы направленности обусловлено тем, что фундаментальная мода локализуется не только в волноводе, а распространяется в подложку на глубину более 10 мкм. На рис. 1 показана расчетная зависимость величины электрического поля по глубине

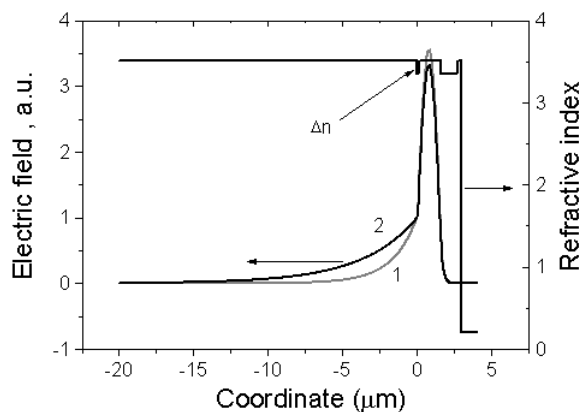


Рис. 1 Расчетная зависимость показателя преломления и величины электрического поля от глубины при значениях скачка показателя преломления $\Delta n=0.0011$ (1) и $\Delta n=0.0006$ (2)

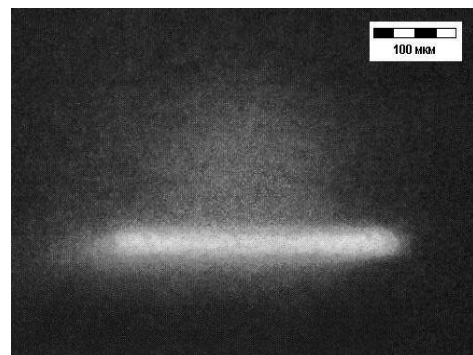


Рис. 2 Ближнепольный снимок излучения передней грани лазера, работающего в импульсном режиме ($I = 40\text{А}$; $t_{\text{имп}} = 4$ мкс)

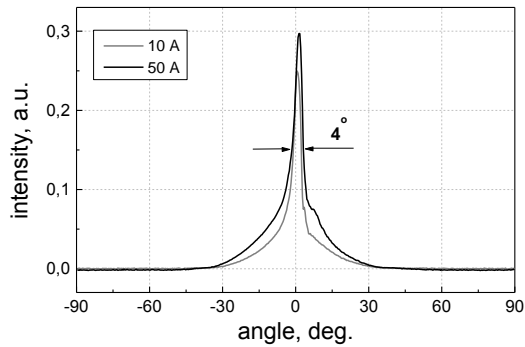


Рис. 3 Диаграмма направленности излучения в плоскости перпендикулярной р-п-переходу при токах накачки 10А (серый) и 50А (черный)

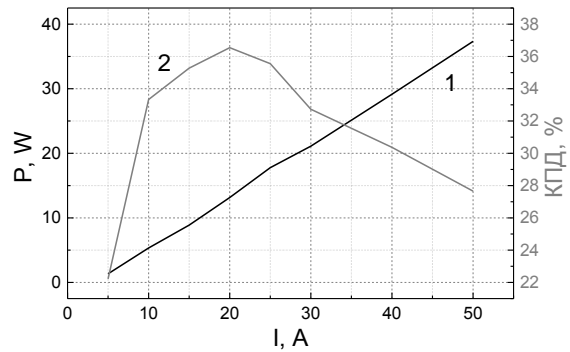


Рис. 4 Зависимость пиковой мощности излучения (1) и КПД (2) от тока накачки

структуры: видно, что амплитуда поля, проникающего в подложку, возрастает с уменьшением скачка показателя преломления на границе волноводного и ограничительного слоев. Также на рис. 2 приведен ближнепольный снимок излучения передней грани лазера, работающего в импульсном режиме ($I = 40\text{А}$; $t_{\text{имп}} = 4\text{ мкс}$; $f = 1\text{ кГц}$). Видно, что излучение выходит не только из волновода (яркая полоса), но и из подложки (свечение сверху), что согласуется с расчетной зависимостью на рис. 1.

Такое распределение поля достигнуто благодаря подбору толщины ограничительных слоев AlGaAs с пониженным (30%) содержанием алюминия, что обеспечивает минимальную разницу эффективного показателя преломления возбуждаемой моды и показателя преломления подложки. Благодаря этому излучение частично выходит в подложку, что равнозначно увеличению апертуры лазерного диода в плоскости перпендикулярной р-п-переходу пропорционально глубине проникновения поля в подложку. Вследствие этого мы можем наблюдать существенное обужение диаграммы направленности, которое связано с тем, что увеличивается выходная апертура волновода. Кроме того, расширенная апертура делает такие лазеры значительно более устойчивыми к катастрофической оптической деградации, связанной с повреждением выходного зеркала излучением с высокой плотностью мощности. Отличительной особенностью данной конфигурации лазера также является положение пика на диаграмме направленности в плоскости перпендикулярной р-п-переходу: у лазеров с выходом излучения через подложку угловое положение пика обычно варьируется в пределах от 10° до 30° , а у данного лазера излучение выходит по центру, в 0° (рис. 3). Таким образом, при монтаже таких структур нет необходимости в использовании теплоотводов с отклоненной гранью, что упрощает технологический цикл.

Была получена высокая выходная оптическая мощность (более 30 Вт при 50 А), а максимальное достигнутое значение КПД составило 36% при токе накачки 20 А (рис. 4). Минимальная ширина диаграммы направленности в плоскости перпендикулярной р-п-переходу составила 4° при токе накачки 50 А для образца с длиной резонатора 650 мкм (рис. 3). Полученные результаты хорошо согласуются с расчетными данными. Таким образом, данный лазер представляет собой эффективный импульсный генератор когерентного света, который может успешно заменить импортные образцы приборов подобного типа.

Литература

1. В. Я. Алешкин, Т. С. Бабушкина, А. А. Бирюков, А. А. Дубинов, Б. Н. Звонков, М. Н. Колесников, В. И. Некоркин, Квант. электрон., 40:10 (2010), 855–857;
2. С. М. Некоркин, Б. Н. Звонков, М. В. Карзанова, Н. В. Дикарева, В. Я. Алешкин, А. А. Дубинов Квант. электрон., 42:10 (2012), 931–933
3. Н. В. Дикарева, С. М. Некоркин, М. В. Карзанова, Б. Н. Звонков, В. Я. Алешкин, А. А. Дубинов, А. А. Афоненко, Квант. электрон., 44:4 (2014), 286–288
4. Н. Б. Звонков, Б. Н. Звонков, А. В. Ершов, Е. А. Ускова, Г. А. Максимов, Квант. электрон., 25:7 (1998), 622–624
5. Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, Н.В. Дикарева, И.В. Самарцев, Д.А. Колпаков / ФТП, 49:12 (2015), 1619-1622.

SEMICONDUCTOR HETEROLASER WITH ENLARGED ACTIVE REGION AND NARROW DIRECTIVITY DIAGRAM

B.N. Zvonkov¹, N.V. Baidus¹, S.M. Nekorkin¹, V.Y. Aleshkin²,
A.A. Dubinov², A.V. Rikov¹, D.A. Kolpakov¹

¹ Research Institute for Physics and Technology of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

² Institute for Physics of Microstructures of RAS

Heterolaser with multiple quantum wells with narrow directivity diagram and partial output of radiation through the substrate was produced. It has been shown that significant narrowing of directivity diagram caused by effect when fundamental mode isn't fully localized in waveguide, but also spreads into substrate for depth more than 10µm. This effect is achieved due to reduced (30 %) concentration of Al in AlGaAs emitting layers. In this case refractive index difference is close to zero on border of waveguide and substrate. High output optical power (30W and higher) was demonstrated. Minimal width of directivity diagram is 4° in perpendicular to p-n-junction plain at 50A impulse current. Experimental results match theoretical calculations.

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ InAs(Sb,P) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ CH₄

к.ф.-м.н. Кижаев С.С., к.ф.-м.н. Калинина К.В., к.ф.-м.н. Петухов А.А., Гурина Т.И.,
Миронова А.Н., к.ф.-м.н. Черняев А.В., к.ф.-м.н. Стоянов Н.Д., д.ф.-м.н. Салихов Х.М.

ООО Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург

В настоящий момент для детектирования метана используют сенсоры, работающие на основе разных принципов: оптические, электрохимические, полупроводниковые, термокаталитические. Оптические сенсоры обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами: высокая селективность, чувствительность, длительный срок службы, для них безопасны химически агрессивные вещества и соединения, выводящие из строя химические датчики, оптическим сенсорам не страшны концентрационные перегрузки вплоть до 100% концентрации определяемого газа. Существующие на рынке компактные оптические сенсоры работают на основе тепловых источников ИК излучения и пироэлектрических детекторов. Оптические сенсоры производства Dynament Ltd. (Великобритания) позволяют проводить измерения метана в диапазоне концентраций 0-5 об.%, 0-100 об.% с разрешением – 0,01% (для диапазона 0-10 об.%) и 0,1% (для диапазона 10-100 об.%). Однако в последнее время при выборе сенсора потребитель предъявляет дополнительное требование, связанное с низким энергопотреблением. Уменьшение энергопотребления необходимо для разработки датчиков и систем, работающих в автономном режиме в течение нескольких лет, с возможностью передачи данных по беспроводным каналам связи (ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth). Потребление лучших оптических сенсоров, таких как Dynament, составляет 200-400 мВт, и это значение достаточно велико для обеспечения непрерывной работы датчика от батареи в течение продолжительного времени. Предлагаемый нами новый сенсор метана на основе ИК свето- и фотодиодов сочетает в себе преимущества существующих оптических сенсоров на базе тепловых ИК источников и при этом отличается низким энергопотреблением ~3,5 мВт (в 100 раз лучше, чем у функциональных аналогов), высоким быстродействием, может быть использован как для промышленных, так и для бытовых целей.

Ключевые компоненты нового сенсора – ИК светодиоды (СД) и фотодиоды (ФД), работающие в области длин волн 3-4 мкм на основе InAs и его твердых растворов с применением InSb, InP, GaSb [1–3], – разрабатываются нашей компанией ООО «Микросенсор Технолоджи». Достигнутые на данный момент характеристики диодов позволили создать на их базе первый прототип сенсорного модуля, однако, полученные значения чувствительности выявили необходимость оптимизации параметров диодов. Ширина спектра излучения СД сравнима с шириной полосы поглощения метана вблизи 3,20-3,45 мкм, благодаря чему отпадает необходимость использования дополнительного фильтра. Однако максимум излучения СД находится на длине волны ≈ 3,50 мкм, т.е. смещен относительно полосы поглощения метана в длинноволновую область (рис.1а, кривая 1). Широкополосный ФД полностью перекрывает полосу поглощения метана (рис.1б, кривая 1) и обеспечивает удовлетворительный сигнал. Дополнительного снижения уровня шумов можно добиться за счет использования ФД с более узким спектром.

Основной задачей данного исследования являлась оптимизация спектральных параметров СД с точки зрения соответствия максимума излучения СД положению полосы поглощения метана путем вариации

технологических параметров, проведены испытания сенсорного модуля на основе оптимизированных диодов.

Светодиодные гетероструктуры (№1, 2, 3) были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) в соответствии с методикой, изложенной в работе [3]. Светодиодные чипы размером $0,38 \times 0,38$ мм создавались методом стандартной фотолитографии. Применялась контактная система на основе многослойной композиции $\text{Cr} - \text{Au} - \text{Ni} - \text{Au}$. С эпитаксиальной стороны структур №1 и №2 формировался сплошной контакт, со стороны подложки p-InAs (легированной S , $n \sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) формировался кольцевой контакт с внутренним диаметром 200 мкм и шириной кольца 35 мкм. Рабочая площадь светодиода составила $S_{\text{сд}} \approx 0,09 \text{ мм}^2$. Структура №3 была выращена на подложке p -типа и имела противоположное расположение контактов – сплошной контакт со стороны подложки и кольцевой – со стороны эпитаксиального слоя. Образцы монтировались на корпуса ТО-18.

Спектральные характеристики СД и ФД были измерены на нашей лабораторной базе с использованием установок на основе монохроматора МДР-41 (производства ОКБ «Спектр», ЛОМО, Санкт-Петербург). На рис.1а представлены спектры электролюминесценции различных светодиодов и характеристическая полоса поглощения CH_4 вблизи 3,20-3,45 мкм.

Первоначально полученный образец СД №1 имел спектр излучения, представленный на рис. 1а (кривая 1), смещенный относительно максимума поглощения метана. При изготовлении следующего образца СД №2 были изменены параметры роста структуры, за счет чего удалось сместить максимум спектра СД в коротковолновую область $\approx 3,38$ мкм. Для обеих структур №1 и №2 использовалась p-InAs подложка, на которой выращивался нелегированный слой p-InAs (активная область) и затем легированный до $n \approx 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ широкозонный барьерный слой InAsSbP:Zn . Вследствие диффузии Zn во время роста барьерного слоя большая часть активной области меняла тип проводимости (становилась p -типа) благодаря эффекту перекомпенсации. Во время роста барьерного слоя величина потока диэтилцинка (DeZn) для структур №1 и №2 значительно различалась. Для структуры №1 эффект перекомпенсации оказался выражен сильнее; при этом выше степень заполнения акцепторных уровней дефектов, имеющих в InAs некоторый разброс по энергии (что эквивалентно некоторому подъему квазиуровня Ферми). В результате переходы электронов осуществлялись с более глубоких акцепторных уровней, что и приводило к уменьшению излучаемого кванта энергии при рекомбинации.

Для рассмотренных СД №1 и №2, излучение которых перед выходом из структуры проходит через подложку, важным обстоятельством является пропускание подложки. Известно, что порог пропускания подложки по длине волны может зависеть от концентрации носителей в подложке (эффект Мосса – Бурштейна). Известно, что эффект Мосса – Бурштейна в InAs заметно проявляется благодаря тому, что данный материал уже является сильно вырожденным при концентрации электронов $n \approx 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [5].

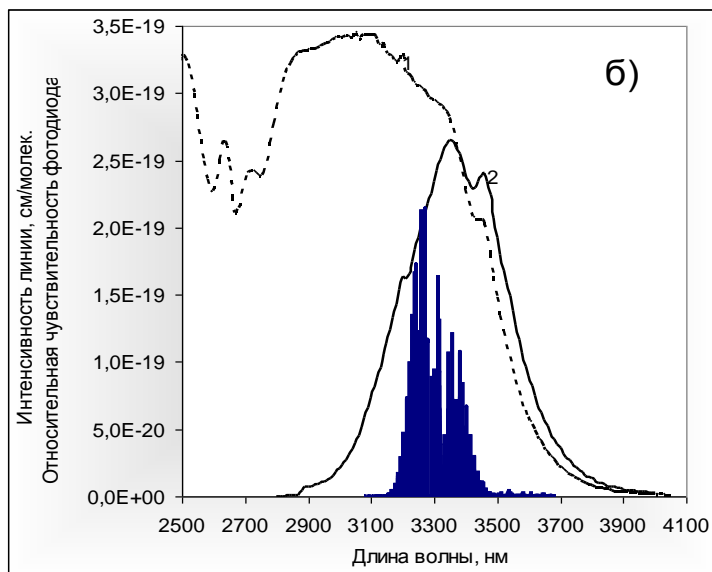
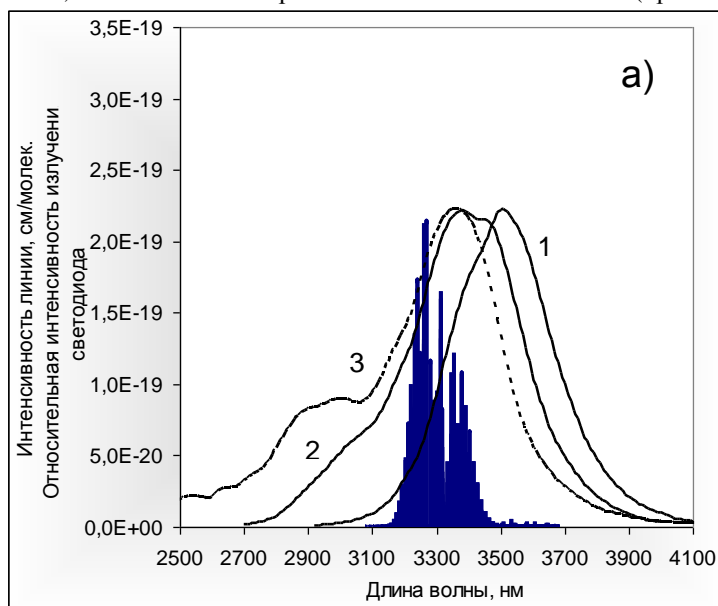
Поэтому следующий шаг состоит в том, чтобы перейти к обратному расположению контактов: кольцевой контакт – на эпитаксиальной стороне, сплошной контакт – со стороны подложки, это было сделано для образца №3. С одной стороны, при такой ситуации ухудшается теплоотвод при пропускании тока через СД, с другой стороны, подложка не препятствует выходу из кристалла коротковолновых квантов излучения. Из рис. 1а видно, что максимум излучения СД №3 еще более смещен в область коротких длин волн и лучше соответствует максимуму поглощения CH_4 по сравнению со светодиодами №1 и №2. За счет питания СД короткими импульсами тока можно избежать разогрева структуры и проблемы ухудшения условий теплоотвода для СД данной конструкции.

Дальнейшего смещения спектра излучения СД структуры третьего типа (на подложках p-InAs , с выводом излучения через эпитаксиальный слой) в коротковолновую область можно добиться путем изменения состава активной области (InAsP). Среди других направлений оптимизации структуры следует также отметить уменьшение рабочего напряжения (при заданном токе) с целью снижения общего энергопотребления СД. Для образцов №1, №2, №3 напряжение при токе 200 мА (в квазистационарном режиме работы с частотой 0,5 кГц, скважностью 2) составило 350, 250 и 500 мВ соответственно.

Для создания оптической ячейки метана был использован широкополосный меза-фотодиод с длинноволновой границей чувствительности 3,6 мкм (рис. 1б, кривая 1). Со стороны эпитаксиального слоя формировалась меза с кольцевым контактом, внутренний диаметр которого составлял 500 мкм, размер фотодиодного кристалла – $0,8 \times 0,8$ мм, рабочая площадь ФД – $S_{\text{фд}} \approx 0,18 \text{ мм}^2$. Достигнутые в настоящий момент рабочие параметры фотодиодов с широким спектром следующие [1]: чувствительность $R=1,5 \text{ А/Вт}$, сопротивление $R_0=R(U=-10 \text{ мВ})=1,1 \text{ кОм}$, обнаружительная способность $D^*=1,6 \times 10^{10} \text{ см}^2 \text{ В/Гц}$. При этом темновые токи $< 60 \text{ нА}$ (при $U=-100 \text{ мВ}$), емкость 0,6 нФ.

Коротковолновая граница широкополосного ФД захватывает значительную область спектра, которая не используется при реализации одноканальной схемы детектирования метана на длине волны 3,25-3,40 мкм, в связи с этим представляет интерес рассмотреть возможность использования ФД с более узким спектром. Такой ФД был изготовлен в соответствии с технологией изготовления СД с выводом излучения через подложку: кольцевой контакт ФД с внутренним диаметром 200 мкм формировался со стороны

подложки n-InAs, размер кристалла составлял $0,38 \times 0,38$ мм, рабочая площадь ФД – $S_{\text{ФД}} \approx 0,09 \text{ мм}^2$. За счет поглощения подложкой n-InAs части излучения, падающего на ФД, был получен более узкий спектр чувствительности (рис. 1б, кривая 2) и следующие значения основных характеристик ФД: чувствительность $R=1,2 \text{ A/W}$, сопротивление $R_0=R(U=-10 \text{ mV})=1,2 \text{ kOhm}$, обнаружительная способность $D^* = 7,8 \cdot 10^9 \text{ cm}^2/\text{Hz/W}$. При этом темновые токи 70 мкА (при $U=-100 \text{ mV}$), емкость $0,3 \text{ пФ}$.



В настоящее время в работе сенсорного модуля применяется ФД с широким спектром как обеспечивающий более высокий электрический сигнал на выходе усилителя. Однако ФД с узким спектром может иметь перспективы в дальнейшей работе, если удастся обеспечить меньший по величине шум электрического сигнала именно за счет «узости» спектра благодаря большому значению КПД преобразования оптического сигнала в электрический. Кроме того, ФД с узким спектром чувствительности может быть полезен для систем, в которых в настоящее время используются более широкополосные источники излучения, например, тепловые ИК излучатели.

Работа СД и ФД была опробована в сенсорном модуле для детектирования метана. Модуль включает в себя компактную оптическую ячейку и электронику для питания светодиода и обработки сигнала фотодиода на единой плате.

Рис.1. На фоне характерных полос поглощения CH_4 [4] показаны: а) спектры электролюминесценции светодиодов (интенсивность - в относительных единицах), цифрами обозначены различные светодиодные структуры, отличающиеся по технологии изготовления; б) спектры чувствительности фотодиодов (в относительных единицах), 1 – структура с широким спектром, 2 – структура с узким спектром.

В табл.1 приведены технические характеристики оптической ячейки.

Таблица 1. Технические характеристики оптической ячейки

Напряжение питания	+3,3 В, стабилизированное
Допуск по напряжению	-5..+5 %
Потребляемая мощность	3,5 мВт
Размеры	55x26x14 мм
Диапазон изменения измерительного сигнала	0..3 В
Диапазон изменения температурного сигнала	0..3 В

Ниже перечислены особенности сенсорного модуля.

Гетероструктуры и оптоэлектроника

- Оптическая ячейка диффузионного типа
- Измерение концентрации в диапазоне 0-5% об.
- Разрешение до 250 ppm в диапазоне концентраций 0-5% об.
- Низкое энергопотребление – 3,5 мВт
- Малое время отклика – <2 с
- Рабочий диапазон температур – 0..+40°C
- Размеры: 55x26x14 мм
- Газы: модуль калиброван для метана, но будет реагировать на большинство углеводородов
- Возможность интеграции с протоколами беспроводной передачи данных такими, как: ZigBee, WiFi, GPRS
- Возможность питания от батареи.

На рис. 2 показаны результаты испытаний сенсорного модуля. Видно, что концентрации CH₄ на уровне 250 ppm надежно определяются.

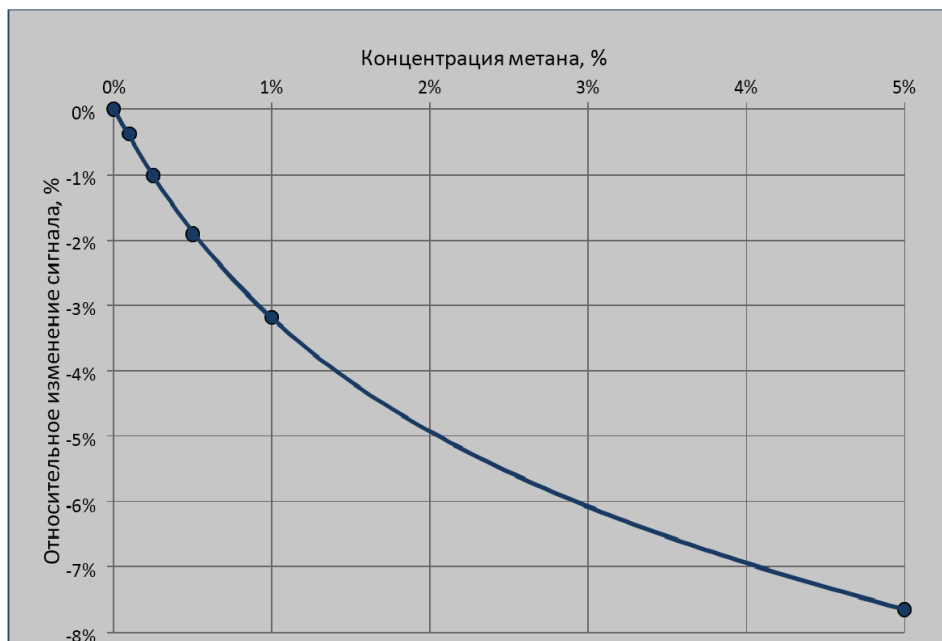


Рис. 2. Зависимость относительного изменения сигнала сенсорного модуля от концентрации метана

Таким образом, в работе получены спектральные характеристики СД и ФД среднего ИК диапазона в области полосы поглощения CH₄ (вблизи 3,3 мкм), изготовленных на основе гетероструктур твердых растворов InAs/InAs(Sb,P). Рассмотрены технологические способы смещения максимума излучения СД с целью достижения наиболее точного спектрального совпадения с полосой поглощения CH₄. Приведены технические характеристики сенсорного модуля метана на основе СД и ФД. Результаты испытаний показали уверенное детектирование концентрации CH₄ на уровне не хуже 250 ppm.

Литература

1. Stoyanov N.D., Salikhov Kh.M., Kalinina K.V., Kizhaev S.S., Chernyaev A.V. Super low power consumption middle infrared LED-PD optopairs for chemical sensing // Proceedings of SPIE. 2014. V. 8982. Art. 89821A.
2. Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия. Обзор // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. В. 6. С. 641–657.
3. Петухов А.А., Ильинская Н.Д., Кизжаев С.С., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П. Влияние температуры на электролюминесцентные свойства flip-chip светодиодов среднего ИК-диапазона ($\lambda_{\max} \sim 3.4$ мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. В. 11. С. 1560–1563.
4. www.hitran.com [Электронный ресурс].
5. www.ioffe.ru (базы данных ФТИ) [Электронный ресурс].

Контакты: Черняев Антон Валентинович E-mail: chernyaevav@yandex.ru
Тел. +79817890449 www.lmsnt.com [Электронный ресурс]

**OPTIMIZATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF MID-IR
LIGHT-EMITTED DIODES ON THE BASIS OF InAs(Sb,P)
FOR MEASUREMENTS OF CONCENTRATION OF CH₄**

S. S. Kizhaev, K. V. Kalinina, A. A. Petukhov, T. I. Guriba,
A. N. Mironova, A. V. Chernyaev, N. D. Stoyanov, H. M. Salikhov

“Microsensor Technology” LLC., St Petersburg

In this work spectral characteristics of IR light-emitted diodes (LEDs) and photodiodes (PDs) near absorption bands of CH₄ (close to 3.3 microns) have been obtained. LEDs and PDs have made on the basis of solid solutions heterostructures InAs/InAs (Sb, P). The technological methods of the maximum displacement of the LEDs radiation emission have analyzed to achieve the most accurate spectral overlap with the absorption bands of CH₄. The technical characteristics of the CH₄ sensor module based on LED and PD have been pointed out. Test results showed a confident detection of CH₄ concentration no worse than 250 ppm.

**УСТРОЙСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА**

к.т.н. Р. Г. Галеев¹, д.ф.-м.н. А. Н. Втюрин^{2,3}, к.ф.-м.н. М. Ю. Реушев^{1,3},
А. А. Многогрешнов⁴, А. А. Казаков¹

¹ ОАО «НПП «Радиосвязь», Красноярск

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

³ Сибирский федеральный университет

⁴ ООО «НПФ Электрон», Красноярск

Одной из причин того, что полупроводниковые лазеры (ППЛ) получили широкое распространение в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) является простая схема модуляции излучения лазера током накачки (прямая модуляция). Такой способ эффективен в цифровых системах передачи, когда требования к частотному и динамическому диапазону (ДД) модуляционной характеристики не очень жесткие. Так, при передаче цифровых сигналов с частотой модуляции до 1 ГГц с помощью трансиверов, работающих на длине волны 1550 нм, ДД составляет ~14 дБ для линии 40 км, ~32–34 дБ – для 120 км. С повышением частот модуляции ППЛ выше 1 ГГц возникает оптическая вариация частоты передаваемого сигнала, которая отрицательно влияет на помехоустойчивость линии связи. При передаче по ВОЛС аналоговых сигналов в СВЧ диапазоне требования по величине ДД в два, а то и в три раза больше, и соответственно возрастают требования к ППЛ [1].

Начиная с 2005 года, в передатчиках ВОЛС стали использовать внешние модуляторы (ВМ). В настоящее время это, прежде всего, электрооптические модуляторы (ЭОМ) и модуляторы электроабсорбционного типа (ЭАМ) [2].

Наибольшее распространение в качестве амплитудных модуляторов РЧ сигнала получили электрооптические модуляторы (ЭОМ) на основе интерферометра Маха – Цендера (ИМЦ). В ЭОМ на основе ИМЦ, используется электрооптический эффект Поккельса в кристаллической структуре на основе LiNbO₃. Именно с помощью ЭОМ ИМЦ в сочетании с высокоскоростными PIN фотодетекторами получены частоты модуляции до 50 ГГц.

Передаточная функция (ПФ) ЭОМ ИМЦ (зависимость выходной интенсивности на выходе ЭОМ от набегающей в плечах ИМЦ разности фаз φ) пропорциональна $\cos\varphi$ (рис. 1). Рабочей точке (РТ) соответствует то положение на ПФ, где наблюдается постоянная разность фаз (рис. 2). При равной оптической длине плеч ИМЦ РТ находится в максимуме ПФ, что соответствует нулевой разности фаз. Такое положение РТ соответствует максимуму ПФ, но вызывает нелинейное искажение передаваемого сигнала. Линейная область ПФ соответствует точкам Quad– и Quad+ и называется «квадратурой» ПФ для ИМЦ. Смещение РТ в область квадратуры в ИМЦ осуществляется дополнительной парой электродов, на которые подается напряжение от устройства контроля рабочей точки (КРТ).

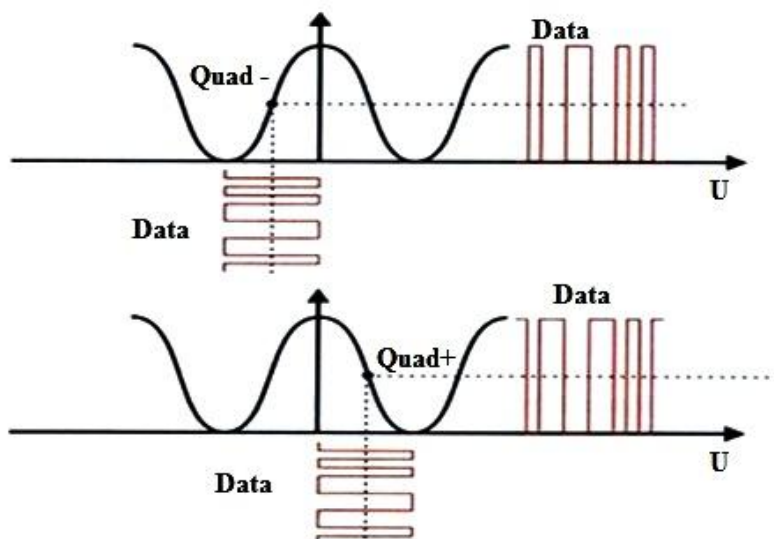


Рис. 1. Передаточная функция ИМЦ

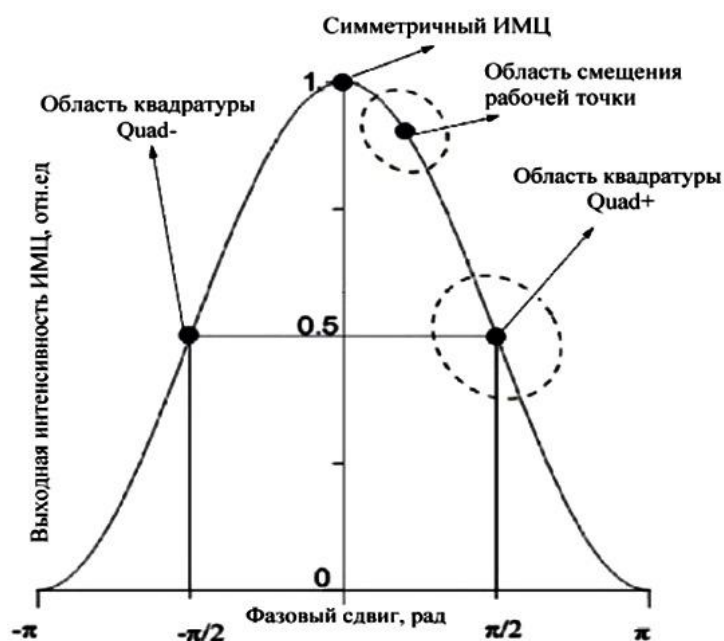


Рис. 2. Рабочие точки ИМЦ

Авторами данной работы была создана модель ВОЛС с использованием ЭОМ MXAN-LN-20 фирмы Photline technologies (France). Структурная схема ВОЛС представлена на рис. 3. Источник излучения ПРД – модуль LDI-FP-1550-10/50 фирмы LasersCom (г. Минск, Республика Беларусь), приемник излучения ПРМ – модуль OZ 450 Rx фирмы OpticalZone (USA). В качестве контроллера рабочей точки (КРТ) ЭОМ использовалось разработанное оригинальное устройство, в схеме которого использованы операционные усилители OPA 1654 фирмы Texas Instrument (USA) с низким уровнем собственных шумов (менее 4.5 nV/√Hz). Функциональная схема КРТ для ЭОМ, выполненного по схеме интерферометра Маха – Цендера (ИМЦ) была реализована на базе следующих элементов: ФД 1, ФД 2 – фотодиоды; ОУ1 и ОУ2 – усилители тока фотодиодов; ФНЧ 1,2 – фильтры низкой частоты; Σ – сумматор сигналов; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; ПЗ – переключатель зон квадратуры линейного участка передаточной функции ИМЦ Quad (+) или Quad (-); ВО1, ВО2 – волоконно-оптические ответвители.

При помощи волоконно-оптических ответвителей ВО1 и ВО2 часть излучения на входе и выходе ИМЦ подавалась на фотодиоды ФД 1 и ФД 2. Напряжение с фотодиодов усиливалось, проходило через фильтры низкой частоты и поступало на сумматор. На сумматоре выполнена отрицательная обратная

связь автоматической системы регулирования КРТ. Схема сумматора была построена на дифференциальном усилителе, что положительно влияло на помехоустойчивость КРТ, т. к. при этом подавлялась синфазная помеха.

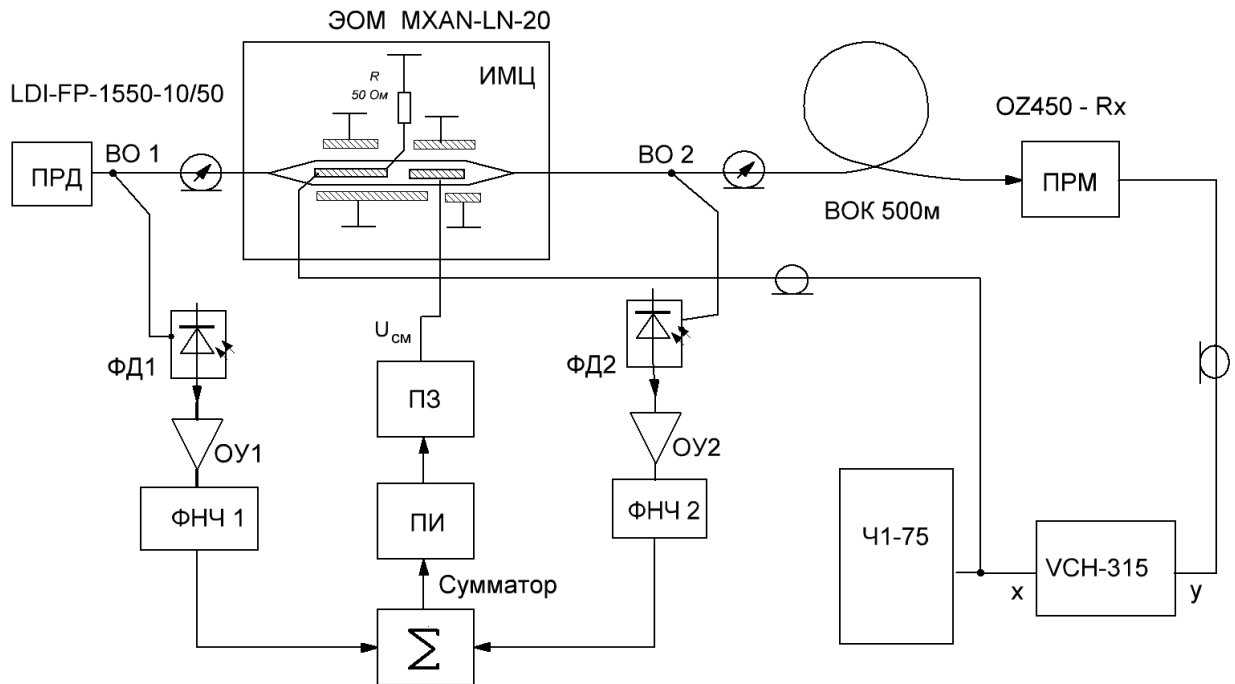


Рис. 3. Структурная схема ВОЛС

На выходе сумматора формировалась ошибка отклонения от заданного значения РТ, и далее сигнал ошибки поступал на аналоговый пропорциональный (ПИ) регулятор. ПИ-регулятор был выполнен на операционных усилителях, обратная связь в которых осуществлялась при помощи интегрирующей цепочки с постоянной времени T_u . Аналитическое выражение для сигнала $U(t)$ на выходе ПИ-регулятора можно представить следующей формулой:

$$U(t) = P + I = K \times \varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon(t) dt ,$$

где: P – пропорциональная часть; I – интегральная часть; K – коэффициент пропорциональности; $\varepsilon(t)$ – сигнал отклонения (ошибки) от заданного значения РТ.

В схеме ПИ-регулятора интегральная составляющая используется для устранения статической ошибки, характерной для пропорционального регулятора, и является накопительной, что позволяет учесть в данный момент времени предыдущую историю изменения входной величины. Фактически, ПИ-регулятор «учится» на предыдущем опыте. Если ИМЦ не испытывает внешних возмущений (температура, давление, влажность), постоянное смещение на выходе переключателя зон квадратуры ПЗ стабилизируется, пропорциональная составляющая будет равняться нулю, а интегральная составляющая обеспечит $U_{см}$, при котором сигнал на выходе ИМЦ будет линейным, т. е. находится в квадратуре ИМЦ.

Испытания работы КРТ были проведены в ходе исследования стабильности сигнала опорной частоты 100 МГц от водородного стандарта частоты Ч1-75 при его прохождении по волоконно-оптическому кабелю (ВОК) длиной 500 м.

Используя стандартные методики, при помощи компаратора VCH-314 измерялись значения величины среднеквадратичного двухвыборочного отклонения (СКДО) для сигнала, подаваемого на входы X и Y компаратора, после прохождения через ВОЛС (СКДО при использовании ВОЛС) и подаваемого непосредственно на компаратор от Ч1-75 (эталонные значения СКДО). На рис. 4 представлены результаты измерений.

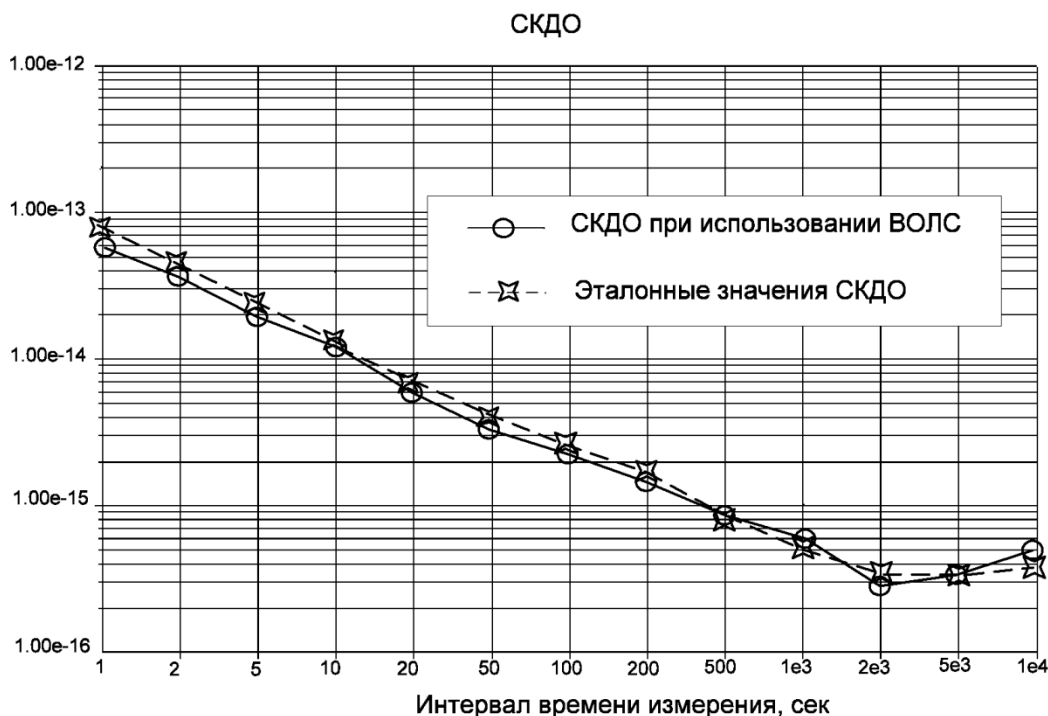


Рис. 4. Результаты измерений СКДО

Как можно видеть из графиков, представленных на рис. 4, результаты измерений оказались практически одинаковыми, что свидетельствует о качественной работе разработанного устройства КРТ в составе ВОЛС с ЭОМ.

Литература

1. С. Н. Cox III, Analog Optical Links: Theory and Practice. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004, ch. 3.
2. E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yi-Yan, E. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien et D. E. Bossi, « A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems, » IEEE J. Sel.Top.Quant.Elec., 6, 69 (2000).

STABILIZATION DEVICE OPERATION POINT ELECTRO-OPTICAL MODULATOR

R. G. Galeev¹, A.N. Vtyurin^{2,3}, M.Yu. Reushev^{1,3},
A. A. Mnogogreshnov⁴, A.A. Kazakov¹

¹ JSC "NPP "Radiosviaz", Krasnoyarsk

²L.V Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of RAS

³Engineering Physic and Radioelectronics Institute of Siberian Federal University

⁴"NPF "Electron"LLC., Krasnoyarsk

The results of the development of the device stabilize the operating point electro-optical modulator (EOM) as a part of fiber optic link. By comparing the optical power at the input and output of the modulator formed error deviation of the operating point, the value of which was used for its stabilization by applying DC bias to the EOM. The quality of the device has been tested in the stability of the measurement signal of the reference frequency of 100 MHz from hydrogen frequency standard CH1-75 as it passes through a fiber-optic cable length of 500 m. As a result of tests, it was a positive conclusion on the device as part of fiber optic link to the EOM.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАВ

к.т. н Балышева О.Л.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Среди акустоэлектронных устройств широкое распространение получили датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Датчики с чувствительными элементами (ЧЭ) на ПАВ обладают такими преимуществами как миниатюрность, надежность, пассивность, конкурентная стоимость, возможность беспроводных измерений, а также совмещения функций измерения и идентификации объектов.

Технология ПАВ позволяет создавать датчики многих физических величин. Разработаны и находятся в коммерческом применении датчики температуры, давления, влажности, деформации, крутящего момента и др.

Теоретические аспекты разработки и примеры практической реализации индивидуальных датчиков с ЧЭ на ПАВ для измерения различных физических величин описаны в литературе, например, в работах [1,2]. Усложнение современных систем экологического и промышленного мониторинга, повышение требований по увеличению скорости, объема передаваемой информации, повышения надежности и уменьшения габаритов требует разработки миниатюрных надежных мультиизмерительных систем. Перспективным направлением в настоящее время является разработка многофункциональных устройств и мультиизмерительных систем, выполняющих несколько измерений или обнаружение нескольких веществ. Технология ПАВ позволяет создавать такие устройства.

Идеология построения мультидатчиков имеет особенности по сравнению с датчиками одной физической величины. Требуется принятие специальных мер по конструктивному объединению нескольких ЧЭ, применению специальных материалов и акустических мод, разработке специальных топологических решений и использованию специально организованных систем, позволяющих осуществлять несколько измерений. В докладе обсуждаются возможные способы организации многофункциональных систем и мультиизмерительных датчиков, общая идеология и принципы построения таких систем.

В устройствах на ПАВ носителями информации служат поверхностные акустические волны, распространяющиеся в твердых телах. Сам принцип действия устройств обеспечивает возможность построения на их основе датчиков. ПАВ чувствительны к множеству физических параметров среды распространения, и любое возмущение поверхности приводит к изменению характеристик акустических волн и выходного электрического сигнала устройства. Изменение какого либо физического параметра среды (или наличие определенного физического качества) изменяет характеристики распространяющейся ПАВ. Фиксируемыми параметрами могут быть скорость, амплитуда, частота, фаза или задержка ПАВ. Фиксация этого изменения относительно невозмущенного состояния (т.е. в отсутствие измеряемой или обнаруживаемой физической величины) позволяет осуществлять измерения или обнаружение.

Принципиально устройства на ПАВ обладают большими возможностями по интеграции как внутри технологии ПАВ [3], так и с устройствами, выполненными по другим технологиям, например, технологиями микроэлектромеханических систем (MEMS) или технологиями пленочных объемно акустических резонаторов (FBAR).

Хотя возможности реализации многофункциональных и мультиизмерительных систем зависят от многих факторов (тип датчика, вид измеряемого параметра или обнаруживаемого вещества и т.д.) и часто рассматриваются индивидуально для каждой системы, можно выделить общие подходы и принципы построения таких систем.

Наиболее простой и распространенный вариант построения мультисистем обнаружения и измерения – это многоканальные системы, в основе которых линейка однотипных ЧЭ. Принцип "многоканальности" успешно применяется для датчиков различных газов, жидкостей. Чаще такая система представляет собой многоканальное устройство, в каждом канале которого используется определенное специальное покрытие, чувствительное к определенному виду газа или жидкости. Каждый канал такой системы требует индивидуальной градуировки и имеет свою чувствительность. По принципу многоканальности строятся известные системы типа "электронный нос" [4]. С помощью линейки ЧЭ (сенсорных матриц) возможен количественный и качественный анализ состава смеси [5]. Многоканальные системы фактически представляют собой несколько отдельных датчиков, конструктивно объединенных в один. Причем возможно объединение (например, на одной подложке) датчиков различных физических величин или датчиков, построенных по различным принципам. Однако целесообразно создание линейки однотипных датчиков, так как в этом случае все они имеют одинаковое влияние других факторов, например, температуры. Соответствующие схемотехнические решения позволяют исключить влияние этих мешающих измерением факторов. В целом развитие

многоканальных систем связано с компромиссом между требуемым ростом числа каналов и, следовательно, функциональности системы, и нестабильности ее работы из-за различия в характеристиках каналов, вызванных неодинаковым старением покрытий, и необходимости перекалибровки системы. Общим недостатком таких систем являются большие габаритные размеры при большом количестве измеряемых или обнаруживаемых компонентов.

Принцип "многочастотности", успешно применяемый в многодиапазонных фильтрах на ПАВ [3], также может быть использован и в ЧЭ датчиков. В таких ЧЭ несколько измерений могут выполняться на различных частотах. При этом возможны разнообразные конструктивные и топологические варианты ЧЭ.

Принцип "многомодовости" может быть применен для совмещения измерений и других функций, например, микронагрева, микронакачки, микросмешивания и др. [6]. По принципу многомодовости построены так называемые "лаборатории на кристалле" (Lab-on-chip) – многофункциональные микросистемы на одном чипе, применяемые для мониторинга физических параметров и обнаружения биохимических объектов. При многомодовом принципе построения число измеряемых параметров или функций системы в большинстве случаев не превышает двух.

Пьезоэлектрические монокристаллические подложки, в которых возбуждаются и распространяются ПАВ, являются анизотропными, т.е. имеют различные свойства в различных направлениях. Принцип "различие свойств" также можно использовать для увеличения функциональности. Например, различный характер температурных зависимостей для разных направлений в кристаллах позволяет использовать ПАВ в этих направлениях для измерений различных параметров совмещать несколько ЧЭ на одном кристалле. Принципы "многомодовости" и "различие свойств" предполагают выбор (или синтез) специальных материалов [7], поддерживающих распространение нескольких акустических мод и обладающих существенно различными свойствами в зависимости от заданного направления.

Один из перспективных способов организации беспроводных измерений – использование систем радиочастотной идентификации (РЧИД) с применением меток на ПАВ. Системы РЧИД позволяют легко совместить измерения с обнаружением и идентификацией объекта измерения, считыватель систем может одновременно работать с несколькими датчиками. Специальные топологии позволяют объединить несколько ЧЭ на одной подложке. Кроме того, возможно использование специальных видов опросных сигналов для получения информации о нескольких измеряемых параметрах [8].

Литература

1. Drafts B. Acoustic Wave Technology Sensors. IEEE Trans. MTT, V.49, No.4, April 2001. PP.795-802.
2. Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Zellers E.T., Frye G.C. and Wohltjen H. Acoustic wave sensors, theory, design, and physico-chemical applications. Academic Press, N.Y. 1997. 704 p.
3. Балышева О.Л. Фильтры на поверхностных акустических волнах: возможности миниатюризации и функциональной интеграции// Радиотехника и электроника, 2009, Т. 54, №12. С.1513-1523.
4. Vlasov Yu., Legin A. Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: from "electronic nose" to "electronic tongue" // Fresenius J. Anal. Chem. — 1998. — Vol. 361. — PP. 255—260.
5. Баника Ф.Г. Химические и биологические сенсоры: основы и применение. Москва: Техносфера, 2014 – 880 с.
6. By J. K. Luo, Y. Q. Fu and W. I. Milne. Acoustic Wave Based Microfluidics and Lab-on-a-Chip// [Электронный ресурс]. URL: <http://www.intechopen.com/books/modeling-and-measurement-methods-for-acoustic-waves-and-for-acoustic-microdevices/acoustic-wave-based-microfluidics-and-lab-on-a-chip> (дата обращения 13.09.15).
7. Балышева О.Л. Критерии выбора материалов для датчиков на поверхностных акустических волнах. Датчики и системы. 2015. №2. С. 23-27.
8. D.C.Malocha, M.Gallagher, B.Fisher, J.Humphries, and D.Gallagher. Passive Wireless Multi-Sensor Technology -- Device and System Perspective. Sensors 2013, 13, 5897-5922.

PRINCIPLES OF DESIGN OF MULTIFUNCTIONAL SYSTEMS BASED ON SAW TECHNOLOGY

O.L. Balysheva

St Petersburg State University of Aerospace Instruments

The possibilities and principles of design of multifunctional and multi-sensor devices using the surface acoustic wave (SAW) technology are discussed.

РАСЧЁТ РАЗМЕРОВ ГРЕБЕНЧАТОГО РЕЗИСТОРА

д. т. н. Спирин В.Г.^{1,2}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

² Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р. Е. Алексеева)

Тонкоплёночный резистор (ТПР) с коэффициентом формы $K_\phi \leq 0,1$ можно спроектировать как в форме прямоугольного резистора, так и в форме гребенчатого резистора (ГР) [1]. Однако в [1] не обоснованы критерии выбора этих форм ТПР. Конструкции ГР характеризуются различным количеством прямоугольных резистивных элементов (РЭ) (рис. 1).

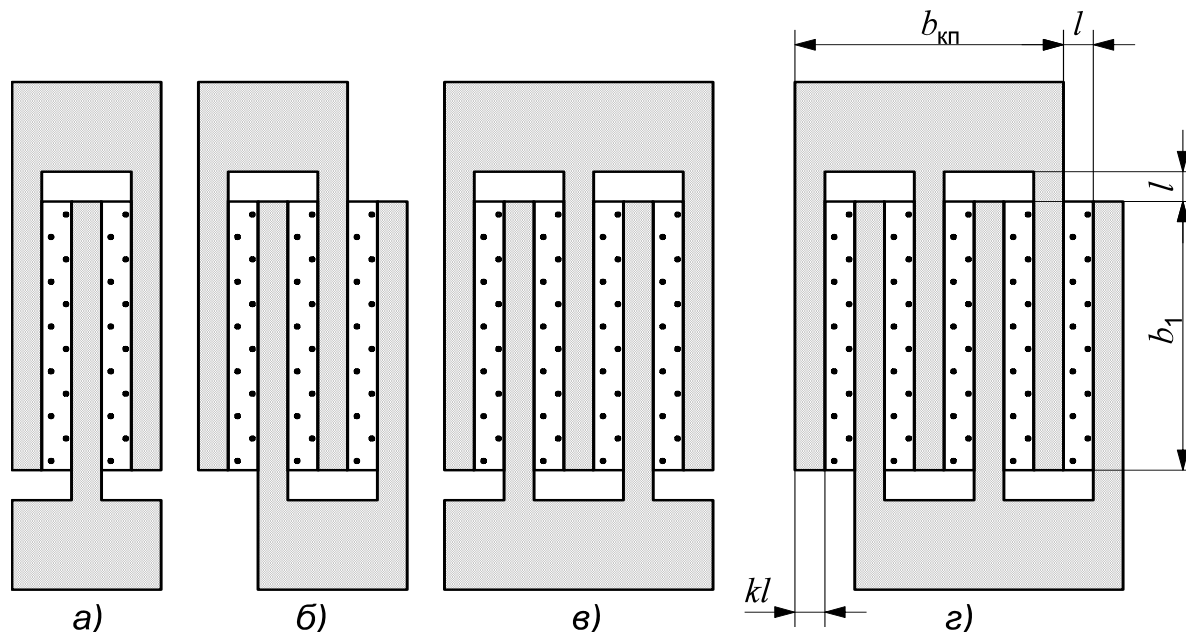


Рис. 1. Конструкции гребенчатых резисторов

Краткий алгоритм расчёта размеров ГР представлен в [2]. Недостатком этого алгоритма является его неоднозначность в выборе количества РЭ и коэффициента формы этих РЭ, что затрудняет разработку машинного алгоритма. Кроме того результаты работы [3] позволяют разработать иной алгоритм расчета минимальных размеров РЭ, исходя из заданной мощности.

Целью настоящей работы является определение критерия выбора формы ТПР с коэффициентом формы $K_\phi \leq 0,1$ и разработка машинного алгоритма расчёта размеров ГР.

В качестве критериев выбора формы ТПР с коэффициентом формы $K_\phi \leq 0,1$ можно предложить следующие параметры ТПР:

- относительную систематическую погрешность $\delta R_{эс} = R_{эд} / R$ (где $R_{эд}$ – допустимое сопротивление электродов, R – номинальное сопротивление ТПР), вносимую сопротивлением электродов при ширине электрода равного длине РЭ (рис. 1), при этом $k = 1$.

- габаритную площадь ТПР.

Как показано в [1] коэффициент формы $K_{\phi 1}$ прямоугольного РЭ ГР не должен быть меньше 0,2. Следовательно, максимальный коэффициент формы ГР с двумя РЭ составит 0,1. Поэтому при $K_\phi > 0,1$ следует применять конструкцию ТПР прямоугольной формы.

Результаты расчётов, проведённые в [1] показывают, что при $0,05 \leq K_\phi \leq 0,1$ относительная погрешность $\delta R_{эс} = 0,05\text{--}0,46\%$ для ТПР прямоугольной формы с контактными площадками (КП), расположенными по середине электрода и $\delta R_{эс} = 0,315\text{--}1,16\%$ для ГР с числом РЭ $n = 2$. При $K_\phi \leq 0,05$ у ГР с $n = 4$ погрешность, вносимая сопротивлением электродов, становится меньше, чем у ТПР прямоугольной формы. Кроме этого при $K_\phi \leq 0,05$ у ТПР прямоугольной формы резко возрастает габаритная площадь. Поэтому при $K_\phi < 0,05$ предпочтительнее использовать ГР.

Учитывая, что относительная погрешность $\delta R_{эс}$ у ГР с $n = 2$ незначительно превосходит аналогичную погрешность ТПР с прямоугольной формой РЭ, к тому же её можно скомпенсировать, путём уменьшения коэффициента формы РЭ, то основным критерием выбора формы ТПР при $0,05 \leq K_\phi \leq 0,1$ становится габаритная площадь.

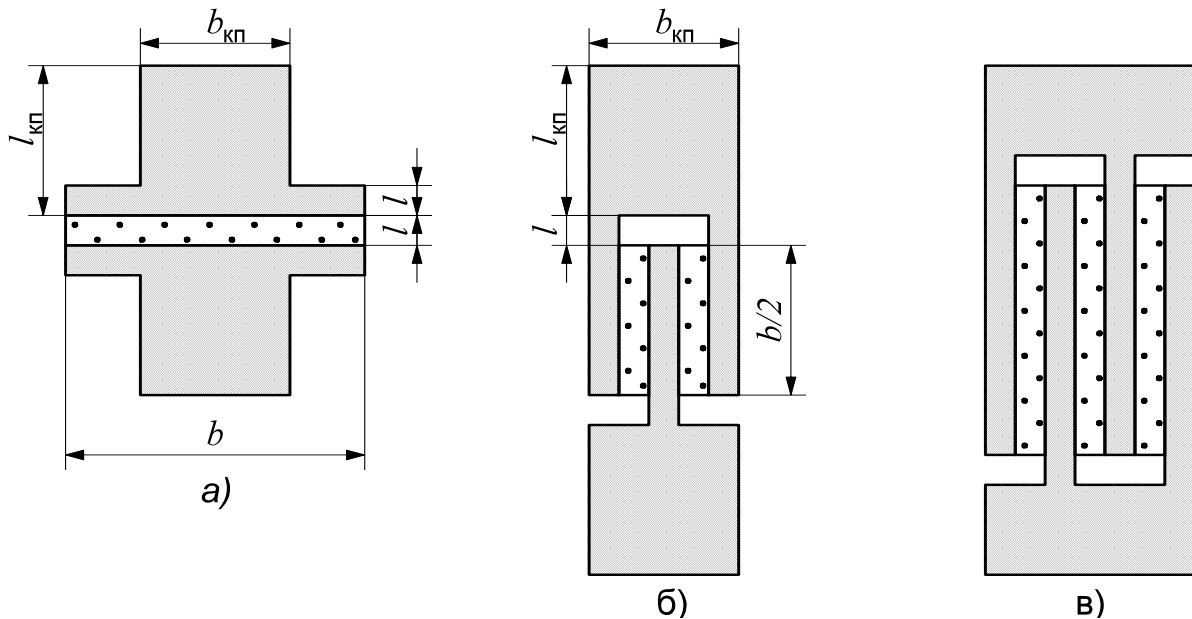


Рис. 2. Конструкции ТФР

Габаритная площадь ТФР, изображённых на рис. 2 будет зависеть от размеров следующих элементов: электродов, КП и РЭ. Размеры КП ТФР определяются технологическими ограничениями на проектирование МСБ. В частности, эти размеры зависят от материала подложки и способа монтажа вывода интегральной схемы к КП резистора. Эти КП могут иметь как квадратную, так и прямоугольную форму. Кроме этого в ГР конструкции КП могут различаться, как это, например, показано на рис. 1, б и рис 2, в.

Как следует из рис. 2, а, б габаритные площади прямоугольного ТФР S_{Π} и ГР $S_{Г}$ определяются следующими выражениями:

$$S_{\Pi} = b(2l_{\text{кп}} + l); \quad S_{Г} = 5l(2l_{\text{кп}} + b/2 + 2l),$$

где l, b – длина и ширина РЭ, $l_{\text{кп}}$ – длина КП.

Сравним эти габаритные площади при одних и тех же размерах КП и ширине электрода равного длине РЭ:

$$S_{\Pi} = S_{Г} = b(2l_{\text{кп}} + l) = 5l(2l_{\text{кп}} + b/2 + 2l). \quad (1)$$

Подставим в уравнение (1) значение $b = l / K_{\phi}$. В результате преобразований получим выражение

$$\frac{l(2l_{\text{кп}} + l)}{K_{\phi}} = 5l \left(2l_{\text{кп}} + \frac{l}{2K_{\phi}} + 2l \right). \quad (2)$$

Решая уравнение (2) относительно l получим следующее выражение:

$$l = \frac{(4 - 20K_{\phi})l_{\text{кп}}}{3 + 20K_{\phi}} \quad (3)$$

Таблица 1. Расчёт длины резистивного элемента

K_{ϕ}	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$l, \text{ мм } (l_{\text{кп}} = 0,2 \text{ мм})$	0,150	0,133	0,118	0,104	0,092	0,080
$l, \text{ мм } (l_{\text{кп}} = 0,25 \text{ мм})$	0,188	0,167	0,148	0,130	0,115	0,100
$l, \text{ мм } (l_{\text{кп}} = 0,3 \text{ мм})$	0,225	0,200	0,177	0,157	0,138	0,120
$l, \text{ мм } (l_{\text{кп}} = 0,35 \text{ мм})$	0,263	0,233	0,207	0,183	0,160	0,140
$l, \text{ мм } (l_{\text{кп}} = 0,4 \text{ мм})$	0,300	0,267	0,236	0,209	0,183	0,160

Как следует из выражения (1) длина резистора незначительно влияет на габаритную площадь прямоугольного ТФР, а габаритная площадь ГР имеет сильную зависимость от этого параметра, так как она прямо пропорциональна длине резистора. Отсюда можно сформулировать основной критерий выбора формы ТФР при $0,05 \leq K_{\phi} \leq 0,1$.

Если длина проектируемого ТПР больше рассчитанного значения по выражению (3), то используют прямоугольную форму ТПР, а если меньше, то ГР.

Результаты расчёта длины РЭ по выражению (3) при типичных значениях $l_{кп}$ и некоторых значениях K_{ϕ} ТПР приведены в таблице 1.

Если длина проектируемого ТПР составляет, например, 0,1 мм, то резистор прямоугольной формы следует использовать в соответствие с табл. 1 при $K_{\phi} > 0,08$ и $l_{кп} = 0,2$ мм, а в остальных случаях нужно использовать ГР.

При разработке алгоритма расчёта размеров ГР с коэффициентом формы $0,01 \leq K_{\phi} \leq 0,1$ случайные производственные погрешности сопротивления электродов и ширины b_1 не учитываются, так как их влияние на точность реализации сопротивления ГР невелико. Расчёт размеров РЭ ГР при заданных параметрах: номинальном сопротивлении R , допуске δR , допустимом сопротивлении электродов $R_{эд}$, коэффициенте $k = 1$ и удельном поверхностном сопротивлении ρ резистивной плёнки производят по следующему алгоритму.

- Находят коэффициент формы ТПР по формуле: $K_{\phi} = R / \rho$.
- Половина поля допуска на сопротивление ГР определяется выражением [2]:

$$\delta R = \delta \rho_c + \sqrt{\delta \rho^2 + \delta l^2},$$

где $\delta \rho_c$ и $\delta \rho$ – систематическая и случайная относительная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной плёнки, δl – производственная относительная погрешность длины РЭ, откуда находят минимальную длину РЭ, которая обеспечит заданный допуск ГР:

$$l_m = \frac{\Delta l}{\sqrt{(\delta R - \delta \rho_c)^2 - \delta \rho^2}},$$

где Δl – случайная абсолютная погрешность длины РЭ.

• Выбирают число РЭ из табл. 2. Это рекомендуемые значения n , при которых погрешность, вносимая сопротивлением электродов, не превышает 2,7%. В принципе число РЭ можно выбрать произвольно. При этом основными ограничениями будут: допустимое значение $\delta R_{эс} = R_{эд} / R$ и значение коэффициента формы прямоугольного РЭ $0,01 \leq K_{\phi 1} \leq 0,2$ [1], где $K_{\phi 1} = l / b_1$.

Таблица 2. Выбор числа РЭ

Диапазон K_{ϕ}	n	$K_{\phi 1}$	$\delta R_{эс}, \%$
$0,05 \leq K_{\phi} \leq 0,1$	2	0,1–0,2	1,155–0,315
$0,034 \leq K_{\phi} < 0,05$	3	0,1–0,15	1,112–0,6
$0,022 \leq K_{\phi} < 0,034$	4	0,12–0,088	1,686–0,933
$0,015 \leq K_{\phi} < 0,022$	5	0,1–0,075	2,23–1
$0,01 \leq K_{\phi} < 0,015$	7	0,1–0,07	2,675–1,614

- Рассчитывают сопротивление электродов ГР [2].

$$R_э = \frac{12\rho_{п} \left(\frac{1}{nK_{\phi}} + 1 \right)}{k(3n + 2)} \quad (\text{при } n - \text{чётном}); \quad R_э = \frac{4\rho_{п} \left(\frac{1}{nK_{\phi}} + 1 \right)}{k(n + 1)} \quad (\text{при } n - \text{нечётном})$$

где $\rho_{п}$ – удельное поверхностное сопротивление проводящей плёнки; $K_{\phi} = R/\rho$; ρ – удельное поверхностное сопротивление резистивной плёнки; $k = 1$.

• Проверяют соответствие $R_э \leq R_{эд}$. Если неравенство не выполняется, то рассчитывают коэффициент k , согласно выражениям

$$k = \frac{12\rho_{п} \left(\frac{1}{nK_{\phi}} + 1 \right)}{R_{эд}(3n + 2)} \quad (\text{при } n - \text{чётном}); \quad k = \frac{4\rho_{п} \left(\frac{1}{nK_{\phi}} + 1 \right)}{R_{эд}(n + 1)} \quad (\text{при } n - \text{нечётном}).$$

Полученное значение k округляют в большую сторону с точностью до 0,1.

- Находят минимальную ширину одного РЭ по заданной точности.

$$b_{1M} = \frac{d_M}{n(R - R_3)}$$

• Электроды ГР между РЭ можно рассматривать как радиаторы, которые отводят тепло от РЭ. Это подтверждено экспериментом [3]. Поэтому при расчете площади ТПР будем учитывать не только площадь РЭ, но и площадь внутренних электродов ГР. В этом случае ГР можно рассматривать как ТПР прямоугольной формы. Следовательно, минимальная площадь и коэффициент формы эквивалентного прямоугольного резистора могут быть определены по следующим выражениям.

$$S_M = b_{1M} l_M (2n - 1) = b_{1M} l_{\Pi}, \quad \text{где } l_{\Pi} = b_{1M} l_M (2n - 1); \quad K_{\Phi \text{ экв}} = l_{\Pi} / b_{1M}.$$

• Затем по известным алгоритмам [2] находят площадь резистора S_r , которая обеспечит требуемое тепловое сопротивление кондуктивного тракта, и рассчитывают минимальную длину резистора l_r , исходя из заданной мощности.

$$l_{r\Pi} = \sqrt{S_r K_{\Phi\Pi}}, \quad \text{откуда } l_r = l_{r\Pi} / (2n - 1)$$

Выбирают длину ГР $l = \max\{l_M, l_r, l_{\text{тех}}\}$, где $l_{\text{тех}}$ – технологическое ограничение на длину ТПР. Выбранное значение округляют с точностью до 1 мкм.

• Затем, исходя из выбранной длины ТПР, находят ширину прямоугольного РЭ и полученное значение округляют с точностью до 1 мкм.

$$b_1 = \frac{d}{n(R - R_3)}.$$

• Компенсируют систематические погрешности длины Δl_c и ширины Δb_c . Для этого уменьшают длину всех РЭ до значения $l - \Delta l_c$, за счёт увеличения ширины электродов, а ширину этих РЭ и длину всех электродов увеличивают до значения $b_1 + \Delta b_c$.

• Находят расчётное сопротивление ГР и определяют ошибку расчёта.

$$R_p = \frac{d}{n b_1} + R_3; \quad \delta R_p = \frac{R_p - R}{R}.$$

Выводы:

- Определены критерии выбора формы ТПР при $K_{\Phi} \leq 0,1$.
- Сформулированы ограничения по выбору числа резистивных элементов гребенчатого резистора.
- Разработан алгоритм расчёта размеров гребенчатого резистора.
- Полученные результаты можно использовать при проектировании как плёночных, так и полупроводниковых микросхем.

Литература

1. Спири́н, В.Г. Сопротивление электродов тонкопленочного резистора / В.Г. Спири́н // Нано- и микросистемная техника.- 2008.- № 7.- С. 19 - 24.
2. Спири́н, В.Г. Метод проектирования топологии тонкопленочной микросборки с размерами пленочных элементов 10-50 мкм / В.Г. Спири́н // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.-2004.- № 5.- С. 6-10.
3. Спири́н, В.Г. Расчет и исследование стационарного теплового режима тонкопленочной микросборки / В.Г. Спири́н // Проектирование и технология электронных средств.- 2005.- № 1.- С.27-32.

CALCULATION OF SIZES OF THE PECCINATE RESISTOR

V.G. Spirin ^{1,2}

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

² Arzamas Politechnical Institute – branch of NNSTU n. a. R. E. Alekseev

Criteria of sampling of a design of the thin-film resistor with small factor of the form are defined. Designs of the peccinate resistor are resulted. Restrictions for choice numbers of resistance elements of the peccinate resistor are formulated. The algorithm of calculation of sizes of the peccinate resistor is developed. The gained results can be used at designing both film, and the monolithic IC.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ С ФРАКТАЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ

к.т.н. Максимов К.О.¹, Тарасов А.В.², д.т.н. Ушаков П.А.²

¹ ООО «ИРЗ ТЕСТ», Ижевск

² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

Элемент с фрактальным импедансом (ЭФИ) – это двухполюсник, связь между напряжением, приложенным к его выводам, и током, протекающим через элемент, описывается дифференциальным уравнением дробного (фрактального) порядка. В установившемся режиме ЭФИ характеризуется импедансом, выражение для которого в общем виде можно записать как

$$\dot{Z}(p) \cong F_0 p^\gamma$$

где $p = \sigma + j\omega$ – комплексная частота, $\gamma = \alpha + j\beta$, $0 \leq |\alpha| \leq 1$, $0 \leq |\beta| \leq 1$, $F_0 = const$ для $\omega_1 < \omega < \omega_2$.

Наиболее перспективными с точки зрения практической реализации являются ЭФИ на основе пленочных структур из чередующихся проводящих и/или резистивных слоев, разделенных диэлектрическими слоями [1]. За последние 15 лет разработаны математические модели, методики анализа и синтеза различных конструктивных вариантов таких ЭФИ по заданным входным и передаточным частотным характеристикам [2, 3]. На этой основе были синтезированы конструкции ЭФИ с γ от 0,1 до 0,85 в диапазоне частот до двух декад. Первая опытная партия образцов ЭФИ была изготовлена по толстопленочной технологии в виде трехслойной конструкции со структурой слоев вида «резистор1-диэлектрик-резистор2 (R-C-NR)» с $\gamma = 0,42$ в диапазоне частот постоянства фазы входного импеданса от 200 Гц до 4 кГц. В работах [3] - [5] подробно рассмотрен программно-аппаратный комплекс, позволяющий измерять параметры этих образцов, и представлены результаты измерений. Вторая партия образцов ЭФИ была спроектирована на более высокий рабочий диапазон частот (примерно от 10 кГц до 1 МГц) и была изготовлена по тонкопленочной технологии на кремниевой подложке. Фото тестовой подложки изображено на рис. 1.

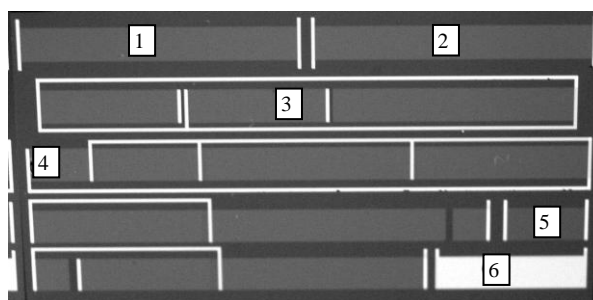


Рис. 1. Внешний вид тестовой подложки с тонкопленочными элементами (размер подложки 18x34 мм): 1 и 2 – контрольные R-C-NR структуры, 3 – ЭФИ с постоянством ФЧХ входного импеданса около 40°, 4 – ЭФИ с постоянством ФЧХ входного импеданса около 30°, 5 – контрольный резистор, 6 – контрольный конденсатор

Однако при измерении параметров ЭФИ, предназначенных для работы в более высокочастотном диапазоне, возникли проблемы с согласованием выходов и входов измерительной аппаратуры с выходными и входными сопротивлениями измеряемых элементов. Поэтому, для получения достоверных результатов измерения параметров ЭФИ потребовалось изменить схему и методику измерений. Данная работа посвящена разработке новой измерительной системы и методики измерения, обеспечивающей оперативное диагностирование и количественную оценку параметров ЭФИ в автоматическом режиме в широком диапазоне частот.

Гетероструктуры и оптоэлектроника

Разработка измерительной системы состояла из следующих этапов.

1. Разработка схемы электрической принципиальной. На рисунке 2 представлена схема для измерения ФЧХ входного импеданса ЭФИ (№3 и №4 на рис. 1). С целью уменьшения влияния помех и усиления сигнала на высоких частотах ЭФИ включены в обратную связь высокочастотного ОУ ОРА1612 с полосой пропускания до 40МГц (DA1). Резисторы R1, R2 предназначены для регулировки коэффициента усиления в диапазоне от 1 до 10; Резисторы R3, R4 обеспечивают режим работы ОУ (номиналы подбираются при калибровке). На рисунке 3 представлена схема для измерения ФЧХ входного импеданса контрольных R-C-NR структур и параметров контрольного конденсатора и резистора.

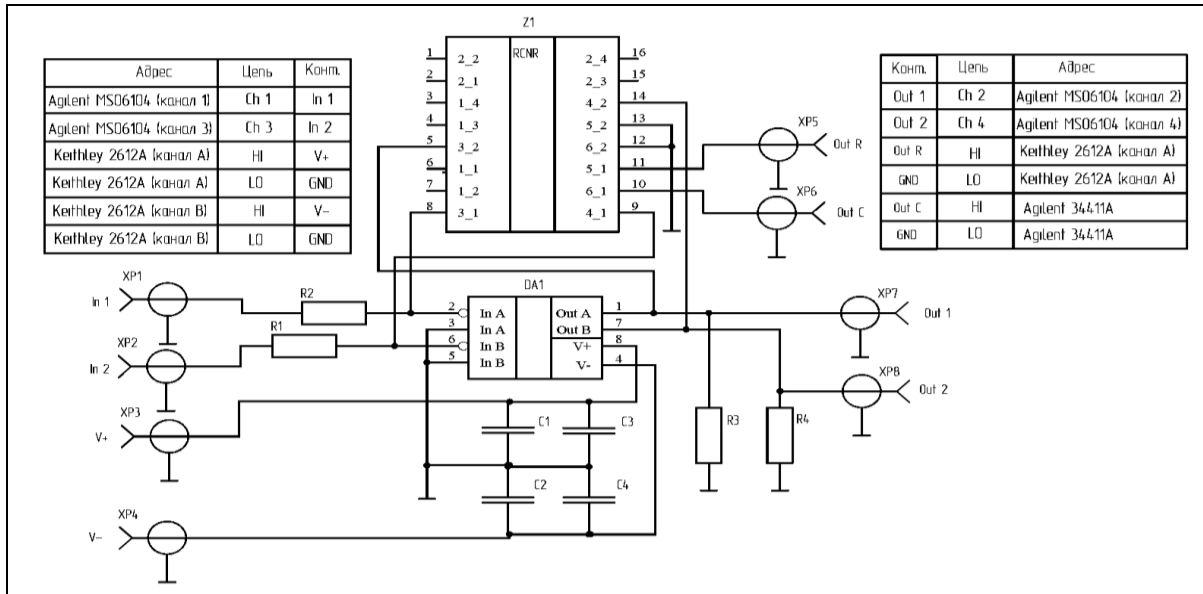


Рис. 2. Схема для измерения ФЧХ входного импеданса ЭФИ (элементы 3 и 4 на рис. 1)

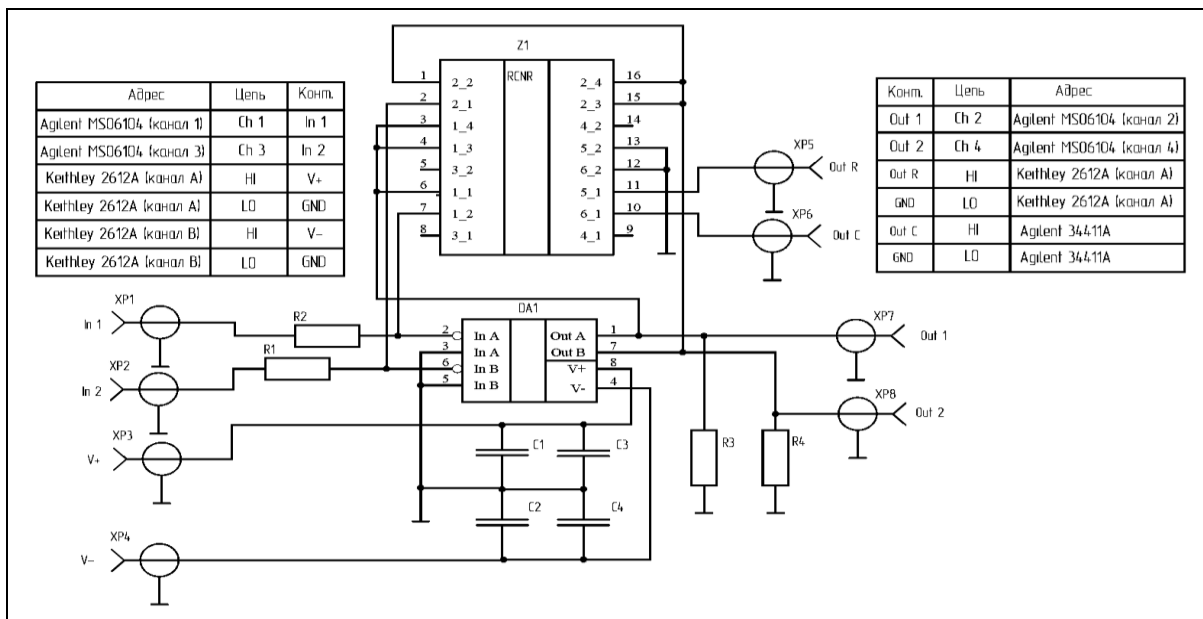


Рис. 3. Схема для измерения параметров контрольных R-C-NR структур, контрольного резистора и контрольного конденсатора (соответственно элементы 1, 2, 5, 6)

2. Разработка платы-адаптера и подключающей платы, подбор измерительного оборудования. Фото платы-адаптера и подключающей платы для измерения параметров опытного образца приведено на рис. 4, а.

Плата-адаптера и подключающая плата представляют собой конструктивно завершенное устройство, предназначенное для обеспечения: корректной коммутации задающих/измерительных каналов измерительной системы; корректного функционирования исследуемого элемента, исходя из выбранной схемы подключения внешних выводов; цепей компенсации/согласования и защиты, если они требуются.

На плату-адаптер выносятся те части схемы, которые являются общими при измерении параметров любых ЭФИ и $R-C-NR$ структур, а также большинство силовых цепей (например, для питания операционного усилителя). На подключающей плате располагают узлы и элементы, зависящие от схемы подключения выводов ЭФИ, а также все чувствительные к ЭМИ/помехам цепи.

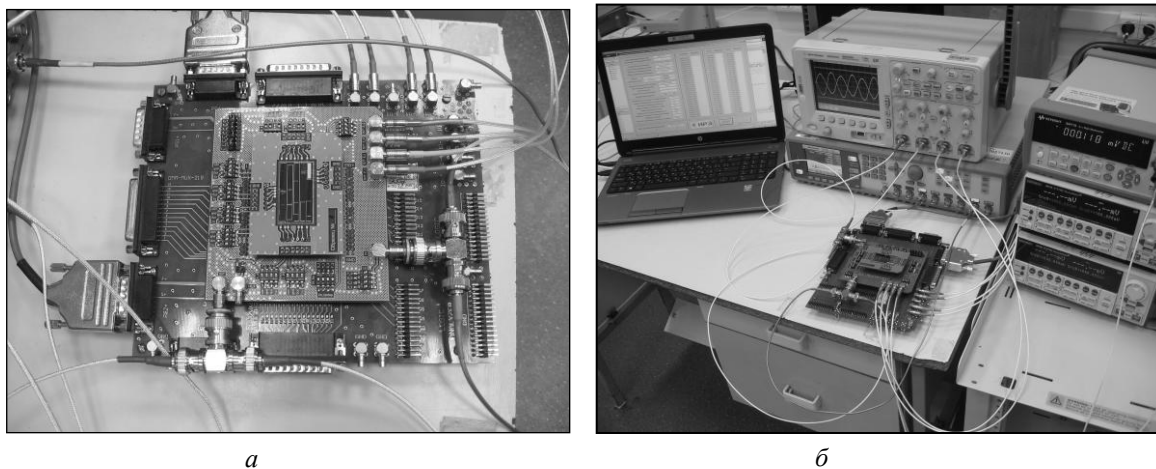


Рис. 4. Фотоизображение: а) подключенных к измерительной системе платы-адаптера, подключающей платы и исследуемого кристалла, б) всей измерительной системы

Такое конструктивное решение целесообразно с той точки зрения, что при испытаниях ЭФИ с другим конструктивным исполнением необходимо будет разрабатывать только подключающую плату, оставляя без изменения плату-адаптер.

Подбор измерительного оборудования осуществлялся исходя из обеспечения адекватных измерений ФЧХ в диапазоне частот как минимум до 40 МГц. На рис. 4, б приведено изображение всей измерительной системы, а в табл. 1 приведен перечень составляющих эту систему устройств и приборов.

Таблица 1. Состав оборудования измерительной системы

№	Марка	Наименование и характеристика	Кол-во
1	Agilent 81150A	Четырехканальный генератор сигналов произвольной формы с частотой генерирования до 200МГц	1
2	Agilent MSO6104	Четырехканальный осциллограф с 16 канальным логическим анализатором. Полоса пропускания – 1ГГц. Наличие математических функции анализа	1
3	Keithley 2612A	Двухканальный источник питания с функцией измерения сопротивления	2
4	Agilent 34411A	Мультиметр с функцией измерения ёмкости	1
5	HP Pro book	Персональная ЭВМ (ноутбук)	1
6	BNC-SMB/BNC-BNC	Высокочастотный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом	8

3. Программное обеспечение и калибровка системы. Все приборы измерительной системы управляются программно посредством ЭВМ через различные интерфейсы: GPIB, LAN, USB. Специализированное программное обеспечение (ПО) было разработано и описано в работе [3]. Основные задачи ЭВМ: выполнение в соответствии с ПО алгоритма калибровки/настройки всех элементов измерительной системы; проверка системы на наличие ошибок/неисправностей; реализация алгоритма измерения параметров ЭФИ; завершение измерений с формированием протокола результатов. Кроме того, ЭВМ посредством созданного графического пользовательского интерфейса выполняет непрерывное динамическое отображение графической/аналитической информации и позволяет оператору обращаться к накопленным данным, исполнительным файлам и иной служебной информации.

Калибровка измерительной системы осуществляется следующим образом: 1) вместо исследуемого образца в обратную связь ОУ устанавливается эталонный резистор номиналом 1 кОм; 2) проводятся измерения ФЧХ входного импеданса; 3) По полученной ФЧХ оценивается степень влияния ОУ, схемы и линий связи с приборами на измеренные характеристики (если ФЧХ на заданном диапазоне частот отклоняется от 0° не более чем на 2° , то схема измерения согласована и влияние на итоговую ФЧХ будет пренебрежимо мало); 4) В случае, если ФЧХ на заданном диапазоне частот отклоняется от 0° более чем на 2° , то в этом случае необходимо предпринимать меры по согласованию: изменение номинала нагрузочного резистора, уменьшение длины линии связи, согласование линии связи по входу и выходу

на нагрузку 50 Ом и т.п. При калибровке удалось согласовать измерительную систему в диапазоне частот до 1 МГц.

Результаты измерения ФЧХ входного импеданса образцов тонкопленочных ЭФИ и сравнение их с ФЧХ входного импеданса схематехнических моделей исследуемых ЭФИ, полученных в программе LTSpice IV, приведены на рисунке 5.

На основании анализа графиков ФЧХ можно сделать следующие выводы:

1. ЭФИ, выполненный по конструктивному варианту 3 (см. рис. 1) имеет постоянство фазы ФЧХ входного импеданса $\varphi_c = -38,5^\circ \pm 2,5^\circ$ в диапазоне частот от $4 \cdot 10^4$ до $8 \cdot 10^5$ Гц (1,3 декады) и, таким образом, реализует в этом диапазоне частот $\gamma = -0,43$. ЭФИ, выполненный по конструктивному варианту 4 (см. рис. 1) имеет постоянство фазы ФЧХ входного импеданса $\varphi_c = -25^\circ \pm 3^\circ$ в диапазоне частот от $2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$ Гц (1,48 декады) и таким образом реализует в этом диапазоне частот $\gamma = -0,28$.

2. ФЧХ входных импедансов схематехнических моделей ЭФИ, разработанных в программе LTSpice IV, и аналогичные ФЧХ опытных образцов практически совпадают в диапазоне частот до 1 МГц, что подтверждает справедливость данных моделей в этом частотном диапазоне. Это подтверждает возможность синтезировать и изготавливать ЭФИ на основе *R-C-NR* структур с различными показателями γ с помощью существующих математических моделей и программного обеспечения.

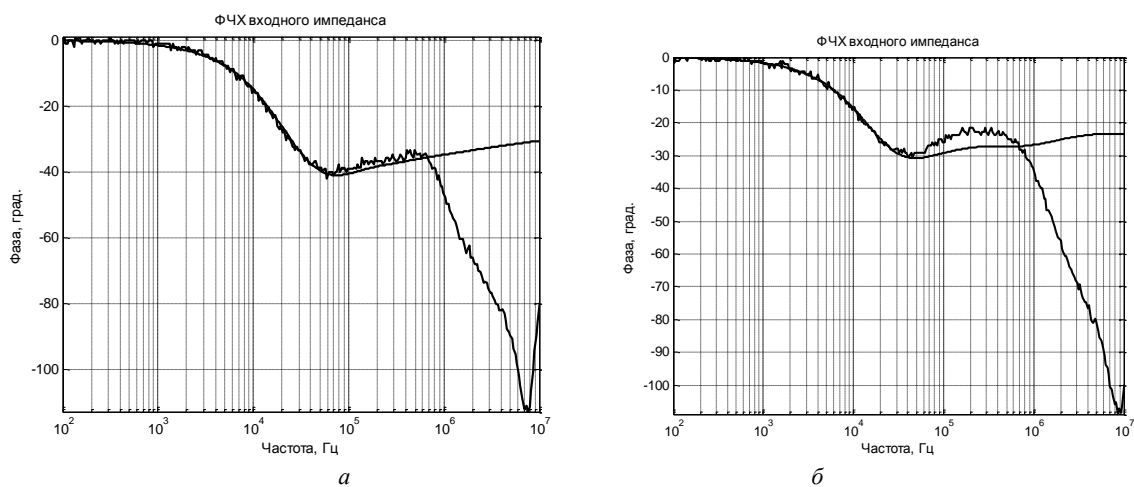


Рис. 5. ФЧХ входного импеданса ЭФИ на основе *R-C-NR* структур: *а*) ЭФИ № 3, *б*) ЭФИ № 4
(на графиках ломанные кривые – измеренные значения ФЧХ по массиву из 300 точек,
гладкие кривые – теоретические значения, полученные в программе LTSpice IV)

На наш взгляд, разработанная измерительная система может применяться как на этапе исследования образцов различных конструктивно-технологических вариантов ЭФИ с целью идентификации параметров их математических моделей, так и на этапе автоматизированного контроля параметров изготовленных ЭФИ в широком диапазоне частот.

Литература

1. Потапов А.А., Ушаков П.А., Гильмутдинов А.Х. Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты. Монография / Под ред. А. А. Потапова. – М.: Радиотехника, 2009. – 200 с.: ил. (Серия «Фракталы. Хаос. Вероятность». Редактор А. А. Потапов).
2. Гильмутдинов А.Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: Анализ, синтез и применение. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. 350 с.
3. Ушаков П.А. Методы анализа и синтеза многослойных неоднородных RC-элементов с распределенными параметрами и устройств на их основе // автореферат дисс. доктора технических наук. – Ижевск: ИжГТУ, 2009. 36 с.
3. Максимов К.О., Ушаков П.А., Тарасов А.В. Разработка методики и средств автоматической идентификации электрофизических параметров образцов многослойных пленочных резистивно-емкостных сред // Интеллектуальные системы. – Ижевск: ИжГТУ, № 2, 2012. – С. 130 – 135.
4. Максимов К.О., Ушаков П.А., Мокляков В.А. Средства и методы автоматизации измерения электрофизических параметров многослойных резистивно-ёмкостных структур: Труды научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты – 2013, ПЭК-2013» Н. Новгород: КБ «ИКАР», 2013. С. 165 – 173.
5. Ушаков П.А., Максимов К.О., Потапов А.А. Идентификация параметров пленочных элементов на основе резистивно-емкостной среды // Нелинейный мир. – 2011. – № 3. – с. 183–213.

MEASUREMENT SYSTEM DESIGN FOR TESTING PARAMETERS OF ELEMENTS WITH FRACTIONAL ORDER IMPEDANCE

K. O. Maksimov, A. V. Tarasov, P. A. Ushakov

¹“IRZ TEST” LLC., Izhevsk

² Izhevsk State Technical University n.a. M. T. Kalashnikov

Elements with fractional order impedance (EFOI) can be presented in the form of alternating layers system of materials in which conductive and/or resistive layers are divided by dielectric layers. EFOI allow to realize fractional order impedances in a wide range of frequencies. The result of parameters and characteristics research of pre-production EFOI models with structure of layers R-C-NR (resistor-dielectric-resistor) is introduced in this article. Also article is devoted to test system development for silicon substrate thin-film EFOI samples research. The test system and the results of researches can be applied at various EFOI development cycles, identification and functional fine tuning, and also for mathematical models adequacy estimation on the limited bandwidth.

ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОМПЛЕКСНОГО ДРОБНОГО ПОРЯДКА: ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, УГО, ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

д.т.н. Гильмутдинов А.Х., Гильметдинов М.М., к.т.н. Мокляков В.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева

Несмотря на то, что понятие дробных производных было известно уже в конце XVII века, начало последовательного применения дробного исчисления в науке и технике можно отнести к моменту появления пионерских работ *Нигматуллина Рашида Шакировича*, основателя и научного руководителя казанской научной школы по исследованию и применению электрохимических преобразователей информации (ЭХПИ), и его учеников.

В начале 60-х годов прошлого столетия *впервые* Нигматуллиным Р.Ш. были физически реализованы операции дробного интегрирования и дифференцирования (ДИД) на основе реальных, в частности, электрохимических, элементов, разработаны методики синтеза многозвенных резистивно-емкостных и резистивно-индуктивных цепей, реализующих эти операции. Физическую реализацию операций ДИД на основе отдельных двухполюсных элементов он предложил назвать, соответственно, «реконд» и «реинд». Идеализированные резистивные, емкостные и индуктивные элементы являются частным случаем реконда и реинда. С 60-х годов прошлого столетия по настоящее время были разработаны множество различных конструктивно-технологических вариантов таких элементов и их моделей. Таким образом, можно говорить о создании обобщенного элементного базиса современной радиоэлектроники, а также об обобщении идеализированных пассивных элементов электрических цепей, которые в операторной форме можно записывать как двухполюсные элементы дробного порядка с импедансом:

$$Z(p) = A_\alpha \cdot p^\alpha, \quad (1)$$

где p – комплексная частота, $A_\alpha = const$, $|\alpha| \leq 1$.

Однако до настоящего времени нет единого термина в обозначении, как реальных конструктивных вариантов, так и моделей этих элементов. Ниже приведем различные названия этих элементов в хронологическом порядке их появления на страницах научных изданий, которыми мы располагаем (см. библиографию в [1-2]).

1960, 1961 – Manabe S. – нецелые интегралы на основе RC-элементов с сосредоточенными параметрами, **1962** – Нигматуллин Р.Ш., Белавин В.А., Мирошников А.И. – полярографические (электрохимические) ячейки для дробного дифференцирования, RC-кабель для дробного дифференцирования, **1963** – Базлов Е.Ф., Нигматуллин Р.Ш., Мирошников А.И. – многозвенные однородные и неоднородные RC- и RL- линии, **1963** – Lerner R. M. – элемент с постоянным углом, **1964** – Нигматуллин Р.Ш., Белавин В.А. – электролитический дробно-дифференцирующий и интегрирующий двухполюсник, **1964** – Carlson G., Halijak C. – фрактальный конденстор, **1965** – DeLevie R. – элемент с постоянной фазой (ЭПФ), **1966** – DuttaRoy S. C., Shenoj V. A. – постоянный аргумент импеданса, **1967** – Roy S. D. – фрактальный оператор, **1970** – Н. Е. Jonesand, В. А. Shenoj – элемент с сосредоточенными параметрами, аппроксимирующий иммитанс фрактального оператора, **1973** – Nathan A., Even R.K. – распределенный RC-импеданс с постоянной фазой, **1974** – Номсу R. V., Newman J. – импеданс Варбурга, **1977** – Le Mehaute A. – фрактальный электрод с постоянным фазовым углом, **1981** – Oustaloup A. – фильтр нецелого порядка, **1987** – Гильмутдинов А.Х., Нигматуллин Р.Ш., Гоппэ А.А., Ушаков П.А. – двухполюсники с постоянной фазой на основе RC-структуры с распределенными параметрами, **1991** – Гильмутдинов А.Х., Нигматуллин Р.Ш., Гоппэ А.А., Ушаков П.А. – элемент с постоянной фазой на основе RC-элемента с поверхностно-распределенными параметрами,

1992 – Nakagawa M., Sorimachi K. – фрактальное устройство, 1997 – Гильмутдинов А.Х. – фрактальные резистивно-емкостные структуры на основе ковра Серпинского, фрактальная структура, фрактальный RC-элемент с распределенными параметрами (ЭРП), 1997 – Haba T. C., Ablart G., Camps T. – фрактальные фотолитографические структуры, 1997 – J. Audonetand, J. M. Roquejoffre – фрактальная модель, 1998 – Troncet E., Ablart G., Allam L. – фрактальные структуры на основе медных пленок, 1998 – Гильмутдинов А.Х. – импеданс с постоянной ФЧХ, 1999 – on-line программный комплекс <http://www.coilcraft.com> – модель индуктора, 2000 – A. Oustaloup, F. Levron, B. Mathieu, F. M. Nanot – комплексный нецелый дифференциатор, 2002 – Bohannan G. – элементы дробного порядка, фрактор, 2002 – Petraš I., Podlubny I., O’Leary P., Dorčák Ľ., Vinagre B.M. – ПИД-контроллер дробного порядка, 2005 – Гильмутдинов А.Х. – фрактальный элемент, 2005 – Ke L. et al. – фрактанс, 2005 – Pu Y. F. et al. – фрактансные цепи, 2006 – Gary W. Bohannan, Stephanie K. Hurst, Lee Spangler – электрический компонент с фрактальным импедансом, 2007 – Гильмутдинов А.Х., Мокляков В.А., Ушаков П.А. – элементы с фрактальной размерностью, 2008 – Гильмутдинов А. Х., Гильметдинов М. М. – оператор комплексного дробного интегродифференцирования (ОКДИД), оператор вещественного (ОВ)ДИД, комплексный дробный оператор (ДО), двухполосник с линейной фазой, 2008 – Т. Cisse Haba, G. Ablart, T. Camps, F. Olivie – фрактальная структура Гильберта, 2009 – Petras I., Chen Y. Q. – фракдуктор, 2009 – Radwan A. G., Salama K. N. – дробная LC-цепь, 2011 – D. Mondaand, K. Biswas – дробно-степенной элемент, 2013 – Freeborn T. J., Maundy B., Elwakil A. S. – суперконденсатор дробного порядка.

Здесь мы отметили только тех авторов, которые предложили новое наименование элемента, с указанием года публикации статьи, опустив название самой статьи. Все известные реализации фрактальных импедансов (1) можно разбить на пять основных групп: 1) на основе электрохимических преобразователей; 2) на основе RC-ЭСП; 3) на основе RC-ЭРП; 4) на основе наноструктурированных материалов; 5) на основе использования неидеальностей, а также электрофизических свойств материалов известных реальных конструктивных элементов. Все эти реальные элементы в дальнейшем условно назовем «элементами дробного порядка» или «фрактальными элементами (ФЭ)».

В целом, из анализа предложенных названий (приведенных не только здесь) элементов видно, что: 1) в большинстве в предложенных наименованиях нет различия между реальным или анализируемым конструктивным элементом и его моделью (схемы замещения), т.е. не ясно, что анализируется конструкция или модель (часто встречающаяся ошибка: иногда емкостной элемент называют конденсатором и т.п.); 2) в некоторых названиях элементы конструкции присутствуют вперемежку с элементами модели; 3) нет единого условного графического обозначения как реальных конструктивных, так и идеализированных элементов с фрактальным импедансом (1). Отметим, что некоторые неточности в наименованиях элементов могут быть обусловлены и неточностью перевода.

До принятия окончательного решения реальные элементы, имеющие в определенном диапазоне частот импеданс (1), будем называть фрактальными элементами (ФЭ). Очевидно, что в зависимости от конструктивно-технологической реализации и возможностей управления их параметрами за счет изменения характеристик воздействующих внешних и внутренних полей, реальные фрактальные элементы (РФЭ) будут иметь разные наименования (подобно различным конденсаторам, варикондам, варикапам, варакторам). Очевидно, что каждому РФЭ должно быть поставлено в соответствие свой идеализированный пассивный элемент (ИПЭ).

Рассмотрим наиболее простой случай ФЭ – фрактальный конденсатор. Очевидно, что по аналогии с реальным элементом – конденсатором и его моделью – идеальный конденсатор (емкостной элемент, емкость), здесь также можно ввести следующие наименования ИПЭ: идеальный вещественный фрактальный конденсатор (ИВФК), вещественный фрактальный емкостный элемент (ВФЭЭ), вещественная фрактальная емкость (ВФЕ), идеальный конденсатор вещественного дробного порядка (ИКВДП), емкостной элемент вещественного дробного порядка (С-ЭВДП, для простоты – C_α).

Как известно, связь между током и напряжением для С-ЭДП имеет вид:

$$i_{C_\alpha}(t) = C_\alpha d^\alpha U_{C_\alpha}(t) / dt^\alpha. \quad (2)$$

Запишем (2) в операторной форме при нулевых начальных условиях: $I_{C_\alpha}(p) = C_\alpha p^\alpha U_{C_\alpha}(p)$. Тогда сопротивление С-ЭВДП в операторной форме имеет вид:

$$Z_{C_\alpha}(p) = U_{C_\alpha}(p) / I_{C_\alpha}(p) = 1 / C_\alpha p^{-\alpha}. \quad (3)$$

С-ЭВДП является в некотором смысле промежуточным элементом между идеальным конденсатором (емкостным элементом, емкостью) и идеальным резистором (резистивным элементом, сопротивлением). Покажем это. Если $\alpha = 0$, то $Z_{C_0}(p) = 1 / C_0 p^{-0} = 1 / C_0 = R_c$. Назовем R_c – собственным (предельным) сопротивлением С-ЭВДП. Если $\alpha = 1$, то $Z_{C_1}(p) = (1 / C_1) p^{-1} = 1 / p C_1 = 1 / p C_c$, где C_c – собственная (предельная) емкость С-ЭВДП.

Введем понятие постоянная времени С-ЭВДП: $\tau_{fc} = R_c C_c = C_1 / C_0$ и нормированной частоты С-ЭДП: $\bar{p} = p \tau_{fc} = p C_1 / C_0$. С учетом введенных обозначений (3) можно записать в виде:

$$Z_{C\alpha}(p) = \tau_{Fc}^\alpha / C_\alpha (p\tau_{Fc})^\alpha = (\tau_{Fc}^\alpha / C_\alpha) \cdot (\bar{p})^{-\alpha} \quad (4a)$$

или

$$Z_{C\alpha}(\bar{p}) = Z_{C\alpha}(p)|_{\bar{p}=1} \cdot (\bar{p})^{-\alpha}. \quad (4б)$$

Тогда нормированное сопротивление C -ЭВДП можно записать как:

$$\bar{Z}_{C\alpha}(\bar{p}) = Z_{C\alpha}(\bar{p}) / Z_{C\alpha}^{xap} = \bar{p}^{-\alpha}, \quad (4в)$$

где $Z_{C\alpha}^{xap} = Z_{C\alpha}(p)|_{\bar{p}=1} = \tau_{Fc}^\alpha / C_\alpha$ – характеристическое сопротивление C -ЭВДП.

Таким образом, C -ЭВДП можно поставить в соответствие схему замещения, изображенную на рис. 1 (при $\gamma = \alpha$, где $-1 \leq \alpha \leq 0$), и характеризовать их следующими *основными параметрами*: 1) α – дробно-степенной показатель C -ЭВДП, 2) C_α – вещественная фрактальная емкость, 3) τ_{Fc}^α – постоянная времени C -ЭВДП и следующими *производными параметрами*: 4) $Z_{C\alpha}^{xap}$ – характеристическое сопротивление C -ЭВДП, 5) $R_c = 1/C_0$ – собственное сопротивление, 6) $C_c = C_1$ – собственная емкость C -ЭВДП.

Очевидно, что C -ЭВДП является ЭПФ для $0 \leq \alpha \leq 0$ и полубесконечная RC -линия является реализацией C -ЭВДП при $\alpha = -0,5$.

Можно ввести аналогичные понятия и для индуктивного элемента вещественного дробного порядка (L -ЭВДП, для простоты – L_α): индуктивность вещественного дробного порядка, вещественный фрактальный индуктивный элемент, вещественная фрактальная индуктивность, фрактальная идеальная катушка индуктивности, идеальная катушка индуктивности вещественного дробного порядка. L -ЭВДП также как и C -ЭВДП будет иметь соответствующие основные и производные параметры.

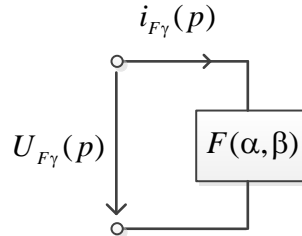


Рис. 1. Операторная схема замещения ИКФЭ при нулевых начальных условиях

Очевидно, что можно ввести некоторый идеализированный элемент (рис. 1), который будет обобщать свойства всех существующих двухполюсных идеализированных пассивных элементов, включая свойства C -ЭВДП, L -ЭВДП. Назовем его идеализированным пассивным элементом комплексного дробного порядка (ИПЭ КДП) или идеальным комплексным фрактальным элементом (ИКФЭ), импеданс которого имеет вид:

$$Z_{F\gamma}(p) = Z_{F(\alpha,\beta)}(p) = U_{F\gamma}(p) / I_{F\gamma}(p) = F(\alpha, \beta) \cdot p^\gamma, \quad (5)$$

где $\gamma = \alpha + j\beta$, $0 \leq |\alpha| \leq 1$, $0 \leq |\beta| \leq 1$, $F(\alpha, \beta) = F_\gamma$ – вещественная постоянная, $U_{F\gamma}(p)$, $I_{F\gamma}(p)$ – напряжение и ток на зажимах ИКФЭ (рис. 1). По аналогии с C -ЭВДП введем понятие постоянного времени ИКФЭ – $\tau(\alpha, \beta)$ и нормированной частоты – $\bar{p} = p\tau(\alpha, \beta)$. Тогда (5) перепишем в виде: $Z_{F(\alpha,\beta)}(\bar{p}) = [F(\alpha, \beta) / \tau^\gamma(\alpha, \beta)] \cdot \bar{p}^\gamma$. Тогда нормированный импеданс ИКФЭ имеет вид:

$$\bar{Z}_{F(\alpha,\beta)}(\bar{p}) = Z_{F(\alpha,\beta)}(\bar{p}) / Z_{F(\alpha,\beta)}^{xap}(\bar{p}) = \bar{p}^\gamma, \quad (6)$$

где $Z_{F(\alpha,\beta)}^{xap}(\bar{p}) = Z_{F(\alpha,\beta)}(\bar{p})|_{\bar{p}=1} = F(\alpha, \beta) / \tau^\gamma(\alpha, \beta)$.

Здесь также по аналогии с C -ЭВДП и L -ЭВДП введены соответствующие основные и производные параметры ИКФЭ. Очевидно, что ИКФЭ является обобщённым двухполюсным пассивным элементом фрактальной радиоэлектроники, который обобщает свойства не только всех существующих идеализированных пассивных двухполюсных элементов, но и безгранично расширяет возможности современной элементной базы. Покажем это. Для этого отобразим идеализированные пассивные элементы, соответствующие нормированному импедансу (6) при различных значениях α и β на плоскости комплексного дробно-степенного показателя ИКФЭ (γ -плоскости), изображенной на рис. 2.

Как видно из рис. 2, на γ -плоскости отображены все известные идеализированные пассивные двухполюсные элементы современной радиоэлектроники, в том числе, так называемые элементы с постоянной фазой (ЭПФ – C_ω , L_ω), которые отображаются на вещественной оси области определения ИПЭ КДП (ИКФЭ), а идеализированные резистивные, емкостные и индуктивные элементы – в виде трех соответствующих точек на вещественной оси (рис. 2).

Отечественная (пока и зарубежная) наука, не говоря уже о промышленности, совершенно недостаточно использует эти элементы и открывающиеся возможности познания природы для получения новых знаний, для создания новых методов и инструментов исследования, для создания более совершенных образцов техники. Одна из причин этого – недостаток научно-технической и, особенно, учебной литературы, в которой бы отражались как вопросы теоретического осмысления новой элементной базы, так и вопросы их реализации и практического применения. Исключением является первое пока учебное пособие по фрактальным элементам [3], вышедшее небольшим тиражом, которое посвящено вопросам реализации ФЭ на основе резистивно-емкостной среды (RC -элементов с распределенными параметрами). Поэтому инженеры и научные работники пока не имеют необходимых знаний в области дробного анализа, в области использования и реализации элементов дробного порядка («фрактальных элементов»), на основе которых возможна физическая реализация всех устройств современной радиоэлектроники, в том числе и устройств фрактальной обработки информации и сигналов, включая дробных операторов [1, 2], составляющих основу фрактальной радиоэлектроники.

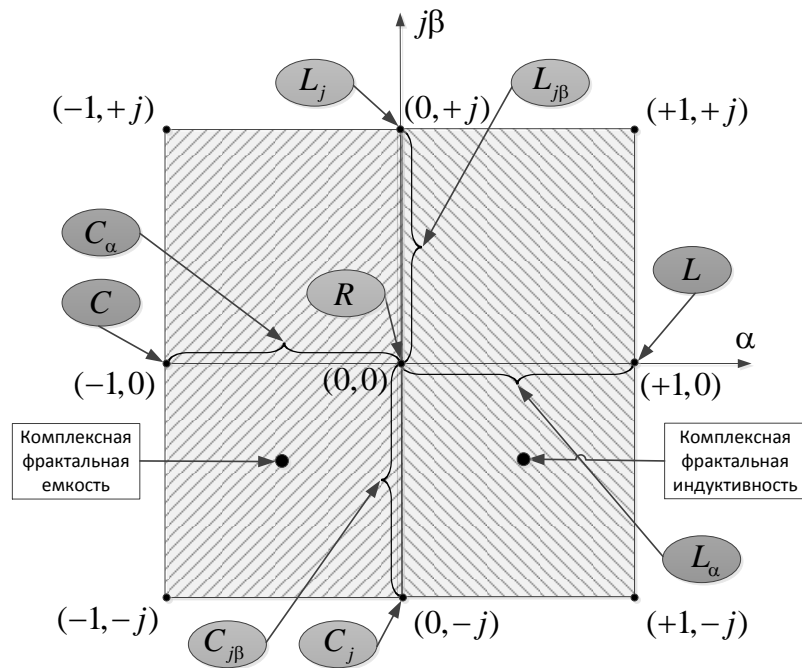


Рис. 2. Отображение ИКФЭ при различных значениях α и β на γ -плоскости

В данной работе введено понятие идеализированного пассивного элемента комплексного дробного порядка (ИП ЭКДП) или идеального комплексного фрактального элемента (ИКФЭ) – идеализации фрактального элемента, для различных значений α и β , введены понятия и определения, а также их условные графические обозначения (УГО). Получены АЧХ, ФЧХ и АФХ для нормированного фрактального импеданса (6) при различных значениях комплексного дробно-степенного показателя $\gamma = \alpha + j\beta$.

Показана необходимость анализа и синтеза линейных и нелинейных цепей комплексного дробного порядка как в частотной, так и во временной областях. Особый упор сделан на необходимость изучения свойств класса фрактальных функций при различных значениях $\gamma = \alpha + j\beta$ и реализации входных и передаточных функций на основе элементов комплексного дробного порядка.

Показано, что решение этих вопросов может послужить толчком к разработке общеинженерных и специальных курсов, соответствующей учебной и научно-технической литературы для активного внедрения идей теории цепей комплексного дробного порядка и фрактальной обработки сигналов в умы будущих специалистов и научных работников. Тогда эти специалисты, придя на производство и в научные лаборатории, смогут реализовать ФЭ, создать на их основе новые приборы, устройства и системы.

Литература

1. Фракталы и дробные операторы / Предисловие акад. Ю.В. Гуляева и чл.-кор. РАН С.А. Никитова / Под общ.ред. А.Х. Гильмутдинова. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2010. – 488с.
2. Гильмутдинов А.Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – 350с.

3. Гильмутдинов А.Х., Ушаков П.А. Фрактальные элементы: учебное пособие под ред. А.Х. Гильмутдинова; Предисловие чл.-кор. РАН С.А. Никитова. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 308с.

проф. Гильмутдинов Анис Харисович: e-mail: agilmutdinov@rambler.ru , тел. моб. +7(897)296907.

PASSIVE ELEMENTS OF THE COMPLEX FRACTIONAL ORDER: TERMS, DEFINITIONS, GNC, FREQUENCY CHARACTERISTICS

A.H. Gilmutdinov, M.M. Gilmetdinov, V. A. Moklyakov

Kazan National Research Technical University n. a. A.N. Tupolev

Versions of terms, determinations and graphical notation conventions (GNC) fractal elements in the chronological order of their appearance on pages of scientific editions are considered. Names, GNC idealized passive elements of a complex fractional order, terms and GNC of their constructive implementations are offered, and also the tasks of the theory of electrical circuits that arise with the emergence of a new class of passive elements.

ПЛАНАРНЫЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ДИССИПАТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

д.т.н. Ашихмин А.В.¹, к.т.н. Латыпова А.Ф.², д.т.н. Пастернак Ю.Г.³

¹ АО «ИРКОС», Москва

² АО «Концерн «Созвездие», Воронеж

³ Воронежский государственный технический университет

Важнейшей характеристикой современных средств и систем вооружения является живучесть во время боя. Проблема повышения живучести неразрывно связана с другой не менее важной проблемой снижения радиозаметности объектов. Основные достижения в этой области связаны с использованием радиопоглощающих материалов и структур.

Помимо области снижения заметности стационарных и подвижных объектов, радиопоглощающие антенные решетки могут использоваться: в качестве средства обеспечения электромагнитной совместимости блоков радиоэлектронной аппаратуры; для защиты от вредного действия микроволнового излучения на биологические объекты; при создании безэховых камер и т.д.

В настоящее время мировые лидеры производства радиопоглотителей (компании SIEPEL, TDK, Cuming Microwave Corporation, Franconia) выпускают радиопоглощающие материалы, в основном, на основе классических конструкций с геометрическими неоднородностями пирамидального типа и плоских поглотителей на основе ферритовых материалов и их сплавов [1,2,3]. Поглотители пирамидального типа применяются для безэховых камер, измерения антенных характеристик, но для снижения эффективной поверхности рассеяния объектов их применение весьма ограничено из-за значительной толщины и существенной стоимости.

Одним из путей создания широкополосных и тонких радиопоглотителей является использование материалов со специальными законами дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемости на основе композиционных материалов [4]. Основными недостатками такого решения являются сложные составы композиции и технология изготовления, предусматривающая смешение очень разнородных по плотности компонентов.

Распространенной конструкцией радиопоглощающей структуры является экран Солсбери, представляющий собой лист резистивного материала, расположенного на расстоянии четверти длины волны от металлического экрана. Достоинствами данного типа поглотителя являются технологичность и небольшая масса конструкции; недостатком - узкая полоса частот и значительная толщина [5].

Перспективным направлением развития тонких планарных радиопоглощающих структур является создание сверхширокополосных радиопоглотителей с использованием частотно-избирательных решеток (ЧИР), представляющих собой периодически расположенные элементы различной формы. Благодаря их применению в многослойных структурах можно расширить рабочий диапазон частот и уменьшить толщину за счет одновременной реализации поглощения, дифракции и интерференции электромагнитной волны. Примеры сверхширокополосных радиопоглотителей на основе однослойных и многослойных резистивных частотно-избирательных решеток представлены в работах [6,7].

Одной из важных задач в области создания радиопоглощающих структур является снижение их толщины, массы и стоимости, а также – упрощение технологии производства. В связи с введением ряда

санкций в отношении Российской Федерации и запуском федеральной программы импортозамещения, данное направление является весьма актуальным. В настоящей работе проведен анализ печатных радиопоглощающих антенных решеток, нагруженных на сосредоточенные диссипативные элементы, построенных по квазифрактальному принципу.

Основополагающей идеей создания радиопоглотителей на основе печатных антенных решеток с сосредоточенными элементами является проектирование радиопоглощающего покрытия как планарной антенной решетки, в которых каждый элемент обладал бы широкой диаграммой направленности без провалов и заданным качеством согласования с сосредоточенной согласованной нагрузкой. Описание методики проектирования радиопоглотителей на основе антенных решеток, нагруженных на сосредоточенные элементы, и ее апробация представлены в работе на примере антенных решеток, состоящих из антенн Вивальди [8].

На основе предложенной методики были разработаны и рассчитаны численные модели радиопоглотителей на основе планарных спиралей (рис. 1), в разрывы витков которых включены сосредоточенные резистивные элементы. Численный анализ характеристик отражения проводился методом конечного интегрирования Вейланда с помощью модели канала Флоке, представляющего собой период структуры поглотителя с периодическими граничными условиями [9].

В ходе численного моделирования получены характеристики отражения радиопоглощающих структур на основе нагруженных логарифмических спиралей при нормальном падении ТЕ -и ТМ- волн представлены на рис. 2.

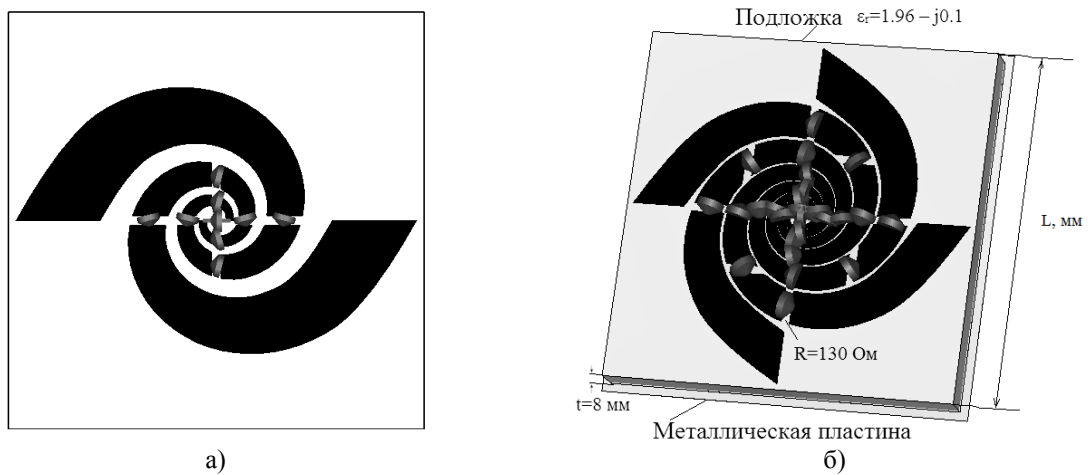


Рис. 1. Ячейка Флоке радиопоглотителей на основе печатных двухзаходной (а) и четырехзаходной (б) спиралей, нагруженных на сосредоточенные резисторы

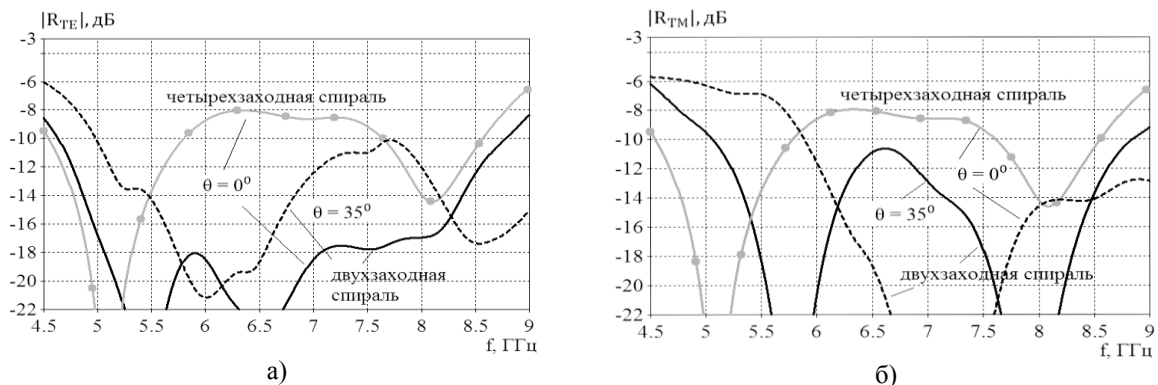


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения при нормальном и наклонном падении ТЕ-волны и ТМ-волны

Как видно из рисунков, разработанные с помощью методики радиопоглощающие конструкции на основе спиральных элементов в печатном исполнении с диссипативными нагрузками позволяют уменьшить коэффициент отражения на 10÷15 дБ в полосе частот с коэффициентом перекрытия 1.7-2.2.

Для расширения полосы поглощения была предложена многослойная квазифрактальная радиопоглощающая конструкция на основе печатных квадратных элементов, нагруженных на сосредоточенные диссипативные нагрузки. Под квазифрактальностью в данном случае понимается

пространственное построение печатных решеток, заключающееся в уменьшении размеров печатных элементов с каждым последующим слоем при сохранении периода структуры постоянным.

Слои частотно-избирательных решеток разделены слоями воздуха, за исключением первого слоя, расположенного между слоями стеклотекстолита с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.3$ (рис. 3в). Снизу вся конструкция экранирована слоем меди.

Для получения максимально возможного коэффициента перекрытия по частоте по уровню отражения -10 дБ проведена оптимизация толщин слоев и номиналов резисторов с помощью генетического алгоритма. Общая толщина квазифрактальной радиопоглощающей конструкции - 12.7. мм. Топологии радиопоглощающих конструкций с различным подключением резистивных сосредоточенных нагрузок представлены на рис. 3.

Частотные характеристики отражения радиопоглощающих конструкций представлены на рис. 4. Благодаря применению квазифрактального пространственного построения низкопрофильных печатных элементов в многослойных радиопоглощающих конструкциях удалось расширить полосу поглощения, упростить технологию разработки радиопоглощающих конструкций за счет применения метода фотолитографии, а также снизить вес и толщину конструкции.

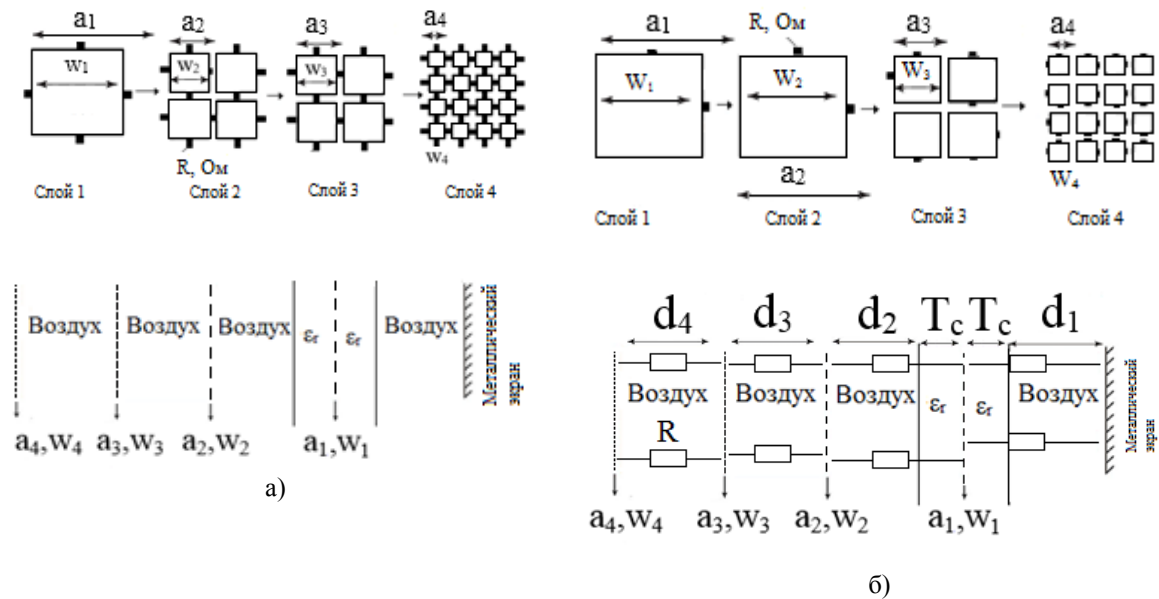


Рис. 3. Квазифрактальная топология печатных элементов с различным подключением диссипативных сосредоточенных элементов: а) конструкция печатной радиопоглощающей антенной решетки с сосредоточенными нагрузками между соседними элементами в каждом ее слое; б) конструкция печатной радиопоглощающей антенной решетки с сосредоточенными диссипативными элементами, подключаемыми между ее слоями (решетка из патч- элементов)

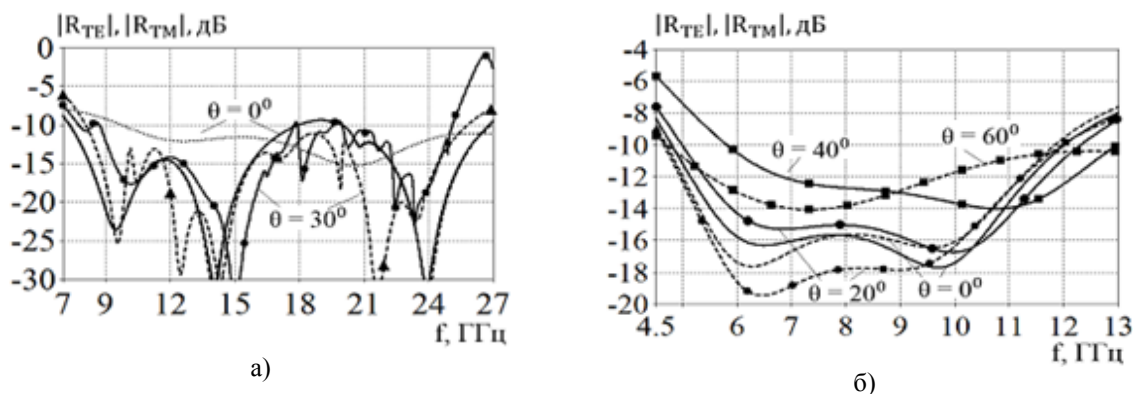


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения при нормальном и наклонном падении ТЕ-волны (сплошные линии) и ТМ-волны (штриховые линии) для конструкции: а) рис. 3а; б) рис. 3б

Проверка адекватности численных расчетов коэффициента отражения радиопоглопителя на основе печатных двойных квадратных рамок (подложка – стеклотекстолит толщиной 10 мм), представленного на рис. 5, была осуществлена стандартным рупорным методом в безэховой камере [10].

Экспериментальная и расчетная частотные зависимости коэффициента отражения радиопоглопителя приведены на рис. 5б.

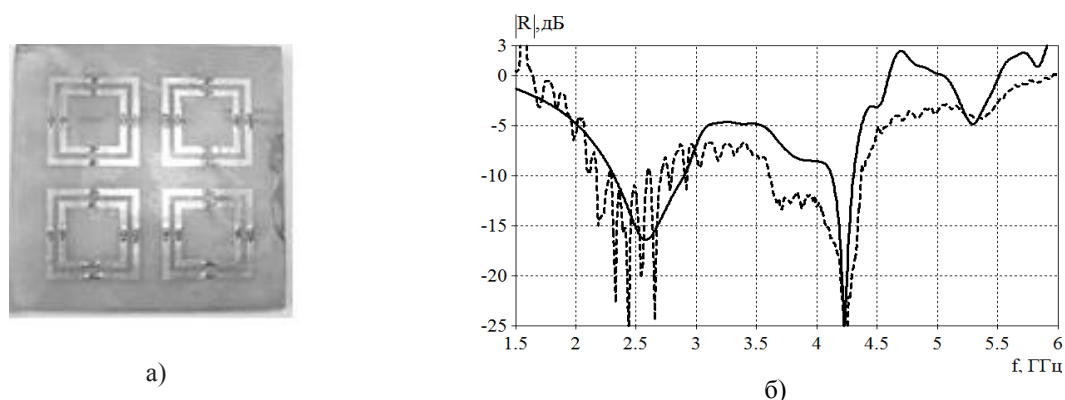


Рис. 5. Макет радиопоглопителя (а), экспериментальная (пунктирная) и расчетная (сплошная) частотные зависимости коэффициента отражения радиопоглопителя (б)

Анализируя графики, представленные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что частотные характеристики коэффициента отражения, полученные с помощью численного моделирования и натуральных измерений макета, удовлетворительно совпадают в полосе частот от 2 до 4 ГГц.

Таким образом, в докладе показана перспективность разработки простых в изготовлении планарных радиопоглощающих антенных решеток, элементы которых нагружены на бескорпусные резисторы, построенных на основе квазифрактального принципа.

Литература

1. www.radiostrim.ru.
2. www.ckbrm.nm.ru.
3. www.siepel.com.
4. Казанцева Н. Е., Рывкина Н. Г., Чмутин И. А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // Радиофизические явления в твердом теле и плазме. Радиотехника и электроника, 2003. Т. 48. № 2. С. 196-209
5. Salisbury W. W. Absorbent body of electromagnetic waves // US Patent 2 599 944. Jun. 10. 1952.
6. F. Costa, A. Monorchio, G. Manara, "Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces" IEEE Transaction on Antennas and Propagation vol. 58, no. 5, pp. 1551-1558, 2010.
7. F. Costa, A. Monorchio, G. Manara, "Electromagnetic Absorbers based on High-Impedance Surfaces: From ultra-narrowband to ultra-wideband absorption" Advanced electromagnetics, vol. 1, no. 3, pp. 7-11, 2012.
8. Калинин, Ю. Е. Исследование влияния конструктивных и материальных параметров радиопоглопителя на основе решетки нагруженных антенн Вивальди на коэффициент отражения / Ю. Е. Калинин, А.Ф. Латыпова, Ю. Г. Пастернак // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т.10. - № 6. - С.77-81.
9. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР // Москва 2008. 276 с.
10. Латыпова, А. Ф. Экспериментальное исследование радиопоглопителя с сосредоточенными элементами [Текст] / А. Ф. Латыпова // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Сер. Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: - М., 2014. – Вып. VII. - С. 120-123.

PLANAR RADIO ABSORBING ANTENNA ARRAYS WITH LUMPED DISSIPATIVE ELEMENTS

A.V. Ashikhmin¹, A.F. Latypova², Yu.G. Pasternak³

¹ SC "IRCOS", Moscow

² SC "Concern "Sozvezdie", Voronezh

³ Voronezh State Technical University

In this paper numerical models results of thin planar radars absorbers based on the printed antenna arrays loaded dissipative lumped elements are introduced. The possibility of enlarge of the absorption band due to the use of spatial quasi fractal elements of different scale is investigated. The results of experimental measurements

of the coefficient reflectivity by standard horn method in an anechoic chamber are shown. The prospects of the design of easy-to-manufacture of radar absorbing planar antenna arrays elements of which are based on the quasifractal principle and loaded on the dissipative chip-resistors is shown.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА ДЛЯ СКРЫТИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Бойправ О.В., Столер Д.В., д. т. н. Борботько Т.В., д. т. н. Лыньков Л.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Порошкообразные отходы производства чугуна (ПОПЧ), как правило, не используются в качестве вторичного сырья и в связи с этим подлежат утилизации, которая требует значительных финансовых затрат. ПОПЧ так же, как и ферриты, представляют собой соединения оксидов металлов, по своим магнитным свойствам относятся к ферримангнетикам, характеризуются способностью к ослаблению мощности электромагнитного излучения диапазона СВЧ, а также поляризации излучения оптического диапазона длин волн. В связи с этим такие отходы приемлемо использовать для формирования конструкций электромагнитных экранов, а также спектрально-поляризационных имитаторов подстилающих поверхностей. На рисунке 1 представлена рентгенограмма ПОПЧ.

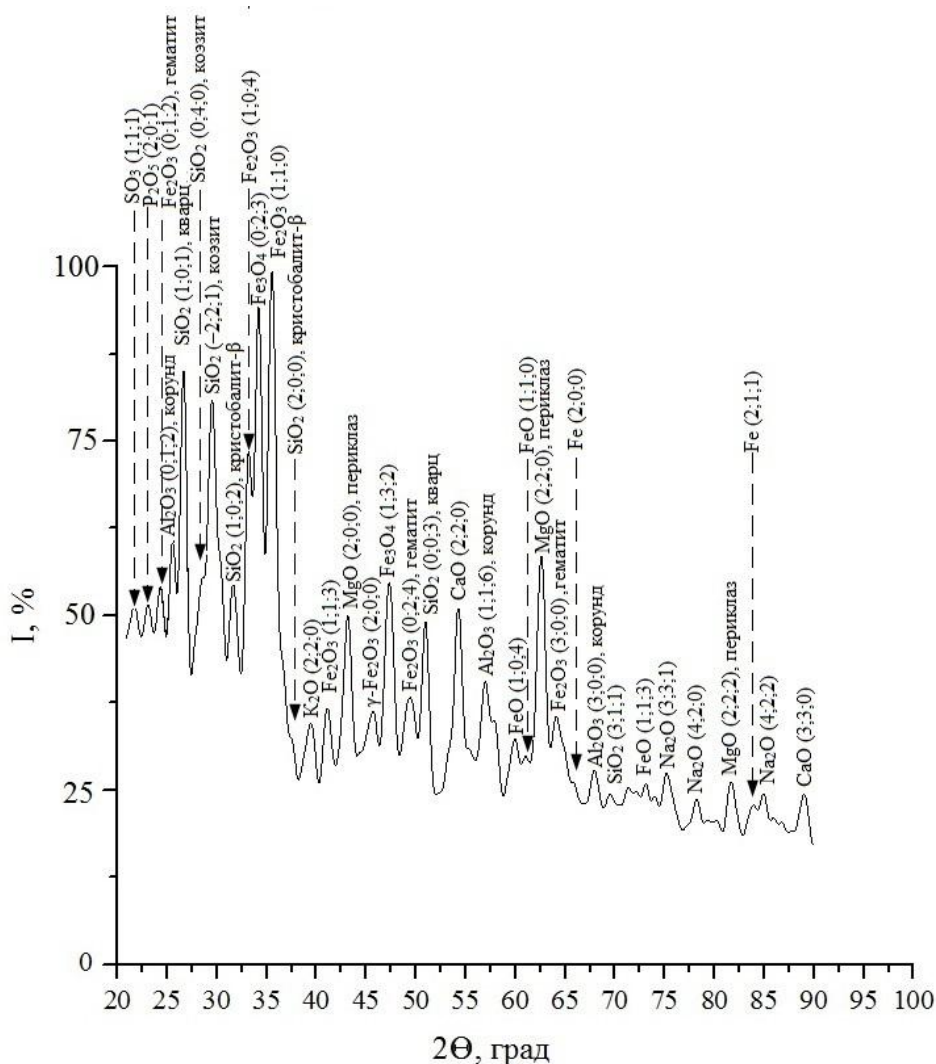


Рис. 1. Рентгенограмма ПОПЧ

Разработанная технология изготовления композиционных материалов на основе ПОПЧ для СПИ подстилающих поверхностей включает в себя следующие процессы:

- подготовка ПОПЧ;

- приготовление и литье композиционной смеси на основе ПОПЧ (наполнитель) и полимерных связующих веществ;
- раскрой полученного композиционного материала.

В рамках первого указанного процесса обеспечивается получение требуемого размера фракций для ПОПЧ (5 мкм, 10 мкм, 20 мкм), от величины которого зависят значения КСЯ и СП формируемых материалов. Получение требуемого размера фракций для ПОПЧ достигается измельчением и просеиванием таких порошкообразных отходов. Для обеспечения их помола до размера фракций 5 мкм используются планетарные мельницы, до размера фракций 20 мкм – мельницы тонкого помола, до размера фракций 30 мкм – струйные мельницы. Выделение фракций с одинаковым размером из молотых порошкообразных отходов производства чугуна реализуется с помощью барабанных полигональных сит. Оценка линейных размеров порошкообразных отходов производства чугуна проводится с применением микрометра ФОМ–2–16.

В рамках второго указанного процесса композиционную смесь, находящуюся в жидкой фазе, получают путем смешивания порошкообразных отходов производства чугуна с полимерным связующим веществом (по ТУ 38.303-04-04-90) с помощью строительного промышленного миксера. Соотношение массы порошкообразных отходов производства чугуна и полимерного связующего вещества – 1:1. Композиционной смесью, находящейся в жидкой фазе, методом литья заполняются пресс-формы. Композиционная смесь выдерживается в пресс-формах в течение 24 ч, после чего полученный в результате этого композиционный материал извлекается из них с помощью шпателя.

Процесс раскрой полученного композиционного материала реализуется путем резки этого материала на фрагменты требуемых формы и размеров, определяемых типом объекта, маскируемого с использованием разрабатываемого СПИ.

Установлено, что значения КСЯ ПОПЧ с размером фракций 5 мкм независимо от угла визирования в диапазоне длин волн 400...1000 нм составляют 0,1...0,3. Значения КСЯ ПОПЧ с размером фракций 20 мкм и 30 мкм практически равны между собой и составляют в указанном диапазоне длин волн 0,03...0,08. При увеличении в пределах от 0° до 65° угла визирования значения КСЯ ПОПЧ с размером фракций 20 и 30 мкм уменьшаются на 0,01...0,03.

Значения СП ПОПЧ с размером фракций 5 мкм составляют 0,01...0,1, ПОПЧ с размером фракций 20 и 30 мкм – 0,01...0,4. При увеличении в пределах от 0° до 65° угла визирования значения СП ПОПЧ увеличиваются на 0,01...0,1. Измерения значений КСЯ и СП проводились согласно методике [1] при углах визирования 0°, 25° и 65°. Таким образом, при увеличении размера фракций ПОПЧ с 5 до 20 или 30 мкм значения их КСЯ уменьшаются на 0,05...0,2, а значения СП увеличиваются на 0,1...0,15.

На рисунках 2 и 3 представлены соответственно зависимости КСЯ и СП изготовленных с использованием разработанной технологии СПИ на основе ПОПЧ с размером фракций 20 мкм от длины электромагнитной волны в диапазоне 400...1000 нм.

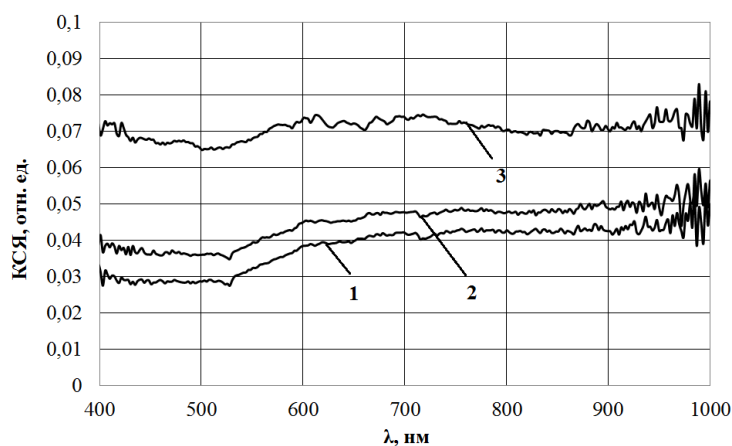


Рис. 2. Зависимость КСЯ СПИ на основе ПОПЧ с размером фракций 20 мкм от длины электромагнитной волны в диапазоне 400...1000 нм при угле визирования 0° (1), 25° (2), 65° (3)

Изменение значений КСЯ и СП композиционных материалов на основе ПОПЧ и СПИ из таких материалов возможно путем модификации ПОПЧ. Процесс модификации должен реализовываться после процесса подготовки и заключаться в химическом осаждении кластеров металлов на поверхность ПОПЧ или пропитывании таких отходов водными растворами. Установлено, что осаждение никеля на поверхность ПОПЧ с размером фракций 5 мкм позволяет снизить значения КСЯ в диапазоне длин волн 400...1000 нм на 3...12 % для СПИ на основе таких материалов, на поверхность ПОПЧ с размерами фракций 20 и 30 мкм – на 17...22 % при изменении угла визирования 0°...65°. Значение СП при этом

увеличивается в среднем на 10 %. Пропитывание ПОПЧ кальцием хлористым марки «жидкий» приводит к снижению на 10...20 % КСЯ в указанном диапазоне длин волн и увеличению в среднем на 15 % СП для СПИ на основе таких материалов.

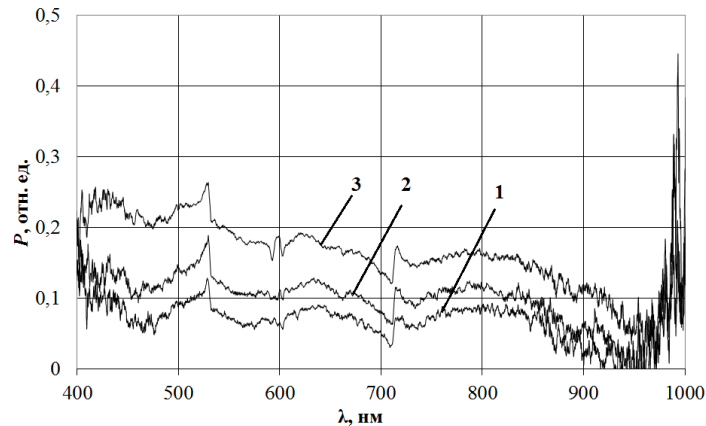


Рис. 3. Зависимость СП СПИ на основе ПОПЧ с размером фракций 20 мкм от длины электромагнитной волны в диапазоне 400...1000 нм при угле визирования 0° (1), 25° (2), 65° (3)

Спектрально-поляризационные имитаторы подстилающих поверхностей, разработанные с использованием предложенной технологии, могут быть использованы для маскирования наземных объектов на фоне почвогрунтов.

Литература

1. Омер Джамаль Саад Абулькасим. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Омер Джамаль Саад Абулькасим, Е.С. Белоусова, О.В. Бойправ, Ю.В. Беляев, Л.М. Лыньков ; под. ред. Л.М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2014. – 159 с.

TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF THE POWDERED IRON SMELTING WASTES FOR HIDING OF GROUND OBJECTS IN VISIBLE RANGE OF WAVELENGTHS

O. V. Boiprav, D. V. Stoler, T. V. Borbotko, L. M. L'inkov

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

It's proposed to use the powdered iron smelting wastes as a filler of composite materials for spectral polarization imitators (SPI) of underlying surfaces to reduce the cost of such imitators. The technology of SPI production with use of specified component are created. The characteristics of spectral brightness coefficient and the degree of polarization depending on the electromagnetic wave length in the range of 400...1000 nm of the simulators produced according to developed technology are shown.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СЛОИ Al_2O_3 И HfO_2 В КАЧЕСТВЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ДЛЯ GaAs-СТРУКТУР

Калентьева И.Л., к.ф.-м.н. Здравейшев А.В., к.ф.-м.н. Кудрин А.В.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Введение

Одно из основных направлений современного полупроводникового приборостроения связано с уменьшением размеров базовых элементов с целью достижения наивысшей плотности их расположения при минимальной потребляемой мощности и максимальном быстродействии [1]. Ряд поставленных задач требует изготовления качественных диэлектрических слоев при относительно низких температурах, позволяющих избежать деградации поверхности полупроводника. С учетом сказанного перспективной представляется разработка низкотемпературной технологии получения high-k диэлектрических слоев (т.е. слоев, величина диэлектрической проницаемости которых превышает значение для диоксида

кремния $\epsilon = 3.9$). Такие high-k диэлектрики, прежде всего, рассматриваются как основные кандидаты для формирования подзатворного диэлектрика при разработке МДП-структур и полевых транзисторов на их основе.

Развитие МДП-интегральных полупроводниковых технологий на основе GaAs долгое время было затруднено в связи с невозможностью получения качественной границы раздела между диэлектриком и полупроводником с малой плотностью поверхностных состояний, что в свою очередь приводило к закреплению уровня Ферми на поверхности полупроводника. Однако, использование новых технологий для получения тонких диэлектрических пленок позволило уменьшить плотность поверхностных состояний и получить первые тестовые МДП-структуры.

Согласно литературным данным, для GaAs-структур перспективными представляются диэлектрические слои Al_2O_3 ($\epsilon = 10$) и HfO_2 ($\epsilon = 25$) [2-5], основным методом получения которых на данный момент является метод атомного слоевого осаждения [2-7]. Достигнуты определенные успехи в создании полевого GaAs транзистора на основе МДП-структур с Al_2O_3 [8] и HfO_2 [5]. Предполагается, что использование двумерных каналов проводимости в таких структурах позволит существенно увеличить подвижность носителей заряда, что приведет к значительному повышению быстродействия таких приборов.

Данная работа посвящена исследованию возможности применения комбинированных слоев на основе оксида алюминия и диоксида гафния, выращенных методом низкотемпературного электронно-лучевого распыления, в качестве диэлектрического материала при формировании приборов с управляющим электродом для арсенид-галлиевых структур с различными каналами проводимости (квантовыми ямами и дельта-слоями).

Методика эксперимента

Исследования проводились с использованием нескольких типов гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении и температуре 600-620 °С. Структуры были изготовлены на пластинах полуизолирующего GaAs. Образцы содержали нелегированный буферный слой GaAs толщиной 0.4 мкм, квантовую яму (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с содержанием индия $x \sim 0.1$ и/или дельта-легированный углеродом слой GaAs. Толщина спейсера GaAs между квантовой ямой и дельта-слоем С составляла 4 нм, а толщина покровного слоя GaAs - около 20-30 нм. Аналогичным способом были изготовлены GaAs-структуры с одиночным дельта-слоем Si.

На полученных структурах методом электронно-лучевого распыления в вакууме при температуре 160-200 °С формировались различные комбинации аморфных диэлектрических слоёв: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ и металлические контакты Au (30 нм)/Ti (15 нм). Как нами было показано ранее, использование трехслойного диэлектрика $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ приводит к повышению рабочих напряжений в GaAs-структурах с двумерным каналом проводимости в несколько раз по сравнению с одиночным слоем Al_2O_3 [9]. Предполагается, что введение промежуточного слоя SiO_2 в данном случае способствует прерыванию каналов паразитной проводимости, присутствующих в слоях оксида алюминия. Верхний слой Al_2O_3 позволяет предотвратить проникновение атомов Au и Ti вглубь диэлектрика. Описание полученных образцов приведено в таблице 1.

Таблица 1. Описание исследуемых структур

№	Особенности структуры GaAs	Тип диэлектрика	Толщины диэлектрических слоев, нм
1	Дельта-слой С и КЯ InGaAs/GaAs	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	10/200/10
2	Дельта-слой С	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	10/200/10
3	Дельта-слой Si	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	10/20/10
4	Дельта-слой Si	$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$	10/200/10

С использованием специального комплекта фотошаблонов, сочетания методов фотолитографии и химического травления на образцах изготавливались меза-структуры типа «холловский мостик» с размерами (3×4) мм² (рис.1). Токовая дорожка холловского мостика была закрыта диэлектриком, поверх которого располагался управляющий металлический Ti/Au электрод. Использование титана в данном случае позволяет улучшить адгезию Au контакта [10].

На сформированных таким образом структурах исследовались зависимости сопротивления Холла (R_H) от напряженности магнитного поля в температурном диапазоне от 10 до 300 К при нулевом, положительном и отрицательном потенциале на управляющем электроде. Для этого использовался автоматизированный комплекс, включающий в себя гелиевый криостат замкнутого цикла и электромагнит с разверткой по магнитному полю ± 4000 Э.

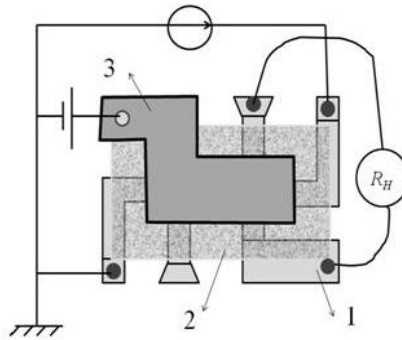


Рис. 1. Схема меза-структуры типа «холловский мостик» с управляющим электродом:
1 - контактные площадки; 2 - диэлектрик; 3 – управляющий электрод

Результаты и обсуждение

Измерения эффекта Холла подтвердили, что образцы, содержащие дельта-слой С (№ 1 и 2 в табл. 1) имеют дырочный, а структуры с дельта-слоем Si – электронный тип проводимости (№ 3, 4). Для всех полученных структур была исследована возможность управления проводимостью в двумерном канале. Использование управляющего электрода в зависимости от прикладываемого на затвор напряжения (V_G) позволило влиять на концентрацию носителей в области дельта-слоя, например, уменьшать (при $V_G < 0$) или увеличивать (при $V_G > 0$) наклон зависимости сопротивления Холла от магнитного поля ($R_H(H)$) для структур с дырочным типом проводимости (рис.2а).

На рис.2б представлена зависимость величины слоевой концентрации носителей (p_s) от величины V_G для температуры измерений 80 К. Как видно из рисунка, изменение p_s пропорционально величине прикладываемого на затвор напряжения. Значительное уменьшение (в 5 раз) концентрации носителей наблюдается в случае положительного напряжения величиной 20 В на затворе. Слабое увеличение концентрации носителей при приложении отрицательного смещения может быть обусловлено отсутствием дополнительных каналов/областей – поставщиков дырок, поскольку все имеющиеся дырки уже задействованы в процессе проводимости.

Рассчитанные с использованием $R_H(H)$ значения слоевой концентрации дырок для структуры с одиночным дельта-слоем углерода в зависимости от величины и знака подаваемого на затвор напряжения при различных температурах измерения представлены в таблице 2. Видно, что с увеличением значения положительного смещения до 30 В удается уменьшить концентрацию носителей в двумерном канале проводимости в 3.5 раза. Отрицательное смещение позволяет в значительно меньшей степени влиять на концентрацию дырок (увеличение p_s лишь на 12%).

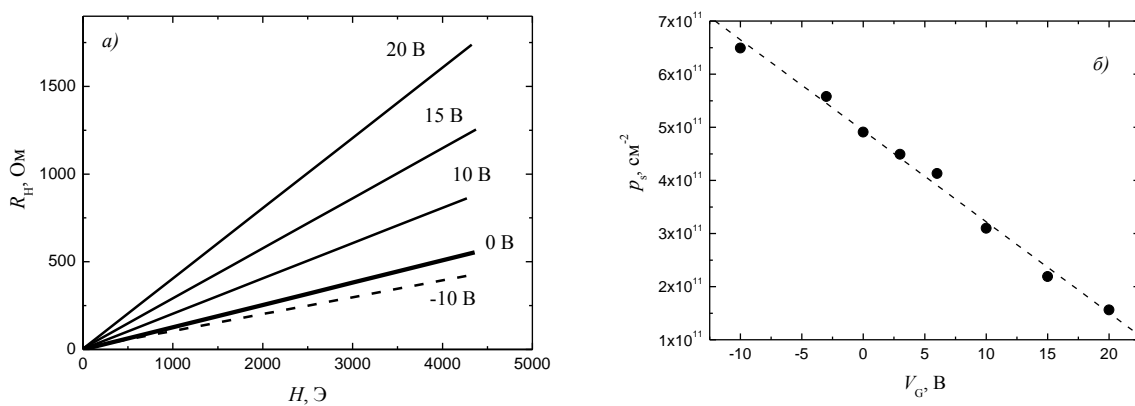


Рис. 2. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла (а) и слоевой концентрации дырок (б) от приложенного смещения для структуры № 1 с двумя каналами проводимости: КЯ InGaAs и дельта-слоем С при температуре 80 К

Аналогичная картина наблюдается для образцов с одиночным дельта-слоем Si, имеющих электронный тип проводимости (рис.3). Для увеличения концентрации в данном случае используется $V_G > 0$. В данном случае, удалось наблюдать более сильное влияние на величину концентрации носителей

при приложении меньшего напряжения на затворе. Так, уже при $V_G = 1\text{В}$ концентрация носителей увеличилась на 15 и 25% для структур 3 и 4 (табл.1), соответственно.

Таблица 2. Слойная концентрация дырок p_s [10^{11} см^{-2}] в зависимости от приложенного смещения V_G при различной температуре для образца с одиночным дельта-слоем С

Температура измерений, К	Напряжение смещения V_G , В						
	-40	-20	-10	0	+10	+20	+30
100	8.76	8.24	8.17	7.73	3.56	2.27	2.2
200	-	17.7	-	13.6	7.76	7.67	-
300	-	-	17.4	16.1	14.5	11.3	-

Как видно из рис. 3, применение более тонкого диэлектрика $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (суммарная толщина 40 нм) не приводит к значительному изменению по сравнению с $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ (220 нм) в величине управляющих напряжений. Это может быть объяснено тем, что HfO_2 обладает намного более высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости по сравнению с диоксидом кремния. Использование более тонких слоев подзатворного диэлектрика может способствовать миниатюризации МДП-структур для полевых транзисторов.

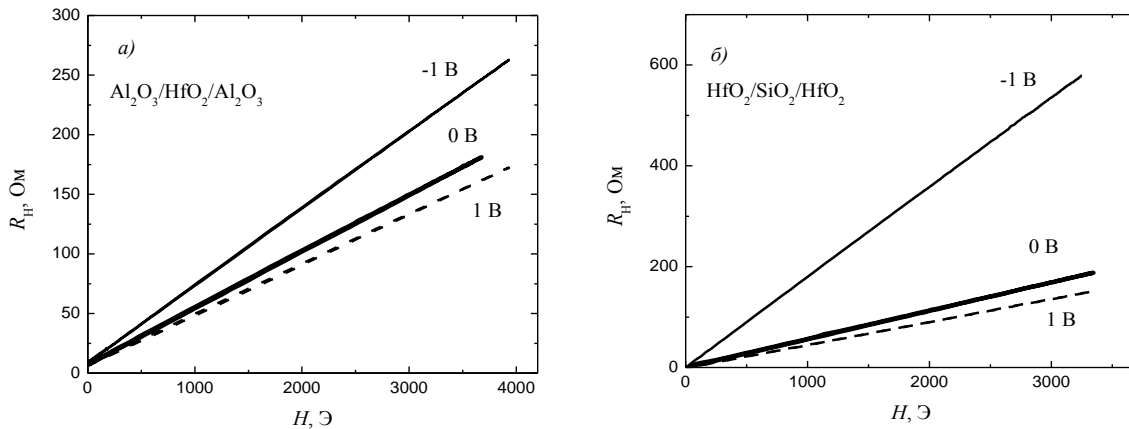


Рис. 3. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла при варьировании напряжением смещения для структуры с одиночным дельта-слоем Si при температуре 300 К с различными трехслойными диэлектриками: а) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2(20\text{ нм})/\text{Al}_2\text{O}_3$, б) $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2(200\text{ нм})/\text{HfO}_2$

Таким образом, можно заключить, что многослойные структуры, содержащие слои Al_2O_3 и HfO_2 , выращенные методом электронно-лучевого распыления, могут применяться в качестве подзатворного диэлектрического материала для приборов на основе GaAs. Показано, что в таких структурах есть возможность управлять величиной концентрации дырок или электронов в двумерном канале проводимости посредством изменения напряжения на затворе. Использование слоя HfO_2 с высокой диэлектрической проницаемостью позволяет существенно уменьшить толщину подзатворного диэлектрика, что может быть полезно для миниатюризации МДП-структур.

Работа выполнялась в рамках реализации государственного задания (№ 8.1054.2014/К и № 3.285.2014/К) Минобрнауки России, а также при финансовой поддержке РФФИ (гранты №15-02-07824_a, 15-38-20642мол_a_вед) и стипендии президента (конкурс СП-2015).

Авторы выражают глубокую признательность ведущему научному сотруднику НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского Б. Н. Звонкову за выращенные полупроводниковые структуры.

Литература

1. Синтез, свойства и применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в кремниевых приборах./ Под редакцией Асеева Л. А. и Гриценко В. А. (Новосибирск: издательство Сибирского отделения РАН. – 2011).
2. D. Shahrjerdi. III-V Channel MOS Devices with Atomic-Layer-Deposited High-k Gate Dielectrics: Interface and Carrier Transport Studies (Dissertation, University of Texas, 2008).
3. T. Yoshida, T. Hashizume // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 122102.
4. D. Chiba, F. Matsukura, and H. Ohno// Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 162505.

5. G. Roll, J. Mo, S. Johansson et al.// Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 2003503.
6. Y. Q. Wu, H. C. Lin, P. D. Ye, G et al.// Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 072105.
7. С.Г. Сазонов, З.Н. Зулуев, В.Е. Дрозд и др.// Письма в ЖТФ. 1998. Т.24. В.13. С. 58-63.
8. S. H. Chen, W. S. Liao, H. C. Yang et al.// Nanoscale Research Lett. 2012. V. 7. P. 431.
9. И.Л. Калентьева, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова и др.// Труды VII Всероссийской научно-технической конференции «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань: РГРТУ, 2014. Т.III. С.93-97.
10. Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // ФТП. 2007. Т.41. В.11. P. 1281-1308.

Калентьева Ирина Леонидовна: e-mail: istery@rambler.ru , тел.: +79202920787

COMBINED Al_2O_3 AND HfO_2 LAYERS AS GATE DIELECTRIC FOR GaAs- STRUCTURES

I.L. Kalentyeva, A.V. Zdoroveishev, A.V. Kudrin

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

We investigated different types of three-layer dielectric compositions obtained by low-temperature electron-beam sputtering: $Al_2O_3/SiO_2/Al_2O_3$, $Al_2O_3/HfO_2/Al_2O_3$ and $HfO_2/SiO_2/HfO_2$. The possibility of controlling the density of the carriers in the two-dimensional channel conductivity GaAs-structures by varying the gate voltage when using these materials as the gate dielectric is shown. At this stage, it is succeeded in reducing 5 times (80%) and an increase by 15% the layer carrier concentration. It is found that the use of HfO_2 layer with high dielectric constant allows to significantly reduce the thickness of gate dielectric lossless control conductivity.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУР НЕМТ

к. т. н. Певцов Е.Ф., к. ф.-м. н. Индришенок В. И., Ходорович В.Г.

Московский государственный университет
информационных технологий, радиотехники и электроники

Введение

Данная работа посвящена проблемам, связанным с отработкой методик приборно-технологического моделирования структур НЕМТ на основе GaN. Большая ширина запрещенной зоны нитрида галлия (3,4 эВ) и низкий коэффициент ударной ионизации делают возможным создание гетроструктурных GaN СВЧ транзисторов большой мощности и с высокими напряжениями смещения. В транзисторах с AlGaIn/GaN гетеропереходом достигается весьма высокая плотность электронов в канале (около 10^{13} см⁻²), что, учитывая большое значение насыщенной скорости электронов ($2,7 \cdot 10^7$ см/с), может обеспечить ток стока в несколько единиц ампер на миллиметр ширины канала. В настоящее время моделированию структур для НЕМТ посвящен целый ряд публикаций (см., например, [1, 2]), однако полученные в них результаты не являются достаточно полными. В рамках данной работы предложены методики моделирования эффектов, связанных с существованием глубоких центров и поляризацией и их влиянием на характеристики СВЧ-транзисторов и проведены соответствующие численные расчеты.

Исходные данные и методика моделирования

Механизмы высокой плотности электронов в канале связаны с эффектами спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в нитридных полупроводниковых материалах с кристаллической решеткой типа вюрцита. Гексагональная решетка вюрцита не имеет центра симметрии, а связь между атомами содержит значительную долю ионной составляющей. В таких кристаллах имеется спонтанная поляризация P_{SP} . Вектор P_{SP} параллелен оси c решетки и направлен противоположно направлению нормали к грани кристалла, на поверхности которой расположены катионы (Ga^+, Al^+). Величина поляризации зависит от химического состава материала. В $Al_xGa_{1-x}N$ величина P_{SP} приблизительно линейно зависит от доли Al и при $x=1$ в три раза больше, чем в GaN.

Упрощенная схема распределения поляризации в гетероструктурах, типичных для нитридгаллиевых НЕМТ, приведена на рисунке 1.

Структура, ориентированная по кристаллической оси [0001], состоит из толстого нижнего слоя GaN, слоя AlGaIn и тонкого верхнего слоя GaN. Вследствие разности параметра решетки a в AlGaIn и GaN, средний слой подвергается растяжению, поэтому в нем присутствует пьезоэлектрическая поляризация P_{PE} , совпадающая по направлению со спонтанной. Взаимосвязь величины и направления P_{PE} с тензором механических напряжений определяется тензором пьезоэлектрических коэффициентов. В верхнем, достаточно тонком слое GaN пьезополяризация незначительна вследствие релаксации. Условие непрерывности электрической индукции при наличии разности значений поляризации с различных

сторон гетероперехода учитывается введением зарядов Q^+ и Q^- на соответствующих гетерограницах. Величина поверхностной плотности зарядов Q^+ может превышать поверхностную плотность доноров $qN_D d$ в слое $Al_xGa_{1-x}N$ толщиной d . Как показано в работе [3], при $x=0,25$, $Q^+/q=1,4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (q —величина элементарного заряда).

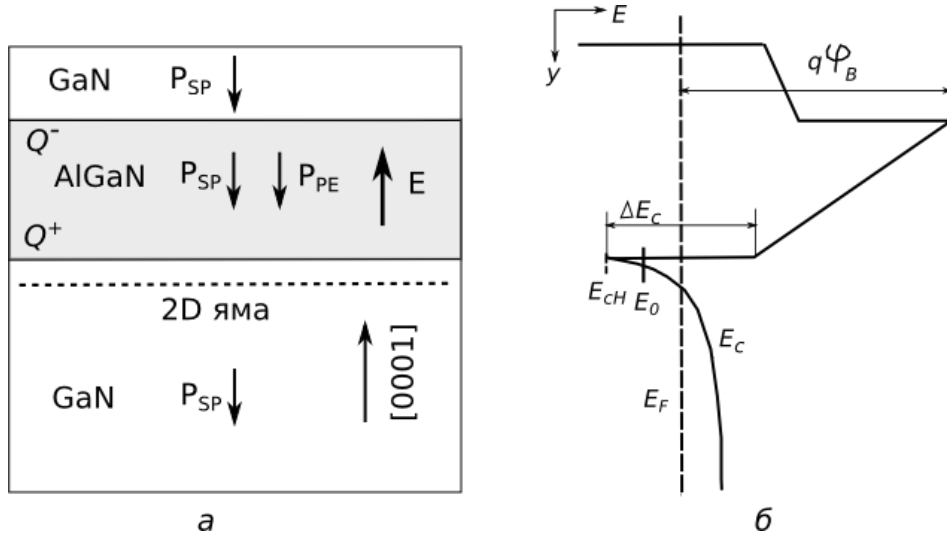


Рис. 1. Расположение слоев (а) и изменение энергии дна зоны проводимости E_c с расстоянием от поверхности (б) в структуре полевого транзистора. Энергетическая диаграмма соответствует условию термодинамического равновесия и присутствию металлического электрода на поверхности

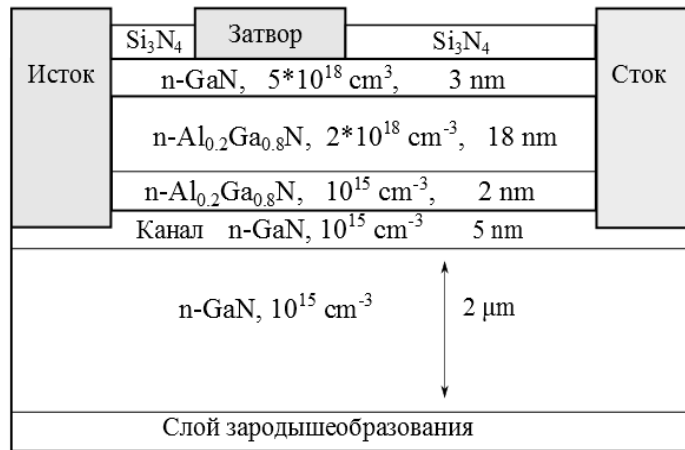


Рис. 2. Структура моделируемого полевого транзистора на GaN

Положительный заряд на границе гетероперехода подтягивает свободные электроны, и, как иллюстрируется рисунком 1б, на поверхности нижнего буферного слоя образуется потенциальная яма с поверхностной плотностью электронов n_s . Величина этой плотности электронов может быть найдена по формуле, определяющей изменение E_c на толщине среднего барьерного слоя в предположении отсутствия в нем зарядов [3]:

$$\frac{q^2 d}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{Q^+}{q} - n_s \right) = q\phi_B + \Delta E_c - (E_F - E_{CH}),$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ — относительная проницаемость вещества, $q\phi_B$ — высота потенциального барьера, ΔE_c — разрыв E_c на границе, $E_F - E_{CH}$ — расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости буферного слоя на границе:

$$(E_F - E_{CH}) = (E_F - E_0) + (E_0 - E_{CH}),$$

где E_0 — абсолютное значение энергии дна нижней подзоны в двумерной квантовой яме треугольного профиля. Интервалы энергий, входящие в последнее уравнение, можно выразить через n_s :

$$(E_F - E_0) = \frac{\pi \hbar^2}{m} n_s \quad \text{и} \quad (E_0 - E_{cH}) = \left(\frac{9 \pi \hbar^2 q^2}{8 \epsilon_0 \epsilon \sqrt{2m}} n_s \right)^{2/3}.$$

где m – эффективная масса электронов. Следует отметить, что в приведенных формулах переменные и параметры материала зависят от состава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Проведенный в [3] численный расчет дает значение $n_s = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при $d = 20 \text{ нм}$ и $x = 0,25$.

Элементы конструкции рассматриваемого транзистора показаны на рисунке 2.

Моделирование характеристик AlGaIn/GaN полевых транзисторов проводилось в системе моделирования Sentaurus TCAD версии J-2014. Контакты истока/стока заглублены так, что они перекрывают толщину канальной области буферного слоя. Расстояние между истоком и стоком 5 мкм, длина затвора 0,8 мкм, сток отстоит от затвора на 3 мкм.

Результаты моделирования и их обсуждение

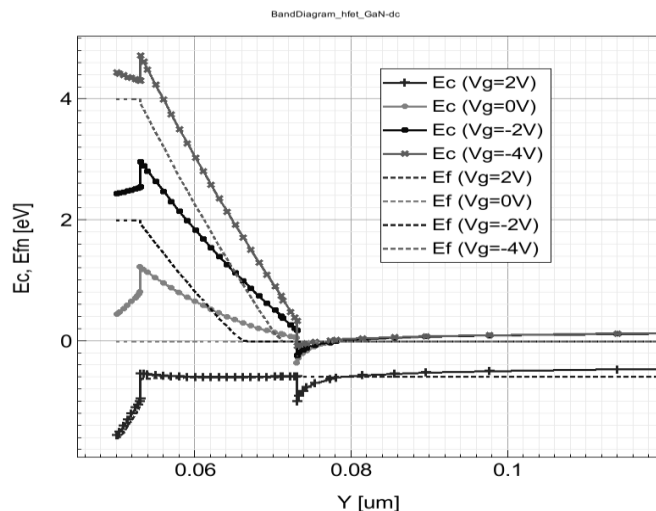


Рис. 3. Зонные диаграммы в сечении, проходящем через середину длины затвора, при различных напряжениях V_{gs} на нём и напряжении на стоке $V_{ds}=0$

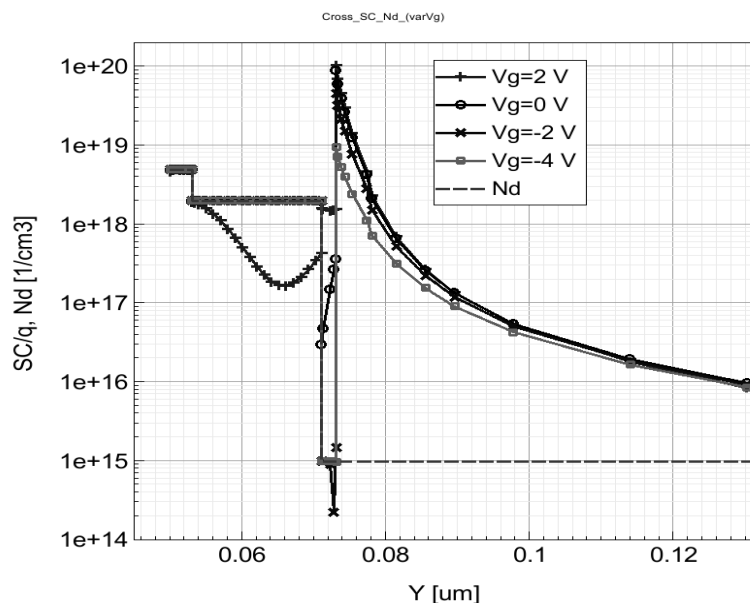


Рис. 4. Распределение плотности объемного заряда в сечении, проходящем через середину длины затвора, при различных напряжениях V_{gs} на нём и напряжении на стоке $V_{ds}=0$

Эффекты поляризации, учтенные в командном файле моделирования характеристик, видны из зонных диаграмм и распределений плотности объемного заряда, показанных на рисунках 3 и 4.

Увеличение отрицательного напряжения на затворе уменьшает плотность электронов в канале n_s . Поскольку поляризационный заряд Q остается неизменным, то увеличивается напряженность

электрического поля в барьере, и почти все напряжение V_{gs} приходится на барьерный слой. При положительном V_{gs} происходит увеличение n_s и уменьшение напряжения на барьерном слое. С дальнейшим ростом V_{gs} накопление n_s ограничивается из-за ухода электронов в затвор через неизменный барьер ΔE_c . Представленное на рисунке 3 смещение квазиуровня Ферми в буферном слое, вероятно, связано с использованием в исходной программе омических контактов к истоку/стоку барьерного типа.

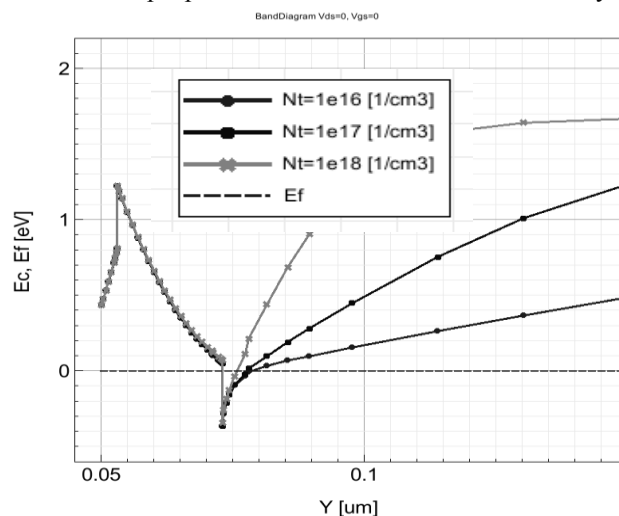


Рис. 5. Зонные диаграммы при различных концентрациях ловушек в слое GaN

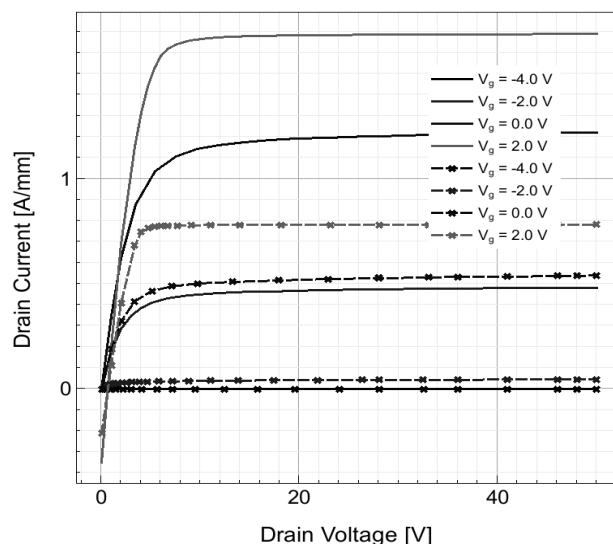


Рис. 6. Семейства выходных вольтамперных характеристик модели без (сплошные линии) и при наличии (штриховые линии) ловушек в слое GaN

Выходные вольтамперные характеристики $I_d(V_{gs})$ показаны на рисунке 5. Из этого рисунка видно уменьшение приращения тока и, следовательно, уменьшение крутизны передачи при положительном смещении затвора, связанное с отмеченной выше зависимостью n_s от V_{gs} . Максимальное значение крутизны в транзисторе без ловушек равно 3,7 См/мм. С целью выяснения роли ловушек в GaN они были включены командный файл для моделирования приборных характеристик. Заданная концентрация ловушек – $10^{16} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$, энергетическое положение – середина запрещенной зоны, сечение захвата электронов и дырок – 10^{-18} см^2 . Как видно из рисунка 5, такие ловушки могут значительно уменьшать тока стока, если их концентрация больше 10^{17} см^{-3} .

Определенный интерес представляет сравнение результатов моделирования с учетом и без эффектов поляризации, для чего из программы были исключены команды вызова моделей поляризации. Получено, что отсутствие поляризации приводит к резкому уменьшению тока стока и изменению характера переноса носителей заряда в канале. Недостаточная концентрация доноров в барьерном слое не может обеспечить высокой поверхностной плотности электронов в квантовой яме канала уже при $V_{gs}=0$. При отрицательном напряжении затвора яма опустошается, и электрическое поле проникает в глубину

буферного слоя. При $V_{gs}=-2$ В толщина области обеднения составляет половину толщины этого слоя. Ток стока определяется переносом электронов через необедненную часть буфера.

Выводы

Выполнено моделирование электрических характеристик AlGaIn/GaN полевого транзистора. Показано существенное различие процессов переноса носителей заряда в случаях сильной и слабой электрической поляризации в элементах конструкции. При отсутствии поляризационных эффектов заметно уменьшается локализация тока в области квантовой ямы. Рассмотрение роли центров захвата в объеме буферного слоя GaN показало, что глубокие ловушки могут оказывать существенное влияние на распределение электростатического потенциала и плотности электронов в объеме буферного слоя. В случае высокой концентрации ловушек захват ими электронов приводит к более резкому спаду плотности свободных электронов с ростом расстояния от канала, плотность тока в глубине буферного слоя становится меньше.

Литература

1. Радченко Д., Сбитнев К., Малеев Н. Моделирование СВЧ-транзистора на основе эпитаксиальной гетероструктуры (HEMT) с помощью САПР Synopsys Sentaurus TCAD // Компоненты и технологии. №7-8 – 2009 – С. 57-61.
2. A. Ashok, D. Vasileska, S.M. Goodnick, and O.L. Hartin Importance of the Gate-Dependent Polarization Charge on the Operation of GaN HEMTs // IEEE transaction on electron devices. 2009. - V. 56. - No. 5 - P.998-1007.
3. O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. E. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger and J. Hilsenbec Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures // J. Appl. Phys., 1999 - V. 85, - No 6 – P. 3222 – 3233.

PROCEDURES AND RESULTS OF MODELLING OF HEMT STRUCTURES

E. F. Pevtsov, V. I. Indrishenok, V.G. Hodorovich

Moscow State University of Informational Technologies, radio engineering and electronics

Simulation of electrical characteristics of AlGaIn/GaN field-effect transistor was made. There is a significant difference of the transport processes of charge carriers in the cases of strong and weak electric polarization in structural elements. In the absence of polarization effects is markedly reduced localization of current in the quantum well region. Consideration of the role of trapping centres in the GaN buffer layer volume has shown that deep traps may significantly affect the electrostatic potential distribution and density of electrons in the buffer layer. In the case of high concentration of traps in the capture of the electron leads to a sharp decline of density of free electrons with increasing distance from the channel, the current density in the depth of the buffer layer becomes smaller.

ГЕТЕРОБАРЬЕРНЫЕ ВАРАКТОРЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ПОДЛОЖКАХ ФОСФИДА ИНДИЯ

к.ф.-м.н. Беляков В.А.¹, д.т.н. Оболенский С.В.², Фефелова Е.Л.¹,
к.х.н. Ладенков И.В.¹, к.т.н. Малеев Н.А.², Васильев А.П.²,
к.ф.-м.н. Кузьменков А.Г.², Кулагина М.М.², Малеев С.Н.²

¹ JSC “NPP “Saljut”, Nizhny Novgorod

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Гетеробарьерные варакторные диоды (ГБВ) являются одними из перспективных активных компонентов для создания эффективных умножителей частоты миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Лучшие результаты на сегодняшний день достигнуты с использованием гетероструктур InAlAs/InGaAs/AlAs на подложках InP [1]. Наличие тонкого (единицы нм) слоя AlAs позволяет эффективно подавить туннельные токи утечки, однако требует тщательной оптимизации конструкции и технологии получения гетероструктуры из-за большого рассогласования параметров кристаллической решетки AlAs и слоев InAlAs (InGaAs), согласованных по параметрам кристаллической с подложкой InP. При этом следует принимать во внимание опубликованные результаты исследований влияния общей толщины гетероструктурного барьера на токи утечки [2], а также возможность накопления структурных напряжений при выращивании эпитаксиальных структур ГБВ.

Гетероструктуры и оптоэлектроника

В настоящем докладе рассмотрены результаты структурных исследований и предварительной приборной апробации для двух конструкций эпитаксиальных структур InAlAs/InGaAs/AlAs ГБВ, содержащих три барьерных слоя. В качестве гетеробарьера во всех случаях использовалась последовательность нелегированных слоев $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, помещенная между легированными слоями $n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Толщины слоев и профиль легирования для первой из двух исследованных конструкций (далее ГБВ1) аналогичны использованным в работах [2,4]. Вторая конструкция (ГБВ2) была разработана с целью получения параболической зависимости емкости от напряжения смещения, обеспечивающей увеличение эффективности умножения частоты. При расчетах конструкции гетероструктур использовалась одномерная численная модель для решения уравнения Пуассона, адаптированная применительно к гетероструктурам в системе материалов InAlAs/InGaAs/InP. Структуры ГБВ выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber Compact 21TM на полужизолирующих подложках InP. Структурные параметры выращенных образцов исследовались методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, а количество и распределение поверхностных дефектов анализировались с использованием рассеяния лазерного излучения на установке SurfScan. Была выявлена существенная корреляция между плотностью и поверхностным распределением дефектов, с одной стороны, и точностью соответствия параметров кристаллической решетки выращенных слоев InGaAs (InAlAs) соответствующим параметрам подложки InP, с другой стороны. Другими критическими параметрами, влияющими на структурное совершенство эпитаксиальных структур ГБВ, являются толщина AlAs вставок и общее количество барьерных слоев, а также температура держателя подложки и отношение потоков элементов III и V групп в ходе эпитаксиального процесса.

Основываясь на результатах проведенной оптимизации, были выращены эпитаксиальные структуры ГБВ двух типов, из которых были изготовлены тестовые диоды и планарные диодные структуры в интегральном исполнении, состоящие из двух последовательно включенных ГБВ (с шириной контакта 150мкм, 100мкм, 80мкм или 30мкм и длиной контакта 6мкм). Таким образом, исследуемые планарные структуры ГБВ содержат 6 последовательно включенных барьеров (3x2). Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и низкочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) проводились на измерителе RLC E4980A и измерителе ВАХ B2902A, соответственно.

На рис. 1 приведены ВФХ, измеренные на частоте 1 МГц для планарных диодных структур с разной шириной контакта, изготовленных из структуры ГБВ1. Из приведенных данных следует, что зависимости емкости от напряжения имеют симметричный характер, а коэффициент перекрытия (отношение максимальной емкости к минимальной) примерно равен трем. Следует отметить, что максимальная емкость пропорциональна ширине контакта.

На рис. 2 приведены ВАХ для исследуемых планарных диодных структур, из которых следует, что токи утечки при напряжениях смещения до 10 В не превышают 10 мкА для ГБВ с шириной контакта 150 мкм. Оценки показывают, что такие токи утечки не оказывают существенного влияния на эффективность умножения варактора, амплитуда напряжения которого составляет до 10 В на входе умножителя, что соответствует 1 Вт мощности в линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом.

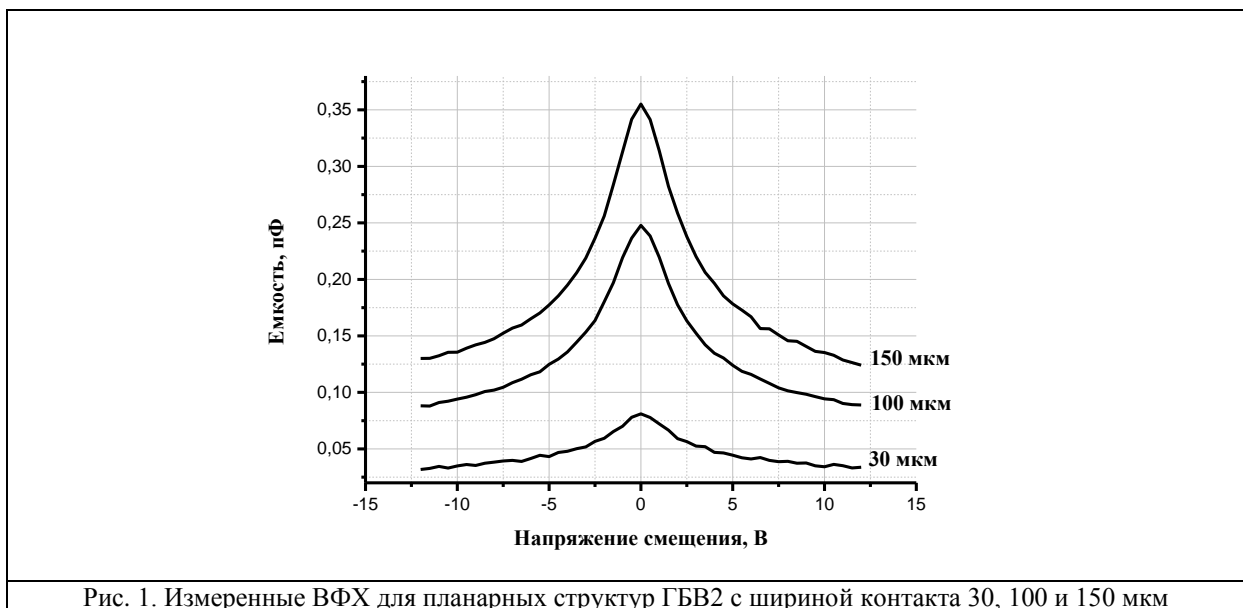


Рис. 1. Измеренные ВФХ для планарных структур ГБВ2 с шириной контакта 30, 100 и 150 мкм

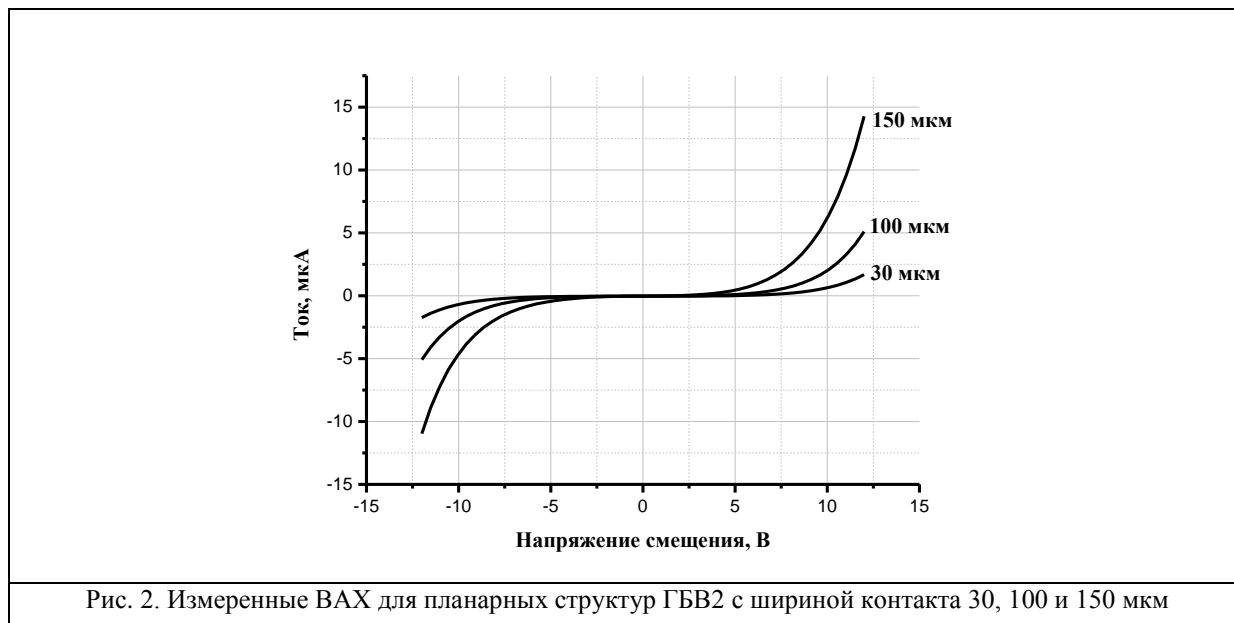


Рис. 2. Измеренные ВАХ для планарных структур ГБВ2 с шириной контакта 30, 100 и 150 мкм

Отобранные планарные диодные структуры ГБВ1 в интегральном исполнении с шириной контакта 80 мкм были использованы для предварительной апробации разработанных ГБВ в составе умножителя частоты мм диапазона. На 3 гармонике (94 ГГц) получена выходная мощность 40 мВт при эффективности преобразования около 10%. При дальнейшей оптимизации конструкции умножителя можно ожидать повышения выходной мощности до 100 мВт.

Результаты выполненных исследований подтверждают перспективность предложенной конструкции ГБВ для реализации умножителей частоты мм диапазона и демонстрируют важность выбора оптимальных параметров эпитаксиальной технологии для реализации эпитаксиальных структур ГБВ с заданными характеристиками.

Литература

1. A. Malko, T. Bryllert, J. Vukusic, J. Stake, "High efficiency and broad-band operation of monolithically integrated W-band HBV frequency tripler," in 24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Satna Barbara, USA, 2012, pp. 92-94.
2. T. A. Emadi, T. Bryllert, M. Sadeghi, J. Vukusic, J. Stake, "Optimum barrier thickness study for the InGaAs/InAlAs/AlAs heterostructure barrier varactor diodes", Applied Physics Letters, vol.90, no.1, 2007.

HETEROBARRIER VARACTORS ON THE BASIS OF HETEROSTRUCTURES ON SUBSTRATES OF InP

V. A. Belyakov¹, S. V. Obolensky², E. L. Fefelova¹,
I. V. Ladenkov¹, N. A. Maleev², A. P. Vasilyev²,
A. G. Kuzmenkov², M. M. Kulagina², S. N. Maleev²

¹ JSC "NPP "Saljut", Nizhny Novgorod

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

³ The Ioffe Institute of RAS

InAlAs/InGaAs/AlAs heterobarrier varactor (HBV) structures of two different designs were grown on semi-insulating InP using an Riber Compact 21TM solid-source molecular beam epitaxy (MBE) system. Heterostructure parameters were characterized using high-resolution XRD and SurfScan technique. Correlation between substrate-to-epitaxial layers matching, growth temperature and surface defect distribution were obtained. Test HBV diodes and integrated planar HBV structures in microwave topology were fabricated and investigated using capacitance-voltage and current-voltage measurements. Integrated planar HBV structure utilizes series connection of two HBV diode mesas, with total 6 heterobarriers, and a cross section area of 480 μm^2 . Fabricated devices demonstrate symmetrical capacitance-voltage characteristics and leakage current value less than 2 μA at 10 V. The capacitance-voltage characteristics shape depends on HBV structure design. In a preliminary frequency tripler experiment a maximum output power of 40 mW was generated at 94 GHz with a flange-to-flange efficiency of about 10%.

СВЧ ГЕНЕРАТОР ХАОСА НА БИПОЛЯРНОМ SiGe ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРЕ

к.ф.-м.н. Максимов Н.А., д.ф.-м.н. Панас А.И.

Фрязинский Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

Введение

При разработке генераторов хаотических колебаний в качестве активного элемента используются, как правило, кремниевые биполярные транзисторы. Такой выбор обусловлен, в первую очередь, нелинейностью р-п переходов, которая играет решающую роль при хаотизации колебаний. В современных системах связи и различных прикладных задачах, использующих хаотические сигналы, требуются сверхширокополосные генераторы хаоса с шириной полосы в несколько гигагерц. Однако, верхний частотный диапазон кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов из-за физических ограничений не превышает единиц гигагерц, что приводит к обужению спектра генерируемых частот и смещению мощности сигнала в нижнюю часть диапазона. В связи с этим актуальным является создание генераторов хаоса, в основе которых лежит транзистор, созданный по SiGe технологиям. Основное достоинство этих транзисторов по сравнению с биполярными кремниевыми - это значительно более высокая максимальная частота генерации до 200 ГГц при сохранении нелинейных свойств р-п переходов. Если же говорить о создании генератора в виде чипа, то еще одно преимущество SiGe технологии заключается в возможности создания в структуре чипа пассивных элементов схемы устройства. В данном докладе приводятся результаты исследования генератора хаотических колебаний и его модификации на основе п-р-п биполярного SiGe транзистора BFP 620F с граничной частотой 65 ГГц.

Моделирование в пакете ADS

Одним из простейших по структуре транзисторных генераторов хаоса является генератор, собранный по классической схеме емкостной трехточки, (генератор Колпитца).. В области низких частот странный аттрактор в такой системе впервые наблюдался в работе [1].

Для продвижения в СВЧ диапазон необходимо выбрать соответствующие номиналы реактивных и активного элементов. На рис 1 приведена схема одного из возможных вариантов такого генератора.

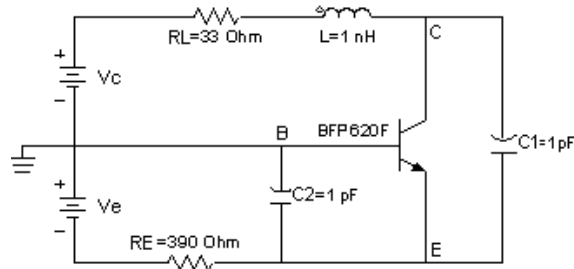


Рис.1. Емкостная трехточка СВЧ диапазона на кремний-германиевом транзисторе BFP 620F

Для исследований данной схемы использовался программный пакет Advanced Design System (ADS), позволяющий моделировать работу электронных устройств со сложной динамикой, в том числе и хаотической, в СВЧ диапазоне.

В качестве активного элемента в данной схеме используется кремний –германиевый транзистор BFP 620F, с частотой отсечки ~65 ГГц. Как было показано в [2] схему такого генератора можно рассматривать, как RLC фильтр нижних частот, активизированный биполярным транзистором. Соответственно и распределение мощности по диапазону, и верхняя граница спектральной характеристики колебаний, возникающих в такой системе, определяются амплитудно-частотной характеристикой этого фильтра [3,4,5].

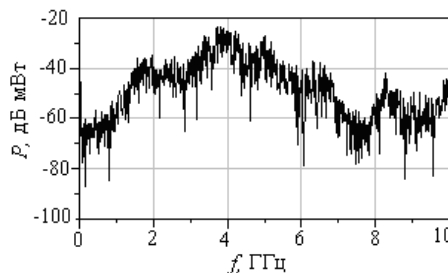


Рис. 2. Спектральная характеристика сигнала снятая в точке С схемы (рис.1).

Параметры схемы и питающие напряжения транзистора как на рисунке 1.

Гетероструктуры и оптоэлектроника

Номиналы элементов схемы подбирались таким образом, чтобы пик АЧХ находился в окрестности $f = 4\text{ГГц}$, центральной частоты диапазона 3-5ГГц, тем самым, создавая более предпочтительные условия для генерации в этой области. При наличии трех реактивных элементов система имеет 1.5 степени свободы и при определенных значениях параметров, в ней могут быть реализованы хаотические колебания. Один из спектров таких колебаний приводится на рис. 2.

Из спектральной характеристики следует, что основная часть мощности сигнала сосредоточена в окрестности $f=4\text{ГГц}$ и по уровню $\sim 15\text{дБ}$ перекрывает полосу от 2 до 6ГГц. Оценка энергетических характеристик генератора показывает, что при затраченной мощности $\sim 100\text{мВт}$, мощность СВЧ сигнала в т.С составляет $\sim 2\text{мВт}$, а к.п.д. $\sim 2\%$.

Эксперимент

Следующим шагом было создание экспериментального макета генератора, топология которого была рассчитана с помощью ADS, и изучение его работоспособности в требуемом диапазоне. В качестве активного элемента использовался, как и при моделировании, кремниво-германиевый n-p-n биполярный транзистор BFP620F. Схема генератора была собрана с использованием чип-элементов, соединяемых пайкой на контактных площадках, изготовленных на материале FR-4. Эскиз топологии генератора изображен на рис.3.

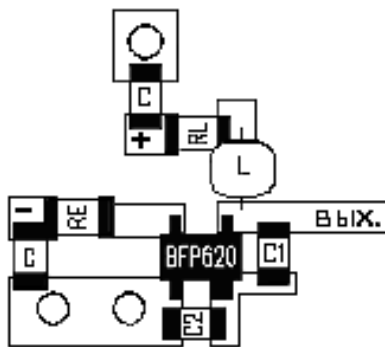


Рис. 3. Эскиз топологии и навесные элементы генератора.
 $RL=33\text{Ohm}$, $RE=390\text{Ohm}$, $L=1\text{nH}$, $C1=1\text{pF}$, $C2=1\text{pF}$

На схеме указаны такие же номиналы, как и при моделировании, но в ходе экспериментов номиналы элементов менялись для апробации различных вариантов генератора. Питание осуществлялось от двух источников напряжения. Экспериментальное исследование режимов генератора показало, что в системе при низких напряжениях коллектор-база ($U_{кб} \sim 0.2\text{В}$) и высоких эмиттер-база ($U_{эб} \sim 6\text{В}$) довольно легко возникают многочастотные колебания, однако переход к хаосу затруднителен, а возникающие хаотические колебания неустойчивы и существуют в узких зонах изменения питающих напряжений транзистора. Спектральная характеристика одного из таких режимов приведена на рис.7а. Спектр занимает широкую полосу частот, но весьма неравномерен по диапазону. Второй режим работы генератора наблюдался при высоком напряжении $U_{кб} \sim 12\text{В}$ и небольших $U_{эб} \sim 0.75-1.5\text{В}$. В этом случае хаос в системе возник практически сразу при открывании перехода эмиттер-база и устойчиво существовал при изменении напряжения на переходе в указанных пределах. Спектральная характеристика приведена на рис.4б.

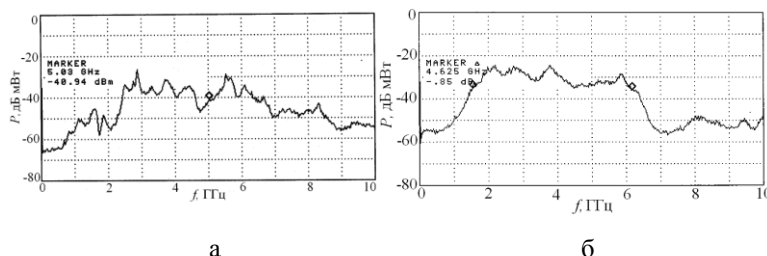


Рис. 4. Спектры хаотических колебаний генератора трехточки, а- $U_{кб}=1\text{В}$, $U_{эб}=6\text{В}$;
б- $U_{кб}=12\text{В}$, $U_{эб}=1.5\text{В}$, по уровню $\sim 15\text{дБ}$ ширина спектра $\sim 5\text{ГГц}$, (1.5-6.5ГГц)

Напряжения питания транзистора для первого режима были близки к полученным при моделировании в ADS, малое на коллекторе $U_{к} \sim 0.2-2\text{В}$ и большое на эмиттере $U_{э} \sim 5-7\text{В}$. Работающий в таком режиме транзистор давал на выходе генератора (коллекторная цепь) до 1мВт выходной мощности.

К.п.д. генератора при этом находилось в пределах 1%. При втором режиме работы транзистора выходная мощность на нагрузку 500 Ом достигала 4.5 мВт, а к.п.д. генератора составлял ~2%.

В диапазоне сверхвысоких частот, когда значения индуктивностей и емкостей измеряются единицами пН и пФ, начинают оказывать влияние емкости р-п переходов и паразитные индуктивности СВЧ-транзисторов. Влияние межэлектродных емкостей приводит к тому, что генерация колебаний в схеме может происходить и при отсутствии емкостей C1, C2 (рис.1). Обратная связь в рассматриваемом диапазоне частот может осуществляться за счет внутренних емкостей р-п переходов транзистора. Для кремний-германиевого транзистора BFP620F, который использовался как в процессе моделирования, так и при реализации лабораторных макетов генераторов емкость коллектор-эмиттер составляет $C_{кэ} \sim 0.2$ пФ. Емкости других переходов для этого транзистора соответственно $C_{кб} = 0.12$ пФ, $C_{эб} = 0.45$ пФ. При решении данной задачи в схеме генератора использовался только один внешний реактивный элемент, а именно, индуктивность, которая в совокупности с емкостями р-п переходов транзистора формировала частотно-избирательную цепь генератора (рис.5).

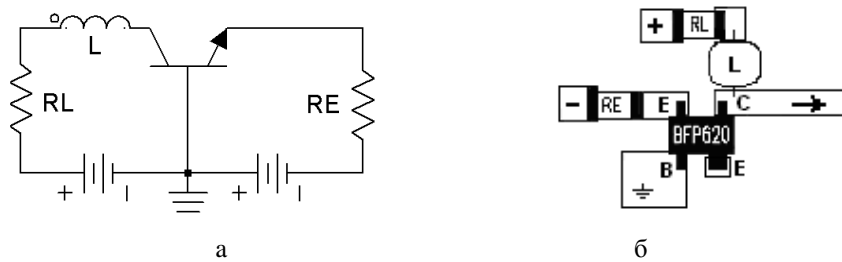


Рис. 5. а-радиотехническая схема генератора; б- Эскиз топологии и чип-элементы генератора. $RL=330\text{ Ом}$, $RE=390\text{ Ом}$, $L=1\text{ нГ}$

Был создан лабораторный макет генератора и проведено экспериментальное исследование его режимов при различных значениях внешней индуктивности L. Типичная картина развития колебаний в системе приведена на рис.6. Напряжение питания эмиттер-база было фиксированным и составляло $U_{эб} = 0.75\text{ В}$, роль управляющего параметра выполняло напряжение коллектор-база, изменяемое в пределах $U_{св} = 0-12\text{ В}$. Вплоть до $U_{св} = 9\text{ В}$ в системе существовало колебание на частоте $\sim 5.6\text{ ГГц}$. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к возникновению субгармонических колебаний удвоенного периода и при изменении $U_{св} = 11-12\text{ В}$, развивались устойчивые хаотические колебания (рис. 6).

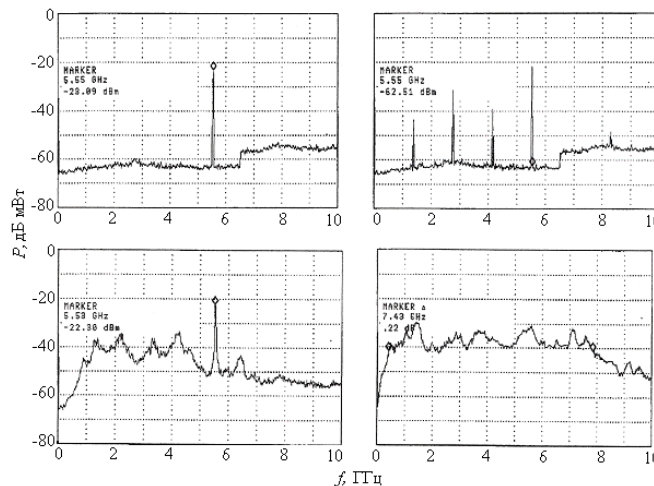


Рис. 6. Динамика спектральных характеристик колебаний в генераторе при фиксированном $U_{эб} = 0.75\text{ В}$ и изменении $U_{св}$ в пределах 0-12В

При $L = 1\text{ нГ}$ на выходе генератора, нагруженного на 500 Ом, наблюдались хаотические колебания в полосе частот 0.5–8 ГГц. Выходная мощность составляла 2.5 мВт, при потребляемом токе 3 мА и суммарном напряжении питания 11.5 В, что соответствует к.п.д. устройства $\sim 7\%$.

Заключение

В пакете ADS был промоделирован и исследован во временной и частотной областях в СВЧ диапазоне генератор хаоса, в основе которого лежит схема Колпитца. Изготовлен макет такого генератора и экспериментально, в зависимости от питающих напряжений транзистора, изучены его

динамические режимы. Как при моделировании, так и в физическом эксперименте было установлено, что в генераторе возможно существование сверхширокополосных хаотических режимов в требуемом диапазоне частот ($\Delta f/f_c \sim 1.25$, $\Delta f = 5 \text{ ГГц}$, $f_c = 4 \text{ ГГц}$). В другом экспериментальном макете генератора при отсутствии внешних емкостей и использовании только индуктивного элемента $L = 1 \text{ нГ}$, и емкостей переходов SiGe транзистора BFP620F были получены устойчивые хаотические колебания в более широкой полосе частот, $\Delta f = 7.5 \text{ ГГц}$ (увеличение полосы на 2.5 ГГц) и более высоким к.п.д. $\sim 7\%$. Результаты работы могут быть использованы при создании сверхширокополосных СВЧ генераторов хаотических колебаний в виде интегральной микросхемы на основе SiGe технологии с минимальным числом пассивных элементов.

Литература

1. Kennedy M.P. Chaos in the Colpitts oscillator. // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Theory and Applications, V.41, №.11, 1994, P.771-774.
2. Максимов Н.А., "Сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ диапазона на сосредоточенных элементах", Труды Всероссийской конф. "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике (СРСА-2006)", 2006, 4-7 июля, Муром. Россия. С. 154-157.
3. N.A. Maksimov and A.I. Panas, "Three-point circuit for generating band-limited chaotic oscillators", Proc. Int. Symp. Signals Circuits Systems (SCS'2001), Iasi, Romania, July 10-11, 2001, pp. 65-68.
4. А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас «Генерация хаоса», монография, 2012, изд. Техносфера, Москва, 423стр

E-mail: maksna49@mail.ru

MICROWAVE CHAOTIC OSCILLATOR WITH BIPOLAR SiGe HETEROTRANSISTOR

N. A. Maximov, A. I. Panas

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (Fryazino Branch)

The report is devoted to the problem of a practical implementation of microwave chaotic oscillators. This important issue is urgent problem because of the need to design energy-efficient sources of ultra wideband microwave chaotic signals for wireless devices meets the IEEE standards 802.15.4 and 802.15.6. The chaotic Colpitts oscillator is known as one of the generators with a simple structure A standard oscillator circuit includes an active element (bipolar SiGe transistor) and three external reactive elements (two capacitors and inductor). The oscillator implementation, results of the simulation and experiments are presented in the report. The generation of ultra wideband chaotic signals in the frequency range 1.5 – 6.5 GHz. with the efficiency of 2% is shown. On the other hand, a modified scheme of the chaotic Colpitts oscillator is proposed in the report. In this case, the capacitances of p-n junctions of the transistor play the role of external capacitors. It is shown, when using BFP620F bipolar SiGe transistor as active element the frequency band of the generated chaotic signal is increased to 7.5 GHz while the efficiency raise up to 7%.

ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УМНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Степанов А.А.¹, к. ф.-м. н. Новиков М.А.², к. ф.-м. н. Иванов В.В.²,
Уставщиков С.С.², Хышов А.А.²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт физики микроструктур РАН

В настоящее время в связи развитием концепции "Умных сетей" (smart grid) большой интерес вызывает разработка бесконтактных методов измерения и дистанционной диагностики в высоковольтных линиях электропередач на основе электро- и магнитооптических эффектов. Речь идет о так называемых измерительных оптических трансформаторах напряжения (ОТН) и тока (ОТТ), которые позволяют решить целый ряд проблем в современных высоковольтных линиях электропередач, которые не возможно решить традиционными электромагнитными измерительными методами. Одно из перспективных направлений исследований, которому посвящен настоящий доклад – создание ОТН на основе линейных электрооптических эффектов Поккельса и электрогирации. Этот эффект Поккельса связан с возникновением линейного двупреломления в кристаллах без центра симметрии при наложении на них электрического поля [1]. Эффект электрогирации связан с появлением вынужденной оптической

Гетероструктуры и оптоэлектроника

хиральности (вращение плоскости поляризации) в кристаллах при наложении внешнего электрического поля. По измерениям эллиптичности поляризации или угла вращения света можно определить величину приложенного к кристаллу электрического напряжения. В первом случае ОТН эквивалентен эллипсометру, а во втором поляриметру.

Многолетний интерес к волоконно-оптическим датчикам высокого электрического напряжения связан с потребностью в повышении точности измерения напряжения высоковольтных ЛЭП, в широком спектральном диапазоне. К настоящему времени продемонстрирован ряд датчиков на основе эффекта Поккельса [1,4]. Перспективными видятся датчики на основе продольного ЭО эффекта в объемных кристаллах, поскольку отклик такого датчика определяется интегральной оптической фазой вдоль луча в кристалле, строго пропорциональный напряжению высоковольтной линии [2], и не зависит от внешних воздействий, определяющих распределение электрического поля внутри кристалла. Особенную важность имеет высокая однородность кристаллов при значительных размерах. В этом смысле, интерес представляет использование анизотропных кристаллов, по сравнению с кубическими, в которых сильно влияние паразитного дупреломления. В настоящей докладе продемонстрирован датчик электрического напряжения до 110kV на основе продольного эффекта Поккельса в кристаллическом кварце с разрешением 20V.

Датчик состоит из приемного модуля, оптической головки с ЭО кристаллами и связывающего их волокна (рис. 1, рис. 2). Сенсорная часть оптической головки выполнена на двух кристаллах кварца ориентированных навстречу друг другу, что позволяет скомпенсировать собственное дупреломление кристаллов в широком диапазоне температур без потери в чувствительности. Электрооптическая постоянная кристаллического кварца очень маленькая и ОТН на его основе не обеспечивает высокой чувствительности. По этой причине для повышения чувствительности применяется модуляционный метод регистрации эффекта Поккельса. Однако ключевым преимуществом этого материала является наличие собственной анизотропии, высокая электрическая и химическая стойкость, развитая технология выращивания однородных кристаллов больших размеров, развитая технология обработки и относительно низкая себестоимость. Оптические компоненты головки склеиваются эпоксидным клеем и заливаются силиконовым компаундом для герметизации и повышения пробойных характеристик.

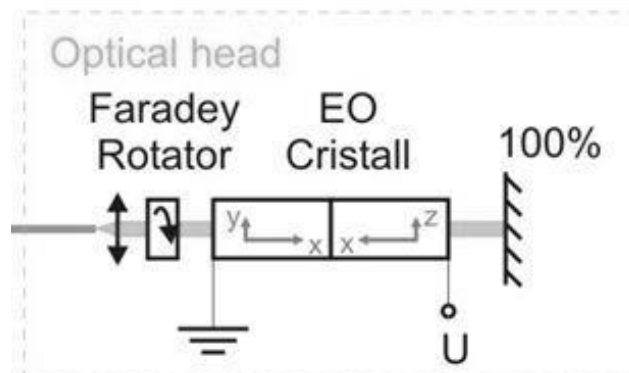


Рис. 1. Оптическая схема датчика

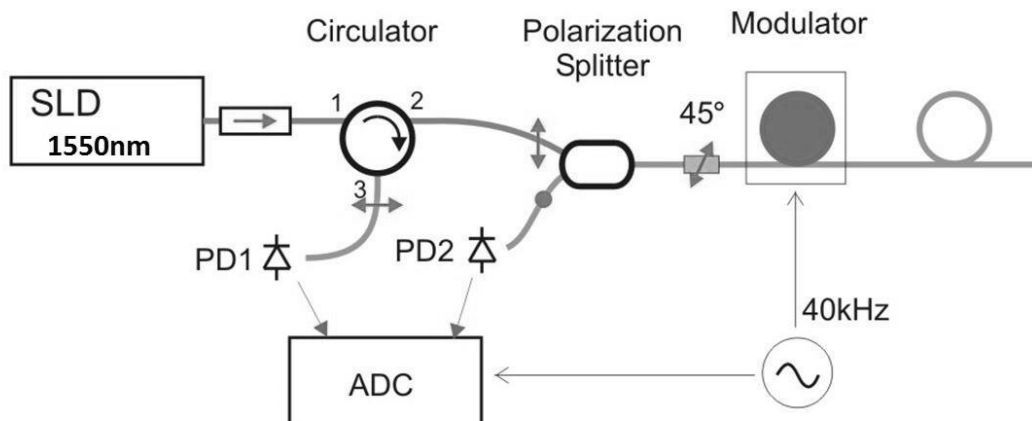


Рис. 2. Приемная схема датчика

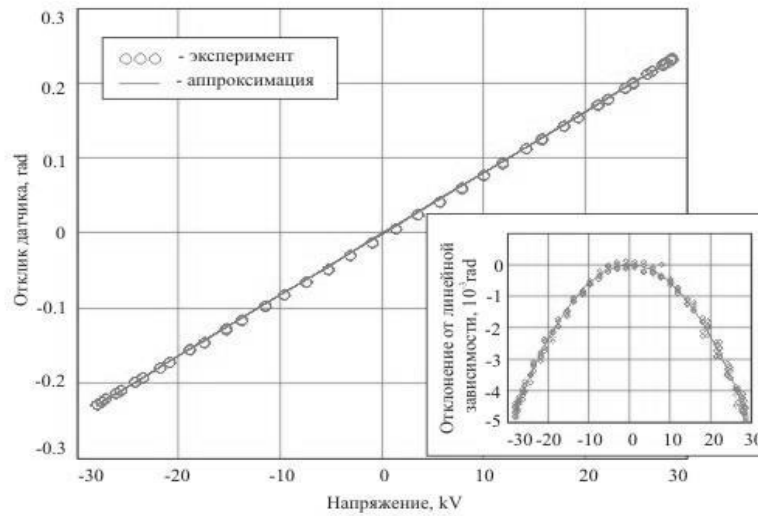


Рис. 3. Фазовый отклик датчика в зависимости от приложенного напряжения при комнатной температуре 25°C (слева)

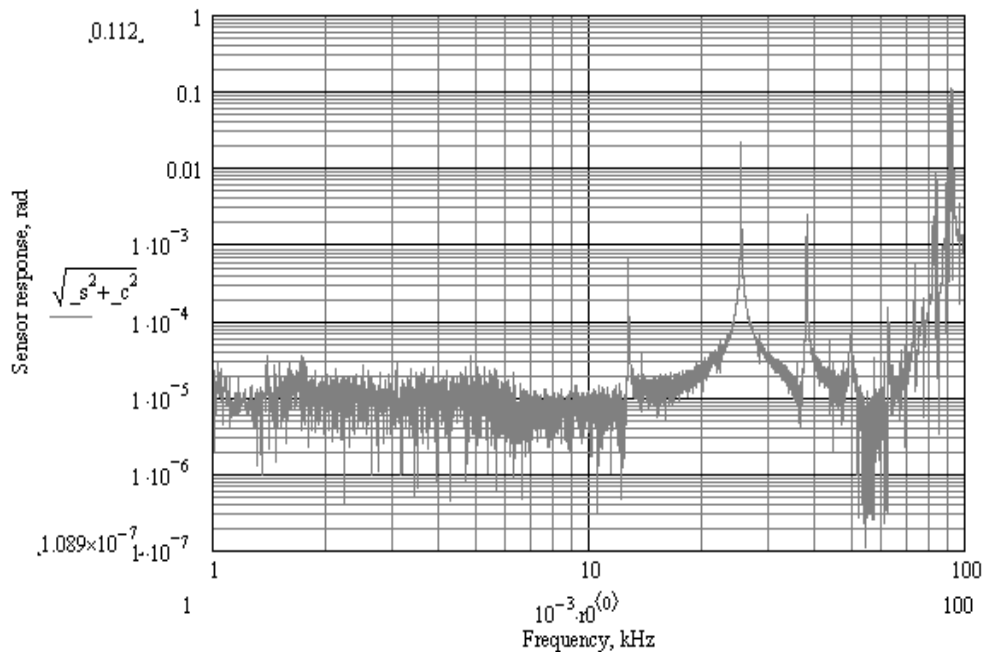


Рис. 4. АЧХ оптической головки (справа) в диапазоне от 1 до 150kHz при напряжении 200V

Приемная часть датчика выполнена на поляризационных волоконных компонентах по модуляционной схеме [3] (см. рис. 2), отличающейся наличием противофазного канала (PD2) для измерения мощности отраженной от оптической головки. Источником излучения является суперлюминисцентный диод с центральной длиной волны 15мкм с линейно-поляризованным оптическим выходом вдоль быстрой оси волокна. Перед модулятором делается сварка волокон с поворотом осей на 45°, для равномерного возбуждения поляризационных мод. Поскольку статическое двупреломление модулятора и связанного волокна компенсируется вращателем Фарадея [4], эллиптичность поляризации отраженного излучения на сварке 45° определяется суммарным набегом фаз в модуляторе и наведенным измеряемым электрическим полем двупреломлением кристаллов.

Экспериментальная проверка макета датчика проведена в диапазоне напряжений $\pm 30\text{kV}$. Стандарт отклонения шума в полосе 5kHz составляет $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ при частоте модуляции 40kHz , соответственно, фазовая чувствительность датчика $2 \cdot 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$. Фазовый отклик датчика от приложенного напряжения (см.рис 3) в исследованном диапазоне напряжений имеет характер близкий к

линейному: $\varphi(U) = \varphi_1 \cdot U + \varphi_2 \cdot U^2$. При комнатной температуре линейный коэффициент равен $\varphi_1 \approx (8.13 \pm 0.05) \cdot 10^{-6} \frac{rad}{V}$, что дает чувствительность по напряжению 20V. Коэффициент

квадратичной нелинейности получился равным $\varphi_2 \approx (-5.82 \pm 0.05) \cdot 10^{-12} \frac{rad}{V}$. Нелинейность

отклика датчика связана с наличием собственного двупреломления кварца и определяется точностью угловой юстировки оптической головки. Эксперименты с имитатором оптической головки на основе электрооптического модулятора МЛ103 показывают, что нелинейность можно минимизировать угловой юстировкой компонент.

Точность измерений в основном определяется конструкцией оптической головки: тепловым дрейфом калибровочной зависимости связанным с юстировкой оптической системы, распределением электрического поля и резонансными характеристиками головки. Для компенсации теплового дрейфа, в конструкцию промышленного варианта датчика нужно включать термометр, и делать калибровку во всем температурном диапазоне. На рисунке 4 приведена АЧХ фазового отклика для склейки двух кристаллов кварца длиной 20см на плоской поверхности под собственным весом и с демпфирующей прослойкой из силиконового герметика. Поскольку возбуждение высокочастотных резонансов возможно через взаимодействие с конструктивными элементами оптической головки, такого рода механического контакта необходимо избегать.

В силу свойств симметрии электрооптических кристаллов, значительный вклад в величину эффект вносит обратный пьезоэффект. За счет акустических резонансов такой ОНТ позволяет регистрировать электрические процессы только до несколько десятков кГц. Это обстоятельство отражается в ограничении спектрального диапазона датчика высокого напряжения, возможных ангармонических искажений, снижении динамического диапазона и искажении фронта импульсной характеристики. Фактически в таких приборах возникают проблемы, связанные с регистрацией быстропротекающих процессов в электросетях, например ударов молнии и импульсов напряжения при переключениях.

В настоящей докладе рассматривается другой вариант ОНТ на основе эффекта электрогирации в кристалле вольфрамата свинца $PbWO_4$, у которого отсутствует обратный пьезоэффект.

Кристаллы $PbWO_4$ широко применяются на ускорителях элементарных частиц как сенсорные элементы для сцинтилляторных счетчиков. Для этого в России освоена промышленная технология выращивания и обработки кристаллов оптического качества больших размеров. Угол поворота плоскости поляризации в продольном электрическом поле направленном вдоль оптической оси кристалла на длине волны 1550нм измерен нами экспериментально и составляет

$$(5.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-7} \frac{rad}{V/cm}.$$

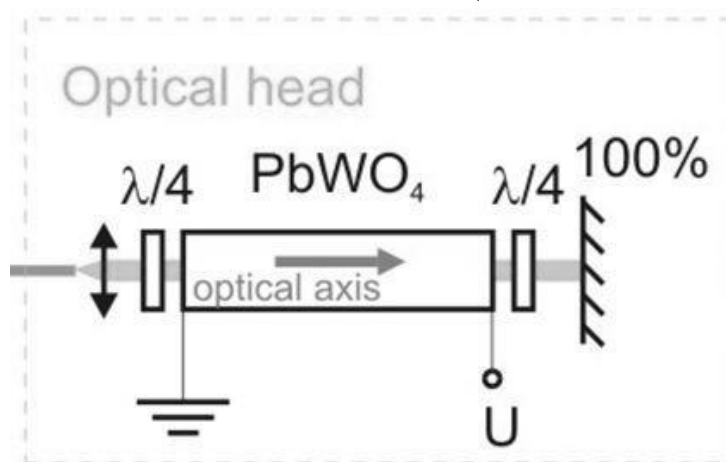


Рис. 5. Оптическая схема датчика на основе электрогирации

На основании этих измерений предложен дистанционный волоконно-оптический датчик высокого напряжения с оптической головкой на основе кристалла вольфрамата свинца, построена теоретическая модель головки и сделан расчет погрешностей измерения связанных с угловой юстировкой элементов. Оптическая схема датчика приведена на рисунке 5. Этот датчик состоит из приемного модуля, оптической головки с ЭО кристаллами и связывающего их волокна. Сенсорная часть оптической головки выполнена из кристалла $PbWO_4$ помещенного между двух четвертьволновых пластинок. В этом случае

такой оптический элемент полностью эквивалентен ячейке Погкельса. Оптическая ось кристалла ориентируется вдоль направления распространения света и силовых линий электрического поля. Для оптической головки заполненной сухим воздухом рассчитанной на напряжение 30kV длина кристалла должна составлять не менее 30мм. Регистрирующая часть полностью повторяет описанную выше схему ОНТ на основе эффекта Погкельса.

Исходя из экспериментально измеренной фазовой чувствительности приемного модуля $2 \cdot 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$, для датчика с описанной выше оптической головкой чувствительность по напряжению следует ожидать $\approx 5 \cdot V \cdot \text{Hz}^{-0.5}$.

В заключение хотелось бы заметить, что значительный интерес имеет повышение частотного диапазона датчика и уменьшение запаздывания. Решение этой проблемы лежит в области подбора кристаллов обладающих большим электрооптическим эффектом с малым вкладом обратного пьезоэффекта, например, кристалла КТР. Применения для этой цели ОНТ на основе электрогирации связано с проблемой недостаточной чувствительности и влиянием паразитного линейного двупреломления. Здесь необходимы дополнительные исследования.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение 14.578.21.0041 от 21.08.2014, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0041).

Литература

1. Bohnert K., et al, Optics and Lasers in Engineering, 43, 511-526 (2005)
2. Christopher P. Yakymyshyn, et al, Proc. of SPIE, 3201, 18 (1998)
3. Stephan Wildermuth, Klaus Bohnert, and Hubert Brändle, Proc. of SPIE, 7503, (2009)
4. Уставщиков С., Комарова С., Новиков М.А., Фотон-Экспресс, 78, 154-155 (2009)

FIVER OPTIC SENSOR FOR HIGH VOLTAGE MEASUREMENT IN SMART ELECTRIC GRID SYSTEMS BASED ON ELECTROOPTIC EFFECTS

A. A. Stepanov¹, M. A. Novikov², V. V. Ivanov²,
S. S. Ustavshikov², A. A. Nyshov²

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

²Institute for Physics of Microstructures of RAS

The report contains the description of development of Fiber optic sensors (FOVT) for High Voltage (from 20kV) measurement. Sensors method of operation is based on two effects – Pockels effect and Electrogyration effect. The sensors are basic elements of Smart Grid System. The report contains some results of develop of the optical scheme, crystal selection, data of sensitivity of the scheme and future development plans for these sensors.

АНАЛИЗ ВЗАИМНО-ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КВАДРАТУРНЫХ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

д. ф.-м. н. Богданов Ю.И.^{1,2,3}, Авосолянц Г.В.^{1,3}, Белинский Л.В.^{1,3},
к.ф.-м.н. Катамадзе К.Г.^{1,4}, член-корр. РАН Лукичев В.Ф.¹

¹Физико-технологический институт РАН

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

³Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

На основе принципа дополнительности Н. Бора с использованием формализма дробного преобразования Фурье выполнен анализ взаимно-дополнительных оптических квадратурных квантовых измерений. В рамках корневого подхода к квантовым измерениям разработаны методы, направленные на существенное улучшение томографии квантовых состояний. Выполнены численные эксперименты, демонстрирующие эффективность разработанных методов.

Принцип дополнительности Нильса Бора является одним из краеугольных камней квантовой механики и квантовых информационных технологий. Согласно этому принципу “evidence obtained under

different experimental conditions cannot be comprehended within a single picture, but must be regarded as complementary in the sense that only the totality of the phenomena exhausts the possible information about the objects" [1]. Принцип дополнителности настолько важен для описания квантовых явлений, что, например, согласно В. Паули «we might call modern quantum theory as "The Theory of Complementarity" (in analogy with the terminology "Theory of Relativity")» [2].

Формальное описание квантового состояния, основанное на понятиях вектора состояния и матрицы плотности, не сводится к какому-либо одному распределению вероятностей. Со статистической точки зрения квантовое состояние можно рассматривать как естественное обобщение понятия распределения вероятностей. Согласно принципу дополнителности, экспериментальное изучение квантового состояния должно базироваться на измерении совокупности взаимно- дополнительных распределений. Например, экспериментальное исследование квантовой системы будет более полным, если данные, полученные при изучении квантового ансамбля в координатном пространстве, дополнить изучением того же ансамбля в канонически сопряженном (импульсном) пространстве. Известная задача Паули (Pauli Problem), как раз, и состоит в том, чтобы реконструировать пси-функцию на основе координатного и импульсного распределений [2]. Благодаря развитию техники гомодинирования в современной квантовой оптике, задача об измерении квантового состояния перешла из сугубо теоретической области в область реальных квантовых информационных технологий, причем в более полной постановке, чем это первоначально предполагал В. Паули. Оказалось, что путем вращения фазы опорного генератора (гетеродина), можно изучать всевозможные квадратурные наблюдаемые электрического поля [3,4]. При этом, координата и импульс являются только двумя частными случаями, отвечающими фазам 0 и $\pi/2$ соответственно [5,6,7].

Квадратурная наблюдаемая в квантовой механике определяется как следующая линейная комбинация операторов координаты и импульса:

$$X_\theta = x \cos(\theta) + p \sin(\theta).$$

Заметим, что случай нулевого угла ($\theta = 0$) отвечает оператору координаты, а случай $\theta = \pi/2$ - оператору импульса.

Выразим операторы координаты и импульса через операторы рождения и уничтожения квантованного электромагнитного поля:

$$x = \frac{(a + a^\dagger)}{\sqrt{2}}, \quad p = -i \frac{(a - a^\dagger)}{\sqrt{2}}.$$

Тогда квадратурный оператор может быть представлен следующей формулой:

$$X_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} (a \exp(-i\theta) + a^\dagger \exp(i\theta)).$$

Рассмотрим задачу на собственные функции и собственные значения для квадратурного оператора:

$$X_\theta |X_\theta\rangle = x_\theta |X_\theta\rangle.$$

Мы обозначаем квадратурный оператор X_θ большой буквой, а его собственное значение x_θ - маленькой.

В качестве решения рассматриваемой задачи может служить следующее выражение для волновой функции квадратурного оператора:

$$K^*(x, x_\theta) = \psi(x|x_\theta) = \langle x | X_\theta \rangle = \sqrt{\frac{1+i \operatorname{ctg}\theta}{2\pi}} \exp\left(\frac{-i \operatorname{ctg}\theta x_\theta^2}{2}\right) \exp\left(i \frac{x_\theta x}{\sin\theta} - i \frac{\operatorname{ctg}\theta x^2}{2}\right).$$

Полученный набор функций удовлетворяет следующему условию полноты:

$$\int \psi(x|x_\theta) \psi^*(x'|x_\theta) dx_\theta = \delta(x - x').$$

Заметим, что квадратурная наблюдаемая X_θ имеет непрерывный спектр ($-\infty < x_\theta < +\infty$).

Полученная функция двух переменных $K^*(x, x_\theta)$ может рассматриваться как ядро интегрального преобразования, которое представляет собой так называемое дробное преобразование Фурье.

Переход от исходной волновой функции к квадратурной волновой функции обеспечивается посредством прямого дробного преобразования Фурье (Fractional Fourier Transform- FRFT):

$$\tilde{\psi}(x_\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(x, x_\theta) \psi(x) dx.$$

Переход от квадратурной волновой функции к исходной волновой функции обеспечивается посредством обратного дробного преобразование Фурье (Inverse Fractional Fourier Transform- IFRFT):

$$\psi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} K^*(x, x_\theta) \tilde{\psi}(x_\theta) dx_\theta.$$

Заметим, что ядра прямого и обратного преобразования являются комплексно сопряженными друг по отношению к другу.

Заметим также, что при $\theta = \pi/2$, когда $x_\theta = p$, дробное преобразование Фурье превращается в обычное преобразование Фурье.

В основе томографии оптических квантовых состояний лежит следующее важное свойство дробного преобразования Фурье. Пусть $\psi_n(x)$ $n=0,1,2,\dots$ - собственные функции гармонического осциллятора, задающие базисный набор функций Чебышева- Эрмита. Оказывается, что эти функции сохраняют свой вид под действием дробного преобразования Фурье (FRFT), приобретая при этом фазу $\exp(in\theta)$, которая зависит от номера базисной функции:

$$FRFT(\psi_n(x)) = \exp(in\theta)\psi_n(x_\theta).$$

С формальной точки зрения можно считать, что базисные функции Чебышева- Эрмита являются собственными функциями унитарного оператора, задающего дробное преобразование Фурье. В соответствии с унитарным характером преобразования, собственные значения равны по модулю единице (в нашем случае это $\exp(in\theta)$).

В настоящем исследовании мы опираемся на так называемый корневой подход к рассматриваемой проблематике, развитый в наших работах [8-12]. Томография на основе корневого подхода предполагает, что мы оцениваем не непосредственно матрицу плотности квантового состояния ρ , а квадратный корень из нее $c = \sqrt{\rho}$ (отсюда и название метода). Рассматриваемая величина есть амплитуда вероятности очищенного состояния. Понятно, что очищенное состояние определено неоднозначно, поскольку, если U - произвольная унитарная матрица, то $\sqrt{\rho}$ и $\sqrt{\rho}U$ эквивалентны. Такая неоднозначность, однако не создает каких-либо трудностей, поскольку рассматриваемые состояния отвечают одной и той же матрице плотности ρ .

Заметим, что непосредственное описание матрицы плотности как объекта в многомерном пространстве является простым только в случае двумерного ($s=2$) состояния кубита (в этом случае геометрия квантового состояния непосредственно задается сферой Блоха). Однако, по мере роста размерности гильбертова пространства, геометрия пространства состояний становится очень сложной [13].

В нашем случае квантовое состояние – это просто произвольная комплексная матрица c , удовлетворяющая условию нормировки $Tr(cc^+) = 1$. Размерность матрицы c равна $s \times r$, где s - размерность исходного гильбертова пространства, r - ранг квантового состояния (число компонент в смеси), $1 \leq r \leq s$. Фактически очищенное квантовое состояние «живет» в расширенном гильбертовом пространстве размерности $s r$. Простота описания пространства возможных состояний обеспечивает простоту итерационных процедур реконструкции, а также возможность описания состояний различного ранга от чистых ($r=1$) до максимально смешанных ($r=s$). Еще одно преимущество развиваемого подхода – это возможность измерения информации о параметрах квантового состояния, которая содержится в том или ином протоколе квантовых измерений.

Ниже в качестве примера мы рассматриваем томографию квантовых состояний на основе квадратурных измерений в рамках двух различных моделей. Первая, базовая модель, предполагает полный ранг матрицы плотности. Модифицированная модель позволяет рассматривать квантовые состояния различного ранга r , где $1 \leq r \leq s$. Ограничение ранга матрицы плотности существенно снижает уровень шумов в реконструированной матрице плотности. В обоих случаях мы используем метод максимального правдоподобия.

Рассмотрим результаты численного эксперимента по восстановлению чистых суперпозиций в пространстве состояний Фока.

Генерация данных осуществлялась методом Метрополиса. Было выполнено 300 экспериментов, объем выборки в каждом $n=10000$. Исследовалась следующая суперпозиция фоковских состояний:

$$\text{вакуум и два фотона: } |\psi\rangle = \frac{|0\rangle + i|2\rangle}{\sqrt{2}}.$$

В качестве характеристики точности квантовой томографии рассматривалась вероятность совпадения теоретического и экспериментально восстановленного квантовых состояний (Fidelity):

$$F = \left| \langle \psi_{exp} | \psi_{theor} \rangle \right|^2.$$

Обработка данных численных экспериментов дала следующие результаты в рамках адекватной модели чистого состояния ($r=1$) для среднего значения и стандартного отклонения вероятности совпадения: $\bar{F} = 0.999773$, $\sigma_F = 0.000167$.

Результаты численного эксперимента представлены на рис.1.

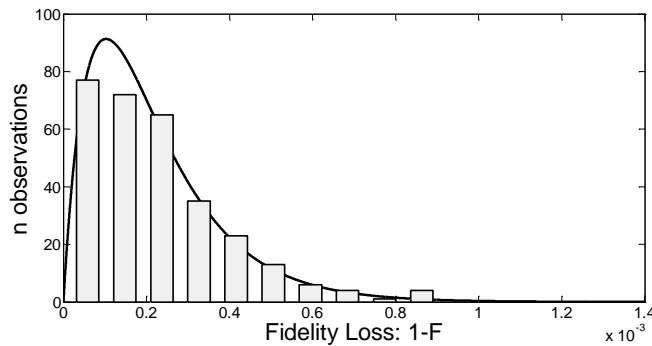


Рис. 1. Распределение потерь точности 1-F для адекватной модели

Рис. 1 демонстрирует хорошее согласие эксперимента с теорией (сплошная кривая). Теоретическая кривая построена в рамках универсального распределения для точности квантовых измерений [10].

Рассмотрим теперь результаты в рамках неадекватной модели смешанного состояния полного ранга ($r=3$). Объем выборки и число экспериментов те же. Среднее значение и стандартное отклонение для вероятности совпадения теперь имеют следующие значения: $\bar{F} = 0.995658$, $\sigma_F = 0.0041098$.

Полученные результаты представлены на рис. 2.

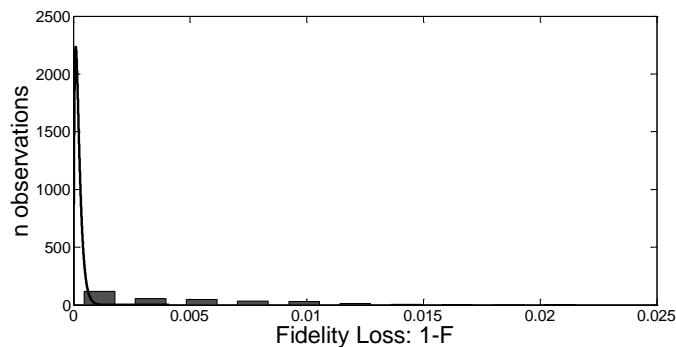


Рис. 2. Распределение потерь точности 1-F для неадекватной модели.

Средние потери точности $1-\bar{F}$ составили в случае адекватной модели 0.000227, а в случае неадекватной 0.004342. Мы видим, что при переходе к неадекватной модели потери точности выросли более чем на порядок (в 19 раз). Низкая точность неадекватной модели реконструкции выражается в том, что на рис.2 гистограмма примерно в 19 раз ниже и в 19 раз шире теоретического распределения.

Выводы

Рассмотрено статистическое восстановление квантовых состояний на основе оптических квадратурных квантовых измерений.

Показана тесная связь рассматриваемой задачи с фундаментальным принципом дополнительности Н. Бора и формализмом дробного преобразования Фурье.

Разработан комплекс методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих существенно более высокую полноту, адекватность и точность восстановления квантовых состояний по сравнению с другими известными подходами.

Результаты исследования имеют существенное значение для разработки методов контроля квантовых информационных технологий с прецизионно высокой точностью, близкой к фундаментальному пределу, который определяется законами квантовой физики.

Данная работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (проект 13-07-00711), а также программой Российской академии наук в области фундаментальных исследований.

Литература

1. Bohr N. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics // in Schilp P.A. (editor), Albert Einstein, Philosopher-Scientist (Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949), P.200-241.
2. W. Pauli General Principles of Quantum Mechanics Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1980. 212 p.

3. Horace P. Yuen, Vincent W. S. Chan Noise in homodyne and heterodyne detection // Optics Letters. 1983. V. 8. № 3. p.177-179.
4. Bonny L. Schumaker Noise in homodyne detection // Optics Letters. 1984. V. 9. № 5. p.189-191.
5. K. Vogel and H. Risken Determination of quasiprobability distributions in terms of probability distributions for the rotated quadrature phase // Phys. Rev. A. 1989. V. 40. №5. P.2847-2849
6. W.P. Schleich Quantum Optics in Phase Space. Wiley-VCH 2001. 696 p.
7. Yu.I. Bogdanov, S.P. Kulik The efficiency of quantum tomography based on photon detection. // Laser Phys. Lett. 10 (2013) 125202 (7p.)
8. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Krivitsky L.A., Kulik S.P., Penin A.N., Kwek L.C., Zhukov A.A., Oh C.H., and Tey M.K. Statistical Reconstruction of Qutrits // Phys. Rev. A. 2004. V.70. 042303
9. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Kulik S.P., Maslennikov G.A., Zhukov A.A., Oh C.H. and Tey M.K. Qutrit state engineering with biphotons // Phys. Rev. Lett. 2004. V.93. 230503.
10. Yu. I. Bogdanov Unified Statistical Method for Reconstructing Quantum States by Purification // Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP). 2009. Vol. 108. No. 6, pp. 928–935.
11. Bogdanov Yu.I., Brida G, Genovese M., Kulik S.P., Moreva E.V., and Shurupov A.P. Statistical Estimation of the Efficiency of Quantum State Tomography Protocols // Phys. Rev. Lett. 2010. V.105. 010404. 4p.;
12. Yu. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, A. P. Shurupov Statistical Estimation of Quantum Tomography Protocols Quality // Phys. Rev. A. 2011. V.84. 042108. 19 p.
13. I. Bengtsson, K. Zyczkowski Geometry of Quantum States: An Introduction to Quantum Entanglement. Cambridge University Press. 2006. 417 p.

ANALYSIS OF MUTUALLY COMPLEMENTARY QUADRATURE QUANTUM MEASUREMENTS

Yu.I. Bogdanov^{1,2,3}, G.V. Avosopyants^{1,3}, L.V. Belinsky^{1,3},
K.G. Katamadze^{1,4}, V.F. Lukichev¹

¹ Institute of Physics and Technology of RAS

² National Research Nuclear University 'MEPHI'

³ National Research University of Electronic Technology MIET

⁴ M. V. Lomonosov Moscow State University

The analysis of mutually complementary optical quadrature quantum measurements is presented. The analysis is based on the Bohr principle of complementarity and fractional Fourier transform. In the framework of the root approach to quantum measurement we have developed new methods that improve the tomography of quantum states. The numerical experiments showing efficiency of developed methods are executed.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛОЖЕНИЯ ШМИДТА

д. ф.-м. н. Богданов Ю.И.^{1,2,3}, к. ф.-м. н. Богданова Н.А.²,
член-корр. РАН Лукичев В.Ф.¹, Фастовец Д.В.^{1,2}, к.ф.-м.н. Чернявский А.Ю.^{1,4}

¹ Физико-технологический институт Российской академии наук

² Национальный исследовательский университет МИЭТ

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Представлен новый метод корреляционного анализа данных, основанный на дополнении классического распределения вероятностей до квантового состояния и разложении Шмидта. Показано, что математические методы квантовой механики позволяют разработать новые эффективные средства анализа статистических зависимостей и связей. Представленный в работе формализм является естественным инструментом для анализа корреляций, как классических, так и квантовых. Изучены алгоритмы вычисления частных и множественных коэффициентов корреляции с использованием числа Шмидта. Получены численные оценки рассматриваемых коэффициентов корреляции для различных распределений вероятностей и квантовых состояний.

Разложение Шмидта является одним из важнейших инструментов квантовой информатики [1]. Так называемые моды Шмидта лежат в основе технологии генерации и измерения многофотонных и высокоразмерных квантовых состояний света [2]. Оказывается, что формализм разложения Шмидта является естественным инструментом для анализа корреляций, как классических, так и квантовых [3]. Настоящая работа направлена на расширение и углубление результатов, полученных ранее в нашей работе [3]. В частности, мы увидим, что концепция корреляций Шмидта, предложенная в [3], с успехом может быть применена не только к стандартным корреляциям Пирсона, но и к так называемым частным и множественным корреляциям.

В основе нашего рассмотрения лежит дополнение классического распределения до квантового состояния. В рамках так называемого корневого подхода [4,5] произвольному многомерному вероятностному распределению $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ может быть сопоставлена волновая функция, которая в

простейшем случае может быть взята в виде квадратного корня из плотности:

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{p(x_1, x_2, \dots, x_n)}; \quad (1)$$

Используя рассматриваемое квантовое состояние и математический инструментарий квантовой механики, можно изучать различные статистические характеристики многомерных распределений.

Пусть имеется чистое двухчастичное состояние в пространстве $H_A \otimes H_B$, $d_A = \dim(H_A)$, $d_B = \dim(H_B)$. Тогда существуют ортонормированные базисы пространств H_A и H_B , для которых справедливо разложение Шмидта [1].

$$|\psi\rangle = \sum_{k=1}^{\min(d_A, d_B)} \sqrt{\lambda_k} |\psi_k^A\rangle |\psi_k^B\rangle; \quad (2)$$

λ_j – коэффициенты Шмидта (веса разложения), удовлетворяющие условию нормировки

$$\sum_j \lambda_j = 1; \quad (3)$$

Волновые функции (векторы в гильбертовом пространстве) $|\psi_k^A\rangle$ и $|\psi_k^B\rangle$ называются модами Шмидта. Оценить эффективное число таких мод позволяет следующая характеристика (число Шмидта)

$$K = \frac{1}{\sum_k \lambda_k^2}; \quad (4)$$

Легко заметить, что число Шмидта всегда не ниже единицы (равенство достигается в том случае, когда разложение содержит только одно ненулевое значение λ_k).

На основе числа Шмидта (4) мы вводим коэффициент корреляции Шмидта [3]:

$$\rho_{Schmidt}^2 = 1 - \frac{1}{K^2}; \quad (5)$$

Можно показать, что в случае двумерного нормального распределения, численное значение коэффициента корреляции Шмидта совпадает с традиционным коэффициентом корреляции Пирсона [3].

В задачах корреляционного анализа многомерных распределений для более полного и точного описания статистического ансамбля необходимо использовать меры корреляций, описывающие степень зависимости между различными подсистемами. Для этих целей, в классической статистике вводятся такие характеристики, как частный коэффициент корреляции и множественный коэффициент корреляции [6, 7].

Частный коэффициент корреляции описывает степень зависимости двух произвольных случайных величин при фиксированных значениях остальных. Эта характеристика позволяет выявить случаи, когда две переменные связаны между собой, но не за счет внутренних связей, а за счет взаимосвязи с внешними переменными.

С помощью множественного коэффициента корреляции характеризуется совокупное влияние на изучаемую случайную величину всех других величин. Наличие высокого множественного коэффициента корреляции свидетельствует о мультиколлинеарности.

Рассмотрим систему из n случайных величин X_1, X_2, \dots, X_n . Пусть данной системе соответствует корреляционная матрица $\rho = \{\rho_{ij}\}$. Обозначим R_{ij} алгебраическое дополнение элемента ρ_{ij} в матрице ρ . Частный коэффициент корреляции между случайными величинами X_{i_1} и X_{i_2} задается формулой:

$$\rho_{i_1 i_2 | 12 \dots (i_1-1)(i_1+1) \dots (i_2-1)(i_2+1) \dots n} = - \frac{R_{i_1 i_2}}{\sqrt{R_{i_1 i_1} R_{i_2 i_2}}}; \quad (6)$$

Степень линейной зависимости между случайной величиной X_i и совокупностью $X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n$ выражается с помощью множественного квадрата коэффициента корреляции[^]

$$\rho_{i-(12\dots(i-1)(i+1)\dots n)}^2 = 1 - \frac{\det p}{R_{ii}}; \quad (7)$$

Аналоги этих коэффициентов корреляции могут быть получены и для квантовых состояний (1), которые мы сопоставляем нашим распределениям вероятности. Рассмотрим это на примере системы трех случайных величин X_1, X_2, X_3 . Им соответствует некоторое трехмерное распределение вероятностей $p(x_1, x_2, x_3)$. Используя корней подход, введем волновую функцию соответствующую данному распределению:

$$\psi(x_1, x_2, x_3) = \sqrt{p(x_1, x_2, x_3)};$$

Данная волновая функция представляет собой трехмерный массив. Для нахождения частного коэффициента корреляции Шмидта (например, между переменными x_1 и x_2) достаточно взять срез этого массива (при фиксированном значении x_3), выполнить разложение Шмидта для этого среза и рассчитать затем коэффициент корреляции Шмидта по формуле (5).

Для нахождения множественного коэффициент корреляции Шмидта (например, между x_1 и совокупностью из x_2 и x_3) необходимо трехмерную волновую функцию $\psi(x_1, x_2, x_3)$ представить (переформатировать) в виде двумерного массива-матрицы, строки которой соответствуют переменной x_1 а столбцы совокупности x_2 и x_3 . Полученную матрицу нужно снова подвергнуть разложению Шмидта и рассчитать затем коэффициент корреляции Шмидта по той же формуле (5).

Оказывается, что в случае многомерного нормального распределения частный и множественный коэффициенты корреляции, рассчитанные с использованием разложения Шмидта, совпадают с коэффициентами корреляции, вычисленными по формулам (6) и (7).

В качестве примера для моделирования были рассмотрены трехмерные нормальные распределения со следующими заданными корреляционными матрицами:

$$\rho_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0.9 & 0.6 \\ 0.9 & 1 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 1 \end{pmatrix}; \rho_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0.81 & 0.9 \\ 0.81 & 1 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 1 \end{pmatrix};$$

Исследовалась зависимость между первой и второй переменной (частный коэффициент корреляции). В первом случае использовалась матрица ρ_1 . Численные значения квадратов частных коэффициентов корреляций совпадают ($\rho_{12-3}^2 = 0.75$).

Мы видим, что частная корреляция оказывается ослабленной по сравнению с исходным значением коэффициента корреляции между x_1 и x_2 ($\rho_{12}^2 = 0.81$).

Оказывается, что корреляция между переменными x_1 и x_2 может исчезнуть вовсе, что иллюстрирует рис.1. В этом случае используется корреляционная матрица ρ_2 . Рисунок 1а отвечает маргинальному распределению переменных x_1 и x_2 с коэффициентом корреляции 0.81, когда по переменной x_3 выполнено интегрирование. Графики 1б, 1в и 1г соответствуют разным срезам трехмерного распределения $p(x_1, x_2, x_3)$ при фиксированных различных значениях x_3 . Исходный квадрат коэффициента корреляции в этом случае есть $\rho_{12}^2 = 0.6561$. Расчеты частных коэффициентов корреляции дают нулевое значение корреляции ($\rho_{12-3}^2 = 0$). Таким образом, в рассматриваемом случае корреляция между x_1 и x_2 была целиком обусловлена их взаимодействием с внешней переменной x_3 .

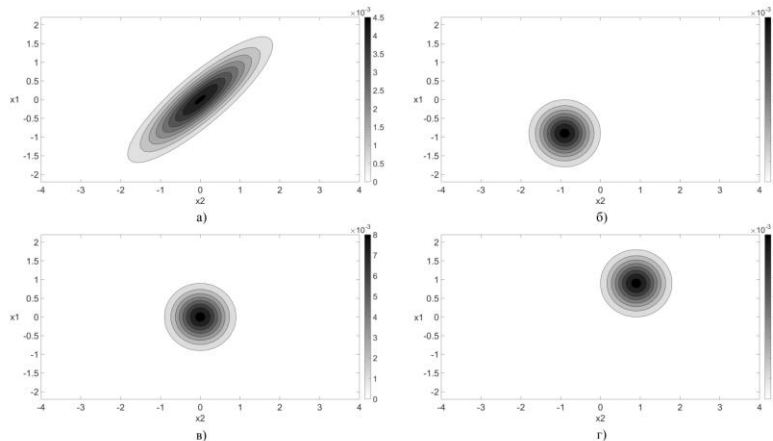


Рис. 1. Иллюстрация исчезновения корреляции между переменными x_1 и x_2 при учете третьей переменной x_3 . Здесь $x_3 = -1$ для рис. 1б, $x_3 = 0$ для рис. 1в, $x_3 = 1$ для рис. 1г

В случае многомерного нормального распределения расчеты множественных коэффициентов корреляций двумя различными указанными способами дают один и тот же результат. При использовании матрицы корреляций ρ_1 имеем $\rho_{1-23}^2 = 0.84$ (в этом случае связь с совокупностью двух переменных выше, чем связь с каждой отдельно взятой переменной). При использовании матрицы корреляций ρ_2 имеем $\rho_{1-23}^2 = 0.81$ (в этом случае первая переменная связана только с третьей и добавление второй переменной не увеличивает корреляционную связь).

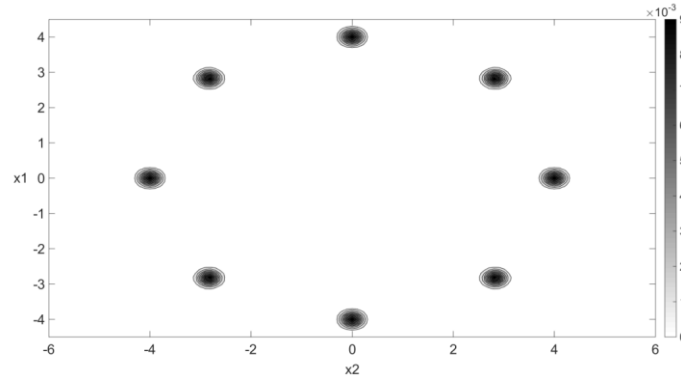


Рис. 2. Двумерное распределение вероятностей – смесь восьми гауссиан

Моды Шмидта позволяют представить корреляции в форме стопроцентных корреляций двух подсистем, образующих исходную систему. В качестве примера, рассмотрим двумерное распределение вероятностей, представляющее собой смесь восьми гауссиан (рис.2)

Веса мод Шмидта и число Шмидта приближенно составляют (λ_j - вес j -ой моды):
 $\lambda_1 = 0.5; \lambda_2 = \lambda_3 = 0.25; K = 8/3$.

Квадраты коэффициенты корреляции Пирсона и Шмидта в этом случае равны соответственно:

$$\rho^2 = 0; \quad \rho_{Schmidt}^2 = \frac{55}{64} = 0.859375$$

Таким образом, в рассматриваемом случае разложение Шмидта позволяет выявить корреляционную связь, которая оказывается скрытой при традиционном рассмотрении с использованием коэффициента корреляции Пирсона.

Выводы

Показано, что математический инструментарий квантовой механики позволяет существенно улучшить классический статистический анализ.

Показано, что дополнение классического распределения вероятностей до квантового состояния и разложение Шмидта дают эффективные средства для выявления корреляционных зависимостей и связей.

Результаты исследования имеют существенное значение для более глубокого понимания статистического анализа данных и могут быть использованы при разработке высокоразмерных квантовых систем обработки информации.

Данная работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (проект 13-07-00711), а также программой Российской академии наук в области фундаментальных исследований

Литература

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006, 824 с.
2. M. V. Fedorov, M. A. Efremov, P. A. Volkov, E. V. Moreva, S. S. Straupe, and S. P. Kulik Anisotropically and High Entanglement of Biphoton States Generated in Spontaneous Parametric Down-Conversion // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99, 063901.
3. А.Ю. Богданов, Ю.И. Богданов, К.А. Валиев Информация Шмидта и запутанность квантовых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер.15. Вычислительная математика и кибернетика. 2007. №1. с. 37-48; arXiv:quant-ph/0512062
4. Богданов Ю.И. Основная задача статистического анализа данных: корневой подход. М. МИЭТ. 2002. 96 с.
5. Ю. И. Богданов Основные понятия классической и квантовой статистики: корневой подход // Оптика и спектроскопия. 2004. Т.96. №5. С.735-746.
6. Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи. Издательство «Наука», 1973, 899 с.
7. Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия. Ред. Прохоров Ю.В. Москва. Издательство «Большая Российская энциклопедия».1999. 912 с.

**RESEARCH OF STATISTICAL CORRELATION CHARACTERISTICS
WITH USING OF SCHMIDT DECOMPOSITION**

Bogdanov Yu. I.^{1,2,3}, Bogdanova N.A.², Chernyavskiy A.Yu.^{1,4},
Fastovets D.V.^{1,2}, Luckichev V.F.¹

¹ Institute of Physics and Technology of RAS

² National Research University of Electronic Technology MIET

³ Moscow National Research Nuclear University "МЭФТИ"

⁴ M.V. Lomonosov Moscow State University

The new correlation data analysis method based on the complements of classical probability distribution to quantum state and Schmidt decomposition is presented. It is shown that mathematical methods of quantum mechanics allow us to develop new effective tools of analysis of statistical dependences and relationships. The presented formalism is the natural approach for the analysis of both classical and quantum correlations. Algorithms of calculation of partial and multiple correlation coefficients using Schmidt number were studied. Numerical estimates of these correlations coefficients were calculated for different probability distributions and quantum states.

**ЭПР И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НИТРИДА КРЕМНИЯ,
ОБОГАЩЁННОГО КРЕМНИЕМ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Добычин Н.А.¹, к. ф.-м. н. Карзанов В.В.²

¹ ФГУП «ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нитрид кремния (Si_3N_4) – один из основных диэлектриков кремниевой микроэлектроники. К настоящему времени подробно изучены его электрические, тепловые, прочностные и химические свойства, разработаны методы получения. Новая волна интереса к этому материалу в последние годы связана с его способностью эффективно люминесцировать в широком интервале длин волн: от ближнего УФ- до ближнего ИК-диапазона в зависимости от стехиометрического и дефектно-фазового состава. Здесь открывается перспектива создания светоизлучающих структур на основе кремниевой технологии, что крайне актуально для современной микроэлектроники.

В настоящем докладе приводятся результаты экспериментального исследования пиролитических пленок Si_3N_4 , обогащенных кремнием с помощью ионной имплантации в широком интервале доз облучения. Изучались фотолюминесценция (ФЛ) в видимом диапазоне длин волн, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), а также спектры пропускания.

Исходные пленки люминесцировали в сине-зеленой полосе видимого света ($\lambda_{\text{max}}=460 \pm 20$ нм), парамагнитные центры в них не обнаруживались. Ширина оптической щели, определенная из спектров пропускания, составляла 4,9 эВ, при этом вблизи порога пропускания наблюдался «пьедестал» до 2,5 эВ. Температурная зависимость интенсивности ФЛ имела вид, характерный для экситонной люминесценции. Эти данные указывают на то, что наблюдаемая ФЛ – результат электронных переходов между «хвостами» зонных состояний.

После имплантации кремния ФЛ угасала до уровня шума, но в таких образцах наблюдался спектр ЭПР, представляющий собой суперпозицию спектральных линий в основном от двух известных парамагнитных дефектов: К-центров (трех координированный кремний или вакансия азота) и D-центров (кремний в позиции азота). Соотношение между ними зависело от энергии ионного пучка: при энергии 40 кэВ преобладали D-центры, а при энергии 100 кэВ – К-центры, что связано с плотностью каскадов смещений. Эти парамагнитные дефекты отжигались при температурах 600-800 °С (конкретное значение определялось дозой внедрения). После таких отжигов восстанавливалась сине-зеленая ФЛ, но ее центр смещался к $\lambda_{\text{max}}=500 \pm 20$ нм, т.е. она становилась зелено-желтой. Кроме отмеченной ФЛ наблюдалась еще и «красная» полоса 600-800 нм, центр которой сдвигался в сторону больших длин волн с ростом дозы облучения, а максимум интенсивности достигался при дозах $\Phi=3 \times 10^{16}$ см⁻² (E=40 кэВ) и $\Phi=8 \times 10^{16}$ см⁻² (E=100 кэВ). На спектрах пропускания «пьедестал» становился более интенсивным, а его край сдвигался к 2 эВ.

Отжиги при более высоких температурах гасили ФЛ, при этом появлялся спектр ЭПР, соответствующий парамагнитным азотно-кремниевым кластерам, возникающим на границах раздела кремниевых включений и Si_3N_4 .

**EPR AND PHOTOLUMINESCENCE SILICON NITRIDE,
ENRICHED SILICON BY ION IMPLANTATION**

N.A. Dobichin¹, V.V. Karzanov²

¹ FSCP Research Institute of Measuring Systems n. a. Yu. E. Sedakov

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

This report presents the results of an experimental study of pyrolytic films Si₃N₄, enriched in silicon by ion implantation in a wide range of doses. The photoluminescence (PL) in the visible wavelength range, electron paramagnetic resonance (EPR) and transmission spectra were studied.

**ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СХЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ОАВ РЕЗОНАТОРА ОТ ЕГО
КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ**

д.т.н. Козлов А.Г.^{1,2}, Танская Т.Н.^{1,2}, к.т.н. Зима В.Н.¹

¹ ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

² Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Тонкопленочные резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ) широко используются в современной радиоэлектронной аппаратуре [1-5]. Одна из распространенных конструктивных разновидностей данного типа резонаторов построена на основе электроакустического преобразователя (пьезоэлектрический слой и два металлических электрода), акустически изолированного от подложки с помощью акустического Брэгговского отражателя [1, 2, 6]. Резонаторы на ОАВ используются в полосовых фильтрах [1, 2], генераторах сигналов [3] и сенсорах с частотным выходным сигналом [4, 5]. При разработке резонаторов на ОАВ и устройств на их основе необходимо знать связь между их конструктивными параметрами и свойствами используемых материалов с одной стороны и характеристиками резонатора с другой стороны. Одним из путей решения данной задачи является использование модифицированной модели Баттерворта-ван Дайка [6, 7], в которой структура резонатора заменяется эквивалентной электрической схемой, состоящей из элементов с сосредоточенными параметрами. В этом случае эквивалентная электрическая схема ОАВ резонатора (рис. 1) содержит следующие элементы: статическую емкость (C_0), статическое сопротивление (R_0), динамическую емкость (C_m), динамическое сопротивление (R_m), динамическую индуктивность (L_m), сопротивление электродов (R_{el}). Данная модель полностью описывает характеристики резонатора вблизи резонансного промежутка с учетом потерь в пьезоэлектрическом слое и в тонкопленочных электродах. При этом статическая емкость представляет собой собственную емкость пьезоэлектрического слоя, расположенного между двумя электродами, а динамические параметры характеризуют электроакустические свойства пьезоэлектрического слоя [8]. Динамическое сопротивление характеризует акустическое затухание в пьезоэлектрическом слое, динамическая индуктивность учитывает упругие свойства, а динамическая емкость – механическую инерцию пьезоэлектрического слоя. Статическое сопротивление характеризует потери в пьезоэлектрическом слое, а сопротивление электродов – потери в тонкопленочных слоях, из которых сформированы электроды. Значения параметров элементов эквивалентной схемы резонатора также зависят от конструктивных параметров резонатора [9], среди которых важным является площадь верхнего электрода электроакустического преобразователя. Для тонкопленочных ОАВ резонаторов этот вопрос до настоящего времени подробно не рассматривался. В связи с этим целью работы является определение зависимости параметров элементов эквивалентной схемы резонатора с акустическим Брэгговским отражателем от площади верхнего электрода электроакустического преобразователя.

Для исследования влияния площади верхнего электрода на значения параметров элементов эквивалентной схемы резонатора с акустическим Брэгговским отражателем были изготовлены опытные образцы резонаторов. Электроакустический преобразователь резонатора был выполнен на основе пленки оксида цинка с двумя алюминиевыми электродами. Со стороны нижнего электрода располагался Брэгговский отражатель на основе 5 пар слоев молибдена и алюминия, который находился на ситалловой подложке. Площадь верхнего электрода варьировалась в диапазоне 0,01-0,04 мм². Электрические характеристики тонкопленочного резонатора исследовались с помощью векторного анализатора цепей E5071C фирмы Agilent Technologies с использованием измерительных зондов G-S-G.

На рис.2а приведены измеренные частотные зависимости входной активной проводимости (G) и входной реактивной проводимости (B) резонатора. Максимальное значение активной проводимости

$G_{\max} = 31,43$ мСм получено на частоте 2,978 ГГц. На рис.26 представлена измеренная частотная зависимость модуля входного электрического импеданса резонатора, которая показала наличие двух резонансов – последовательного на частоте 2,978 ГГц и параллельного на частоте 2,989 ГГц. Небольшой резонансный промежуток (~ 11 МГц) связан с малым значением коэффициента электромеханической связи пленки оксида цинка. Частотные зависимости активной и реактивной проводимости, и модуля электрического импеданса характерны для тонкопленочных резонаторов на ОАВ [1].

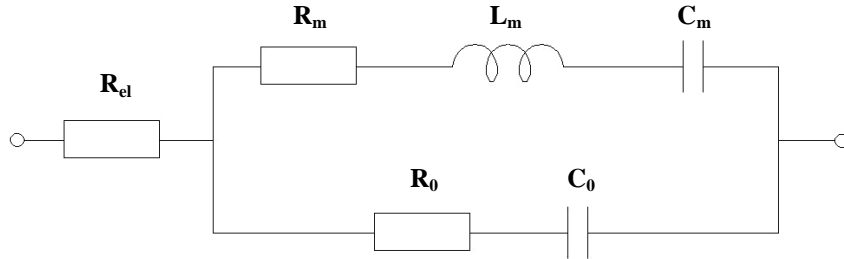


Рис.1. Модифицированная эквивалентная электрическая схема резонатора

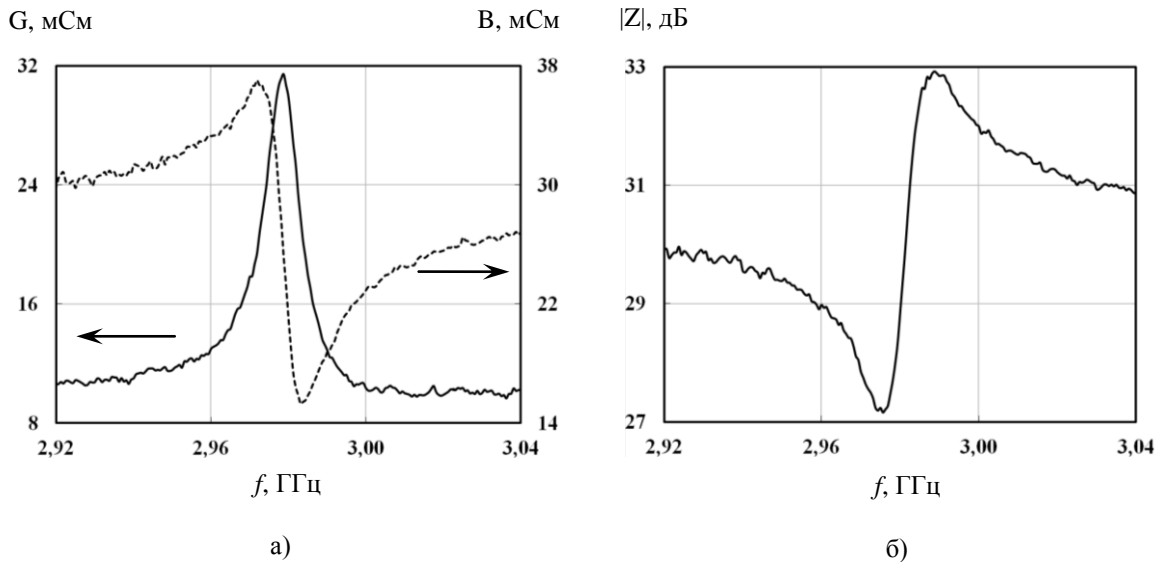


Рис.2. Электрические характеристики резонатора с Брэгговским отражателем

Номиналы элементов эквивалентной электрической схемы микронного тонкопленочного ОАВ резонатора определяются из экспериментальных характеристик резонатора [10]:

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l_{el} b_{el}}{d_{pz}}; \quad (1)$$

$$C_m = C_0 \left[\left(\frac{f_p}{f_s} \right)^2 - 1 \right]; \quad (2)$$

$$L_m = \frac{1}{C_m (2\pi f_s)^2}; \quad (3)$$

$$R_m = \frac{2\pi L_m f_s}{Q_s}; \quad (4)$$

$$R_0 = \frac{1}{2\pi C_0 f_p Q_p}; \quad (5)$$

$$R_{el} = 2\rho_{el} \frac{d_{el}}{l_{el} b_{el}}; \quad (6)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая постоянная; ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость материала пьезоэлектрического слоя; d_{pz} - толщина пьезоэлектрического слоя; l_{el} , b_{el} , d_{el} - длина, ширина и толщина электродов пьезоэлектрического преобразователя, соответственно; ρ_{el} - сопротивление материала электродов пьезоэлектрического преобразователя; Q_s , Q_p - добротность резонатора при последовательном и параллельном резонансе. Величина статической емкости C_0 была экспериментально измерена для резонаторов с разной площадью верхнего электрода. Зависимость статической емкости от площади верхнего электрода представлена на рис. 3. Из данной зависимости следует, что с увеличением площади верхнего электрода от 0,01 до 0,04 мм² значение статической емкости резонатора линейно возрастает в 3,9 раза.

C_0 , пФ

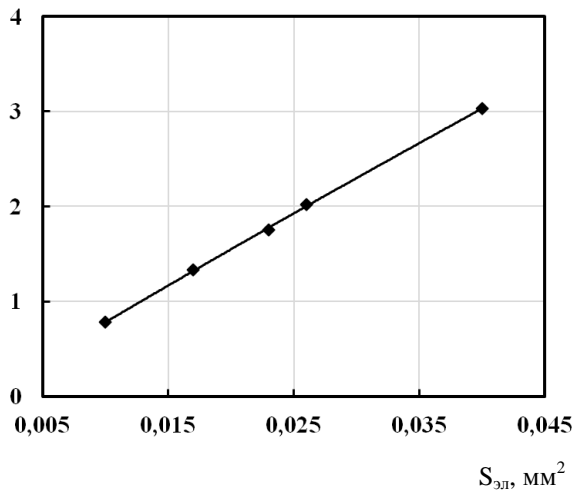


Рис.3. Зависимость статической емкости от площади верхнего электрода резонатора

C_m , фФ

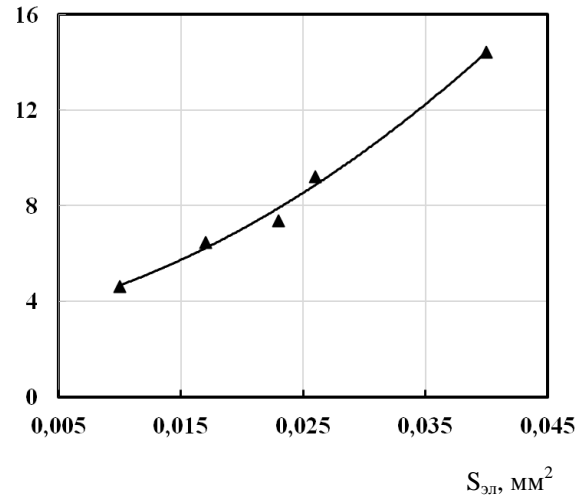


Рис.4. Зависимость динамической емкости от площади верхнего электрода резонатора.

R_m , Ом

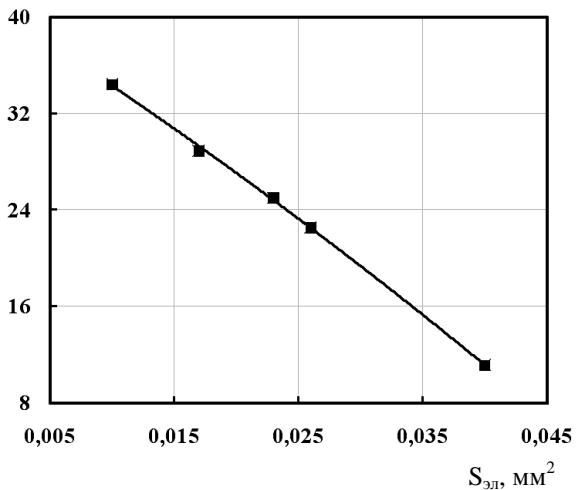


Рис. 5. Зависимость динамического сопротивления от площади верхнего электрода

L_m , нГн

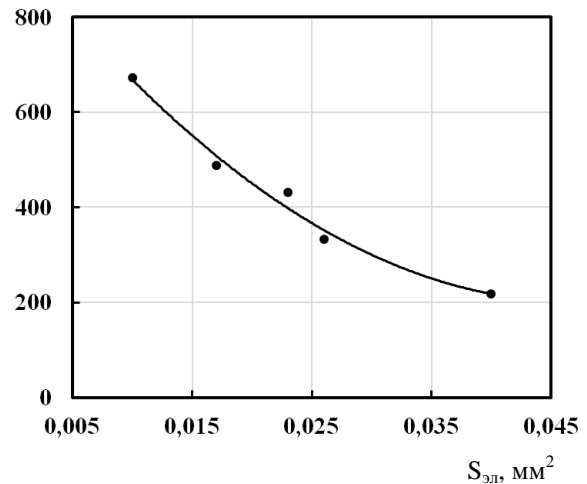


Рис.6. Зависимость динамической индуктивности от площади верхнего электрода резонатора.

С учетом измеренных параметров G_{max} , f_s , f_p и C_0 , а также с использованием выражений (1) – (6), были определены зависимости эквивалентных электрических параметров от площади верхнего электрода, рис.4-8. Полученные результаты показывают, что с увеличением площади верхнего электрода от 0,01 до 0,04 мм² (в 4 раза) динамическая емкость увеличивается в 3,1 раза, а значения динамического сопротивления и индуктивности уменьшаются, соответственно, в 2,9 и 3,1 раза. При увеличении

площади верхнего электрода от 0,01 до 0,04 мм² (в 4 раза) значения статического сопротивления и сопротивления электродов уменьшаются в 3,9 и 4 раза, соответственно (рис.7 и рис.8). Таким образом, варьируя площадь верхнего электрода можно получать резонаторы с нужными эквивалентными электрическими параметрами. Представленный алгоритм позволяет также определять значения эквивалентных параметров резонатора при значениях площади верхнего электрода, находящихся вне рассматриваемого диапазона.

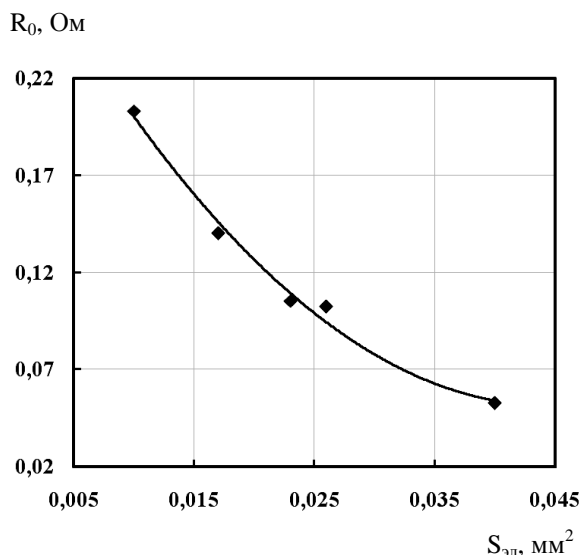


Рис.7. Зависимость статического сопротивления от площади верхнего электрода резонатора.

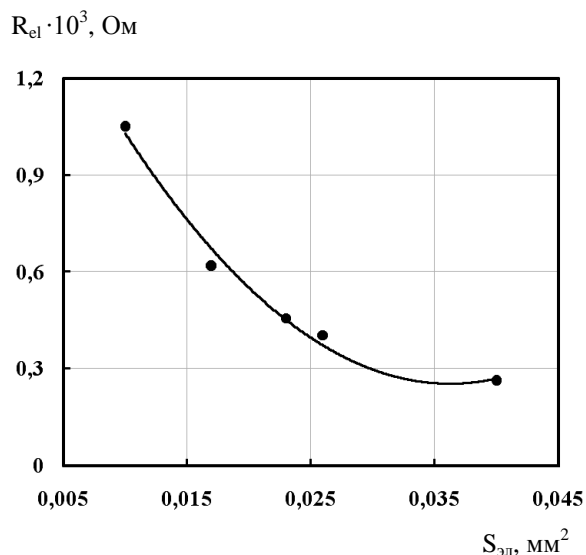


Рис.8. Зависимость сопротивления электродов от площади верхнего электрода резонатора.

Выводы

Изготовлены и исследованы опытные образцы резонаторов с Брэгговским отражателем на основе 5 пар слоев молибдена и алюминия. Рассмотрена модифицированная эквивалентная электрическая схема резонатора. Рассчитаны значения эквивалентных электрических параметров реальных тонкопленочных резонаторов от площади верхнего электрода электроакустического преобразователя. Установлено, что при увеличении площади верхнего электрода от 0,01 до 0,04 мм² значения статической и динамической емкостей увеличиваются в 3,9 и 3,1 раза, при этом динамическое сопротивление и индуктивность уменьшаются в 2,9 и 3,1 раза, соответственно, и значения статического сопротивления и сопротивления электродов уменьшаются в 3,9 и 4 раза, соответственно.

Представленные результаты могут быть использованы при разработке тонкопленочных резонаторов и фильтров на их основе для получения оптимальных (требуемых) характеристик данных устройств.

Литература

1. Гуляев Ю.В., Мансфельд Г.Д. Резонаторы и фильтры сверхвысоких частот на объемных акустических волнах – современное состояние и тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – №5-6. – С.13-28.
2. Clement M., Iborra E., Olivares J., Rimmer N., Giraud S., Bila S., Reinhardt A. DCS Tx Filters Using AlN Resonators With Iridium Electrodes // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2010. – P. 518-523.
3. Park Y.S., Pinkett S., Kenney J.S., Hunt W.D. A 2.4 GHz VCO with an Integrated Acoustic Solidly Mounted Resonator // IEEE Ultrasonics Symposium. – 2001. – P. 839-842.
4. Chen Y., Reyes P.I., Duan Z., Saraf G., Wittstruck R., Lu Y., Taratula O., Galoppini E. Multifunctional ZnO-Based Thin-Film Bulk Acoustic Resonators for Biosensors // Journal of Electronic Materials. – 2009. – Vol. 38, no. 8. – P. 1605-1611.
5. Voiculescu I., Nordin A.N. Acoustic wave based MEMS devices for biosensing applications // Biosensors and Bioelectronics. – 2012. – Vol. 33. – P. 1-9.
6. Гуляев Ю.В. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / Ю.В. Гуляев, О.Л. Балышева, В.И. Григорьевский и др. М.: Радиотехника, 2012. – 555 с.
7. Pensala T., Thalhammer R., Dekker J., Kaitila J. Experimental Investigation of Acoustic Substrate Losses in 1850-MHz Thin Film BAW Resonators // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2009. – Vol. 56. – P. 2544-2552.

8. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
9. Baumgartel L., Kim S. Experimental Optimization of Electrodes for High Q, High Frequency HBAR // IEEE Ultrasonics Symposium. – 2009. – P. 2107-2110.
10. Dutta, J. Design and Simulation of a Zinc Oxide Thin Film Bulk Acoustic Resonator Filter for 2.6 GHz Band Applications / J. Dutta, A.V. Singh, S. Singhal and M.D. Upadhyay // IETE Journal of Research. – Published online: 24 Jul 2015.

DEPENDENCE OF EQUIVALENT ELECTRIC CIRCUIT PARAMETERS OF MICROELECTRONIC BAW RESONATOR ON ITS DESIGN FEATURES

A.G. Kozlov^{1,2}, T.N. Tanskaya^{1,2}, V.N. Zima¹

¹ JSC «Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya»

² Omsk State University n.a. F.M. Dostoevsky

The characteristics of the microelectronic BAW resonator consisting of the electroacoustic transducer based on the piezoelectric film of zinc oxide and the acoustic Bragg reflector with five pairs of thin-film layers made of molybdenum and aluminum films are investigated. The modified equivalent electrical circuit of the resonator is considered. Using the experimental electrical characteristics of the resonator, the parameters of the elements included in the equivalent circuit are determined. The influence of the area of the upper electrode of the electroacoustic transducer on the values of the given parameters is investigated.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологии получения материалов для элементной базы отечественной радиоэлектроники, а также методы их исследования: сканирующая зондовая микроскопия, рентгеноструктурный анализ и т. д. Оптическая, рентгеновская, электронная и ионная литография. Ионная имплантация. Моделирование на суперЭВМ технологических процессов микроэлектроники. Высокочистые материалы для микро- и нанозлектроники, волоконной и силовой оптики, оптоэлектроники. Методы физического материаловедения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА СУБМИКРОННЫХ МИКРОСХЕМ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ РАЗВЕРТКИ

к.т.н. Чигирь Г.Г., член-корр. НАНБ Белоус А.И., Панфиленко А.К.,
к.ф.-м.н. Петлицкий А.Н., Солодуха В.А., Шведов С.В.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск

Современные технологии интегральных микросхем предъявляют высокие требования к подзатворному и туннельному диэлектрикам, толщина которых составляет менее 10 нм. Они во многом определяют надёжность микросхем. Новым в данной работе является то, что предложенная модель позволяет реализовать экспрессную оценку надёжности тонких диэлектриков в процессе производства кристаллов микросхем. Это позволяет обеспечить поступление на сборку потенциально надёжных кристаллов и является гарантией надёжности корпусированных микросхем [1].

Предложенная модель расчета времени наработки до отказа подзатворных диэлектриков базируется на результатах проведения испытаний тестовых МДП-транзисторов или МДП-структур подачи на затвор ступенчато-нарастающего напряжения до пробоя структуры при разных скоростях развертки. При этом испытания проводятся при температуре эксплуатации микросхемы и пересчетов или поправок на температуру испытаний не требуется. Модель основана на экспоненциальной зависимости времени до отказа от приложенного напряжения. В процессе эксплуатации микросхема работает при напряжении U_{oper} и время наработки до отказа T_{oper} в данном случае будет рассчитываться из соотношения

$$T_{oper} = A_0 \cdot \exp(-\beta \cdot U_{oper}) \quad (1)$$

где A_0 , β – константы.

Для обеспечения экспрессности контроля предложено использовать в процессе испытаний ступенчато-нарастающее напряжение. Ступенчато-нарастающее напряжение удобно характеризовать скоростью развертки K_{swip} , В/с

$$\hat{E}_{swip} = \frac{\Delta U}{\Delta t_{step}} \quad (2)$$

где ΔU – величина ступеньки или шаг по напряжению при развертке, В; Δt_{step} – длительность ступеньки напряжения, с.

В соответствии с выражением (1) величина коэффициента ускорения деградации подзатворного диэлектрика при ускоренных испытаниях K_{accel} равна отношению времени наработки на отказ при режимах эксплуатации T_{oper} , ко времени наработки на отказ при ускоренных режимах испытаний $T_{accel\ oper}$

$$\hat{E}_{accel} = \frac{T_{oper}}{T_{accel\ oper}} = \frac{\exp(-\beta \cdot U_{oper})}{\exp(-\beta \cdot U_{accel})} = \exp(\beta[U_{accel} - U_{oper}]) \quad (3)$$

В процессе испытаний за время одной ступеньки Δt_{step} при напряжении величиной U происходит деградация подзатворного диэлектрика по величине в K_{accel} раз больше, чем при напряжении эксплуатации U_{oper} за то же время Δt_{step} . Поэтому, в процессе испытаний за время одной ступеньки Δt_{step} , в соответствии с выражениями (2), (3) происходит деградация, эквивалентная деградации в условиях эксплуатации, за время ΔT_{oper} , рассчитываемая из соотношения:

$$\Delta T_{oper} = \Delta t_{step} \cdot \hat{E}_{accel} = \Delta t_{step} \cdot \exp(\beta[U - U_{oper}]) = \Delta U \cdot \frac{\exp(\beta[U - U_{oper}])}{K_{swip}} \quad (4)$$

Проведя интегрирование (суммирование) по всем ступенькам напряжения, получим

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{oper} &= \int_0^{U_{bd}} \frac{\exp(\beta \cdot [U - U_{oper}])}{\hat{E}_{swip}} \cdot dU = \frac{\exp(-\beta \cdot U_{oper})}{\hat{E}_{swip}} \cdot \int_0^{U_{bd}} \exp(\beta \cdot U) dU = \\ &= \frac{\exp(-\beta \cdot U_{oper})}{\hat{E}_{swip} \cdot \beta} \cdot (\exp(\beta \cdot U_{bd}) - 1) \approx \frac{\exp(\beta \cdot (U_{bd} - U_{oper}))}{\hat{E}_{swip} \cdot \beta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент β рассчитывается по данным двух измерений с различной скоростью развертки в соответствии с выражением:

$$\beta = \frac{1}{U_{bd1} - U_{bd2}} \cdot \ln \frac{\hat{E}_{swip1}}{\hat{E}_{swip2}}, \quad (6)$$

где U_{oper} – напряжение эксплуатации микросхемы, В; U_{bd1} – напряжение пробоя диэлектрика при первой скорости развертки, В; U_{bd2} – напряжение пробоя диэлектрика при второй скорости развертки, В; K_{swip1} , – первая скорость развертки, В/с; K_{swip2} , – вторая скорость развертки, В/с.

Из выражения (5) следует, что время наработки до отказа подзатворного диэлектрика T_{oper} экспоненциально увеличивается с увеличением величины константы β . В то же время, величина константы β в соответствии с выражением (6) увеличивается с уменьшением разницы пробивных напряжений, измеренных при двух различных скоростях развертки. Это означает, что для диэлектриков с повышенной надежностью эта разница пробивных напряжений не должна превышать оределенную, заранее установленную величину.

Испытания проводились на комплексе прецизионного анализа характеристик элементной базы микросхем (тестовых структур) модели В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade (США). Особенностью данного комплекса является обеспечение измерений параметров в широком диапазоне с высокой точностью (погрешность измерений составляет 0.1 %) и возможностью работы в специальных режимах, включая режим ступенчато-нарастающего напряжения. Кроме того, данный комплекс позволяет измерять параметры тестовых структур в составе пластины диаметром до 200 мм в диапазоне температур от минус 60 до плюс 150 °С. Это существенно расширяет возможности проведения испытаний и в совокупности обеспечивает широкий их спектр. В частности, можно произвести испытания при температуре эксплуатации микросхемы.

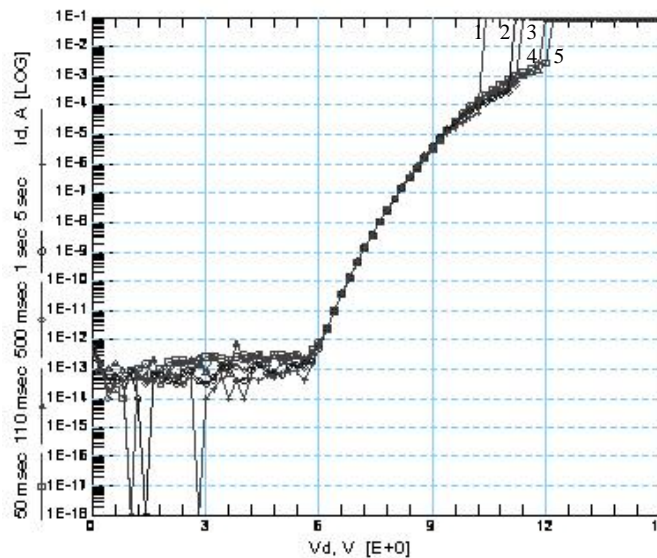


Рис. 1. ВАХ МДП-структуры при различных скоростях развертки: 1 - 0.02 В/с; 2 - 0.1 В/с; 3 - 0.2 В/с; 4 - 0.9 В/с; 5 - 2.0 В/с.

Предварительное опробование метода проведено на МДП-микросхеме памяти емкостью 1 Мбит, изготовленной по 0.35 мкм проектной норме с толщиной подзатворного диэлектрика 7 нм. Микросхема изготовлена по КМОП-технологии и содержит как п-канальные, так и р-канальные МОП-транзисторы. Испытания проводились на МОП конденсаторах площадью $S = 2.1E-4 \text{ см}^2$ (размер сторон 70 и 300 мкм).

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

На рисунке 1 приведены ВАХ МДП-структуры при различных скоростях развертки. В таблице 1 приведены значения величины пробивного напряжения тестового конденсатора для двух разных скоростей разверток и расчетное значение времени наработки до отказа. Конденсатор изготовлен по технологическому процессу микросхем с проектными нормами 0.35 мкм, сформирован над кремнием р-типа проводимости и имеет поликремниевый затвор, легированный фосфором. Толщина подзатворного слоя двуокиси кремния составляла 7 нм, $U_{oper} = 3.3$ В.

Таблица 1. Пробивное напряжение тестового конденсатора при различных скоростях развертки и расчетное значение времени наработки до отказа

Наименование параметра	Значение параметра	
Скорость развертки K_{swip} , В/с	1.470	0.442
Пробивное напряжение при токе 10 мА, В	12.40	11.88
Время наработки до отказа T_{oper} , год	10.6	

В технологическом процессе изготовления микросхем измерения величины напряжения пробоя диэлектрика производится на тестовых структурах, расположенных в тестовых модулях на товарной пластине или на периферии кристалла микросхемы. В качестве такой структуры используется тестовый МОП-конденсатор размером 100 x 100 мкм. Из-за ограниченных размеров областей на товарной пластине увеличить размер МОП-конденсатора практически не удастся и процедура измерений величины напряжения пробоя должна базироваться на использовании МОП-конденсатора размером порядка 100 x 100 мкм. Площадь такого конденсатора составляет 10^{-2} мм². Расчеты показывают, что активная площадь подзатворного диэлектрика микросхем составляет от 5 до 10 % площади кристалла. Для микросхемы с размером кристалла 6 x 6 мм и проектными нормами 0.8 мкм активная площадь подзатворного диэлектрика составляет около 2 мм². Для микросхемы памяти статического ОЗУ емкостью 1 Мбит с проектными нормами 0.35 мкм площадь подзатворного диэлектрика составляет около 10 мм² (размер кристалла 10 x 10 мм). Таким образом, площадь подзатворного диэлектрика на реальных схемах может в тысячу раз превышать площадь тестовой структуры и результаты измерения величины напряжения пробоя на тестовой структуре и микросхемы будут существенно отличаться. Большое различие в площадях требует моделирования величины напряжения пробоя подзатворного диэлектрика микросхемы по результатам измерения параметров тестовых структур.

Таким образом, предложенная модель позволяет реализовать экспрессный контроль времени наработки до отказа подзатворных диэлектриков микросхем за счет значительного уменьшения времени испытаний и обработки данных. Контроль является эффективным для оперативного выявления потенциально ненадежной продукции и поддержания технологического процесса на требуемом уровне. Существенным достоинством предложенного метода также является возможность оценки надёжности подзатворного диэлектрика микросхем в диапазоне температур эксплуатации от минус 60 до плюс 125 С путем непосредственных измерений характеристик тестовых структур при соответствующей температуре эксплуатации. При этом не требуется проведения сложной процедуры интерполяции измеренных данных. При реализации метода необходимо набирать статистику не менее чем из 30 измерений и обработку данных проводить по построенным распределениям Вейбула. Это позволяет объективно определить величину пробивного напряжения для каждой скорости развертки и определить плотность скрытых дефектов подзатворного диэлектрика.

Литература

1. V.A. Solodukha, S.V. Shvedov, A.N. Petlitsky, R.R. Chyhir. Prefailure Life Time Simulation of the Submicron ICs' Gate Dielectric as per the Breakdown Voltage Value at the Various Sweep Rates // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Books of Abstracts 9th International Conference Zakopane, Poland, 23.06.2015 – 26.06.2015, P.20.

E-mail: office@bms.by

MODELLING OF PREFAILURE LIFE TIME OF THE SUBMICRON IC'S GATE DIELECTRIC AS PER THE BREAKDOWN VOLTAGE VALUE AT THE VARIOUS SWEEP RATES

G. G. Chigir, A. I. Belous, A. K. Panfilenko,
A. N. Petlitsky, V. A. Solodukha, S. V. Shvedov

JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company, Minsk

The proposed model ensures realization of the reliability express assessment of the thin dielectrics in the fabrication process of IC chips. This makes it possible to ensure delivery for assembly of the potentially good

chips and serves a reliability guarantee of the packaged microcircuits. The model is based on the exponential prefailure life time to applied voltage. The MDS-structures were tested with application to the gate of the step-rising voltage to the structural breakdown at the various sweep rates. Error-free running time of the gate dielectric T_{oper} exponentially augments with the β -constant value rise. At the same time the β -constant value increases with the difference reduction of the breaking-down voltages, measured at two various sweep rates. This signifies that for the dielectrics with the enhanced reliability this difference of the breaking-down voltages should not exceed a definite, previously preset value.

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

к.ф.-м.н. Волков П. В.¹, Горюнов А.В.¹, к.ф.-м.н. Лукьянов А.Ю.¹,
Тертышник А.Д.¹, к.ф.-м.н. Дроздов М.Н.¹, к.ф.-м.н. Новиков А.В.^{1,2},
к.ф.-м.н. Юрасов Д.В.^{1,2}, к.ф.-м.н. Михайлов Н. Н.³, Икусов Д.Г.³, Ужаков И.Н.³

¹Институт физики микроструктур РАН

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Большинство современных процессов тонкоплёночных технологий требуют присутствия систем in situ контроля за наиболее важными технологическими параметрами, такими как температура подложки и скорость роста или травления [1]. Существуют различные системы мониторинга указанных параметров, среди которых наибольший интерес вызывают оптические [2], в силу их высокой чувствительности, а также из-за отсутствия механического контакта между измеряемым объектом и измерительной системой. Одним из перспективных оптических методов мониторинга является низкокогерентная тандемная интерферометрия (НКТИ) [3]. Возможности применения данной методики в условиях металлоорганической газовой и молекулярно-пучковой эпитаксии, а также при плазмохимическом травлении были продемонстрированы ранее как нами [4-7], так и в работах других авторов [8]. Более полный обзор различных методов мониторинга можно найти в [9].

Идея НКТИ, в варианте time-domain, состоит в следующем. Два последовательно связанных интерферометра (линии задержки), имеющие разность длин плеч, соответственно, L_1 и L_2 , освещаются широкополосным источником с малой длиной когерентности L_{coh} (рис. 1. a).

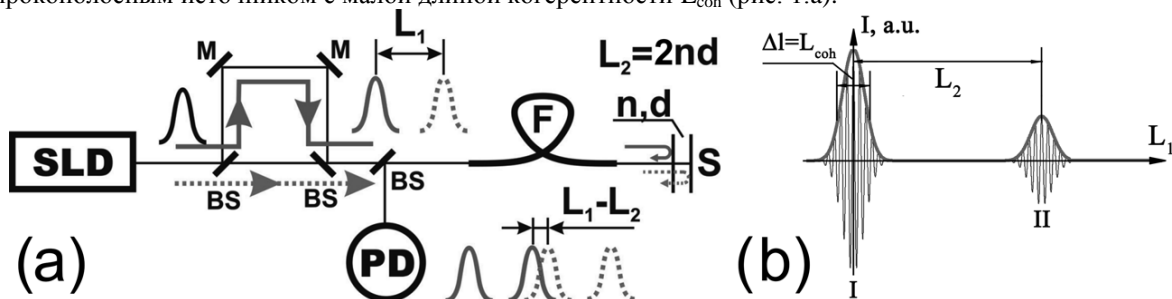


Рис. 1. (a) оптическая схема НКТИ и (b) форма сигнала от подложки

Первый интерферометр (измерительный) имеет возможность контролируемой перестройки разности длин плеч. В качестве второго выступает исследуемый образец (подложка). При изменении задержки L_1 в первом интерферометре на выходе схемы формируется интерференционный сигнал, состоящий из 2-х пиков (рис. 1. b). Первый пик соответствует нулевой разности длин плеч опорного интерферометра ($L_1=0$), а второй – моменту совпадения оптических толщин интерферометра и подложки ($L_1=L_2$). Таким образом, зная разность хода измерительного интерферометра L_1 в момент времени, соответствующий максимуму второго интерференционного пика, получаем толщину подложки. Для контроля температуры подложки необходимо определить ее оптическую толщину в некоторый момент, когда значение ее температуры известно и далее контролировать ее изменения. В работе представлены некоторые результаты применения методики НКТИ для мониторинга процессов формирования полупроводниковых структур.

Была проведена серия экспериментов на установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber SIVA-21 (ИФМ РАН) по росту структур с δ -слоями Si:Sb, причем один слой в структуре выращивался с термодинамическим контролем температуры, а второй с оптическим. Отсутствие необходимости термостабилизации подложки при оптическом контроле температуры позволило сократить время формирования δ -слоя с 15 минут до 3 минут, что само по себе является важным результатом с точки

зрения технологии, особенно при формировании многослойных структур. На рис.2 приведены данные ВИМС анализа выращенной структуры. Видно, что концентрация Sb в обоих δ -слоях отличаются слабо ($\pm 5\%$), что может, в том числе, быть следствием конечного разрешения ВИМС спектрометра. При этом виден пик концентрации углерода, являющегося во многих случаях нежелательной “загрязняющей” примесью, на глубине ~ 75 нм, что соответствует глубине залегания δ -слоя, выращенного с контролем температуры по термопаре. Этот пик связан с длительной остановкой роста, которая была необходима для термостабилизации.

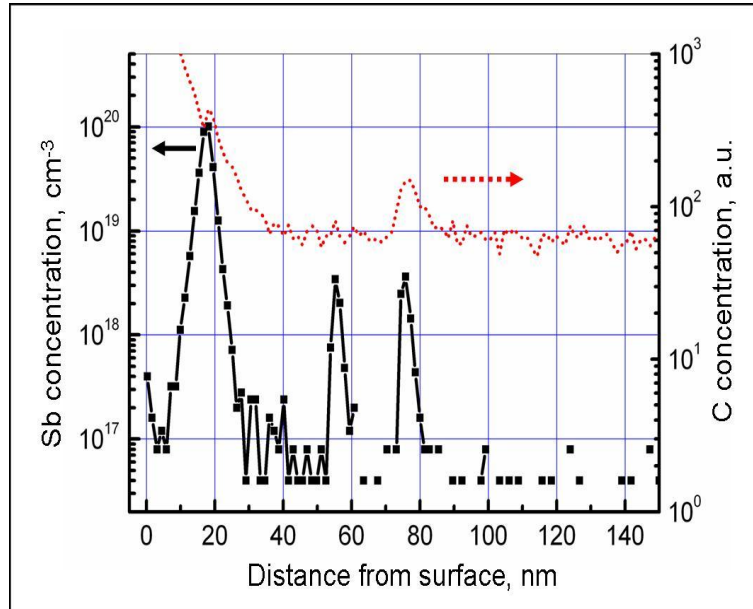


Рис. 2. Результаты ВИМС анализа структуры с δ -слоями Si:Sb

Таким образом, показана возможность значительного сокращения времени формирования многослойных структур и уменьшения их избыточного загрязнения неконтролируемыми примесями. Это происходит в результате сокращения времени переходов с одной температуры роста на другую, ввиду отсутствия необходимости в длительной термостабилизации, связанной с инерционностью стандартных термопар (особенно при низких температурах). Отметим, что данное преимущество особенно важно в случае умеренных и низких температур ($<400^\circ\text{C}$), которые не могут быть измерены специализированными ИК пирометрами, используемыми при МПЭ Si/Ge структур.

Исследованы особенности поведения температуры подложки GaAs при росте HgCdTe (КРТ) структур методом МПЭ на установке "Обь-М" в ИФП СО РАН. На рис.3 приведены записи процесса подготовки структур к росту. Видно, что разброс значений температуры для различных процессов при одинаковых установках термопары не превышает 5°C , что позволяет утверждать о хорошей воспроизводимости предлагаемого метода.

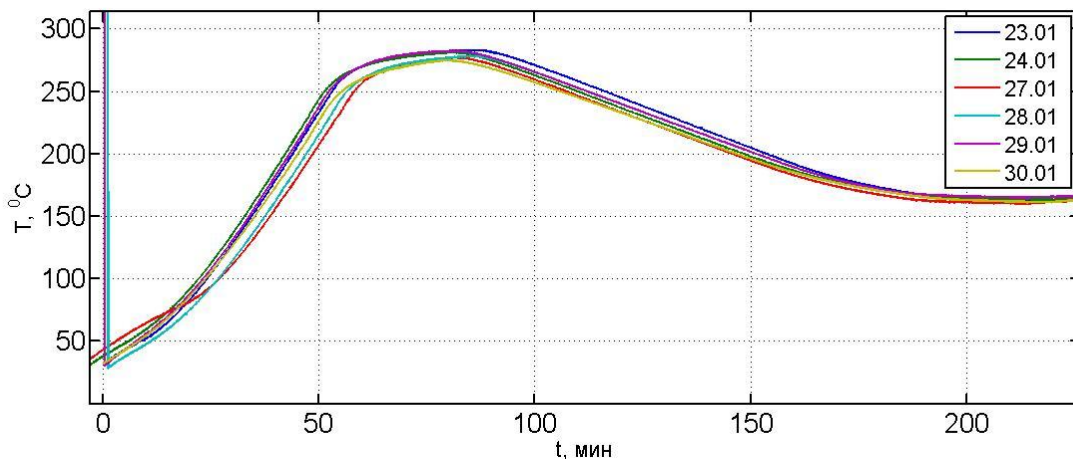


Рис. 3. Изменение температуры подложки в процессе подготовки структуры к росту

Для проверки показаний был проведен контрольный эксперимент по сравнению результатов измерения НКТИ системой с эллипсометром. В условиях постоянного состава и структуры поверхности показания эллипсометра определяются температурой поверхности образца. В ходе эксперимента была выращена структура толщиной 4 мкм. После остановки роста было сделано несколько изменений установки температуры ПИД регулятора. На рис.4 приведены сравнения показаний записанных НКТИ системой с показаниями эллипсометра. Видно их очень хорошее соответствие (в пределах 1°C).

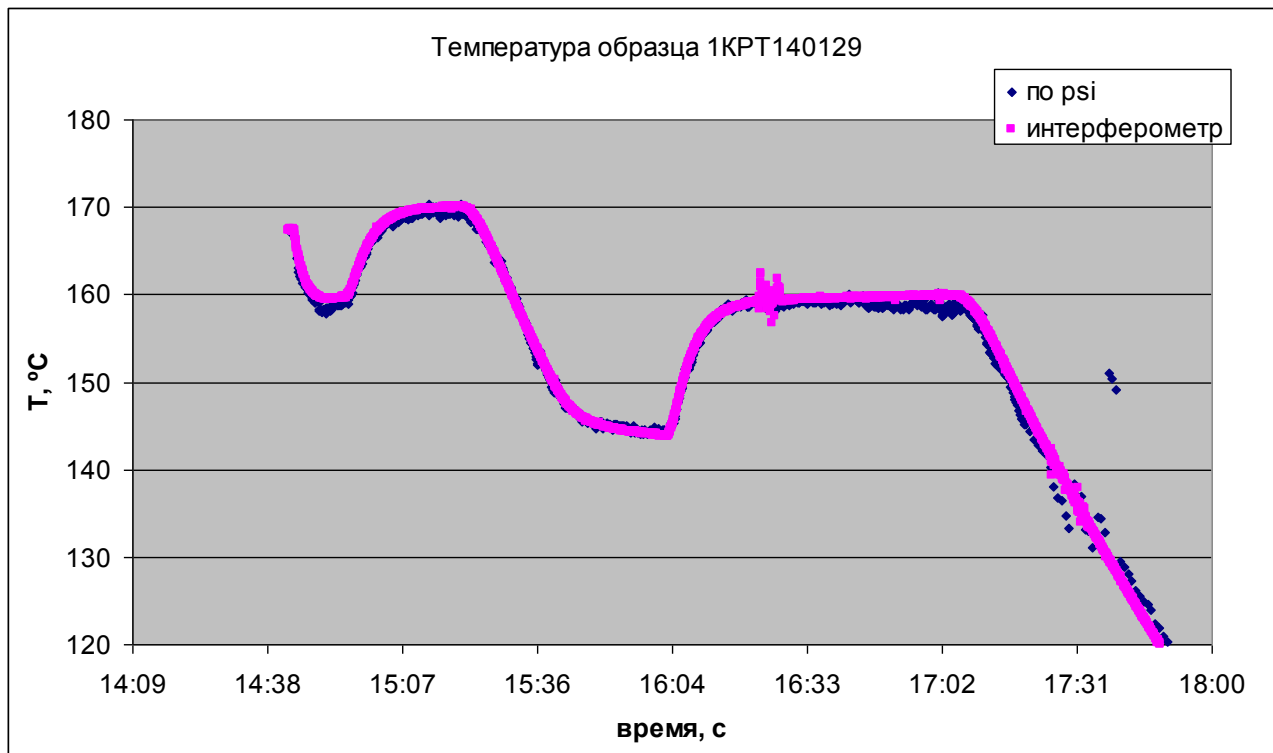


Рис. 4. Сравнение показаний НКТИ системы с показаниями эллипсометра

Можно выделить две основные проблемы применения НКТИ для мониторинга реальных технологических процессов. Первая состоит в том, что для получения абсолютных значений температуры, необходимо знать температуру подложки в какой-либо момент времени. Как правило, такая привязка осуществляется в момент загрузки подложки в камеру, исходя из предположения о том, что температура подложки не успевает измениться в процессе загрузки и остаётся равной температуре в комнате. Однако существуют процессы, в которых подложка принципиально загружается в разогретую камеру, что может приводить к систематической ошибке, связанной с неконтролируемым нагревом подложки за время ее загрузки и последующей юстировки оптической системы, если это необходимо. Вторая проблема состоит в том, что в общем случае оптическая толщина подложки одновременно изменяется по двум причинам: изменяется физическая толщина (в результате роста/травления) и изменяется показатель преломления (в результате изменения температуры подложки). В результате, при достаточно большой толщине подложки даже малые колебания температуры могут полностью маскировать физические изменения толщины и делают невозможным мониторинг скорости роста/травления. В ходе работы были предложены и реализованы два оригинальных метода, позволяющие решить указанные проблемы, основанные на использовании дисперсии температурной зависимости показателя преломления материала подложки при измерении с двумя источниками с разнесенными центральными длинами волн.

На рис. 5 и 6 приведены результаты мониторинга процесса травления кремниевой пластины, который проводился в несколько этапов. На шаге I в камере поджигался разряд аргоновой плазмы (мощность разряда 10 Вт, поток Ar 50 sccm, давление в камере 5.9 мТорр). Однако травящий агент в камеру не подавался, и механизм плазмохимического травления не реализовывался. Далее (шаг II) разряд отключался и подложка остывала. По результатам этих этапов, используя описанную выше процедуру, был определён коэффициент α/β . На шаге III проводилось травление, для чего в камеру подавался травящий агент (гексафторид серы, поток 10 sccm, давление в камере 9.3 мТорр). На шаге IV разряд был выключен, и подложка остывала. Затем (шаги V-VIII) процедура повторялась с измененными параметрами разряда (мощность разряда осталась такой же - 10 Вт, а потоки изменены: поток Ar 10 sccm,

поток гексафторида серы 50 ссст, давление в камере без гексафторида серы 6.3 мТор, с гексафторида серы 11.2 мТорр).

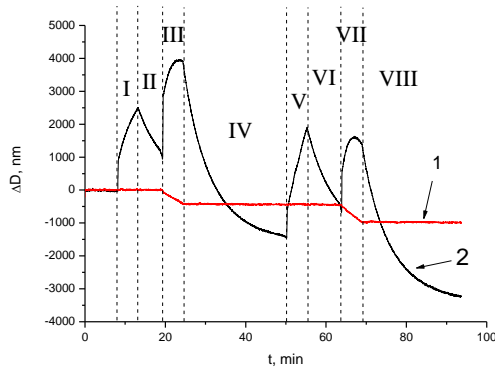


Рис. 5. Изменение толщины образца в процессе плазмохимического травления. Кривая 1 – изменения «геометрической» толщины, выделенные согласно предложенной методике из общих изменений оптической толщины (кривая 2).

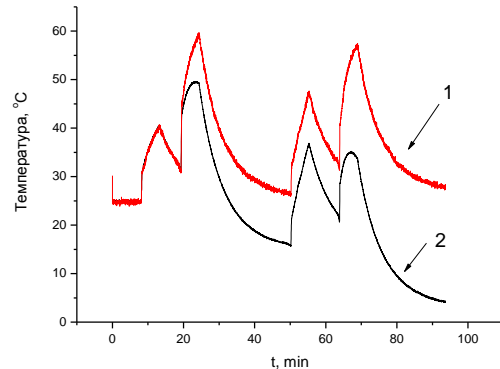


Рис. 6. Изменение температуры образца в процессе плазмохимического травления (кривая 1), выделенные согласно предложенной методике из общих изменений оптической толщины (кривая 2) с учётом изменений «геометрической» толщины.

Хорошо видно, что в результате нагрева подложки плазмой происходит заметное изменение оптической толщины образца (кривая 2), вызванное изменением ее показателя преломления. При этом величина изменений в несколько раз превышает толщину стравленного слоя. Тем не менее, применение предложенной двухволновой методики позволило определить толщину стравленного слоя с хорошей точностью. Интересно отметить, что, несмотря на большую разницу в потоках травящего агента (10 и 50 ссст), скорость травления на III и VII этапах отличалась всего на 20%. Данный факт подчеркивает важность использования систем *in situ* мониторинга при проведении процессов плазмохимического травления, поскольку позволяет исключить процедуру многократного травления тестовых структур для калибровки скорости травления. На рис.6 приведен график изменения температуры подложки (кривая 2) в ходе эксперимента, полученный в соответствии с предложенной методикой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01124) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» при ИФМ РАН.

Литература

1. Hiroshi Yamamoto, Hiroki Kuroda, Masafumi Ito, Takayuki Ohta, Keigo Takeda, Kenji Ishikawa, Hiroki Kondo, Makoto Sekine and Masaru Hori, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 016202 (2012)
2. А.Н. Магунов, *Лазерная термометрия твёрдых тел* // М.: Физматлит, 2001. 224 с.
3. Yu. Rao and D.A. Jackson, *Meas. Sci. Technol.* 7(7), 981 (1996).
4. P.V. Volkov, A.V. Goryunov, V.M. Daniltsev, A.Yu. Luk'yanov, D.A. Pryakhin, A.D. Tertyshnik, O.I. Khrykin, and V.I. Shashkin, *J. Cryst. Growth.* 310, 4724 (2008).
5. П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тертышник, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов, Н.А. Байдакова, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, В.Д. Кузьмин // *Физика и техника полупроводников.* 2012. Т.46. Вып.12. С.1505-1509
6. D.V. Yurasov, A.Yu.Luk'yanov, P.V.Volkov, A.V.Goryunov, A.D.Tertyshnik, M.N. Drozdov, A.V.Novikov // *Journal of Crystal Growth* 413 (2015) 42–45
7. P. V. Volkov, A. V. Goryunov, A. Yu. Lukyanov, A. I. Okhapkin, A. D. Tertyshnik, V. V. Travkin and P. A. Yunin // *Appl. Phys. Lett.* 107, 111601 (2015)
8. Takayoshi Tsutsumi, Takayuki Ohta, Kenji Ishikawa, Keigo Takeda, Hiroki Kondo, Makoto Sekine, Masaru Hori and Masafumi Ito, *Appl. Phys. Lett.* 103, 182102 (2013)
9. I.P. Herman, *Optical Diagnostic for Thin Film Processing* (Academic Press, San Diego, 1996).

NOVEL TECHNIQUE FOR MONITORING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THIN FILM STRUCTURES FORMATION

Volkov P. V.¹, A. V. Goryunov¹, A. Yu. Lukjanov¹,
A. D. Tertshnik¹, M. N. Drozdov¹, A. V. Novikov^{1,2},
D. V. Yurasov^{1,2}, N. N. Mikhailov³, D. G. Ikusov³, I. N. Uzhakov³

¹Institute for Physics of Microstructures of RAS

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

³Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of RAS

It was demonstrated that the low-coherence interferometry technique can be successfully applied to real-time substrate temperature evaluation during molecular beam epitaxy in a wide range down to room temperature. The proposed technique was used for formation of silicon layers delta-doped by antimony and HgCdTe growth monitoring. Due to shortening of the growth interruptions needed for temperature switching the low-coherence interferometry technique allows improving the crystal quality of grown samples and reducing the material and time consumption. These advantages become extremely beneficial with lowering of growth temperatures. We also propose an original algorithm for processing of low-coherence tandem interferometer signals, enabling identification of small changes in the geometric thickness of sample against major changes in its optical thickness, caused by temperature variations. Possibilities for simultaneous monitoring of the changes in sample thickness and temperature are demonstrated during chemical plasma etching of a Si wafer highly heated by a plasma discharge.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СУБМИКРОННЫХ ИМС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВОГО НАНОМАНИПУЛЯТОРА

член-корр. НАНБ Пилипенко В.А., Солодуха В.А.,
к.ф.-м.н. Петлицкий А.Н., Шведов С.В., Панфиленко А.К.,
к.т.н. Петлицкая Т.В., Филипеня В.А., Жигулин Д.В., Шабалина С.В.

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск

Одним из важных этапов при анализе отказов изделий электронной техники является изучение электрических характеристик элементной базы микросхем таких как, вольтамперные характеристики (ВАХ) транзисторов, емкости конденсаторов, сопротивление резисторов и т. п.

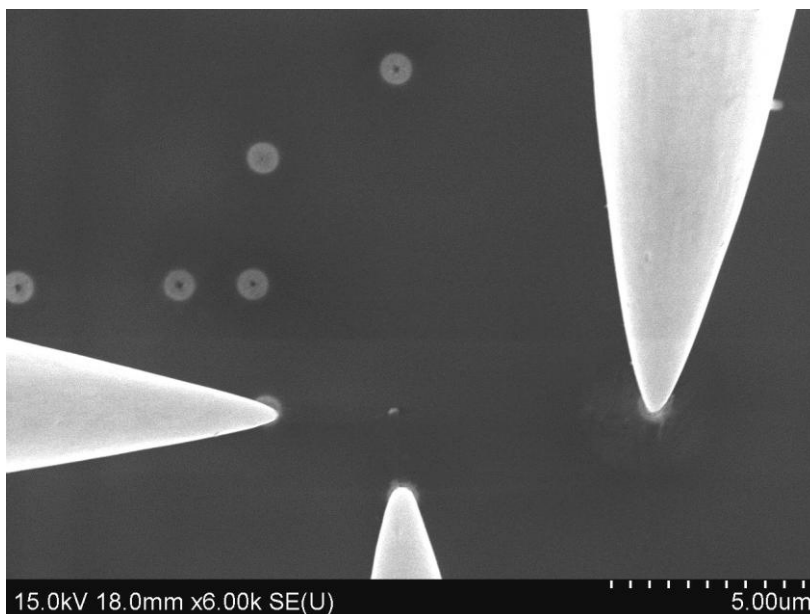


Рис. 1. РЭМ-фото зондов наноманипулятора для измерения электрических характеристик субмикронного МОП-транзистора

На предприятии имеется большой опыт в этой области: успешно функционирует специализированное аналитическое оборудование, в рамках системы менеджмента качества разработан и внедрен стандарт организации "Методы контроля параметров материалов и полупроводниковых структур".

Agilent

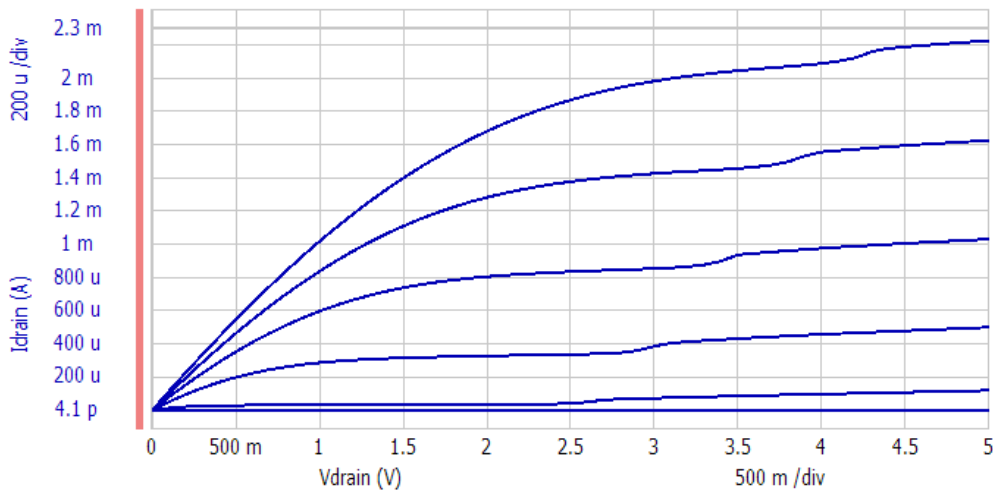


Рис. 2. Выходная характеристика субмикронного МОП-транзистора

Agilent

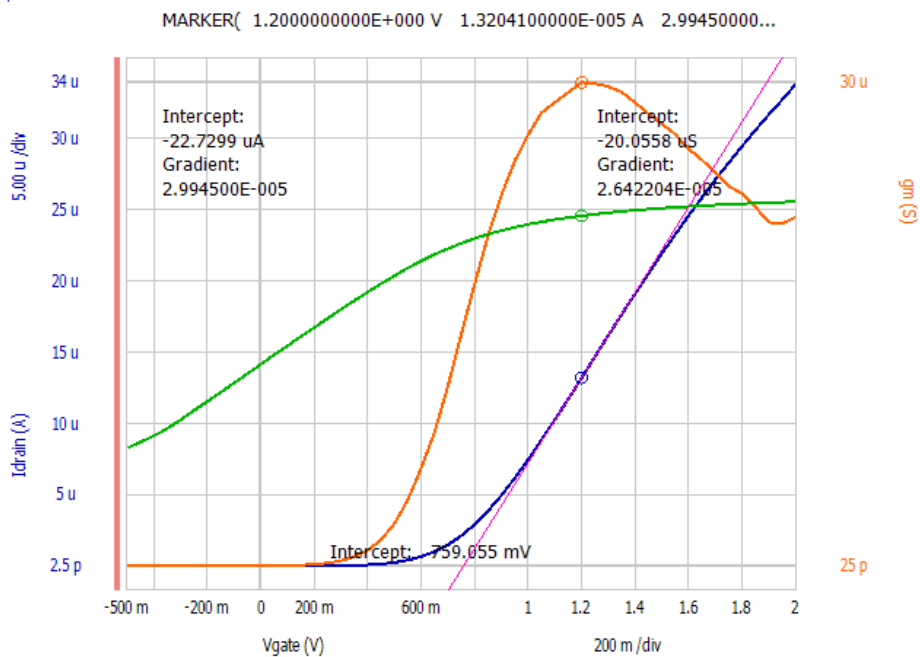


Рис. 3. Допороговая характеристика субмикронного МОП-транзистора

Однако перед разработчиками НТЦ "Белмикросистемы" в настоящее время остро стоит вопрос по анализу качества производства и причин отказов интегральных микросхем субмикронного уровня, который требует дальнейшего развития аналитических средств контроля и совершенствования методик по пробоподготовке образцов изделий электронной техники с проектными нормами 0,35 мкм и менее.

Вариантом решения проблемы измерения электрических характеристик элементной базы субмикронных изделий непосредственно на кристалле с проектными нормами до 45 нм является использование 4-х зондового наноманипулятора в сочетании с растровым электронным микроскопом.

В работе представлены материалы по получению ВАХ транзисторов микросхемы с проектными нормами 0.35 мкм. Микросхема имеет 3 уровня металлизации. Металлизированные и диэлектрические слои были удалены химическим и плазмохимическим травлением, а также с использованием прецизионной химико-механической полировки. Благодаря высокоточной пробоподготовке на поверхности кристалла ИМС остались активные слои, поликремниевые шины затворов транзисторов, а

также вольфрамовые столбики контактов к затворам и сток-истоковым областям транзисторов. Это позволило успешно осуществить контактирование с помощью нанозондов и получить выходные и допороговые характеристики субмикронного МОП-транзистора.

На рисунке 1 представлено РЭМ-фото зондов наноманипулятора для измерения электрических характеристик субмикронного МОП-транзистора. На рисунках 2 и 3 представлены выходная и допороговая характеристики субмикронного МОП-транзистора.

Исследования проведены с использованием 4-х зондового наноманипулятора Probe Workstation ф. Kleindiek Nanotechnik (США) в сочетании с растровым электронным микроскопом S-4800 ф. Hitachi (Япония). Манипулятор обладает низкими токами утечки и позволяет обеспечить измерения величины токов от 0,2 пА до 100 мА в диапазоне напряжений до 100 В. Возможность анализа субмикронных изделий достигается за счет использования контактирующих зондов с радиусом закругления не более 100 нм.

THE ANALYSIS OF THE ELECTRIC CHARACTERISTICS OF THE SUBMICRON MICROCIRCUITS' ELEMENTS BY MEANS OF THE QUAD-PROBE NANOMANIPULATOR

V. A. Pilipenko, V. A. Solodukha, A. N. Petlitsky,
S. V. Shvedov, A. K. Panfilenko, T. V. Petlitskaya,
V. A. Filippenya, D. V. Zhigulin, S.V. Shabalina

JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company, Minsk

The work presents the analysis of results of measurements of the electric characteristics of the submicron microcircuits' elements by means of the quad-probe nanomanipulator, built-in the raster electron microscope. Individually reckoned are the procedures for preparation of the microcircuit samples for the electro-physical measurements to be effected. The preparation is based on the plasma-chemical etching and the precision chemical-mechanical polishing. The basic task of preparation is the electric isolation of the individual elements of a microcircuit.

ДИАГНОСТИКА ПЛАНАРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ПОМОЩИ МИКРОВОЛНОВОГО БЛИЖНЕПОЛЬНОГО МИКРОСКОПА С МОНОПОЛЬНОЙ АНТЕННОЙ

д. ф.-м. н. Резник А.Н., Королёв С.А.

Институт физики микроструктур Российской академии наук

Ближнеполюсная (БП) микроволновая микроскопия – это инструмент для исследования объектов на микронных и субмикронных пространственных масштабах, на много порядков меньших рабочей длины волны λ . Субволновое разрешение БП микроволнового микроскопа (БПММ) обусловлено излучением электрически малой антенной квазистационарного (ближнего) электромагнитного поля. При этом пространственное разрешение БПММ определяется размером апертуры зонда. Современные БПММ при $\lambda \approx 5-10$ см обладают разрешением ~ 50 нм [1,2], а в работе [3] реализовано атомарное разрешение (десятые доли нм). Высокая чувствительность микроволнового поля к проводящим свойствам вещества делает БПММ особенно перспективным для применений в полупроводниковой микроэлектронике и в медицинской диагностике. Нанометровое пространственное разрешение достигается в настоящее время БПММ с коаксиальными зондами. Для описания подобных устройств представляется конструктивной концепция монополюсной антенны [4], в которой переменный заряд сосредоточен только на заостренном конце центрального проводника коаксиала. Использование метода отражений в [4,5] не позволило распространить модель монополюсной антенны на многослойные структуры, ограничив ее применимость достаточно простыми объектами в виде однородного полупространства, либо системы пленка – полубесконечная подложка. В данной работе развита теория БПММ с монополюсной антенной, взаимодействующей с одномерной структурой любой степени сложности. Мы выполнили экспериментальную верификацию теории с использованием БПММ с разрешением $\sim 50-100$ мкм и полупроводниковых структур: объемно однородных и тонкопленочных. Мы также разработали метод определения сопротивления полупроводниковой пленки на изолирующей подложке, в основе которого лежит развитая теория.

В предложенной модели зонд рассматривается в виде открытого конца коаксиального волновода, показанного на рис. 1. Микроволновый ток I_+ течет по центральному проводнику коаксиала, который мы моделируем цилиндром радиуса r_0 . Ток противоположного направления I_- течет по внешней оболочке

коаксиала, представляющей собой цилиндр с основанием в виде кольца радиуса R_0 и толщины τ . При этом $|I_+| = |I_-| = I$. Торцы волновода имеют концентрическую форму, на проводящих поверхностях которого образуются переменные поверхностные заряды противоположного знака с плотностями ρ_s^+ при $r < r_0$ и ρ_s^- при $R_0 < r < R_0 + \tau$. Задача заключается в том, чтобы найти входной импеданс Z такой антенны. Ограничимся квазистатическим приближением, в рамках которого выражение для Z имеет вид [6]:

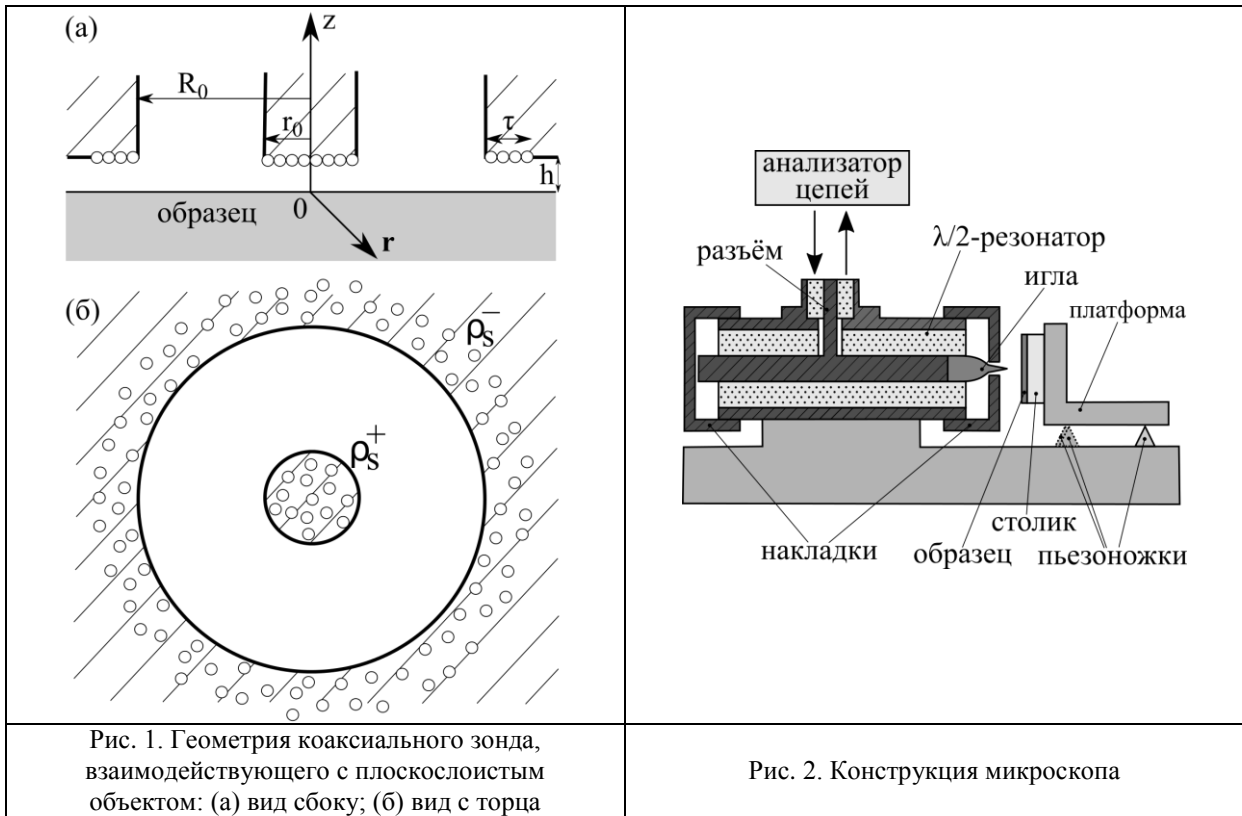
$$Z = -\frac{i\omega\epsilon_0}{I^2} \int dz d^2r \tilde{\epsilon}^*(z) |\vec{E}(z, \vec{r})|^2, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)^{-1}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума, ω – круговая частота излучения, $\vec{E}(z, \vec{r})$ – квазистационарное электрическое поле излучения антенны в окружающее пространство. Антенна расположена в воздушной среде на высоте h над плоской поверхностью образца с комплексной диэлектрической проницаемостью $\epsilon(z) = \epsilon'(z) - i\epsilon''(z)$, т.е. в формуле (1) имеем

$$\tilde{\epsilon}(z) = \begin{cases} 1, & z > 0; \\ \epsilon(z), & z \leq 0; \end{cases} \quad (2)$$

причем $\epsilon(z)$ может быть как кусочно-однородной, так и непрерывной функцией. Для расчета поля $\vec{E}(z, \vec{r})$ производится дискретизация, т.е. исследуемая среда представляется в виде N однородных слоев с проницаемостями $\epsilon_j = \text{const}$, толщинами d_j , где $j = 1, 2, \dots, N$, причем при $z < -\sum_{j=1}^N d_j$ полагаем $\epsilon(z) = \epsilon_{N+1} = \text{const}$.

В случае кусочно-однородной среды границы слоев совпадают с границами раздела в образце. Для непрерывной среды шаг дискретизации Δz и глубина $N\Delta z$, начиная с которой среда считается однородной, определяются из расчета импеданса Z , так, чтобы изменение значений Δz , N не влияло на Z . Решение задачи об импедансе Z электродипольной антенны получено в [7], а квазистатический предел этой теории рассмотрен в [6]. Отличие рассматриваемой здесь конфигурации антенны заключается в асимметричном пространственном распределении зарядов противоположного знака на апертуре, показанном на рис.1б. Окончательное выражение для Z (которое из-за громоздкости не приводится) представлено в виде конечной суммы из $(N+2)$ -х компонент, связанных рекуррентными соотношениями. Отметим, что при типичном для БПММ соотношении параметров $r_0 \ll R_0$, $\tau \ll R_0$ заряд на внешней оболочке коаксиала (см. рис.1) практически не влияет на импеданс Z . Это означает, что рассматриваемая антенна для ближнего поля излучения представляет собой электрический монополю с эффективным радиусом r_0 .



Одна из задач данной работы заключалась в экспериментальной проверке предложенной модели. С этой целью мы использовали БПММ диапазона 2.1 ГГц в виде коаксиального резонатора, показанного на рис. 2. Центральный проводник коаксиала на рабочем конце был соединен с иглой, которая служила антенной. С помощью специальных ножек с пьезотрубками было реализовано перемещение образца относительно иглы с шагом 0.19 мкм. Взаимодействие образца с иглой приводит к уменьшению резонансной частоты f_0 и добротности Q_0 резонатора. Были получены экспериментальные зависимости $f_0(h)$ и $Q_0(h)$ для каждого из исследовавшихся образцов. С целью сравнения экспериментальных и теоретических результатов производился расчет резонансной характеристики БПММ по эквивалентной схеме $\lambda/2$ -резонатора в виде отрезка двухпроводной линии, нагруженной антенной с импедансом Z . Вычисление Z производилось при помощи развитой теории монополярной антенны.

Таблица 1. Параметры однородных пластин

Образец	d_E , мкм	ρ , Ом·см	μ , см ² /(В·с)	n , 1/см ³	ϵ
ES	510	-	-	-	$10 \cdot i \cdot 10^{-3}$
E0	670	8600	330	$2.2 \cdot 10^{12}$	$11.7 - i \cdot 0.10$
E1	470	52	340	$3.5 \cdot 10^{14}$	$11.7 - i \cdot 16.3$
E2	530	13	310	$1.6 \cdot 10^{15}$	$11.7 - i \cdot 60.6$

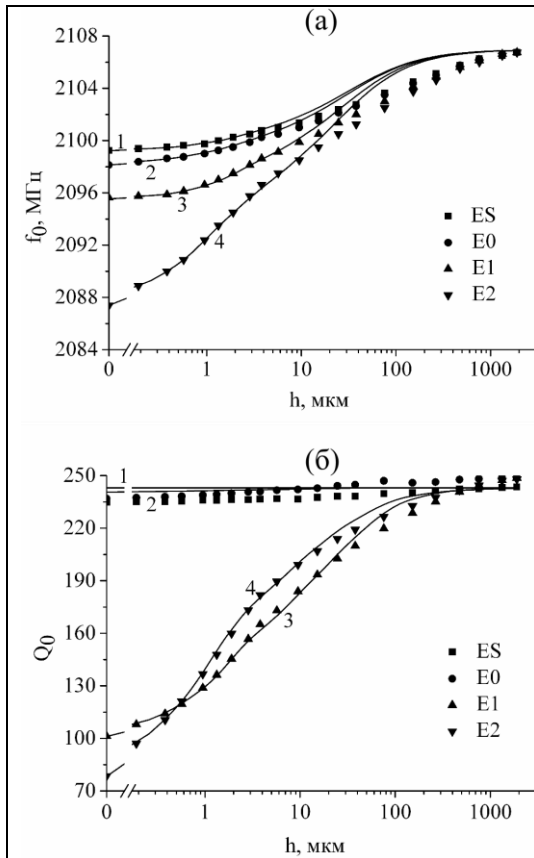


Рис. 3. Зависимости информативных параметров микроскопа от расстояния зонд-образец: (а) $f_0(h)$, (б) $Q_0(h)$, для эталонных образцов из таблицы 1: 1 – ES, 2 – E0, 3 – E1, 4 – E2. Символы – экспериментальные данные, линии – результаты расчета.

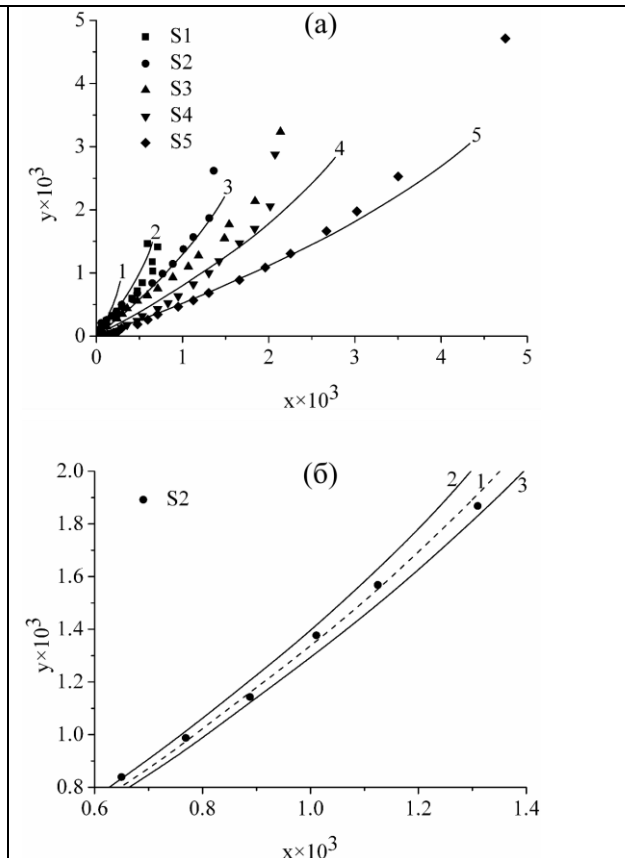


Рис. 4. Нормированная добротность y как функция нормированной частоты x для пленочных полупроводниковых структур. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – результаты расчетов. (а) Измерения для образцов S1-S5 из таблицы 2, расчеты для $R_{sh} = 20$ (1), 10 (2), 5 (3), 2.5 (4), 1.25 кОм (5). (б) Пример определения R_{sh} для образца S2. Расчет выполнен для $R_{sh} = 5.5$ (2), 5.2 (1), 5 кОм (3).

В качестве тестовых структур исследовано несколько однородных пластин с параметрами, приведенными в таблице 1, где ρ – удельное сопротивление, μ – подвижность, n – концентрация носителей заряда. Символом ES обозначена пластина сапфира, E0-E2 – пластины кремния разной степени легирования. Диэлектрическая проницаемость легированного кремния рассчитывалась по

модели Друде с использованием данных измерений сопротивления образца на постоянном токе методом Ван-дер-Пау (ВДП). Проницаемость материала столика, на котором крепился образец, принята равной $\epsilon_r=6(1-i10^{-2})$. Толщина пластин ES, E0-E2 $d_E \sim 0.5-0.7$ мм и столика $d_f \approx 2$ мм такова, что в расчетах столик можно полагать однородным полупространством, т.е. влияние его нижней границы на импеданс зонда Z оказывается несущественным.

Расчеты по предложенной теории монополярной антенны требуют определения эффективного размера иглы r_0 , которая в нашей модели имела цилиндрическую форму. В силу сделанного упрощающего предположения радиус цилиндра r_0 следует рассматривать как подгоночный параметр, который по порядку величины соответствует геометрическому радиусу конца иглы. Вторым подгоночным параметром служит эффективная высота зонда над поверхностью образца h_0 . Как показали расчеты, согласие с измерениями может быть достигнуто только в том случае, если положить параметры модели функцией высоты зонда, т.е. $r_0=r_0(h)$, $h_0=h_0(h)$, где h – истинная высота зонда, фиксируемая в процессе измерений. При этих предположениях, согласующихся с результатами ряда предшествующих исследований [8-10], развитая теория монополярной антенны адекватно описывает экспериментальные данные (см. рис. 3).

В другой серии экспериментов исследовались тонкие (толщина $d_f=0.5-1.2$ мкм) полупроводниковые пленки n-GaN, выращенные на сапфировой подложке и легированные кремнием. В зависимости от степени легирования сопротивление пленок $R_{sh}=\rho/d_f$, измеренное методом ВДП, варьировало в пределах 2.2-14 кОм. В этих исследованиях мы поставили перед собой более сложную задачу – установить возможность определения сопротивления R_{sh} пленки по данным измерений БПММ с коаксиальным зондом. Похожий метод, разработанный в [8], базировался на модели электродипольной антенны и использовал в измерениях зонд подходящей конфигурации в виде сужающегося на конце отрезка симметричной полосковой линии. В той работе измерения выполнялись при фиксированном положении зонда относительно поверхности образца. Здесь мы использовали для определения R_{sh} массив экспериментальных данных, полученных при разных высотах h , что повышает точность измерений. За счет коаксиальной геометрии зонда разрешающая способность устройства теперь на порядок выше при приблизительно такой же чувствительности. Рассматриваемая конструкция БПММ описывается развитой теорией монополярной антенны. Таким образом, результаты этой части данной работы можно рассматривать как дальнейшее развитие метода [8].

На рис.4а символами обозначены экспериментальные данные, полученные для каждого из пяти исследованных образцов. Высотные зависимости $f_0(h)$, $Q_0(h)$ трансформированы в функции $y(x)$, где $x = (f_0(h) - f_0^S(h))/f_0^S(h)$, $y = 0.5(1/Q_0(h) - 1/Q_0^S(h))$ – изменения резонансной частоты и обратной добротности на образцах относительно значений f_0^S , Q_0^S , измеренных для сапфировой подложки без полупроводниковой пленки. Линиями на рис.4а показаны расчетные функции $y(x)$ для полупроводниковых пленок с различными значениями сопротивления R_{sh} . Данные на рис.4а не только характеризуют точность теории, но также позволяют сделать заключение о возможности определения сопротивления R_{sh} по БП измерениям монополярным зондом. При эффективном радиусе иглы ~ 100 мкм следует использовать измерения высотных зависимостей резонансной частоты и добротности БПММ в диапазоне $h < 5-10$ мкм, исключая точку плотного контакта зонда с образцом. Процедура определения R_{sh} проиллюстрирована на рис.4б на примере образца S2. За сопротивление пленки $R_{sh}=5.2$ кОм принимается величина, для которой результаты расчета функции $y(x)$ наилучшим образом соответствуют экспериментальным данным. Разброс экспериментальных точек относительно расчетной кривой позволяет оценить точность такой аппроксимации, которая по данным рис.5б составляет $\delta R/R_{sh} < 0.02$.

Таблица 2. Результаты измерения сопротивления полупроводниковых плёнок

Образец	$R_{sh}^{ВДП}$, кОм	$R_{sh}^{БПММ}$, кОм
S1	14	8
S2	6.8	5.2
S3	6.6	3.6
S4	5.7	2.6
S5	2.2	1.3

Результаты БП измерений R_{sh} для всех исследовавшихся образцов сведены в таблицу 2, где для сравнения также приведены данные измерений методом ВДП. Обратим внимание на существенное различие результатов микроволновых и статических измерений. Во всех случаях значения R_{sh} , полученные методом ВДП, оказываются выше БП сопротивлений, причем для большинства образцов эта разница составляет 50-100%. При этом характер зависимости R_{sh} , убывающий от образца S1 к S5, одинаков. Такая же тенденция наблюдалась и в наших измерениях [8], в особенности для исследованных

здесь высокоомных пленок. Различие может быть связано с дефектами структур, которые огибаются постоянным током, что приводит к повышению статического сопротивления за счет сужения токовых каналов. Микроволновый ток, напротив, эффективно проникает в дефектные области, в результате чего общее сопротивление оказывается близким к осредненной по площади образца величине.

В данной работе мы показали, что разработанная модель БПММ адекватно описывает экспериментальные данные. На примере тонкопленочных полупроводников мы также показали, что данная теория может быть положена в основу метода характеристики планарных структур. С этой целью подгоночные параметры модели определяются по данным калибровочных измерений эталонных образцов. В качестве эталонов выбираются достаточно простые структуры – объемно однородные полупроводниковые пластины различной степени легирования. Оптимистичные выводы данной работы относятся к микроскопам среднего разрешения ~50-100 мкм. Возможность количественной характеристики структур при помощи микроскопов микронной-субмикронной разрешающей способности требует отдельного исследования. Последнее представляется важным, поскольку коаксиальные зонды позволяют получать в микроволновом диапазоне нанометровое разрешение вплоть до атомарного. Вместе с тем разрешающая способность в несколько десятков мкм достаточно для решения многих практических задач, а соответствующие устройства обладают значительно более высокой чувствительностью по сравнению с микроскопами лучшего разрешения. Выполненные измерения сопротивления R_{sh} полупроводниковых пленок показали систематическое превышение статических над микроволновыми данными, что мы связываем с дефектностью образцов. Наблюдавшееся различие повышает значение микроволновых методов диагностики, применяемых в исследованиях и технологиях производства материалов и устройств соответствующего диапазона.

Литература

1. H.P.Huber et al. J. Appl. Phys. V.111, 014301 (2012).
2. A.Tselev et al. Nanotechnology. V.23, 385706 (2012).
3. J.Lee et al. Appl. Phys. Lett. V.97, 183111 (2010).
4. C.Gao, X.-D.Xiang. Rev. Sci. Instrum. V.69, 3846 (1998).
5. C.Gao et al. Appl. Phys. Lett. V.84, 4647 (2004).
6. A.N.Reznik. J. Appl. Phys. V.115, 084501 (2014).
7. A.N.Reznik, N.V.Yurasova. J. Appl. Phys. V.98, 114701 (2005).
8. A.N.Reznik, E.V.Demidov. J. Appl. Phys. V.113, 094501 (2013).
9. A.Imtiaz et al. Appl. Phys. Lett. V.90, 243105 (2007).
10. S.Kurokawa, A.Sakai. J. Appl. Phys. V.83, 7416 (1998).

DIAGNOSIS OF PLANAR SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY MEANS OF THE NEAR-FIELD MICROWAVE MICROSCOPE WITH A MONOPOLE ANTENNA

A. N. Resnik, S. A. Korolev

Institute for Physics of Microstructures of RAS

An electromagnetic model of the near-field microwave microscope interacting with a layered sample is presented. The coaxial probe of the microscope is considered as a monopole antenna included as a load to the resonator circuit. The experimental verification of the model has been done. A microscope for 2.1 GHz frequency band with resolution of ~100 μm was constructed. Bulk and film semiconductor samples were tested. The sample sensitive parameters: the resonant frequency f_0 and the quality factor Q_0 , are measured and calculated. Good agreement between theoretical and experimental curves $f_0(h)$ and $Q_0(h)$ (h – the probe-sample distance) is demonstrated. We developed and experimentally proved a method which is based on our model and allow determining the sheet resistance R_{sh} of a semiconductor film on a dielectric substrate. The fitting parameters of the model are extracted from calibration measurements of etalon samples. DC R_{sh} is found to be larger than the microwave one up to 50-100%. This discrepancy is explained by microdefects existing in the semiconductor films.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕТИКИ ПРЕЦИПИТАЦИИ КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИМС

Солодуха В.А., Панфиленко А.К., Шведов С.В.,
к.ф.-м.н. Петлицкий А.Н., к.т.н. Петлицкая Т.В.,
Крекотень Н.А., Ещик Т.Н.

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск

Одной из основных примесей в полупроводниковом кремнии, используемом при производстве интегральных микросхем, является кислород. Поведение кислорода во время высокотемпературных термообработок во многом определяет склонность пластин кремния к дефектообразованию. При этом кристаллографические дефекты – преципитаты кислорода, дефекты упаковки, образовавшиеся во время производства интегральных микросхем, могут оказывать отрицательное влияние на параметры сформированных приборов.

Определение характера преципитации кислорода в зависимости от исходных значений концентрации кислорода и условий проведения термических операций является определяющим для прогнозирования поведения конкретных пластин кремния в условиях технологического цикла изготовления ИМС.

Существенными факторами, влияющими на процесс преципитации кислорода, является температура термообработки и примесный состав кремния, который может определяться не только исходным состоянием кремния, но также и состоянием технологического оборудования и условиями проведения технологических операций.

Поэтому актуальной является задача не только изучения поведения кислорода в зависимости от интегральных характеристик кремниевых пластин, но и характер пространственного распределения изменений концентраций кислорода по площади пластины.

Исследование влияния термообработок на процесс преципитации кислорода проводилось на пластинах кремния диаметром 200 и 150 мм. Тестовые термообработки соответствовали основным термическим операциям изготовления субмикронных ИМС – «разгонка кармана», окисление под затвор (отжиг 850 °С) и «локальное окисление».

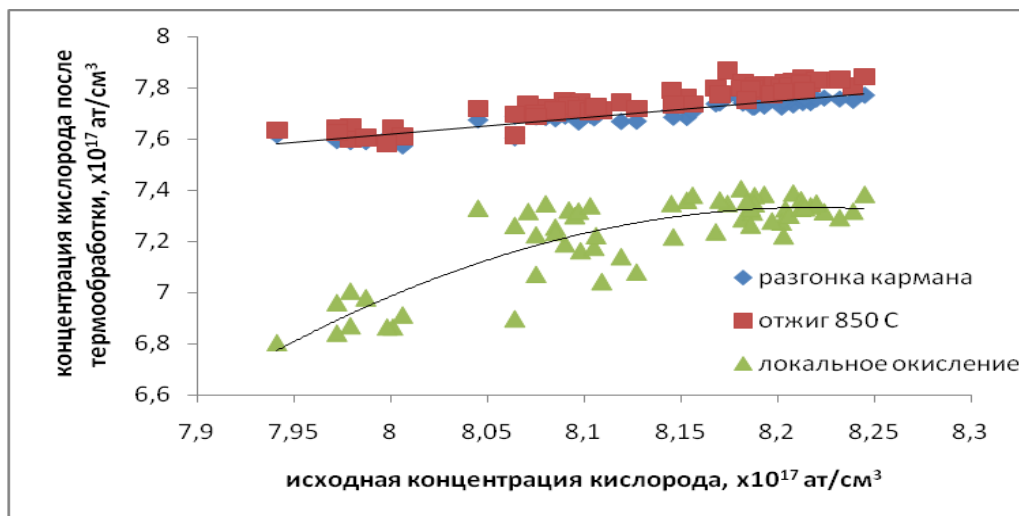


Рис. 1. Зависимость концентрации кислорода в кремнии после термообработок от исходной концентрации кислорода

На начальном этапе на всех пластинах измерялось распределение концентрации кислорода по площади пластины по 61 точке. Затем пластины проходили первую термообработку. После термообработки с пластин во фтористоводородной кислоте стравливался слой оксида кремния для предотвращения влияния дополнительных связей Si-O на измеряемую концентрацию кислорода инфракрасным методом по интенсивности линии поглощения связей Si-O. После стравливания оксида кремния на пластинах кремния вновь контролировалось распределение концентрации кислорода по площади пластины. Затем пластины отправлялись на следующую термическую операцию и цикл отжига-измерения повторялся.

По полученным результатам измерений строились зависимости концентрации кислорода в пластинах кремния и изменение концентрации кислорода после термообработки от исходной концентрации кислорода в кремнии.

Существенное внимание в процессе проведения эксперимента уделялось пространственному распределению концентрации кислорода и изменения концентрации кислорода по отношению к исходным значениям в каждой точке пластины. Величина изменения концентрации кислорода в кремнии показывает плотность преципитатов кислорода в кремнии. Преципитаты кислорода являются одними из основных кристаллографических дефектов в кремнии. Кроме того, преципитаты кислорода являются зародышами дефектов упаковки и влияют на генерацию дислокаций при наличии термомеханических напряжений в пластинах кремния.

В исследованных пластинах концентрация кислорода составляла $(7,9 - 8,3) \times 10^{17}$ ат/см³. После проведения первой высокотемпературной термообработки при 1150 °С (разгонка кармана) происходит уменьшение концентрации кислорода в основном из-за ускоренной диффузии и испарения кислорода с поверхности пластины, а также за счет частичного роста крупных преципитатов, радиус которых больше критического для температуры термообработки (рис. 1).

После проведения следующей операции окисления 850 °С происходит увеличение измеренной концентрации кислорода по сравнению с предыдущей операцией.

Отличительной особенностью этой операции является пирогенное окисление, эквивалентное окислению в парах воды. Во время проведения этой операции происходит ускоренный рост пленки оксида кремния, что приводит к избыточной генерации собственных междоузельных атомов кремния и сдвигу равновесных критических размеров преципитатов кислорода в сторону больших значений. При этом часть стабильных преципитатов кислорода становятся нестабильными с радиусом меньше критического и начинают растворяться, кислород из оптически неактивного состояния становится оптически активным в междоузельном состоянии.

Таким образом после проведения отжига 850°С в пластинах кремния становится меньше концентрация центров преципитации кислорода, что позволяет уменьшить плотность кристаллографических дефектов после проведения последующих высокотемпературных операций изготовления ИМС.

Следующей контрольной операцией, после которой анализировался процесс преципитации кислорода, было «локальное окисление» при температуре 950°С. Эта операция является одной из самых длительных высокотемпературных обработок и оказывает существенное влияние на процесс дефектообразования в кремниевых пластинах в процессе изготовления интегральных микросхем.

После локального окисления концентрация растворенного кислорода значительно уменьшается. Кроме того, особенностью операции «локальное окисление» является и значительный разброс значений концентрации оптически активного кислорода относительно линии тренда, в то время как после предыдущих операций разброс был значительно ниже. Это во многом может быть связано с однородностью теплового поля в диффузионных печах.

Анализ распределения концентрации кислорода и характера преципитации кислорода по площади пластины позволяет контролировать однородность параметров по пластинам большой площади и настроенность технологического оборудования и оснастки.

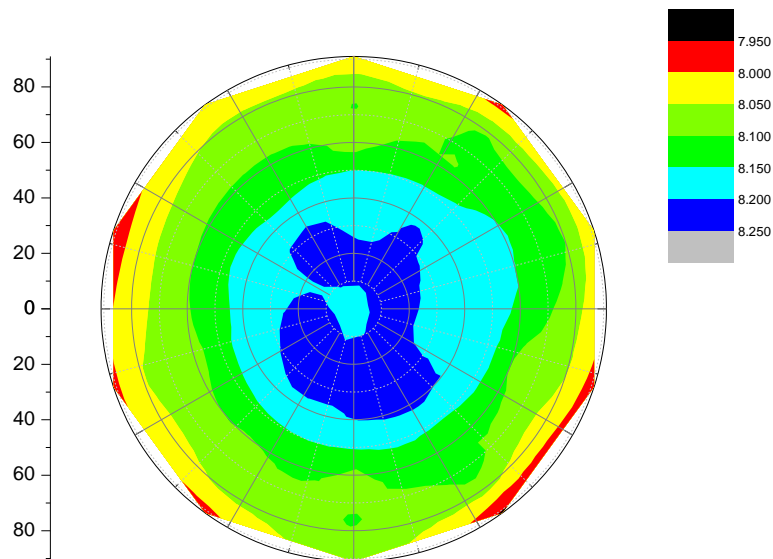


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации кислорода в исходной пластине

На исходных пластинах кремния распределение концентрации кислорода имеет центрально симметричный характер (рис. 2.). Центрально симметричное распределение концентрации кислорода связано с особенностями выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского, при котором происходит вращение как растущего монокристалла, так и тигля с расплавом, из которого вытягивается слиток кремния. Расположение локальных максимумов концентрации кислорода определяется профилем фронта кристаллизации, который зависит от скорости вытягивания слитка, скоростей вращения затравки и тигля, а также степени переохлаждения расплава кремния. В современных монокристаллах кремния радиальный градиент концентрации кислорода не превышает 5%, что и подтверждают полученные в эксперименте распределения концентрации кислорода по площади пластин кремния.

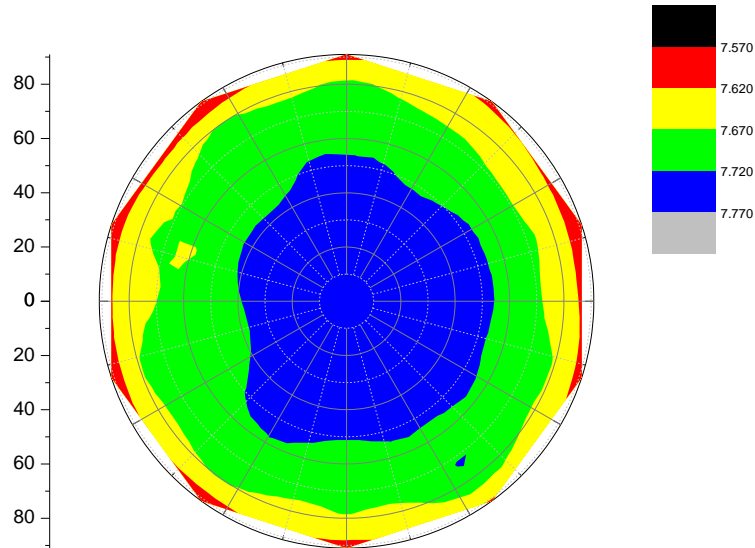


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации кислорода в пластине после операции «разгонка кармана»

Как отмечалось выше после проведения операции «разгонка кармана» при 1150 °С происходит уменьшение концентрации кислорода в кремниевых пластинах. При этом характер распределения концентрации кислорода по площади пластин в основном остается центрально симметричным, однако начинают проявляться локальные экстремумы, характерные для различных пластин кремния (рис. 3).

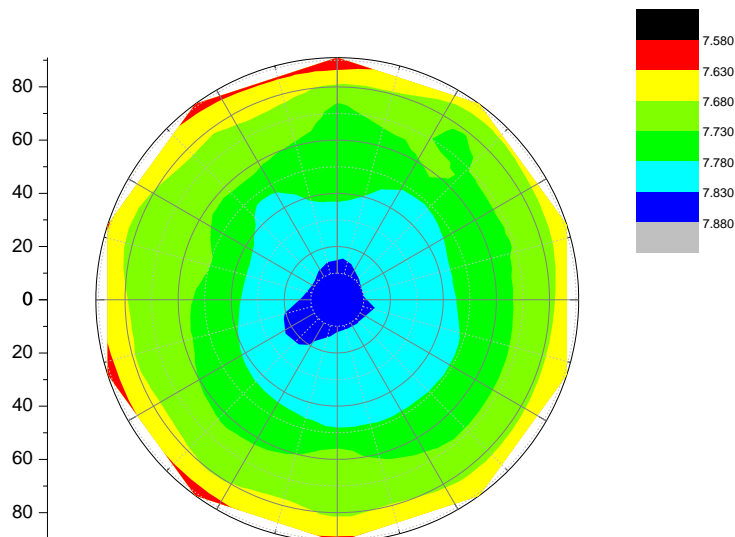


Рис. 4. Пространственное распределение концентрации кислорода в пластине после операции «окисление 850 °С»

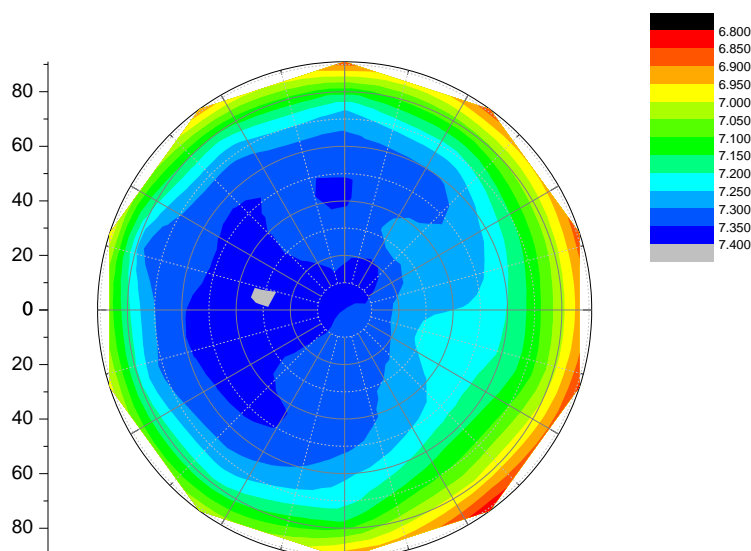


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации кислорода в пластине после операции «локальное окисление»

Следующая термообработка при 850 °С также в основном сохраняет центрально симметричное распределение кислорода по площади пластины. В большинстве случаев его характер аналогичен картине распределения кислорода в исходных пластинах кремния (рис. 4).

Наиболее длительная высокотемпературная операция «локальное окисление» приводит к существенному изменению картины распределения концентрации оптически активного кислорода в пластинах кремния (рис. 5). Появляются значительные экстремумы в распределении концентрации кислорода в областях пластины, противоположных базовому срезу. При этом экстремумы представляют собой локальные максимумы концентрации.

Учитывая, что при проведении всех термических операций пластины ориентируются в установках термообработки одинаковым образом относительно базового среза, можно сделать вывод, что на такую картину распределения оказывает влияние условия проведения термообработки в конкретных установках. Причиной такой картины может быть как неоднородность теплового поля в установке окисления, так и ростовых установок слитков.

Характер картины распределения концентрации кислорода по площади пластины может говорить о существовании проблемы корректной работы технологического оборудования для проведения высокотемпературных термообработок.

INVESTIGATION OF SPATIAL CHANGE OF PRECIPITATION KINETICS OF OXYGEN IN SILICON UNDER FABRICATION OF THE INTEGRATED MICROCIRCUITS BY MEANS OF IR-FOURIER SPECTROMETRY

V. A. Solodukha, A. K. Panfilenko, S. V. Shvedov,
A. N. Petlitsky, T. V. Petlitskaya,
N. A. Krekoten', T. N. Yeshik

JSC "INTEGRAL" - "INTEGRAL" Holding Managing Company, Minsk

In the work the behavior of oxygen is contemplated after the high temperature thermal treatments within the temperature range of 850-1150 °С, typical for fabrication of the submicron integrated microcircuits. There are determined variation dependences of the oxygen concentration in the silicon wafers on the oxygen initial concentration, temperature and sequence procedure of the high temperature thermal treatments. Analysis of the oxygen bulk distribution has mainly central symmetrical nature. However, with the progress of the high temperature thermal treatments the oxygen distribution along the wafer assumes the local extreme points, which are manifested as a crescent in the wafer areas opposite to the base cut. This may signify the non-homogeneity of the heat field cross-section-wise of the units, wherein the high temperature process operations are conducted.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МОНОСИЛАНЕ

Аношин О.С.¹, к.х.н. Котков А.П.¹, к.х.н. Гришнова Н.Д.¹,
д.х.н. Сенников П.Г.², Скосырев А.И.¹

¹ ОАО «НПП «Салют», Нижний Новгород

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН

Кремний остается основным материалом микроэлектроники. С каждым годом к чистоте кремния предъявляются все более жесткие требования. Для кремния электронного качества требуется содержание основного вещества на уровне 11N. Существуют различные методы получения полупроводникового кремния. Качество кремния зависит от чистоты исходного вещества, из которого его производят. Для производства наиболее чистого кремния приоритетной остается моносилановая технология. Очистка моносилана от большинства примесей является наиболее эффективной из-за значительного различия физико-химических свойств SiH₄ и других соединений. Кремний получают путем термического разложения моносилана на нагретом стержне при 800 °С по следующей реакции SiH₄→Si + 2H₂.

Примесный состав моносилана определяется методом его синтеза [1]. Независимо от метода синтеза, в моносилане практически всегда присутствует следующие примеси – постоянные газы (водород, азот, кислород), оксид и диоксид углерода, углеводороды (C1-C4), дисилан, дисилоксан, вода и гидриды элементов 3-ей и 5-й групп (диборан, фосфин, арсин, стибин). Наиболее важными примесями являются гидриды электрически активных в кремнии элементов – бора, фосфора, мышьяка. Содержание этих элементов в кремнии лимитируется на уровне ≤0,03 ppba. Также в кремнии лимитируется содержание углерода и кислорода на уровне <0,1 ppm. Источниками углерода и кислорода в кремнии могут служить углеводороды, оксиды углерода, дисилоксан и др.

Наиболее эффективными методами очистки моносилана остаются дистилляционные методы, в частности низкотемпературная ректификация. Для достижения необходимого уровня чистоты моносилан подвергают глубокой очистке на ректификационной колонне. Более летучие, чем моносилан, примеси концентрируются вверху колонны, в так называемой, легкой фракции (ЛФ). Менее летучие, чем моносилан примеси концентрируются внизу колонну - в тяжелой фракции (ТФ). С точки зрения очистки важно определить наиболее трудноудаляемые примеси в ЛФ и в ТФ. Нами установлено, что среди легких примесей (водород, метан, углекислый газ и др.) наиболее трудноудаляемой является углекислый газ. Он лимитирует процесс очистки от легких примесей. Данная работа посвящена разработке методик определения углекислого газа в моносилане. Определять содержание CO₂ в моносилане необходимо на всех этапах очистки – в исходном моносилане после синтеза, в отборах легкой фракции в ходе очистки, а также в конечном продукте – высокочистом моносилане.

У ведущих зарубежных производителей моносилана содержание углекислого газа в моносилане квалификации 6N не превышает уровня 5*10⁻⁶ %об. (0,05 ppm).

Определению углекислого газа в моносилане посвящены несколько работ. В работе [2] сообщалось, что с применением газового хроматографа, оснащенного пламенно-ионизационным детектором и метанатаром, устройством переводящим углекислый газ в метан, был достигнут предел обнаружения CO₂ - 0,2ppm (2*10⁻⁵% об.). В работе [3] описывается применение хромато-масс-спектрометрической методики для определения CO₂ в монсилане. Реально измеренная минимальная концентрация CO₂ в силане составляла 2,1*10⁻⁵ % об. (0,21ppm). Соотношение сигнал/шум было на уровне 30, из чего авторы сделали вывод о пределе обнаружения методики - 1*10⁻⁶ % об. (10ppb). Однако, измерение таких низких концентраций требует применения дополнительных высокоэффективных средств очистки газа-носителя. В работе [1] для определения содержания CO₂ в силане применяли метод ИК-Фурье спектроскопии. О величине предела обнаружения методики не сообщалось.

Для определения углекислого газа в моносилане мы применили метод ИК-Фурье спектроскопии. Эксперименты проводились на двух вакуумных ИК-Фурье спектрометрах фирмы Bruker: Vertex 80v и IFS-125. Параметры спектрометров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ИК-Фурье спектрометров

Спектрометр	Оптическое разрешение, см ⁻¹	Длина оптического пути, м	Остаточное давление в спектрометре, hPa
Vertex 80v	0.1	8	2.2
IFS-125	0.005	12	0.07

В качестве аналитической спектральной полосы для определения CO₂ использовали валентное колебание ν₃ в области 2349 обратных сантиметров.

Для приготовления калибровочных смесей и проведения экспериментов была изготовлена установка из нержавеющей стали, запорная арматура которой также выполнена из нержавеющей стали. Установка была оснащена криогенной ловушкой, форвакуумным насосом, также был подключен баллон с аргоном квалификации 99.998 для промывки системы.

Для построения калибровочных кривых и оценки предела обнаружения были приготовлены калибровочные смеси углекислого газа в моносилане. Концентрация CO_2 в смесях составляла от $1 \cdot 10^{-1} \%$ об до $7 \cdot 10^{-6} \%$ об. Смеси готовили путем одно- и двукратного разбавления с использованием технического углекислого газа и высокочистого моносилана.

Для спектрометра Vertex 80v были построены калибровочные кривые в диапазоне концентраций $1 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-5} \%$ об. и диапазоне давлений от 5 до 100 кПа. Они представлены на рисунке 1.

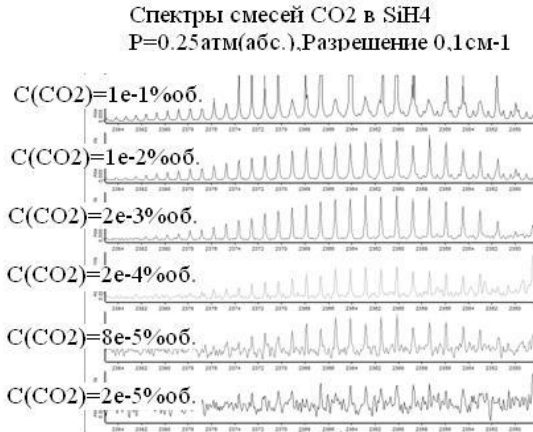


Рис. 1а.

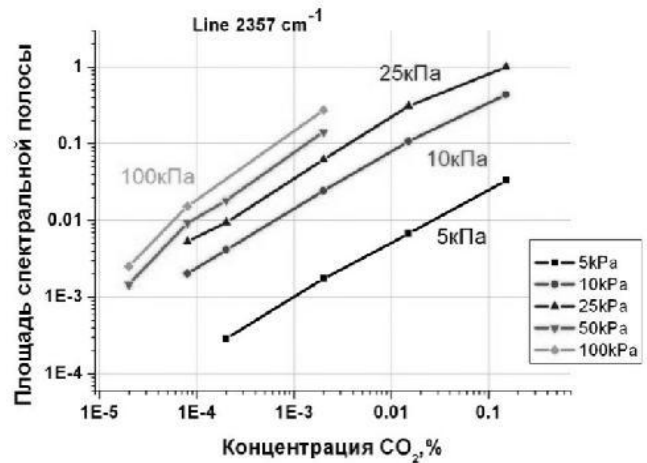


Рис. 1б.

Рис. 1. а) участки спектров смесей моносилана с углекислым газом, с концентрацией CO_2 от $1 \cdot 10^{-1}$ до $2 \cdot 10^{-5} \%$; б) калибровочные кривые определения CO_2 в SiH_4 для спектрометра Vertex 80v

На рисунке приведены участки спектров смесей моносилана с углекислым газом. Исходя изданных полученных калибровочных кривых, предел обнаружения углекислого газа в моносилане с применением ИК-Фурье спектрометра Vertex 80v составил $1 \cdot 10^{-3} \%$ об. (0.1 ppm).

На спектрометре IFS-125 была исследована зависимость уширения спектральной полосы углекислого газа в моносилане в зависимости от давления смеси – рисунок 2. Была исследована форма спектральной полосы CO_2 с разрешением $0,1$, $0,01$ и $0,005 \text{ см}^{-1}$. Установлено, что уширение полосы углекислого газа в смеси с моносиланом при увеличении давлении смеси больше 100 торр делает нецелесообразным улучшать разрешение ниже $0,01 \text{ см}^{-1}$.

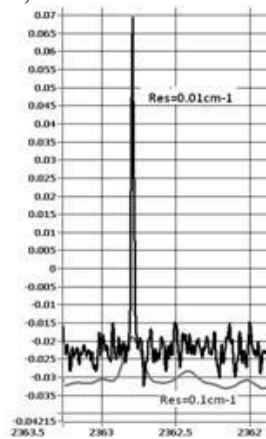


Рис.2а.

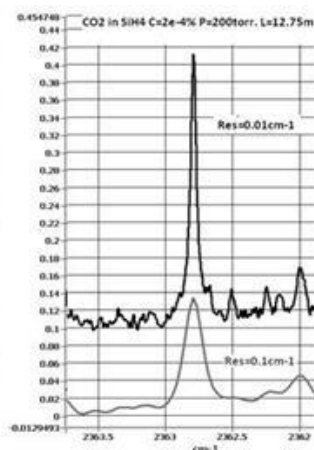


Рис.2б.

Рис. 2. Форма спектральной полосы CO_2 при давлении смеси CO_2 в моносилане 10 торр (рис 2а.) и 200торр (рис 2б.), записанные с разрешением $0,1$ и $0,01 \text{ см}^{-1}$

Улучшение разрешения с $0,1$ до $0,01 \text{ см}^{-1}$ увеличивает длительность анализа в 6 раз, улучшение до $0,005 \text{ см}^{-1}$ увеличивает длительность еще примерно в 10 раз. Таким образом, улучшая разрешение, мы увеличиваем длительность анализа, что негативно сказывается на экспрессности анализа. Но самое главное увеличивает ошибку измерения, связанную с возможным микронатеканием углекислого газа из атмосферы в анализируемую пробу. Таким образом, оптимальными параметрами для определения CO_2 в моносилане являются давление пробы 100 торр и оптическое разрешение $0,01 \text{ см}^{-1}$. Для спектрометра IFS-

125 были построены калибровочные кривые в диапазоне концентраций CO_2 от $2 \cdot 10^{-4}$ % об. до $7 \cdot 10^{-6}$ % об. – рисунок 3.

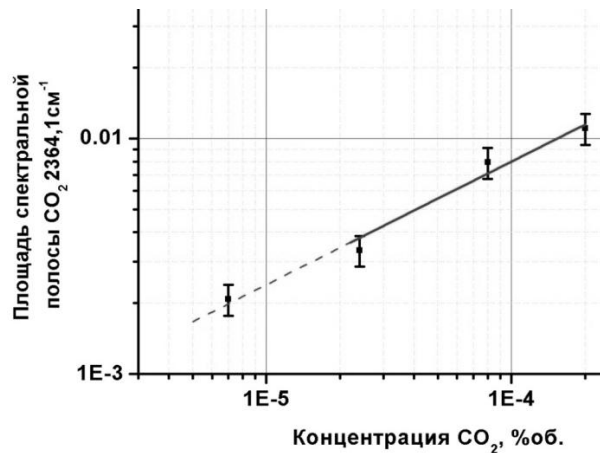


Рис. 3. Калибровочная кривая определения CO_2 в моносилане для спектрометра IFS-125 при давлении пробы 100 торр и разрешении $0,01 \text{ см}^{-1}$

Исходя из данных полученной калибровочной кривой, предел обнаружения углекислого газа в моносилане с применением ИК-Фурье спектрометра IFS-125 составил величину $5 \cdot 10^{-6}$ % об. (0,05ppm).

Разработанные методики были применены в ходе очистки образцов моносилана с различным содержанием углекислого газа. Содержание CO_2 в образцах моносилана перед очисткой было предварительно измерено с помощью спектрометра Vertex 80v. Концентрация CO_2 в первых трех образцах была $2 \cdot 10^{-4}$, $8 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-5}$ % об. соответственно. В четвертом образце содержание CO_2 было ниже предела обнаружения $< 2 \cdot 10^{-5}$ % об. В ходе очистки этих образцов моносилана проводился анализ отборов легкой фракции силана на содержание CO_2 . Масса загрузки каждого образца составляла около 100 г.

На рисунке 4а представлена схема подключения аналитической кюветы спектрометра Vertex 80v к ректификационной колонне для очистки моносилана. На рисунке 4б представлен график изменения содержания CO_2 в отборах легкой фракции моносилан по мере очистки.

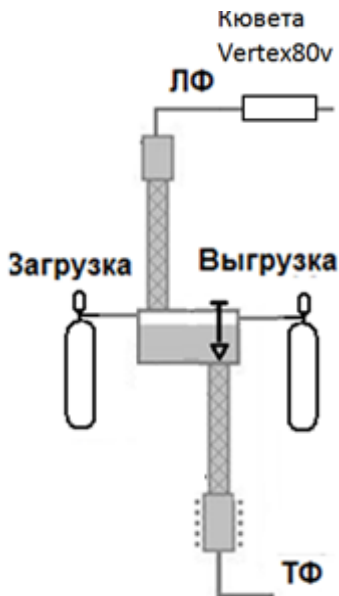


Рис. 4а. Схема ректификационной колонны для очистки моносилана

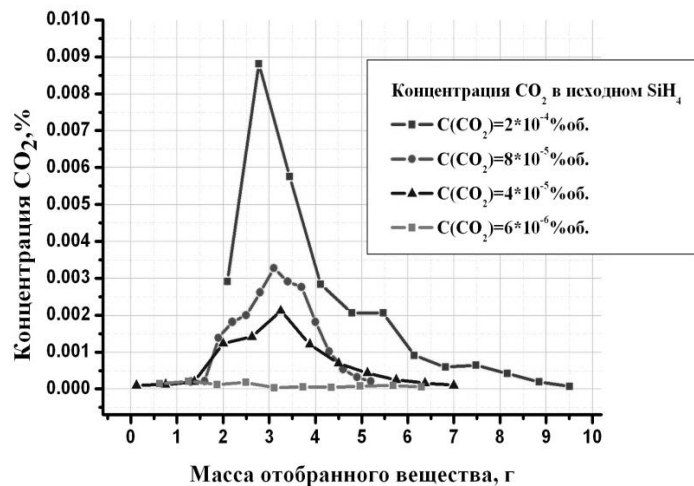


Рис. 4б. Изменение содержания углекислого газа в отборах легкой фракции при очистке образцов моносилана с различным исходным содержанием CO_2

Рис. 4. а) схема подключения кюветы спектрометра к ректификационной колонне; б) результат измерения содержания CO_2 в отборах ЛФ при очистке различных образцов моносилана

Как видно из графиков на рисунке 4б площадь под кривой изменения содержания CO_2 в отборах ЛФ пропорциональна концентрации CO_2 в исходном моносилане. Таким образом, проинтегрировав кривую изменения CO_2 в отборах ЛФ, мы можем определить массу отобранного углекислого газа. Тем самым, соотнеся массу отобранного CO_2 с массой загруженной пробы, мы можем определить исходную

концентрацию CO₂ в моносилане. В случае достаточно высоких исходных концентраций CO₂ в моносилане содержание можно определить прямым методом измерения. Однако, когда для прямого метода определения недостаточно чувствительности для определения содержания CO₂ в моносилане, можно прибегнуть к методу концентрирования на ректификационной колонне.

Для измерения неизвестного содержания CO₂ в пробе моносилана необходимо загрузить пробу моносилана известной массы (в нашем случае 100г.) в ректификационную колонну. Вывести колонну в рабочий режим, затем отобрать легкие фракции сверху колонны с проведением анализа на ИК-Фурье спектрометре. Добиться снижения содержания CO₂ в ЛФ до уровня предела обнаружения методики. Для определения концентрации CO₂ в анализируемой пробе можно использовать два подхода. Первый заключается в интегрировании кривой изменения концентрации CO₂ в отборах ЛФ. Зная массу каждого отбора и содержание в нем углекислого газа, можно рассчитать все количество CO₂, отобранное из анализируемой пробы. Таким образом, исходная концентрация легко рассчитывается по уравнению

$$C_{\text{исх}} = (\sum C_i * m_i / M_{\text{пробы}}) * 100\%$$

где C_i – концентрация CO₂ в i-м отборе ЛФ, m_i – масса i-го отбора ЛФ, M_{пробы} – масса загруженной в колонну анализируемой пробы силана.

Второй подход к расчету исходного содержания CO₂ в пробе моносилана заключается в проведении анализа баллона с отобранной легкой фракцией, определения содержания в нем CO₂, взвешивании отобранной фракции ЛФ и тем самым определением массу отобранного углекислого газа. Таким образом, исходная концентрация рассчитывается по следующей формуле.

$$C_{\text{исх}} = (C_{\text{лф}} * M_{\text{лф}} / M_{\text{пробы}}) * 100\%$$

где C_{лф} – концентрация CO₂ в баллоне с отобранной легкой фракцией, M_{лф} – масса отобранной легкой фракции, M_{пробы} – масса загруженной в колонну анализируемой пробы силана.

Применение метода концентрирования примеси CO₂ на ректификационной колонне позволяет понизить предел обнаружения разработанных методик минимум на 2 порядка. Однако важную роль на правильность проведения анализа оказывает фон системы по углекислому газу. Перед проведением анализа силана на ректификационной колонне, необходимо до загрузки анализируемой пробы загрузить в колонну чистого моносилана, вывести колонну в режим и отобрать сверху легкую фракцию до момента снижения концентрации CO₂ до уровня предела обнаружения методики анализа. Только после этого можно загружать пробу в колонну и проводить анализ.

Таким образом, были разработаны методики определения углекислого газа в моносилане с применением ИК-Фурье спектроскопии. Для анализа моносилана в ходе его очистки на ректификационной колонне применялся ИК-Фурье спектрометр Vertex-80v. Предел обнаружения этой методики составил 1*10⁻⁵% об.(0,1ppm). Также была разработана еще более чувствительная методика определения CO₂ в моносилане с применением ИК-Фурье спектрометра IFS-125. Предел обнаружения которой составил величину 5*10⁻⁶ %об.(0,05ppm). В дополнение к этим методикам была разработана и апробирована методика концентрирования углекислого газа на ректификационной колонне. Это позволило понизить предел обнаружения разработанных методик на 2 порядка. В итоге, были получены образцы высокочистого моносилана, содержание углекислого газа в которых не превышало уровня 1*10⁻⁷% об. (1ppb).

Литература

1. Сенников П.Г., Примеси в моносилане, синтезированным различными методами.
2. Bradley Am.lab 1987 p228
3. I.Morisako, Trace gas detection in high purity gases for semiconductor fabrication with a new GS/MS system, Journ. of Mass Spectrometry and Ion Physics, 1983, p 19-22

E-mail: saluthps@mail.ru

APPLICATION OF FTIR-SPECTROSCOPY FOR CARBON DIOXIDE DETECTION IN MONOSILANE

O.S. Anoshin¹, A. P. Kotkov¹, N. D. Grishnova¹,
P.G. Sennikov², A. I. Skosyrev¹

¹ JSC "NPP "Salut", Nizhny Novgorod

² G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS

The paper found that carbon dioxide is one of stubborn impurities in the purification of monosilane. The methodology for determining CO₂ in monosilane by FTIR spectroscopy was developed. The detection limits of the developed techniques have the value of 0,2 ppmv for the spectrometer Vertex80v, and 0,05ppmv for spectrometer IFS-125. In applying the method of concentrating impurity in rectification column the lower

detection limit of carbon dioxide in the monosilane was achieved with the value 10ppb. Using developed techniques monosilane samples containing CO₂ on the level <10ppb were obtained.

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА СВЕРХПРОВОДНИК-ФЕРРИМАГНЕТИК ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.¹, к. ф.-м. н. Каланда Н.А.²,
к. ф.-м. н. Соболев Н.А.³, Ярмолич М.В.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

² ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

³ Universidade de Aveiro, Portugal

Большое значение для микроэлектронной промышленности имеет разработка и создание слабых джозефсоновских контактов в высокотемпературных сверхпроводящих материалах, которые представляют интерес для исследователей как с сугубо научной точки зрения, так и для их практического применения [1–2]. Наличие межзеренных границ и малой длины когерентности $\xi \sim 10^{-7}$ м, как например в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, приводит к уменьшению предельного значения ширины потенциального барьера, бездиссипативно проходимого для куперовских пар. В результате межзеренные границы являются слабыми связями джозефсоновского типа [3–5]. При этом в поликристаллическом сверхпроводящем соединении $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ наблюдается значительный магниторезистивный эффект ниже температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние (T_c). Однако температурный диапазон, в котором наблюдается высокое магнитосопротивление (МС), достаточно узок, и для купрата иттрия бария не превышает нескольких градусов ниже T_c . Кроме того, характеристики возможных активных элементов датчиков магнитного поля, как, например, избыточное удельное электросопротивление, обусловленное магнитным полем, величины плотности транспортного тока через образец, чувствительность к магнитному полю и др. у однофазного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ не подходят для возможного практического применения [4–8]. В этом плане перспективным является исследование композитных материалов на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + M$, в которых межгранульные границы модифицируются за счет добавления несверхпроводящего магнитного ингредиента (М) [5–8].

В настоящей работе в качестве магнитного ингредиента в сверхпроводящей матрице выбран ферромолибдат стронция $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$, который является ферримагнетиком и полупроводником, имеющим высокую температуру плавления и химически инертным к $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Необходимые свойства ферримагнитной подсистемы соединения $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ определяются присутствием сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} . При его наличии происходит увеличение плотности электронных состояний на уровне Ферми с усилением металлического типа проводимости и степени спиновой поляризации. Важной характеристикой композита для его использования в микроэлектронике является быстроедействие. Повышение быстрогодействия, определяемого подвижностью доменных стенок, достигается путем уменьшения гранул ферромолибдата стронция до субмикронных размеров [1].

Согласно данным рентгеноструктурного анализа установлено, что образцы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ являются однофазными, имеют орторомбическую РМММ структуру с параметрами кристаллической решетки: $a=3,879036 \text{ \AA}$, $b=3,818421 \text{ \AA}$, $c=11,694800 \text{ \AA}$ и $V=173,221 \text{ \AA}^3$, при этом содержание кислорода в структуре купрата иттрия бария составляет $(7 - \delta) = 6,8$. Согласно данным рентгеноструктурного анализа образцы $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ являются однофазными, имеют тетрагональную ($I4/m, Z=2$) структуру со сверхструктурным упорядочением катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} , что следует из наличия рефлексов (011) и (013) на рентгенограммах. Параметры кристаллической решетки составляли: $a=b=5,5577 \text{ \AA}$, $c=7,8925 \text{ \AA}$ и $V=243,7837 \text{ \AA}^3$ при этом степень сверхструктурного упорядочения равняется $P=84\%$.

Перемешивание исходных реагентов состава $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0,05Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ проводилось в спирту в течение $t=1$ ч. Полученные смеси сушились при температуре 350K и прессовались в таблетки диаметром 10мм, толщиной 3мм под давлением $P=50$ кбар/см². Для получения композита $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0,05Sr_2FeMoO_{6-\delta}$, использовали крупнозернистый порошок купрата иттрия бария со средним диаметром зерен $\langle d \rangle = 50\text{--}100$ мкм и порошок ферромолибдата стронция субмикронных размеров $\langle d \rangle = 0,5\text{--}0,9$ мкм, рис.1. Определение химических процессов с образованием новых соединений в процессе прессования композита осуществлялось с помощью структурных исследований. Согласно данным рентгенофазового анализа не обнаружено присутствия рентгеновских рефлексов других соединений, а только рефлексы фаз исходных ингредиентов, что указывает на наличие атомарно резких границ между зернами магнитной и сверхпроводящей фаз.

При анализе политермических зависимостей удельного электросопротивления композита $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8} + 0,05\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6.8}$ в режиме охлаждения при различных величинах индукции B постоянного магнитного поля и значении измерительного тока $I_{\text{изм}}=2\text{мА}$ обнаружено два различных характера поведения $\rho=f(T, B)$. Значение измерительного тока $I_{\text{изм}}=2\text{мА}$ было выбрано согласно данным вольт-амперных характеристик, рис. 2. Обнаружено, что при этом значении композит не переходит в сверхпроводящее состояние и не наблюдается выделения джоулевого тепла на межзеренных контактах, что способствует временной стабильности сигнала. При этом, зависимости $\rho(T, B)$ полностью воспроизводимы при любой скорости термоциклирования, что указывает на отсутствие влияния саморазогрева образца при измеряемом токе.

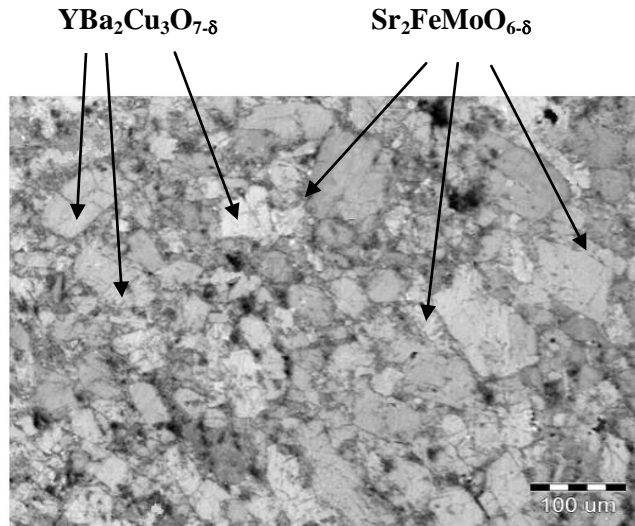


Рис. 1. Микроструктура композита $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8} + 0,05\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6.8}$, спрессованного под давлением $P=50$ кбар/ см^2

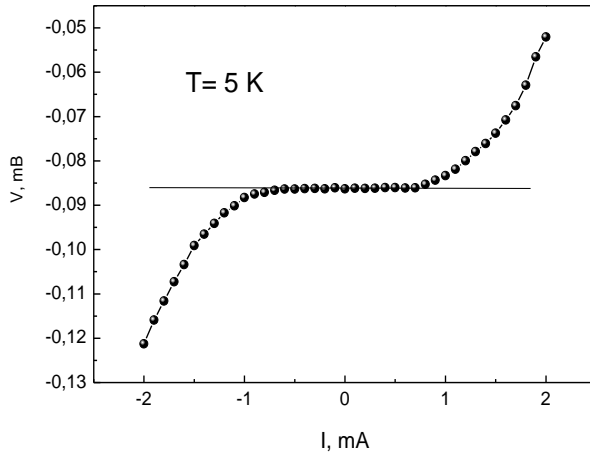


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики композита $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8} + 0,05\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6.8}$

В температурном интервале $T=300-T_c^1$, K установлен полупроводниковый тип проводимости, а в интервале температур $T_c^1 - T_{\text{мин}}$ преимущественно реализуется переход в сверхпроводящее состояние, рис. 3. Обнаружено, что с увеличением величины B электросопротивление композита незначительно уменьшается, а значения T_c^1 , K сдвигаются в сторону меньших температур, увеличивая температурный диапазон существования полупроводникового типа проводимости. При дальнейшем понижении температуры величина температурного интервала $\Delta T_1=(T_c^1-T_{\text{мин}})K$ резкого уменьшения удельного электросопротивления увеличивается с ростом B , табл. 1. Увеличение индукции магнитного поля B до 10Тл повышает выраженность полупроводникового типа проводимости во всем исследуемом интервале температур $\Delta T_2=(T_{\text{мин}} - T_{\text{н}}^2)K$, не меняя смешанный режим переноса заряда и знак температурного коэффициента сопротивления $(d\rho/dT)$, а только сдвигая точку перегиба $T_{\text{мин}}$ в сторону меньших

температур, рис. 3. В этом случае значения T_c^2 , соответствующие началу второго перехода в сверхпроводящее состояние, уменьшаются с увеличением B . Дальнейшее поведение величины электросопротивления при охлаждении композита до 4,2K носит сложный характер и зависит от величины приложенного поля, а также и от качества слабых связей, в роли которых выступает магнитный ингредиент $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$.

Исходя из того, что композит $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.05Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ состоит из зерен, связанных слабым джозефсоновским взаимодействием через магнитную прослойку, то величина транспортного критического тока определяется межгранульным критическим током J_{cs} . При этом величина J_{cs} , как правило, на несколько порядков ниже, чем критическая плотность внутригранульного тока J_c . Ввиду высокой анизотропией проводимости ($\rho_c/\rho_{ab} \sim 10$) и малой длиной когерентности в различных кристаллографических направлениях $\xi_{ab} \sim (10-15)\text{Å}$, $\xi_c \sim (2-4)\text{Å}$ величина $J_{cs}(\varphi)$ значительно зависит от угла разориентации кристаллографических плоскостей в соседних кристаллитах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Кроме того сдвиг точек T_c^2 в сторону меньших температур под воздействием магнитного поля обусловлен плавлением решетки абрикосовских вихрей в сверхпроводящих зернах купрата иттрия бария.

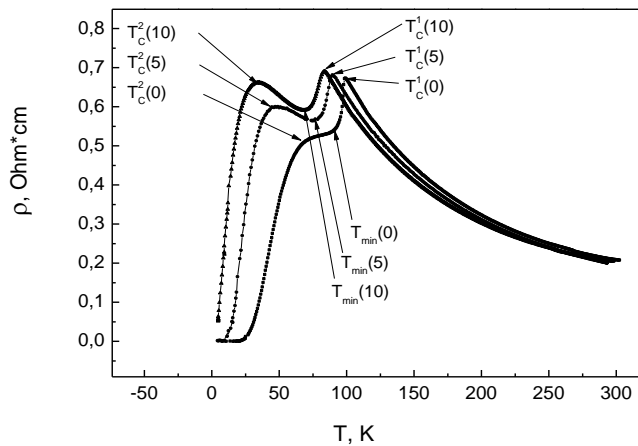


Рис. 3. Температурная зависимость электросопротивления композита $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.05Sr_2FeMoO_{6-\delta}$, измеренная при различных величинах внешнего магнитного поля, где $T_c^2(0) = T_c^1 - T_{min}$

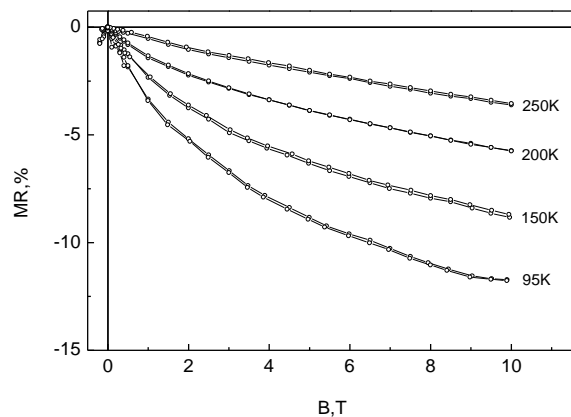


Рис. 4. Полевая зависимость магнитосопротивления композита $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.05Sr_2FeMoO_{6-\delta}$, измеренная при различных температурах.

При изучении поведения магнитосопротивления в композите обнаружено, что в интервале температур $T=300-T_c^1$, K композит имеет отрицательное магнитосопротивление $MR = [\rho(B) - \rho(0)] / \rho(0)$, где $\rho(B)$ и $\rho(0)$ – соответственно удельное электросопротивление в магнитном поле и без него. Наличие отрицательного магнитосопротивления обусловлено присутствием в композите ферромolibдата стронция. В этом случае по зернам $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ течет спинполяризованный ток. При этом вероятность туннелирования электронов, термически активированных выше энергетического барьера, зависит от

взаимной ориентации намагниченности в зернах. Так при $B=0$ магнитные моменты доменов ориентированы случайным образом и, согласно модели Слончевского, электрический ток минимален и пропорционален относительному углу между векторами намагниченности доменов, т.е. $\rho - \rho_s \propto 1 - \cos\Theta$, где Θ - угол между векторами намагниченности, являющийся функцией магнитного поля, а ρ_s - это ρ при $\Theta = 0$. При $B \neq 0$ внешнее магнитное поле формирует коллинеарную магнитную структуру, тем самым, уменьшая угол между векторами намагниченности зерен и увеличивая величину протекающего по композиту спинполяризованного тока. Тем не менее, существует ряд рассеивающих факторов, влияющих на уменьшение величины спинполяризованного тока. В этом случае величина MR связана с магнитосопротивлением, ассоциируемым со спиновым беспорядком, возникающим из-за рассеяния электронов на магнонах и магнитных кластерах.

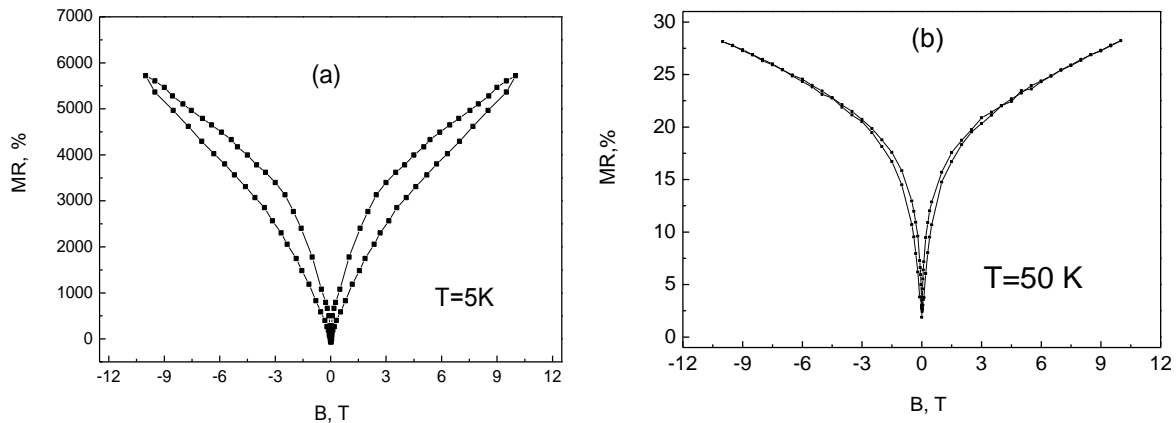


Рис. 5. Полевые зависимости магнитосопротивления, измеренные при температурах: $T=5K$ – (а) и $T=50K$ – (б)

При дальнейшем понижении температуры от T_c^1 до $4,2 K$ наблюдается магниторезистивный эффект, значения которого, при внешнем магнитном поле с индукцией $B = 10$ Тл приобретают огромную величину $MR \sim 5700\%$ при $T=5K$. Тем не менее, при росте температуры до $T=50K$ величины магнитосопротивления резко падают и соответствуют $MR \sim 27\%$ при $B = 10$ Тл, рис. 5. Такое поведение магнитосопротивления вблизи нулевых значений удельного электросопротивления может быть объяснено тем, что при температурах вблизи $R \approx 0$ на сверхпроводящий переход влияют сети слабых связей в качестве которых выступает материал из несверхпроводящего магнитного ингредиента. В этом случае даже слабые величины индукции магнитного поля оказывают влияние на нарушение фазовой когерентности между $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ гранулами в композите и понижают температуру плавления решетки магнитных вихрей, приводя их в движение без пиннингования в межзеренных связях. При температурах $T < T_c^1$ абрикосовские вихри пиннингуются внутри сверхпроводящих зерен, тогда как на слабых связях магнитные вихри все еще остаются свободными. Такая ситуация под воздействием внешнего магнитного поля создает нелинейный ход зависимости $R(T, B)$ в композите $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0,05Sr_2FeMoO_{6,\delta}$.

Замечено также, что при изотермическом ходе полевой зависимости магнитосопротивления обнаружен гистерезис, величина которого зависит от температуры. Такое поведение $MR=f(B)$ определяется влиянием намагниченности сверхпроводящих зерен на величину магнитной индукции в джозефсоновских межзеренных связях. В связи с тем, что диссипация магнитного потока осуществляется на джозефсоновских контактах, то магнитотранспортные характеристики композита будут определяться магнитным состоянием, а именно количеством захваченного магнитного потока зернами $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Литература

1. L.I. Gurskiy, N.A. Kalanda. Synthesis, phase transitions, structure and properties of metal-oxide materials. Ed. A.P. Dostanko (Bestprint, Minsk, 2012, 260 pp.) (in Russian).
2. High-temperature superconductivity. Fundamental and applied studies. Issue 1. Ed. A.A. Kiselev (Mashinostroenie, Leningrad, 1990) (in Russian).
3. A.A. Sukhanov, V.I. Omelchenko. Anisotropy of the magnetoresistance in the case of trapping of magnetic fields in granular bismuth-containing high- T_c superconductors. Low Temp. Phys. 29 (2003) 297.
4. V.V. Derevyanko, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel'. Effect of an external magnetic field and a trapped magnetic flux on the current-voltage characteristics of a granular high-temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Phys. Solid State 48 (2006) 1455.

5. D.A. Balaev, S.I. Popkov, K.A. Saihutdinov, M.I. Petrov. Mechanisms of dissipation in a Josephson medium based on a high-temperature superconductor in a magnetic field. *Phys. Solid State* 48 (2006) 48.
6. D.A. Balaev, D.M. Gohfeld, S.I. Popkov, K.A. Saihutdinov, M.I. Petrov. High-temperature superconductor based composites: Large magnetoresistance in weak magnetic fields. *Tech. Phys. Lett.* 27 (2001) 952.
7. D.A. Balaev, K.A. Shaykhtudinov, S.I. Popkov, M.I. Petrov. Controlled magnetoresistance in $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_{7-x}CuO$ composites at 77 K. *Tech. Phys. Lett.* 29 (2003) 578.
8. D.A. Balaev, A.A. Dubrovskiy, K.A. Shaykhtudinov, S.I. Popkov, M.I. Petrov. Time relaxation of residual resistance of HTSC-based composites. *Physica C* 460-462 (2007) 1309.
9. J.S. Park, Y.P. Lee, J.-H. Kang, J. Kim, B.W. Lee, J.Y. Rhee. Electrical transport and magnetic properties of $(La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3)_{1-x}(Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta})_x$ composite ceramics. *J. Magn. Magn. Mater.* 324 (2012) 1234.
10. Xuecan Yao, Yuan Jin, Mingtao Li, Zhe Li, Guixin Cao, Shixun Cao, Jincang Zhang. Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4-La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$ matrix composites. *J. Alloys Comp.* 509 (2011) 5472.

ELECTRICAL TRANSPORT PROPERTIES OF SUPERCONDUCTOR-FERRIMAGNET COMPOSITE IN APPLIED MAGNETIC FIELD

L. I. Gursky¹, N. A. Kalanda², N. A. Sobolev³, M. V. Jarmolich²

¹ Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

² SSPA "Scientific and Practical Materials Research Centre of NASB"

³ Universidade de Aveiro, Portugal

Electrical transport properties of the as a function of the temperature T and the applied magnetic field B are reported. Four different ranges in the temperature dependence of the resistivity have been found between room temperature $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ superconductor-ferrimagnet composite rature and 4.2K. In the temperature range from 300K down to T_c^1 a semiconducting conductivity type is observed, whereas below T_c^2 the first transition into a superconducting state sets in. Upon further cooling down, the semiconducting conduction appears again below $T_{min} < T_c^1$, and then a second superconducting transition starts at $T_c^2 < T_{min}$ continuing down to 4.2K. The magnetoresistance is negative above T_c^1 and positive below it, achieving at 5K a huge value of $\sim 5700\%$. We discuss the role of the weak links between the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ grains represented by the $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ interlayers on the magnetotransport in the composite.

НИЗКОФОНОВЫЙ ТИТАН ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И НИЗКОФОНОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

к. ф.-м. н. Чепурнов А.С.¹, д. т. н. Глебовский В.Г.²,
Чуб А.В.³, Аветисов И.Х.⁴, Мозжевитина Е.Н.⁴

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

² Институт физики твердого тела РАН

³ ОАО «Соликамский Магниевый Завод»

⁴ Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

Проблема получения тугоплавких металлов высокой чистоты является приоритетной научной и технической задачей в таких областях науки, как физика твердого тела, физическое материаловедение, микроэлектроника и металлургия высокочистых металлов. При этом огромное значение имеет разработка технологий получения монокристаллических и поликристаллических металлов особой чистоты с заданными кристаллографическими параметрами, изучение их микроструктуры при воздействии высоких температур и давлений. В 80-90-х годах прошлого века в результате исследований физико-химических процессов, протекающих при получении высокочистых тугоплавких металлов, в ИФТТ РАН были проведены исследования и разработаны технологии получения этих металлов с чистотой на уровне единиц ppm (particles per million) и ниже, разработаны способы и конструкции магнетронных мишеней, методы аналитического контроля и произведены поставки распыляемых мишеней практически всех тугоплавких металлов высокой чистоты на предприятия электронной промышленности (МЭП). Испытания, проведенные на отечественных предприятиях МЭП, показали их

высокое качество и высокие конкурентные возможности в сравнении с импортными изделиями. Однозначно установлено, что отечественные микроэлектронные предприятия могут с успехом использовать отечественные изделия из тугоплавких металлов и их соединений высокой чистоты при создании суб-микроэлектронной элементной базы для современных процессов производства микроприборов, например, при нанесении барьерных или токопроводящих тонких слоев высокого качества распылением мишеней из высокочистых металлов, псевдо-сплавов (например, W-Ti) и соединений (например, дисилицидов). Созданные в свое время научные и технологические основы материаловедения для микроэлектроники за прошедшие годы не были разрушены, но и не были продвинуты на современный уровень требований к материалам для элементной базы суб-микроэлектроники и нанoeлектроники. Новые требования к таким материалам направлены, прежде всего, на получение распыляемых материалов с содержанием остаточных примесей, металлических и неметаллических, на уровне единиц ppb (particles per billion).

Новым, сильным толчком к возобновлению работ по созданию металлов высокой чистоты в последние годы стал интерес со стороны физики космических частиц и редких процессов. Большие объемы (десятьки тонн) металлов с ультранизким содержанием изотопов урана и тория необходимы для создания перспективных низкофоновых детекторов большого объема. Низкофоновые жидко-сцинтилляционные детекторы большого объема являются одним из основных инструментов исследований в физике частиц для поиска ответов на такие фундаментальные вопросы, как барионная асимметрия материи, природа «темной материи», стабильность протона, свойства нейтрино и нейтринных осцилляций [1]. Однако для создания подобных детекторов нужны значительные объемы сверхчистых конструкционных материалов с уровнем радиоактивности менее 1 мБк/кг, что соответствует концентрациям изотопов менее 0.1 ppb для ^{238}U , менее 0.25 ppb для ^{232}Th , менее 0.4 ppb для ^{40}K . Из этих материалов должны быть изготовлены детали детекторов, в том числе детали большого размера с сохранением исходной радиохимической чистоты. При этом механические свойства полученных радиоактивно чистых материалов должны соответствовать общепринятым стандартам на инженерное проектирование таких элементов детекторов, как криостаты, емкости большого объема (сотни кубических метров) для жидких сцинтилляторов, трубопроводы, фланцы и т.п. Поиск ультранизкофоновых конструкционных материалов и попытки их изготовления ведутся с 80-х годов прошлого века, с момента начала низкофоновых подземных экспериментов [2]. До недавнего времени подобные материалы нужны были в относительно малых объемах. Для подтверждения их радиоактивной чистоты использованы специальные низкофоновые гамма-спектрометры на основе сверхчистых полупроводниковых детекторов, установленных в подземных низкофоновых лабораториях, с последующим подтверждением только после постройки детектора, когда сам детектор является средством измерения собственной радиоактивности. Подобные измерения требуют большого времени - от нескольких недель до нескольких месяцев, и время измерения увеличивается при снижении требуемых предельных уровней радиоактивности. В последние 5-10 лет за счет развития способов вскрытия проб, развития методов пробоподготовки, усовершенствования приборов для масс-спектропии в индуктивно-связанной плазме была решена задача оперативного контроля концентраций химических элементов, имеющих собственную радиоактивность на уровне предельно низких концентраций (10^{-10} - 10^{-11} г/г).

Нами была проанализирована практика применения традиционных материалов, применяемых в современных низкофоновых экспериментах – низкофоновая, специально отобранная нержавеющая сталь [3], промышленный титановый прокат [6, 7], электролитическая безкислородная медь [4, 5], которая обычно применяется в комбинации с нержавеющей сталью, что позволяет использовать преимущества обоих материалов, но усложняет и утяжеляет полученные конструкции. В работе [8] показано, что практика отбора титанового проката является достаточно спорной и не может применяться при проектировании детекторов, в которых нужны тонны низкофоновых материалов.

Нами был предложен другой, новый подход для обеспечения низкофоновыми конструкционными материалами будущих низкофоновых детекторов – низкофоновый конструкционный материал должен изготавливаться из изначально низкофоновых продуктов с возможностью контроля поступления радиоактивных примесей как в процессе производства, так и на всех стадиях механической и металлургической обработки с постоянным приборным контролем загрязнений на всех стадиях производства. При необходимости, должны применяться дополнительные направленные методы физико-химической очистки от отдельных элементных примесей, которые традиционно применяются в металлургии сверхчистых металлов.

В связи с тем, что титан по физико-механическим свойствам во многом не уступает, а даже превосходит нержавеющую сталь и для микроэлектроники титан производится с высокой степенью химической чистоты, именно он был нами выбран в качестве основного кандидата на низкофоновый конструкционный материал. В работе [8], на основе анализа исходных продуктов, применяемых для производства титановой губки методом магнетермического восстановления с последующей вакуумной

сепарацией и анализа промышленных образцов титановых сплавов, показано, что в некоторых случаях содержание урана и тория не превышает необходимого уровня, т.е. находится на уровне ppb и ниже.

Совместно с ОАО «Соликамский Магниевый Завод» (СМЗ) была проведена работа по проверке гипотезы о возможности получения низкофонового титана в стандартном технологическом цикле. Выбор этого предприятия как технологической площадки для проведения экспериментальной работы был связан с тем, что на СМЗ находится самое современное и новое производство титановой губки магниитермическим способом (модифицированный процесс Кролла). Все исходные продукты производятся на этом же предприятии, что позволяет контролировать процесс производства, начиная от исходных рудных материалов до финального продукта (Рис. 1). Кроме того, производство СМЗ является уникальным в России по максимально возможному объему и массе крицы титановой губки, производимой за один технологический цикл – 6 т, что позволяет ожидать ослабления контейнерного эффекта [9]. Были выбраны два технологических цикла, которые отслеживались от начала и до конца. Во время магниитермического процесса производились отборы проб тетрахлорида титана, рафинированного магния и хлорида магния - всего около 40 проб. От полученной крицы титановой губки отобраны дополнительные 40 образцов, равномерно распределенных по объему крицы. Для этого была разработана специальная методика разделки крицы с параллельным отбором проб (Рис. 2). Все образцы (более 80 шт.) были проанализированы методом ICP-MS. Полученные результаты показали, что распределение урана и тория по объему крицы происходит неравномерно и центральные области являются наиболее чистыми. Качественные значения концентрации урана и тория в диапазоне от 10-20 ppb располагаются ближе к наружной поверхности крицы (до 0,8) и < 0,05 ppb (меньше предела обнаружения для применяемой методики ICP-MS) во внутренней области крицы. Полученные результаты [10] позволили сделать вывод о том, что применяемый на СМЗ технологический процесс может быть использован для получения низкофонового титановой губки.

Для передела титановой губки в слиток металла, с качеством, пригодным для изготовления проката с сохранением достигнутой чистоты по радиоактивным примесям, предполагается применение вакуумной электронно-лучевой бестигельной зонной плавки. Такие методы очистки как зонная сублимация и газотранспортные реакции в отношении интересующих нас радиоактивных примесей с последующей дополнительной электронно-лучевой зонной плавкой должны приводить к завершению химических реакций с участием галогенидов и к активному удалению летучих галогенидов примесей [11-13]. Наиболее рационален процесс очистки, когда все примеси, при надлежащем подборе условий ведения процесса, переводятся в разряд менее летучих на стадии испарения и в разряд более летучих - при кристаллизации. Именно сочетание химико-кристаллизационных и вакуумно-металлургических методов представляется авторам наиболее перспективными для достижения предельно малых концентраций по интересующим нас примесям.

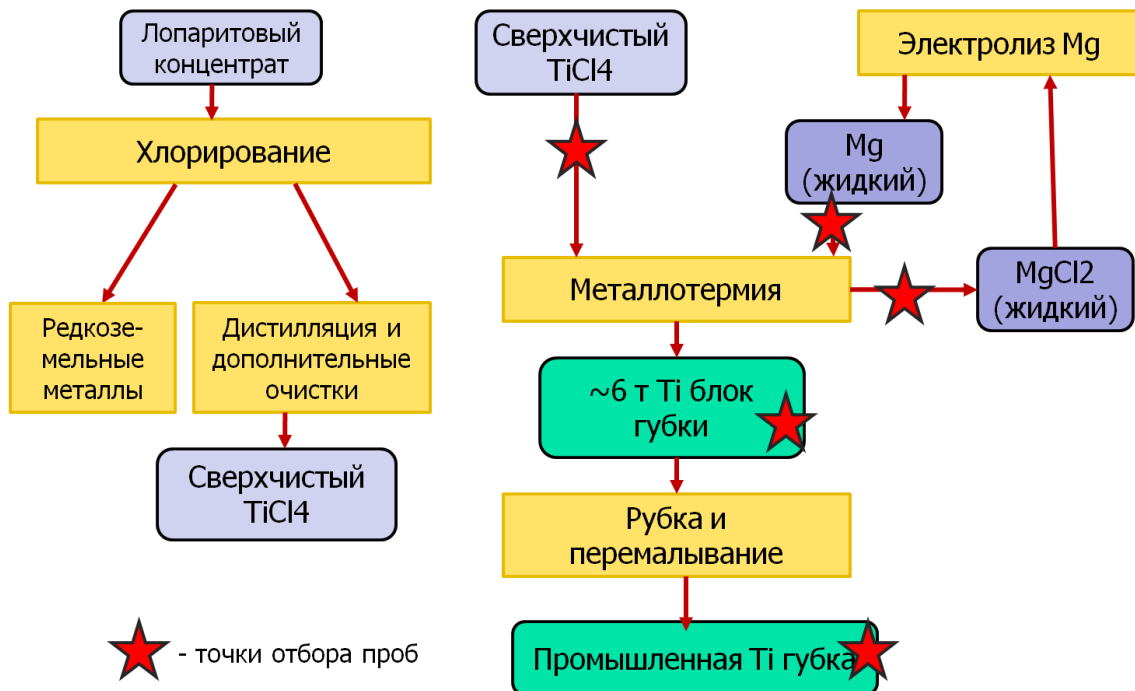


Рис. 1. Цикл производства титановой губки на ОАО СМЗ с указанием места отбора проб на содержание урана и тория

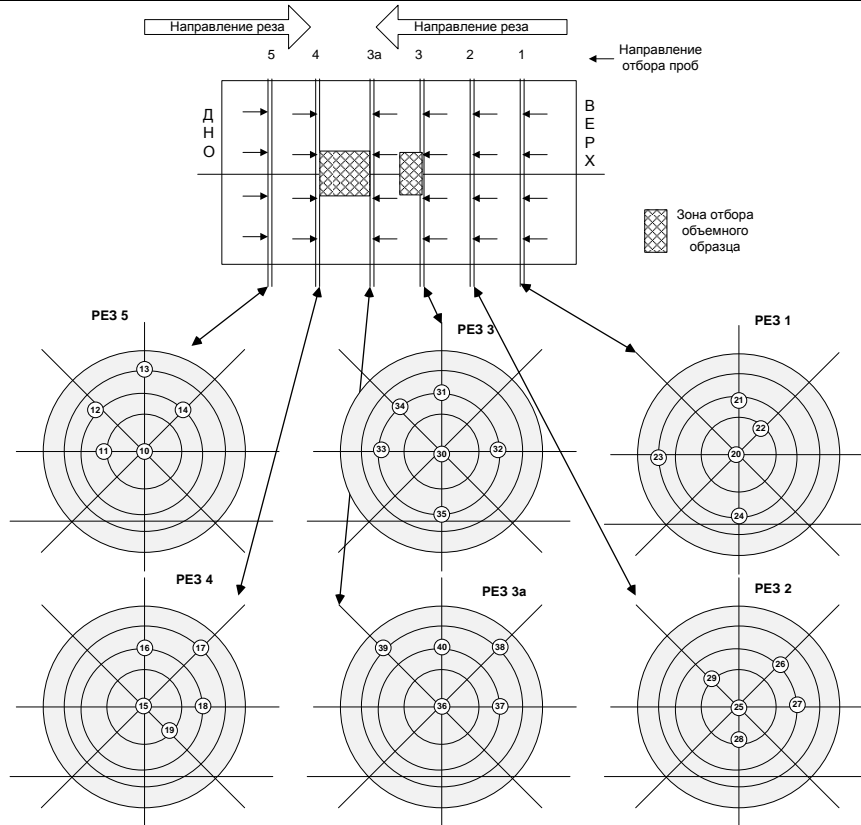


Рис. 2. Схема разделки крицы губчатого титана для отбора проб

Лабораторные эксперименты, проведенные в ИФТТ по переплавке отобранных из центральной «чистой» зоны крицы образцов титановой губки в металлические образцы методами электронно-лучевой плавки с последующей очисткой методом зонной плавки и вакуумной левитации показали, что достигнутые в титановой губке сверхнизкие уровни U и Th могут быть сохранены. Так же было показано, что применение ВЧ вакуумной левитации приводит к снижению концентрации U от 0.8 ppb до < 0.04 ppb [10].

Выводы

Предложено решение проблемы создания больших объемов низкофонового титана для применения в микроэлектронике и в качестве перспективного низкофонового конструкционного материала с использованием стандартных промышленных металлургических технологических процессов и последующим применением специальных химико-кристаллизационных и вакуумно-металлургических методов очистки тугоплавких металлов. Экспериментально подтверждено, что требуемые уровни содержания радиоактивных примесей на уровне 1 мБк/кг могут быть достигнуты при производстве титановой губки методом магнетермии с последующей вакуумной сепарацией. Также подтверждено, что электронно-лучевой переплав с последующей зонной плавкой позволяют сохранить достигнутую на стадии производства губки чистоту относительно содержания урана и тория.

Благодаря доминирующей позиции Российской титановой промышленности в мире российские ученые обладают уникальной возможностью для разработки уникального низкофонового титана и титановых конструкционных сплавов на его основе в кооперации с титановой промышленностью. Российский низкофоновый титан укрепит позиции российских ученых и российских научно-исследовательских институтов в этой важной и новой области науки. Низкофоновый титан станет важным и востребованным вкладом России в международных проектах по проектированию, созданию и эксплуатации низкофоновых детекторов.

Литература

1. <http://appec.org/infrastructures.html>
2. Копылов А.В., Черезовский В.И. Естественная радиоактивность конструкционных материалов. ИЯИ АН СССР, П-0604, (1989).
3. BOREXINO Collaboration, Measurements of extremely low radioactivity levels in BOREXINO. Astroparticle Physics, 2002, v. 18, Issue 1, P. 1–25.

4. Akimov D.Yu., Alner G.J., Araújo H.M. et al. The ZEPLIN-III dark matter detector: Instrument design, manufacture and commissioning, *Astroparticle Physics*, 2007, v. 27, Issue 1, P. 46–60.
5. Aprile E. et al. (XENON100 Collaboration) First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, v. 105, 131302.
6. Akerib D.S. et al. *Astroparticle Physics*, 2014, v. 62, P. 33-44; Table 2 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2014.07.009>)
7. Akimov D.Yu. et al 2013 *JINST* 8 P10023. doi:10.1088/1748-0221/8/10/P10023
8. Cherpurnov A., Nisi S., di Vacri M.L., Suvorov Y. The ultra-pure Ti for the low background experiments AIP Conference Proceedings, 2013, v. 1549(1), p. 161-164; LRT 2013: 4.; DOI:10.1063/1.4818099
9. Червоний И.Ф., Масленников А.Н., Сорокина Л.В., Иващенко В.И. Примесные элементы в поверхностных слоях блока губчатого титана. Междунар. конф. «Ti-2008 в СНГ», 18-21 мая 2008 г., Санкт-Петербург: Сборник трудов. Киев: НАН Украины, Ин-т металлофизики, 2008. – С. 183-186.
10. Mozhevitina E., Cherpurnov A., Chub A., Avetisov I., Glebovsky V., Nisi S., di Vacri M.L., Suvorov Y. Study of the Kroll-process to produce Ultra-pure Ti for the Low Background Experiments AIP Conference Proceedings, 2015, v. 1672; p. 050001-1 – 050001-6; LRT 2015: 4.; DOI: 10.1063/1.4927986
11. Глебовский В.Г., Штинов Е.Д., Сидоров Н.С.. Исследование процессов получения высокочистого молибдена. Перспективные материалы, 2011, №11, с.11.
12. Sidorov N.S., Glebovsky V.G., Stinov E.D.. Refining of nickel by chemical–solidification methods. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, №7, p.610-615.
13. Штинов Е.Д., Сидоров Н.С., Глебовский В.Г., Карандашев В.К.. Комбинированная очистка титана. *Металлы*, 2004, № 6, с.49-53.

ULTRA HIGH PURITY TITANIUM FOR MICROELECTRONICS AND LOW BACKGROUND DETECTORS OF NEXT GENERATION

A.S. Cherpurnov¹, V.G. Glebovsky², A.V. Chub³,
I.Ch. Avetisov⁴, E.N. Mozhevitina⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

² Institute of Solid State Physics of RAS

³ JSC “Solikamsk Magnesium Plant”

⁴ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Development of technologies for production of ultra high purity (UHP) refractory metals is important for current and future microelectronic manufacturing cycles with increasing demands concerning radioactive impurities. In addition, future detectors for low background experiments are expected to be important consumers of UHP low background construction materials in the near future. An expected need for construction materials with a very low contamination level (below ~1 mBq/kg of U and Th) is over dozens of tons per one detector. The presented research was focused on a developing of an industrial-scale production cycle of the UHP low background Ti. It is confirmed experimentally that an industrial Kroll process could be used for the UHP Ti sponge production with a residual U/Th contaminations less than the *ppb* level. To achieve and keep an original radiopurity of Ti sponge, a technological complex of the vacuum-metallurgical and chemical-solidification techniques has been developed (the e-beam multi-melting, e-beam floating multi-zone melting, HF levitation melting, chemical purification, and cold plastic deformation).

РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВКИ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ III-N ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

к.ф.-м.н. Цацульников А.Ф.¹, к.ф.-м.н. Лундин В.В.¹, к.ф.-м.н. Заварин Е.Е.¹,
к.ф.-м.н. Сахаров А.В.¹, член-корр. РАН Устинов В.М.¹, к.ф.-м.н. Мизеров М.Н.²,
к.ф.-м.н. Земляков В.Е.^{3,4}, Волков В.В.⁴, Великовский Л.Э.⁵

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

² НТЦ Микроэлектроники РАН

³ Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

⁴ ЗАО «Светлана-Электронприбор», Санкт-Петербург

⁵ ЗАО «НПФ «Микран»», Томск

Эпитаксиальный рост гетероструктур на основе нитрида галлия является ключевой технологией, позволяющей производить ряд СВЧ-транзисторов, МИС и светодиодов видимого и УФ диапазонов. Уникальность текущей ситуации на рынке эпитаксиального оборудования в мире состоит в том, что ведущие производители при разработке новых серий установок МОС-гидридной эпитаксии (являющейся основным методом производства эпитаксиальных пластин) учитывают только потребности крупных промышленных компаний, как основных покупателей. Линейка номенклатуры установок эпитаксиального роста является очень узкой, и фактически разработку технологии эпитаксии новых структур и оптимизацию уже существующей технологии необходимо проводить на промышленном оборудовании максимального размера, что могут позволить себе только очень крупные корпорации (OSRAM, CREE, Samsung...). Данная ситуация характерна для всего мира за исключением Японии, которая является традиционно закрытым рынком и информация об используемом оборудовании явно недостаточна. За последние 15-20 лет сменилось 5-6 поколений реакторов (темпы смены нарастают). Каждое последующее позволяло получать более совершенные материалы и приборные структуры. Однако, драйвером развития установок является рынок синих светодиодов и оно идет по пути «больше подложек в реакторе, чем у конкурента» (Рис. 1).

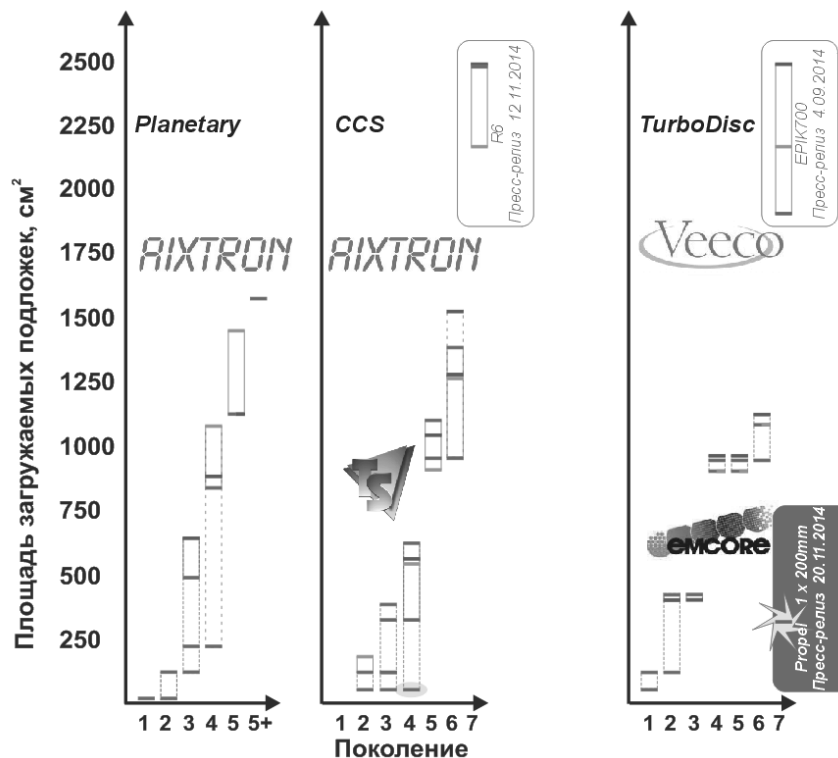


Рис. 1. Эволюция емкости реакторов AIXTRON и Veeco (до 2004 - Emcore) для МОС-гидридной эпитаксии III-N материалов в интервале 1995 – 2015 гг.

(* Поколения обозначены условно, так как соответствуют появлению принципиально значимых новых конструкторских решений, могут не совпадать по годам для различных типов реакторов и не всегда соответствуют маркетинговым обозначениям.)

От поколения к поколению с 1995 года постоянно оптимизируется дизайн реакторов, повышается совершенство материала и приборных структур. Увеличиваются как максимальные размеры реакторов в пределах поколения (с 6 до 120 подложек 2"), так и минимальные размеры реакторов в пределах поколения (с 1 подложки 2" до 1 подложки 200 мм). Однако, для эффективной разработки технологии и организации мелко- и среднесерийного производства (несколько тысяч эпитаксиальных пластин в год), которое, например, характерно для России для вертикально-интегрированных компаний, работающих в области производства СВЧ транзисторов и светодиодов на основе нитрида галлия, необходима разработка и производство семейства МОС-гидридных установок с ограниченным размером реактора. При этом наиболее важно, что данное семейство должно иметь общие принципы функционирования, позволяющих легко переносить технологию.

Группой авторов был разработан российский экспериментальный образец установки МОС-гидридной эпитаксии для мелкосерийного и опытного производства гетероструктур на основе соединений нитрида галлия (Рис. 2), который позволяет проводить процессы на подложках размером 2"-4".

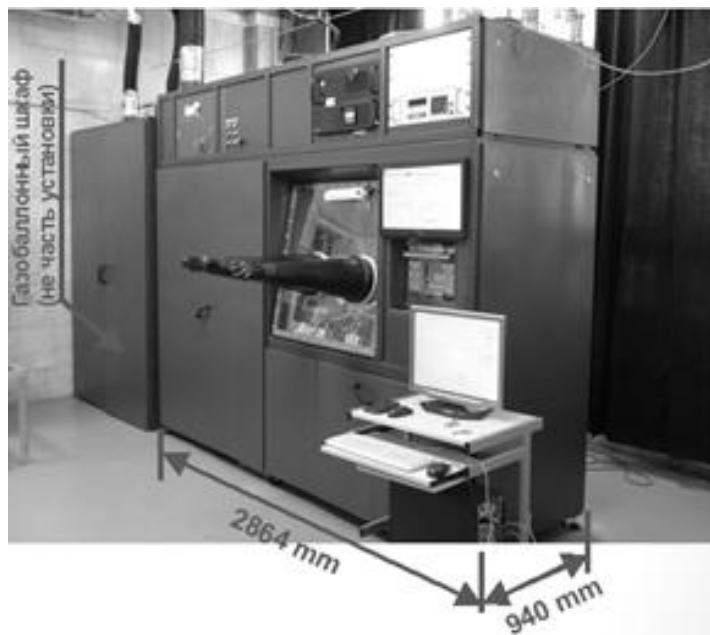


Рис. 2. Установка МОС-гидридной эпитаксии для мелкосерийного и опытного производства наногетероструктур

Данная установка имеет следующие характерные особенности. Давление в реакторе изменяется в диапазоне 100 – 1600 мбар, то есть установка позволяет работать при давлении выше атмосферного, что невозможно в коммерчески доступных установках. Также данная система самая компактная по сравнению с коммерчески доступными. Установка обладает горизонтальным реактором, металлическим корпусом реактора и индукционным нагревом. Диаметр зоны осаждения составляет 125 мм (3*2" или 1*4"). Установка оснащена собственной системой контроля эпитаксиального процесса, включающей 3 *in-situ* датчика отражения (для контроля скорости роста и кривизны подложки). Используется собственное программное обеспечение.

На данной установке в настоящее время проводится комплекс работ по оптимизации технологии эпитаксиального роста гетероструктур для светодиодов и транзисторов на подложках сапфира, карбида кремния и кремния.

В результате проведенных экспериментов были выращены гетероструктуры для НЕМТ транзисторов на подложках сапфира, карбида кремния и кремния. Для гетероструктур на подложках сапфира была получена подвижность более $1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации в канале $1.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Среднеквадратичное отклонение проводимости по подложке составило 1-3%, среднеквадратичное отклонение толщины 3-4% при полной толщине структуры 2.7 микрона. На подложках кремния была достигнута подвижность более $1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации в канале $1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На подложках карбида кремния была достигнута подвижность более $2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации в канале $1.3-1.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Эффективности излучения светодиодных гетероструктур синего диапазона, выращенных на подложках сапфира размером 2 и 4", показали результаты, совпадающие с результатами, полученными ранее на коммерческой установке АХ2000НТ, и демонстрирующие внутреннюю квантовую эффективность в синем диапазоне более 70%. Светодиодные гетероструктуры, выращенные на подложках кремния,

показали эффективность фотолюминесценции и вольт-амперные характеристики, аналогичные структурам, выращенным на подложках сапфира.

Проведенные эксперименты показали, что при оптимизированных технологических условиях время эпитаксиального процесса на разработанной установке для светодиодных гетероструктур на подложке сапфира и НЕМТ гетероструктур на подложках кремния составляет 2 часа 30 мин. – 2 часа 45 мин., а для НЕМТ гетероструктур на подложке SiC - ~ 2 часа, что значительно меньше длительности эпитаксиального процесса на коммерчески доступном оборудовании

Разработка технологии эпитаксиального роста гетероструктур для НЕМТ транзисторов осуществляется на подложках карбида кремния как импортного, так и российского производства. В качестве российских подложек использовалась продукция компании ЗАО «Светлана-Электронприбор» (С.-Петербург), которая организовала полный цикл производства подложек изолирующего SiC. На Рис. 3 приведены карты слоевого сопротивления гетероструктур НЕМТ транзисторов на подложках SiC размером 2 и 3 дюйма. Как видно из приведенных данных, слоевое сопротивление НЕМТ гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN составляет 270-300 Ом.кв со среднеквадратичным отклонением 1-2% на подложках карбида кремния как от стороннего коммерческого производителя, так и российского производства, что находится на хорошем современном уровне. На транзисторах, изготовленных из структур, выращенных на отечественных подложках, достигнута выходная мощность 9 Вт на частоте 3 ГГц (Рис. 4).

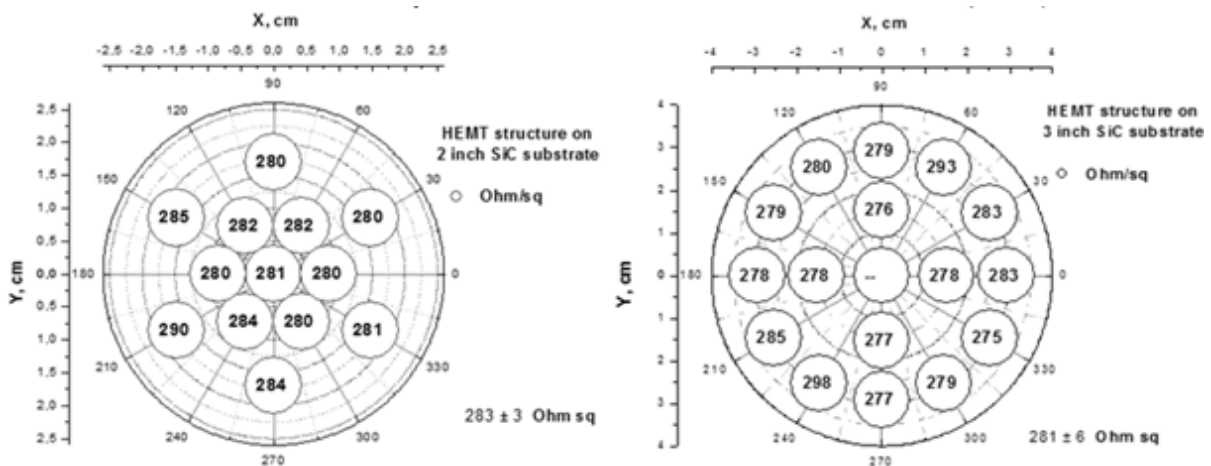


Рис. 3. Карты слоевого сопротивления транзисторных структур
а) сторонний производитель, размер 2 дюйма, б) российский производитель, размер 3 дюйма

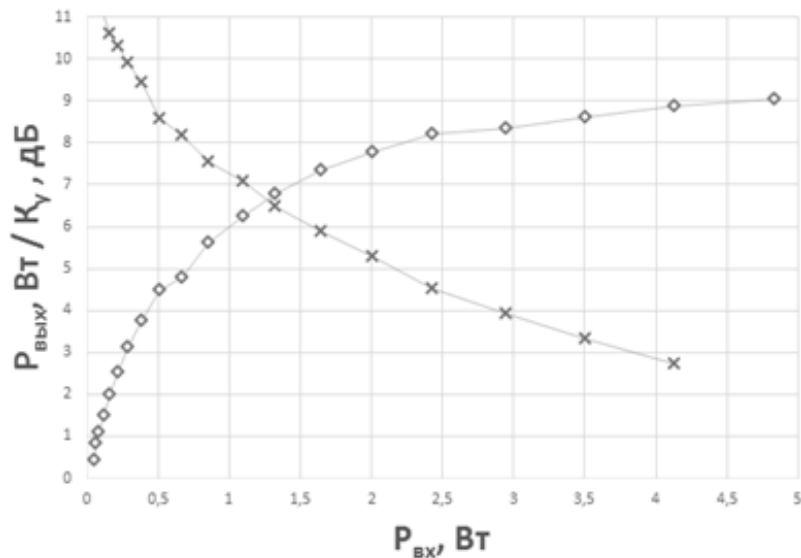
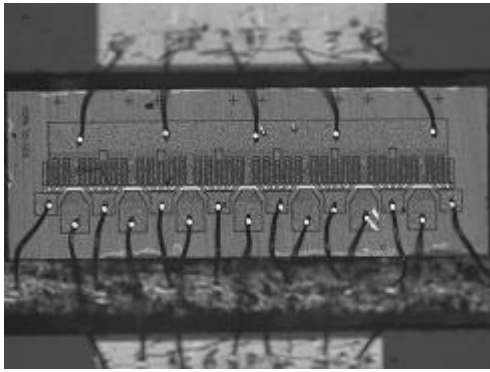
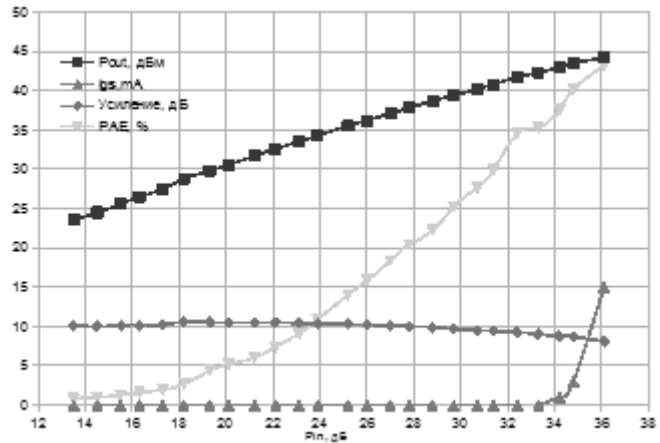


Рис. 4. Выходная мощность и коэффициент усиления транзистора с шириной затвора 3600 мкм

В НПФ Микран из гетероструктур на подложках карбида кремния были созданы транзисторы для диапазона частот 2.4 ГГц, имеющие в импульсном режиме выходную мощность 36 Вт, при плотности мощности 4 Вт/мм и КПД 34% (Рис.5).



(a)



(b)

Рис. 5. Внешний вид транзисторов в оснастке для СВЧ измерений (а). Динамические характеристики транзистора с периферией затвора 10.5 мм при импульсном СВЧ сигнале ($F=2.5$ ГГц, $V_{ds}=28$ В, $V_{gs}=-4$ В, длительность импульса 20 мкс, скважность 50) (b).

Такие параметры позволяют рассчитывать, при дальнейшем совершенствовании конструкции и технологии, на получение СВЧ параметров на уровне современных зарубежных аналогов.

Таким образом, в результате работ была создана российская установка МОС-гидридной эпитаксии позволяющая изготавливать различные типы гетероструктур на основе нитрида галлия для оптоэлектроники и электроники. Использование решений, заложенных при разработке данной установке, позволит в перспективе расширить типоразмеры установок, от существующей на данный момент установки с размером зоны осаждения 150 мм до установок с размером зоны осаждения 200 мм и более. Разработанная концепция модульной газовой схемы позволяет создавать установки в различной комплектации - от простейшей, предназначенной для роста структур GaN/AlN при атмосферном давлении до промышленной установки по росту оптоэлектронных структур.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003).

DEVELOPMENT OF THE MOCVD SYSTEM FOR GROWTH OF III-N HETEROSTRUCTURES FOR PILOT PRODUCTION

A.F. Tsatsulnikov¹, W.V. Lundin¹, E.E. Zavarin¹,
A.V. Sakharov¹, V.M. Ustinov¹, M.N. Mizerov²,
V.E. Zemlyakov³, V.V. Volkov⁴, L.E. Velikovskiy⁵

¹The Ioffe Institute of RAS

²Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center RAS

³National Research University of Electronic Technology

⁴JSC «Svetlana-Electronpribor», St Petersburg

⁵JSC «Research and production company «Micran»», Tomsk

Russian MOCVD system, allowing manufacturing different types of GaN based heterostructures for optoelectronics and electronics was developed and fabricated. Heterostructure for HEMT transistors on sapphire, SiC and silicon heterostructure substrates as well as LED structures on sapphire substrates with parameters corresponding to the world level were grown on this system. Optimization of reactor design and growth conditions allow significantly reducing the time of the epitaxial process in compared to commercial available growth systems. Solutions incorporated in the design of this growth system, will allow expanding sizes of the reactor from the existing size of the deposition zone of 150 mm to 200 mm or more.

ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ТРЕХХЛОРИСТОГО МЫШЬЯКА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

д.х.н. Родченков¹ В. И., к.х.н. Котков² А.П., Исаев² Д. В.

¹ Институт прикладной физики РАН

² ОАО «НПП «Салют»

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка технологий получения хлоридов и гидридов кремния, мышьяка и фосфора». Цель НИР: разработка технологии получения и очистки хлоридов кремния квалификации 99,99994 и мышьяка квалификации 99,9999 и организация их выпуска в обеспечение производства эпитаксиальных слоев Si и GaAs. Требования, предъявляемые согласно техническому заданию к четыреххлористому кремнию и треххлористому мышьяку, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Требования, предъявляемые к четыреххлористому кремнию

Параметр	Значение параметра
Содержание галогенуглеводородов ($C_1 - C_3$: трихлорметана – $CHCl_3$; дихлорэтана – $C_2H_4Cl_2$ и др.)	не более 1×10^{-5} вес. %
Содержание трихлорсилана ($SiHCl_3$)	не более 2×10^{-5} вес. %
Суммарное содержание металлов (Fe, Co, Ni, Cu, Mn, Ca, Mg)	не более 1×10^{-5} вес. %
Удельное сопротивление кремния, полученного из тетрахлорида кремния	более 500 Ом×см
Содержание взвешенных частиц (размером 0,08 – 1 мкм)	Не более 1×10^4 см ⁻³

Таблица 2. Требования, предъявляемые к треххлористому мышьяку

Параметр	Значение параметра
Содержание галогенуглеводородов ($C_1 - C_3$: $CHCl_3$; $C_2H_4Cl_2$ и др.)	не более 3×10^{-5} вес. %
Содержание летучих хлоридов ($SiCl_4$ и др.)	не более 5×10^{-5} вес. %
Суммарное содержание металлов (Fe, Co, Ni, Cu, Mn, Ca, Mg)	не более 5×10^{-5} вес. %



Рис. 1. Схема ректификационного комплекса для получения высокочистого тетрахлорида кремния: Д1, Д2 – дефлегматоры; КР1, КР2, КР3 – разделительные секции; И1, И2 – испарители; БЛ1 – баллон; Х1 – холодильник; С1 – промежуточная емкость; РС1 – средний питающий резервуар; РН1 – нижний куб.

Для решения поставленной задачи разработаны и построены опытные образцы эмульгационных ректификационных колонн, обеспечивших получение и фасовку в транспортно-технологическую тару высокочистых SiCl_4 и AsCl_3 . Материал установок – кварцевое стекло. Базовый элемент – разделительная секция высотой ~ 1 м с нихромовой (для четыреххлористого кремния) и танталовой (для треххлористого мышьяка) спирально-призматической насадкой $5 \times 5 \times 0,25$ мм, 40 теоретических тарелок при полной флегме.

Высокочистый тетрахлорид кремния (ТХК) получали из отходов процесса синтеза моносилана ионообменным диспропорционированием трихлорсилана (ТХС). В исходном материале содержалось до 5 % масс. нижекипящей примеси ТХС, суммарная концентрация вышекипящих примесей хлорорганических веществ составляла 0.5 – 1 % масс. В связи с этим процесс очистки производили в две стадии ректификации в режиме эмульгирования.

Схема ректификационного комплекса для получения высокочистого ТХК представлена на рис. 1.

Первая ректификация (в колонне с нижним кубом) показала, что основная часть хлорорганических веществ газохроматографически не определяется в дистилляте, т.е. не лимитирует процесс очистки. Макропримесь ТХС удалялась в режиме фракционной разгонки по температуре до уровня ~ 0.1 %; целевой продукт первой ректификации отбирался с большим флегмовым числом в промежуточную емкость С1.

Финишная ректификация проводилась в колонне со средним питающим резервуаром (СПР) в режиме одновременного дискретного отбора фракций, обогащенных выше- и нижекипящими примесями. Режим процесса рассчитывали для достижения очистки ТХК в 10^3 раз от гипотетической (выше- или нижекипящей) примеси с коэффициентом разделения $\alpha = 1,1$:

а) первичный выбег колонны [1 – 3]

$$t = \frac{1}{L} \frac{\alpha}{\alpha - 1} \left[H \left(\frac{S_0 - 1}{\ln S_0} - 1 \right) + V_k (S_0 - 1) \right] \ln(S_0 - 1)$$

$$S = \frac{X_D}{X_0} = \frac{F(V_0 + V_k + H)}{V_0 + V_k F + H \frac{F - 1}{\ln F}}, S_0 = \frac{F_0(V_0 + V_k + H)}{V_0 + V_k F_0 + H \frac{F_0 - 1}{\ln F_0}}$$

где S_0, S – соответственно, текущее и стационарное значение степени разделения; F_0, F – соответственно, текущее и стационарное значение степени разделения, V_k – объем задержки в дефлегматоре, V_0 – объем жидкости в кубе, H – объем жидкостного захвата в ректифицирующей секции, L – скорость потока жидкости в колонне, x_0 – начальное содержание примеси в кубовой загрузке, x_D – мольная доля примеси в дистилляте.

б) изменение фактора разделения при одном дискретном отборе [4]

$$F_D^* = F_D \frac{H - V_k}{H}$$

где F_D – фактор разделения в момент начала, а F_D^* – в момент окончания дискретного отбора, H – объем жидкостного захвата в ректифицирующей секции, V_k – объем дистиллята, выводимый из колонны за один отбор.

Зависимость состава продукта в СПР от числа отборов m [5]

$$x_{N_m} = \frac{V_0 x_0 - V_k F_D \sum_{i=1}^{m-1} x_{N_i}}{R_N - m V_k}$$

где $R_N = V_0 + H \left[\frac{(F_D - 1)}{\ln F_D} - 1 \right] + F_D V_k$, m – номер отбора, x_0 – начальное содержание примеси в кубовой загрузке.

Аналитически контролировалось содержание идентифицированных лимитирующих примесей (примесей-маркеров): вышекипящего тетрахлорида углерода ($\alpha_{ж} = 1,55$) и нижекипящего хлороформа ($\alpha_{п} = 1,3$).

Концентрация контролируемых примесей хлорорганических веществ была снижена с $n \cdot 10^{-4}$ % масс. до уровня, не превышающего предел обнаружения ($n \cdot 10^{-7}$ % масс.), содержание примесей металлов не превышало $n \cdot 10^{-7}$ % масс.

Целевой продукт фасовался в металлические контейнеры емкостью до 20 л, включаемые в цикл ректификации для отмывки и заполнения потоком чистого вещества.

Результаты испытаний первой опытной партии SiCl_4

Заинтересованными организациями были проведены испытания целевых свойств полученного SiCl_4 как исходного материала для микроэлектроники и волоконной оптики, а также жидкой нелинейно-активной среды в лазерной технике.

В ЗАО «Эпиэл», г. Зеленоград, с использованием ТХК выращены эпитаксиальные слои кремния электронного типа проводимости с удельным сопротивлением $2000 \div 4000$ Ом·см.

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

В ИХВВ РАН, г. Нижний Новгород, применение очищенного ТХК в процессе MCVD обеспечило получение волоконных световодов с предельно малыми оптическими потерями.

В ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, высокочистый ТХК использован в мощных лазерных системах в качестве активной среды в нелинейно-оптических элементах для компрессии лазерных импульсов и адаптивной компенсации фазовых искажений в лазерном пучке. Эти применения требуют ТХК с линейным поглощением $\alpha \approx 10^{-6} - 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 1.06 \text{ мкм}$) и содержанием взвешенных микрочастиц $d \geq 0.1 \text{ мкм}$ не более $1 - 10 \text{ см}^{-3}$. Разработанная технология обеспечила получение продукта данной чистоты.

Для получения особо чистого ТХМ в качестве исходного использовали технический хлорид мышьяка с содержанием основного компонента $\sim 95\%$ хранившийся в емкостях из нелегированной стали, представлявший собой непрозрачную жидкость черного цвета.

Газохроматографическим анализом с предварительным гидролизом основы в исходном ТХМ зафиксировали микропримеси хлорорганических соединений на уровне $n \cdot 10^{-5}\%$ масс., методом атомно-эмиссионной спектроскопии – примеси металлов на уровне $10^{-2} - 10^{-3}\%$ масс.

Процесс получения особо чистого AsCl_3 осуществляли в две стадии: на первом этапе производили загрузку хлорида простой перегонкой в нижний куб ректификационной колонны (аналогична показанной на рис. 1 колонне предварительной очистки), на втором – ректификацию.

Рассчитали и осуществили режим процесса ректификации, в котором реализуется предельная разделительная возможность ректификационной установки с сохранением приемлемой производительности (достижение очистки в 10^2 раз от выше- или нижекипящей примеси с коэффициентом разделения $\alpha = 1.25$).

Зависимость разделительной способности колонны от скорости отбора (продукта):

$$F = \frac{1 + \Theta}{(1 - p)F_0^{\frac{1+\Theta}{1-p}} + \alpha\Theta},$$

где $\Theta = \frac{p}{\alpha - 1}$, p – степень отбора.

Зависимость состава дистиллята (продукта) от доли отгона

$$\bar{x}_D = \frac{x_0 V_0}{V_D} \left[1 - \frac{\left(1 - c_1 - \frac{V_D}{V_0}\right)^F}{1 - c_1} \right],$$

где

$$c_1 = \frac{H}{V_0} \left\{ 1 - \frac{F}{1 + \Theta} \left[\frac{1 - p}{(1 + \Theta) \ln F_0} \left(1 - F_0^{\frac{1+\Theta}{1-p}} \right) + \Theta \right] \right\},$$

V_D – объем отобранного продукта.

Фракция, обогащенная легколетучими компонентами, составила $\sim 10\%$, целевая фракция – примерно 60% от загрузки. Очищенный AsCl_3 загружали в двухкрановые ампулы из стекла С51-1 емкостью 500 мл, предварительно отмытые потоком целевого дистиллята. Содержание в ректификате контролируемых примесей хлорорганических веществ – ниже предела обнаружения ($n \cdot 10^{-7}\%$ масс.), металлов – $n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-6}\%$ масс.

Результаты испытаний AsCl_3

Испытания опытной партии очищенного ТХМ в хлоридной технологии получения эпитаксиальных структур арсенида галлия в ЗАО «Элма-Малахит», г. Зеленоград, показали, что изготовленный особо чистый треххлористый мышьяк обеспечивает необходимый уровень параметров нелегированных эпитаксиальных слоев арсенида галлия: концентрация носителей заряда – $(1 - 5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$; подвижность носителей $> 100000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 77 К.

Выводы

Характеристики опытных партий хлоридов кремния и мышьяка по примесному составу соответствуют требованиям потребителей.

Результаты целевых испытаний в заинтересованных организациях положительные.

Литература

1. Бабков С.И., Жаворонков Н.М., Кинетика многоступенчатых процессов разделения бинарных смесей. Скорость приближения к стационарному состоянию. – Докл. АН СССР, 1956, т. 106, № 5, с. 877 – 880.

2. Стрельцов Л.В., Зельвенский Я.Д., Жаворонков Н.М. Уравнение нестационарного процесса ректификации с полным возвратом флегмы и периодическим отбором из куба. – Теор. основы хим. технологии, 1968, т. 2, № 6, с. 863 – 868.
3. Стрельцов Л.В., Жаворонков Н.М., Зельвенский Я.Д. Расчет замкнутой схемы ректификации при любых концентрациях продукта. – Теор. основы хим. технологии, 1969, т. 3, № 2, с. 302 – 304.
4. Девярых Г.Г., Родченков В.И., Мурский Г.Л., Качемцев А.Н., Дозоров В.А., Сахаров А.Н., Влияние способа отбора на эффективность процесса ректификации. – Докл. АН СССР, 1983, т. 273, № 2, с. 397-400.
5. Еллиев Ю. Е., Щеплягин Е. М., Глубокая очистка веществ периодической ректификацией путем концентрирования примесей с дискретным отбором концентрата. – В сб.: Получение и анализ чистых веществ. Горьк. гос. ун-т, 1980, с. 25 – 27.

HIGH PURIFICATION OF SILICON TETRACHLORIDE AND ARSENIC TRICHLORIDE FOR MICROELECTRONICS BY BATCH RECTIFICATION

V.I. Rodchenkov¹, A.P. Kotkov², D. V. Isayev²

¹ Institute of Applied Physics of RAS

² JSC "NPP "Salut", Nizhny Novgorod

The prototypes of high-pure materials with the total purity level suitable for applications in microelectronics (SiCl_4 , AsCl_3), fiber optics (SiCl_4) and nonlinear adaptive optics (SiCl_4), were obtained by the method of periodic rectification emulsification mode in quartz columns with an irregular filling of technical raw materials. Testing of the electrophysical and optical characteristics of the products received from these chlorides in the interested organizations yielded the positive results.

МАГНЕТРОННО-ИНЖЕКТОРНЫЕ ПУШКИ ДЛЯ ГИРОТРОНОВ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ И ДВУХЗЕРКАЛЬНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Кунцевич А.Д., Лещева К.А., д.ф.-м.н. Мануилов В.Н.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Введение

Гиротроны [1, 2], занимающие среди источников электромагнитного излучения лидирующие позиции по мощности и длительности импульса в диапазоне длин волн 0.3-10 мм (30 ГГц – 1 ТГц), основаны на когерентном излучении ансамбля классических электронов-осцилляторов в виде винтового электронного пучка (ВЭП). Наиболее часто для формирования ВЭП используется адиабатическая аксиально-симметричная магнетронно-инжекторная электронная пушка (МИП). Основным требованием к МИП является формирование устойчивого ВЭП с большим питч-фактором g (отношением скорости вращения электронов к скорости их продольного движения) при умеренной величине разброса вращательных скоростей δv_{\perp} . Скоростной разброс в МИП формируется за счет целого ряда факторов (см. например [2]). Поскольку МИП работает в режиме температурного ограничения эмиссии, часто встречается ситуация, когда вследствие особенностей конструкции подогревателя эмиттера, участки катода с разным азимутом имеют разную температуру, что приводит к азимутальной неоднородности плотности тока эмиссии, зависимости кулоновского поля пучка от азимута и соответствующему увеличению скоростного разброса. Кроме того, ряд перспективных электродинамических систем гиротронов требует использования ВЭП с нарушенной осевой симметрией, когда эмитируют лишь отдельные азимутально ограниченные участки катода. В частности, это имеет место при использовании двухзеркальных разрезных резонаторов в гиротроне. В обоих случаях необходимо исследование возмущения скоростного распределения, вносимого указанным нарушением аксиальной симметрии. Однако до последнего времени такие исследования ограничивались лишь экспериментальными измерениями азимутального распределения тока эмиссии для ряда гиротронов миллиметрового диапазона длин волн и изучением корреляции этой величины с выходными параметрами гиротрона (мощность, КПД). В частности, в [3] было показано, что нарушение аксиальной симметрии может приводить к значительному снижению КПД гиротрона и ухудшению устойчивости ВЭП. Теоретический анализ ВЭП до сих пор осуществлялся только в рамках двумерных численных моделей, предполагающих аксиальную симметрию распределения плотности тока $j(\varphi)$ [4-5]. Здесь φ – азимутальная координата.

**Численное моделирование магнетронно-инжекторных пушек
гиротронов с эллиптическими и двухзеркальными резонаторами**

Разработка в последнее десятилетие эффективных пакетов прикладных программ трехмерного моделирования, среди которых выделяется комплекс CST Studio Suite [6], позволила поставить в практическую плоскость решение задачи по численному расчету МИП гиротронов в трехмерной постановке с учетом зависимости $j(\varphi)$. Моделирование проводилось методом трубок тока в рамках модели с нулевыми скоростями стартующих с катода частиц. Поскольку для гиротронов характерно большое значение фокусирующего магнитного поля, то при индукциях $B(z_f) > B_0/(2-3)$ электронный пучок оказывается «вмороженным» в магнитное поле и далее с высокой степенью точности справедлива адиабатическая теория движения частиц (см. [2, 5]). Здесь B_0 – индукция в резонаторе гиротрона. Поэтому траектории частиц рассчитывались только до плоскости $z=z_f$, а далее осцилляторные скорости пересчитывались в рабочее пространство гиротрона с помощью закона сохранения поперечного адиабатического инварианта.

Отметим, что специфика параметров МИП требует специального постпроцессора для обработки полученных с помощью комплекса CST Studio Suite данных траекторного анализа. В докладе развита методика такой обработки, позволяющая определить величины среднего питч-фактора g , скоростного разброса, а также построить функцию распределения по осцилляторным скоростям как для всего пучка в целом, так и для отдельных фракций электронного пучка, отличающихся азимутальным углом φ . По известным в плоскости $z=z_f$, значениям компонент скоростей v_x, v_y, v_z , компонент индукции B_x, B_y, B_z и потенциалу U_i в последней точке i -ой траектории находятся релятивистский γ -фактор и полная скорость электронов

$$\gamma_i = 1 + \frac{e_0 U_i}{m_0 c^2}, \quad v_i = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_i^2}} \quad (1)$$

а также скорость электрона вдоль магнитного поля и его осцилляторная скорость

$$v_{\parallel i} = \frac{v_x B_x + v_y B_y + v_z B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} = \frac{(\vec{v} \vec{B})}{B} \quad (2)$$

$$v_{\perp i} = \sqrt{v_i^2 - v_{\parallel i}^2} \quad (3)$$

Далее, из условия сохранения поперечного адиабатического инварианта последняя величина пересчитывается в рабочее пространство как

$$v_{\perp i0} = \sqrt{\frac{B_i}{B_0}} v_{\perp i}, \quad (4)$$

где вычисляется средняя осцилляторная скорость (I_i – ток i -ой трубки тока)

$$\overline{v_{\perp}} = \frac{\sum I_i v_{\perp i}}{\sum I_i} \quad (5)$$

и питч-фактор

$$g = \frac{\overline{v_{\perp}}}{\sqrt{v^2 - v_{\perp}^2}} \quad (6)$$

Величина полной скорости определяется из закона сохранения энергии:

$$\gamma = 1 + \frac{e_0 U_0}{m_0 c^2} \quad (7)$$

$$v^2 = c^2 \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right). \quad (8)$$

Здесь U_0 – потенциал пучка относительно катода в резонаторе гиротрона.

Зная токи I_i и скорости $v_{\perp i}$ легко сосчитать и функцию распределения по осцилляторным скоростям и далее определить скоростной разброс δv_{\perp} , который ниже вычислялся как

$$\delta v_{\perp} = \frac{v_{\perp \max} - v_{\perp \min}}{v_{\perp}} \quad (9)$$

Здесь $v_{\perp \max}, v_{\perp \min}$ – соответственно максимальная и минимальная осцилляторные скорости в ВЭП.

В качестве простейшего примера приведены результаты сравнения характеристик пучка, формируемого МИП гиротрона с рабочим магнитным полем 3.4 кГс, ускоряющим напряжением 16 кВ и током пучка, меняющимся в пределах от 0.1 до 0.3 от Ленгмюровского тока МИП. Выполнено сравнение

параметров пучков для трех случаев: $j(\varphi)=\text{const}$, $j(\varphi)=j_0+j_1\cos(\varphi)$ и случая, когда эмитируют 2 участка катода, сдвинутые по азимуту на 180 градусов (рис.2). Для каждого из рассмотренных случаев построены карты плотности электронного потока в различных поперечных сечениях пучка.

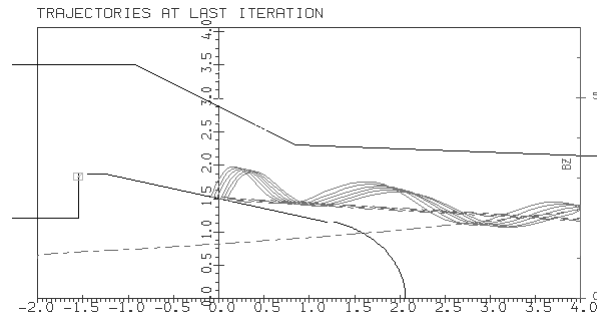


Рис. 1. Геометрия МИП и электронные траектории в прикатодной области

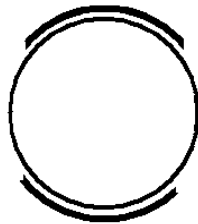


Рис. 2. Распределение тока эмиссии. Секторами отмечены эмитирующие участки катода МИП

Заключение

Развита методика численного моделирования МИП гиротронов с нарушенной аксиальной симметрией распределения плотности тока. Представлены данные сравнительного анализа скоростных распределений пучка и профилей пучка в поперечной плоскости для различных распределений плотности тока эмиссии вдоль поверхности катода.

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. G.S.Nusonovich. Introduction to the Physics of Gyrotrons, John Hopkins University press, 2004, 352 p.
2. Tsimring Sh.E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Wiley-Interscience, 2007, 573 p.
3. Louksha O., Pioszyk B., Sominski G. et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron // IEEE Trans.Plasma Science. 2006. Vol. 34. N 3. P. 502–511.
4. Hermannsfeldt W.B. Electron trajectory program // SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979. 119 p.
5. P.V. Krivosheev, V.K.Lygin, V.N. Manuilov, Sh.E.Tsimring. Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams. Int. J. of Infrared and MM waves. 2001, vol.22, No 8, pp.1119-1146.
6. <https://www.cst.com/>

MAGNETRON INJECTION GUNS FOR GYROTRONS WITH ELLIPTICAL AND TWO-MIRROR RESONATORS

K.A. Leshcheva, A. D. Kuntsevich, V.N. Manuilov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The method of calculation of the gyrotron helical electron beams (HEB) parameters in the magnetron-injection guns with violation of axial symmetry of the cathode current density is presented. Such HEBs can be used in the gyrotrons with high-selective elliptical and two-mirror cavities. Comparison of the HEB parameters with different types of violation of axial symmetry of current density is carried out.

НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЧ- И ЛАЗЕРНЫХ АВТОДИНОВ

д.ф.-м.н. Усанов Д.А., д.ф.-м.н. Скрипаль Ал.В., д.ф.-м.н. Скрипаль Ан.В.

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

К числу физических явлений, использование которых позволяет создать устройства, допускающие совмещение различных радиотехнических функций, относится открытый в феврале 1922 года нашим соотечественником О.В. Лосевым эффект автодинного детектирования [1]. Сотрудник Нижегородской радиолaborатории О.В. Лосев использовал полупроводниковый кристаллический диод на основе цинкита (ZnO), обладавший падающим участком на вольтамперной характеристике, в качестве активного элемента [2]. Эффект автодинного детектирования детально изучался в СВЧ-приборах вакуумной электроники [3]. К числу первых работ, в которых экспериментально исследовался аналогичный эффект в приборах полупроводниковой СВЧ-электроники, можно отнести работу [4]. В них приведены результаты исследований возможности проявления этого эффекта в СВЧ-генераторах на диодах Ганна. Эффект автодинного детектирования экспериментально был исследован также в СВЧ-усилителях на диодах Ганна [5]. Устройства, в основе работы которых лежит эффект автодинного детектирования отличаются конструктивной простотой, малогабаритностью и высокой чувствительностью. Вследствие этого они находят широкое применение для решения различных задач метрологии, контроля технологических процессов, ближней локации и других целей. Выделенный сигнал регистрируется либо в цепи питания СВЧ-генератора, либо внешним детектором, на который отвечает часть генерируемой СВЧ-мощности. СВЧ-генераторы и полупроводниковые лазерные диоды, работающие в режиме автодинного детектирования, могут быть использованы для контроля параметров технологических процессов [6, 7], для измерения перемещений, скоростей, ускорений, направления движения движущихся объектов, скорости течения жидкости, потока крови и движения глаз, фотопроводимости, химического состава веществ, влажности, проводимости, диэлектрической проницаемости, толщины слоев металлодиэлектрических структур [8–11].

Одной из новых областей применения эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах является ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия. Ближнеполевая СВЧ-сканирующая микроскопия относится к современным методам контроля структур твердотельной микро- и нанoeлектроники. Этот вид микроскопии имеет ряд преимуществ, среди которых – отсутствие квантовых эффектов поглощения излучения веществом исследуемого объекта, прозрачность в СВЧ-диапазоне многих оптически непрозрачных веществ. Данный вид микроскопии особенно предпочтителен при отладке технологии производства микроэлектронных устройств, предназначенных для использования именно в СВЧ-диапазоне, так как параметры материалов и структур измеряются на тех же частотах, на которых они будут использоваться [12, 13]. В приложении к задачам подповерхностного зондирования диапазон СВЧ обладает несомненным преимуществом перед оптическими и инфракрасными волнами благодаря сравнительно высокой проникающей способности СВЧ-излучения внутрь многих сред.

Основным элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающим его высокую чувствительность и разрешающую способность, авторы [12] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор. По изменению характеристик резонатора (резонансной частоты и добротности) в процессе сканирования исследуемого образца можно судить о его топологии и изменении свойств материала подложки от точки к точке. В работе [14] показана возможность создания СВЧ-резонаторов на основе так называемых низкоразмерных резонансных систем и обнаружена их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям. Резонансы в таких системах объяснены возбуждением в них высших типов колебаний. Так как один из размеров такого рода резонаторов намного меньше длины волны основного типа, они были названы "низкоразмерными". Вносимое в низкоразмерный резонатор малое возмущение, изменяющее его электрическую длину, приводит к значительному изменению его характеристик. При непосредственном подключении зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа к СВЧ-генератору без использования элементов развязки может быть создана автодинная система, в которой реализуется, так называемый, эффект автодинного детектирования [15]. Применение эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для контроля параметров материалов основано на установлении зависимостей величины продетектированного сигнала от параметров контролируемых образцов, например, толщины, диэлектрической проницаемости, электропроводности [16].

Если поверхность образца обладает рельефом, или образец является неоднородным по своим электрофизическим характеристикам (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), то при перемещении зонда вдоль поверхности образца изменяется амплитуда и фаза отражённой электромагнитной волны и тем самым изменяется величина сигнала, фиксируемого детекторным диодом. При сканировании исследуемого образца сигнал с детекторного диода через АЦП передавался в

компьютер, где с помощью специального программного обеспечения с учётом величины сигналов, управляющих линейными трансляторами, формировался трёхмерный массив данных, позволяющий получить графическое представление свойств исследуемого образца.



Рис. 1. Фотография пластины с юбилейным знаком СГУ, фрагмент которого покрыт слоем графита

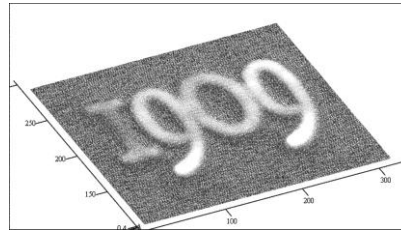


Рис. 2. Результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита

Для демонстрации возможности применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна к задачам подповерхностного зондирования была использована керамическая пластины с изображением юбилейного знака Саратовского государственного университета, покрытым слоем графита толщиной 0,8 мкм и удельной электропроводностью $103 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Фотография пластины с юбилейным знаком Саратовского государственного университета, фрагмент которого покрыт слоем графита, приведена на рис. 1. На рис. 2 приведены результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита, с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Шаг сканирования составлял 2,0 мкм по обоим направлениям в плоскости образца. Как следует из результатов, представленных на рис. 1 и рис. 2, трудноразрешимая в оптическом диапазоне длин волн задача подповерхностного зондирования может быть успешно решена с использованием метода ближнеполевой СВЧ-микроскопии.

СВЧ-микроскоп был использован для измерения распределения поля и концентрации носителей заряда в диодах Ганна (см. рис. 3, 4). В результате была впервые установлена возможность существования в таких диодах стационарного многодоменного режима, что позволяет по-новому объяснить физику их работы [17].

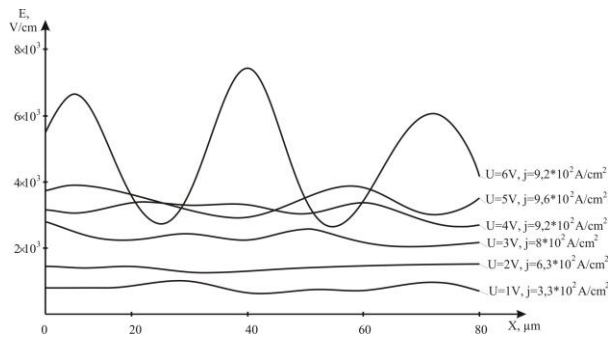


Рис. 3. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла диода Ганна

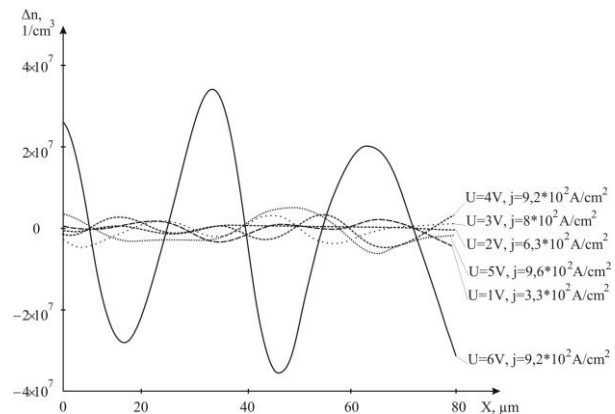


Рис. 4. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна

С помощью созданного ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа было проведено измерение стационарных распределений напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в СВЧ p-i-n диоде при прямом смещении для различных значений плотности тока через диод [18]. Результаты измерений $|R|(x)$ приведены на рис. 5. Из этих результатов следует, что, начиная с определенных значений j , наблюдается возникновение пространственных пульсаций характеристик диода. Результаты проведенного численного моделирования коррелируют с результатами эксперимента.

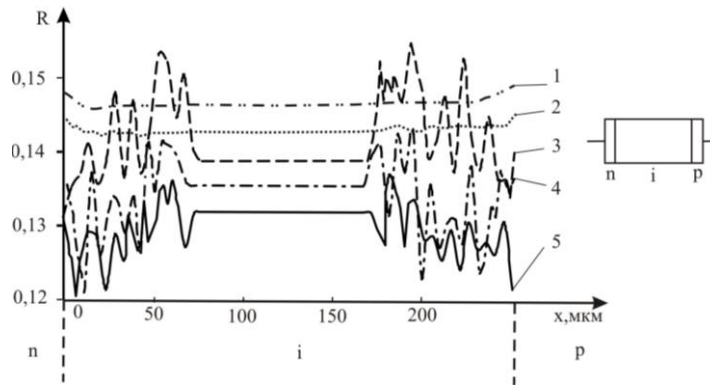


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования при различных плотностях тока: 1 – $j=0$ А/см², 2 – $j=0.63 \cdot 10^2$ А/см², 3 – $j=1.89 \cdot 10^2$ А/см², 4 – $j=3.15 \cdot 10^2$ А/см², 5 – $j=5.04 \cdot 10^2$ А/см²

Для измерения параметров движения объектов при микро и наносмещениях широкое распространение получили методы, основанные на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах [10, 19]. Автодинные измерительные системы, созданные на основе этого эффекта, по сравнению с интерференционными системами обладают уменьшенными габаритами, весом, низким энергопотреблением.

Следует учесть, что автодинный сигнал не всегда предоставляет исключительно характеристики исследуемого процесса, поскольку результаты измерений сильно зависят от параметров внешней оптической обратной связи, что требует применения сложных расчетов, учета возможности получения неоднозначности в определении искоемых параметров и выбора адекватной модели.

Одним из преимуществ лазерной автодинной системы на полупроводниковом лазере является возможность создания систем измерения микровибраций и перемещений методом, основанным на сравнении с длиной волны излучения лазера. Если же величина смещения существенно меньше длины волны лазерного излучения, то можно применить метод, основанный на возбуждении дополнительных колебаний с известными характеристиками [20], или использовать модуляцию длины волны излучения полупроводникового лазера, которая, в свою очередь, может быть достигнута, например, модуляцией тока питания лазера [21].

В настоящее время лазерные автодинные системы находят применение и для контроля нановибраций и перемещений биологических объектов. В частности, удалось применить полупроводниковый лазерный автодин для диагностики патологических состояний колебаний барабанной перепонки: определена амплитудно-частотная характеристика амплитуды колебания барабанной перепонки при различных уровнях звукового воздействия на нее, установлены различия между амплитудно-частотными зависимостями барабанной перепонки в зависимости от уровня звукового давления при патологии и в норме [22].

Другим перспективным направлением применения лазерного автодина в медицине является разработка метода регистрации внутриглазного давления, основанного на измерении микросмещений глазного яблока, возникающих под действием пневмоимпульса. При этом оценка внутриглазного давления проводится с использованием в качестве информационного параметра отношения величины прогиба и ускорения, позволяющего уменьшить ошибку измерения внутреннего давления, связанную с различной толщиной оболочки глазного яблока [23].

Лазерный автодин также был применен для контроля качества воды методом, при котором измеряется частота и амплитуда сердцебиений тест-объекта пресноводного рачка дафнии. Медицинские приложения лазерного автодина направлены на диагностику тремора глазного яблока и регистрацию формы пульсовой волны [24, 25].

Таким образом, показано, что измерения с помощью полупроводникового СВЧ-автодина в сочетании с ближнеполевой сканирующей системой позволяют существенным образом расширить представление о физике работы полупроводниковых структур, используемых в СВЧ-технике, а регистрация автодинного сигнала с помощью полупроводникового лазера открывает новые возможности в диагностике биомедицинских органов и систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

Литература

1. Лосев О.В. Детектор-генератор; детектор-усилитель // Телеграфия и телефония без проводов. 1922. № 14. С. 374–366.
2. Лосев О. В. У истоков полупроводниковой техники. Избранные труды. Л.: Наука, 1971. 203 с.

3. Алахов Е.К. Прибор на отражательном клистроне в автодинном режиме на волне 3.2 см для измерений круговых диаграмм вторичного излучения // Изв. вузов—Приборостроение. 1961 №2. С.10–13.
4. Absolute load detection with microwave Gunn oscillators / Partaind L.D., Coon W.A., Huang H.F., Goodrich .C. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1967. Vol.14, № 10. P.656–670.
5. Усанов Д. А., Посадский В. Н., Буренин П. В. и др. Детекторный эффект в усилителях на диодах с переносом электронов // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, №5. С. 1085–1086.
6. Носков В.Я., Смольский С.М. Сто лет автодину: исторический очерк основных этапов и направлений развития автодинных систем // Радиотехника. 2013. № 8. С. 091-101.
7. Коган И.М., Тамарчак Д.Я., Хотунцев Ю.Л. Автодины// Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М: ВИНТИ, 1984. Т. 33, С. 3–175.
8. Nugren T., Sjolung A. Doppler radar with self-detecting diode osciators // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1974. Vol. 22, № 5. P. 494–498.
9. Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для создания устройств радиоволнового контроля/Д. А. Усанов, В. Д. Тупикин, А. В. Скрипаль, Б. Н. Коротин // Дефектоскопия. 1995. № 5. С. 16–20.
10. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Левит Б.И. Автодинные и модуляционные характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т.23. № 5. С. 535–541.
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С.51–57.
12. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P. and Wellstood F. C. “Near-field microwave microscopy of materials properties” in Microwave Superconductivity. Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269.
13. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области её применения. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. 100 с.
14. Резонансы в полубесконечном волноводе с диафрагмой, связанные с возбуждением волн высших типов/ Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, С. Б. Вениг, В. Е. Орлов // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, № 18. С.47–49.
15. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.
16. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 376 с.
17. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю. Формирование многодоменной пространственной структуры в арсенид-галлиевом диоде Ганна как нелинейный феномен// Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т. 21, №5. С. 51–59.
18. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю., Фадеев А.В., Калямин А.А. Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом р-і-п диоде// Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 21. С. 104–110.
19. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 136 с.
20. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме// Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С.51–57.
21. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С.. Определение расстояния до объекта с помощью частотномодулированного полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2007. Том 33. Вып 21. С. 72-77.
22. Д.А. Усанов, О.В. Мареев, А.В. Скрипаль, Г.О. Мареев. Лазерные автодинные измерения параметров движений барабанной перепонки // Российский журнал биомеханики. 2012. Т.16, №1. С.8-21.
23. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Метод измерения внутриглазного давления с помощью полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2012. Том 38, выпуск 3. С.69-74.
24. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Вагарин А.Ю., Скрипаль Ан.В., Потапов В.В., Шмакова Т.Т., Мосияш С.С. Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т.24. Вып.5. С.39-43.
25. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кашавцев Е.О. Определение формы пульсовой волны по сигналу полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2013. Том 39, выпуск 5. С.82-87.

NEW APPLICATIONS OF SEMICONDUCTOR MICROWAVE AND LASER AUTODYNES

D.A. Usanov, A.I.V. Skripal, An.V. Skripal

Saratov State University n. a. N. G. Chernyshevsky

New applications of semiconductor microwave and laser autodynes have been considered. It has been noted that near-field scanning microwave microscopy is a one of new application areas of the autodyne detection effect in semiconductor microwave generators. It is shown that near-field measurements using microwave microscope allows one to significantly expand the understanding of the physics of semiconductor structures used in microwave technology.

It has been shown that nowadays autodynes semiconductor laser system are used to control both nanovibrations and biological objects displacements. The possibility of using semiconductor laser autodyne for the diagnostics of pathological states of the eardrum vibrations has been shown. It has been noted that new advanced direction of laser autodyne applications in medicine is to provide a method of recording the intraocular pressure based on the eyeball microdisplacements measurement under the air-impact impulse.

НЕАДИАБАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА

Лещева К.А.¹, д.ф.-м.н. Гольденберг А.Л.²,
д.ф.-м.н. Глявин М.Ю.², д.ф.-м.н. Мануилов В.Н.¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

²Институт прикладной физики РАН

Введение

В гиротронах, наиболее мощных источниках электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн от миллиметрового до субмиллиметрового [1], в качестве активной среды (источника энергии излучения) используются трубчатые пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям в постоянном магнитном поле (так называемые винтовые электронные пучки - ВЭП) [2,3]. В таких пучках электроны обладают одинаковыми полными скоростями, но имеет место разброс вращательных (осцилляторных) и поступательных компонент скоростей электронов. Питч-фактор пучка g , равный отношению вращательной и дрейфовой скоростей движения частиц, должен быть достаточно велик (больше 1), поскольку энергия электромагнитного излучения черпается из осцилляторной энергии электронов, а продольная скорость нужна только для прохождения электронов за определенное время через рабочее пространство прибора.

В настоящее время в гиротронах для формирования ВЭП используются магнетронно-инжекторные пушки (МИП). Особенностью МИП является то, что в них уже в момент вылета с катода электроны обладают начальной осцилляторной скоростью и, в значительной мере, разбросом компонент скоростей электронов [2]. В принципе, это означает, что различные углы вылета электронов с катода, обусловленные тепловыми скоростями и шероховатостью поверхности эмиттера, и неоднородности электрического поля на катоде, в частности, связанные с пространственным зарядом на катоде, вносят существенный вклад в разброс скоростей электронов. Эти факторы разброса тем значительней, чем короче рабочая длина волны гиротрона. Влияние поля пространственного заряда на разброс скоростей является основной причиной того, что МИП гиротронов работают в режиме температурного ограничения тока эмиссии, то есть при токах значительно меньших, чем ток в режиме полного пространственного заряда на катоде. При дальнейшем продвижении электронов от катода к рабочему пространству магнитное поле возрастает до максимальной величины и при этом осцилляторные скорости электронов увеличиваются в соответствии с адиабатическим инвариантом. Одно из следствий разброса скоростей электронов состоит в том, что продольные скорости частиц, обладающих наибольшими начальными осцилляторными скоростями, могут стать нулевыми еще на подходе к максимальному магнитному полю рабочего пространства; такие электроны отражаются обратно к катоду (явление магнитной пробки). В результате, при попытке повысить питч-фактор, часть электронов с наибольшими осцилляторными скоростями отражается магнитным зеркалом и оказывается захваченной в адиабатической ловушке между рабочим пространством и катодом МИП. Накопление электронов в ловушке приводит к неустойчивостям электронного потока, выражающимся в паразитной генерации и интенсивной бомбардировке катода. Отражение электронов и их накопление в ловушке запускает и другие нежелательные явления, рассмотренные в [3]. Все это ограничивает возможности увеличения КПД прибора и, вообще говоря, требует постоянного контроля во избежание самопроизвольного изменения

тока пучка. Таким образом, хотя МИП используются во всех мощных гиротронах вплоть до мегаваттного уровня выходной мощности, они имеют серьезные недостатки, которые могут быть частично устранены при использовании неадиабатических электронных пушек, подобных тем, проекты которых были рассмотрены в [4].

В неадиабатических электронных пушках влияние условий вылета электронов с катода на разброс их скоростей может быть существенно нивелировано или даже вовсе исключено как при температурном ограничении тока эмиссии, так и в режиме ограничения тока пространственным зарядом.

Принцип работы неадиабатической электронно-оптической системы

Рассмотрим триодную схему формирования (рис.1), где электроны пучка разгоняются до анодного потенциала U_a в магнитном поле, составляющем угол ψ с электрическим полем на катоде. Величина магнитного поля должна быть такой, чтобы электроны двигались в сильном электрическом поле вплоть до щелевого зазора в составе почти прямолинейного пучка и только затем отклонялись магнитным. Таким образом они приобретают первичную осцилляторную скорость примерно равную $\sin \psi \times v_a$, где $v_a = \sqrt{2\eta U_a}$ которая затем возрастает в нарастающем магнитном поле как и в адиабатической системе формирования пучка. При этом все рассмотренные выше факторы разброса адиабатической МИП вносят возмущение в распределение компонент скоростей электронов только как величины второго порядка малости. При потенциале анодов порядка и выше 10 кВ их вклад оказывается пренебрежимо малым. В принципе, это позволяет повысить качество ВЭП при оптимизации формы электродов пушки.

Для регулировки угла ψ и питч-фактора g в магнитной системе использована пара включенных навстречу друг другу дипольных катушек, позволяющая варьировать величину ψ без изменения компрессии пучка. Достоинством системы является также неизменность величины питч-фактора в диодном режиме $U_a=U_0$ при изменении величины полного ускоряющего напряжения U_0 в значительных пределах. Анализируемая электронно-оптическая система может работать как в режиме температурного ограничения эмиссии (Т-режим), так и режиме ограничения тока пространственным зарядом (р-режим). Достоинством последнего режима является стабильность работы катода независимо от эффектов, связанных с бомбардировкой катода и с изменением степени вакуума в лампе.

Развита аналитическая теория неадиабатической ЭОС, позволяющая проводить предварительные оценки основных параметров системы формирования и на этой основе определять исходную форму электродов и положение электронной пушки в магнитном поле. Такой подход позволяет находить хорошее начальное приближение для дальнейшей оптимизации ЭОС численными методами.

Численное моделирование данной электронной пушки проводилось по программам ЭПОС [5] и CST Studio Suite [6] в Т-режиме. Определены оптимальные углы наклона боковых катодных фокусирующих электродов, обеспечивающих одинаковые углы наклона электронных траекторий к магнитному полю в области инжекции пучка. Оптимизировано положение кольцевой анодной щели для улучшения токопрохождения формируемого ВЭП. Использование щелевой конструкции первого анода (рис.1) также защищает катод от бомбардировки отраженными от магнитного зеркал частицами и за счет этого позволяет достичь больших величин питч-фактора. Найдены оптимальные расстояния L (см. рис.1) катушек от центра эмиттера и их конфигурация, обеспечивающие вариацию угла ψ и питч-фактора g в широких пределах при минимальном энергопотреблении катодных катушек.

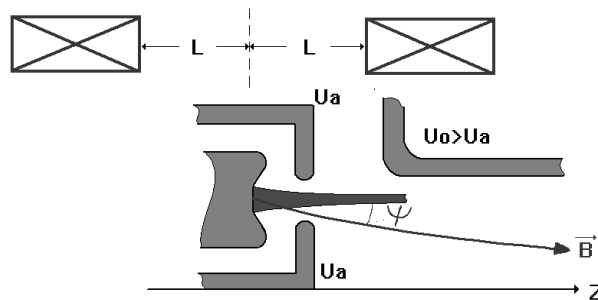


Рис. 1. Схема катодной части неадиабатической ЭОС

Заключение

Показано, что переход от адиабатической к неадиабатической схеме формирования винтового электронного пучка в гиротронах позволяет устранить влияние на величину скоростного разброса таких критически важных для гиротронов короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн факторов как тепловые скорости и шероховатостей эмиттера. В результате становится возможным увеличение питч-фактора электронного пучка до величин порядка 1.6-1.8, что способствует

как увеличению выходного КПД, так и улучшению устойчивости одномодовой генерации. Достоинством рассмотренной системы является возможность независимой вариации тока пучка и питч-фактора при сохранении положения ВЭП в рабочем пространстве гиротрона.

Рассмотрены как триодный ($U_0 > U_a$), так и диодный ($U_0 = U_a$) режимы работы пушки. Показано, что в диодном режиме при перестройке ЭОС по полному ускоряющему напряжению в 1.5 раза можно обеспечить малые вариации питч-фактора и скоростного разброса при величине питч-фактора более 1.7 и в то же время отсутствие отраженных от магнитного зеркала частиц. Показано, что поле пространственного заряда пучка слабо влияет на величину рабочего питч-фактора. Найдены основные физические причины, приводящие к плавному увеличению скоростного разброса за счет действия сил пространственного заряда пучка. С этой целью выполнено моделирование в режиме с частичной ионной компенсацией заряда пучка ионным фоном частиц, образующихся при ионизации остаточного газа проходящим электронным пучком.

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. M.Thumm, State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013), KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1-138, 2014.
2. A.L.Goldenberg, M.I.Petelin Formation of helical electron beams in adiabatic gun, Radiophysics and Quantum Electronics, vol.16, No 6, 1973, pp. 141-149.
3. Sh.E.Tsimring Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Wiley-Interscience, 2007, 573 p.
4. A.L.Goldenberg, V.N.Manuilov and M.Yu.Glyavin Electron-Optical System of a High-Power Gyrotron with Nonadiabatic Electron Gun, Radiophysics and Quantum Electronics, vol.48, No 6, 2005, pp. 461-465.
5. P.V.Krivosheev, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, Sh.E.Tsimring. Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical elec-tron Beams. Int. J. of Infrared and MM waves. 2001, vol.22, No 8, pp.1119-1146.
6. <https://www.cst.com>

NON-ADIABATIC ELECTRON-OPTICAL SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL GYROTRON

K.A. Leshcheva¹, A.L. Goldenberg², M.Y. Glyavin², V.N. Manuilov¹

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

²Institute of Applied Physics of RAS

A new version of the non-adiabatic system for forming the helical electron beam for gyrotrons is analyzed. The initial transverse velocity of electrons is formed by injection of rectilinear electron beam at an angle to the magnetic field. It is shown that in such systems the influence of the thermal velocity of the electrons and emitter surface roughness can be considerably reduced in comparison with traditional magnetron-injection guns, which makes it possible to produce electron beams with high enough pitch-factor and moderate velocity spread. The advantage of proposed system is the ability of independent variation of the beam current and the pitch factor in space charge limitation regime and increasing of cathode lifetime.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ АММИАКА МЕТОДОМ РЕКТИФИКАЦИИ

Скосырев А.И.¹, к.х.н.Котков А.П.¹, к.х.н., Гришнова Н.Д.¹,
к.ф.-м.н. Понуровский Я.Я.², Аношин О.С.¹

¹ОАО «НПП «Салют», Нижний Новгород

²Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН

Аммиак является источником азота при выращивании гетероэпитаксиальных структур Ga(Al,In)N методами химического осаждения из газовой фазы. Присутствие примесей в аммиаке, особенно воды, отрицательно влияет на приборные свойства гетероструктур. Для очистки аммиака от примесей наиболее эффективно использовать метод низкотемпературной ректификации.

Целью работы являлось исследование примесного состава исходного аммиака и поведения примесей в процессе очистки аммиака методом низкотемпературной ректификации.

Очистку аммиака проводили методом периодической ректификации на колонне со средним питающим резервуаром (рис. 1).

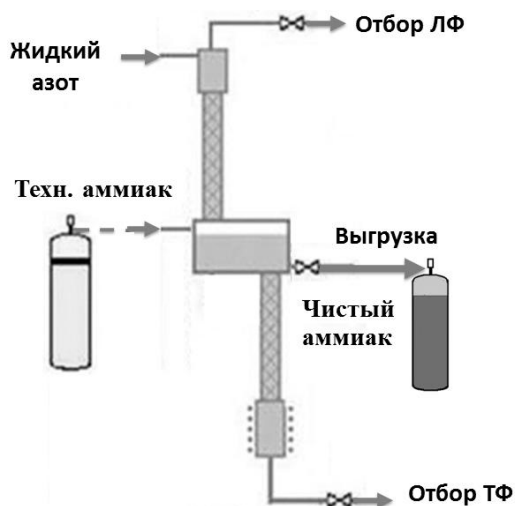


Рис. 1. Схема ректификационной колонны со средним питающим резервуаром для очистки аммиака от примесей

В качестве исходного сырья использовали технический аммиак марки «Ак» (ГОСТ 6221-90).

Для анализа аммиака на содержание примесей углеводородов, азота и кислорода использовался метод газовой хроматографии с применением газового хроматографа «Цвет-800-02» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД) и детектором по теплопроводности (ДТП).

Пробу аммиака из баллонов вводили в прибор с помощью вакуумноплотной системы, выполненной из нержавеющей стали. Дозирование пробы в колонку осуществляли автоматическим краном-дозатором. Вводимый объем пробы составлял 1 см³ при давлении 0.5-1 атм. В качестве газа-носителя использовали гелий марки 6.0 (ТУ 0271-011-45905715-02). Для хроматографического разделения примесей использовали насадочную адсорбционную колонку 4 м × 3 мм с сорбентом – модифицированным алюмогелем и колонку с сорбентом PorapakQ 4 м × 3 мм.

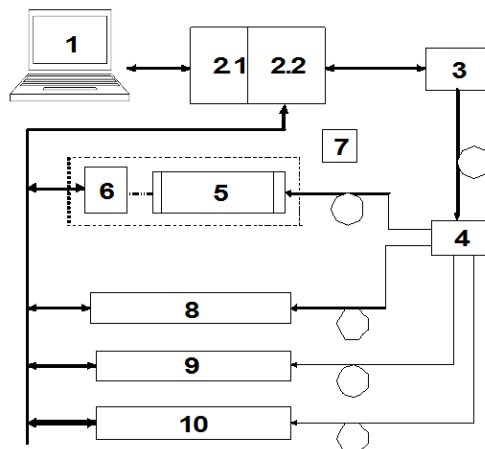


Рис. 2. Принципиальная блок-схема многоканального газоанализатора на базе ДЛ с волоконным выводом излучения: 1- персональный компьютер; 2.1- платы ввода/вывода NI DAQ-USB; 2.2 - модуль электроники; 3- модуль диодного лазера; 4 – разветвитель (коэффициент деления 1/4); 5- реперная кювета, 6- фотоприемник с предусилителем; 7- интерферометр Фабри-Перо; 8, 9, 10- аналитические каналы

Расчет содержания примесей в аммиаке проводили путем сравнения с результатами анализа поверочных газовых смесей углеводородов с гелием (ТУ-2114-006-53373468-2008). Обработка результатов производилась с помощью программы «Цвет-Аналитик» с использованием метода абсолютной градуировки.

Для определения содержания воды при получении высокочистого аммиака был применен метод диодно-лазерной спектроскопии. Для этой цели в отделе ДЛС ИОФРАН имени Прохорова разработан и изготовлен прибор (рис.2) для определения содержания воды в аммиаке, в котором используется диодный лазер (ДЛ) на длину волны 1,392 мкм. Диодно-лазерный спектрометр (ДЛС) состоял из реперного и двух аналитических каналов. Реперный канал использовался для температурной

стабилизации циклов сканирования и как канал сравнения. В аналитических каналах использовали оптические кюветы: однопроходную с длиной оптического пути 0,8м, а также многопроходную – 20м.

При разработке методики анализа были сняты панорамные спектры поглощения H₂O и NH₃, на основе которых выбрана рабочая линия поглощения воды.

Исследовано влияние давления воды и аммиака на форму спектральной линии поглощения воды в диапазоне давлений от 1 до 100 кПа. Установлено, что основное влияние на форму спектральной линии воды оказывает давление аммиака. С увеличением давления смеси NH₃-H₂O происходит уширение линии и смещение ее в длинноволновую область. Также установлено, что с повышением давления смеси площадь спектральной линии воды растет в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, затем перестает меняться и уменьшается. Такое изменение линии поглощения обусловлено взаимодействием аммиака с водой. Эта особенность не позволяет проводить определение содержания воды в аммиаке при давлении аммиака в смеси более 20 кПа.

Для калибровки ДЛС были приготовлены смеси воды с аммиаком в интервале концентраций 10⁻³-10⁻¹ об. %.

Технический аммиак марки «Ак» транспортировали в 40-литровых баллонах. Аммиак находится в нём в виде двух фаз: жидкой и паровой. Результаты анализа технического аммиака (таблица 1) позволяют сделать вывод о том, что между фазами имеет место значительное распределение примесей.

Таблица 1. Результаты анализа технического аммиака методами газовой хроматографии и ДЛ спектроскопии.

Примесь	T _{кип} , °C	Концентрация, об. %		α	Примечание
		Паровая фаза	Жидкая фаза		
N ₂	-195,8	(4,0 ± 1,2) · 10 ⁻²	< 1 · 10 ⁻⁴	-	Проявляют свойства более летучих, чем аммиак примесей
O ₂	-183,0	(7,0 ± 2,1) · 10 ⁻³		-	
CH ₄	-161,6	2,1 ± 0,2	(9,2 ± 1,3) · 10 ⁻³	230	
C ₂ H ₆	-88,6	(4,4 ± 0,7) · 10 ⁻³	(6,7 ± 1,0) · 10 ⁻⁵	60	
C ₃ H ₈	-42,1	(9,4 ± 1,1) · 10 ⁻⁵	(3,8 ± 0,6) · 10 ⁻⁶	30	
i-C ₄ H ₁₀	-11,7	(2,1 ± 0,6) · 10 ⁻⁶	< 1 · 10 ⁻⁶	≈2-14	
n-C ₄ H ₁₀	-0,5	(1,4 ± 0,2) · 10 ⁻⁵			
i-C ₅ H ₁₂	27,9	(2,8 ± 0,8) · 10 ⁻⁶			
n-C ₅ H ₁₂	36,1	(8,9 ± 2,6) · 10 ⁻⁶			
C ₆ H ₁₄	68,7	(5,9 ± 1,8) · 10 ⁻⁶			
H ₂ O	100,0	(1,0 ± 0,2) · 10 ⁻²	не опред.	20-40	Менее летучая примесь

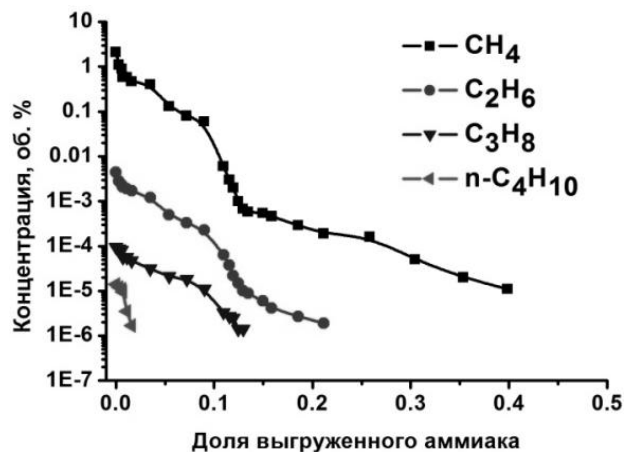


Рис. 3. Изменение содержания углеводородов C₁-C₄ в техническом аммиаке, выгружаемом из баллона по газовой фазе, в зависимости от доли выгруженного аммиака

В паровой фазе аммиака концентрируются атмосферные газы и углеводороды C₁ – C₅ (коэффициент разделения составляет величину от 10 до 230). Нужно отметить, что углеводороды C₄-C₅ проявляют в аммиаке аномальные свойства - свойства более летучих, чем аммиак примесей, хотя углеводороды C₄-C₅ имеют температуру кипения выше температуры кипения аммиака. В жидкой фазе аммиака в баллоне концентрируется вода.

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

Из-за распределения примесей между жидкой и паровой фазами аммиака в баллоне, в процессе выгрузки аммиака из баллона происходит заметное изменение содержания летучих примесей в аммиаке, выгружаемом из баллона (рисунки 3 и 4).

Содержание углеводородов, азота и кислорода в выгружаемом из баллона аммиаке быстро уменьшается (рисунок 3), а содержание воды - наоборот увеличивается (рисунок 4).

По мере выгрузки полного баллона содержание воды в аммиаке возрастает приблизительно на порядок. Распределение примесей между паровой и жидкой фазами в баллоне необходимо учитывать при анализе аммиака из баллона на содержание примесей, а также при использовании аммиака.

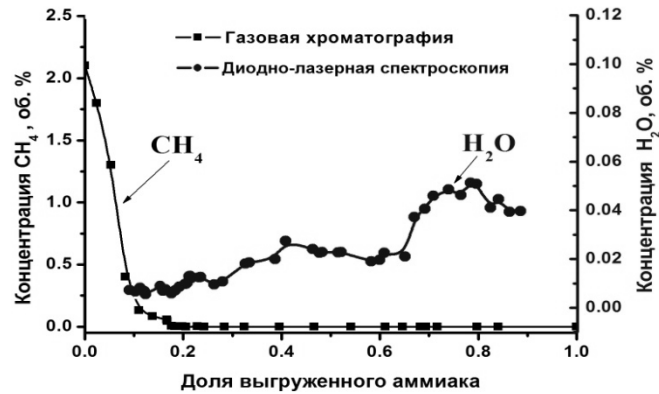


Рис. 4. Содержание метана и воды в техническом аммиаке, выгружаемом из баллона по газовой фазе

Таблица 2. Результаты анализа аммиака из баллона с отборами ЛФ

Примесь	T _{кип} , °C	α	Концентрация, об. %	
			Паровая фаза	Жидкая фаза
CH ₄	-161,6	280	1,4±0,5	(5,1±1,8)·10 ⁻³
C ₂ H ₆	-88,6	85	(4,3±1,5)·10 ⁻³	(5,0±1,8)·10 ⁻⁵
C ₃ H ₈	-42,1	20	(5,5±1,7)·10 ⁻⁴	(1,6±0,5)·10 ⁻⁵
i-C ₄ H ₁₀	-11,7	25	(1,2±0,2)·10 ⁻⁴	(4,9±0,7)·10 ⁻⁶
n-C ₄ H ₁₀	-0,5	20	(8,9±1,3)·10 ⁻⁴	(4,5±0,6)·10 ⁻⁵
i-C ₅ H ₁₂	27,9	≈ 10	(1,1±0,1)·10 ⁻⁴	(1,0±0,1)·10 ⁻⁵
n-C ₅ H ₁₂	36,1		(5,5±0,8)·10 ⁻⁴	(5,2±0,8)·10 ⁻⁵
C ₆ H ₁₄	68,7		(2,7±0,4)·10 ⁻⁴	(2,3±0,3)·10 ⁻⁵

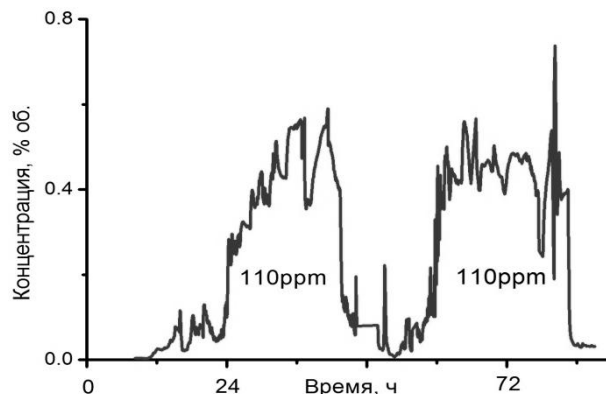


Рис. 5. Изменение содержания воды в отборах «тяжелой фракции» после загрузки технического аммиака из 2-х последовательных баллонов

Глубокую очистку аммиака проводили в режиме периодической ректификации на колонне насадочного типа со средним питающим резервуаром. «Легкую фракцию», обогащенную нижекипящими (более летучими) относительно аммиака примесями отбирали из верхней части колонны.

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

“Тяжелую фракцию”, в которой концентрировалась вода, отбирали из нижней части колонны. Содержание воды в отбираемой ТФ непрерывно контролировали методом ДЛС (рисунок 5). Очищенный аммиак в конце очистки выгружался из среднего питающего резервуара.

Для определения содержания воды в очищенном аммиаке разработана методика с концентрированием примеси воды из анализируемой пробы аммиака на ректификационной колонне.

С использованием концентрирования проанализированы полученные образцы высокочистого аммиака. Предел обнаружения воды в аммиаке составил величину $1 \cdot 10^{-5}$ об. %.

На основе проведенных исследований разработано оборудование и технология для получения аммиака квалификации 6N4 производительностью до 2500 кг в год.

Таблица 2. Содержание примесей в очищенном аммиаке

Примесь	Содержание примесей
Азот (N ₂)	≤ 0.1 ppmv
Кислород (O ₂)	≤ 0.02 ppmv
Метан (CH ₄)	≤ 0.05 ppmv
Углеводороды C ₂ -C ₆	≤ 0.05 ppmv
Вода (H ₂ O)	≤ 0.1ppmv

Таким образом, в результате проведенных исследований:

- Изучен примесный состав аммиака. Установлено, что основными примесями в аммиаке являются азот, кислород, углеводороды C₁-C₆ и вода.

- Разработаны методики газохроматографического анализа аммиака на содержание углеводородов и постоянных газов.

Разработаны методики измерения содержания воды в аммиаке, с использованием диодно-лазерного спектрометра.

- Исследовано поведение примесей в процессе очистки аммиака. Основными более летучими, чем аммиак примесями являются азот, кислород, а также углеводороды C₁-C₆. Менее летучей, чем аммиак примесью является вода.

- Получены образцы высокочистого аммиака.

RESEARCHING THE BEHAVIOR OF IMPURITIES IN THE AMMONIA PURIFICATION PROCESS

A. I. Skosyrev¹, A. P. Kotkov¹, N. D. Grishnova¹,
Ya. Ya. Ponurovsky², O. S. Anoshin¹

¹ JSC "NPP "Salut", Nizhny Novgorod

² A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS

In the paper the impurity composition of raw ammonia was determined. It was found that the major impurities in ammonia are nitrogen, oxygen, C1-C6 hydrocarbons, and water. The methods of gas chromatography analysis ammonia content of hydrocarbons and permanent gases and the technique of measuring the water content in ammonia using a diode laser spectrometer were developed. The behavior of the impurities during purification of ammonia were researched. The main more volatile than ammonia impurities are nitrogen, oxygen, and C1 - C6 hydrocarbons and less volatile than ammonia impurity is water. Using the developed techniques the samples of high purity ammonia were produced.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА СПЕКТРАЛЬНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ МУЛЬТИПЛЕТНЫХ СТРУКТУР
СПЕКТРА СИГНАЛОВ ЯМР**

к. ф.-м. н. Коротей Е.В.¹, д. ф.-м. н. Волхонская Е.В.¹,
д. ф.-м. н. Пахотин В.А.¹, к. ф.-м. н. Власова К.В.²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта

² Калининградский государственный технический университет
«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»

Развитие современной базы отечественной микроэлектроники предполагает активную работу по конструированию и внедрению новых функциональных материалов различного назначения. На этапах прогнозирования их свойств, производства и контроля качества требуется проведение анализа состава и структуры вещества. Среди прочих методов, используемых для этой цели, можно выделить группу так называемых методов неразрушающего контроля: ядерный магнитный резонанс (ЯМР), ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР), электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), ферромагнитный резонанс (ФМР).

В то же время для обеспечения прогресса в области нанотехнологий, требуется исследование все более мелких структур, что предполагает соответствующее улучшение технических характеристик ЯМР-спектрометров. Традиционно для его реализации используется переход к более сильным магнитным полям, что предполагает разработку новых технических решений для аппаратной части спектрометров, а значит, увеличение его рыночной стоимости. Помимо этого, как отмечается в [1], сильные магнитные поля (10 - 20 Тл и выше) способны привести к систематическим ошибкам в оценке информативных параметров спектров сигналов ЯМР. Программные же методы коррекции сигнала не позволяют добиться значительного улучшения качества получаемых спектров, так как искажают его исходную форму, либо улучшают один из параметров за счет ухудшения другого.

В работах авторов [2, 3] был представлен метод, позволяющий повысить разрешающую способность ЯМР-спектрометров программными средствами, без увеличения отношения сигнал/шум или искажения исходного сигнала. Он основан на применении теории оптимального приема и позволяет анализировать спектры сигналов в области их неортогональности по частоте, когда реализуется их перекрытие сверх релеевского предела. Проведенные модельные исследования показали, что удовлетворительные оценки параметров двух сигналов можно получить в диапазоне отношений сигнал/шум свыше 10 дБ при разности резонансных частот свыше 0,4 кГц. Классический анализ на основе спектрального метода позволяет получить удовлетворительные оценки при отношении сигнал/шум свыше 15 дБ и при разности частот свыше 2,5 кГц. Динамический диапазон при оценке параметров двух сигналов методом максимального правдоподобия определяется диапазоном отношений амплитуд от 0,05 до 20, а для метода спектрального анализа он составляет от 0,2 до 5. Таким образом, по своим возможностям метод максимального правдоподобия существенно эффективнее, чем метод спектрального анализа и может быть использован при исследовании сигналов ЯМР с повышенным разрешением.

Для получения наиболее точных оценок информативных параметров спектра сигнала ЯМР методом максимального правдоподобия требуется априорная информация о количестве линий, содержащихся в мультиплетной структуре. На практике подобные сведения обычно отсутствуют, поэтому в модель сигнала закладывается наиболее вероятное количество линий, что может привести к потере части данных и недостоверной оценке параметров на выходе. Действительно, если количество линий в модели меньше, чем в экспериментальном спектре, то наиболее близкие по частоте составляющие будут определены алгоритмом как один объект, с некоторым промежуточным значением параметров. Если же количество линий в модели будет превосходить количество линий в спектре, то алгоритм определит в качестве добавочных линий шумовые максимумы. При низком отношении сигнал/шум будет велика вероятность того, что значения амплитуд шумовых максимумов окажутся близки к значениям амплитуд слабых сигналов. В этом случае спектр сигнала ЯМР будет интерпретирован неверно.

В настоящей работе представлена методика оценки точного количества спектральных линий, содержащихся в мультиплетной структуре спектра сигнала ЯМР, основанная на положениях теории оптимального приема. Функционал правдоподобия в этом случае можно представить в виде

$$\ln(L(\vec{\lambda}')) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^\infty \left| y(t) - \sum_{n=1}^{N'} U'_{0n} \cos\left(\omega'_{0n}t - \frac{\pi}{2} + \varphi'_{0n}\right) e^{-\alpha't} \right|^2 dt, \quad (1)$$

где $\vec{\lambda}' = \{U'_{0n}, \omega'_{0n}, \varphi'_{0n}, \alpha'\}$ – вектор оценочных параметров сигнала;

$y(t) = \sum_{n=1}^N U_{0n} \cos\left(\omega_{0n}t - \frac{\pi}{2} + \varphi_{0n}\right) e^{-\alpha t} + u_{ш}(t)$ - принятое сообщение, содержащее N сигналов со следующими параметрами: U_{0n} – амплитуды с лоренцевой формой спектральной линии; ω_{0n} - угловые частоты; φ_{0n} - начальные фазы; α - коэффициент затухания (полуширина спектральной линии) и $u_{ш}(t)$ - аддитивный белый гауссов шум с нулевым математическим ожиданием, дисперсией σ^2 и временем корреляции τ_k .

Требуется определить число сигналов N' , закладываемых в модель.

Рассмотрим случай, когда количество линий в модели сигнала определено верно. Минимизируя функционал правдоподобия (1) по параметрам, получим единственный минимум, определяющий информативные параметры всех спектральных составляющих. Значение функционала правдоподобия в минимуме будет определено дисперсией шума σ^2 .

Если количество линий в модели N' меньше, чем в принятом сообщении, то значение функционала в минимуме увеличится, так как оно будет определяться как дисперсией шума, так и вкладом неучтенных спектральных составляющих.

На рисунке 1 представлен результат модельного исследования зависимости значения функционала (1) в минимуме от отношения сигнал/шум. При моделировании создавались сигналы ЯМР, представляющий собой суперпозицию двух спектральных составляющих со следующими комбинациями параметров $U_{01} = 1$ и $U_{02} = 0,8$, $\varphi_{01} = \varphi_{02} = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 600\pi$ рад/с, $\omega_{01} = 2\pi \cdot 10^4$ рад/с и $\omega_{02} = 2\pi \cdot 1,2 \cdot 10^4$ рад/с. Модель сигнала содержала либо один сигнал ЯМР с неизвестными параметрами (зависимость показана кружками), либо два сигнала ЯМР (зависимость показана треугольниками).

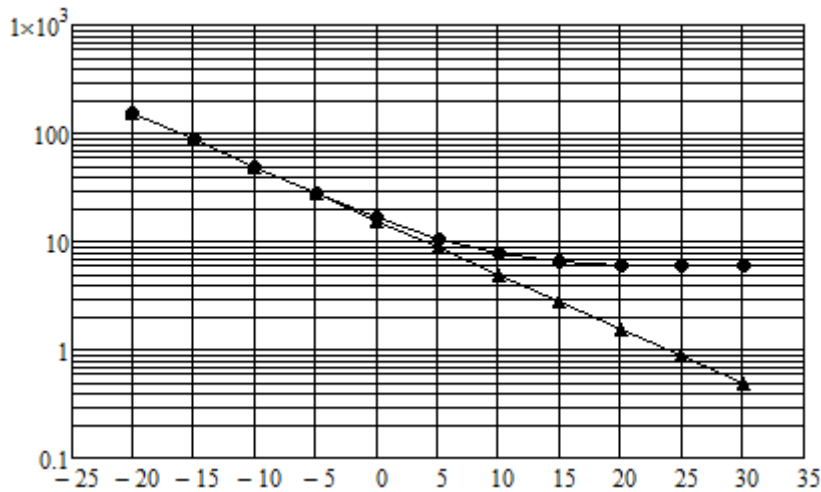


Рис. 1. Зависимость минимума функционала правдоподобия от ОСШ при величине частотного сдвига 2 кГц (кружки – при поиске одной спектральной линии, треугольники – при поиске двух спектральных линий): по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат – значения функционала правдоподобия в логарифмическом масштабе

Видно, что в обоих случаях зависимости имеют линейный характер; с ростом отношения сигнал/шум значение функционала уменьшается. Однако тот график зависимости, где количество линий N' определено неверно (кружки), проходит выше при любом отношении сигнал/шум.

Чем больше различие между числом сигналов в принятом сообщении N и числом сигналов в модели N' , тем больше будет значение функционала правдоподобия в минимуме. Последовательно увеличивая число сигналов в модели, и фиксируя значения функционала в минимуме, можно определить N' . Если продолжать увеличивать количество сигналов, закладываемых в модель N' , то значение функционала в минимуме будет меняться слабо, так как в качестве дополнительных спектральных составляющих будут определены шумовые максимумы.

Рисунки 2-4 иллюстрируют возможности разрешения двух неортогональных по частоте спектральных составляющих при различных соотношениях их параметров в зависимости от отношения сигнал/шум. При построении данных зависимостей рассчитывалась разность между значением функционала в минимуме при поиске двух линий $\Delta_{\min 2}$ ($N = N'$) и при поиске одной линии $\Delta_{\min 1}$ ($N > N'$).

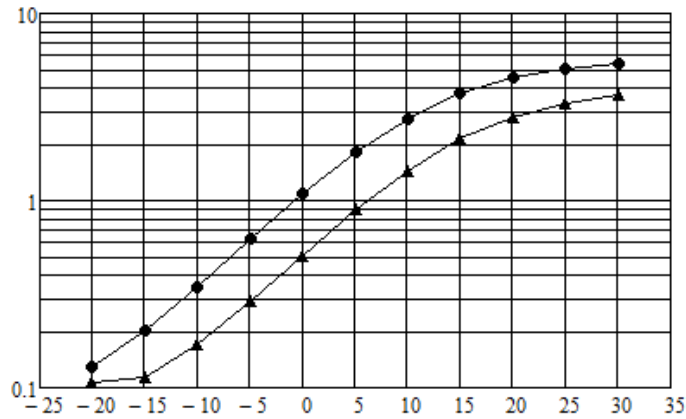


Рис. 2. Зависимость разности значений минимума функционала правдоподобия для случаев поиска одной и двух спектральных линий ($\Delta_{\min 1} - \Delta_{\min 2}$) от ОСШ для двух значений частотного сдвига в 2 кГц (кружки) и 1 кГц (треугольники) при ширине спектральных линий 600 Гц и относительном уровне второй спектральной линии 0,8

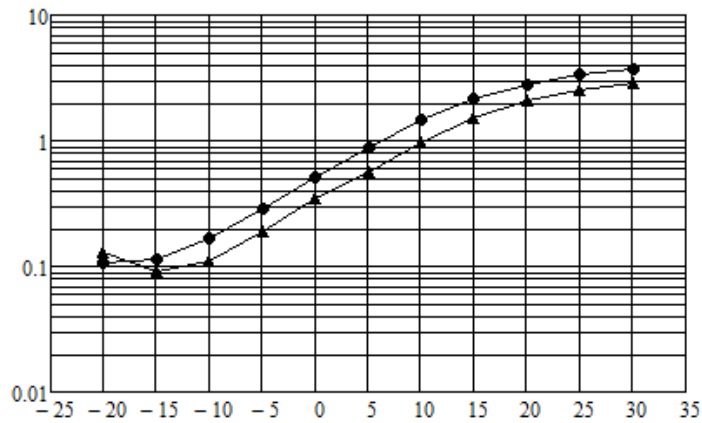


Рис. 3. Зависимость разности значений минимума функционала правдоподобия для случаев поиска одной и двух спектральных линий ($\Delta_{\min 1} - \Delta_{\min 2}$) от ОСШ для двух значений ширины спектральной линии в 600 Гц (кружки) и 800 Гц (треугольники) при величине частотного сдвига в 1 кГц и относительном уровне второй спектральной линии 0,8

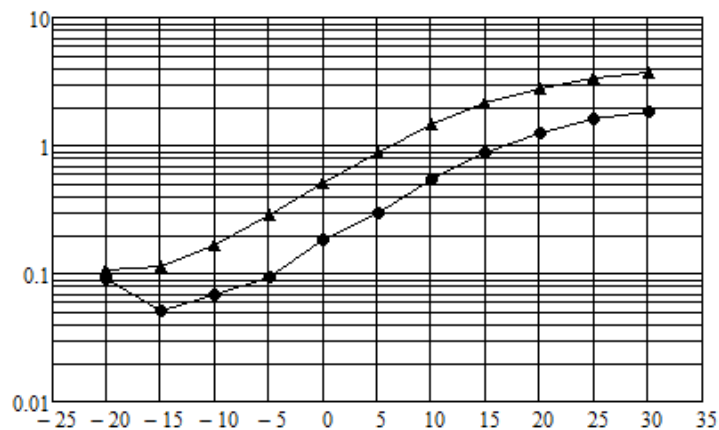


Рис. 4. Зависимость разности значений минимума функционала правдоподобия для случаев поиска одной и двух спектральных линий ($\Delta_{\min 1} - \Delta_{\min 2}$) от ОСШ для двух значений относительного уровня второй спектральной линии 0,8 (треугольники) и 0,4 (кружки) при значении ширины спектральной линии 600 Гц (треугольники) при величине частотного сдвига в 1 кГц

На рисунке 2 представлены две зависимости, характеризующиеся различным разнесением по частоте спектральных составляющих 2 кГц (кружки) и 1 кГц (треугольники). Видно, что чем ближе частоты, тем

меньше значение разности функционалов, следовательно, тем выше вероятность ошибки в оценке параметров линий. На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости, полученные для различных значений полуширины спектральной линии 600 Гц (кружки) и 800 Гц (треугольники). Количество спектральных составляющих и их параметры будут определены тем точнее, чем меньше полуширина спектральной линии. На рисунке 4 исследовалась зависимость $\Delta_{\min 1} - \Delta_{\min 2}$ при различных значениях относительной амплитуды второй спектральной составляющей 0,8 (треугольники) и 0,4 (кружки). На основании данных зависимостей можно сделать вывод, что точность в оценке количества линий будет тем выше, чем больше амплитуда второго сигнала.

Следовательно, для определения границы работоспособности метода необходимо учитывать не только отношение сигнал/шум, но и параметры спектральных составляющих. Так, при уменьшении частотного сдвига от 2 кГц до 1 кГц требуется увеличение отношения сигнал/шум на 7 дБ для сохранения допустимого уровня дисперсии параметров сигналов. При переходе от значения ширины спектральных линий в 600 Гц к значению 800 Гц или уменьшению относительного уровня второй спектральной линии в два раза нижняя граница отношения сигнал/шум поднимается на 4 дБ и 10 дБ, соответственно.

Таким образом, на основе метода максимального правдоподобия предложен алгоритм определения количества спектральных линий сигнала ЯМР на фоне аддитивного гауссова шума. Установлено, что наименьшее из возможных значений минимума функционала правдоподобия может быть использовано в качестве критерия при определении количества спектральных линий сигнала ЯМР.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Контракт № 12516р/23919 «Разработка нового подхода в обработке радиочастотных откликов в рамках теории оптимального приема для структурного анализа новых перспективных материалов».

Литература

1. Чертков В. А. Новые методы расшифровки мультиплетной структуры спектров ЯМР как инструмент изучения структуры и свойств органических соединений: дисс. докт. хим. наук. – М., 2006. – 486 с.
2. Коротей Е.В., Волхонская Е.В., Пахотин К.В., Власова К.В., Строков В.И. Алгоритм оценки параметров составного сигнала ЯМР методом максимального правдоподобия. - Цифровая обработка сигналов. – Вып. №2. – Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2015. – с. 14-17
3. Коротей Е.В., Волхонская Е.В., Пахотин К.В., Власова К.В., Коротей Е.В. Разрешение сигналов ЯМР методом максимального правдоподобия. - Сборник докладов XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь RLNC 2015». - Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2015. – т.1. - с. 205-216
4. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем: учебное пособие для вузов. - М.: Радиотехника, 2003. - 400 с.
5. Теоретические основы оптимальной обработки сигналов / Пахотин В. А., Бессонов В. А., Молостова С. В., Власова К. В. – Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2008. - 186 с.
6. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004 – 320 с.
7. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983. - 320 с.
8. Бирюков И. П., Воронков М. Г., Сафин И. А. Таблицы частот ядерного квадрупольного резонанса. – Ленинград: Изд. «Химия», 1968. – 140 с.

TECHNIQUE OF DEFINITION QUANTITY OF SPECTRAL COMPONENTS FOR MULTIPLLET STRUCTURES OF THE RANGE SIGNALS A NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

E.V. Korotey¹, E.V. Volkhonskaya¹,
V.A. Pakhotin¹, K.V. Vlasova²

¹ The Baltic Federal university of I. Kant

² Kaliningrad state technical university Baltic state academy of fishery fleet

In the real work modern mathematical methods of processing of ranges of signals of the nuclear magnetic resonance (NMR) are considered. Comparison of a method of the spectral analysis and a method of maximum likelihood is carried out. It is shown that the method of maximum likelihood has essential advantage whenever possible of permission of spectral lines and to dynamic range.

In work the algorithm of an assessment of exact quantity of spectral components as a part of multiplet structures of ranges of signals of a nuclear magnetic resonance is considered. It is based on an assessment of value of functionality of credibility in a minimum. It is shown that at coincidence of number of lines in selection

of data and in signal models, value of functionality in a minimum is defined only by noise dispersion. In case the number of lines in model is defined incorrectly, value of functionality in a minimum will be significantly higher. Thus, value of functionality in a minimum can be used as criterion when determining quantity of spectral components.

The conducted model researches showed the following. Limits of operability of a method are defined by the relation signal/noise and parameters of spectral components. So, at reduction of frequency shift from 2 kHz to 1 kHz the increase in the relation signal/noise on 7 dB for preservation of admissible level of dispersion of parameters of signals is required. Upon transition from value of width of spectral lines to 600 Hz to value of 800 Hz or reduction of relative level of the second spectral line twice the lower bound of the relation signal/noise is made on 4 dB and 10 dB, respectively.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ, ПОСТУПАЮЩИХ ИЗ ТРИМЕТИЛГАЛЛИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Ревин М.В.¹, к.х.н. Котков А.П.¹, Медведев Г.В.¹,
Свинков Н.В.¹, д.х.н. Артёмов А.Н.², Сазонова Е.В.²

¹ОАО «НПП «Салют»

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Арсенид галлия является одним из наиболее важных и востребованных полупроводниковых материалов [1]. Причем когда сегодня говорят об арсенид галлиевых структурах, имеют в виду, прежде всего, квантоворазмерные гетероструктуры (ГС) на основе арсенида галлия и его твёрдых растворов – AlGaAs/GaAs/InGaAs. Обладая уникальными свойствами, указанные ГС представляют повышенный интерес как для фундаментальных исследований в области полупроводников, так и для их практического использования. В настоящее время ГС на основе арсенида галлия нашли широкое применение для изготовления активных элементов твердотельной СВЧ-электроники, а также приборов современной оптоэлектроники и ИК-техники [2].

Метод химического осаждения из газовой фазы с применением металлоорганических соединений и летучих гидридов - МОС-гидридная эпитаксия (в зарубежной литературе – МОСVD), является приоритетным методом выращивания многослойных приборных ГС в промышленном масштабе [3]. Благодаря высокой летучести и термической стабильности в качестве наиболее востребованного металлоорганического источника атомов галлия в МОС-гидридном процессе выступает триметилгаллий (ТМГ). Источником атомов мышьяка служит арсин.

Одним из основных требований, предъявляемых к процессу выращивания ГС, является низкий уровень фонового легирования формируемых эпитаксиальных слоев, так как электрически активные примеси, неконтролируемо поступающие в слои в процессе роста, ухудшают характеристики приборов, создаваемых на основе ГС. Электрически активными в арсениде галлия являются примеси элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы. Элементы II группы (магний, цинк, кадмий) и углерод проявляют акцепторные свойства и приводят к образованию дырок в GaAs. Кремний, германий, олово, свинец и элементы VI группы (сера, селен, теллур) – донорные примеси, приводящие к образованию свободных электронов. Разность содержания доноров (N_d) и акцепторов (N_a) в арсениде галлия определяет тип проводимости и концентрацию носителей заряда в материале: дырок (p) или электронов (n). Если $N_d < N_a$, то формируются эпитаксиальные слои дырочного типа проводимости (p-тип) с концентрацией дырок $p = N_a - N_d$. В случае $N_d > N_a$ эпитаксиальные слои обладают электронным типом проводимости (n-тип) с концентрацией электронов $n = N_d - N_a$. Тип проводимости и суммарное содержание доноров и акцепторов ($N_d + N_a$) определяют подвижность носителей заряда.

Согласно литературным источникам [4] лучшие нелегированные эпитаксиальные слои GaAs n-типа, выращенные МОС-гидридным методом с использованием триметилгаллия, имели концентрацию электронов $(0.7-1.7) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижность – $8200-8400 \text{ см}^2 \times \text{в}^{-1} \times \text{сек}^{-1}$ и $140000-152000 \text{ см}^2 \times \text{в}^{-1} \times \text{сек}^{-1}$ при температурах 300 К и 77 К соответственно. Оценки показывают, что в указанных слоях GaAs концентрация электрически активных примесей находится на уровне $\sim 10^{-7}$ атомных %.

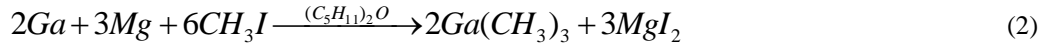
Основным источником поступления примесей в GaAs в процессе эпитаксиального роста являются исходные вещества – ТМГ и арсин, примесный состав которых формируется на стадиях их синтеза. Каждый способ синтеза предполагает свой набор примесей. Цель данной работы состояла в сопоставлении методов синтеза ТМГ с точки зрения содержания электрически активных примесей в синтезированном продукте, а также в изучении поведения примесей на стадиях синтеза и очистки ТМГ.

Исследуемые в рамках данной работы образцы ТМГ были получены следующими методами:

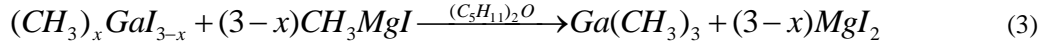
- ТМГ1 и ТМГ2 по реакции трихлорида галлия с триметилалюминием в присутствии хлористого натрия в растворе декана:



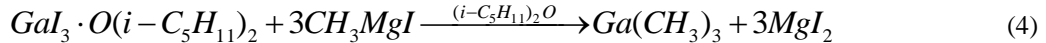
- ТМГ 3 по реакции смеси металлических галлия и магния с йодистым метилом в растворе амилового эфира:



- ТМГ 4 по реакции смеси метилгаллиййодидов с метильным реактивом Гриньяра в среде амилового эфира [5]:



- ТМГ 5 по реакции эфирата йодида галлия с метильным реактивом Гриньяра в среде изоамилового эфира:



Используемый в синтезе триметилгаллия в качестве алкилирующего агента метильный реактив Гриньяра был получен по стандартной методике взаимодействием металлического магния с йодистым метилом в эфирной среде.

Очистку полученных образцов триметилгаллия проводили методом ректификации при пониженном давлении. Отбор низкокипящих компонентов (лёгких фракций) и высококипящих компонентов (тяжёлых фракций) осуществляли дискретным методом по газовой фазе.

Оценку уровня содержания электрически активных примесей в синтезированных образцах (сырец) и продуктах их ректификационной очистки проводили методом функционального контроля по электрофизическим параметрам - концентрации и подвижности носителей заряда, ЭС GaAs, выращенных из исследуемых образцов ТМГ.

Рост ЭС GaAs осуществляли МОС-гидридным методом на полуизолирующих подложках из монокристаллического GaAs (100), разориентированных на 2° в направлении $\langle 110 \rangle$. Источником мышьяка служил высокочистый арсин квалификации 6N4 производства ОАО «НПП «Салют». В качестве газа-носителя использовали водород. Рабочее значение точки росы водорода в процессе эпитаксиального роста не превышало минус 90°C .

Тестирование образцов ТМГ с высоким уровнем содержания лимитируемых примесей – сырца, лёгких и тяжёлых фракций, проводили на установке с кварцевым реактором вертикального типа при атмосферном давлении, температуре роста 640°C и мольным соотношении $AsH_3/Ga(CH_3)_3$ равным 45. Эпитаксиальный рост GaAs из очищенных образцов ТМГ – ректификата, осуществляли на установке с кварцевым реактором горизонтального типа в условиях пониженного давления – 100 мбар, температуре роста 630°C и мольным соотношении $AsH_3/Ga(CH_3)_3$ равным 55.

Измерение электрофизических параметров - концентрацию и холловскую подвижность носителей заряда, в полученных в рамках данной работы образцах GaAs проводили 4-контактным методом Ван-дер-Пау при температурах 300 и 77 К. Толщину выращенных ЭС рассчитывали весовым методом.

Контроль содержания лимитируемых примесей металлов в исходных веществах и полученных образцах ТМГ проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой PRODIGY ICP методом прямого ввода пробы, а также химико-спектральным методом с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра «Квант-2АТ» и атомно-эмиссионного спектрографа PGS-2 с фотоэлектрической приставкой ФЭП – 454 М.

Для оценки влияния чистоты триметилалюминия на содержание электрически активных примесей в ТМГ, полученном по реакции трихлорида галлия с триметилалюминием (уравнение 1), нами были использованы две партии алюминийорганического соединения – ТМА-1 и ТМА-2, с различным содержанием примесей. Обе партии триметилалюминия были получены по реакции смеси металлических алюминия и магния с йодистым метилом. Степень чистоты партии ТМА-1 была ниже. Согласно результатам спектрального анализа основной электрически активной примесью в ТМА-1 был кремний с содержанием $9 \cdot 10^{-4}$ масс.%. В образце ТМА-2 содержание примесей соответствовало квалификации 5N, концентрация кремния была ниже $5 \cdot 10^{-5}$ масс.%.

Полученные из указанных партий триметилалюминия образцы триметилгаллия - сырец ТМГ-1 и сырец ТМГ-2 соответственно, были исследованы на содержание примесей металлов, а также испытаны в эпитаксиальном процессе роста GaAs. Электрофизические характеристики выращенных ЭС приведены в таблице 1.

Как следует из представленных в таблице 1 данных функционального контроля, при тестировании в МОС - гидридном процессе указанных образцов ТМГ в обоих случаях были получены слои электронного типа проводимости. Сравнение измеренных значений фоновой концентрации носителей заряда (электронов) в слоях, выращенных из сырца ТМГ-1 ($n = (1-2) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и сырца ТМГ-2 ($n = (5-7) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$), показывает, что использование для синтеза триметилгаллия партии предварительно очищенного

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

триметилалюминия (ТМА-2) позволило более чем на порядок снизить содержание электрически активных примесей в синтезированном продукте.

Спектральный анализ сырца ТМГ-1 и сырца ТМГ-2 показал, что преобладающей лимитируемой примесью в указанных образцах является кремний с содержанием $2.2 \cdot 10^{-3}$ масс.% и $2.5 \cdot 10^{-4}$ масс.% соответственно. Сопоставление данных спектрального анализа исходных веществ и синтезированных образцов ТМГ позволяет сделать вывод, что основным источником поступления примеси кремния в сырец ТМГ-1 является исходная партия ТМА-1, тогда как происходящее в процессе синтеза загрязнение сырца ТМГ-2 примесью кремния во многом обусловлено её переходом из трихлорид галлия.

Для исследования поведения электрически активных примесей на стадии очистки синтезированные образцы ТМГ-1 и ТМГ-2 были подвергнуты ректификации при пониженном давлении. Полученные фракции, обогащённые как более летучими, чем ТМГ, соединениями (лёгкие фракции – ЛФ), так и менее летучими (тяжёлые фракции – ТФ), а также очищенный продукт - ректификат, были исследованы на примесный состав и использованы в процессе роста ЭС GaAs, результаты измерения электрофизических характеристик которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Электрофизические характеристики ЭС GaAs, выращенных с использованием исследуемых образцов ТМГ

Характеристика ТМГ	Концентрация (n, p) и подвижность носителей заряда при 300К (μ_{300}) и 77 К (μ_{77})		
	(n, p), см ⁻³	μ_{300} , см ² /В×с	μ_{77} , см ² /В×с
ТМГ – 1			
Сырце	(n) $(1-2) \times 10^{16}$	4200 - 4300	10000 - 15000
Ректификат	(n) $(2-3) \times 10^{14}$	7000 - 7300	90000-110000
ЛФ	(n) $(4-5) \times 10^{16}$	4100-4200	5800-6500
ТФ	(n) $(1-2) \times 10^{17}$	3700 - 3800	4600 - 4800
ТМГ – 2			
Сырце	(n) $(5-7) \times 10^{14}$	6100-6500	64000-67000
Ректификат	(n) $(0,7-1) \times 10^{14}$	7700-7800	130000-132000
ЛФ	(n) $(2-3) \times 10^{15}$	5800-6400	55000-58000
ТФ	(n) $(1-2) \times 10^{16}$	4400-4600	12000-14000
ТМГ – 3			
Сырце	(p) $(0.8-1) \cdot 10^{16}$	200-230	1500-1800
ТМГ – 4			
Сырце	(p) $(5-7) \cdot 10^{15}$	280-300	2500-3000
ТМГ – 5			
Сырце	(p) $(0.9-3) \cdot 10^{15}$	340-370	3600-4300
Ректификат	(n) $(4-5) \cdot 10^{14}$	7300-7700	87000-95000
ЛФ-1	(p) $(1 - 2) \cdot 10^{17}$	220-250	770-750
ЛФ-2	(p) $(1 - 5) \cdot 10^{15}$	350-370	4600
ТФ	(n) $(0.9 - 1) \cdot 10^{16}$	4500-5100	8500-10000

Как видно из таблицы 1, ЭС GaAs, выращенные с использованием фракций, полученных при ректификации сырца ТМГ-1 и сырца ТМГ-2, во всех случаях имеют электронный тип проводимости, что

позволяет говорить о ТМГ, синтезированном по обменной реакции хлорида галлия с триметилалюминием, как об источнике примесей преимущественно n-типа. Полученные результаты свидетельствуют, что присутствующие как в сырце ТМГ-1, так и в сырце ТМГ-2 донорные примеси находятся в основном в виде менее летучих, чем триметилгаллий, соединений. На данный факт указывает значение концентрации носителей заряда – электронов в ЭС GaAs, выращенных из тяжёлых фракций, которое в обоих случаях выше аналогичного параметра, измеренного для слоёв, полученных с использованием лёгких фракций.

Сопоставление результатов функционального контроля с данными спектрального анализа показывает, что уровень фонового легирования ЭС GaAs, полученных из ЛФ, в основном определяется концентрирующей в процессе ректификационной очистки в указанной фракции примесью кремния. Тогда как происходящее во время эпитаксиального роста неконтролируемое легирование слоёв GaAs, выращенных с участием ТФ, связано с присутствием в испытываемой фракции примесей олова и свинца.

Процесс получения триметилгаллия с участием в качестве исходного реагента металлического магния включал три синтетических подхода. Первый (ТМГ-3) заключался в прямом алкилировании смеси порошков галлия и магния йодистым метилом в эфирной среде (уравнение 2). Второй (ТМГ-4) и третий (ТМГ-5) способы состояли в предварительном получении метильного реактива Гриньяра как алкилирующего агента для последующей реакции обмена со смесью метилйодидов галлия (уравнение 3) и эфиром трийодида галлия (уравнение 4) соответственно.

Из синтезированных перечисленными выше методами образцов ТМГ были выращены ЭС GaAs. Согласно представленным в таблице 1 данным функционального контроля, полученные с использованием сырца ТМГ-2, сырца ТМГ-3 и сырца ТМГ-4 ЭС GaAs во всех случаях обладали дырочным типом проводимости, что свидетельствует о преобладающей роли примесей p-типа в исследуемых образцах триметилгаллия. Однако, измеренное значение подвижности носителей заряда (дырок) указывает на высокую степень компенсации, имеющей место в полученных ЭС, что, в свою очередь, говорит о значительном загрязнении триметилгаллия примесями не только акцепторного, но и донорного типа. Результаты спектрального анализа свидетельствуют, что преобладающей примесью p-типа в указанных образцах триметилгаллия является цинк, тогда как примесью n-типа – кремний. Основными источниками поступления данных примесей в целевой продукт являются металлические магний и галлий.

Изучение поведения электрически активных примесей на стадии ректификационной очистки проводили на примере ТМГ-5. Для этого полученные в процессе ректификации две последовательно отобранные лёгкие фракции (ЛФ1 и ЛФ2 соответственно), тяжёлая фракция (ТФ) и очищенный продукт - ректификат были исследованы на содержание примесей металлов и испытаны в эпитаксиальном процессе роста GaAs (таблица 1).

Из данных спектрального анализа следует, что преобладающие в сырце примеси цинка и кремния преимущественно концентрируются в лёгких фракциях, в основном ЛФ1. Вместе с тем, согласно приведённым в таблице 1 данным функционального контроля, наибольший вклад в фоновое легирование слоёв в процессе их эпитаксиального роста вносят примеси p-типа (Zn). Так, при тестировании фракций ЛФ1 и ЛФ2 в МОС-гидридном процессе в обоих случаях были получены слои дырочного типа проводимости с концентрацией носителей заряда – дырок на уровне $(1-2) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $(1-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. В противоположность этому, во фракции, обогащённой высококипящими продуктами, доминирующую роль играют примеси n-типа. Из таблицы 1 видно, что ЭС GaAs, выращенные с использованием полученной в процессе ректификации сырца ТМГ-5 тяжёлой фракции (ТФ), обладали электронным типом проводимости с уровнем фонового легирования $(0.9-1) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Результаты спектрального анализа показывают, что основными лимитируемыми примесными компонентами в указанной фракции являются олово и свинец.

На основании результатов измерения электрофизических характеристик ЭС GaAs, выращенных с использованием полученных в рамках исследования очищенных продуктов (ТМГ-ректификат), можно сделать вывод, что методика, включающая в себя проведение синтеза по реакции алкилирования тригалогенидов галлия метильными производными алюминия (уравнение 1) и магния (уравнение 4) с последующей ректификационной очисткой полученного продукта, позволяет осуществлять получение высокочистого триметилгаллия с низким уровнем содержания электрически активных примесей. Так, из приведённой таблицы 1 видно, что во всех случаях ЭС GaAs, выращенные из триметилгаллия-ректификата, имеют низкий уровень фонового легирования $(0,7 - 5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и высокую подвижность носителей заряда при 77 К с пиковыми значениями - $110000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (ректификат ТМГ-1), $132000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (ректификат ТМГ-2) и $95000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (ректификат ТМГ-5), что соответствует, согласно литературным данным, наиболее чистым образцам ЭС GaAs, полученным из ТМГ и арсина методом МОС-гидридной эпитаксии.

Литература

1. Adachi S. GaAs and related materials: bulk semiconducting and superlattice properties // World Scientific Publishing Co.
2. Асеев А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии. 2006. №1. С.97-110.
3. Stringfellow G.B. Organometallic vapor – phase epitaxy: theory and practice. Elsevier. 1999. P. 35-142.
4. Hanna M.C., Lu Z.H.//Journal of Crystal Growth.1992.V.124.P.443-448.
5. Ревин М.В., Артёмов А.Н., Сазонова Е.В. // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86. № 9. С. 1389.

**RESEARCH OF INFLUENCE ELECTRICALLY ACTIVE IMPURITIES
FROM THE SYNTHESIZED BY DIFFERENT METHODS
TRIMETHYLGALLIUM ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF GALLIUM ARSENIDE EPITAXIAL LAYERS**

M.V. Revin¹, A.P. Kotkov¹, G. V. Medvedev¹,
N.V. Svinkov¹, A.N. Artemov², E.V. Sazonova²

¹JSC «RPC «Salut», Nizhny Novgorod
²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Results of investigation of behaviour of impurities (including the electrically active impurities in GaAs) during synthesis and purification of trimethylgallium (TMG) are presented. The content of electrically active impurities was determined by the method of functional control, which is based upon the measurement of electrophysical properties of GaAs epitaxial layers. The GaAs layers were grown by MOVPE (metalorganic vapour phase epitaxy) technique using test samples of trimethylgallium and high purity arsine. It was shown that the TMG synthesized by the exchange reaction of gallium trichloride with trimethylaluminum is a source of n-type impurities, mostly IV-group elements (Si, Sn, Pb). TMG obtained by using as the starting material of metallic magnesium is a source of both p-type impurities, mostly Zn, and n-type impurities, mostly Si.

**ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПЛАНАРИЗАЦИЯ
ПОДЛОЖЕК И ОБРАБОТКА ТОНКИХ ПЛЕНОК МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
МЕТОДОМ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ**

к. т. н. Худoley А.Л., к. ф.-м. н. Колпашиков В.Л., Городкин Г.Р.

Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ

Высокоточная обработка поверхностей подложек, элементов микроэлектроники и оптоэлектроники может быть эффективно осуществлена за счет применения магнитореологической жидкости [1-3]. Такой метод обработки в отечественных источниках называют магнитореологическим полированием (МРП), а в зарубежных – магнитореологическим финишированием (MRF). На примере использования данного вида обработки для кремниевой пластины диаметром 300 мм показано, что применение МРП позволяет достичь уменьшения разнотолщинности пластины с 449 нм до 95 нм по всей апертуре и плоскостности не более 20 нм практически 90-95 участкам из 109 измеряемых [4].

В основе метода МРП лежит использование магнитореологических жидкостей [5]. Магнитореологическая жидкость (МРЖ) представляет собой сложную систему, состоящую из жидкой среды, магнитных микрочастиц и абразивных наночастиц. Фактически МРЖ выступает в роли рабочего инструмента. Процесс съема материала с поверхности представляет собой массоперенос (унос материала), который сопровождается трибологическими и механохимическими взаимодействиями. Ближайший аналог в технике данной разработки – это обработка поверхности малым инструментом. Отличие, от аналога заключается в том, что МРЖ является интеллектуальным инструментом, операционные свойства которого можно регулировать путем варьирования состава МРЖ, изменения параметров магнитного поля, формы несущей поверхности (полировальника) и скорости ее движения. Для автоматизации технологии МРП необходимо, чтобы инструмент прошел по обрабатываемой поверхности в режиме по заданной траектории, что на практике реализуется применением станков с ЧПУ.

МРП является универсальным методом обработки, который позволяет реализовать три принципиально разные технологии: полирования, формообразования и ретуши. При полировании с поверхности равномерно снимается слой материала. Формообразование осуществляют посредством контролируемого удаления части материала, целенаправленно изменяя форму поверхности. Режим

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

“ретушь” характеризуется снятием неравномерного по величине припуска материала с различных участков поверхности.

Полная автоматизация МРП обеспечивает достижение высокого уровня воспроизводимости результатов как для отдельных участков единичного изделия, так и серии деталей с габаритными размерами от 3 мм до 2,5 метров. Технология является экологически чистой и не требует применения защитной среды или вакуума.

На рис.1 приведен пример обработки пластины диаметром 200 мм в режиме “полирование”.

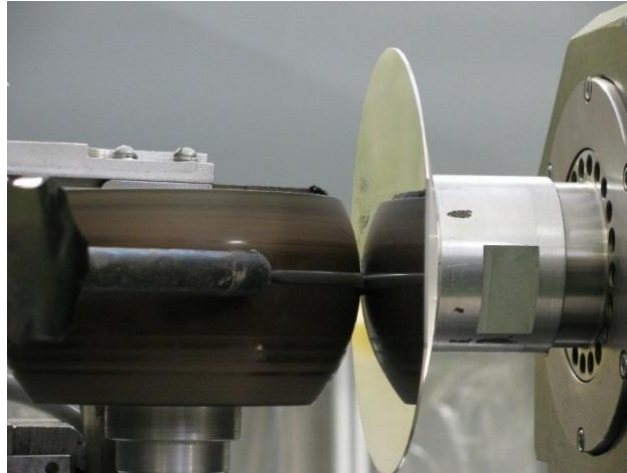


Рис.1. Обработка пластины методом МРП

На рис.2 показано изображение поперечного сечения кремниевой пластины с нанесенным слоем, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

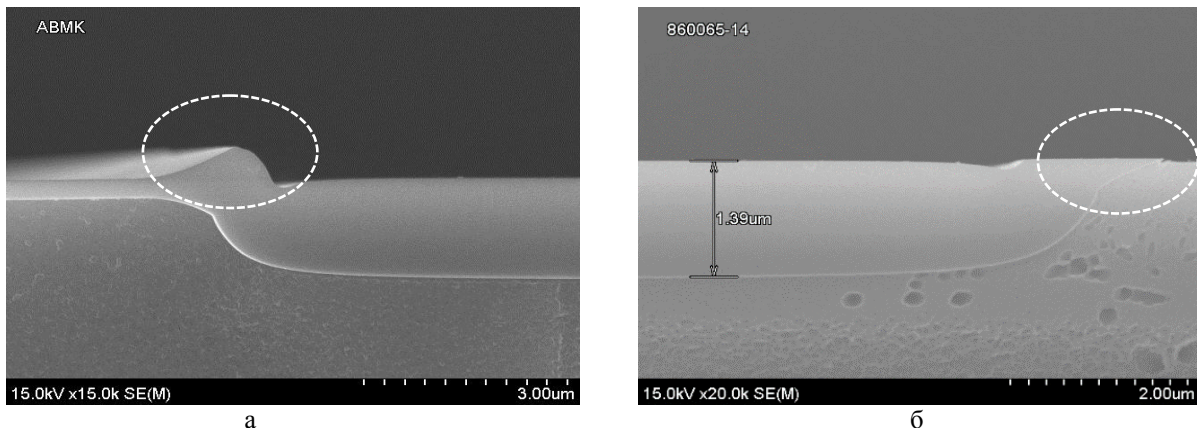


Рис. 2. СЭМ Изображения поперечного сечения кремниевой пластины с нанесенным слоем:
а – до МРП обработки; б – после МРП обработки

Нами установлено, что МРП позволяет производить съем тончайших слоев материала без деструктивного деформационного воздействия на обрабатываемую поверхность, поэтому данный вид обработки может быть эффективно использован для полирования тонких пленок и слоев нанометровой толщины. Существенным отличием технологии МРП от традиционных методов обработки является то, что отделенный от поверхности материал постоянно уносится из рабочей зоны потоком магнитореологической жидкости, что также обеспечивает эффективный отвод тепла, тем самым минимизируя температурное воздействие на обрабатываемый материал. МРП позволяет удалять поверхностные дефектные слои, что, например, на порядок повышает лучевой прочности оптического изделия. Точностные параметры формы обрабатываемых изделий достигают величин $\lambda/120$ - $\lambda/150$, а уровень шероховатости поверхности - до $R_q=0,2$ нм. Следует отметить, что существенное влияние на уровень шероховатости поверхности при МРП оказывает качество выполнения предшествующей обработки и технология получения (синтеза) материала, обуславливающая особенности его морфологического строения.

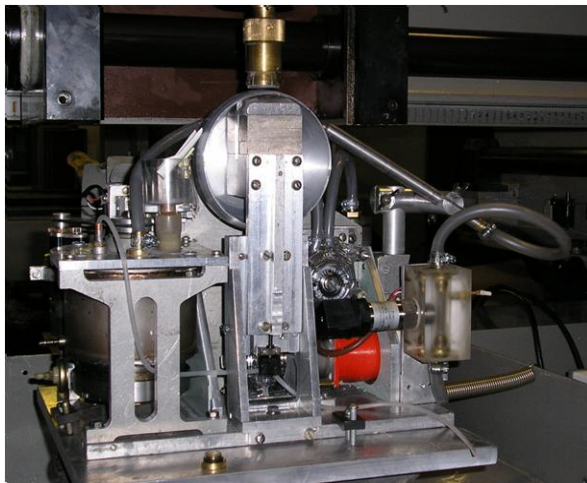
На примере МРП обработки подложек из алюминиевых сплавов после алмазного микрооточения показано, что такая технология может быть эффективно использована не только для суперфинишной

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

обработки, но и для полувыводки и чистовой доводки, первоначально достаточно грубых поверхностей изделий из металлических немагнитных сплавов [6].

Приведем некоторые применения технологии МРП, а именно:

- уменьшение разнотолщинности подложки;
- планаризация поверхностей интегральных схем, имеющих сложное морфологическое и топологическое строение, для изготовления компонентов 3D электроники. Финишная обработка тонких пленок и слоев нанометровой толщины (режим “полирование”);
- использование МРП при обработке слоев и подложек вместо технологии химического травления;
- снятие дефектных (выбракованных) поверхностных слоев с целью дальнейшего использования подложки;
- формирование асферической поверхности оптического изделия, имеющего первоначальную сферическую форму (режим “формообразование”);
- автоматизированная обработка локальных участков поверхности со снятием различного припуска (режим “ретушь”);
- снятие тончайшего дефектного слоя, образовавшегося при выполнении предшествующих операций, для повышения лучевой прочности оптических элементов лазерных систем (включая изделия из водорастворимых кристаллов);
- финишная обработка поверхностей длинномерных труб, калибров, сложных сочленений, прецизионных направляющих, выполненных из немагнитных металлических сплавов;
- обработка сегментных асферических металлооптических элементов после алмазного микрооточения и последующее финишное полирование аморфного покрытия;
- полирование крупногабаритной оптики, зеркал и сегментов зеркал, изготовленных из церодура, ситалла и карбида кремния.



а



б

Рис. 3. Оборудование для МРП обработки:

а – модуль для полирования, б – установка на базе станка с ЧПУ

Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси разрабатывает и поставляет Заказчикам технологии и оборудование (рис.3) для высокоточного формообразования и финишного магнитореологического полирования плоских, сферических и асферических поверхностей прецизионных деталей. Габаритные размеры обрабатываемых изделий от 3 мм до 2,5 метров, среднеквадратичная точность формы до $\lambda/150$; шероховатость поверхности R_q до 0,2 нм.

Литература

1. Harris, D.C. History of Magnetorheological Finishing / D.C. Harris // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8016. P. 1-22.
2. Pat. US 5449313 Magnetorheological polishing devices and methods / W.I. Kordonsky, I.V. Prokhorov, S.R. Gorodkin, G.R. Gorodkin, L.K. Gleb, B.E. Kashevsky; заявл. 04.06.1993; опубл. 12.09.1995. – 36 с.
3. Кордонский, В.И. Магнитореологическое полирование оптических поверхностей / В.И. Кордонский, С.Р. Городкин // Оптический журнал. 2012. № 79 (9). С.81–95.
4. Diebold A.C., McDonald R., Garner C. M., Herr D., Khosla R.P. and Secula E.M. Manufacture and Metrology of 300 mm Silicon Wafers with Ultra-Low Thickness Variations / 2007 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology , National Institute of Standards and Technology, Semiconductor Electronics Division, Gaithersburg 27-29 March 2007, MD, USA. - AIP Conference Proceedings 931 - p.105-110.

5. Худoley А.Л., Городкин Г.Р., Глеб Л.К., Александронец А.С. Высокоточная обработка поверхностей материалов с использованием магнитореологических жидкостей // Наука и инновации. – 2015. – № 6. – С.20-23.

6. Худoley А.Л. Магнитореологическое полирование металлооптических элементов / А.Л. Худoley, Г.Р. Городкин, Д.Г. Соколовский, А.С. Александронец // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы третьей Междунар. научн.-практ. конф., 28-29 апр. 2015, Минск, С. 283-285.

Контакты: Худoley Андрей Леонидович, e-mail: khudoley@hmti.ac.by

RECEIVING THE ULTRA-SMOOTH SURFACES, PLANARIZATION OF SUBSTRATES AND PROCESSING OF THIN FILMS OF MICROELECTRONICS BY MAGNETORHEOLOGICAL POLISHING METHOD

A. L. Khudoley, V. L. Kolpashikov, G. R. Gorodkin

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NASB

The problems of receiving the ultra-smooth surfaces, planarization of substrates and processing of thin films of micro- and optoelectronics by magnetorheological polishing method are discussed. The high efficiency of the usage of magnetorheological fluids for polishing and shaping (planarization, aspherization) surfaces of non-magnetic materials is demonstrated for components with dimensions from 3 to 2500 mm.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

д.т.н. Бородин А. В. Ширяев Д.Б., Юдин М. В.

ФГУП «Экспериментальный завод научного приборостроения РАН»

На сегодняшний день в мире обостряется конкуренция на рынке производства в различных областях промышленности и науки, в том числе и наукоемкого лабораторного и промышленного технологического оборудования, что заставляет производителей искать пути снижения производственных издержек и сроков вывода новой продукции на рынок. При серийном производстве чаще всего применяются методы снижения стоимости непосредственно производственных этапов путём совершенствования технологий производства, унифицирования компонентов и т.д. В случае же новых разработок и мелкосерийного производства крупных наукоемких изделий снизить технологические издержки является затруднительным, значительную часть затрат составляет этап проектирования, выпуска конструкторской документации, создания макетных образцов продукции. За производством опытного образца следует этап выявления слабых мест, методов улучшения характеристик, расширения функциональных и аналитических возможностей оборудования, отработка эргономики места пользователя и т.п. Данный цикл может повторяться неоднократно, т.к. заранее крайне сложно предсказать и отсеять заведомо тупиковые ветви развития, а также заметить и устранить все ошибки проектирования. Это приводит к нарушению графика выполнения работ, росту себестоимости продукции, несоответствия продукции требованиям рынка. Таким образом, стоимость разработки нового оборудования может составлять 2 – 3 стоимости материального производства проектируемого изделия, стоит отметить, что значительной является и временная составляющая этих затрат.

Одним из эффективных методов снижения затрат на этапе проектирования оборудования является внедрение и использование современных систем автоматизированного проектирования (далее САПР). Наиболее эффективно себя показывают САПР позволяющие осуществлять параметрическое проектирование на базе твердотельных 3-х мерных моделей деталей и сборочных единиц, с последующим автоматизированным построением 2-ух мерных чертежей и оформлением их. В дальнейшем графика чертежа по стандартам ЕСКД формируется с полученной 3-ех мерной модели детали в автоматическом режиме, разработчик лишь тратит время на финальное оформление чертежа. В последующем из таких деталей средствами САПР формируются сборочные единицы и, соответствующая КД (сборочные чертежи, спецификации). В параметрических САПР изменения размеров или параметров (например, размерных коэффициентов) в первоначальных эскизах деталей и (или) в сформированных чертежах приводит к перестроению изменяемой детали или сборочной единицы во всех элементах этой

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

цепочки разработки КД, кроме того визуализация и возможности САПР позволяют провести контроль собираемости и технологичности разрабатываемых узлов. Установка для выращивания монокристаллов карбида кремния и отжига эпитаксиальных пластин, разработанная с помощью САПР Pro Engineer, показана на рис.1.



Рис. 1. Промышленная установка «НИКА-ПРОФИЛЬ 10» для выращивания профилированных кристаллов сапфира

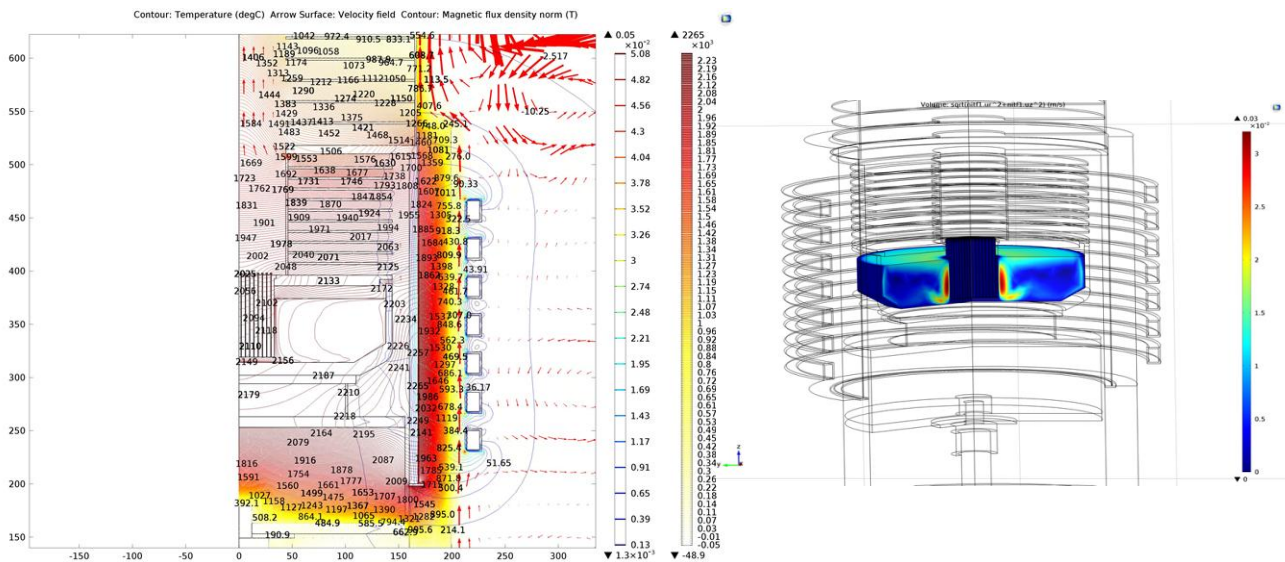


Рис. 2. Распределение температуры и поля скоростей течения защитного газа и расплава в тигле (показано отдельно)



Рис. 3. Модель и реальное исполнение установки для выращивания монокристаллов карбида кремния и отжига эпитаксиальных пластин

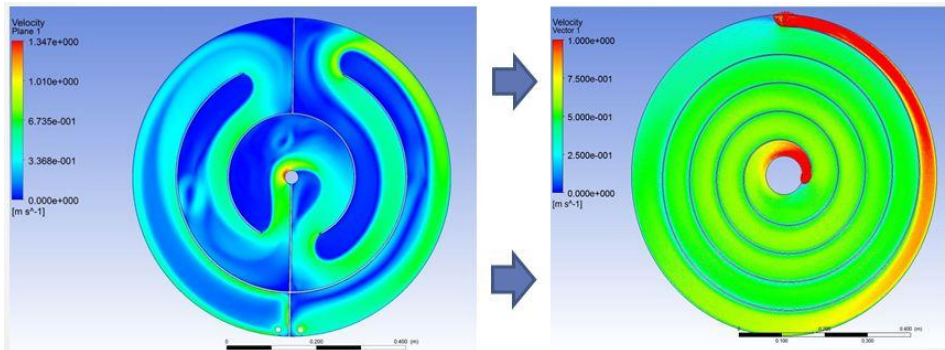


Рис. 4. Распределение скоростей течения охлаждающей жидкости в элементе рабочей камеры в зависимости от геометрии канала охлаждения

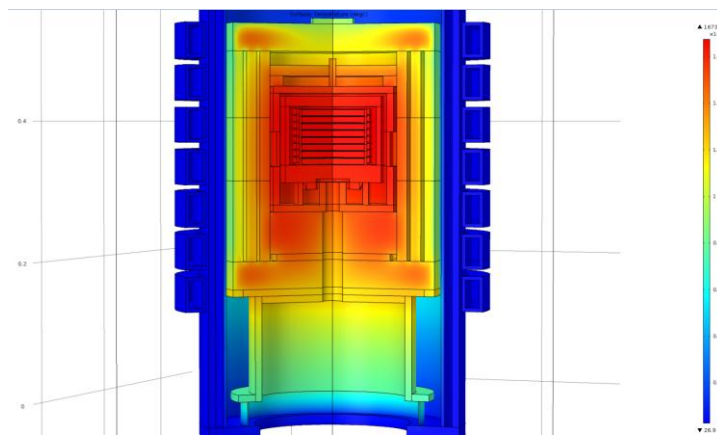


Рис. 5. Распределение температуры в зоне отжига эпитаксиальных пластин SiC

Не менее перспективным методом, позволяющим значительно ускорить и повысить качество результата разработки, является численное моделирование в современных расчетных системах (Computer-aided engineering), таких как ANSYS, NX Nastran, Star-CD, Comsol и прочие. Следует понимать, что виртуальные эксперименты не способны полностью заменить реальные, но они могут в разы или даже на порядки сократить количество необходимых экспериментальных исследований.

Примером подобного рода является моделирование взаимосвязанных физических процессов, происходящих в тепловой зоне для выращивания профилированных кристаллов сапфира (Рис.1, Рис.2). Модель включает индукционный нагрев, теплопередачу в твердом теле, радиационный теплообмен, гидродинамику в расплаве, газовую динамику в камере, взаимодействие расплава с ЭМ полем индуктора. Полученные результаты (рис.3, рис.4) полностью коррелируют с экспериментально наблюдаемыми

закономерностями и позволяют направленно улучшать характеристики технологического процесса и оборудования.

Другим примером является разработка конфигурации канала охлаждения конструктивных элементов камеры рабочей зоны установки для отжига эпитаксиальных пластин карбида кремния (рис.3). В результате численного моделирования течения охлаждающей жидкости, посредством решения уравнений Рейнольдса с использованием модели турбулентности, была решена проблема с неравномерным распределением температуры рабочей зоны (рис.4). С помощью численного решения связанных задач индукционного нагрева и радиационного теплообмена была проведена оптимизация конструкции теплового узла установки отжига пластин монокристалла карбида кремния, позволившая изготовить сложнейшее технологическое устройство с минимальным количеством макетных и экспериментальных образцов (рис. 5)

Контакты: Бородин Алексей Владимирович, e-mail: borodin@ezan.ac.ru

APPLICATION OF COMPUTER-AIDED DESIGN AND NUMERICAL SIMULATION FOR DESIGN OF HIGH-TEMPERATURE EQUIPMENT AND TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PRODUCTION AND ANNEALING OF MATERIALS

A.V. Borodin, D.B. Shiryayev, M.V. Yudin

Experimental Factory of Scientific Engineering and Special Design Department of RAS

The report describes the application of computer-aided design and numerical simulation for design of the high-temperature furnaces and thermal units for shaped sapphire growing process and annealing of SiC epitaxial wafers. The use of these systems significantly shortens time of equipment design and allows making of a complex technological equipment with minimal breadboarding and experimental research.

ВЫСОКОЧИСТЫЕ ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ ДЛЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

д. т. н. Глебовский В.Г.¹, к. ф.-м. н. Чепурнов А.С.²

¹ Институт физики твердого тела РАН

² НИИ ядерной физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Повышение плотности тока и удельной рассеиваемой мощности в микроэлектронных устройствах со сверхбольшой степенью интеграции (СБИС) при одновременном уменьшении характерных размеров их элементов до субмикронного уровня приводит к развитию таких негативных процессов как электромиграция, межслоевая диффузия, образование интерметаллидов на межслоевых границах и т.д. Прямым следствием этих процессов является деградация интегральных микросхем с металлизацией из легкоплавких металлов. Наиболее перспективным путем, позволяющим практически полностью избежать указанных негативных эффектов в СБИС, является использование для тонкопленочной металлизации тугоплавких металлов 4, 5 и 6-й групп Периодической системы элементов (Mo, Ti, W, Ta и др.). Переход к субмикронным размерам в СБИС обусловил специфические и чрезвычайно высокие требования к чистоте этих металлов. Для нанесения тонких пленок необходимы тугоплавкие металлы с весьма низким содержанием примесей внедрения (C, O, N, H на уровне ppm), щелочных металлов (K, Na на уровне ppm/ppb), α -радиоактивных металлов (Th, U на уровне ppm/ppb). Повышенные требования предъявляются также к химической и структурной однородности распыляемых металлов и наносимых пленок.

Тугоплавкие металлы и их силициды являются прекрасной альтернативой Al и поли-Si, поскольку обеспечивают значения поверхностного сопротивления на уровне 0,5-1 Ом/□ (металлы) и 3-5 Ом/□ (силициды) в слоях толщиной до 0,5 мкм и сохраняют достоинства поли-Si. Постепенному вытеснению Al и поли-Si при металлизации СБИС способствует также широкое использование в технологии микроэлектроники высокотемпературных процессов, усложняющих или исключающих применение Al. В настоящей работе кратко приведены результаты изучения физико-химических и технологических аспектов получения высокочистых тугоплавких металлов для формирования тонких металлических и силицидных пленок, используемых в производстве современных СБИС [1-4].

Макрометаллургический аспект

Проанализированы и проведены физико-химические исследования по удалению «газовых» примесей внедрения на расплавленных и твердых образцах всех исследуемых тугоплавких металлов. Исследования

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

проводили в условиях вакуума и бесконтактного электронного, индукционного и лазерного нагрева. Для анализа «газовых» примесей использованы методы вакуумной экстракции и активационные методы. Для анализа щелочных и α -активных металлов, а также других значимых примесей использованы активационные методы и масс-спектрометрия с индукционно связанной плазмой. Установлены возможности, пределы и параметры вакуумной очистки металлов в зависимости от их природных физических характеристик. На основании полученных результатов отработано несколько технологических схем получения мишеней для магнетронного распыления из высокочистых Mo, Ti, W, V, Ni, Ta и др., а также композиций (Ti-W, VNi и др.) на их основе [5-8]. Базовая технология состоит в получении слитков круглого или плоского сечения методами электронно-лучевого вакуумного переплава, холодной/вакуумной пластической деформационной обработки, механической обработки и вакуумной диффузионной сварки. В качестве исходного материала для получения распыляемых мишеней использовали как прессованные материалы из порошков высшей промышленной чистоты, так и материалы, подготовленные специальными методами глубокой химической очистки (разработаны в ИФТТ РАН). Разработанные технологии позволяют получать распыляемые металлы достаточно высокой чистоты (таблица 1). Из литых и прокатанных высокочистых тугоплавких металлов изготавливали магнетронные мишени различной конструкции: цилиндрические - диаметром от 40 до 240 мм, прямоугольные - 100x300x25 мм и 130x260x25 мм. В ИФТТ РАН создано сертифицированное (ТУ) производство магнетронных мишеней, обеспечивающих не только все версии отечественных «Ораторий», но и импортные распылительные устройства [9-11].

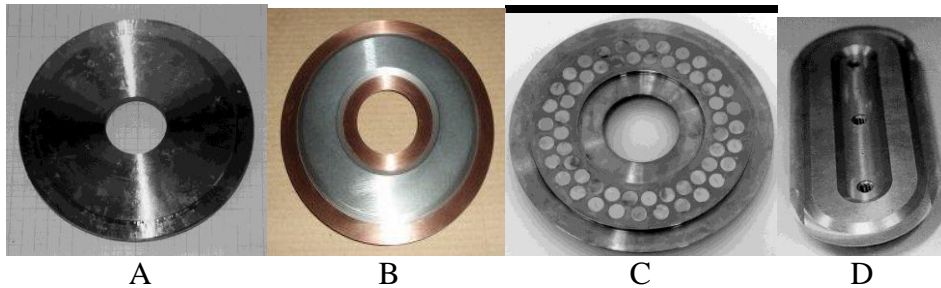


Рис. 1. Магнетронные мишени из высокочистых тугоплавких металлов: А–Мо; В–Мо(Cu); С–W-Ti; D-Ni

Таблица 1. Примесный состав металлов, использованных для магнетронных мишеней (ppm)

	Mo	W	Ta	Nb	V	Ti	Zr	Hf
C	10	30	30	40	20	30	50	50
O	1	0.5	5	5	200	400	100	10
H	0.2	-	2	1	-	-	-	-
N	5	5	5	5	5	5	5	5
K,Na	0.6	2	1	1	1	8	11	-
W	20	-	2	20	-	100	-	-
Nb	-	-	30	-	-	2	-	-
Ta	2	1	-	50	30	-	-	-
Ост	9.8	12.5	18.2	36	41	34.7	483	20.1

Микрометаллургический аспект

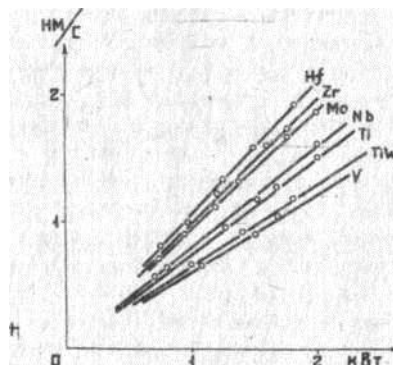


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения тугоплавких металлов от мощности разряда

Исследование процесса магнетронного распыления проводили на стандартных установках класса «Оратория» плоскопараллельной и планетарной конструкций. Напыление производили на пластины

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

кремния диаметром 76-100 мм, подвергнутых стандартной предварительной обработке. При нанесении пленок тугоплавких металлов в оптимальных условиях (поток загрязняющих газов в область разряда не более 3×10^{-8} Па.м³/с, скорость осаждения 0,5 нм/с) установлено сильное влияние исходной чистоты материала мишени на электрофизические характеристики напыляемых металлических пленок. Исследование процесса магнетронного распыления показало, что скорость осаждения при постоянном давлении практически линейно зависит от мощности распыления (рис. 2)

В результате магнетронного распыления на мишенях образовывались зоны эрозии. Из-за конструктивных особенностей стандартных магнетронов, используемых в «Ораториях», распыляется всего 10-15% от массы мишеней, и затем распыление идет нестабильно. Отработано два технологических варианта компенсации указанной особенности магнетронов: использование кольцевых вставок и наплавление слоя того же металла в зоне эрозии. Коэффициент использования "вставок" или наплавки составляет 0.8-0.9. Продолжительность работы мишеней после такой регенерации увеличивалась в 20-25 раз.

Данные по удельному сопротивлению металлических пленок толщиной $\sim 0,15$ мкм, полученных распылением магнетронных мишеней из тугоплавких металлов, прошедших металлургическую обработку по разработанной базовой технологии, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Удельное сопротивление (мкОм.см) тугоплавких металлов

	Mo	W	V	Nb	Ta	Ti	Zr	Hf
Пленка	8.0	15.0	27.1	17.4	16.8	49.2	41.8	48.3
Мишень	5.2	5.5	25.0	-	12.7	41.7	-	-

Особый интерес, на наш взгляд, представляют перспективы применения двух металлов - Мо и Тi. Мо, в отличие от остальных тугоплавких металлов, имеет низкое удельное сопротивление и наиболее близкую к Si величину КТР. Мо практически не взаимодействует с SiO₂ - наиболее широко используемым диэлектриком в конструкциях СБИС, а сочетание механических свойств обеспечивает стойкость к механическим повреждениям. Кроме того, при высоком уровне легирования Мо образует с Si омические контакты со сравнительно низким контактным сопротивлением. Магнетронное распыление, обеспечивающее контролируемые условия нанесения пленок, позволяет достаточно полно реализовать возможности распыления Мо. Высокоочищенный Тi уже занял свое законное место в микроэлектронике благодаря высокой стойкости и функциональности барьерных пленок стехиометрического TiSi₂. Однако хотелось бы отметить, что этот металл оказался незаменимым материалом и в других инновационных областях науки и техники, в частности, в ядерной физике при создании низкофоновых детекторов, предназначенных для поисков и исследования «темной материи». Содержание радиоактивных α -примесей Th и U в Тi для таких низкофоновых детекторов должно быть на уровне десятых и сотых долей ppb. Это полностью совпадает с аналогичными требованиями по низкому содержанию α -активных примесей Th и U, предъявляемыми ко всем тугоплавким металлам для применения в микроэлектронике. Однако аналитические сложности при определении содержаний на уровне ppb и ниже не позволили в свое время провести эту часть исследований в полном объеме. В течение последнего года нам удалось объединить задачи получения высокочистого Тi для низкофоновых детекторов с задачами микроэлектроники и уже можно заявлять о заметном прогрессе в этих исследованиях [1-3].

Слой из дисилицидов

Получение дисилицидов осаждением металла на моно-Si и поли-Si с последующей термообработкой для синтеза силицида (дисилицида) - наиболее привлекательный способ, поскольку, с одной стороны, позволяет получать пленки стехиометрического состава, а с другой,- избежать непредсказуемости получения мишеней методами порошковой металлургии. Для создания пленок силицидов с заданными параметрами необходимо иметь четкое представление о механизме превращений в процессе их образования. Это касается как соотношения толщин Si и металла для получения тонких дисилицидных пленок с заданными параметрами, так и оптимизации условий термообработки. Первая часть требований определяется разработкой методики нанесения пленок металла заданной толщины (0,025 - 0,15 мкм) и оптимизацией режима термообработки, что обусловлено исследованием кинетики формирования силицидов.

Процесс формирования силицидов определяется реактивной диффузией Si в металл. Для рационального выбора условий термообработки разработана методика определения ее параметров, основанная на измерении величины изменения объема взаимодействующих металла и Si. Мы исходили из предположения, что новая порция силицида возникает сразу же за фронтом уже образовавшегося силицида при появлении продиффундировавших через него новых атомов Si. Принцип формирования дисилицидов показан на рис.2. Толщины слоев силицида металла $\Delta MeSi_2$, образованного при

Материалы для микроэлектроники и методы их исследования

взаимодействии металла (ΔMe) и Si (ΔSi), находятся друг с другом в соотношениях (рассматривая реакцию на единичной площади):

$$\Delta MeSi_2 = a\Delta Me = b\Delta Si; \Delta Si = \frac{a}{b}\Delta Me = c\Delta Me.$$

Здесь Φ – атомная (молекулярная) масса; γ_{Si} , γ_{Me} , γ_{MeSi_2} – соответственно, плотности Si, металла и дисилицида. Предполагается образование именно дисилицида металла - наиболее устойчивой фазы.

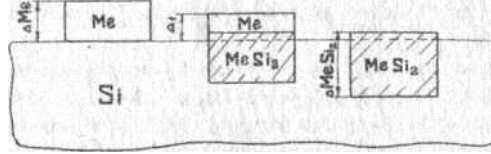


Рис. 3. Постадийная схема отжига для определения параметров реактивной диффузии:

1 - исходное состояние, 2 - частичное образование силицида, 3 - полное образование дисилицида

Используя приведенное соотношение для рассмотрения промежуточной стадии образования

$$\Delta MeSi_2 = \frac{a(\Delta Me - \Delta 1)}{(1 - a + c)} = b(\Delta Me - \Delta 1)$$

силицида, его финальную толщину

рассчитывали по данным, сведенным в таблицы для расчета толщины пленок силицидов 10 тугоплавких металлов. Эксперименты по определению величин, входящих в эти соотношения, проводились следующим образом. На подготовленную поверхность Si наносили слой металла. После фотолитографии и измерения толщины металла производили термообработку композиции при заданной температуре T в течение времени t . После измерения толщины выступающего над поверхностью слоя, вычисляли толщину слоя силицида по приведенным уравнениям. Эту процедуру выполняли для нескольких температур и времен. Полученные данные представлялись в виде зависимостей $f(t)$ для каждой температуры: они имели вид прямых, соответствующих выражению $\Delta MeSi_2 = \sqrt{k \cdot D(T) \cdot t}$ где $D(T)$ – коэффициент реактивной диффузии, определяющий образование силицида. Справедливость описанного подхода подтверждена оже-спектрометрией пленочных структур с частичным и полным преобразованием металла в дисилицид. Установлено наличие одной фазы, идентичной фазе, наблюдавшейся при термообработке металлических пленок, нанесенных на Si (на сапфире). Соотношение толщин слоев Si и металла соответствовало стехиометрическим дисилицидам. В ходе экспериментов измерено удельное сопротивление силицидных пленок - одна из важнейших характеристик, определяющих возможности применения силицидов в СБИС в качестве барьерно-токопроводящих слоев (таблица 3). Здесь же указаны температуры отжига, при которых получены оптимальные значения удельного сопротивления.

Таблица 3. Дисилициды высокочистых тугоплавких металлов, полученные «вжиганием»

Силицид	TiSi ₂	ZrSi ₂	HfSi ₂	CoSi ₂	NbSi ₂	VSi ₂	TaSi ₂	MoSi ₂	WSi ₂
Отжиг	900	900	900	900	900	900	1000	1000	1000
мкОм.см	13-17	40-43	150-260	30	55-63	67-80	60	67-80	50



Рис. 4. Магнетронные мишени из TiSi₂ (до распыления и полностью распыленная)

Литые мишени из силицидов тугоплавких металлов (рис. 4) производили с помощью вакуумной левитационной плавки капсулы металла с Si в ВЧ электромагнитном поле, при этом исходное соотношение массы металла и Si соответствовало стехиометрическому дисилициду [12-17]. Полученные в результате этой операции небольшие плоские слитки дисилицида имели отличную литую поверхность и практически не нуждались в дополнительной механической подготовке. Из плоских слитков изготавливали магнетронную мишень на медном основании с помощью УЗ пайки. Предварительно была опробована схема, включавшая выплавку массивного слитка дисилицида с последующей его электроэрозионной резкой. Оказалось, что получаемые в результате такой процедуры элементы имели грубую поверхность, массу загрязнений и проблемы с подготовкой поверхности каждого элемента из-за высокой твердости и хрупкости силицидов, что полностью исключало использование такой схемы.

Наряду с этими исследованиями, нами были исследованы тонкие пленки дисилицидов, полученные с помощью лазерной абляции. Подробно изучена их структура и электрофизические характеристики.

Проведенные исследования возможностей использования высокочистых тугоплавких металлов в микроэлектронике показали их огромный потенциал для тонкопленочной металлизации СБИС. В широком серийном производстве СБИС установлена высокая надежность и эффективность тонких пленок различного функционального назначения (барьерные, токопроводящие и т.д.).

Литература

1. Glebovsky V.G. UHP Metals for Critical Applications Working meeting "DarkSide Collaboration", Pula, Sardinia, Italy; 06/2015
2. Chepurnov A.S., Glebovsky V.G., Stinov E.D., Chub A.V. Study of the titanium as a candidate for construction material for the next generation of low background detectors. V Int. Conf. "Nano Materials and High-Purity Substances", Suzdal, Russia; 10/2014.
3. Glebovsky V.G., Chepurnov A.S., Stinov E.D. High-Purity Titanium for Critical Applications. V Int. Conf. "Nano Materials & High-Purity Substances", Suzdal, Russia; 10/2014.
4. Glebovsky V.G., Markaryants E.A. Thin film metallization by magnetron sputtering from highly pure molybdenum targets. *J. Alloys & Compounds* 190 (1993) 157–160.
5. Глебовский В.Г., Штинов Е.Д., Сидоров Н.С. Высокочистый вольфрам для тонкопленочной металлизации. Межд. Конф. "Современные технологии для производства материалов", Минск, (2009) 137.
6. Glebovsky V.G., E.D. Stinov, N.S. Sidorov Complex study of processes for production of highly pure molybdenum *Perspective Materials*, 11 (2011) 51-53.
7. Штинов Е.Д., Сидоров Н.С., Глебовский В.Г., Карандашев В.К. Комбинированная очистка титана. *Металлы* 6 (2004) 49-53.
8. Штинов Е.Д., Сидоров Н.С., Глебовский В.Г., Гнесин Б.А. Производство высокочистого кобальта с помощью электронно-лучевой зонной плавки. *Металлы* 4 (2005) 13-17.
9. Штинов Е.Д., Глебовский В.Г. Напыление тонких пленок W-Ti магнетронным распылением литых мишеней. *Перспективные материалы* 2 (2008) 142.
10. Glebovsky V.G., Yastschak V.Y., Baranov V.V., Sackovich E.L. Properties of W-Ti thin films obtained by magnetron sputtering of composite targets. *Thin Solid Films* 257 (1995) 1 – 8.
11. Glebovsky V.G., Markaryants E.A., Titov E.V. Deposition of W-Ti thin films by magnetron sputtering. *Materials Letters* 20 (1994) 89 – 93.
12. Koleshko V.M., Belitsky V.F., Dolgy N.A., Glebovsky V.G., Dulinets Y.C. Technology and application of thin silicide films in semiconductor devices and integrated microcircuits. *Vacuum* 42 (1991) 519 – 607.
13. Shulga Y.M., Glebovsky V.G., Dulinets Y.C., Rubtsov V.I., Borodko Y.G. Electron energy-loss spectroscopy as an analytical tool in the study of TiSi₂/Si interfaces. *Materials Letters* 15 (1993) 325 – 330.
14. Glebovsky V.G., Oganyan R.A., Ermolov S.N., Stinov E.D., Kolosova E.V. Preparation of tungsten disilicide thin films by laser evaporation. *Thin Solid Films* 239 (1994) 192 – 195.
15. Glebovsky V.G., Oganyan R.A., Ermolov S.N., Kolosova E.V. Deposition of cobalt disilicide thin films by laser ablation. *Thin Solid Films* 248 (1994) 145 – 148.
16. Glebovsky V.G., Ermolov S.N., Motuzenko V.N., Stinov E.D. Thin silicide films deposited from cast silicide targets. *Materials Letters* 37 (1998) 44-50.
17. Штинов Е.Д., Глебовский В.Г. Напыление тонких пленок WSi₂ магнетронным распылением литых мишеней. *Перспективные материалы* 2 (2008) 147.

Контакты: glebovs@issp.ac.ru

HIGH-PURITY REFRACTORY METALS FOR THIN-FILM METALLIZATION IN MICROELECTRONICS

V.G. Glebovsky¹, A.S. Chepurnov²

¹ Institute of Solid State Physics RAS

² Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University

Both vacuum and powder metallurgy methods of preparation of highly pure transition refractory metals for magnetron sputtering targets were studied. It is found that a combination of the multiple electron-beam melting, zone melting, levitation melting, and electric arc vacuum melting are the optimal metallurgical techniques to obtain polycrystalline ingots of the highly pure refractory metals for the magnetron targets. Highly sensitive methods of analysis are used to characterize the targets made of the highly pure refractory metals. The specific

resistivity values of the deposited thin refractory films (Mo, Ti, W, Nb, Ta, Zr, Hf, Ni, Co etc.) were found to be strongly dependent on both the sputtering conditions and the initial target purity.

ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ФРАКТАЛЬНОГО НАЧАЛЬНОГО УСЛОВИЯ ПРИ РОСТЕ ПОВЕРХНОСТИ

Китаев А. Е.¹, д. ф.-м. н. Потапов А. А.², Рассадин А. Э.³

¹ ОАО «СКБ РИАП», Нижний Новгород

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

³ НРО РНТОРЭС им. А. С. Попова

В докладе проводится исследование фрактальных свойств поверхности, рост которой описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 = 0. \quad (1)$$

В уравнение (1) входит лишь одна пространственная координата (предполагается, что зависимость от второй пространственной координаты (y) отсутствует, т. е. рассматривается случай цилиндрической образующей).

Возьмем в качестве начального условия F, зависящего от z₀, несколько (N) первых членов ряда, представляющего собой функцию Вейерштрасса [1]:

$$U|_{t=0} = F(z_0) = \sum_{n=1}^{\infty} a^n \cos(\pi b^n z_0). \quad (2)$$

Как известно, эта функция не является дифференцируемой при всех значениях параметров a, b [1] (a при решении задачи нам потребуется ее производная). Но, взяв конечное количество членов ряда, мы будем иметь дело с «хорошей» (дифференцируемой) функцией. График такой функции приведен на рис. 1.

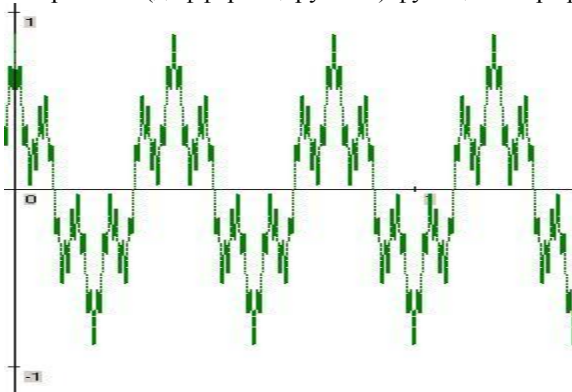


Рис. 1. Начальное условие (2) при N=3, a=0.5, b=5

Решая для уравнения простые дифференциальные уравнения характеристик, соответствующих исходному нелинейному уравнению в частных производных (1), мы получим систему двух алгебраических уравнений [2]:

$$\begin{cases} U = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial F(z_0)}{\partial z_0} \right)^2 t + F(z_0) \\ z = z_0 - \frac{\partial F(z_0)}{\partial z_0} t \end{cases} \quad (3)$$

Для численного решения второго уравнения системы (3) использовался просмотр достаточно большого (десятки тысяч точек) массива значений функции, представляемой левой частью второго уравнения, и поиск перемен знака. На рис. 2 и 3 приведены некоторые результаты численных расчетов.

Был произведен расчет фрактальной размерности (размерности подобия) полученных решений. Использовалась следующая методика [1]: плоскость покрывается прямоугольниками, на каждом шаге линейный размер прямоугольников уменьшается в некоторое количество раз (в данном случае это квадратный корень из 2). На каждом шаге вычисляется величина

$$D_i = \frac{\ln N_i - \ln N_{i-1}}{\ln k_i - \ln k_{i-1}}. \quad (4)$$

Здесь N – число прямоугольников, «задетых» графиком исследуемой функции. А k – это отношение длины стороны первоначального прямоугольника к длине стороны уменьшенного (на данной итерации). Уточним: мы получаем свое значение D для каждой итерации. Если же несколько последовательных итераций дают близкие значения этой величины – тогда мы можем говорить о том, что функция имеет в некотором диапазоне масштабов определенное значение размерности подобия. При расчете использовалось допущение о том, что растяжения и сжатия оси x не влияют на величину размерности геометрического объекта.

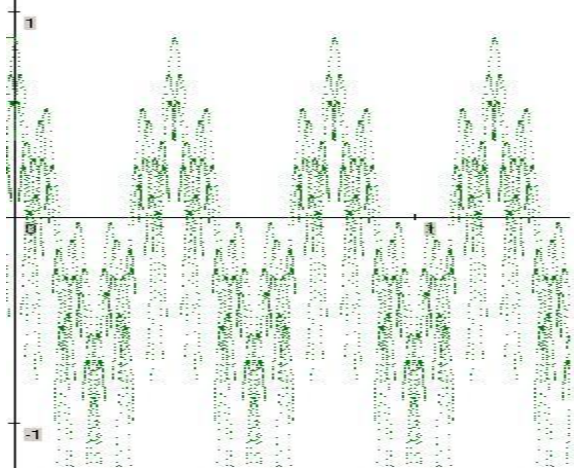


Рис. 2. Решение при $t=0.0005$

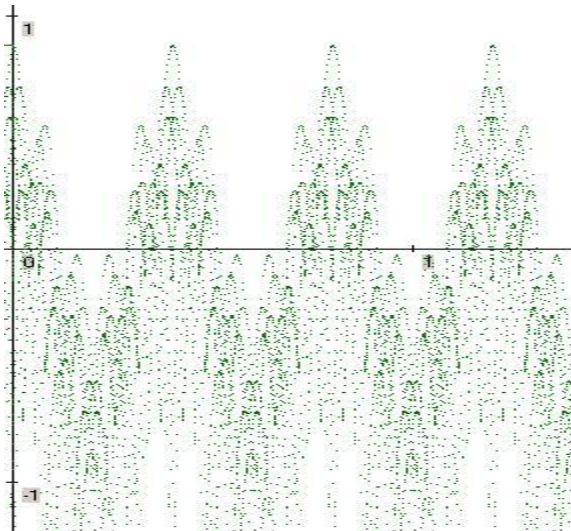


Рис. 3. Решение при $t=0.001$

В таблице 1 указаны значения D_i для 19 итераций (сверху вниз размер прямоугольников уменьшается, т.о. верхние строки соответствуют большим пространственным масштабам). Видно, что с течением времени размерность D , соответствующая большим масштабам (верхние строки) увеличивается. Это можно интерпретировать следующим образом – эволюционирующая кривая имеет тенденцию «заполнить собой» большую долю плоскости.

Впервые применить это уравнение для описания роста поверхности твёрдого тела при осаждении на него частиц по всей видимости было предложено в статье [3]. Позднее оно было реанимировано в книге [2] в качестве модели роста снежной поверхности. Отметим, что изменив знак перед квадратом пространственной производной, мы получим уравнение Гамильтона-Якоби для свободного движения частицы с единичной массой [4].

В радиолокации представляет большой интерес вычисление удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР). Для статической фрактальной поверхности это было сделано в статьях [5-8]. Для растущей согласно уравнению (1) снежной поверхности — с гладкими и с случайными начальными условиями — это было сделано в статьях [9-11]. Таким образом, приведённое исследование является

синтезом двух вышеописанных подходов. Хотя возможно, что более корректно фрактальные эффекты при изучении временной эволюции поверхности будут учтены, если в уравнении (1) обычную частную производную по пространственной координате x заменить дробной производной порядка α ($0 < \alpha < 1$) [1]:

$$\frac{\partial^\alpha U(x,t)}{\partial x^\alpha} \equiv \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^x \frac{U(\xi,t) \cdot d\xi}{(x-\xi)^\alpha}, \quad (5)$$

где $\Gamma(\dots)$ — гамма-функция Эйлера.

Перспективой данного исследования является исследование роста поверхности из фрактального начального условия в двумерном случае и построение образцов полей фрактальной размерности такой поверхности. А его результаты будут применены как в радиолокационных задачах, так и в задачах анализа поверхности в физике твёрдого тела и её микроэлектронных приложениях. Экспериментальные изображения поверхности в этом случае могут быть получены, например, с помощью сканирующего зондового микроскопа [1].

Таблица 1. Фрактальная размерность растущей цилиндрической поверхности

Нач.условие	t=0.0005	t=0.001	t=0.05
1.53	1.17	1.17	1.17
2.16	2.23	2.23	2.23
1.47	1.47	1.52	1.60
1.42	1.46	1.42	1.64
1.55	1.55	1.60	1.61
1.35	1.40	1.42	1.74
1.62	1.58	1.58	1.09
1.46	1.59	1.58	1.19
1.37	1.60	1.63	0.57
1.31	1.55	1.56	0.33
1.37	1.45	1.31	0.20
1.32	1.01	0.87	0.11
1.45	0.80	0.51	0.11
1.18	0.45	0.32	0.11
0.81	0.28	0.21	0.13
0.49	0.19	0.12	0.20
0.32	0.13	0.09	0.24
0.14	0.11	0.09	0.32
0.11	0.09	0.09	0.42

Литература

1. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 496 с.: ил.
2. Гурбатов С. Н., Руденко О. В., Саичев А. И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 496 с.: ил.
3. Kardar M., Parisi G., Zhang Y. C. Dynamical scaling of growing interfaces // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 889 - 892.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1988. — 218 с.: ил. — (Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, т. I).
5. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Основы теории рассеяния волн фрактальной поверхностью // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 5. С. 517-544.
6. Потапов А.А. К теории функционалов стохастических полей обратного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 261-310.
7. Потапов А.А., Лактюнькин А.В. Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью // Нелинейный мир. 2008. Т. 6. № 1. С. 3 – 36.

8. Потапов А.А., Лактюнькин А. В. Частотная функция когерентности пространственно-временного радиолокационного канала формирования изображений анизотропной фрактальной поверхности и фрактальных объектов // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 9. С. 906 – 913.
9. Рассадин А. Э. Концептуальное проектирование радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны (РСА) на воздушном носителе "из первых принципов" [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2012. N 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/2/text.pdf> . 35 с.
10. Рассадин А. Э. О рассеянии электромагнитных волн на динамических подстилающих поверхностях // Сборник материалов Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Общество, наука, инновации». — Киров, 2012. С. 1364-1368.
11. Рассадин А. Э. Вычисление УЭПР снежной подстилающей поверхности с помощью статистики случайных волн Римана // Доклады VI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». — М.: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2012. Т. 1. С. 101-104.

TEMPORARY EVOLUTION OF FRACTAL INITIAL CONDITION UNDER GROWTH OF SURFACE

А. Е. Китаев ¹, А. А. Потопов ², А. Е. Рассадин ³

¹ JSC «SDD RIAP», Nizhny Novgorod

²Институт V.A.Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

³ Nizhny Novgorod Regional Division of Scientific and Technical Society of
Radio Engineering, Electronics and Communication n. a. A.S. Popov

In the report evolution of surface with fractal initial condition is under investigation. In particular fractal dimension of such surface depending on time has been calculated.

ЭКОНОМИКА МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

Исследование внедрения инноваций в микроэлектронике. Проблемы импортозамещения в микроэлектронике, в том числе с применением математического моделирования. Вопросы экономики, качества, надежности, диагностики и стандартизации в производстве элементной базы отечественной радиоэлектроники.

ПРОБЛЕМЫ, КОМПРОМИССЫ И ТЕНДЕНЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

академик НАНБ Достанко А.П., Беляев А.В., к. т. н. Василевич В.П.,
Воротницкий Е. Д., Грицкевич В.С., Дубина О.Н., Чумаков А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Введение

Сегодня вся вырабатываемая в мире электроэнергия расходуется на электроприводы (50–52%), источники тепла и холода (15–17%), телекоммуникации (13–15%) и освещение (17–20%). Таким образом, электрическое освещение является одним из наиболее энергоемких в структуре мирового энергопотребления [1].

В настоящий момент на мировом рынке светотехники и средств отображения информации активно развивается направление твердотельных источников света (Solid State Light, SSL), которые благодаря ряду преимуществ уверенно вытесняют традиционные источники света, достигшие своих предельных параметров уже за столетнюю историю развития.

К SSL-устройствам относятся два вида светоизлучающих диодов: неорганические (Light Emitting Diodes, LED) и органические (Organic Light Emitting Diodes, OLED), соответственно. Тем не менее, в мировой тенденции развития SSL-устройств органические и неорганические светодиоды рассматриваются не как конкурирующие, а как взаимно дополняющие технологии. Благодаря низким эксплуатационным затратам и длительному сроку службы светодиоды являются лидерами в рейтинге источников света. Скорость, с которой светодиоды будут завоевывать рынок осветительных приборов, во многом зависит от их цены.

Целью работы является анализ принципов создания, современного состояния и перспектив развития интеллектуальных систем светодиодного освещения.

Задачи, решаемые при проектировании светодиодных систем освещения

Следует отметить, что только ценовой фактор, но и технические проблемы сдерживают развитие и внедрение светодиодных систем освещения, наиболее значимые из них следующие:

- принципиальная невозможность работы при повышенных температурах окружающей среды более 60–80 °С;
- в силу значительной нелинейности вольт-амперной характеристики, белые светодиоды не могут непосредственно питаться от распространенных источников энергии и требуют для сохранения высокого КПД всей системы применения достаточно сложных специализированных источников питания (обычно, импульсных преобразователей-драйверов).

Для использования в системах освещения источники света должны обладать следующими свойствами: высокой эффективностью, высокой мощностью излучения, хорошей цветопередачей, высокой надежностью, низкой стоимостью производства и безопасностью для окружающей среды. Поскольку существующим светодиодам присущи эти свойства, они уже сегодня весьма успешно соперничают с традиционными осветительными приборами – флуоресцентными лампами и лампами накаливания.

Человеческий глаз воспринимает свет как белый, если все три группы рецепторов его сетчатки возбуждены в определенном соотношении. Физиологические аспекты систем освещения в последнее время достаточно хорошо изучены [2–5]. Координаты цветности белого света находятся в области, расположенной в центре цветовой диаграммы.

Создание белого цвета при помощи монохроматических излучателей видимого спектра, при этом три из них, основаны на излучении светодиодов двух, трех и четырех цветов. Однако, получить высококачественные источники белого света на принципе аддитивного смешения двух комплементарных (пространственно взаимодополняемых) цветов, пригодные для применения в осветительных системах, проблематично. Поэтому все высококачественные источники белого света

построены, как правило, на принципе смешения трех и большего количества основных цветов точность передачи цвета [6].

Цветовосприятие человека сильно изменяется в зависимости от освещенности. При небольшой освещенности мы лучше видим синий и хуже красный. Поэтому для каждого уровня освещенности существует наиболее подходящий диапазон цветовой температуры источников света. Замечено, что с ростом температуры меняются координаты цветности многоцветных источников белого света, это происходит из-за температурных зависимостей мощности излучения, длины волны в максимуме излучения и ширины спектральных линий, что приводит к необходимости охлаждения светодиодов [7].

При выборе источника белого света всегда приходится искать компромисс между его цветопередачей и световой эффективностью излучения. Двухцветные источники белого света, как правило, имеют самые высокие значения световой эффективности, но при этом наихудшую цветопередачу. Трехцветные излучатели обладают приемлемыми параметрами цветопередачи ($CRI > 80$) и средними показателями световой эффективности (более 300 лм/Вт). Индексы цветопередачи четырехцветных источников белого света могут быть больше 90 [8].

Интеллектуальные («умные») системы освещения на основе светоизлучающих диодов (СИД) высокой яркости позволяют разработчикам контролировать цветовую температуру, поддерживать высокое значение коэффициента цветопередачи для приложений с белым светом, способны обеспечивать высокоточное освещение широкого спектра.

Большинство интеллектуальных светодиодных систем освещения построено на основе контроллера смешанного сигнала, драйверов постоянного тока и СИД высокой яркости. В обоих случаях используется многоканальная система управления СИД и, следовательно, при проектировании таких систем разработчикам придется иметь дело с такими проблемами как тщательный отбор светодиодов по цвету (биннинг), температурные эффекты, процессы старения и поддержка общей точности передачи цвета. Использование контроллера смешанного сигнала – эффективный метод решения этих задач.

Одной из важных особенностей таких систем является точная настройка параметров света. Раньше, при использовании традиционных источников света для освещения, регулировка света была связана с затемнением или управлением площадью рассеивания посредством оптической системы. В системах на основе СИД регулировка света связана с управлением нескольких различных характеристик света одновременно.

Такая гибкость сопровождается определенными сложностями и компромиссами в каждой системе освещения. Типовая интеллектуальная система освещения строится на базе структурной схемы, показанной на рис 1.

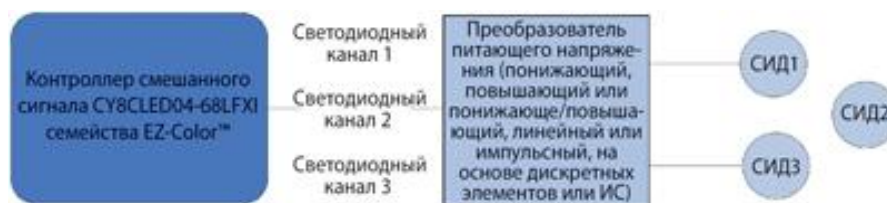


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы освещения [7]

В нее входят СИД высокой яркости, преобразователь системы питания и контроллер смешанного сигнала. Вначале следует выбрать светодиоды. Большинство поставщиков, включая компании Lumileds, Cree, Nichia и Osram, предлагает светодиоды с широким рядом параметров: номинальное значение тока и мощности, площадь рассеивания, цвет свечения, КПД, размеры посадочного места, тепловые характеристики, бин-код и т. д. Перечень параметров одинаков для белых и цветных светодиодов, однако для белых СИД необходимо также учитывать цветовую температуру и CRI. Оба эти параметра в большой степени зависят от люминофора покрытия СИД голубого цвета свечения.

Контроллер смешанного сигнала – важная часть системы управления освещением. Управляемость и гибкость систем на основе СИД высокой яркости во многом обеспечиваются именно контроллером, способным компенсировать проблемы, которые возникают при регулировке света СИД. Для большинства приложений достаточной вычислительной мощностью обладают 8-разрядные микроконтроллеры, содержащие ОЗУ или флэш-память.

Для цифровой периферии весьма важным является число специализированных каналов регулировки яркости свечения и их разрешение, а также способность реализации различных коммуникационных интерфейсов. Каналы регулировки яркости используются для управления понижающими преобразователями. Они могут быть также реализованы на основе программных счетчиков. Однако программные каналы регулировки яркости используют ресурсы процессора, которые могут обеспечивать выполнение других полезных функций. В интеллектуальных системах освещения обычно используется 8-разрядное разрешение для достижения хорошей точности передачи цвета, но в высококачественных

системах может использоваться и 16-разрядное разрешение. Для большинства приложений 8-разрядное разрешение обеспечивает необходимую точность, и разработчики обычно используют более высокое разрешение для достижения лучшей линейности регулировки яркости при малых выходных уровнях.

Компараторы и усилители с программируемым коэффициентом усиления позволяют реализовать простую топологию системы питания. Большинство поставщиков микроконтроллеров предлагает некоторые или все перечисленные виды периферии, однако необходимо учитывать, что при изменении системных требований набор нужной для реализации проекта периферии также можно изменить. Разработка интеллектуальной системы освещения на основе СИД высокой яркости является сложной задачей. Для систем, где требуется сверхвысокая производительность, за реализацию которой заказчик готов платить, хорошим решением было бы использование FPGA. Однако в системе на их основе, кроме того, должны использоваться дополнительные аналоговые компоненты. Наибольшую гибкость обеспечивают контроллеры с конфигурируемой периферией и настраиваемыми портами ввода/вывода.

Проблема достижения высокого качества белого света

Для систем белого света нужно учитывать цветовую температуру и коэффициент цветопередачи CRI. Цветовая температура – это цвет, соотношенный с линией цветностей черного тела, или кривой излучателя Планка на цветовой шкале, утвержденной Международной комиссией по освещению CIE в 1931 г. (рис. 2).

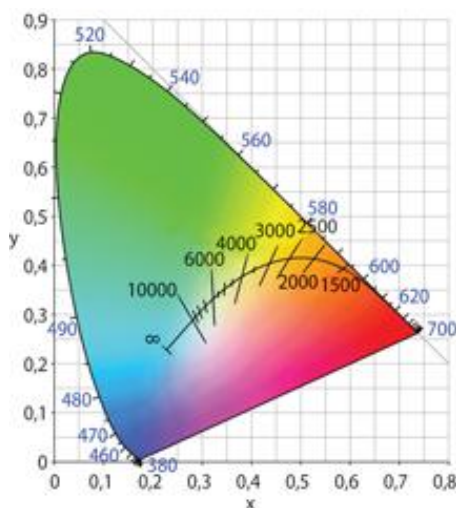


Рис. 2. Кривая излучателя Планка и цветовая температура [7]

Например, черное тело, нагретое до температуры 2500 К, рассматривается как излучатель довольно теплого белого света, а нагретое до 7000 К – как излучатель холодного света. Системы на основе СИД высокой яркости в действительности не могут обеспечить цвета в соответствии с кривой излучателя Планка, и для измерения их характеристик используется относительная цветовая температура (Correlated Color Temperature – CCT).

Коэффициент цветопередачи – параметр, используемый для описания качества белого света путем сравнения передачи различных цветов данным и эталонным источником света. Как цветовую температуру, так и коэффициент цветопередачи можно настроить путем выбора соответствующего СИД, используя нужный канал СИД и управляя этими каналами с помощью контроллера смешанного сигнала.

Система белого освещения, содержащая только белые СИД, имеет ограничения по цветовой температуре, однако обеспечивает достаточно высокой коэффициент цветопередачи при данной цветовой температуре белых светодиодов. Поскольку коэффициент цветопередачи сильно зависит от цветового спектра СИД, установленных в системе, следует руководствоваться общим правилом – чем больше число СИД (особенно разного цвета), тем выше коэффициент цветопередачи.

В системе цветного освещения разработчики должны учитывать точность цвета, разрешение цвета и спектр смешанных цветов. Один из важных факторов – разрешение пределов регулировки яркости. Расширение спектра смешанных цветов зависит от цветовой гаммы, обеспечиваемой светодиодами в системе, что напрямую определяется количеством СИД различных цветов, составляющих цветовую гамму. Количество СИД и разрешение регулировки яркости также влияет на цветовое разрешение.

Большинство систем цветного освещения имеет минимум три СИД обычно основных цветов: красного, зеленого и синего. Если с помощью интеллектуальной системы требуется получить какие-либо специфические цвета, разработчики могут определить, способны ли выбранные светодиоды обеспечить этот цвет с помощью цветовой шкалы CIE, соединяя точки цветовой гаммы. Если цветовая гамма не

включает цвет, который нужно получить, разработчик может добавить новый цвет светодиода, который расширяет цветовую гамму.

Проблемой является обеспечение требуемого числа каналов регулировки яркости с достаточным разрешением. В системах с четырьмя и более СИД, кроме того, нужен более сложный алгоритм регулировки цветовой температуры, смещения цветов или увеличения коэффициента цветопередачи.

Разумеется, для интеллектуальных систем освещения нужно предусмотреть возможность управления количеством рассеиваемого тепла и обеспечить сортировку СИД по различным параметрам. При увеличении температуры светодиода светосила определенных СИД падает (например, для красного светодиода это очень заметно), и немного смещается длина волны света на выходе.

Использование радиаторов для рассеивания тепла и активное охлаждение являются необходимыми мерами. Однако эти методы не всегда предсказуемы и поддаются измерениям. Некоторое количество тепла всегда существует в системе, и точность передачи цвета из-за этого будет меняться.

Одним из входных данных для алгоритма расчета величины изменения яркости света является световой поток. Используя кусочно-линейную аппроксимацию кривой зависимости температуры от светового потока СИД, контроллер смешанного сигнала может управлять точностью передачи цвета посредством соответствующей регулировки светосилы СИД в системе. Сортировка по параметрам цветового оттенка необходима, т.к. СИД высокой яркости – это твердотельные приборы, и современный процесс их производства вносит разброс параметров, в частности, светосилы, длины волны и прямого напряжения. Из-за того, что световой поток является важной характеристикой при формировании смешанных цветов, отклонения этого параметра могут значительно влиять на результат. Однако в системах с низким качеством передачи цвета это может не приниматься во внимание.

Разработчики, которым важно качество передачи цвета, могут либо приобрести СИД со специальным бин-кодом, которые стоят на 15–20% дороже обычных, либо компенсировать отклонения параметров путем программирования контроллера смешанного сигнала. Можно составить таблицу бин-кодов, в которую вносятся возможные характеристики яркости светодиодов в системе. Затем в процессе производства, когда получены реальные СИД, программу контроллера смешанного сигнала можно обновить в соответствии с полученными бин-кодами [8].

Перспективы использования органических светодиодов в системах освещения

В мировой тенденции развития SSL-устройств органические и неорганические светодиоды рассматриваются не как конкурирующие, а взаимно дополняющие технологии. При получении OLED-структур белого цвета свечения используется люминесценция нескольких органических материалов, что при смешивании дает белый цвет различных оттенков.

В настоящий момент производство OLED-устройств развивается с использованием двух основных процессов группового исполнения: ленточного (Web processing) и листового (Sheet processing). К *первому типу* относятся системы Roll-to-Roll, которые подразумевают производство устройств на длинной ленте-носителе с разделением устройств по ее длине. В системах с использованием *второго метода* групповое исполнение устройств осуществляется на подложках больших размеров с разделением устройств по длине и ширине подложки.

Для создания LED-светильника с распределенным диффузным светом необходимо применять различного рода рассеивающие конструкции (рис. 3а), в которых потери достигают 30–40%. В свою очередь, OLED-панель уже является распределенным источником света (рис. 3б).

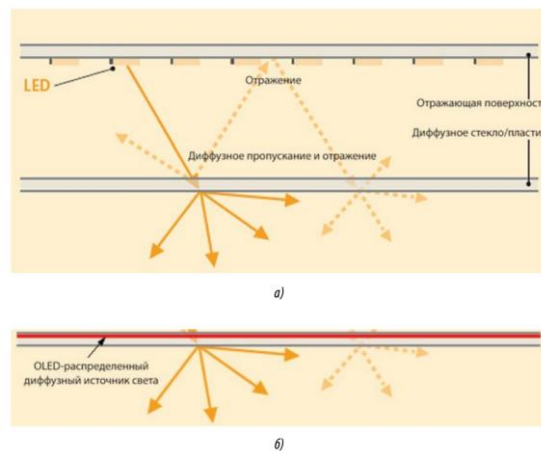


Рис. 3. Рассеивающая конструкция диффузного LED-светильника (а) и OLED-панель как распределенный диффузный источник света (б) [9]

Таким образом, LED-светильники выигрывают в секторе направленных источников света, а OLED – в секторе распределенных. Распределенный характер OLED-структур играет важную роль в процессе отвода тепла от активной области, которое неизбежно выделяется из-за потерь в структуре. В неорганических светодиодах рабочие плотности тока достигают значений в десятки А/см², что при высоком тепловом сопротивлении кристалл/корпус и отсутствии внешнего теплоотвода от корпуса светодиода приведет к его перегреву, выходу из строя или существенному снижению времени жизни и эффективности.

В OLED-структурах токи распределены по большой поверхности, и рабочая плотность тока составляет величину в десятки мА/см², что не приводит к существенному разогреву структуры и необходимости установки радиатора.

Единственным сертифицированным доступным в продаже продуктом является линейка OLED-панелей различных цветов и оттенков от Philips с эффективностью в 20 лм/Вт, яркостью 1000 кд/м² и временем жизни около 10 тыс. ч. Тем не менее, лабораторные образцы OLED-структур показывают весьма приличные характеристики, уже сравнимые с уровнем LED-технологии 2005–2006 гг. Компания Eastman Kodak продемонстрировала образцы белых OLED-светодиодов с эффективностью 62 лм/Вт при напряжении питания 3 В и плотности тока 5 мА/см².

Основными целями программ развития OLED-технологии США, Евросоюза и России является повышение эффективности устройств при снижении себестоимости. В программе DOE SSL Manufacturing Roadmap предусмотрены планы по снижению себестоимости OLED-устройств, произведенных по методам Sheet Processing и Web Processing (см. рисунок 6). Для снижения себестоимости единицы площади OLED-панели потребуется снижение стоимости исходных материалов и затрат на производство, что может обеспечить только серийное производство.



Рис. 6. Тенденции снижения себестоимости OLED-панелей[9]

Снижение стоимости килолюмена света OLED-панели должно быть обеспечено как снижением стоимости единицы площади панели, так и увеличением ее светимости (лм/м²). Конечно, для коммерческого применения OLED-панелей необходима высокая эффективность панели не менее 100 лм/Вт и ресурс не менее 50 тыс. ч при спаде светимости на 30%. При успешном завершении европейского проекта OLED100.EU и выполнении планов US DOE можно уже в 2015 г. ожидать появления на рынке конкурентоспособных светотехнических устройств на основе OLED-панелей [9].

Заключение

Для многих разработчиков, переходящих от традиционных систем освещения к твердотельным, выбор используемых в проекте компонентов является довольно серьезной задачей. Однако уже сейчас существуют необходимая элементная база и средства программного обеспечения, использующие традиционные языки программирования, позволяющие разработчику проектировать интеллектуальных систем освещения на основе светодиодов высокой яркости.

Во многих случаях важнейшее значение имеют мощные программируемые средства управления и опыт разработчика по их использованию. Такие преимущества систем освещения на основе LED-источников белого света, как интеллектуальность, гибкость и экологичность, сопровождаются серьезными ценовыми проблемами и возможными компромиссами.

Учитывая научные и технологические достижения, разработку программ развития, принятых на уровне ведущих государств и крупнейших корпораций, не возникает сомнений в будущем успехе OLED-источников света, имеющих значительный потенциал снижения себестоимости и дополняющих кристаллические LED-источники в системах светодиодного освещения.

Литература

1. Буробин В., Коновалов А., Матвеев Ю. Решение проблем энергосбережения / Электроника: наука, технология, бизнес 3/2009 стр.48–51.

2. Mills P., Tomkins S., Schlangen L. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1186/1740-3391-5-2>. – Дата доступа: 5.11.2014.
3. Takatsugu Deguchi, Masahiko Sato. The Effect of Color Temperature of Lighting Sources on Mental Activity Level Ann. Physiol. Anthropol. 11(1): 37-43.1992.
4. Phipps-Nelson J., Redman J., Dijk D. Raiaratnam Stvl. Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. Sleep, 2003 Sep;26(6):695-700.
5. Revell V., Arendt J., Fogg L., Skene D. Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. Neurosci Lett. 2006 May 15; 399(1-2):96-100.
6. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. - М.: Физматлит, 2008. - 496 с.
7. Пескин А. // Полупроводниковая Светотехника №2, 2011, стр.60–63
8. Tran S, Kropf B. Understand LED-based white and color-mixing system design. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272460. – Дата доступа 4.11.2014.
9. Стахарный С. // Современная светотехника, №3/ 2010 стр.23 – 30.

PROBLEMS, COMPROMISE AND TRENDS IN LED LIGHTING DESIGN

A. P. Dostanko, A. V. Belyaev, V. P. Vasilyevich, E. D. Vorotnitsky,
V. S. Gritskevich, O. N. Dubina, A. V. Chumakov

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

There were carried out analysis of the main aspects of obtaining high-precision lighting based on LEDs, considered compromises choosing a LED light sources for physiological, energy, color and cost characteristics, modern architecture and integration of software-controlled systems of intelligent LED lighting, the direction and development trend of lighting OLED.

СОЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

Покровский И.А.

Информационно-аналитический
Центр Современной Электроники (ООО «СОВЭЛ»)

Среди множества определений понятия стратегии [1] я выбрал наиболее подходящее, по моему мнению, для отраслевого управления:

Стратегия - общий, не детализированный план какой-либо деятельности, охватывающий длительный период времени, способ достижения сложной цели, являющейся неопределённой и главной для управленца на данный момент, в дальнейшем корректируемой под изменившиеся условия [2]

Ключевыми в этом определении являются характеристики цели – они сложные, неопределенные и для их достижения требуется длительный период времени. Кроме того, стратегические цели не являются жесткими, а корректируются под изменяющиеся условия.

Стратегическое управление можно противопоставить ситуативному управлению. Первое основано на незримых, нечетких, постоянно корректируемых целях. Второе основано на оценке хорошо просматриваемой, уже сложившейся ситуации.

Основной недостаток ситуативного управления состоит в неизбежном отставании принятых решений от изменяющихся обстоятельств (работа по «хвостам»). Чтобы действия были своевременны, необходим элемент предвидения ситуации, постановка опережающих целей. Кроме того, стратегия субъекта может оказывать значительное влияние на внешние условия, которые формируются под влиянием объективных и субъективных факторов, а ситуативное управление всегда остается реактивным, ведомым. Ведомая позиция может обеспечивать рост экономических показателей, когда условия стабильны, а внешние факторы благоприятны. Ведомая позиция будет приводить к падению экономических показателей, когда условия меняются динамично, а внешние факторы недружественны. Можно сказать, что ситуативное управление закрепляет негативные тенденции, если они уже сложились: потеря дохода приводит к сокращению инвестиционных ресурсов, что приводит к технологическому отставанию, дальнейшим потерям доли рынка и т.д. по понижающей спирали. Именно эти негативные процессы наблюдаются сейчас в радиоэлектронной отрасли России [3], [4]. Чтобы переломить их, необходимы опережающие действия, основанные на долгосрочных целях и стратегическом управлении.

Отраслевая стратегия, как и корпоративная, должна опираться на стратегическое Видение. В основе его лежит набор ключевых ценностей и убеждений [5]. Схематично связи между стратегическим видением, стратегией и тактикой, а также их содержание показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Состав стратегического видения и стратегии

Влияние ключевых ценностей на подходы к управлению

Ключевые ценности определяют способ мышления и связанное с ним восприятие мира. Анализ ключевых ценностей предприятий и общества является важнейшей задачей при разработке стратегии развития отрасли. В отрыве от них стратегия не будет воспринята, не получит поддержки предприятий, не станет основой их деятельности, т.к. разработчик стратегии может видеть рынок и промышленность другими глазами, через призму других ценностей.

Чем более полным является набор базовых ценностей разработчика стратегии, тем более целостным будет его восприятие действительности, тем более выверенной будет стратегия [6]. На рисунке 2 показана интерпретация схемы спирального развития ценностей, предложенной Клером Грейвзом [6].



Рис. 2. Спиральное развитие ключевых ценностей человека и общества

На рисунке 3 показана еще одна интерпретация эволюции ценностей - проекция на производственную деятельность и порождаемые приоритеты.

Экономика микроэлектронной отрасли

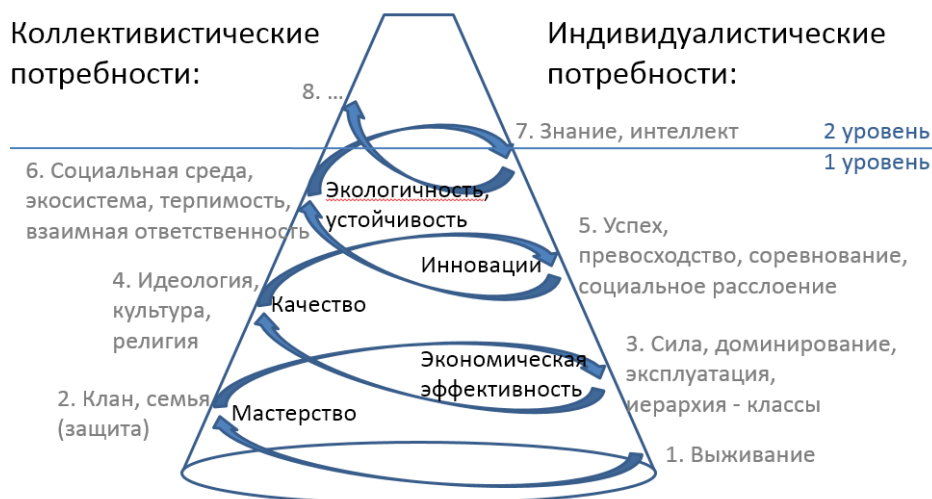


Рис. 3. Спиральное развитие ценностей в производственной деятельности компаний

Предприятия отрасли могут иметь разный состав базовых ценностей. По набору базовых ценностей предприятия ВПК значительно отличаются от предприятий, которые работают на открытых рынках гражданской продукции. Предприятия государственного сектора отличаются от частных предприятий. Исследовательские институты и дизайн-центры отличаются от серийных заводов. Область деятельности и соответствующие внешние условия во многом определяют ценностные приоритеты. Но с другой стороны набор ценностей не только определяют восприятие мира, но и предопределяют область компетенций, а значит и предпочтительную область деятельности. Эта взаимная зависимость ценностей и области деятельности порождает сильное сопротивление любым качественными изменениям в компаниях. В стабильных условиях ключевые ценности меняются медленно – вместе со сменой поколений сотрудников. Резкое изменение ценностного кода компании является ее перерождением и не может произойти без значительных потерь и сильных воздействий со стороны внутренних или внешних факторов. Это всегда мощный стресс с риском полного разрушения. Зависимость области компетенций от набора ценностей и устойчивость базовых ценностей компаний ограничивают выбор направлений развития и диверсификации, что важно учитывать при разработке отраслевой стратегии. Стратегия должна предлагать предприятиям разных секторов отрасли разные роли, которые им не только доступны по области компетенций, но и органичны по ценностным установкам и стимулируют их эволюционное развитие.

Большинство частных компаний радиоэлектронной отрасли созданы в 90-х инженерами-предпринимателями. В основном они опираются на ценности пятого уровня – ими движет стремление к личному успеху в конкурентной среде. Они гибкие и расчётливые. Они умеют строить выгодные отношения с клиентами, с партнерами по кооперации и даже с конкурентами. Они являются активными инноваторами. Однако, концентрируясь исключительно на собственных интересах и опираясь только на собственные силы, они не могут противостоять существенно более крупным зарубежным конкурентам на емких рынках и вынуждены уходить в нишевые сегменты. Качественное развитие этих компаний связано с консолидацией раздробленных и разобщенных ресурсов, как внутри отрасли, так и в смежных отраслях для реализации масштабных проектов. Важно, чтобы эта консолидация осуществлялась не административными насильственными методами, это будет отталкивать класс инноваторов, а за счет продвижения привлекательного стратегического видения, основанного на идеологии развития, а также за счет экономической мотивации. Задача создания общей идеологии развития, восполняющей дефицит ценностей четвертого уровня, выходит за рамки отраслевого управления. Но это не означает, что нужно ждать, когда идеологию предложат сверху. Она может быть создана только при активном участии и взаимодействии различных сообществ, в том числе отраслевых.

Предприятия, контролируемые государством, опираются в основном на ценности третьего уровня – подчинения и доминирования. Это особенно четко проявляется в деятельности производственных предприятий ВПК. Среди научных организаций ситуация не однородная, некоторые из них по ментальности ближе к компаниям частного сектора отрасли. Ценности четвертого уровня – остатки советской идеологической базы, постепенно разрушаются. По мере того, как ослабевает их притяжение, предприятия ВПК скатываются дальше вниз по спирали ценностей к уровню клановых отношений, в основе которых лежит коллективная защита от внешних угроз, часто надуманных, почти всегда неправильно интерпретируемых. Здесь уже мифы заменяют собой реалистичный анализ, вместо обсуждений совершаются ритуальные обряды, вместо практических решений повторяются заклинания с

требованиями многомиллиардных приношений. Это выпукло проявляется в планировании и реализации Федеральных целевых программ и программ импортозамещения.

Раньше я считал, что нужно развивать конкуренцию в среде предприятий государственного сектора [7]. Мне казалось, что конкуренция подстегнет их развитие. Однако, многие предприятия государственного сектора, возможно, уже не восприимчивы к такой мотивации. Возможно, необходимо сначала помочь им восстановить адекватное понимание своей роли в решении практических задач. Это понимание состоит во внятных ответах на базовые вопросы. Например – в чем предназначение компаний государственного сектора? Простой и четкий ответ – производство вооружений – может быть опорой в стратегическом управлении. Возможно, могут быть и лучшие варианты ответа на этот вопрос, но нельзя уходить от ответа или давать размытые и запутанные определения миссий и предназначений, в которых почти всегда замешиваются слова об инновационном развитии, обеспечении обороноспособности и другие популярные клише без понимания, как эти понятия соотносятся между собой. Работа по восстановлению адекватности восприятия, как мне кажется, ведется сейчас (экономический кризис заставляет). Следующим шагом важно будет предложить предприятиям идеологическую (вместо мифической) основу развития. И лишь после этого можно будет развивать конкуренцию. В рамках заданной идеологии конкуренция между предприятиями будет способствовать общему развитию отрасли, а не приводить к раздербаниванию ресурсов между самыми ушлыми.

Вопросы субъекта стратегии

Важным является определение субъекта отраслевой стратегии. Этот вопрос не возникает, когда рассматривается стратегия компании. Сама компания является субъектом стратегии, а разрабатывают стратегию руководители компании. Отрасль является совокупностью предприятий и производств, обладающих общностью производимой продукции, технологий и удовлетворяемых потребностей. Однако совокупность предприятий в отличие от подразделений компании может не иметь единого управления, деятельность множества компаний может быть подчинена разным, часто конфликтующим между собой интересам. Совокупность предприятий может стать субъектом стратегии, когда она обладает свойствами сообщества. Отраслевое сообщество помимо схожего профиля деятельности имеет общие долгосрочные интересы и стратегические цели. Кроме того, сообщество предприятий способно к совместным действиям для достижения общих целей.

Если субъектом отраслевой стратегии должно быть сообщество компаний, то следующие важные вопросы - как консолидировать совокупность компаний, кто может это сделать? Без ответа на этот вопрос переход к стратегическому управлению невозможен, а так называемые стратегии будут оставаться размышлениями на тему развития отрасли, не связанными с реальной деятельностью предприятий.

В советское время такие вопросы даже не возникали бы, т. к. предприятия полностью контролировались государством, подчинялись ему. Сейчас это не совсем так. Основная функция государства в рыночной экономике – регулирование деятельности компаний, но не управление ими. Смещение этих функций приводит к конфликту интересов, что демотивирует предпринимательскую активность и частных инвесторов, снижает эффективность рыночной экономики, основанной на конкуренции. К сожалению российское государство пренебрегает этими потерями ради контроля, а точнее ради ощущения контроля.

Через госкорпорации российское государство участвует в управлении почти всеми предприятиями, созданными в советское время (большая часть отрасли). В условиях рыночной экономики это можно сравнить с играющим на поле арбитром. Качество «игры» (кооперационных и конкурентных взаимодействий компаний) в такой модели неизбежно деградирует. Позиция «играющего арбитра» не позволяют государству даже в отношении контролируемых госкорпораций использовать подходы стратегического управления – у играющего арбитра нарушается целостность восприятия рынка и промышленности, управление неизбежно становится ситуативным. Такой подход обеспечивает сохранение контроля над материальными и финансовыми активами, удастся поддерживать устойчивость предприятий, за счет распределения государственных дотаций поддерживать догоняющую технологическую модернизацию. Но государство не замечает миграции и истощения интеллектуальных и волевых человеческих ресурсов. Этот актив слишком летуч и не поддается удержанию в командно-директивных рамках. В ответ на административное давление интеллект мигрирует в другие области деятельности или в другие страны. Настрой оставшихся интеллектуалов меняется у одних в направлении меланхолии, у других в направлении агрессивного недовольства.

Это похоже на то, что происходило в поздний советский период, когда закостеневшая идеология перестала сплачивать общество. Отличие текущей ситуации заключается в том, что никакой идеологии в постсоветское время не было предложено. В настоящее время в государственном управлении отраслями промышленности преобладают ценности третьего уровня – безусловное подчинение более высокой власти и желание доминировать в управлении подведомственными предприятиями. В надотраслевом

управлении преобладают ценности пятого уровня – политическая игра, ориентированная на решение краткосрочных и среднесрочных задач и удовлетворение частных политических интересов. При этом игроки не гнушаются использовать в своих целях стадные чувства и примитивные защитные реакции, преобладающие в значительной части травмированного общества. Отсутствие идеологической основы является основной причиной непоследовательного, порой безответственного по отношению к обществу управления, в том числе на отраслевом уровне.

По моему мнению, обращения к государству с запросами отраслевой стратегии в настоящее время не имеют перспектив. Государство не может предложить промышленности (совокупности предприятий) стратегическое видение и консолидировать за счет этого отраслевое сообщество. Наоборот, принятая дотационная схема поддержки приводит к разобщению предприятий, борющихся за распределяемые ресурсы. Государство подменяет стратегическое видение перечислением текущих проблем отрасли, ориентируя на них свои программы мероприятий. Россия безуспешно пытается имитировать опыт передовых экономик, не учитывая социальных различий. Как указывается в работе [8]: «Деградиацию современного общества можно преодолеть не с помощью бесконечного наращивания капитальных вложений, на что полагаются большинство экономистов, а только зарядив общество мощной социальной энергией». Этой социальной энергией, по моему мнению, современное российское государство не обладает.

В текущих условиях я не вижу другой возможности консолидировать отраслевое сообщество кроме как за счет инициативы предприятий-лидеров, находящихся внутри отрасли. Два-три десятка компаний со схожими базовыми убеждениями могут сформировать ядро отраслевого сообщества, запустить разработку отраслевой стратегии, постепенно вовлекать в ее реализацию все большее число предприятий, вовлекать государственные регулирующие структуры. В процессе этой работы сообщества, взаимодействий с другими сообществами постепенно будет формироваться идеология развития. Планирование этой работы заслуживает отдельного обсуждения, которое не вмещается в рамки этой статьи.

Ключевые ценности и убеждения субъекта отраслевой стратегии

Как было сказано выше, работа по стратегическому планированию будет продуктивной, если участники будут иметь схожие, как минимум, пересекающийся набор ценностей. Этот набор ценностей или базовых убеждений ложится в основу стратегии. Он должен быть выше среднего уровня предприятий отрасли, но не находится в отрыве от него, он должен быть адекватным условиям рыночной экономики. Среди компаний, образующих ядро отраслевого сообщества, должны преобладать ценности четвертого и пятого уровней [6]: стратегия должна объединить тех, кто не боится конкуренции и стремятся к лидерству, кто не ожидает указаний сверху и опирается на личную предпринимательскую инициативу, кто при этом считает себя частью российского общества и готов делить ответственность за его развитие, кто с уважением относится к государству и его законам.

Это не исключает участие других компаний в работе, но они будут ведомыми участниками.

Понимание потребностей и подходы к развитию отрасли

Российская радиоэлектронная промышленность составляет десятые доли процентов от мировой. Масштаб деятельности крупнейших российских компаний меньше, чем у лидеров мирового рынка на три порядка. Например, годовой объем закупок полупроводников компонентов у крупнейших российских производителей электронного оборудования исчисляется десятками миллионов долларов [9], а у крупнейших мировых компаний – десятками миллиардов [10]. Это не позволяет всерьез рассматривать возможности прямой конкуренции с лидерами мирового рынка на сложившихся зрелых рынках. По моему мнению можно рассматривать следующие три подхода к развитию отрасли:

- 1) Встраивание в сложившиеся глобальные цепочки создания стоимости
- 2) Развитие вместе с формирующимися или развивающимися рынками стран, которые, как и Россия, проходят этап индустриализации или реиндустриализации.
- 3) Развитие вместе с новыми рынками, формирующимися под влиянием новых технологий

У российских компаний есть большой потенциал развития за счет кооперации с лидерами мирового рынка. За счет этого можнократно увеличить вклад радиоэлектронной отрасли в российскую экономику. Такими возможностями нужно пользоваться, но я полагаю, что их нельзя рассматривать, как долгосрочные. Равноправных отношений между компаниями с различающимися на два-три порядка финансовыми ресурсами не может быть. Для России это риск закрепится в ведомой, подчиненной позиции: продавать на почасовой основе сокращающийся научный и инженерный ресурс, а потом продавать дешевающий труд рабочих. Кроме того, важно учитывать, что будет в дальнейшем с процессом глобализации, будет ли он обеспечивать устойчивое развитие.

Я полагаю, что глобализация в существующем формате с четким разделением труда между странами постепенно исчерпывает себя. На это указывает в частности замедление темпов роста международной

торговли, см. рис. 4 и рис. 5. Исчерпание существующей модели глобализации представляется мне основной причиной снижения темпов роста мировой экономики. Следствием этого становятся политические и экономические кризисы регионального и глобального уровней.

Страны развитого Запада отвоёвали себе высокодоходные роли стратегического управления и креативного производства, предоставляя другим странам возможности зарабатывать руками или добычей сырья. До тех пор, пока удавалось вовлекать все больше народов и людей в эту схему, мировая экономика росла и тянула вверх всех участников.

Возрастала общая производительность – создаваемые на Западе технологии использовались и в производстве на Востоке, и при добыче сырья в России. Расширялось число людей, вовлечённых в высокопроизводительный труд – росли потребительские рынки – быстрее возвращались инвестиции в создание новых продуктов и технологий. Однако этот процесс имеет свои пределы и похоже, что мы к ним подходим вплотную.

Хотя резервы роста за счет неохваченных глобализацией человеческих ресурсов есть – можно обсуждать вовлечение в глобальное промышленное производство Индии, стран Африки, дальнейшую индустриализацию стран ЮВА, но использовать их не так просто.

Значительная часть неглобализованного населения не готова к интенсивной трудовой деятельности с четким разделением труда. Когда люди живут натуральным хозяйством, не выходя за пределы своих общин, они не способны стать полноценной частью даже национальной экономики, тем более глобальной.

С точки зрения либеральных идеалов это звучит крамольно, но, вероятно, только при жесткой авторитарной власти можно поменять уклад их жизни и вовлечь в индустриальное производство. Возможно, жесткое принуждение со стороны государства необходимо такому обществу, оно соответствует задачам развития на этом этапе. Некоторые народы, как дети пяти лет, не готовы к демократии, подростки тринадцати лет, надо сказать, тоже не готовы. Многим народам еще предстоит пройти обязательные этапы развития, в которых доминируют сначала сила, а потом государственная идеология [11].

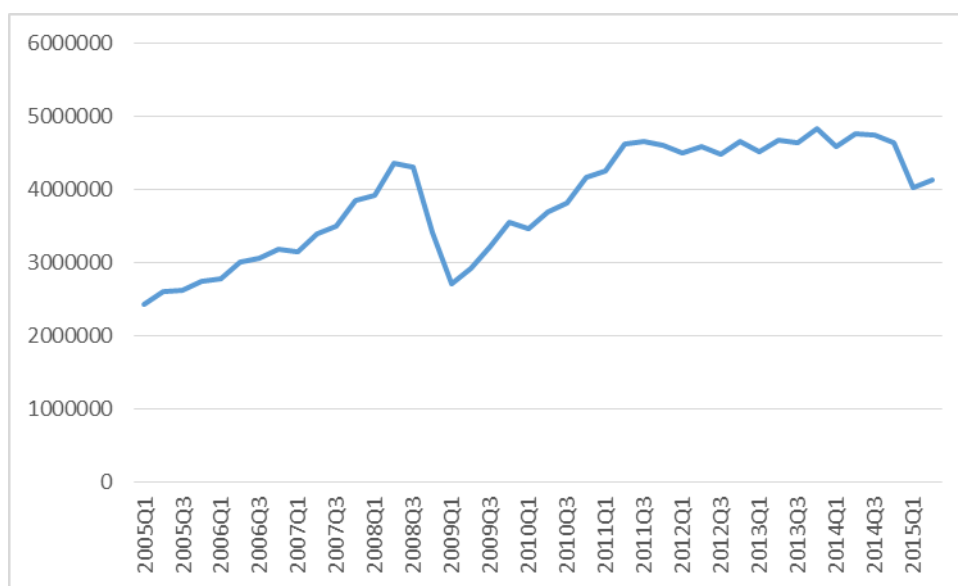


Рис. 4. Объем товарного экспорта в мире по данным ВТО [12]

Если текущая модель развития мировой экономики за счет глобализации и разделения ролей между странами постепенно исчерпывает себя, то что может стать новым драйвером роста в будущем? Темп роста может возобновиться за счет перехода от эксплуатации человеческих и сырьевых ресурсов третьих стран к его развитию: за счет вовлечения индустриальных стран третьего мира в креативную деятельность, за счет бережного отношения к процессу развития и индустриализации обществ на этапах автократии и тоталитаризма.

Разделение труда между странами, как способ повышения эффективности, должно углубляться, но разделение может быть не по сложившимся сейчас ролям, а по направлениям научной и технической специализации стран. При этом изменение баланса между креативной деятельностью и физическим производством должно произойти во всех странах.

Если в странах Запада доля материального производства увеличится, то это повысит социальную устойчивость, пойдет на пользу значительной части общества, которая не способна к креативной деятельности и в противном случае будет разлагаться на иждивении.

Экономика микроэлектронной отрасли

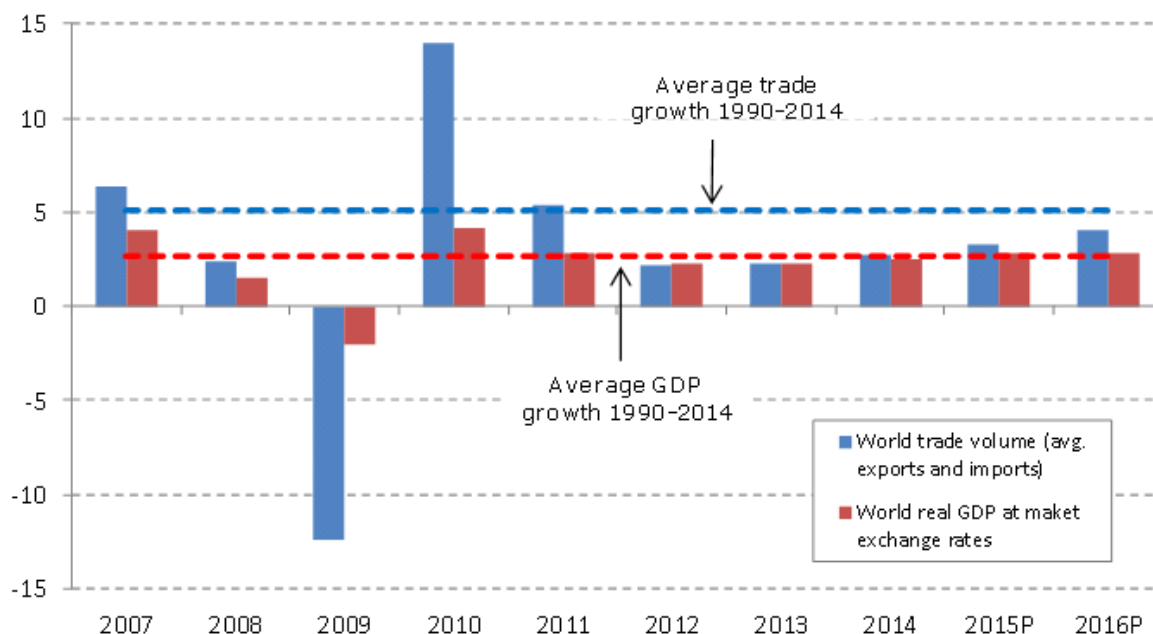


Рис. 5. Годовые темпы роста международной торговли по сравнению со средним уровнем с 1990 года [12]

России, как и другим странам с устоявшейся ролью в мировой экономике, сложно меняться, находить себя в формирующемся будущем. Мы по-прежнему стремимся встроиться в сложившиеся мировые цепочки создания стоимости со своим сырьевым ресурсом.

Но главная возможность будущего мне представляется не в удовлетворении потребностей рынка богатого Запада, а в социальном, индустриальном и научном развитии отстающих стран. Десятки стран нуждаются в этом. Большие новые рынки поднимутся на этом.

Например, задача информатизации общества в отстающих странах решается сейчас поставкой оборудования и технологий из развитых стран. Информатизация оплачивается за счет средств, полученных от продаж сырья или трудоемкого производства товаров (закрепляется сложившаяся специализация страны). Информационные технологии не способствуют развитию новых отраслей или изменению характера производства в стране, т.к. нет соответствующих предприятий и потребностей. Информационные технологии используются в основном для доступа к развлекательному контенту, который формирует у людей завышенные потребительские запросы, что только разлагает мотивацию развития, увеличивает отставание страны, приводит к росту социальной напряженности. Кроме того, страна попадает в зависимость от поставщиков оборудования, без которых невозможно обслуживание и управление сетями связи.

Альтернативой может быть подход, изначально направленный на развитие общества и промышленности страны. Когда параллельно с поставками оборудования организуется обучение специалистов, создается местная инженерная школа, создаются сборочные производства, согласовывается участие страны-заказчика в финансировании новых проектов исследований и разработок с предоставлением прав на использование создаваемых технологий и т.д. Т.е. делать в других странах то, что нужно самим, при этом за счет других стран расширять масштаб проектов, тиражировать успешные решения, складывать инвестиционные возможности.

Возможно, многим это напомнит политику Советского Союза в отношении дружественных стран. Но тогда СССР преследовал политические и военные цели часто в ущерб собственной экономике. Такая модель отношений не могла быть устойчивой. Сейчас взаимовыгодное экономическое сотрудничество и промышленная кооперация должны получить наивысший приоритет, это естественным образом будет способствовать и политическому сближению. Китай уже начал использовать эти подходы [13].

У России есть большие возможности экономической интеграции со странами, которые не попали в сферу влияния Китая и стремятся вести независимую от него экономическую политику, например, с Индией.

Недавно Индия анонсировала программу развития отрасли информационных технологий и электроники [14]. Для российских компаний участие в этой программе позволило бы занять выгодные позиции на быстроразвивающемся индийском рынке. С другой стороны, Россия может приглашать индийские компании, как инвесторов, открывая им свой рынок, предоставляя возможности развивать те

направления, в которых собственных компетенций недостаточно. Также важно развитие производственной кооперации между предприятиями двух стран, совместные инвестиции в наиболее значимые для обеих стран направления, создание конкурентоспособных на мировом рынке корпораций за счет объединения национальных компаний одного профиля.

Область наибольших возможностей для развития находится на пересечении потребностей развивающихся стран и перспективных технологических направлений.

Действительно, рынки стран со сложившейся инфраструктурой не всегда восприимчивы к инновациям, т.к. держатели инфраструктурных объектов и каналов поставок рискуют потерять часть доходов при переходе на новые технологии. Сложившаяся нормативная база и устоявшиеся отношения добавляют инерционности развитым рынкам. Развивающиеся страны могут быть более открыты для внедрения инноваций, особенно, когда инновационные технологии не только потребляются в виде конечной продукции или услуг, но и осваиваются национальными предприятиями. Наиболее ярко это проявилось в Японии в период быстрого развития ее экономики. В России примером может быть внедрение услуг сотовой связи, когда отсталость проводной инфраструктуры способствовала быстрому распространению новых технологий.

При выборе приоритетных технологических направлений важно учитывать не только потенциальный объем рынка, но и уровень зрелости этого рынка, входные инвестиционные барьеры, требования конкурентной среды к масштабу деятельности компаний.

По меркам мировой электронной отрасли инвестиционные ресурсы российских компаний, даже с учетом государственной поддержки, очень маленькие. Чем меньше инвестиционные ресурсы компаний, тем более узкой и точной должна быть их специализация. Нам уже поздно вступать в конкуренцию с Intel, Samsung, TSMC на рынке технологий массового производства цифровых полупроводников, ориентированных на потребительскую электронику. Здесь инвестиционные ставки измеряются суммами больше 10 млрд долларов в год. Но есть вновь формирующиеся рынки, некоторые из них имеют перспективу вырасти до значительных объемов. За последнее время самым ярким примером в прямом и переносном смысле слова является рынок светодиодного освещения. Входной инвестиционный барьер на этот рынок еще несколько лет назад измерялся всего десятками миллионов долларов, сейчас этот рынок перешел с этапа формирования на этап быстрого роста. Применение технологий расширяется: от архитектурной подсветки — к уличному освещению, а впереди рынок освещения офисных и жилых помещений, на порядки более емкий. Среднегодовой темп роста до 2022 года ожидается на уровне 11% [15], что существенно выше среднеотраслевых 3-4%.

Большой потенциал развития есть у рынка силовой электроники. Здесь тоже относительно невысокий входной барьер. Лидеры рынка инвестируют в развитие десятки и сотни миллионов долларов. Применение силовой электроники будет расширяться очень быстро вместе с развитием альтернативной энергетики, интеллектуальных энергетических сетей (Smart Grid), электропривода в автомобильной промышленности, общим повышением требований к энергоэффективности.

И светодиодные технологии, и технологии энергетической электроники позволяют значительно сократить потребление электроэнергии, что очень важно для развивающихся стран, где дефицит энергоресурсов является одним из факторов, сдерживающих развитие промышленности и городских агломераций.

Перспективным для российской электронной отрасли представляется рынок доверенных систем связи и управления. Сейчас, можно сказать, такого рынка еще нет. Его предстоит создавать, формировать и развивать. Именно такой подход позволяет рассчитывать на глобальное лидерство в будущем. Технологии доверенных систем — это ответ на риски, которые принесла глобализация: доминирование американских корпораций на рынке информационных технологий с вытекающими отсюда политическими рисками; риски террористических атак через информационные сети; риски техногенных катастроф из-за неисправностей или невыявленных ошибок в сложных системах управления. Ведущая роль в этом направлении отводится сейчас разработчикам программного обеспечения, но в случае их успеха с избытком будут загружены также разработчики и производители аппаратных средств.

Возможности, открывающиеся на рынках доверенных систем связи и управления и других рынках цифровых технологий, ставят вопрос о новых границах отрасли. Современная продукция создается совместными усилиями схемотехников, конструкторов и разработчиков программного обеспечения. Вклад разработчиков ПО в добавленную стоимость постоянно увеличивается. Во многих продуктовых сегментах при унификации аппаратных платформ основная роль отводится разработчикам встроенного и прикладного ПО. Часто аппаратные средства становятся упаковкой для продаж оригинальных решений в области программного обеспечения, так как стоимость аппаратного комплекса в разы, а часто на порядок превышает стоимость программного продукта, проданного отдельно.

Для решения задач, которые стоят перед отраслью, необходимо объединение усилий разработчиков — производителей аппаратных средств и разработчиков программного обеспечения. В результате при создании многих новых продуктов именно софтверные компании возьмут на себя ведущие роли. Это

происходит уже сейчас в силу того, что традиционные компании радиоэлектронной отрасли отстают от современного уровня технологий, а российские разработчики ПО находятся на самом его острие. Достаточно сказать, что объем российского экспорта программного обеспечения и услуг по его разработке составляет более 5 млрд долларов в год, а российские компании занимают 2,5% мирового рынка ПО [16]. Для сравнения: доля российских производителей аппаратных средств на мировом рынке составляет около 0,3%, и обеспечена она в основном поставками в закрытые от конкуренции сегменты российского рынка.

На рынке силовой электроники и электропривода необходима интеграция сообществ электронных и электротехнических компаний. Здесь также нужно пересматривать традиционные границы отрасли.

В рамках статьи нет возможности рассмотреть все перспективные направления в электронике. Здесь важно показать, что стратегия отрасли должна использовать возможности новых формирующихся рынков, нужна активная исследовательская работа, чтобы своевременно проявлять их, нужна решимость, чтобы использовать открывающиеся возможности, пока лидирующие позиции не заняты существенно более крупными игроками. Это не означает, что нужно отказаться от работы на рынках традиционных технологий. Там тоже есть множество ниш, которые могут занять российские компании. Например, ряд российских компаний успешно развиваются на рынке контрактного производства прототипов и опытных партий, отстраиваясь от крупных зарубежных конкурентов за счет срочности изготовления и гибкости в работе с заказчиками.

Заключение

Ситуативное управление, используемое в настоящее время компаниями и государственными структурами, не может качественно изменить ситуацию в радиоэлектронной отрасли. Хотя при благоприятных внешних факторах возможны некоторые улучшения финансовых показателей, они только маскируют падение конкурентоспособности предприятий и отсутствие ориентиров долгосрочного развития.

Постановка более высоких целей, чем выживание отрасли на рынке государственного заказа, требует перехода к стратегическому управлению. Необходимым условием перехода к стратегическому управлению отраслью является формирование и развитие отраслевого инженерного и бизнес-сообщества, т.к. именно отраслевое сообщество является субъектом стратегии в современной рыночной экономике. В противном случае текущая модель ситуативного управления будет проводить ко все большему технологическому отставанию и социальной деградации. Попытки государства предложить какие-либо стратегии без вовлечения в их разработку отраслевого сообщества не были и не будут успешными, т.к. не могут активизировать человеческий потенциал компаний. Без этого распределяемые финансовые ресурсы в лучшем случае становятся мерами дотационной поддержки.

При планировании развития отрасли важно учитывать системы ценностей, на которые опираются предприятия. Задачи стратегического управления, инновационного развития недоступны для многих предприятий государственного сектора отрасли, которые опираются на ценности доминирования и подчинения, а также клановой верности. Задача восстановления и активизации на этих предприятиях ценностей более высокого уровня может занять продолжительное время, исчисляемое многими годами.

Стратегия развития отрасли может опираться на ценности ведущих частных компаний отрасли, сочетающие предпринимательскую активность с уважением к обществу и государству. Предприятия государственного сектора, опирающиеся на схожий набор ценностей, также могут составить ядро отраслевого сообщества.

Развитие российской радиоэлектронной отрасли нужно планировать в контексте изменений мировой экономики и глобального рынка электроники. Встраивание в сложившиеся цепочки создания стоимости можно рассматривать, как этап стратегии, одновременно нужно включаться в развитие новых рынков, возникающих за счет внедрения инновационных технологий и индустриализации отстающих стран.

При разработке отраслевой стратегии необходимо расширить рассматриваемые границы отрасли за счет компаний из смежных направлений – разработчиков программного обеспечения и производителей электротехники. Необходимо использовать возможности взаимодействия с отраслевыми сообществами других развитых и развивающихся стран, согласовывать с ними общие программы развития, объединять финансовые и человеческие ресурсы.

Литература

1. Блог молодого аналитика. Определение понятия "Стратегия". <http://humeur.ru/page/opredelenie-ponjatija-strategija>.
2. Википедия, Стратегия (значения). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Стратегия_\(значения\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Стратегия_(значения)).
3. И. Покровский. Вырастить электронную микроэкономику. Журнал "Эксперт". № 29, 2014.
4. И. Покровский. Развитие радиоэлектронной промышленности России. Живая электроника России. 2015.

5. Д. Коллинз. Больше, чем бизнес: как преодолеть ограничения и построить великую компанию. Альпина Паблишер. 2008.
6. Д. Бек. Спиральная динамика. Управляя ценностями, лидерством и изменениями. Открытый Мир. 2010.
7. И. Покровский, Как остаться в радиоэлектронной игре. Журнал "Эксперт". 2015.
8. Л. Евстигнеева, Р. Евстигнеев. Догоняющее развитие: современная трактовка. Институт экономики РАН. 2012.
9. Центр Современной Электроники. Отчет исследования российского рынка электронных компонентов. 2015.
10. Gartner, Samsung and Apple Continue to Lead as Top Global Semiconductor Customers in 2014. 2015. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2966829>.
11. И. Покровский. ЧЕМ НЕ НАЦИОНАЛЬНАЯ ИДЕЯ? Page 42. 2015. <https://www.facebook.com/stranitsa42/posts/996328543751519>.
12. WTO. «Short-term trade statistics. 2015. https://www.wto.org/english/res_e/statis_e
13. Д. Любин. Китай может стимулировать рост развивающихся экономик. Ведомости. 6 октября 2015.
14. Department of Electronics & Information Technology, Government of India. Digital India. 2015. <http://www.digitalindia.gov.in/>.
15. Unlimited Strategies. Global Luminaires: Lighting Market Analysis and Forecast. 2014.
16. НП "Руссофт". Маркетинговый анализ экспортных рынков российского программного обеспечения. 2014.

SOCIAL ISSUES OF STRATEGIC MANAGEMENT IN RUSSIAN ELECTRONICS INDUSTRY

I. A. Pokrovsky

Center of Modern Electronics (SOVEL Ltd.)

The industry development is considered here in the context of social issues. The author shows necessity of changes the industry management from situational approaches to strategic, as well as the circumstances under which it is possible. He analyzes the correlation between the social values and the area of the competence and development opportunities. He presents hypothesis about value priorities of the government departments and value priorities of companies from different segments of the industry, as well as the limitations of strategic decisions which are defined by social profile. The opportunities of the integration of Russia into the global electronic industry are researched in context of new long-term changes in the global economy.

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА

к.ф.-м.н. Белотелов Н.В.^{1,2}

¹ Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН

² Московский физико-технический институт (государственный университет)

Экономические проблемы современной эпохи заставляют в новом свете рассмотреть парадигму экономического развития. Ведущим процессом экономической динамики является процесс потребления ценностей, существующих в системе. Они либо изымаются из биосферы, либо перерабатываются по определенным технологиям. Особенностью современного этапа является стремительное развитие сферы услуг, которая занимает значительную долю в валовых национальных продуктах развитых стран. Для рентабельности этой сферы необходим «грамотный потребитель», который должен «производиться» системой образования.

В Вычислительном Центре РАН была разработана эколого - демографо - экономическая модель (ЭДЭМ), которая описывает взаимодействие в виртуальном мире демографических, экономических и экологических факторов. В этой модели ведущим фактором, влияющим на экономическую динамику, являлась образованность населения, которая определяла структуру потребления и опосредовано влияла на экономический процесс.

При описании экономики на таких характерных временах нельзя пренебрегать процессом разработки и внедрения в производство новых технологий (инновационным процессом). Новые технологии увеличивают рентабельность производства товаров, улучшают их потребительские качества, а также создают новые товары.

Устойчивое развитие рыночной экономической системы невозможно без инновационного процесса, порождаемого основной движущей силой развития в рыночной системе - конкуренцией. Остается открытым вопрос о том, что такое рыночная экономическая система и в какой пропорции в устойчивой экономике должны сочетаться рыночные и плановые начала. В модели считается, что экономика - рыночная в общепринятом значении этого термина. В то же время, в модели неявно вводится элемент плановости через возможность изменения структуры потребления за счет образовательного процесса.

Увеличение душевого потребления, вызываемое инновационным процессом, как правило, влечет за собой увеличение антропогенного влияния на окружающую среду. Это приводит к увеличению выбросов токсичных загрязнений и деградации экосистем. В ЭДЭМ окружающая среда характеризуется уровнем ее загрязнения (токсичности), зависящим от антропогенных выбросов, а также количеством ресурса, используемого в процессе производства, обладающего способностью к самовосстановлению, тем меньшей, чем более токсична окружающая среда.

Можно высказать некоторые общие положения, касающиеся последствий увеличения антропогенного влияния на окружающую среду. Всякая система, которую мы наблюдаем, содержит в себе механизмы самосохранения, гомеостаза. В противном случае мы её не наблюдали бы. Всякая система существует до тех пор, пока эти механизмы способны противостоять внешним воздействиям, т.е. способны поддерживать её структуру и её «внутреннюю среду» - то, что и дает право говорить о ней как о данной системе. Если эта способность исчерпывается, то система, либо переходит в какую-то другую, изменяя свою структуру и внутреннюю среду и формируя другие механизмы их поддержания, либо вообще перестает существовать.

Эти рассуждения применимы и к биосфере Земли. Имеется граница интенсивности антропогенного влияния на окружающую среду, за пределами которой биосфера окажется неспособной противостоять этому влиянию и сохранять свои основные параметры. По достижении этой границы начнется переход в новое, неизвестное нам состояние. Эта предельная граница (предельная «емкость среды») нам неизвестна, а поэтому и неизвестно, когда этот переход начнется: те знания, которыми мы сейчас располагаем и которыми будем располагать в течение жизни ближайшего поколения, недостаточны для достоверного прогноза предельной интенсивности антропогенного влияния на окружающую среду. Кроме того, может быть так, что новое состояние биосферы нельзя предсказать в принципе. Неизвестна и скорость перехода биосферы в новое состояние. Маловероятно, но не исключено полностью, что эта скорость будет столь велика, что человечество как биологический вид не сумеет к ней приспособиться.

Центральным вопросом, изучаемым в имитационной игре ЭДЭМ, является проблема, заключающаяся в том, каким образом при экспоненциальном росте численности населения и соответствующем этому росту экспоненциальном росте промышленного производства стабилизировать антропогенное влияние на окружающую среду на уровне, обеспечивающем их утилизацию биосферой Земли, и увеличивать в то же время уровень жизни людей. В частности, в игре необходимо сделать так, чтобы уровень токсичности выбрасываемых в окружающую среду загрязнений в единицу времени не превышал некоторого «разумного» предела, при котором количество природного ресурса и душевое потребление было бы не меньше некоторого предела. Проблема кажется на первый взгляд неразрешимой. Действительно, ограничение выбросов токсичных загрязнений при экспоненциальном росте промышленного производства требует экспоненциально растущих вложений в очистку окружающей среды, что, соответственно, увеличивает издержки производства. В этих условиях кажется невозможным, например, не только увеличивать душевое потребление, но и даже держать его постоянным: при некоторой численности населения душевое потребление начнет уменьшаться.

Выход из этой ситуации, иллюстрируемый моделью, состоит в *иницировании механизма, превращающего затраты на обеспечение чистоты среды обитания, из издержек производства в необходимое людям потребительское качество, которое должно 'содержаться' в покупаемых ими товарах.* Считается, что в виртуальном мире, который воспроизводится моделью, имеется единая мера токсичности различных загрязнителей. Разработана система измерения этой токсичности, а также система сертификации чистых технологий и производимых по этим технологиям товаров. Чистой считается технология, обеспечивающая выбросы загрязнителей на единицу производимой продукции с токсичностью, меньшей некоторого предела. Указанный предел устанавливается на законодательном уровне и периодически пересматривается: он должен уменьшаться с увеличением суммарных производственных мощностей на Земле. Чистыми считаются товары, производимые по чистым технологиям. Чистые товары снабжаются соответствующей меткой. Спрос на чистые товары зависит от уровня образованности людей, от уровня жизни, от расходов на экологическое воспитание, а, значит, и расходов на образование. Технологии производятся фундаментальной и прикладной наукой с интенсивностью, зависящей от уровня образованности людей. В модели основным механизмом стабилизации качества окружающей среды являются не штрафные или какие-либо другие ограничительные санкции, а процесс формирования спроса на экологически чистую продукцию.

Экономика микроэлектронной отрасли

На самом общем уровне имитационную эколого - демографо - экономическую имитационную модель (ЭДЭМ) можно описать следующим образом. В модели имеются объекты двух видов - люди и производственные фонды, которые относятся к факторам производства в экономической подмодели. Каждый из этих двух видов объектов обладает присущими им характеристиками: люди - полом, возрастом, экономической активностью и уровнем образованности; производственные фонды - мощностью, эксплуатационным возрастом и технологией.

Мощность - это максимальное количество продукта, который в единицу времени (год) способны произвести данные фонды при полной обеспеченности их ресурсами.

Технология - это количество продукта, необходимое для строительства единицы производственных фондов (фондообразующие коэффициенты), количество природных и трудовых ресурсов различного уровня образованности, необходимых для выпуска единицы продукции по данной технологии (коэффициенты ресурсоемкости и трудоемкости) и уровень токсичности выбросов загрязнителей на единицу выпускаемой продукции.

Технологии делятся на «чистые» и «грязные». И те, и другие виды объектов (люди и производственные фонды) рождаются в некоторый момент, живут некоторое время и умирают (естественным образом для людей, путем списания - для производственных фондов). Для того чтобы производственные фонды рождались и функционировали, необходимы инвестиции и труд людей разных уровней образованности в соответствии с фондообразующими коэффициентами и коэффициентами трудоемкости. Чтобы люди рождались и предлагали свой труд, необходима выпускаемая имеющимися и функционирующими (т.е. обеспеченными трудовыми ресурсами) фондами продукция, «чистая» и «грязная», - в соответствии со структурой потребления. Ни технологии, ни структура потребления на характерных временах порядка нескольких десятилетий не являются постоянными. Технологии производятся фундаментальной и прикладной наукой в соответствии со средствами, которые в это вкладываются.

Структура потребления, т.е. распределение спроса между «чистой» и «грязной» продукцией, расходы на здравоохранение и образование зависят от уровня образованности людей и от государственных средств, которые выделяются на образование. Доля чистой продукции в потреблении людей характеризует степень, в которой чистота окружающей среды является для них потребительским качеством.

Проведенные имитационные эксперименты с описанной выше моделью наглядно показали, что образовательный процесс существенным образом через структуру потребления влияет на экономическую динамику. В настоящее время образование довольно часто рассматривается как платная услуга, которая должна приносить прибыль, но очевидно, что оно определяющим образом формирует систему ценностей, существующих в социально-экономической системе и тем самым существенно влияет на экономическую динамику.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-01-00499а.

Литература

Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И. Компьютерное моделирование. Учеб. пособие для вузов. - М.: Физматкнига, 2014, 304с. 304 с.

EDUCATION AND ECONOMIC DYNAMICS

N. V. Belotelov^{1,2}

¹ Dorodnicyn Computing Centre of RAS

² Moscow Institute for Physics and Technology (State University)

The paper discusses the links between the educational process and economic dynamics. The paper also discusses environmental - demographical - economic model, which explicitly takes into account the relationship between education and patterns of consumption.

**РАЗВИТИЕ ТЕМАТИКИ МИКРОНАНОСИСТЕМ ЗА РУБЕЖОМ.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА
МЭМС В РОССИИ И БЕЛОРУССИИ**

к.т.н. Урманов Д.М.

ООО «Русская Ассоциация разработчиков, производителей и потребителей микроэлектромеханических систем» (РАМЭМС)

Актуальность темы доклада

За период прошедший с начала XXI века и до настоящего времени, одним из наиболее интенсивно и динамично развивающихся направлений мировой индустрии стала микросистемная техника. Ее стремительное развитие за рубежом в основном основано на разработке и производстве различных миниатюрных датчиков инерциальной и внешней информации, микродвигателей и преобразователей. Применение новых технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволило значительно уменьшить массово-геометрические характеристики, энергопотребление и стоимость датчиков, что позволило расширить сферу применения микросистемной техники в народном хозяйстве. Проблема разработки и производства новых МЭМС устройств является, безусловно, актуальной и для российского прецизионного микроэлектронного приборостроения и может быть решена с помощью применения новых технологий, технических решений и методик проектирования на основе новых математических моделей функционирования и программных продуктов. Достижение высоких точностей МЭМС изделий ставит перед разработчиками комплекс новых актуальных задач: учет физических свойств новых конструкционных материалов, влияние инструментальных погрешностей изготовления чувствительных элементов и условий функционирования на погрешности измерений датчиков, развитие и улучшение отечественной технологии МЭМС, сокращение сроков проектирования и изготовления прототипов новых МЭМС, комплексная проверка проектов до начала фактического производства при помощи современных электронных средств.

Особенности российского рынка МЭМС

Согласно данным проведенных нами маркетинговых исследований в настоящее время наибольший интерес у российских заказчиков вызывают различные инерциальные датчики и системы. Причем наши предприятия интересуют как сами указанные продукты (в готовом виде), так и технологии по их проектированию, моделированию, производству и испытанию. Спецификой подобного интереса у заказчиков является его нишевой характер. Вызвано это тем, что в России не производятся миллионные партии упомянутых ранее мобильных устройств и поэтому в каждом случае речь идет о разработке и производстве относительно небольших объемов МЭМС-сенсоров, отвечающих требованиям указанным в проектом техническом задании.

Популярность инерциальных сенсоров в нашей стране объясняется тем, что их можно использовать для различных приложений в виде отдельных компонентов или в составе инерциальных систем. Так, например автономные МЭМС – акселерометры, гироскопы и инклинометры могут применяться на наземных и воздушных объектах в следующих сферах:

- Спутниковая антенна и другие приборы стабилизации: для измерения вращения различных инструментов (спутниковая антенна, камера ...) в целях их стабилизации и удаления колебаний или движения платформы. Обычно для этого используются 2 или 3 гироскопа;

- Стабилизация датчика ориентатора: для стабилизации датчика ориентатора ракет во время полета используются акселерометры и гироскопы;

- Управление полетом: автоматическое управление средством с учетом данных поступающих от инерциальных сенсоров. Эти данные обычно предоставляются несколькими гироскопами интегрированными в крылья и элероны самолета;

- Стабилизация транспортного средства: для измерения вращения транспортных средств (корабль, вертолет, автобус и т.д.) в целях обеспечения устойчивости и комфорта. Обычно используются 2 или 3 гироскопа, иногда вместе с акселерометром.

- Контроль обслуживания: для измерения ускорения и вибрации различных частей транспортного средства или машины для того, чтобы выполнить соответствующее техническое обслуживание и предотвратить сбой в дальнейшем. Для этих целей используется один акселерометр, главным образом для летательных аппаратов (вертолетов, самолетов ...) или в индустриальной зоне;

- Навигация судов: чтобы иметь возможность очень быстро получить информацию о курсе используются точные гирокомпасы.

Малогобаритные инерциальные системы (МИС) состоящие из нескольких МЭМС-гироскопов, акселерометров (иногда в сочетании с датчиком температуры или давления) могут применяться для решения задач в следующих областях:

- Навигация: определение относительного положения транспортного средства и его траектории. Соответствующие МИС часто интегрируются в штатные инерциальные навигационные системы (ИНС) для корректировки смещения и определения точного расположения транспортного средства с учетом использования сигнала GPS приемника и данных от других приборов;

- Железнодорожный и автомобильный транспорт (контроль устойчивости): для измерения наклона движения поезда или стабильности движения поездов и автомобилей для того, чтобы компенсировать это в режиме реального времени;

- Измерительные приборы в кабинах: обеспечение отображения инерциальной информации на панели кабины ЖК-дисплея;

- Тестирование летательной аппаратуры: для проверки правильности работы внутренних инерциальных систем новых моделей самолетов, вертолетов и т.д.

- Измерение движения и контроль за движением: для контроля движения человека в здравоохранении, или для проверки правильности движения робота в индустриальной сфере и др.;

- Бурильные головки для нефте- и газодобычи: - определение ориентации головки относительно заданной траектории скважины в процессе бурения.

В составе вышеуказанных и других приложений МЭМС-компоненты и инерциальные системы на их основе могут применяться в индустриальной, гражданской, военно-морской, шельфовой, аэрокосмической, оборонной и других сферах.

Особенности разработки и производства современных МЭМС

В современной мировой микросистемной индустрии существует достаточно жесткая конкуренция и поэтому одним из решающих факторов позволяющим выиграть в конкурентной борьбе является - время. То насколько быстро та или иная компания сможет разработать и вывести на рынок новый продукт, в конечном итоге влияет на распределение долей рынка и соответственно на уровень дохода от продажи МЭМС. По этой причине подавляющее большинство мировых лидеров-производителей МЭМС сегодня активно применяют на практике метод так называемого «виртуального производства» микросистем и других полупроводниковых изделий. Заключается он в том, что при помощи специализированных программ, конструкторы сначала создают на компьютере модель МЭМС, а затем моделируют процесс его производства с учетом технологических особенностей имеющегося на фабрике оборудования. Такой подход позволяет устранить все ошибки в проектировании еще на стадии моделирования и существенно экономит время на выпуск нового изделия, т.к. на производственную линию поступает по сути «идеальная» маска чувствительного элемента, которую практически сразу можно запускать в массовое производство.

Учитывая вышесказанное стоит отметить, что на сегодня признанным лидером в сфере программ для «виртуального производства» МЭМС является фирма Coventor (США). Благодаря ее продуктам по всему миру ежегодно в рекордно короткие сроки разрабатываются и производятся различные МЭМС-датчики, включая высокоточные для специального применения.

Одним из новых направлений применения МЭМС-акселерометров и инклинометров является их интеграция в специальные модули вместе с радиопередаточными антеннами и аккумуляторными батареями. В составе таких малогабаритных устройств МЭМС-датчики можно успешно применять для технического мониторинга зданий и сооружений, дистанционного контроля уровня вибрации и углов крена на различных подвижных и не подвижных объектах, в других рыночных нишах.

Заключение

Приведенный выше обзор, показывает хорошие перспективы по применению МЭМС на российском и белорусском рынках. Данные устройства в составе различных систем могут быть полезны для: сельского хозяйства, автономных подводных аппаратов, грузовых транспортных судов, здравоохранения, высокоскоростных поездов, строительных инклинометрических систем, дистанционно управляемых аппаратов, спутникового управления связью, стабилизации оптических систем, инструментов обзора, контроля вибрации, автоматических наземных аппаратов, служебных самолетов, гражданских самолетов и вертолетов, беспилотных летательных аппаратов (МЧС и др.), спутников, космических кораблей, ракет, наземных транспортных объектов и других целей.

В настоящий момент видно, что российский и белорусский рынки нишевых МЭМС-сенсоров и инерциальных систем обладает хорошим потенциалом и поэтому вполне понятно, постоянно растущее, стремление различных отечественных предприятий как минимум - использовать в своих изделиях МЭМС-сенсоры и как максимум - организовать производство современных МЭМС на своей базе. Опыт показывает, что МЭМС-датчики нового поколения от известных мировых брендов (для гражданского и специального применения) в Россию и Белоруссию, как правило, не поступают ввиду наличия разного рода ограничений. При этом зарубежная МЭМС – продукция, доступная на отечественном рынке, в большинстве случаев не отвечает техническим требованиям заказчиков (по причине меньшей, чем требуется точности, диапазона, стабильности измерений и т.д.). А имеющиеся образцы МЭМС-изделий российского производства уже не устраивают многих заказчиков ввиду устаревших и не отвечающих

современным требованиям массогабаритных и точностных показателей, уровней энергопотребления, надежности, диапазона измерений, соотношения цены/качества и т.д.

Указанное выше отсутствие доступа к современным МЭМС порой заставляет российских проектировщиков опираться при разработке новых изделий на то, что как говорится «под рукой». Это в свою очередь приводит к проектированию и выпуску отдельных изделий заведомо уступающих по своим характеристикам зарубежным аналогам, использующим достижения современной МЭМС-индустрии в полном объеме. Подобная ситуация в дальнейшем негативно сказывается на сбыте отечественной продукции не только на зарубежном, но и на внутреннем рынке, т.к. наши заказчики вполне закономерно хотят покупать ту продукцию, которая в полной мере отвечает всем современным требованиям (в том числе и по микросистемам).

С учетом указанной ситуации одним из подходящих вариантов может быть изготовление прототипов необходимых МЭМС по ТЗ российских и белорусских заказчиков первоначально на базе доступных европейских МЭМС-фабрик уже сегодня (не откладывая «в долгий ящик»). Указанные прототипы можно будет испытывать по российским стандартам и пробовать интегрировать в различные системы. В случае успешной технической апробации полученных прототипов МЭМС на российских и белорусских изделиях, будет иметь смысл рассматривать поэтапный перенос технологии их производства в Россию и Белоруссию по принципу «от простого к сложному». Например, сначала производить чувствительные элементы МЭМС в Европе, но корпусирование и обвязку другой электроникой на плате уже делать на одном из российских или белорусских предприятий, обладающим необходимым оборудованием. В дальнейшем при наличии стабильного спроса на указанные типы МЭМС и увеличении доли рынка по микросистемам, возможно, будет экономически целесообразно перенести в Россию и в Белоруссию и производство чувствительных элементов, чтобы замкнуть у себя полный цикл разработки и производства необходимых нашим странам микросистемных датчиков.

Таким образом, поэтапно можно будет насытить наш рынок различными МЭМС, не создавая при этом ситуации, когда зачастую сначала в оборудование вкладываются большие деньги, а потом в течение многих лет решается вопрос о том, что на нем производить, какую технологию производства МЭМС использовать, как решать вопросы по сбыту продукции и т. д. За это время оборудование морально устаревает, теряет часть своих функций из-за простоя, «продает» немалые суммы на поддержание его минимальной работоспособности и т. д. Но самое главное, что в течение всего этого «времени раздумий» нашим потребителям по-прежнему не бывают доступны необходимые современные МЭМС и, следовательно, повторяется ситуация, описанная выше. А это уже вопрос безопасности и престижа наших стран в целом.

DEVELOPMENT OF THE MICRONANOSYSTEMS ALL OVER THE WORLD. THE MAIN PROSPECTS OF APPLICATION AND LOCALIZATION OF MEMS-PRODUCTION IN RUSSIA AND BELORUSSIA

D. M. Urmanov

Russian MEMS Association (RAMEMS), LLC.

Lately, we had the worldwide development of different MEMS at the international market. The main advantages of the MEMS sensors are small size, low power consumption, high level of reliability, wide range of application and easy integration to complicated systems.

Taking into account all mentioned above, the main areas of application of MEMS in Russia are presented in the report. You may find here some features of the development and manufacturing of high precision inertial MEMS-sensors. In the frame of the report, there is an analysis of their application in the land-based mobile and immobile objects. Here presented also our experience in the area of the development of wireless systems of the technical monitoring.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАНЯЕМОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПАССИВНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

д. т. н. Ямпурин Н.П., к. т. н. Баранова А.В.

Арзамасский политехнический институт – филиал
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

1. Введение. Надежность изделий оценивается по следующим характеристикам изделия: готовность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость (ГОСТ Р53480-2009).

Сохраняемость – это свойство изделий поддерживать свои эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки, установленного технической документацией. Основной задачей хранения является поддержание всех надежных, технических и эксплуатационных характеристик в пределах норм, соответствующих техническим условиям [1].

В процессе хранения на изделия радиоэлектронной аппаратуры воздействует большое число объективных и субъективных эксплуатационных факторов. Совместное действие этих факторов приводит к тому, что параметры изделий, а, следовательно, и выходные параметры аппаратуры претерпевают изменения, которые могут быть достаточными, чтобы привести к ее отказу.

2. Оценка сохраняемости пассивной элементной базы (резисторов и конденсаторов) выполнялась экспериментально, по элементной базе с длительным сроком хранения.

Сохраняемость изделий РЭА зависит от сохраняемости и долговечности электрорадиоэлементов (ЭРЭ), из которых состоит это изделие.

Практика показывает, что отказы элементов при хранении в основном возникают за счет воздействия повышенной влажности и температуры [2].

Основными количественными характеристиками надежности при хранении являются интенсивность возникновения отказов при хранении λ_{xp} и среднее время хранения на одну неисправность T_{xp} .

Опыт хранения радиоэлектронной аппаратуры показывает, что величина λ_{xp} не остается постоянной. Зависимость λ_{xp} от времени хранения имеет такой же вид, что и λ – характеристика при нормальной эксплуатации [3]. Первый участок при отсутствии пределов наработки аппаратуры характеризуется повышенной интенсивностью отказов и имеет длительность порядка 3-10 месяцев. В большинстве случаев аппаратура имеет предшествующую наработку. Обычно наработка аппаратуры, предшествующая хранению, такова, что начальный участок характеристики с повышенной интенсивностью отсутствует, поэтому при дальнейшем анализе будем принимать:

$$\lambda_{xp} = \text{const.} \quad (1)$$

Интенсивность возникновения неисправностей при хранении ориентировочно может быть определена из соотношения [3]:

$$\lambda_{xp} = \lambda_0 (10^{-2}-10^{-3}), \quad (2)$$

где λ_0 – интенсивность отказов той же аппаратуры в период нормальной эксплуатации.

Соотношение между λ_0 и λ_{xp} подтверждается данными из источников [1,2], приведенными в таблице 1 для постоянных резисторов.

Таблица 1

Параметры	Резисторы				
	постоянные непроволочные металло- диэлектрические	металло- диэлектрические прецизионные	металлизиро- ванные	композиционные проволочные	композиционные объемные
$\lambda_0 \cdot 10^8, \text{ г}^{-1}$	5	4,3	4,0	3,0	4,0
$\lambda_{xp} \cdot 10^{10}, \text{ г}^{-1}$	36	36	36	36	36

Необходимо учитывать также условия хранения элементов. В этом случае интенсивность возникновения неисправности при хранении будет являться функцией условий хранения, что учитывается введением поправочных коэффициентов в расчет λ – характеристик изделий:

$$\lambda_{xp,з} = \lambda_{xp} \cdot K_{усл} \cdot K_{t, xp} \cdot K_{пр}, \quad (3)$$

где $\lambda_{xp,з}$ – интенсивность возникновения неисправностей при хранении в реальных условиях; $K_{усл}$ – коэффициент условий хранения; $K_{t, xp}$ – коэффициент влияния температуры хранения; $K_{пр}$ – коэффициент приемки.

Исследование зависимости вероятности безотказного хранения $P_{xp}(t)$ от времени хранения t показывает, что для радиоэлектронной аппаратуры она подчиняется экспоненциальному закону:

$$P_{xp}(t) = \exp(-\lambda_{xp} \cdot t) \quad (4)$$

Из (4) следует, что параметр λ_{xp} связан обратной зависимостью с T_{xp} :

$$T_{xp} = 1 / \lambda_{xp}. \quad (5)$$

Хранение изделий может проводиться в складских или полевых условиях. В свою очередь, в складских условиях это может быть отапливаемое или неотапливаемое помещение. Во втором случае необходимо учитывать циклические изменения температуры хранения (до 50 циклов в год).

Проверка изделий на сохраняемость может осуществляться разными методами.

Прямые испытания осуществляются путем закладки выборки из партий нескольких изделий на полный срок хранения.

При хранении изделий проводятся следующие работы: контроль за условиями работы и за состоянием изделия; профилактические мероприятия, направленные на предупреждение отказов изделия в процессе хранения; замена влагопоглотителей; ремонтные мероприятия.

Контроль за состоянием изделия включает внешний осмотр и инструментальный контроль параметров. Обычно внешний осмотр, дающий возможность выявить такие неисправности, как наличие механических повреждений, коррозии, нарушение защитных покрытий и т.д., проводится в несколько раз чаще, чем инструментальный контроль параметров [5].

Метод позволяет определить характеристики сохраняемости тогда, когда изделия начинают морально устаревать, поэтому невозможно внести коррекции в производство и конструкцию изделия.

Ускоренные испытания рассматриваются как разновидность физического моделирования, позволяющего оценить надежность приборов при сжатом масштабе времени. В качестве ускоряющих факторов, способствующих выявлению потенциально слабых мест в приборах при хранении, рассматривают температуру и влажность. При воздействии ускоряющих факторов возбуждения физические факторы должны быть теми же, что и при обычном хранении.

Обычно при выборе режима таких испытаний исходят из закона Аррениуса, записывая его для интенсивности отказов при хранении в следующей форме:

$$\lambda_{xp,y}(T) = K_{\lambda} \exp(-A/T) \quad (9)$$

В основе идеи ускоренных испытаний при формировании режимов лежит уравнение вида:

$$\lambda_{xp,o} t_{xp} \approx \lambda_{xp,y} \cdot t_{xp,y}, \quad (10)$$

где $\lambda_{xp,o}$ – интенсивность возникновения неисправности при хранении в нормальном режиме.

Метод аналогий. Оценка сохраняемости изделия методом аналогии предусматривает проведение сравнительного анализа конструкции, и воздействующих факторов рассматриваемого изделия по отношению к параметрам изделий, материалов, элементов, о сохраняемости которых имеется информация [5].

При методе аналогий необходимо учитывать:

- нагрузки, возникающие за счет внешних воздействующих факторов и степень защиты от них;
- тип конструкции изделия, материалы, применяемые в конструкции;
- место установки элементов в изделии, конструктивное оформление элементов;
- прочностные характеристики материалов и элементов.

Оценка долговечности при хранении методом аналогии по элементам более точна и перспективна, так как позволяет более полно учесть особенности сравниваемых элементов. Причем, объем информации по отдельным типам функциональных узлов значительно выше, чем по преобразованным выходным параметрам элемента в целом.

Наиболее точным метод аналогий становится, если оценку вести на уровне материалов и элементов. Причем, за отказ элементов следует принять выход его основной эксплуатационной характеристики за допустимые пределы.

В соответствии с ОСТ 11.070.050 допускается возможность расчета показателей надежности радиоэлектронных компонентов как расчетно-экспериментальным, так и расчетным методами [8].

Большая часть элементной базы электронных блоков составляют резисторы, которые дают 50-60% всех отказов электронной аппаратуры. На надежность резисторов отрицательно влияет влага. Она ускоряет коррозию контактных выводов, что нередко приводит к их обрыву и способствует растрескиванию защитных эмалей. Проникающая через трещину влага разрушает резистивные слои или проводники [7].

При хранении электронных компонентов в закрытых помещениях с температурой хранения $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, влажности 60 % при 25°C и давлении 750 ± 10 мм.рт.ст. процессы старения протекают крайне медленно и срок службы элементов увеличивается и вероятность безотказного хранения остается очень высокой за очень большое время хранения. Соответственно, вероятность безотказной работы после хранения

$P_{xp}(t) = e^{-\lambda_{xp}t}$, где t – время хранения.

Найдем значение вероятности безотказного хранения резисторов, находящихся на хранении в течении 30 лет. Значение $t = 2,63 \cdot 10^5$ час. Вычислим

$$P_{xp}(t) = e^{-3610^{-10} \cdot 2,6310^5} = e^{-9510^{-5}} = 0,999.$$

Как видно из вычислений такие компоненты как резисторы имеют очень высокую вероятность безотказной работы.

Экономика микроэлектронной отрасли

Проводилось исследование резисторов группы МЛТ, ОМЛТ, С2 со сроком хранения более 30 лет. Установлено, что внешний вид резисторов не изменился. Гистограмма одного из распределений сопротивлений резисторов представлена на рис. 1. Всего было проанализировано шесть групп резисторов 1969-1989 годов выпуска одного номинала 130 кОм.

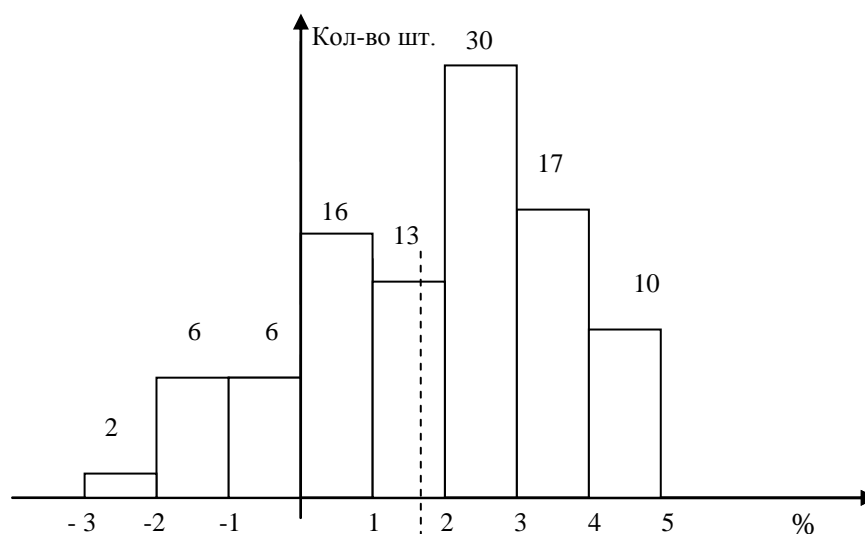


Рис. 1. Гистограмма распределения сопротивлений для резисторов ОМЛТ 1975 г. номиналом 130 кОм $\pm 5\%$

Из распределений следует, что резисторы выпуска 1975 г. и позднее имеют отклонение номинального сопротивления в пределах допуска. Это подтверждается измерениями, выполненными для резисторов других номиналов группы МЛТ. Данные по отклонениям номинальных сопротивлений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Год изготовления	Резисторы МЛТ с назначенным допуском									
	130 К $\pm 5\%$		150 К $\pm 5\%$		220 К $\pm 5\%$		240 К $\pm 5\%$		240 К $\pm 10\%$	
	$M(\bar{R})^*$	$\delta R\%^{**}$	$M(\bar{R})$	$\delta R\%$	$M(\bar{R})$	$\delta R\%$	$M(\bar{R})$	$\delta R\%$	$M(\bar{R})$	$\delta R\%$
1969	132,1	+7 -4	152,67	+7 -2			244,5	+7 -6		
1970	131,88	+7 -8	153,5	+7 -5	221	+7 -4	242,3	+7 -7		
1971	130,25	+5 -4	150,74	+6 -4	219	+8 -7	243	+6 -3		
1972					221,5	+6 -4			243,9	± 6
1975	131,58	+5 -3	151,2	+5 -4	222,54	+4 -3	242	+5 -5		
1976					223,61	+5 -4				
1988	128,4	+4 -4			220,5	+4 -3				
1989	132,5	+4 -3	152,1	+5 -3			224,4	+5 -3		

* $M(\bar{R})$ – среднее арифметическое значение сопротивления резистора;

** $\Delta R\%$ – допустимое отклонение измеряемого сопротивления резистора.

Резисторы, выпущенные до 1975 года, имеют отклонения номинальных сопротивлений за пределами допустимых отклонений, что свидетельствует о процессе старения.

Имеют номинальное сопротивление в пределах допуска резисторы, имеющие год выпуска меньше 1975 г., следовательно, процесс старения для них не критичен.

Исследовался переменный резистор группы СП5 проволочный подстроечный. Оценка надежности переменных резисторов проводилась по поведению проволочных постоянных резисторов расчетным методом, по временной зависимости.

Расчетный метод основывается на статистическом прогнозировании показателей надежности по временной зависимости. Для прогнозирования используют данные испытаний на надежность радиоэлектронных компонентов методом длительного хранения, причем, время испытаний должно быть не менее 25% срока сохраняемости, установленного в ТУ [2].

При использовании расчетного метода на основе анализа экспериментальных данных о распределении параметра-критерия годности выбирается преобразующая функция, которая приводит распределение величины ΔR_d к нормальному виду. С ее помощью и производится прогнозирование изменения значения ΔR_d в течение требуемого времени [2].

В соответствии с представлениями о старении резисторов зависимость $\Delta R_d(t)$ может быть представлена моделью Аврами:

$$\Delta R_d = \Delta R_{d \max} \cdot (1 - \exp(-K_1 t^{K_2}))$$

Для рассматриваемых резисторов $\Delta R_{d \max} = \text{const} = 0,1$, а ΔR_d за 5 и 15 лет составляет 0,06 и 0,08 процентов соответственно, вычислим коэффициенты K_1 и K_2 , по экспериментальным данным: $K_1 = 0,4$; $K_2 = 0,5$, поэтому к тридцати годам хранения уход параметра составит $\Delta R = 0,09\%$.

Из полученных данных видно, что резистор по-прежнему годен к эксплуатации и может применяться в электронной аппаратуре. Тем не менее, уход параметра близок к критическому, что следует учитывать при диагностике неисправностей в системах.

Для **конденсаторов** оценка сохраняемости также выполнялась экспериментальным методом по аналогам.

Основное количество отказов у конденсаторов наблюдается в начальный период эксплуатации. Около 70% всех пробоев конденсаторов происходит до наступления нормального периода эксплуатации или хранения, где $\lambda = \text{const}$. Этот период приходится на этап приработки, что позволяет значительно повысить надежность конденсаторов путем отбраковки ненадежных изделий.

На этапе исследования была произведена проверка ряда конденсаторов группы К10-17, К73-17 и К22Д, К50, К53 разных лет выпуска, которые хранились в складских помещениях. К10-17, КД-22, КМ-5 относятся к конденсаторам с неорганическим диэлектриком, визуальный осмотр показал, что их внешний вид не изменился, из гистограмм следует, что отклонения емкости в пределах допуска.

Из чего, что конденсаторы с неорганическим диэлектриком имеют высокую сохраняемость в течении 35 лет при хранении в складских помещениях. На сохраняемость конденсаторов оказывает наибольшее влияние влага и температура, однако при хранении влияние влаги можно исключить.

Конденсаторы К73 относятся к пленочным полиэтилентерефталатным и имеют распределение емкости аналогичное конденсаторам с неорганическим диэлектриком.

3. Заключение. Оценка сохраняемости пассивных элементов с длительным сроком хранения показала, что срок реальной сохраняемости отечественных резисторов и конденсаторов, выпущенных в XX веке, при хранении в складских помещениях значительно выше заявленной сохраняемости по техническим условиям.

Литература

1. Ямпурин, Н.П. Основы надежности электронных средств: учебное пособие / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова. – М.: Изд. центр «Академия», 2010.
2. Костюченков, И.В. Методы прогнозирования показателей надежности радиоэлектронных компонентов. / И.В. Костюченков, М.К. Маркелов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество- 2009» в 2-х томах. Том 2. – Пенза, 2009.
3. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры / Под редакцией Н.А. Шишонка. – М.: Сов. радио, 1964 г.
4. Борисов, Ю.И. Динамика радиоэлектроники. / Под общ. ред. Ю.И. Борисова. – М.: Техносфера, 2007.
5. Доценко, Н.С. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги) / Н.С. Доценко, В.В. Соболев. – Л., «Энергия», 1973г.
6. Баранова, А.В. Экспериментальное исследование ЭРЭ с длительным сроком хранения / А.В. Баранова, Н.П. Ямпурин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество – 2010» в 2-х томах. Том 2 / Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. – С. 93-94.
7. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов. / Н.А. Митрейкин, А.И. Озерский. – М.: «Радио и связь», 1981г.
8. Конструирование и расчет, БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе. / Под редакцией Б.Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1981г.

**INVESTIGATION OF STORABILITY OF
DOMESTIC RESISTORS AND CONDENSERS**

N. P. Yampurin, A. V. Baranova

Arzamas Politechnical Institute – branch of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

In this article questions of storability of domestic resistors and condensers with a big period of storage (30 years and more) are considered.

**ЗАЩИТА КОМПОНЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ
БИОКОРРОЗИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

к.ф.-м.н. Бритенков А.К.¹, Зоткин И.И.², к.х.н., Кузнецова Н.В.²

¹ НПО РНТОРЭС им. А. С. Попова

² ООО «АМ Лаборатория», Нижний Новгород

Применение компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РА) в условиях жаркого климата и (или) высокой влажности приводит к появлению микрофлоры (плесени, бактерий) не только на конструктивных, но и на электронных компонентах (печатных платах, интегральных микросхемах, оптических датчиках). Биокоррозия возникает при эксплуатации РА даже в космосе. Ситуация особенно осложняется для внешних блоков РА, так как биокоррозия может частично или полностью нарушить тактико-технические показатели РА и зачастую ведёт к порче дорогостоящего оборудования и отказу техники, поэтому её устранение является важной научно-практической задачей. Проблемы биокоррозии РА невозможно решить, используя лишь дезинфектанты. Авторы предложили вводить в матрицу используемого для РА полимера принципиально новый биоцид на основе хелатного соединения цинка, что в течение длительного времени эффективно устраняет биокоррозию РА.

Целью настоящих исследований было изучение биообращения РА при использовании для её изготовления полимеров с внедренным в матрицу используемого полимера принципиально нового биоцида, полученного на основе хелатного соединения цинка.

Для решения проблем биокоррозии компонентов радиоэлектронной аппаратуры была разработана серия биоцидных препаратов «Септикон», имеющие одновременно высокие фунгицидные, бактерицидные, альгицидные и вирулицидные свойства. При кажущейся насыщенности рынка биоцидных препаратов, цинк-содержащие биоциды «Септикон» обладают рядом преимуществ перед аналогичными препаратами. К основным преимуществам биоцидных препаратов «Септикон» относятся - универсальный спектр действия, подтвержденный исследованиями аккредитованных лабораторий; - низкая минимальная действующая концентрация; - способность не только предотвращать, но и уничтожать уже имеющиеся поражения микроорганизмами; - экологическая безопасность (соединения цинка относятся к 4 группе опасности); - отсутствие привыкания к ним микроорганизмов, а значит их мутации с усилением их вредных свойств.

Испытания препарата «Септикон» проведены в отделе биологических исследований НИИ Химии ННГУ. Фунгицидная активность препарата оценивалась в отношении различных ассоциативных групп 27 видов грибов согласно ГОСТ 9.049-91, ГОСТ 9.050-75 и ГОСТ 30028.4-93; бактерицидная активность в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий 6 видов оценивалась по методикам, изложенным в справочнике по микробиологическим и вирусологическим методам исследований [1]. Полученные данные демонстрируют, что разработанное ДС обладает бактерицидным действием в отношении как монокультур изученных штаммов, так и ассоциаций микроорганизмов. Устойчивость к старению цинксодержащей композиции при различных условиях свидетельствует о возможности её использования в широком диапазоне температур и при воздействии ультрафиолетового облучения.

Оценка эффективности разработанного препарата проведена в отделе лабораторных исследований НИИ профилактической медицины Нижегородской государственной медицинской академии. Объектами исследования при изучении бактерицидной активности являлись тест-штаммы E.coli шт.906 и S.aureus шт.1257, используемые для изучения бактерицидной активности ДС в соответствии с требованиями, принятыми в РФ [2]. Оценка чувствительности клинических изолятов бактерий, выделенных в ЛПО, проводилась согласно МР [2]. В качестве тест-штаммов использовались культуры P.aeruginosa и метициллинорезистентный штамм S.aureus (MRSA). Всего проведено более 100 исследований бактерицидной активности разработанного ДС и чувствительности микроорганизмов к нему. В ходе проведенных исследований эффективности ДС и чувствительности тест-штаммов и клинических изолятов микроорганизмов к разработанному цинксодержащему веществу установлена бактерицидная

активность в отношении широкого спектра микроорганизмов и чувствительность изученных штаммов к ряду режимов применения указанного средства.

Безопасность применения является важным аспектом разработки новых препаратов. Для выяснения возможности использования препарата «Септикон» проведены токсикологические испытания разработанного биоцида в аккредитованном испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Нижегородской области». Согласно заключению испытательного лабораторного центра, разработанное вещество относится к IV классу опасности, не оказывает раздражающего действия на слизистые оболочки верхних дыхательных путей и глаз, на неповрежденные кожные покровы и не обладает кожно-резорбтивным действием.

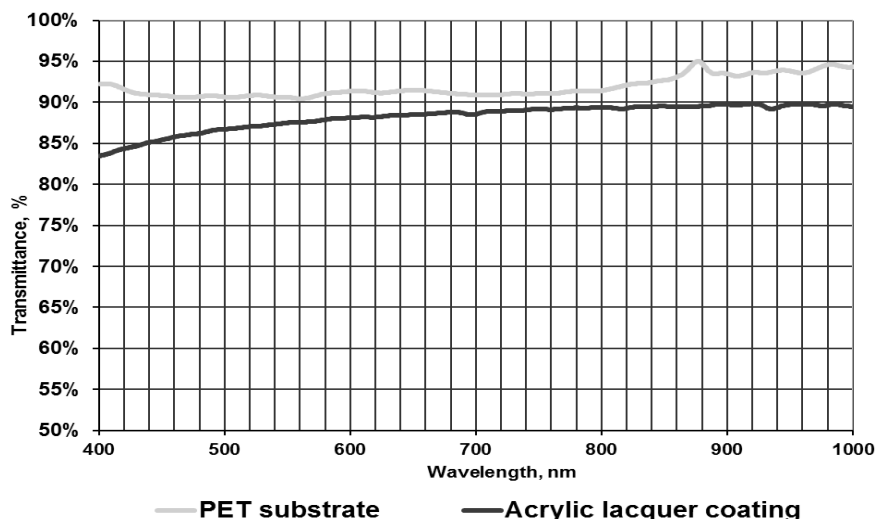


Рис. 1. Спектр пропускания оптического полиэтилентерефталата с антимикробным на основе хелатного соединения цинка с защитным покрытием и без него

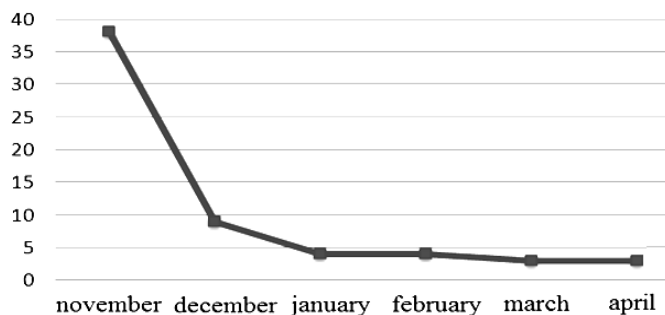


Рис. 2. Изменение во времени количества колониеобразующих единиц (КОЭ) плесневых грибов в воздухе рабочей зоны после обработки части стен производственного помещения полимерным покрытием «Септикон» при норме <math><10</math> КОЭ. Концентрация КОЭ приведена в пересчёте на см^2

Биологическая активность препарата «Септикон» сохраняется после введения его в полимерную матрицу различных по природе полимеров. В табл. 1 приведен протокол исследований чувствительности микроорганизмов к препарату «Септикон», внедренному в полимерную матрицу ПВХ. Опыт проводился методом смывов с последующим высевом на твердую питательную среду, помещением в термостат и считыванием результатов через сутки. В качестве поверхности использовались полимерные пленки размером 6x6 (контроль без введения, опыт с введением биоцида в матрицу ПВХ). Исследования показали, что ПВХ-покрытие становится биоцидным как по отношению к тест-культурам, так и клиническим изолятам. Введение биоцидного препарата дает длительную защиту, не позволяя микробной пленке расти на защищенной поверхности. Кроме того, исследование спектра пропускания используемого для экранов РА оптического полиэтилентерефталата (ПЭТ) с введенным препаратом «Септикон» показало полное сохранение прозрачности ПЭТ.

Исследования возможностей препарата «Септикон» для длительной защиты объектов в жестких условиях постоянной контаминации плесневыми грибами и бактериями показало, что данный биоцид сохраняет эффективность в течение продолжительного времени. Так, введение в состав полимерной пленки препарата «Септикон», позволяет защитить не только стены (тесты проведены для помещения

площадью 100 м² и объёмом 1000 м³), но и в течение более чем 7 месяцев исключает появление плесневых грибов в воздухе, находящемся внутри этого помещения (рис. 2).

Использование биоцида «Септикон» является весьма эффективным способом защиты не только в санитарно-гигиенической и медико-биологической сфере, но также и для РА. Препарат «Септикон» сохраняет свои свойства при нагреве до 250⁰ С, что делает его устойчивым при введении в полимер при изготовлении деталей кондиционеров, нанесении защитного покрытия для печатных плат и оптических датчиков, в том числе предназначенных для наружных систем связи, телеметрии, видеонаблюдения, мониторинга окружающей среды.

Таблица 1. Исследование бактерицидных свойств полимерной плёнки с внесением биоцида «Септикон» (1% массовой доли)

Культура	Экспозиция на поверхности полимерной плёнки с введенным биоцидом «Септикон»			
	15 мин	30 мин	45 мин	60 мин
S.aureus – эталонный штамм № 1257	115 КОЕ 26 КОЕ	5 КОЕ 1 КОЕ	7 КОЕ рн	1 КОЕ Рн
E.coli – эталонный штамм № 906	рн 3 КОЕ сплошной рост	ри 1 КОЕ ри	рн рн 2 КОЕ	рн рн 1 КОЕ
P.aeruginosa – клинический штамм	рн рн	рн рн	рн рн	рн
S.aureus – клинический штамм	сплошной рост > 3 КОЕ > 3 КОЕ	> 3 КОЕ > 3 КОЕ 48 КОЕ	8 КОЕ 21 КОЕ	рн ри
Экспозиция на поверхности полимерной плёнки без введения биоцида «Септикон»				
S.aureus – эталонный штамм № 1257	сплошной рост	сплошной рост	> 300 КОЕ	>149 КОЕ

Выводы и обсуждение результатов испытаний. Проведённые испытания разработанного препарата «Септикон», включавшие в себя более 500 тестов, показали, что на данный момент отсутствуют аналоги [4], сопоставимые по эффективности и спектру действия препарата. Использование полимерных покрытий с внедрённым в матрицу хелатным соединением цинка «Септикон» в течение длительного времени способно надёжно защитить РА от биокоррозии без изменений её тактико-технических показателей.

Литература

1. Справочник по микробиологическим и вирусологическим методам исследований / Под ред. М.О. Биргера. М.: Медицина, 1982. – 464 с.
2. Руководство Р 4.2.2643-10 «Методы лабораторных исследований и испытаний дезинфекционных средств для оценки их эффективности и безопасности» / Утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом РФ 1 июня 2010 г.
3. Способ определения чувствительности микроорганизмов к дезинфицирующему средству (варианты). Пат. 2378363 Российская Федерация. / Шкарин В.В., Ковалишена О.В., Благодравова А.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО НижГМА - №2008123115; заявл. 10.06.2008; зарег. 10.01.2010. – 1 с.
4. Благодравова А.С., Алексеева И.Г. Сравнительная характеристика чувствительности тест-микроорганизмов и клинических изолятов к дезинфицирующим средствам // Нижегородский медицинский журнал. – 2007. – №6. – С. 29–33.

Контакты:

Бритенков А.К.

e-mail: jkd@yandex.ru

Зоткин И.И.

e-mail: zotkinii@yandex.ru

Кузнецова Н.В.

e-mail: nkuznetsova51@mail.ru

PROTECTION RADIO EQUIPMENT COMPONENTS FROM BIOCORROSION UNDER EXTREME CONDITIONS

A.K. Britenkov¹, I.I. Zotkin², N.V. Kuznetsova²

¹ Nizhny Novgorod Regional Division of Scientific and Technical Society of
Radio Engineering, Electronics and Communication n. a. A.S. Popov

² JSC “AM Laboratory”, Nizhny Novgorod

Application of the components of electronic equipment in a hot environment and (or) the appearance of high humidity causes microflora (fungus, bacteria) are not only structural, but also on the electronic components (printed circuit boards, integrated circuits, optical sensors). There is biocorrosion of the electronic equipment even in space. The situation is especially complicated for using external electronic equipment blocks, when biocorrosion may partially or completely break the tactical and technical characteristics of electronics and often leads to damage of expensive equipment and machinery failure, so its elimination is an important scientific and practical task. Problems of biocorrosion of electronic equipment cannot be solved using only disinfectants. For a long time effectively eliminates biological corrosion the authors proposed to introduce new biocide based chelate compound of zinc into the matrix polymer used for electronic equipment fundamentally.

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ СВЕТОТРАНСФОРМИРУЮЩИЕ УКРЫВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЛЕСНОМ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

к. ф.-м. н. Храмов Р. Н.¹, д. б. н. Бессчетнов В. П.²,
к. с.-х. н. Бессчетнова Н. Н.², к. б. н. Гаврилова А. А.²

¹ Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН

² Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

С целью защиты растений и повышения урожайности сельскохозяйственных растений в теплицах и парниках, а также при выращивании в открытом грунте часто применяют различные укрывные материалы. В настоящее время их выбор весьма широк: полиэтиленовая пленка, ПВХ пленка, армированная полиэтиленовая пленка, воздушно-пузырчатая пленка, нетканый материал спанбонд.

Самым известным широко распространенным материалом для укрытия теплиц является полиэтиленовая пленка: она пропускает свет, защищает растения от ветра и частично сохраняет тепло. Растения под его защитой могут переносить заморозки от -2 до -7°C, что зависит от плотности пленки и объема теплицы. Но поскольку пленка воздухо- и водонепроницаема, растениям под ее укрытием необходимо регулярное проветривание и полив. Кроме того, на поверхности пленки скапливается конденсат, что приводит к возбуждению грибковых заболеваний.

Под ПВХ пленкой не бывает перегрева растений, так как пленка дышит. Вместе с тем в теплицах складывается благоприятный температурный режим, пленка защищает от заморозков и позволяет повышать ночью температуру в парниках и теплицах на 3-5°C.

В армированной полиэтиленовой пленке армирующим компонентом служит сетка из стекловолокна с ячейками около 10×10 мм, вплавленная в полиэтиленовую основу. Ее ценным качеством является механическая прочность: армированная пленка выдерживает не менее трех сезонов эксплуатации, устойчива при сильных порывах ветра, при случайном разрыве полиэтилен не расползается дальше одной ячейки. Имеется разновидность такого материала – пористая пленка, с микроскопическими отверстиями в каждой ячейке, пропускающими воздух и воду, благодаря чему растения могут свободно «дышать». Выпуск армированной пленки производится датскими и отечественными производителями.

В течение последних десятилетий большой успех приобрел из нетканый укрывной материал из полипропилена – спанбонд. В суровых условиях средней полосы России на сегодняшний день он является наиболее эффективным средством защиты растений. Благодаря своим уникальным свойствам: химической и биологической стойкостью, отсутствием токсичных выделений, устойчивостью к УФ-излучению, малой плотностью и, соответственно, весом, высокой прочностью и долговечностью и невысоким ценам этот материал пользуется большой популярностью как у садоводов-любителей, фермеров, так и у и крупных агрофирм. Спанбонд является экологически чистым, легким по весу нетканым материалом, он хорошо пропускает свет, воду и воздух. Растениям не требуется проветривание, их можно поливать непосредственно через материал, создаются оптимальные условия для выращивания растений, необходимый микроклимат.

Разработка современных технологий на основе полипропилена для производства нетканых материалов, а также текстильных решеток, сеток, специального агротрикотажа, значительно удешевляет продукцию и расширяет возможности ее применения. для укрытия теплиц и защиты от вымерзания

Экономика микроэлектронной отрасли

саженцев кустов и деревьев в зимний период применяется спанбонд плотностью 42 и 60 г/м². Материал защищает растения от легких ночных заморозков (до -3 - 4°С) и холодных туманов. Полотно проницаемо для воды и воздуха, что создает благоприятный микроклимат и увеличивает период вегетации растений. Спанбонд имеет высокую прочность – в условиях Средней полосы России его срок эксплуатации составляет три сезона. Имеет в своем составе УФ-стабилизатор.

Чтобы обеспечить быстрый прогрев почвы и постоянно поддерживать необходимую температуру, а также для защиты почвы от сорняков применяется мульчирование. С этой целью используют спанбонд черного цвета плотностью 60 г/м². В состав мульчирующего спанбонда входит специальный пигмент, который придает полотну черный цвет, что обеспечивает поглощение теплового излучения и способствует хорошему прогреву почвы. Почва под мульчей из черного спанбонда не уплотняется, остается рыхлой в течение всей вегетации без дополнительной обработки. Материал легко пропускает воду и жидкие удобрения благодаря пористости материала. Это позволяет уменьшить норму полива и испарение влаги из почвы и снизить необходимость применения пестицидов и гербицидов. Мульча сохраняет плоды от загрязнения и предотвращает образование гнили и плесени на почве и растениях. Также, как и укрывной материал для теплиц, содержит в своем составе УФ-стабилизатор.

В настоящее время современные технологии производства позволяют получать материалы с различными свойствами, в том числе и по отношению к фактору света. Так новые укрывные материалы могут содержать добавки веществ-светостабилизаторов и светопреобразователей, а также пигментов. Часто эти свойства сопряжены с механическими: так светостабилизированные материалы имеют повышенную прочность, а фотодеструктурируемые материалы для прививки черенков, разрушаются после заживления места прививки.

Введение специальных светотрансформирующих добавок в агротекстиль изменяет солнечное излучение, падающее на растения, преобразуя часть вредного ультрафиолетового излучения в полезный стимулирующий оранжево-красный свет.

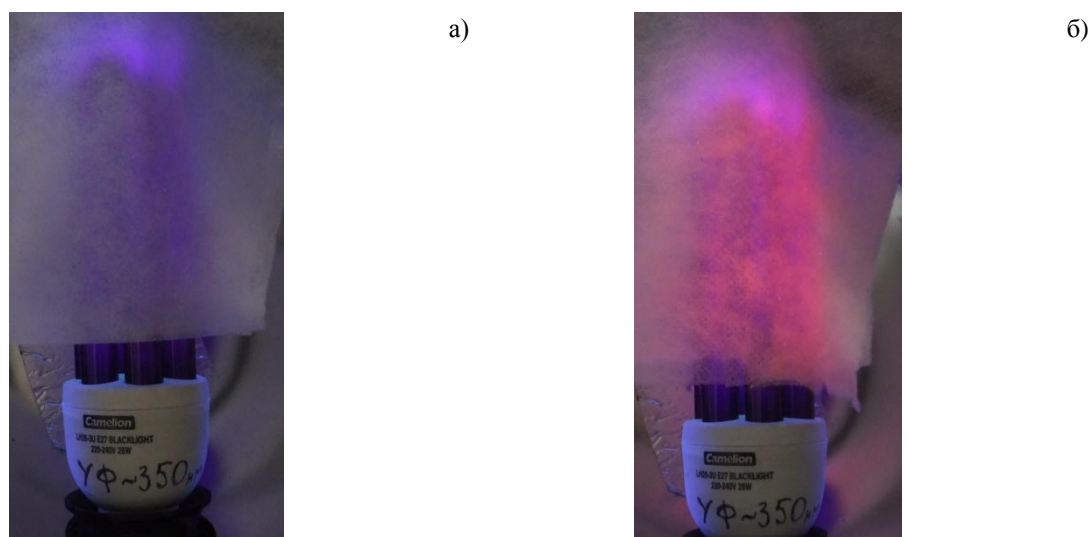


Рис. 1. Обычный агротекстиль при освещении УФ-лампой (а), светотрансформирующий агротекстиль «Люм-агро-текс» при освещении УФ-лампой (б)

Светопреобразующая полиэтиленовая пленка содержит вещества – люминофоры, которые являются своеобразными фильтрами для солнечных лучей. **Целью** создания таких материалов является интенсификация процесса фотосинтеза. Благодаря люминофорам растения усваивают более 50% видимого света, повышается урожайность, сокращаются сроки вегетации. Включения выделяют и пропускают только волны определенного диапазона – ИК-области оптического спектра, что благоприятствует созданию в подпленочном пространстве оптимальных температурных условий, исключающих как перегрев, так и переохлаждение растений и регулирует обменные процессы.

Поставленная цель достигается путем решения двух технических **задач**. Суть первой из них состоит в увеличении коэффициента преобразования УФ-составляющей солнечного света в 5-6 раз при сохранении концентрации 0,01 мас.% за счет применения люминофора с субмикронным размером частиц, что, в свою очередь, ведет к снижению стоимости укрывного материала. Второй технической задачей, является расширение арсенала материалов, пригодных для изготовления изделий, обладающих светопреобразующими свойствами.

Светотрансформирующий укрывной материал «Люм-агро-текс», разработанный Институтом теоретической и экспериментальной биофизики РАН (ИТЭБ РАН, г. Пущино) и произведенный ЗАО «Полисветан» [3] на основе нетканого термоскрепленного полипропиленового полотна и

светотрансформирующих добавок легко отличить от обычного агротекстиля по его характерному свечению оранжево-красным светом при освещении ультрафиолетовой лампой, что не наблюдается у обычного текстиля (рис. 1).

Светообразующий укрывной материал состоит из матрицы, выполненной из любого термопластичного или растворимого полимера (полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол, полиамид и др.), различного вида стекол, натуральных или искусственных волокон и активной добавки (неорганический люминофор) с субмикронными размерами частиц иттрия, европия, церия, алюминия, титана и др., преобразующих УФ-излучение в оранжево-красное.

Продуктивность растений напрямую зависит от главного фотосинтетического светопоглощающего пигмента – хлорофилла. В фотосинтезирующих клетках высших растений всегда присутствуют хлорофиллы двух типов: хлорофилл а и хлорофилл b, при чем хлорофилла а больше в 3 раза, чем хлорофилла b [5]. Они отличаются как строением (вместо метильной группы при кольце II в хлорофилле b содержится альдегидная группа), так и по спектру поглощения: нативный хлорофилл а имеет 2 максимума поглощения в сине-фиолетовой и красно-оранжевой части спектра – 430 и 680 нм, а хлорофилл b 450 нм и 650 нм [9] (рис. 2). Таким образом, фотосинтетически активная радиация (ФАР) лежит в области видимого излучения [2, 6].

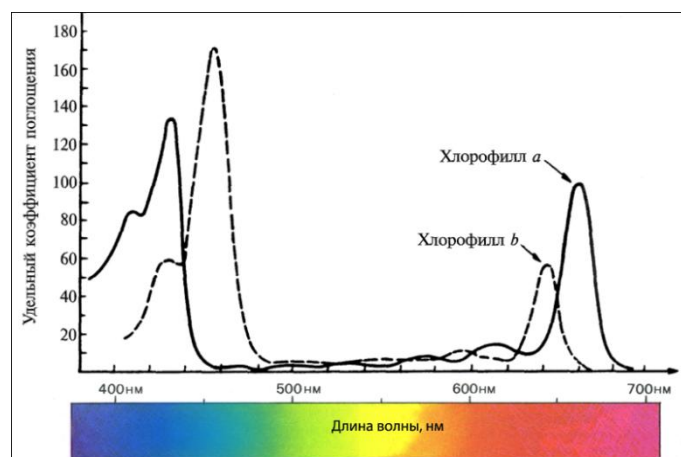


Рис. 2. Спектры поглощения хлорофилла

Хлорофилл как фотохимическое соединение чутко реагирует на состояние окружающей среды [5]. В результате атмосферных загрязнений, в частности, наличии тропосферного озона, у растений все чаще наблюдаются нарушения биосинтеза хлорофилла, их количественное соотношение (снижается хлорофилл а) [1, 12, 15]. При истощении стратосферного озона снижается содержание хлорофиллов обоих типов [10]. Уменьшение стратосферного озона усиливает облучение растений более жестким УФ-β, что приводит к обесцвечиванию и опробковению кожуры некоторых фруктов, повреждением листовых пластинок и фотосинтетического аппарата в целом [8, 11, 14, 16]. Такие негативные фотохимические процессы способствуют развитию некрозов, опадению листьев, и, в конечном счете, потере урожая [13].

Свет с длиной волны 700-750 нм («дальний красный») оказывает ярко выраженное регуляторное действие на растения, с длиной волны 1200-1600 нм (инфракрасный) – увеличивает скорость тепловых биохимических реакций [7]. В связи с этим светотрансформирующий укрывной материал, преобразующий спектр солнечного излучения (ультрафиолетовое излучение переходит в полезное для растений инфракрасное) имеет важное практическое значение для повышения продуктивности растений и улучшения качества урожая.

В ранее полученных **результатах** при выращивании растений, защиты от солнца сельскохозяйственных животных и рыб с использованием материалов, содержащих светотрансформирующие добавки «Люм-агро-текс» и «Полисветан-текс» были отмечены следующие результаты: увеличение продуктивности томатов (на 30-70%), огурцов (на 15-50%), капусты (на 20-40%), клубники (на 20-60%), зеленных культур (на 30-60%); ускорение созревания фруктов (на 7-15 дней) и цветения цветочных культур (роз на 20-30 дней, тюльпанов – на 7-10 дней); улучшение качества продукции (увеличение содержания сахаров, витамина С, каротина, снижение содержания нитратов и т.п.); повышение стресс-устойчивости растений (к жаре, заморозкам, засухе); интенсификация процессов биодegradации загрязнений в почве, за счет увеличения количества и активации почвенных микроорганизмов; оздоровление животных и рыб, ускорение их роста и увеличение продуктивности.

В области лесного хозяйства в связи с участвовавшими случаями незаконной вырубki, возникновением пожаров, особое значение имеет воспроизводство лесов, в том числе искусственным

путем [4]. Поэтому применение современных эффективных укрывных светотрансформирующих материалов при выращивании сеянцев, укоренении черенков растений, имеет такую же первостепенную важность, как и в области овощеводства и растениеводства.

В наших работах на испытательном полигоне Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии изучалось укоренение черенков туи при выращивании их в парнике, где в качестве испытываемого материала было взято нетканое светотрансформирующее укрывное полотно сельскохозяйственного назначения «Агрол» с плотностью 30 гр/м², разработанный ИТЭБ РАН и произведенный ЗАО «Полисветан». Результаты исследований показали, что опытные значения примерно на 30 % превышали контрольные, что подтверждает ранее полученные данные по другим культурам и показывает целесообразность применения данного материала в лесном и сельском хозяйстве.

Литература

1. Калверт С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений / С. Калверт. – М.: Наука, 1988. – 760 с.
2. Козырева И. Н. Формирование фитопотоков светодиодных облучательных установок для выращивания сельскохозяйственных культур в условиях защищенного грунта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / И. Н. Козырева, МГУ им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2014. – 19 с.
3. Патент RU 2 407 770 C2, МПК C09K 11/08 C08K 3/10 C08K 3/30 C09K 11/77 C08K 3/22. Светопреобразующий материал и композиция для его получения / В. А. Воробьев [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО НПФ «Свет», ЗАО «Полисветан». – № 2007108564/04; заявл. 09.03.2007; опубл. 27.12.2010, бюл. № 36. – 21 с.
4. Правила лесовосстановления (Приказ Минприроды России (МПР РФ) от 16 июля 2007 г. № 183; изменение: Приказ МПР РФ от 5 ноября 2013 г. № 479).
5. Сравнительная характеристика содержания фотосинтетических пигментов некоторых оранжевых растений при различных условиях освещенности / Турбина И.Н. [и др.] // Вестник ОГУ. – 2013. – №12 (161). – С. 179- 181.
6. Соколов А. В. Индикатор мощности ФАР для освещения растений / А. В. Соколов // Инновации в сельском хозяйстве. – ГНУ ВИЭСХ, 2013. – №1 (3). – С. 9-12.
7. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Т.М. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы. Учеб. пособие. / А. А.Тихомиров, В. П. Шарупич, Т. М. Лисовский. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2000. – 213 с.
7. Трешоу М. Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу. – Л.: Наука, 1988. – с. 357.
8. Фотобиофизика. версия 1.0 [электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / И. Е. Суковатая, В. А. Кратасюк, В. В. Межевикин и др. — Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – С. 438.
9. Ambasht Navin K. Plant responses to changing ozone and UV-B scenario/ Navin K. Ambasht, R. S. Ambasht // A review Proc. Nat. Acad. Sci., India. B. – 2005. – 75, № 3. – p. 159-168.
10. Brazaityte Ausra Zemes ukio augalu fotosintezes pigmentu sistemos tolerancija ozono ir UV-B spinduliuotes sukeltam stresui/ Brazaityte Ausra [et al.]. // Sodininkyste ir Darzininkyste, 2006. – 25, № 2. – p. 14-24.
11. Cano I. Ozone effects on three Sambucus species/ I. Cano [et al.]. // Environ. Monit. and Assess., 2007. – 128, № 1-3. – p. 83-91.
12. Grandjean A. Growth and leaf senescence in spring wheat Triticum acstivum grown of diffent ozone concentrations in open – top field chambers / A. Grandjean, J. Fuhrer // Physiol. Plant. – 1989. – 77, №3. – p. 389-394.
13. Havens Mallory A. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on photosynthesis in soybeans / Mallory A. Havens, Robert G. Ewy // 97 Annual Meeting of the Illinois State Academy of Science, Galesburg, Ill., Apr. 7-9, 2005. – Trans. Ill. State Acad. Sci. – 2005. – p. 35-36.
14. Picchi V. Photosynthetic responses of two Triticum durum varieties exposed to chronic ozone fumigation / V. Picchi [et al.]. // 13 National Meeting of the Italian Society for Plant Pathology (SIPaV), Foggia, 12-16 Sept., 2006. – J. Plant Pathol., 2006. – 88, № 3. – p. 23.
15. Saitanis C. J. Effects of ozone on chlorophyll and quantim yield of tobacco (Nicotiana tabacum L.). / C. J. Saitanis, A. N. Riga-Karandinos, M. G. Karandinos // Varieties Chemosphere. – 2001. – 42, № 8. – p. 945-953.

Контакты: Гаврилова Анна Александровна, e-mail anna-gavrilova-65@mail.ru

NANOCOMPOSITE LIGHTTRANSFORMING COVERING MATERIALS IN FOREST FARMING AND AGRICULTURE

R. N. Hramov¹, V. P. Besschetnov², N. N. Besschetnova², A. A. Gavrilova²

¹Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of RAS

²Nizhny Novgorod State Agricultural Academy

The article discusses the various modern covering materials: agrolink, a film with a reinforcing basis, spandbond, mulch: structural features and application area. Special attention is paid to ecological situation of the environment, caused by the penetration of hard ultraviolet radiation and its effects on plant productivity. In this regard, the use svetorasseivayuschim covering materials, shifting the region of UV radiation to orange-red. The work describes statransforming non-woven covering material, developed by the Institute of theoretical and experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences (ITEB RAS, Pushchino) and containing submicron particles of the phosphors, the inclusion of which leads to the conversion of more stringent UV-β radiation in orange-red. A brief description of its structural components, the results of testing this material: rooting of cuttings of thuja showed the best results compared with control, characterized by 30%.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСТАНОВКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Доронин П. А.

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Под индукционным нагревом понимается нагрев при бесконтактной передаче энергии в нагреваемое электропроводящее тело с помощью переменного электромагнитного поля, создаваемого индуктором. Индукционный способ нагрева обеспечивает достаточно высокую производительность, возможность автоматизации и приемлемый уровень сложности производства. Главным отличием индукционного нагрева от нагрева внешними источниками тепла (в печах и других нагревательных устройствах) является выделение тепла непосредственно в самом металле. Преимуществом индукционного нагрева является его высокий КПД и возможность значительной концентрации электрической энергии в небольшом объеме нагреваемого металла, что позволяет осуществлять нагрев с большой скоростью [2].

Широкое применение индукционного нагрева для различных видов термообработки изделий требует проектирования специальных высокочастотных индукторов, служащих для концентрирования переменного электромагнитного поля в нагреваемых зонах.

Физическая сущность индукционного способа нагрева заключается в следующем.

Передача электрической энергии от индуктора к нагреваемому телу основана на законе электромагнитной индукции, а превращение ее в тепловую – на законе Джоуля-Ленца.

В металлическом теле, помещенном внутрь индуктора (соленоида), через который пропускается переменный ток, изменяющееся магнитное поле вызывает появление ЭДС индукции:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где ε – мгновенное значение ЭДС индукции, а Φ – мгновенное значение магнитного потока.

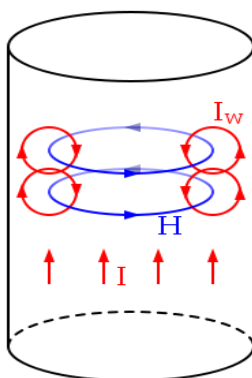


Рис. 1. Скин-эффект

Индуктированные и циркулирующие в поверхностных слоях тела вихревые токи вызывают его нагрев. Поэтому значение и характер распределения выделяющейся мощности в нагреваемом теле зависят от его электромагнитных свойств (электрического сопротивления и магнитной проницаемости), а

наличие электропроводящих свойств материала тела является обязательным условием индукционного нагрева [1].

Явление неравномерного распределения переменного электрического тока по сечению проводника, когда плотность тока у его поверхности оказывается выше, чем в глубине проводника, называют поверхностным эффектом (или скин-эффектом, рис. 1).

При пропускании переменного тока металл проводника находится в переменном магнитном поле, которое индуцирует в нем против-ЭДС. Наибольшая против-ЭДС индуцируется в центре проводника, который охватывается полным магнитным потоком. Чем ближе к поверхности проводника, тем слабее магнитное поле, а следовательно, меньше против-ЭДС. Встречая в центре проводника наибольшую против-ЭДС или наибольшее индуктивное сопротивление, ток будет стремиться пройти по пути наименьшего сопротивления и вытеснится к поверхности проводника. Таким образом, плотность тока будет уменьшаться от поверхности проводника к его оси. Неравномерность распределения тока по сечению проводника будет тем больше, чем толще проводник и выше частота тока.

Одна из разновидностей поверхностного эффекта – эффект близости. Он состоит в концентрации тока в определенных зонах поверхности проводников в результате суммарного взаимодействия электромагнитных полей всех проводников с током, входящих в рассматриваемую систему. При прохождении тока высокой частоты по двум проводникам, находящимся на близком расстоянии друг от друга, происходит перераспределение тока внутри каждого проводника. Если токи в проводниках пропускаются в разных направлениях, то наибольшая плотность тока будет сосредоточена на сторонах, обращенных друг к другу. Если же токи в проводниках имеют одинаковое направление, то наибольшая плотность тока будет на удаленных сторонах проводников. Эффект близости проявляется тем сильнее, чем ближе проводники друг к другу (рис. 2).

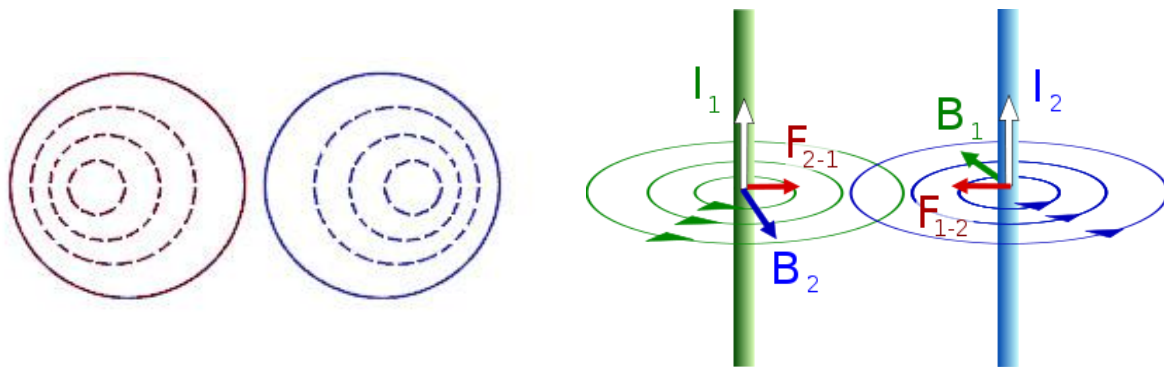


Рис. 2. Эффект близости

Передача энергии от источника питания в нагреваемое изделие при индукционном нагреве производится при помощи специального устройства – индуктора.

Индукторы изготавливают обычно из медных трубок. Во время работы индуктор охлаждается проточной водой. Форма и размеры индуктора зависят от условий нагрева, величины и конфигурации нагреваемой поверхности, а также от мощности и частоты источника питания.

Индукторы в зависимости от того, какую поверхность имеет нагреваемая деталь, разделяются на четыре вида: для нагрева внешних цилиндрических поверхностей, для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей, для нагрева плоских и сложных по форме поверхностей.

Установки индукционного нагрева могут иметь различие по типам преобразователей частоты: высокочастотные (ламповые, MOSFET, IGBT, биполярные транзисторы) и низкочастотные (MOSFET, IGBT, биполярные транзисторы, тиристоры, электромашинный преобразователь).

Метод индукционного нагрева широко применяется в различных отраслях промышленности: от расплава горных пород [3] до выращивания кремниевых подложек для электронной промышленности [4].

Целью настоящей работы было усовершенствование современной конструкции установки индукционного нагрева металлов.

Проектирование включало следующие этапы разработки: выбор топологии преобразователя частоты; выбор метода компенсации реактивности индуктора; разработка схемы управления преобразователя частоты; разработка задающего генератора, систем защиты и стабилизации.

За основу было взято устройство, имеющее следующие технические показатели. Схема преобразователя частоты: полумостовая; режим работы преобразователя: импульсный, резонансный, переключение в нуле тока; тип силовых ключей: IGBT транзисторы IRGP50B60, максимальная мощность: 3,7 кВт; диапазон частот: 75-200 кГц; максимальный КПД: 78%.

В результате проведенных работ было разработано и создано устройство индукционного нагрева на базе IGBT модулей (рис. 3). Были проведены эксперименты с макетами установок на базе тиристорного

преобразователя и с макетами установок с компенсацией реактивности на базе керамических высоковольтных конденсаторов.

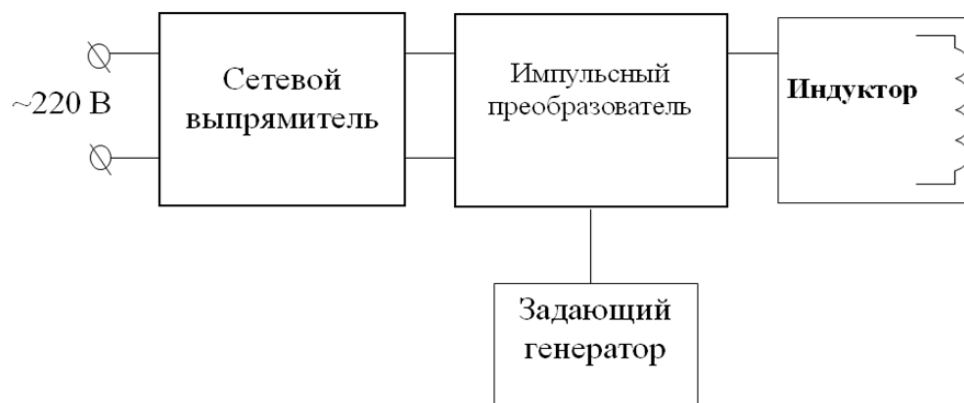


Рис. 3. Блок-схема высокочастотной установки индукционного нагрева металлов

Вывод: Проведенные эксперименты с макетами установок с компенсацией реактивности на базе керамических высоковольтных конденсаторов показали их создание целесообразным, что и будет являться целью последующих разработок.

Литература

1. Индукционные тигельные печи: учебное пособие / Л.И.Иванова [и др.] – Екатеринбург: УГТУ, 2002. – 87 с.
2. Кабалин Е. И. Разработка конструкции и методики расчета системы двухконтурного охлаждения электропроводящих тиглей вакуумных индукционных печей: дисс. канд. тех. наук / Кабалин Е. И., МЭИ. – Москва, 2014. – 112 с.
3. Татаринцева О. С. Математическое описание плавления базальта токами высокой частоты / О. С. Татаринцева, О. В. Литвинов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 266 - 270.
4. Червонный И. Ф. Особенности выращивания кремниевых основ для производства поликристаллического кремния / И. Ф. Червонный, Ю. В. Реков, С. Г. Егоров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 8 (59). – С. 47 - 51.

HIGH-FREQUENCY DEVICE OF INDUCTION HEATING

P. A. Doronin

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy

The article discusses the most effective and efficient method of heating metals. A brief description of physical principles and phenomena that are the essence of this method. The paper considers all types of inductors and installations. In the result, we've created a device for induction heating of metals based on IGBT modules. Consider the possibility of developing plants with compensation of reactivity-based ceramic high voltage capacitors.

ОБЗОР ПРИНЦИПОВ МАРШРУТИЗАЦИИ СИГНАЛОВ В АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ОДНОСЛОЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

д.т.н. Южаков А.А., Посягин А.И., Васбиева А.Ф.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Системы автоматизированного управления (САУ) все чаще встречаются в жизнедеятельности человека. Как известно, САУ обрабатывают цифровые сигналы, поэтому существует потребность представлять данные с различных аналоговых датчиков в цифровом виде. Эту функцию выполняют аналого-цифровые преобразователи (АЦП), являющиеся частью микроконтроллеров или отдельным элементом САУ. Встроенные в микроконтроллер АЦП являются удобным решением для экономии места на плате и удешевления реализации САУ, но данные АЦП обладают рядом ключевых недостатков: небольшая точность и скорость проведения аналого-цифрового преобразования, невысокая надежность заложенных алгоритмов преобразования, кроме того для проведения аналого-цифрового преобразования

требуются ресурсы микроконтроллера, которые могли быть использованы для других целей обработки полученной информации. Поэтому актуальной задачей представляется разработка аппаратно-реализованного АЦП, который бы позволил обеспечить отказоустойчивость и высокую скорость обработки входных сигналов, а также позволил бы разгрузить микроконтроллер.

Одним из перспективных направлений в данной области является применение потоковой динамической архитектуры (ПДА) для создания АЦП [1]. Реализация ПДА может быть различной, но предлагаемый нами вариант базируется на использовании нейронной сети (НС), так как это позволит минимизировать аппаратные затраты, а также обеспечить требуемую отказоустойчивость устройства. На первом этапе исследований в этой области была предложена трехслойная структура НС [2], которая содержала в себе слой основных нейронов, отвечающих за проведение аналого-цифрового преобразования и два дополнительных слоя, которые позволяли отправить входной сигнал в свободную часть НС и сформировать индивидуальный АЦП (ИАЦП) под конкретный сигнал. В дальнейшем структура была переработана и стала двухслойной [3], что позволило повысить отказоустойчивость НС, но несколько усложнило структуру основных нейронов.

Разработанная ранее НС для самомаршрутизирующегося АЦП состоит из слоя входных и выходных нейронов, а также двух скрытых слоев: слоя коммутаторов (Км) и слоя основных измерительных нейронов (ОИН) [3]. Слой Км принимает сигналы со входных нейронов и отвечает за управление, маршрутизацию и формирование ИАЦП на конкретном свободном участке сети ОИН. При реализации схем на основе такой НС в среде схемотехнического проектирования было выявлено, что для одного Км необходимо более 1000 логических элементов «2И-НЕ». Таких же элементов для реализации одного ОИН требуется около 100. Как было отмечено в [2], при уменьшении возможной минимальной разрядности индивидуального ИАЦП, количество Км возрастает, что приводит к значительному увеличению аппаратных затрат. Кроме того, для соответствия требованиям отказоустойчивости, необходимы дополнительные связи между последним собственным ОИН одного коммутатора и первым ОИН следующего коммутатора [3]. То есть, в НС добавляется как минимум n дополнительных связей, где n – число коммутаторов. Также выход из строя Км приводит к потере доступа к части исправных и свободных ОИН, что плохо сказывается на надежности и функциональных возможностях всего устройства в целом. Таким образом, стояла задача отказа от дополнительного слоя коммутаторов в пользу однослойной НС, состоящей только из слоя ОИН.

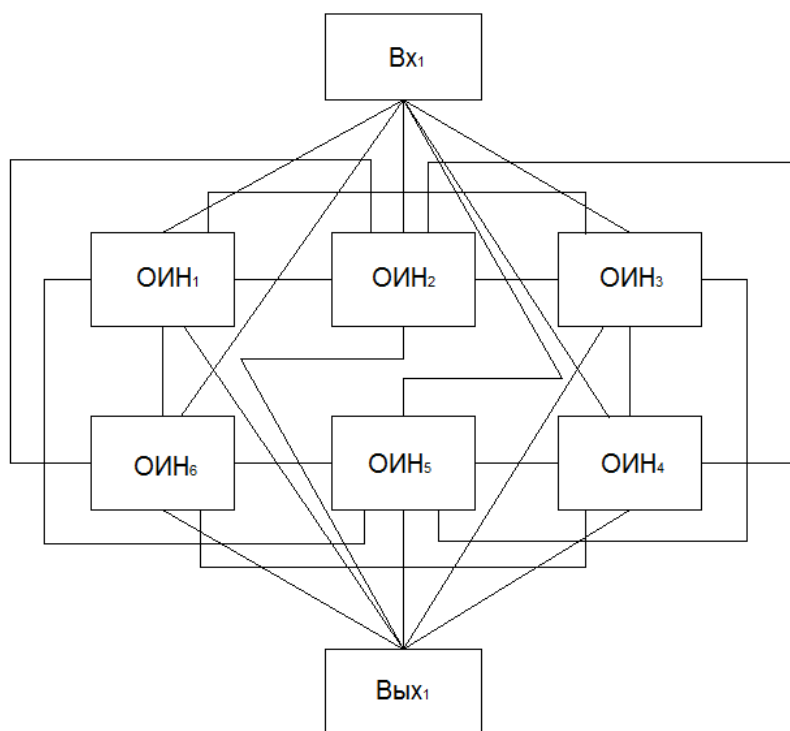


Рис. 1. Пример НС с одним входным и выходным нейроном и шестью ОИН в скрытом слое, введена одна дополнительная связь для обеспечения отказоустойчивости

В этом случае данный слой будет представлять собой замкнутую последовательность соединенных ОИН по типу топологии кольца, но с применением дополнительных связей (рис. 1), кроме того каждый из ОИН будет соединен с входными и выходными нейронами, которые будут играть вспомогательную роль при передаче заявки на формирование ИАЦП и выводе итогового значения отсчета. В качестве

примера (рис. 1) приведена одноотказоустойчивая НС, в которой при выходе из строя любого из ОИН сигналы будут все равно передаваться между ОИН, используя дополнительную связь.

Для того чтобы реализовать функции маршрутизации сигналов и формирования ИАЦП на свободном участке НС, которые решались с помощью коммутаторов, ОИН должен иметь возможность самостоятельно узнавать о состоянии последующих ОИН. Для этого было предложено использовать метод на подобии «эхо-локации», применяемой, например, летучими мышами при определении расстояния до окружающих препятствий. В данном случае ОИН посылает следующему за ним нейрону сигнал «эхо-запрос», который представляет собой последовательность логических «1», длиной соответствующей максимальной разрядности заявки для формирования ИАЦП. Каждый из ОИН получивший «эхо-запрос» передает его дальше, уменьшая последовательность единиц на одну, в случае если дальше передавать становится нечего, то передача «эхо-запроса» прекращается. Одновременно с этим ОИН, получивший «эхо-запрос», передает обратно сигнал «эхо-ответ», который представляет собой импульс логической «1» длиной один такт. При этом все ОИН, которые не являлись источником «эхо-запроса», а лишь передавали его, транслируют сигнал «эхо-ответа» дальше. Таким образом, в ОИН, который отправил «эхо-запрос» приходит некоторое количество «эхо-ответов» соответствующее количеству свободных и исправных ОИН, которые могут быть использованы им для формирования ИАЦП.

ОИН, являющийся источником «эхо-запроса» будем называть активным, все остальные пассивными. При этом существует два вида активных ОИН: первый – временно активный ОИН – это нейрон, посылающий «эхо-запросы» постоянно по некоторому тайм-ауту, заложенному изначально в структуру ОИН. Второй тип активных ОИН связан с тем, что при размещении в НС хотя бы одного ИАЦП либо при появлении в кольце ОИН разрыва, который невозможно обойти с помощью дополнительных связей, для нас принципиальным становится формирование новых ИАЦП, начиная с ОИН следующего сразу за разрывом, либо ранее сформированным ИАЦП. Это связано с рациональным распределением ресурсов НС между формируемыми ИАЦП. Такие ОИН будем называть вынужденно активными ОИН.

Временно активные ОИН включаются в работу поочередно, каждый в соответствии со своим внутренним счетчиком тайм-аута, поэтому в НС всегда присутствует несколько временно активных ОИН, каждый из которых считает «эхо-ответы» и в соответствии с этим имеет некоторое значение в счетчике доступных ОИН для формирования ИАЦП. Так как для посылки «эхо-запроса» и подсчета «эхо-ответов» требуется некоторое время, то информация, хранящаяся в ОИН, быстро устаревает, поэтому не получив команды на формирование ИАЦП, ОИН сбрасывает значение счётчика и возвращается в пассивное состояние. Вынужденно активные ОИН должны иметь более актуальную информацию о расположенных вслед за ними ОИН, поэтому они не сбрасывают счетчик «эхо-ответов», а вместо этого, как только к ним прекращают поступать «эхо-ответы», что говорит о том, что расчет окончен, посылают новый «эхо-запрос», таким образом постоянно обновляя информацию о состоянии доступных им для формирования ИАЦП ОИН.

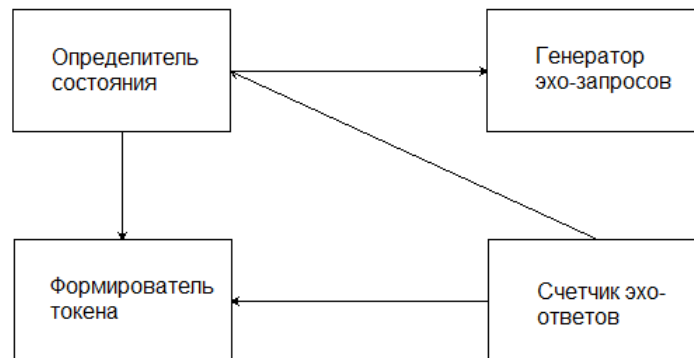


Рис. 2. Структурная схема системы управления ОИН

Так как процесс подсчета ОИН является случайным, то есть ОИН не связаны между собой никаким синхросигналом для отправки очередного «эхо-запроса», а ориентируются только на собственный внутренний счетчик тайм-аута, поэтому необходимо предусмотреть порядок действия ОИН при поступлении запроса на определенное число разрядов, которое можно разместить одновременно на нескольких участках сети. В таком случае ОИН будет действовать следующим образом, при поступлении запроса на определенное число запросов схема определителя состояния (рис. 2) будет вычитать значение запроса из состояния счетчика «эхо-ответов», получая таким образом количество «лишних» ОИН доступных для формирования ИАЦП на данном участке сети. Естественно, мы заинтересованы, чтобы

число доступных ОИН и число запрашиваемых разрядов для ИАЦП было максимально близким, так как это позволит уплотнить размещаемые в сети ИАЦП. Для этого полученная разница между запросом и значением счетчика поступает на декрементирующий счетчик, который уменьшает ее значение с каждым тактом на единицу и как только значение на этом счетчике становится равно нулю, ОИН формирует токен, то есть сообщает входному нейрону, что готов приступить к формированию ИАЦП.

Входной нейрон в данной конфигурации сети играет вспомогательную роль и передает значение запроса для конкретного входного сигнала всем ОИН, которые находятся в состоянии подсчета «эхо-ответов», а также определяет какому из них поручить формирование ИАЦП, ориентируясь на полученные токены. При этом входной нейрон наверняка знает, какие из ОИН находятся во временно-активном состоянии, а какие в вынужденно-активном состоянии, так как они имеют разный тип токена. Таким образом, входной нейрон может определить какому из ОИН имеет смысл поручить формирование ИАЦП для рационального размещения ИАЦП в сети.

Итогом проделанной работы является новая структура нейронной сети, состоящая из одного скрытого слоя нейронов, что упрощает решение вопроса по увеличению отказоустойчивости. Кроме того, использование именно одного скрытого слоя нейронов значительно упрощает применение местной системы управления для разделения функций по формированию ИАЦП и проведению аналого-цифрового преобразования между ОИН, которое обусловлено повышением отказоустойчивости системы. Таким образом, модернизирована система управления ОИН, которая была заложена на этапе разработки двухслойной сети [4], при этом принцип проведения самого аналого-цифрового преобразования остается неизменным.

В дальнейшем предполагается реализовать модель данной сети в среде MultiSim с целью сравнить аппаратные затраты на однослойную сеть по сравнению с двухслойной. Кроме того, необходимо тщательнее продумать алгоритм работы входного нейрона, а конкретно рассмотреть задержки, возникающие при формировании ИАЦП и их влияние на общее время преобразования. Также требуется оценить влияние задержек связанных с формированием «эхо-запросов» и «эхо-ответов» на формирование ИАЦП.

Литература

1. Матушкин Н.Н., Южаков А.А. Измерительные преобразователи на основе потоковой динамической архитектуры // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1994. №1. С.16-21
2. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети. Электротехника. 2012. № 11. С. 18а-24.
3. Посягин А.И., Южаков А.А. Самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе двухслойной нейронной. Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2013. № 11. С. 076-081.
4. Васбиева А.Ф., Посягин А.И., Южаков А.А. Анализ работы основного измерительного нейрона самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети. В сборнике: Информационные технологии в науке, образовании и управлении под редакцией проф. Е.Л. Глоризова. Москва, 2015. С. 240-246.

SURVEY OF ROUTING PRINCIPLES OF SIGNALS IN ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER BASED ON ONE-LAYER NEURAL NETWORK

A. A. Yuzhakov, A. I. Posyagin, A. F. Vasbieva

Perm National Research Politechnical University

The paper deals with advanced neural network scheme of self-routing analog-to-digital converter and basic measuring neuron scheme. Advanced neural network scheme has three layers: input neurons, basic measuring neurons and output neurons. Interaction principles and connection with other neurons mechanisms are described.

ОВЧ—СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЕМ

д.т.н. Баранов А.В.

ОАО «НПП «Салют», Нижний Новгород

Одним из основных элементов современных синтезаторов, использующих системы автоматической подстройки частоты [1], является генератор, управляемый напряжением (ГУН) или «voltage controlled oscillator» (VCO). Зарубежные производители предлагают широкий спектр данных устройств, в том числе и LC-типа. С целью замещения некоторых из них в данной работе предлагаются результаты разработки отечественных перестраиваемых LC-генераторов и исследуются особенности их проектирования на частотах до 10 ГГц.

Предметом исследования являются автогенераторы с положительной обратной связью, в частности, LC-генераторы осцилляторного типа [2], которые выполнены по обобщенной схеме трехточки (см. рисунок 1 а); соответствующие точки обозначены буквами а, б и с).

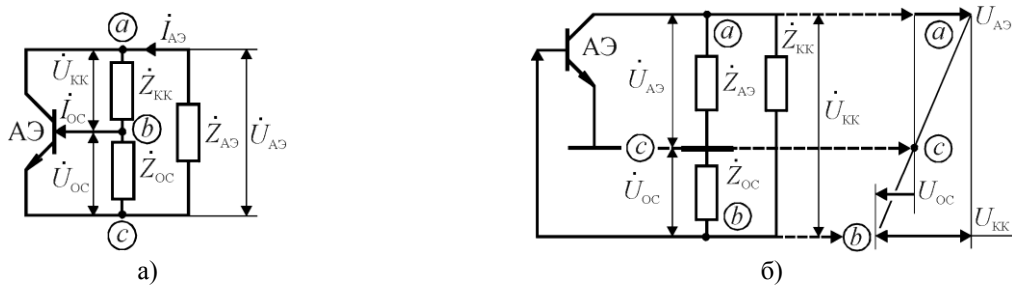


Рис. 1. Схемы автогенераторов с положительной обратной связью

Выбор элементов обобщенной схемы на рисунке 1 а) не зависит от типа активного элемента (АЭ). Если в качестве АЭ использовать транзистор, то $Z_{АЭ}$, $Z_{КК}$, $Z_{ОС}$ обозначим элементы, которые характеризуются импедансами активного элемента $Z_{АЭ}$ колебательного контура $Z_{КК}$ и цепи положительной обратной связи $Z_{ОС}$. В общем случае эти импедансы являются комплексными величинами. Здесь также показаны амплитуды комплексных напряжений и токов на входе $U_{ОС}$, $I_{ОС}$ и выходе $U_{АЭ}$, $I_{АЭ}$ транзистора и на колебательном контуре $U_{КК}$. Обобщенная схема трехточки всегда может быть приведена к стандартному виду, характерному для генераторов с положительной обратной связью. Пример такого сведения представлен на рисунке 1 б) для случая, если в качестве общего «заземляющего» электрода транзистора выбрать его эмиттер. Работу этого генератора можно пояснить, используя амплитуды напряжений на входе $U_{ОС}$ и выходе $U_{АЭ}$ АЭ, а также на колебательном контуре $U_{КК}$, которые показаны на рисунке 1 б) в виде векторов.

Обычно в качестве элементов $Z_{АЭ}$, $Z_{КК}$, $Z_{ОС}$ применяются емкости и индуктивности (или расстроенные контура, которые можно представить эквивалентными емкостями или индуктивностями) с малыми потерями. По этой причине в первом приближении их можно считать чисто реактивными: $Z_{ОС} = jX_{ОС}$; $Z_{АЭ} = jX_{АЭ}$; $Z_{КК} = jX_{КК}$. Причем для индуктивного элемента $X_L = \omega L > 0$, а для емкостного $X_C = -j/\omega C < 0$. Тогда для реактивных сопротивлений трехточки $X_{АЭ}$, $X_{КК}$, $X_{ОС}$ необходимыми для режима автогенерации являются следующие условия [2, 3]:

$$X_{АЭ} X_{ОС} > 0; \tag{1}$$

$$X_{АЭ} X_{КК} < 0; \tag{2}$$

$$\begin{cases} |X_{ОС}| < |X_{АЭ}| \\ |X_{ОС}| < |X_{КК}| \end{cases} \tag{3}$$

Неравенство (1) означает, что реактивности элементов $Z_{АЭ}$ и $Z_{ОС}$ должны иметь одинаковые знаки. Вместе с тем, из неравенства (2) следует, что реактивности элементов $Z_{КК}$ и $Z_{ОС}$ должны иметь разные знаки: если $Z_{КК} = j\omega L_{КК}$, то $Z_{ОС} = -j/\omega C_{ОС}$ (и наоборот, если $Z_{КК} = -j/\omega C_{КК}$, то $Z_{ОС} = j\omega L_{ОС}$). Таким образом, если $X_{АЭ}$, $X_{ОС}$ являются индуктивными сопротивлениями, то $X_{КК}$ – это емкостное сопротивление, а трехточка называется индуктивной. Возможен второй вариант построения схемы автогенератора, когда $X_{АЭ}$, $X_{ОС}$ могут быть сопротивлениями емкостей, а $X_{КК}$ должно быть только индуктивным сопротивлением. В этом случае трехточка называется емкостной. При выполнении неравенств (3) в автогенераторе реализуется условие минимальной обратной связи. Оно необходимо для обеспечения режима работы АЭ автогенератора без захода его в перенапряженный режим, который характеризуется повышенным уровнем высших гармонических составляющих. Так, чтобы выполнить условия (3), для любой индуктивной трехточки число витков индуктивности $L_{ОС}$ всегда должно быть меньше количества витков $L_{АЭ}$ или $L_{ОС} < L_{АЭ}$. Вместе с тем, для любой емкостной трехточки $C_{ОС} > C_{АЭ}$. При таком выборе элементов напряжение $U_{ОС}$ становится относительно небольшим, но достаточным для возникновения генерации колебаний. Кроме того, оптимизируя в автогенераторе величину обратной связи (мощность на входе транзистора, в частности) можно понизить уровень спектральной плотности мощности фазового шума [4].

На практике различают шесть основных вариантов автогенераторов, производных от обобщенной схемы на рисунке 1 а). Если по очереди приравнять потенциалы узлов а, б, с к нулевому уровню по высокой частоте, то для индуктивной и емкостной схем трехточек можно получить по три модификации автогенераторов, которые изображены на рисунках 2 а), б), в) и, соответственно, 3 а), б), в). Для удобства все модификации схем представлены в виде генераторов с положительной обратной связью, в которых АЭ включены либо с общим эмиттером (ОЭ), либо с общей базой (ОБ), либо с общим по отношению к входному и выходному сигналам эмиттером и одновременно «заземленным» по высокой частоте коллектором (ОЭ-ЗК).

В англоязычной литературе устройства на рисунках 2 а), б), в) известны как автогенераторы Хартли, генератор на рисунке 3 а) назван генератором Пирса, а генераторы на рисунках 3 б), в) – автогенераторами Колпиттца. Из литературных источников известны и другие модификации приведенных выше автогенераторов. Например, возможна еще одна разновидность генератора Колпиттца, в которой на рисунке 3 б) меняются местами узлы а и с, то есть выходная мощность генератора снимается не с коллектора, а с эмиттера транзистора. Одной из модификаций емкостной трехточки является схема генератора Клаппа, в которой последовательно с индуктивностью $L_{КК}$ включен конденсатор. С его помощью обеспечивается развязка цепей коллектора и базы по постоянному току, а на высоких частотах может быть увеличена величина индуктивности $L_{КК}$. Некоторые авторы выделяют также двухконтурные схемы построения LC-генераторов, в которых в качестве элементов $Z_{АЭ}$, $Z_{ОС}$ используются LC-контур [1]. Согласно условиям (1) и (2) эквивалентные реактивности LC-контуров и соответствующие им реактивности $X_{АЭ}$, $X_{КК}$, $X_{ОС}$ должны иметь одинаковые знаки. С учетом этого все перечисленные выше варианты генераторов всегда могут быть сведены к одной из шести схем генераторов, приведенных на рисунках 2 и 3.

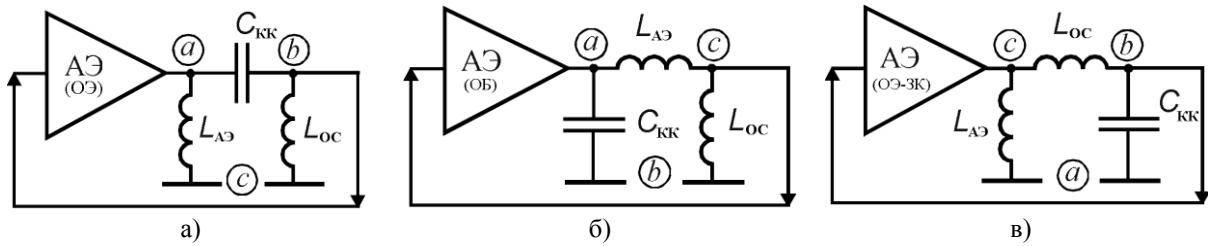


Рис. 2. Автогенераторы Хартли

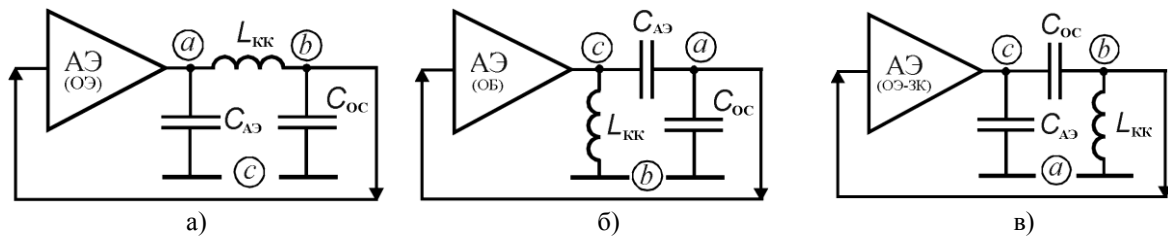


Рис. 3. Автогенераторы Пирса (а) и Колпиттца (б, в)

Частота генерации любого трехточечного автогенератора на рисунках 2 и 3 полностью определяется реактивными сопротивлениями $X_{АЭ}$, $X_{КК}$, $X_{ОС}$ в выражении: $X_{АЭ} + X_{КК} + X_{ОС} = 0$ [3]. Если предположить, что режим работы транзистора не влияет на частоту генерации и что вариации частотно-зависимых параметров элементов схемы трехточки $X_{АЭ}$, $X_{КК}$, $X_{ОС}$ связаны только с целенаправленным действием разработчика, то в автогенераторах можно говорить о процессах управления частотой генератора. А устройства, в которых реализованы эти процессы, называют перестраиваемыми по частоте генераторами. Если при этом управление частотой выполняется при помощи напряжения, то такие устройства называют ГУН. Обычно для управления частотой генератора к одному из элементов трехточки подключают варикап, величина емкости перехода которого зависит от приложенного запирающего напряжения. Причем неважно к индуктивному или емкостному элементу подключается один или несколько варикапов, необходимо только, чтобы для эквивалентных реактивностей в ГУН выполнялись условия (1) – (3). На низких частотах не имеет особого значения в соответствии с какой из шести схем на рисунках 2 и 3 выполнен ГУН. Лишь из соображений простоты реализации многие разработчики предпочитают на низких частотах использовать автогенераторы, в которых АЭ включен по схеме с ОЭ. В большей степени для работы в высокочастотном диапазоне подходят автогенераторы, в которых транзистор включен по схеме с ОБ. Это связано с тем, что граничная частота единичного усиления транзистора в схеме с ОБ имеет, как правило, более высокое значение, чем величина аналогичной характеристики того же транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Кроме того, при проектировании ГУН на высоких частотах необходимо принимать во внимание межэлектродные емкости транзисторов: емкости «коллектор-база» ($C_{КБ}$), «эмиттер-база» ($C_{ЭБ}$) и «коллектор-эмиттер» ($C_{КЭ}$), так как их величины становятся соизмеримыми с расчетными величинами емкостей контуров, описываемых реактивными сопротивлениями $X_{АЭ}$, $X_{КК}$, $X_{ОС}$. Более того, на высоких частотах емкости трехточки могут быть полностью замещены соответствующими межэлектродными емкостями транзисторов. Будучи паразитными элементами эквивалентной схемы транзистора, величины $C_{КБ}$, $C_{ЭБ}$ и $C_{КЭ}$ являются нерегулируемыми и, фактически, ограничивают рост частоты колебаний автогенератора. По этой причине частоты генерации ГУН может быть повышены либо за счет полной или частичной

компенсации паразитных межэлектродных емкостей, либо путем изменения схемы ГУН – с емкостной схемы на индуктивную схему трехточки. В выполненных в соответствии с рисунком 2 схемах ГУН межэлектродные емкости транзистора могут быть частично или полностью скомпенсированы при помощи индуктивных элементов трехточки. При этом знаки эквивалентных реактивностей контуров, образованных индуктивностями трехточки и межэлектродными емкостями транзистора, должны остаться без изменений, а сами реактивности должны носить индуктивный характер и удовлетворять условиям (1) – (3). На величины реактивностей выбранной схемы ГУН также не должны существенно влиять и другие элементы, которые могут входить в ее состав, например, элементы фильтра гармоник выходного сигнала.

Принимая во внимание предложенные приемы повышения частоты LC-генераторов, спроектированы два ГУН, работающие на частотах ~4.5 (см. рисунок 4 а) и ~10 ГГц (см. рисунок 4 б)). При разработке данных устройств использованы рекомендации пособий [3], [5]. Первый ГУН представляет собой одну из модификаций генератора Колпиттца (см. рисунок 3 б)), второй ГУН является разновидностью генераторов Хартли (см. рисунок 2 а)). Первый ГУН выполнен на стеклотекстолитовой подложке FR-4 размером 12.7x12.7x0.8 мм, которая закрывается крышкой и вместе с ней образует корпус ГУН с габаритами 12.7x12.7x4.5 мм и всеми привязками, являющийся для VCO за рубежом стандартными (например, для VCO фирмы Mini-Circuits с корпусом типа СК605). Второй ГУН реализован на поликорковой подложке размером 10x12.5x0.5 мм, которая размещена в корпусе с габаритами 20x12.5x4.5 мм. Фотографии ГУН приведены на рисунке 5.

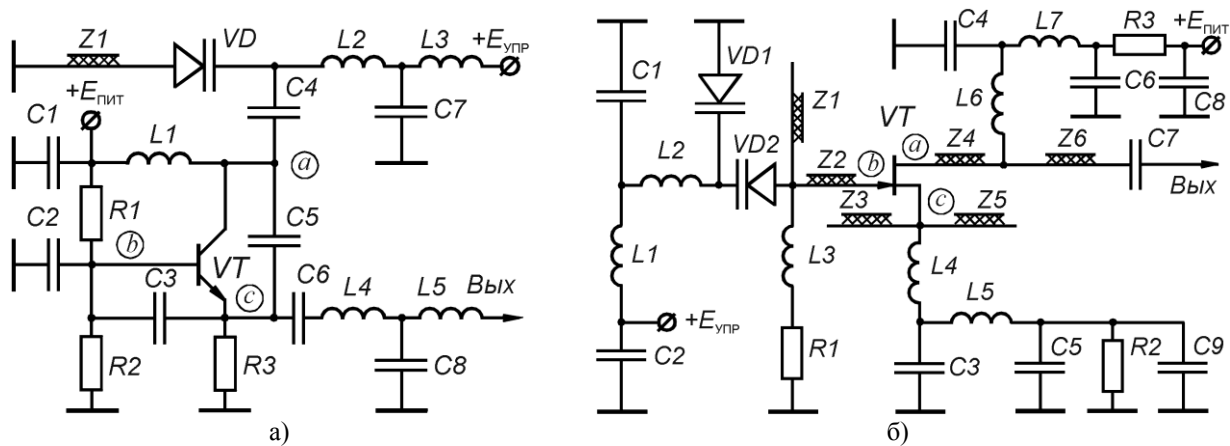


Рис. 4. Схемы спроектированных генераторов, управляемых напряжением

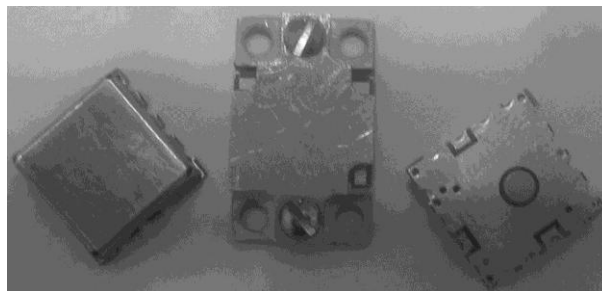


Рис. 5. Внешний вид спроектированных генераторов, управляемых напряжением

В данных ГУН использованы комплектующие элементы, в основном, отечественного производства. Так, в качестве их активных элементов использованы транзисторы типа 2Т 3132 А-2 и 3П 339 А-5, а также варикапы типа 3А 623 А-6 и планарной конструкции производства ОАО «НПП «Салют». В первом ГУН транзистор по ВЧ сигналу включен по схеме с общей базой при помощи конденсатора С2. В качестве индуктивности $L_{КК}$ (см. рисунок 3 б)) используется эквивалентная индуктивность контура, которая образована конденсаторами С2, С4, С_{КБ}, емкостью варикапа VD и отрезком микрополосковой линии передач (МПЛ) Z1. В этом случае емкость конденсатора С_{А3} является суммарной емкостью С5 и С_{ЭБ}, а емкость С_{ОС} образована емкостями С3 и эквивалентной емкостью цепи, которая включает в себя элементы выходного фильтра гармоник: С6, С8 и L4, L5. Во втором ГУН транзистор включен при помощи шлейфов Z3 и Z5 по схеме с общим истоком. Здесь емкость С_{КК} полностью замещена емкостью «затвор-сток», а индуктивные элементы трехточки L_{А3} и L_{ОС} реализуются при помощи отрезков МПЛ Z4, Z6 и, соответственно, Z1, Z2. Режим работы транзисторов по постоянному току обеспечивается в обоих ГУН при помощи резисторов R1, R2 и R3. Элементы С1, С7, L2, L3 в первом ГУН и элементы С1, С3–С6,

C8, C9, L1, L2, L4–L7 во втором ГУН необходимы для развязки СВЧ цепей по питанию. При напряжении питания $E_{пит}=+5$ В ток потребления ГУН на рисунке 4 а) составляет 7.5 мА, а выходная мощность – ~0.6 мВт. Данный ГУН обладает 7%-ной перестройкой по частоте при изменении напряжения управления $E_{упр}$ на выбранном варикапе от 1 до 12 В. При напряжении питания $E_{пит}=+6$ В ток потребления и выходная мощность второго ГУН составляют, соответственно, 20 мА и ~2 мВт. ГУН на рисунке 4 б) при изменении $E_{упр}$ от 1 до 10 В перестраивается в 3 %-ной полосе частот. Уровни фазовых шумов предлагаемых ГУН соответствуют шумам аналогичных зарубежных VCO, а также шумам ГУН отечественного производителя [6].

Таким образом, в данной работе приведены результаты проектирования двух перестраиваемых в окрестностях частот ~4.5 и ~10 ГГц генераторов. При их разработке отмечен и учтен ряд особенностей, характерных для СВЧ диапазона. Эти особенности проектирования заключаются в выборе схем включения транзисторов, соответствующих их работе с более высокими граничными частотами; в выборе схем трехточек, в которых возможна компенсация паразитных межэлектродных емкостей транзисторов; в выборе выходных фильтрующих элементов, при которых их влияние на элементы трехточки на высоких частотах минимально. Полученные результаты могут служить основой для проектирования ГУН LC-типа в рамках работ по импортозамещению VCO.

Литература

1. Радиотехника: от истоков до наших дней: Учебное пособие / В.И. Каганов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2015. – 352 с. – ISBN 978-5-00091-074-0 (ФОРУМ).
2. Схемотехника устройств формирования сигналов: Учебное пособие / Г.А. Андреев, А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов. – Владимир: Вл.ГУ, 2001. – 168 с. – ISBN 5-89368-223-8.
3. Транзисторные СВЧ усилители мощности и генераторы гармонических колебаний: Учебное пособие / А.В. Баранов, С.Л. Моругин. – Нижний Новгород: НГТУ, 2015. – 114 с. – ISBN 978-5-502-00631-6.
4. Кревский, М.А. Уменьшение фазовых флуктуаций СВЧ генераторов / М.А. Кревский, А.В. Баранов, М.В. Кренцин // Стабилизация частоты: тезисы докладов межотраслевых научных конференций, совещаний, семинаров, Канев, (26.09–04.10).89. – М.: ВИМИ, 1989. – Ч. 2. – С. 15–17.
5. Разевиг, В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap6 / В.Д. Разевиг. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с. – ISBN 5-93517-026-4.
6. Кузнецов, Г.А. Генератор с электронной перестройкой частоты для синтезатора 8 мм диапазона / Г.А. Кузнецов, М.А. Кревский // Материалы XV координационного семинара по СВЧ технике, п. Хахалы Нижегородской обл., (04–06).09.2007. – Нижний Новгород, 2007. – С. 79.

VHF TO X-BAND VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATORS

A.V. Baranov

JSC “NPP “Salut”

The peculiarities of VHF to X-band voltage controlled LC-oscillators design are investigated. They consist in the choices of transistor common electrode and three-point oscillator configuration and output harmonic filtering circuits. Taking into consideration these peculiarities, the voltage controlled oscillators at central frequencies about 4.5 and about 10 GHz are designed.

ПРИНЦИП ГАРАНТИРОВАННОГО РЕЗУЛЬТАТА ДЛЯ УЧЁТА КАЧЕСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРЕДПОЧТЕНИЯХ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТОВ

к. ф.-м. н. Шапошников Д.Е.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

При решении задач оценки и выбора проектных решений возникает проблема комплексной многопараметрической оценки вариантов. Многокритериальной оценке вариантов при выборе или ранжировании вариантов посвящено значительное число усилий ученых и это широко описано в литературе. При этом под задачей выбора понимается ситуация ранжирования вариантов по итоговой оценке качества и, в дальнейшем, необходимости выбора наилучшего в некотором смысле варианта из множества рассматриваемых. В дальнейшем будем говорить о задачах выбора и ранжирования как эквивалентных.

Существуют подходы к задачам многокритериального выбора и ранжирования (МКВР), учитывающие качественную информацию о предпочтениях ЛПР [1]. Основным недостатком этих

методов является требование к ЛПП о вводе достаточно большого объема дополнительных параметров, отсутствие (хотя бы, частичное) которых ставит под вопрос применимость этих методов. Описанная методика предполагает использование ровно того количества информации, которое ЛПП готово предоставить (в частном случае, вообще отсутствие такой информации).

Одним из самых известных и распространенных способов решения задач МКВР является применение обобщенного критерия оптимальности с весовыми коэффициентами важности $w \in D_w$, отражающими мнение лица, принимающего решение (ЛПП) об относительной предпочтительности частных критериев оптимальности, и решение однокритериальной задачи оптимизации (выбора) следующего вида (при выборе направления минимизации):

$$x^* = \arg \min_{x \in D} F(q(x), w). \quad (1)$$

В дальнейшем, для краткости, через q будем обозначать вектор численных оценок частных критериев $q(x)$ при определенном в контексте x . Кроме того, предположим, что численные значения оценок q приведены к безразмерному виду и некоторому интервалу $[\alpha, \beta]$, причем $\alpha > 0$ (например, к интервалу $[1, 2]$).

В задаче (1) важность критериев понимается в смысле аксиоматической теории важности [11], что позволяет считать: если известна дополнительная информация вида " i -й критерий не менее важен, чем j -й критерий ($Q_i \succ Q_j$), то для весовых коэффициентов w_i и w_j справедливо соотношение:

$$Q_i \succ Q_j \Leftrightarrow w_i \geq w_j. \quad (2)$$

Весовые коэффициенты могут быть назначены ЛПП различными способами. При использовании (или неиспользовании) одного из них, но при возможности назначить точные численные значения весовых коэффициентов со стороны ЛПП, получаем возможность решить задачу подходящим методом оптимизации. Однако все известные методы назначения весовых коэффициентов важности в задаче (1) требуют полноты вводимой информации с точно определенными числовыми оценками в соответствии с алгоритмом метода.

В ряде работ [2] был предложен и развит подход, при котором весовые коэффициенты важности частных критериев являются неконтролируемыми факторами, их значения могут быть различными для различных вариантов выбора, отражать зависимость от них. При этом численные значения весовых коэффициентов могут быть вычислены по принципу гарантированного результата:

$$x^* = \arg \min_{x \in D} \max_{w \in D_w} F(q(x), w).$$

При этом область допустимых значений весовых коэффициентов важности D_w определяется следующим образом:

$$D_w = \left\{ w \mid w_j \geq w_0 \geq 0, j = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n w_i = R \right\}. \quad (3)$$

В дальнейшем будем считать, что в общем случае (при отсутствии качественной информации о предпочтениях частных критериев) весовые коэффициенты $w_i, i = \overline{1, n}$, нормированы относительно положительного параметра $R > 0$.

Величина w_0 необходима для исключения ситуации, при которой значение весового коэффициента частного критерия в результате решения некоторой оптимизационной задачи может стать равной нулю. Фактически это будет означать «выключение» данного частного критерия из дальнейшего рассмотрения и, следовательно, по сути, решение другой задачи многокритериального выбора. Кроме того, как известно [9] нулевое значение весового коэффициента может привести к выбору слабо-эффективного решения в качестве оптимального.

В качестве обобщенного критерия оптимальности могут быть использованы различные функции [3]. Особое место среди них занимает обобщенный логический критерий минимизации, который можно назвать «обобщенным критерием максимальной осторожности» (или принципом гарантированного результата) при расчете весовых коэффициентов:

$$F_{\max}(q, w) = \min_{1 \leq j \leq n} \{w_j q_j\}. \quad (4)$$

Таким образом, исходная задача (2) при использовании данного обобщенного логического критерия формулируется так:

$$x^* = \arg \min_{x \in D} \max_{w \in D_w} \min_{1 \leq j \leq n} (w_j q_j(x)). \quad (5)$$

При этом область допустимых значений весовых коэффициентов важности D_w в задаче (5) определяется как (2).

Использование дополнительной качественной информации об относительной предпочтительности частных критериев заключается в том, что от ЛПР может быть получена дополнительная качественная информация, устанавливающая для некоторых L пар частных критериев (необязательно для всех C_n^2 возможных пар) предпочтение i -го критерия над j -м критерием на всем множестве D допустимых вариантов:

$$e_l = \{Q_i \succ Q_j\}, l = 1, \dots, L \leq \frac{n(n-1)}{2}. \quad (6)$$

Информация (6) является качественной, так как из нее следует, что i -й критерий важнее j -го критерия, но нельзя сказать, во сколько раз. Тогда качественная информация (6) в соответствии с соотношением (2) позволяет уточнить определение области допустимых значений (3) весовых коэффициентов следующим образом:

$$D_w^1 = \left\{ w \mid w_j \geq w_0 \geq 0, j = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n w_i = R; \langle w_i \geq w_j \rangle_{e_l}, l = \overline{1, L} \right\}.$$

Данный подход позволяет ЛПР предоставить информацию о своих предпочтениях в виде некоторого (в общем случае – неполного) множества пар сравнения частных критериев.

В некоторых случаях ЛПР имеет возможность уточнить информацию о взаимной предпочтительности частных критериев и соответствующих весовых коэффициентах w_i и w_j связанных отношением $\langle Q_i \succ Q_j \rangle$ с помощью параметра $\xi_l \geq 1$:

$$D_w^2 = \left\{ w \mid w_j \geq 0, j = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n w_i = R; \langle w_i \geq \xi_l w_j \rangle_{e_l}, \xi_l \geq 1, l = \overline{1, L} \right\}. \quad (7)$$

Будем считать, что дополнительная качественная информация (6) является непротиворечивой, если область D_w непуста. Данная информация может быть представлена в виде графа $G(I, E)$, где I – множество вершин, соответствующих частным критериям, E – множество ребер, соединяющих i -ю вершину с j -й тогда и только тогда, когда выполняется соотношение $Q_i \succ Q_j$.

Разобьем все вершины I графа $G(I, E)$ на слои (ярусы) следующим образом:

- к последнему слою ($s = n$) отнесем те вершины, из которых не выходит ни одна дуга;
- к предпоследнему слою ($s = n - 1$) – те и только те вершины, исходящие дуги которых входят в вершины последнего слоя;
- к третьему нижнему слою ($s = n - 2$) – те и только те вершины, исходящие дуги которых входят в вершины последнего и предпоследнего слоев, и т. д.;
- к первому слою ($s = n - S + 1$) отнесем оставшиеся вершины, то есть, те и только те, исходящие дуги которых входят в вершины остальных слоев;
- перенумеровываем слои графа таким образом, чтобы первый слой имел первый номер ($s = 1$), а самый нижний слой – номер S ($s = S$).

Рассмотрено решение задачи вычисления весовых коэффициентов важности по принципу гарантированного результата (то есть, при использовании обобщенного логического критерия «максимальной осторожности»):

$$w(x) = \arg \max_{w \in D_w} \min_{1 \leq i \leq n} \{w_i q_i\}, \quad (8)$$

где

$$D_w = \left\{ w \mid w_j \geq w_0 \geq 0, j = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n w_i = R; \langle w_i \geq \xi_l w_j \rangle_{e_l}, \xi_l \geq 1, l = \overline{1, L} \right\}. \quad (9)$$

Для решения этой задачи (нахождения значений весовых коэффициентов важности $w_i, i = \overline{1, \dots, n}$) с нулевым значением параметра w_0 ($w_0 = 0$) может быть применен конечный алгоритм, описанный в докладе.

Сущность данного подхода и принцип минимакса при вычислении весовых коэффициентов практически гарантируют, что получаемые значения весовых коэффициентов будут иметь ненулевые значения. Поэтому, наличием жесткого параметра w_0 при расчетах можно пренебречь при условии достаточно малого его значения.

Тем не менее может быть рассмотрен частный случай задачи (8)-(9) при $\xi_l = 1, l = \overline{1, L}$ совместно с обобщением на случай ненулевого значения минимального порога $w_0 \geq 0$, где $w_0 \leq R/N$:

$$w^*(x) = \arg \max_{w \in D_w} F_{\min}(w, q) = \arg \max_{w \in D_w} \left(\min_{1 \leq i \leq n} (w, q) \right), \quad (10)$$

где

$$D_w = \left\{ w \mid w_j \geq w_0 \geq 0, j = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n w_i = R; \langle w_i \geq w_j \rangle_{e_l}, l = \overline{1, L} \right\}. \quad (11)$$

Для вычисления значений весовых коэффициентов важности получено решение задачи в виде конечного алгоритма и доказана его корректность.

Данная методика применима для широкого класса задач многокритериального выбора. Кроме того, приведенные соотношения легко обобщаются на общий случай решения задач многокритериального математического программирования.

Литература

1. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
2. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1994. 92 с.
3. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971. 384 с.
4. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.

THE PRINCIPLE OF GUARANTEED RESULT FOR CONSIDERATION OF THE QUALITY INFORMATION UNDER THE COMPLEX PROJECT ESTIMATION

D. E. Shaposhnikov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Article considers a way of the solution of problems of a multicriteria choice and ranging on the basis of automatic calculation of weight coefficients of importance of private criteria by the principle of the guaranteed result with use of the generalized logical criterion of the maximum care. This way allows to consider additional qualitative information of the person making the decision in the form of a preference graph with the specifying coefficients. Received on the basis of the principle of the guaranteed result of value of weight coefficients possess property of uniformity. Solutions of optimizing tasks are provided in a type of final algorithms and analytical expressions taking into account the entered additional information. The analysis of this information and ways of its representation is described.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ-МЕЗОНИНА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА МЕХАНИЗМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ БСКТ

д. т. н. Гимпилевич Ю.Б., Иськив В.М, к. т. н. Михайлюк Ю.П.,
к. т. н. Савочкин А.А., к. т. н. Щекатурин А.А., к. т. н. Лукьянчиков А.В.

Севастопольский государственный университет

В настоящее время актуальной задачей является разработка специализированных модулей для систем автоматики, построенных на базе контроллеров серии КМ-04, разрабатываемым по программе импортозамещения программно-технического комплекса, используемого для построения систем управления технологическими процессами на объектах нефтегазовой отрасли.

Специализированные модули применяются в составе микропроцессорных контроллеров для сбора и обработки информации, управления объектами в схемах автоматического управления или в составе распределенной системы управления на объектах нефтегазовой отрасли, в частности на объектах ОАО «Газпром».

В качестве модулей-мезонинов могут быть использованы модуль измерения частоты вращения, модуль-мезонин БСКТ, модуль-мезонин управления с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и другие. Модуль измерения частоты вращения предназначен для приема и высокоточного измерения входного частотного сигнала от датчиков частоты вращения и преобразования его в цифровой двоичный код. Модуль-мезонин управления с ШИМ предназначен для формирования управляющих сигналов с широтно-импульсной модуляцией.

Модули-мезонины устанавливаются на модуле-носителе, который предназначен для организации питания и управления модулями-мезонинами.

Задачей данной работы была разработка модуля-мезонина измерения угла поворота механизма с использованием датчиков бесконтактных синусно-косинусных преобразователей (БСКТ), предназначенного для измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ и преобразования значения угла поворота в цифровой двоичный код.

Модуль-мезонин разработан на базе микросхемы AD2S82AHP, преобразующей сигналы с синусной и косинусной обмоток БСКТ в шестнадцатиразрядный двоичный код угла. Работа частей модуля-мезонина измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ управляется 32-битным микроконтроллером K1986BE92QI российского производства фирмы ЗАО «ПКК Миландр» с ядром ARM Cortex-M3.

Виды сверху а) и снизу б) на модуль-мезонин измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ показаны на рис. 1.

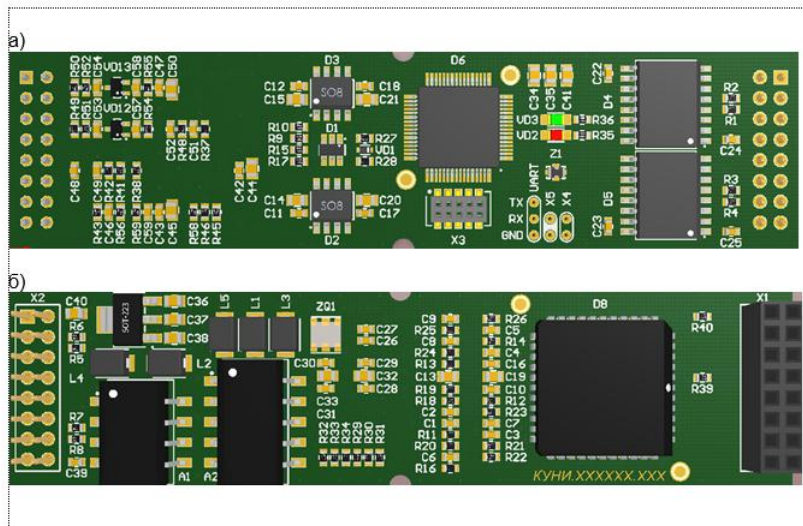


Рис. 1. Виды сверху а) и снизу б) на модуль-мезонин измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ

Для тестирования разработанного модуля-мезонина измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ был изготовлен модуль-носитель СГУ, выполняющий роль моста между разработанным модулем-мезонином и персональным компьютером. Разработан протокол обмена данными между модулем-мезонином и модулем-носителем СевГУ.

На модуль-носитель СГУ устанавливается отладочная плата STM32F4Discovery, выполненная на основе ARM микроконтроллера Cortex STM32F407VGT6 фирмы ST Microelectronics.

Отладочная плата STM32F4Discovery содержит внутрисхемный программатор/отладчик JTAG ST-LINK/V2, с помощью которого осуществляется программирование и отладка программы микроконтроллера STM32F407VGT6.

Общий вид модуля-носителя СевГУ с установленными на нем отладочной платы STM32F4Discovery и модулем-мезонином измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ показан на рис. 2.

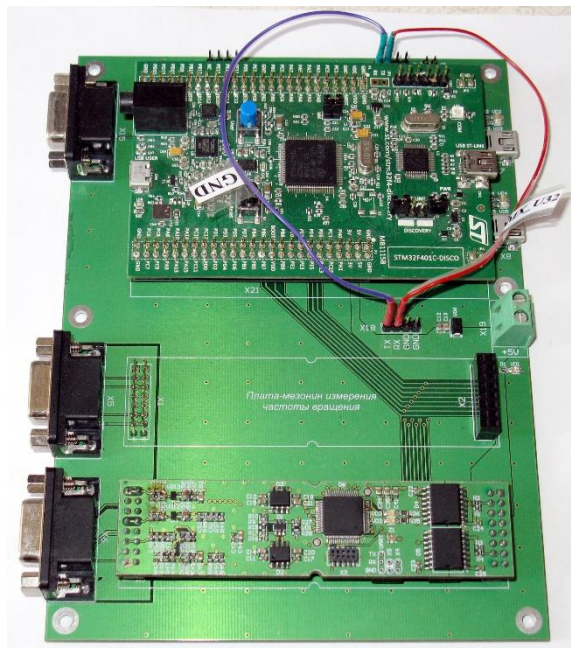


Рис. 2 . Модуль-носитель СевГУ с установленными на нем отладочной платы STM32F4Discovery и модулем-мезонином измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ

Для тестирования модуля-носителя разработаны тестовые разъемы, соответствующие углам поворота механизма 0° , 45° и 90° .

На рис. 3 показан измерительный стенд для исследования характеристик модуля-мезонина измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ.

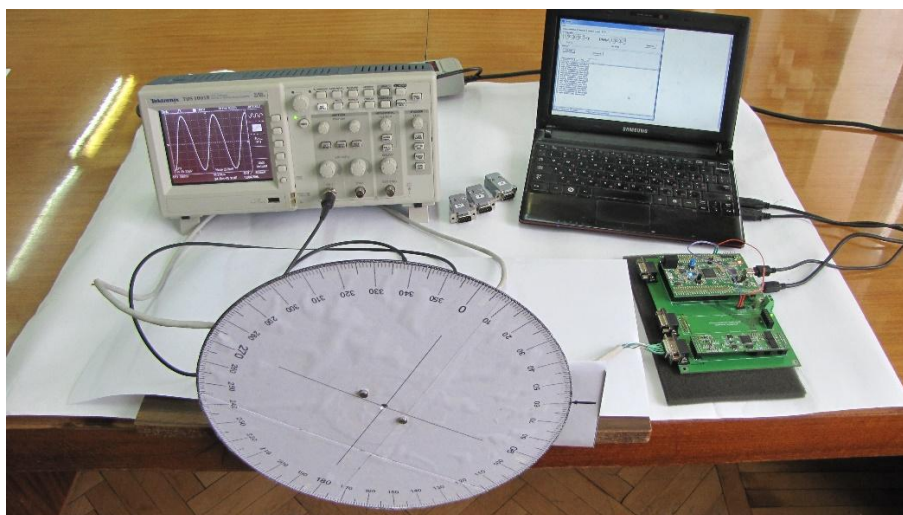


Рис. 3. Измерительный стенд для исследования характеристик модуля-мезонина измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ

На рис. 4 показаны три варианта схем стендов:

- а) — схема стенда для проверки функционирования модуля-мезонина БСКТ при тестовых углах поворота и диагностики цепей обмоток возбуждения, синусной и косинусной обмоток;
- б) — схема стенда для проверки формирования напряжения питания обмотки возбуждения датчика БСКТ;
- в) — схема стенда для проверки диапазона углов поворота и погрешности измерения угла поворота.

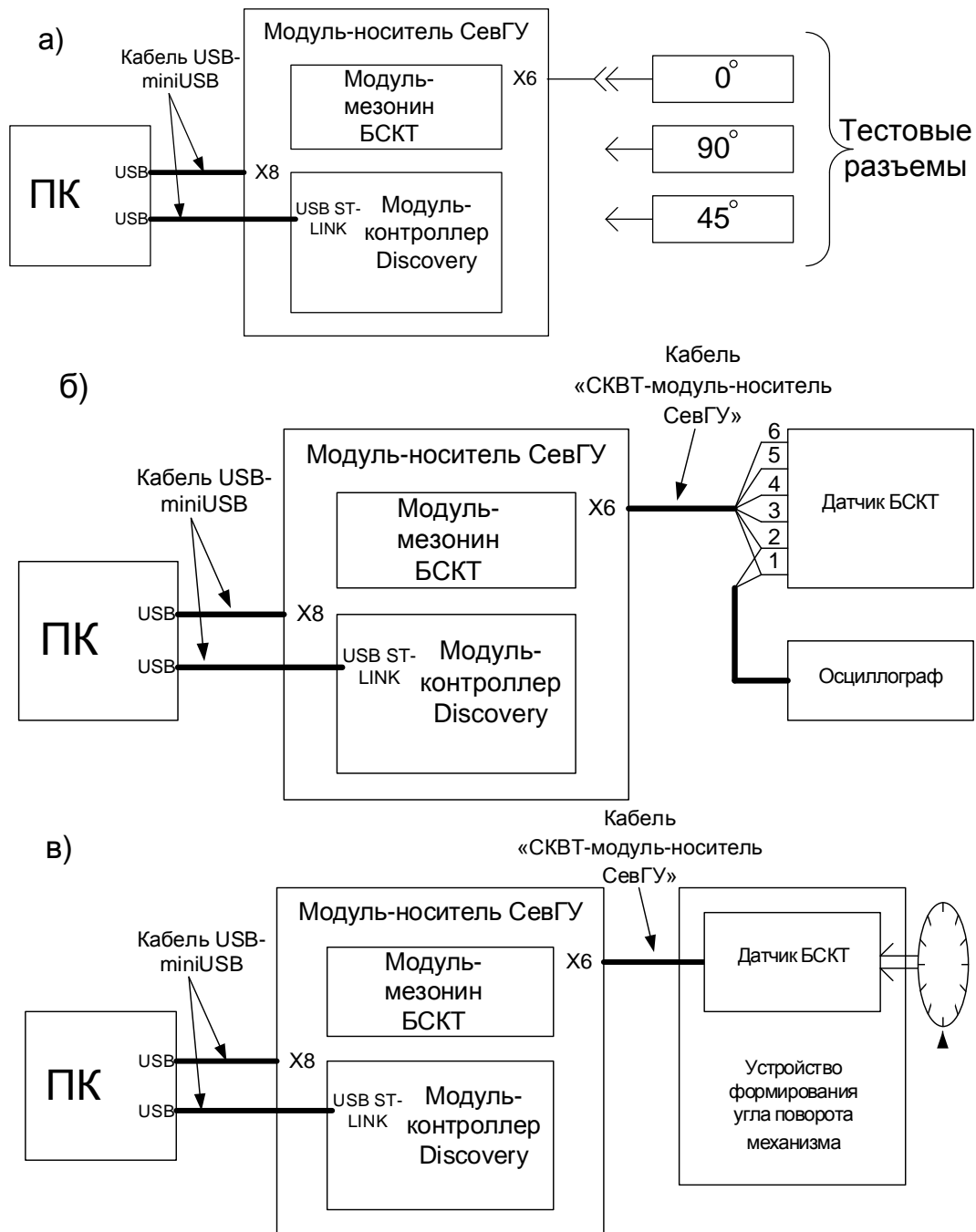


Рис. 4. Варианты схем стандов

На рис. 5 и 6 показан интерфейс программы связи модуля-мезонина с персональным компьютером.

Вкладка «Setup connection» позволяет устанавливать параметры связи между модулем-носителем СГУ и персональным компьютером.

На вкладке «BSKT» устанавливаются частота и напряжения возбуждения, подаваемого на возбуждающую обмотку БСКТ. В окне данных видны измеряемые значения углов поворота механизма.

Таким образом, разработан модуль-мезонин измерения угла поворота механизма с использованием датчиков БСКТ, имеющий следующие параметры: диапазон углов поворота 0...360 град; погрешность определения угла поворота не более 3 град; шаг изменения напряжения питания обмотки возбуждения датчика, действующее значение, не более 0,5 В; диапазон частот напряжения питания обмотки возбуждения датчика 1...4 кГц; шаг изменения частоты напряжения питания обмотки возбуждения датчика не более 0,5 кГц.

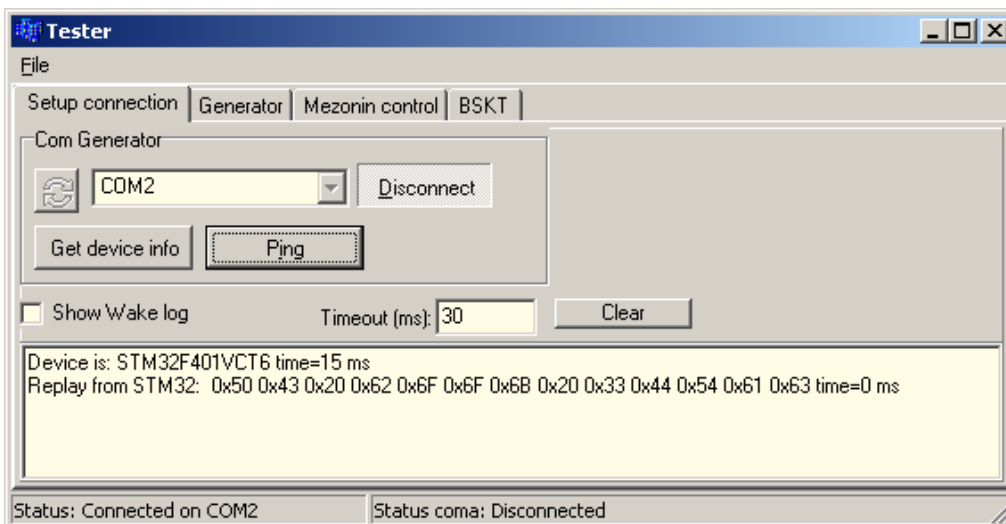


Рис. 5. Интерфейс программы связи модуля-мезонина с персональным компьютером, вкладка «Setup connection»

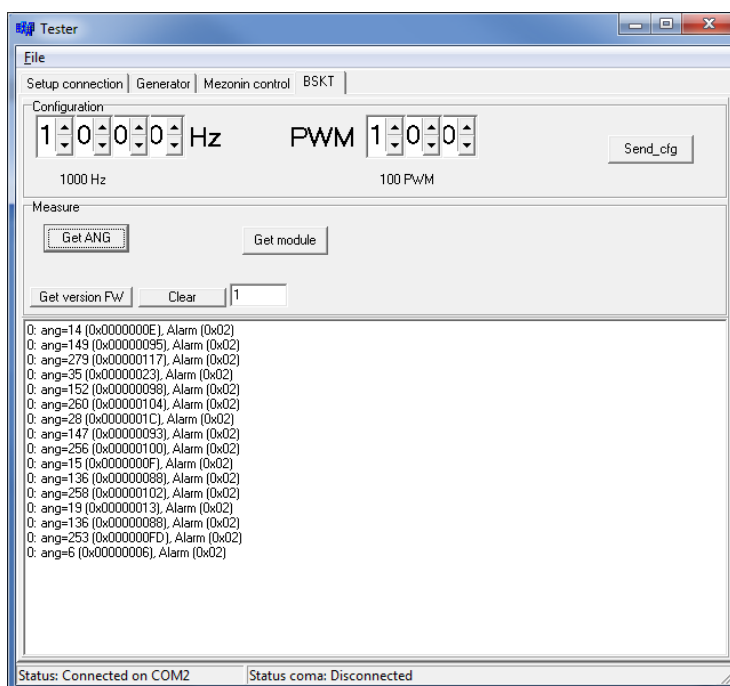


Рис. 6. Интерфейс программы связи модуля-мезонина с персональным компьютером, вкладка «BSKT»

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MEZZANINE UNIT FOR MEASUREMENT ANGLE USING SINE-COSINE TRANSFORMER SENSORS

Yu. B. Gimpelevich, V. M. Is'kiv, Yu. P. Mikhailuk,
A. A. Savochkin, A. A. Shekaturin, A. V. Lukyanchikov

Sevastopol State University

The objective of this work was to develop a module for measurement of the angle of rotation of the mechanism using probes of contactless sine-cosine transformers and converting the rotation angle to a digital binary code.

Mezzanine module is based on the chip AD2S82AHP and use 32-bit Russian microcontroller K1986VE92QI produced by company JSC "Milandr" with the core ARM Cortex-M3.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Интегрированные интеллектуальные системы радиолокации, гидролокации, навигации, робототехники и связи будущего. Параллельные вычисления и грид-технологии в перспективных радиотехнических системах: системах дистанционного зондирования Земли, ГЛОНАСС и т. д., а также в гидроакустических и робототехнических системах. Микросистемная техника. Информационная безопасность.

РАЗВИТИЕ В ИРЭ РАН РАБОТ ПО ТЕКСТУРНЫМ И ФРАКТАЛЬНЫМ МЕТОДАМ ОБНАРУЖЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И РАСПОЗНАВАНИЯ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ И МАЛОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕПОДВИЖНЫХ И ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ПОМЕХ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЗАДАЧ СТАТИСТИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКИ, РАДИОЛОКАЦИИ, НАВИГАЦИИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

д.ф.-м.н. Потапов А.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

В докладе представлен аналитический обзор фундаментальных теоретических и экспериментальных научных исследований, которые выполнены за период 1980 – 2015 гг. автором и его учениками в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по планомерному внедрению понятий текстур, фракталов, эффектов скейлинга и операторов дробного интегро-дифференцирования в радиофизику, радиолокацию и широкий спектр радиотехнических наук [1 - 17]. Необходимо отметить, что наличие в уравнениях дробной производной по времени интерпретируется как отражение памяти/эредитарности или *немарковости* стохастического процесса. Дробные производные по пространственным координатам отражают самоподобную неоднородность фрактальной структуры или фрактальной среды, в которой процесс развивается. Физически операторы дробного интегрирования играют роль своеобразных “фильтров”, выделяющих только те составляющие, которые локализованы на фрактальных (дробных) множествах исследуемого процесса. Однако, для большинства ученых дробно-дифференциальное исчисление, как и фракталы, остаются экзотикой.

Задачи поиска и обнаружения движущихся объектов на малоконтрастных зашумленных изображениях имеют в настоящее время, да и ранее, исключительное большое значение. Такие задачи возникают в радиолокации, исследовании природных ресурсов, дистанционном зондировании, навигации, метеорологии, обработке информации с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), медицине, биологии, при автоматизации научных исследований, и т.д. Перечень возможных применений предложенных методов можно было бы продолжить. Динамика объекта определяется на основе данных о его движении и изменении положения. Эта информация может быть получена при анализе последовательности изображений через определенные временные интервалы. Необходимо отметить, что очень часто обнаруживаемые объекты имеют фрактальную форму и строение, как например, морские льды, облака и другие гидрометеорообразования, дипольные отражатели и т.п. К тому же, их форма может непрерывно изменяться в пространстве и во времени. Одновременно различные элементы такого фрактального объекта могут двигаться и поворачиваться в различных направлениях с различной скоростью. Решение этой задачи возможно с помощью ранее предложенного в [1, 2] метода корреляционно-экстремального сравнения. В этом случае необходимо сформировать корреляционное поле сравнения двух изображений, относящихся к одной и той же сцене, но полученных в различные моменты времени.

В случае фрактального подхода необходимо искать, реализовывать и использовать правила, которым подчиняется дробная (сложная) топология рассматриваемых образов. Алгоритмы фрактального распознавания образов основаны на использовании парадигмы "*топология цели - ее фрактальная размерность*" [2 - 17].

Общая постановка наших исследований следующая. Проблема кластеризации изображений состоит в разбиении исходного множества A на подмножества (классы), которые в идеальном случае должны быть сепарабельными. Такая постановка задачи является некорректной для реальных изображений, т.к. последние относятся к классу нечетких множеств. Информативность пространства признаков можно улучшить, используя методы *текстурных* и *фрактальных* мер. Использование понятия текстуры изображений, фрактальных характеристик (фрактальная размерность D , фрактальная сигнатура $D(t, f)$,

\vec{r}), ее наклон, пространственный фрактальный кепстр, дробные показатели пространственного спектра, показатель Херста, лакунарность) позволяет повысить размерность вектора измерений и более четко выделить классы естественных и антропогенных объектов и поверхностей. Следует отметить, что условие стационарности для большинства земных покровов обычно не выполняется.

В отличие от тона и цвета, которые относятся к отдельным фрагментам изображения, текстура связана более чем с одним фрагментом. Автор дал определение [1 - 9], что *текстура* – это матрица или фрагмент пространственных свойств участков изображений с однородными статистическими характеристиками. Тектурные признаки основаны на статистических характеристиках уровней интенсивности элементов изображения и относятся к вероятностным признакам, случайные значения которых распределены по всем классам природных объектов. Решение о принадлежности текстуры к тому или иному классу может приниматься только на основании конкретных значений признаков данной текстуры. В таком случае принято говорить о *сигнатуре текстуры*. Классические радиолокационные сигнатуры включают в себя временные, спектральные и поляризационные особенности отраженного сигнала. С точки зрения автора, *сигнатура текстуры* – это распределение генеральной совокупности измерений для данной текстуры в сценах такого же типа, как и данная. При возможности осуществления декомпозиции текстуры выявляются два основных фактора. Первый соотносит текстуру с производными элементами, из которых составлено изображение в целом, а второй служит для описания пространственной зависимости между ними. Тоновые производные элементы представляют собой области изображения, характеризуемые определенными значениями яркости, пропорциональной интенсивности отраженного сигнала, в свою очередь, зависящей от значений удельной эффективной площади рассеяния (ЭПР) σ_* земной поверхности. Так как понятие удельной ЭПР значимо только для пространственно однородного объекта, то, следовательно, текстура изображения реального земного покрова определяется пространственными изменениями σ_* . Все указанное выше позволяет установить взаимные связи между понятиями удельной ЭПР подстилающего покрова и его текстурой. Когда небольшой участок изображения характеризуется малым изменением типовых производных элементов, то преобладающим свойством этого участка является значение удельной ЭПР. При заметном изменении яркости этих элементов преобладающий признак заложен в текстуре. Иначе говоря, при уменьшении числа различных типовых производных элементов в изображении, роль энергетических признаков (в частности, σ_*) возрастает. Фактически для одного элемента разрешения единственными признаками являются энергетические. Если число различных типовых производных элементов растет, то начинают доминировать тектурные признаки. При статистическом анализе текстур используют статистики первого или второго порядков. При использовании статистик второго порядка непосредственно тектурные признаки извлекаются с помощью матриц распределения вероятности пространственной зависимости градации яркости \mathbf{P} , называемой такие матрицей распределения градиентов. Экспериментально показано [1, 2], что признаки, основанные на параметрах корреляционных функций, не так хорошо оценивают текстуру изображения, как признаки, определенные по матрице градиентов \mathbf{P} .

Впервые в мире расчет полного ансамбля из 28 тектурных признаков и их детальный синхронный анализ для реальных (оптических и радиолокационных в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) на волне 8,6 мм), а также синтезированных текстур земных покровов на основе авторегрессионных моделей был проведен автором в ИРЭ РАН в начале 80-х гг. XX в. [1, 2, 8]. Многолетние натурные эксперименты проводились автором совместно с ЦКБ “Алмаз” и другими ведущими промышленными организациями СССР. При выделении сигнала миллиметровых волн (ММВ), рассеянного разнообразными земными покровами, автор еще в 1985 г. проводил первые эксперименты по селекции участков частотного и временного скейлинга, наличие которых и предполагают определенные фрактальные свойства принятой выборки. При этом была поставлена и решена задача расчета тектурных признаков с учетом дрейфа их сигнатур при изменении времени года. Были также оптимизированы оценки влияния размера окон на точность определения тектурных признаков для изображений различных типов земных покровов. Продолжительное время эти работы в области исследования радиолокационных изображений (РЛИ) земных покровов на ММВ с использованием тектурной информации фактически были единственными и, по отзывам специалистов, актуальны до сих пор (сейчас происходит их “переоткрытие”).

Анализ полученных данных позволил доказать очень важную особенность [1, 2]: одномерные области существования тектурных признаков РЛИ в диапазоне ММВ (множество R) почти полностью вкладываются в соответствующие области признаков АФС (множество A): $R \in A$. Таким образом, области признаков РЛИ как бы сжимаются по сравнению с областями признаков АФС. Это происходит, из-за сглаживания в РЛИ тонкой структуры исследуемых покровов, характерной для АФС. Следовательно, со значительной степенью достоверности множество R можно прогнозировать по множеству A . Компактность областей существования тектурных признаков для текстур РЛИ дает возможность предположить, что по РЛИ классификация земных покровов и обнаружение целей иногда

проводится точнее. В то же время, комплексирование оптических и радиотехнических систем [1, 2] взаимно дополняет их основные достоинства и увеличивает общую информативность. Инвариантность к масштабу и повороту достигается путем выбора конкретного шага дискретизации при оцифровке текстур (обычно, порядка интервала автокорреляции) и операции усреднения значений признаков по четырем направлениям сканирования при компьютерной обработке.

Вокруг обнаруживаемой цели всегда присутствуют участки фоновых отражений, объединенные общим понятием текстуры. Это предоставляет возможность предложить новые подходы к обнаружению протяженных малоcontrastных целей на фоне земных покровов в полученных радиолокационных изображениях (РЛИ) или многомерных сигналах. На основе полученных в ИРЭ РАН результатов автором были впервые предложены и реализованы следующие нетрадиционные и достаточно эффективные методы обнаружения сигналов при малых отношениях сигнал/фон q_0^2 порядка единицы или меньше единицы: дисперсионный метод, метод обнаружения с помощью линейно моделированных эталонов и метод с прямым использованием ансамбля текстурных признаков [1, 2]. Кроме того, важным достоинством текстурных методов обработки, является возможность нейтрализации *спеклов* на когерентных изображениях земной поверхности, полученных с помощью РСА.

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \vec{r})$ в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры, т.е., свойств пространственной корреляции рассеяния радиоволн от соответствующих участков поверхности. Автором было впервые показано, что фрактальная обработка как нельзя лучше подходит для решения современных задач при обработке малоcontrastных изображений и обнаружении сверхслабых сигналов в интенсивных помехах, когда современные радиолокаторы практически не функционируют.

Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном острове науки конца XX в. Их открытие принадлежит Б. Мандельброту (20.11.1924 – 14.10.2010). В современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания. Следуя принципу Рене Декарта “определяйте значение слов”, начинать необходимо с пояснения содержания, которое вложено в термин “*фрактал*”. Автор всегда в своих работах опирается на собственное определение фрактала [3 – 17]. (Оно было одобрено Б. Мандельбротом при нашей личной встрече в декабре 2005 г. в США [6, 8]).

Результаты многочисленных экспериментов показывают, что фрактально-скейлинговые методы эффективны для фильтрации объектов на изображениях в оптическом и радиодиапазоне при отрицательном (в децибелах) отношении сигнал/фон. Гауссовские флуктуации площадей модельных прямоугольных объектов со среднеквадратическим отклонением порядка 30% практически не влияют на качество их обнаружения. Фрактальная сигнатура характеризует также пространственный *фрактальный кепстр* изображения. Автором доказано, что фрактальный кепстр является с одной стороны удобным топологическим инвариантом – не требует предварительного ориентирования/масштабирования, а с другой стороны он нечувствителен к контрасту изображения. Так, положения характерных точек на фрактальных кепстрах позволяют определить класс цели (по какому – либо правилу), ее размеры, а также и количество целей. Относительное изменение положения характерных точек дает возможность решить задачу обнаружения детерминированной цели даже при очень низком контрасте. Создание первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей и постоянное усовершенствование алгоритмического обеспечения явились основными этапами при разработке и макетировании первого *фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов* [3 - 17]. Отметим, что в литературе, как в России, так и за рубежом, непараметрические фрактальные обнаружители с использованием *дробной метрики пространства признаков* никогда прежде не рассматривались, кроме (естественно) авторских публикаций.

Впервые также было автором показано, что при разработке *эталонного словаря фрактальных признаков* (или банка данных), в качестве последних необходимо выбирать: *а)* – значение фрактальной (дробной) топологической размерности D , *б)* – вид фрактальных сигнатур или фрактальных кепстров, *в)* – вид пространственного спектра и значения пространственных частот, характеризующие текстуру изображений. Фрактальный кепстр является с одной стороны удобным топологическим инвариантом – не требует предварительного ориентирования/масштабирования, а с другой стороны он нечувствителен к контрасту изображения. Так, положения характерных точек на фрактальных кепстрах позволяют определить класс цели (по какому – либо тесту), ее размеры, а также количество целей. Относительное изменение положения характерных точек дает возможность решить задачу обнаружения детерминированной цели даже при очень низком контрасте [6, 8].

В докладе дается общее видение наиболее перспективных направлений “*фрактальных*” исследований в области современных наук. Отмечено, что в науку и технику должно быть введено “фрактальное” измерение, причем не на вспомогательную роль, а в качестве фундаментального объяснительного факта. В настоящее время автором установлены универсальные черты функционирования, изоморфные для огромного количества объектов и целей, относящихся к различным классам явлений, описываемых

дробными операторами и фракталами. Авторский подход не отвергает ценности существующих теорий, не претендует на превосходство по отношению к ним и чужд амбициям “исчерпывающего” объяснения. На основе созданной автором “фрактальной парадигмы” существующие наблюдения могут быть переоценены, а прежние выводы – дополнены и переформулированы.

Автором введен функциональный принцип «*максимум топологии при минимуме энергии*» для принимаемого сигнала, позволяющий более эффективно использовать преимущества фрактально-скейлинговой обработки информации. Использование фрактального принципа приводит к переоценке ценностей в области обнаружения неподвижных и движущихся объектов на фоне интенсивных помех и шумов.

В результате в научном мире образовано новое смысловое пространство с его необычными для классической физики свойствами и задачами. Область фрактальных наук открыта для творческих поисков. Однако прежде чем начинать творить, необходимо ясно осознать идеи, лежащие в основе фрактально-скейлингового метода.

В докладе автор коснулся лишь некоторых наиболее важных вопросов, связанных с использованием текстур, фракталов и эффектов скейлинга в статистической радиофизике и радиолокации. В развитии фрактальных направлений уже пройдены многие важные этапы, в том числе, и этап становления этой области наук. Однако много задач еще предстоит решить. Не результаты, не конкретные решения представляют самую большую ценность, а, именно, метод решения, подход к нему. Глобальный метод автором создан и успешно развивается [1 - 17].

Литература

1. Потапов А.А. Радиофизические эффекты при взаимодействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн с окружающей средой // Зарубежная радиоэлектроника. 1992. № 8. С. 36 - 76; № 9. С. 4 - 28; № 11. С. 23 - 48; 1993. № 3. С. 36 - 48; № 7-9. С. 32 - 49; 1994. № 7/8. С. 11 - 30; 1995. № 1. С. 27 - 36 (журнальный вариант монографии).
2. Потапов А.А. Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн: дис... д-р физ.-мат. наук: (01.04.03). М.: ИРЭ РАН, 1994.- 436 с.
3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации.- М.: Логос, 2002.- 664 с.
4. Бункин Б.В., Реутов А.П., Потапов А.А. и др. Вопросы перспективной радиолокации (Коллективная монография).- М.: Радиотехника, 2003.- 512 с.
5. Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Под ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003.- 720 с.
6. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Университетская книга, 2005.- 848 с.
7. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой.- М.: Радиотехника, 2005.- 368 с.
8. Потапов А.А. Фракталы и хаос как основа новых прорывных технологий в современных радиосистемах. - Дополнение к кн.: Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах / Пер. с англ.; Под ред. Т.Э. Кренкеля.- М.: Техносфера, 2006.- С. 374 – 479.
9. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Герман В.А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А.А. Потапова.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 496 с. (монография - по гранту РФФИ № 07 – 07 - 07005).
10. Потапов А.А. Фрактальные методы исследования флуктуаций сигналов и динамических систем в пространстве дробной размерности. – Глава в кн.: Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы / Под ред. Р.М. Юльметьева и др.- Казань: Министерство образования и науки Республики Татарстан, 2008.- С. 257 – 310.
11. Потапов А.А. Фрактальные модели и методы на основе скейлинга в фундаментальных и прикладных проблемах современной физики // Сб. науч. тр. «Необратимые процессы в природе и технике» / Под ред. В.С. Горелика и А.Н. Морозова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН. 2008. Вып. II. С. 5-107.
12. Потапов А.А. О фрактальных радиосистемах, дробных операторах, скейлинге, и не только... . – Глава в кн.: Фракталы и дробные операторы / С предисловием акад. Ю.В. Гуляева и чл.-корр. РАН С.А. Никитова.- Казань: Изд-во "Фэн" Академии наук РТ, 2010.- С. 417 – 472.
13. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в обработке информации (Московская научная школа фрактальных методов в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 1981 – 2011 гг.) // Сб. науч. тр. “Необратимые процессы в природе и технике” / Под ред. В.С. Горелика и А.Н. Морозова.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, 2012. Вып. IV. С. 5 - 121.
14. Потапов А.А. Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании.- Воронеж: ИПЦ “Научная книга”, 2012.- 108 с.

15. Потапов А.А. Методы обработки малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов интегральными операторами и дробными фрактально-скейлинговыми методами // Сб. «Инновационные разработки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук». М.: «Република», 2013. С. 15. (Сб. посв. 60-летию со дня образования ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).
16. Потапов А.А., Быстров Р.П., Гвоздев А.Е., Немцов А.В. Избранные вопросы теории и практики линейной и нелинейной радиолокации: В 3-х частях. Ч. I. Линейная радиолокация, 240 с.; Ч. II. Нелинейная радиолокация, 234 с.; Ч. III. Нелинейная радиолокация, 180 с. / Под ред. д.ф.-м.н., проф. А.А. Потапова. М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2014.
17. Подосенов С.А., Потапов А.А., Фоукзон Дж., Менькова Е.Р. Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии: В 3-х т. / Под ред. А.А. Потапова. М.: ЛЕНАНД, 2015.- 1200 с.

IREE RAS DEVELOPMENT OF RESEARCHES ON TEXTURAL AND FRACTAL METHODS OF DETECTING, PROCESSING AND RECOGNITION OF WEAK SIGNALS AND LOW-CONTRAST IMAGES OF STATIC AND MOVING OBJECTS AGAINST THE BACKGROUND OF INTENSIVE NATURAL AND ARTIFICIAL NOISE FOR THE ACTUAL PROBLEMS OF STATISTICAL RADIO PHYSICS, RADIO LOCATION, NAVIGATION AND REMOTE SENSING

A.A. Potapov

V.A.Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

The problem of searching and detecting of moving objects on low-contrast noisy images is of exclusively importance now. In this report an analytical review of fundamental theoretical and experimental scientific researches which were carried out by the author and his pupils in V.A.Kotel'nikov Institute of radio engineering and electronics of RAS on the systematic introducing of conceptions of textures, fractals, scaling effects and fractional integro-differentiation operators into radio physics, radio location and a wide spectrum of radio engineering sciences during 1980 - 2015 is presented. In the case of the fractal approach one should look for, implement and use rules which dominate over the fractional (complex) topology of the patterns under consideration. Algorithms of fractal patterns recognition are based on using the paradigm "the target topology - its fractal dimension". The problem solving is possible with using an earlier proposed approach of the correlative-extremal comparison. The author introduced a functional concept "the maximum of topology at the minimum of energy" for a receive signal which allows more effective using of advantages of the fractal-scaling information processing.

СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ В ФАЗОВЫХ ПЕЛЕНГАТОРАХ ПРОСВЕТНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ

к.т.н. Ковалев А.Н., к.т.н. Ковалев Ф.Н., член-корр. РАН Кондратьев В.В.

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Просветные радиолокационные системы (РЛС) основаны на явлении повышенной интенсивности рассеянного вперед излучения и являются эффективным средством обнаружения малоразмерных, а также низколетящих объектов [1,2,3,4].

Просветные РЛС могут быть сформированы из монохроматического передатчика и приемников с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции радиоволны, рассеянной на объекте, и более мощной радиоволны, излученной передатчиком. Несколько близкорасположенных приемников позволяют измерять направление прихода рассеянной радиоволны путем сравнения фаз продетектированных сигналов. По направлению прихода и доплеровскому смещению частоты (доплеровской частоте) рассеянной радиоволны могут быть определены координаты объекта [5,6]. Однако при амплитудном детектировании теряется знак доплеровского смещения и возникает неоднозначность угловых измерений [7,8,9,10]. В докладе рассматриваются возможные подходы к устранению такого рода неоднозначности. Совокупность подходов заметно расширяет представление о способах организации обработки сигнала в просветных РЛС и дает основу для поиска новых способов, ведущих к повышению эффективности и точности просветных систем различных конфигураций [5,6,11,12,13,14].

Подходы к разрешению неоднозначности удобно рассмотреть на примере двухкоординатной РЛС с приемной антенной решеткой. Пусть приемники $\text{Пр}_l, l = \overline{0, L-1}$ (L – число приемников), образующие линейную решетку, передатчик и объект расположены в одной плоскости xOy (рис. 1). Решетка размещена на оси Oy . Нормаль к решетке, проведенная через ее центр, направлена на передатчик Π (в сторону оси Ox). Объект движется равномерно прямолинейно и пересекает под углом ψ отрезок длиной a , соединяющий передатчик с решеткой (часто называемый базовым отрезком [3,5,12]). Использование линейной модели движения с курсовыми углами ψ близкими к $\pi/2$ оправдано узостью зоны действия просветных систем [2,3,4] и позволяет выявить основные закономерности изменений первичных параметров (доплеровской частоты и азимута) для построения алгоритмов обработки сигнала [5,6,12,13].

На рис. 1 обозначено: $r_{\text{п}}$ – расстояние от передатчика до объекта, $r_{\text{пр}}$ – расстояние от центра решетки (точки O) до объекта, θ – угол, характеризующий направление на объект из начала системы координат относительно оси Ox , \vec{v} – скорость объекта, s – абсцисса точки пересечения траектории объекта с линией базы.

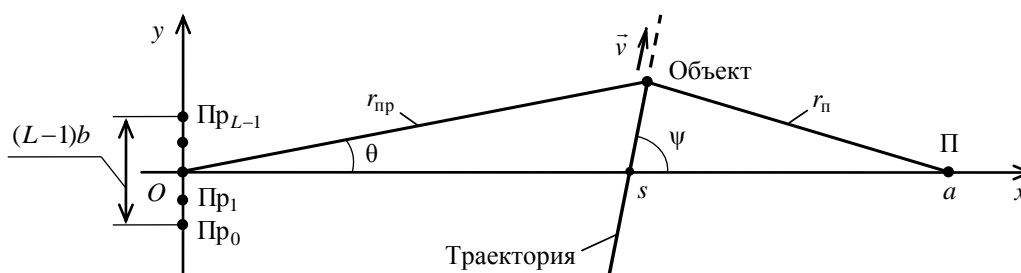


Рис. 1. Схема просветной двухкоординатной РЛС с приемной антенной решеткой

Элементы решетки расположены на одинаковом расстоянии b друг от друга ($b < \lambda/2, \lambda$ – длина волны излучения передатчика). В каждом приемнике проводится фильтрация, усиление, амплитудное детектирование с последующей режекцией постоянной составляющей и аналого-цифровое преобразование сигнала [4,8]. Выражение для i -го отсчета сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя l -го приемника имеет вид

$$u[i, l] = U \cos(\varphi_{\text{д}}[i] + \varphi_{\text{р}}[l] + \varphi_0), \quad (1)$$

где U, φ_0 – амплитуда и начальная фаза сигнала, $\varphi_{\text{д}}[i]$ – фазовый набег, обусловленный доплеровским смещением частоты рассеянного на объекте сигнала, $\varphi_{\text{р}}[l]$ – фазовый набег, обусловленный разностью расстояний от элементов решетки до объекта. Длина решетки $(L-1)b$ относительно невелика, поэтому доплеровскую частоту f в приемниках можно считать примерно одинаковой и на небольших интервалах измерения T практически не меняющейся [8]:

$$\varphi_{\text{д}}[i] = 2\pi f i \delta, \quad \varphi_{\text{р}}[l] = 2\pi l \frac{b}{\lambda} \sin \theta,$$

где $i = \overline{0, N-1}$; δ – период дискретизации по времени, $\delta = T/N$.

Для получения единичного измерения доплеровского смещения частоты и направления прихода рассеянного сигнала производится двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) над массивом отсчетов $u[i, l]$ (1):

$$G[n, m] = \frac{1}{\sqrt{N} \sqrt{L}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} u[i, l] \exp\left\{-\frac{j2\pi ni}{N}\right\} \exp\left\{-\frac{j2\pi ml}{L}\right\}, \quad (2)$$

$n = \overline{0, N-1}, m = \overline{0, L-1}, j = \sqrt{-1}$. Отсчеты ДПФ с номерами $0 \leq n \leq (N/2)-1, 0 \leq m \leq (L/2)-1$ соответствуют положительным частотам и углам, а с номерами $(N/2)-1 < n \leq N-1$ и $(L/2)-1 < m \leq L-1$ – отрицательным.

Поскольку сигнал (1) – действительный, то модуль функции $G[n, m]$ (2) имеет два максимума, расположенных симметрично в диагональных квадрантах (четных или нечетных) координатной плоскости частота-угол. Положение максимумов в этой плоскости с точностью до знаков дает оценку значений доплеровской частоты и направления прихода сигнала [4,8].

Оценка доплеровского смещения грубо производится по номеру отсчета ДПФ с максимальной амплитудой в области положительных или отрицательных частот. Ее уточнение возможно путем

сопоставления величин максимального и соседних с ним отсчетов [15]. Аналогичным образом оценивается и направление прихода сигнала.

С течением времени – от $(k-1)$ -го интервала измерений к k -му – происходит изменение положений максимумов, что вызвано изменением во времени доплеровского смещения частоты и направления прихода сигнала вследствие движения объекта. Анализ положений максимумов и связанные с ним оценки доплеровского смещения и угла, позволяют разрешать неоднозначность угловых измерений в решетке после операции амплитудного детектирования. Можно предложить несколько подходов, основанных на анализе изменения положений максимумов как вдоль оси частот, так и вдоль оси углов.

В первом случае – когда анализируется изменение положений максимумов вдоль оси частот – выбор одного из максимумов, отвечающего истинным знакам доплеровского смещения и угла, производится в соответствии с правилом уменьшения доплеровского смещения во времени для принятой модели движения объекта [8,9]. То есть знаки доплеровского смещения и угла определяются тем максимумом функции $G[n, m]$, для которого частота со временем убывает:

$$\hat{f}(k) - \hat{f}(k-1) < 0,$$

где $\hat{}$ – означает оценку величины, $\hat{f}(k)$ – оценка доплеровского смещения частоты, соответствующая рассматриваемому максимуму, $\hat{f}(k-1)$ – оценка доплеровского смещения на предыдущем интервале измерения.

В другом подходе анализируется перемещение максимумов вдоль оси углов. Если приращение угла, соответствующего расположению максимума, лежащего в области положительных частот, положительное:

$$\hat{\theta}^+(k) - \hat{\theta}^+(k-1) > 0, \tag{3}$$

то объект находится в области отрицательных углов; индекс $^+$ указывает на полуплоскость, в которой частота $f > 0$. И наоборот, если

$$\hat{\theta}^+(k) - \hat{\theta}^+(k-1) < 0, \tag{4}$$

то объект движется в области положительных углов.

Аналогичным образом может быть сформулировано правило и для отрицательных частот. При этом знак приращения углового положения максимума ($\hat{\theta}^-(k) - \hat{\theta}^-(k-1)$) будет совпадать со знаком угловой координаты объекта [8,10].

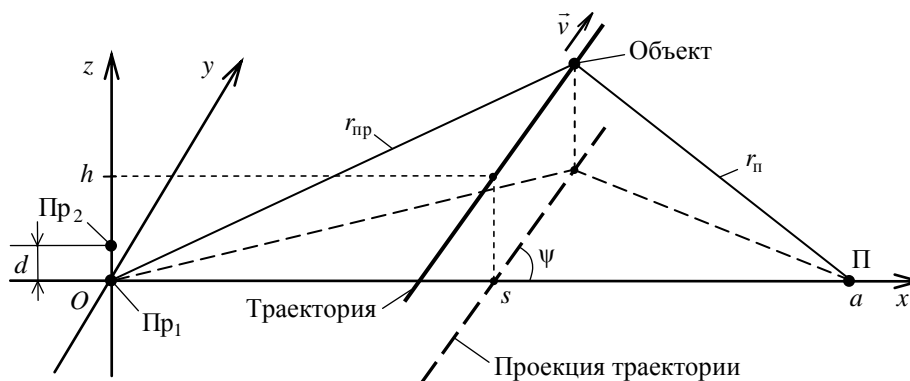


Рис. 2. Геометрия бистатической РЛС с двумя приемниками (движение объекта происходит на высоте h над плоскостью xOy)

Сформулированные правила позволяют достаточно просто устранять неоднозначность угловых измерений в просветных радиолокаторах с различным количеством элементов в антенных решетках, в том числе в радиолокаторах с двухэлементными решетками (фазовых пеленгаторах с двумя антеннами) [9], а также в радиолокаторах с антенными решетками с большим периодом ($b > \lambda/2$) [8,10]. В последнем случае для приближенного определения интерференционной полосы, в которой движется объект, могут использоваться оценки угловой координаты, выполненные по угловым приращениям (3), (4):

$$\hat{\theta}(t) = \frac{\hat{\theta}^+(k) - \hat{\theta}^+(k-1)}{T} (t - \hat{t}), \quad t < \hat{t}, \quad \hat{\theta}(t) = -\frac{\hat{\theta}^+(k) - \hat{\theta}^+(k-1)}{T} (t - \hat{t}), \quad t > \hat{t},$$

где $t = kT$, T – интервал между оценками угла, $\hat{\tau}$ – оценка момента τ пересечения объектом линии базы, предварительно выполненная по измерениям доплеровской частоты, исходя из условия перехода доплеровской частоты через нуль [5,8,14]

$$f(\tau) = 0.$$

Рассмотренные выше правила разработаны для плоской задачи – когда система и движущийся объект находятся в одной плоскости. Выход за рамки двухкоординатной задачи позволяет увеличить число возможных способов устранения неоднозначности измерений угла и доплеровской частоты. Так, в случае движения объекта над плоскостью xOy размещения просветной системы информацию о знаках доплеровской частоты f и азимута θ можно получить из анализа разности фаз сигналов в двух приемниках, один из которых расположен в плоскости xOy а другой – над этой плоскостью (рис. 2) или под ней.

За время наблюдения объекта в системе на рис. 2 знак разности фаз $\Delta\varphi_{пр}$ сигналов на входе приемников не меняется. В то время как знак доплеровского смещения меняется с положительного (до пересечения проекции траектории на плоскость xOy с линией базы) на отрицательный (после пересечения, когда объект удаляется от РЛС). Предполагается, что высота h полета объекта превосходит расстояние d между приемниками $Пр_1$ и $Пр_2$ ($d < h$, $d < \lambda/2$, $h \approx \text{const}$), а курсовой угол ψ близок к $\pi/2$. Вместе с тем частота протектированных сигналов согласно (1) всегда положительная, что приводит к смене разности фаз $\Delta\varphi_{дет}$ этих сигналов в момент пересечения проекцией траектории линии базы.

Таким образом, априорная информация о знаке разности фаз $\Delta\varphi_{пр}$ принимаемых колебаний (по сути информация о полуплоскости, где происходит движение объекта, $z > 0$ или $z < 0$) позволяет по знаку разности фаз $\Delta\varphi_{дет}$ протектированных колебаний судить о знаке доплеровского смещения:

- если знак $\Delta\varphi_{дет}$ совпадает со знаком $\Delta\varphi_{пр}$, то $f > 0$, и объект приближается к радиолокатору;
- и наоборот, если знак $\Delta\varphi_{дет}$ отличен от $\Delta\varphi_{пр}$, то $f < 0$, и объект удаляется от радиолокатора.

Информация о соответствии знаков $\Delta\varphi_{дет}$ и $\Delta\varphi_{пр}$ (т.е. информация о знаке доплеровского смещения) далее может использоваться для устранения неоднозначности измерения азимута объекта фазовым пеленгатором, который размещен в плоскости xOy . На рис. 3 его образуют приемники $Пр_{11}$ – $Пр_{12}$.

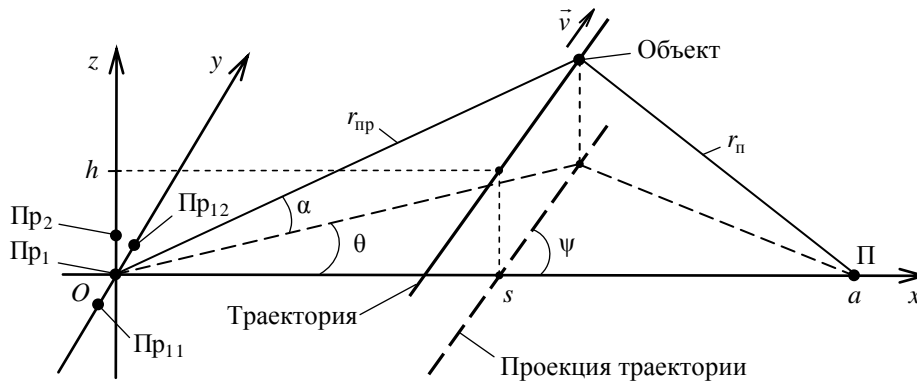


Рис. 3. Схема просветной бистатической трехкоординатной РЛС с измерениями угла места α и азимута θ фазовым методом

В заключении отметим, что построение трехкоординатной РЛС с измерениями азимута θ и угла места α фазовым методом изначально предполагает использование нескольких вибраторов, расположенных не в одной плоскости (рис. 3). Это делает весьма привлекательным устранение неоднозначности измерений азимута θ и доплеровской частоты по соотношению известных знаков разности колебаний на входе вибраторов, расположенных в и над/под плоскостью xOy , и измеряемой разности протектированных сигналов в тех же вибраторах (приемниках). Последняя дает информацию и о значении угла места α . Подобная схема легко реализуема в наземных трехкоординатных РЛС обнаружения воздушных объектов.

Литература

1. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. – М.: БИНОМ, 2011. – 351 с.
2. Бляхман А.Б., Рунова И.А. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации на просвет // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 424–432.

3. Чапурский В.В. Синтезированная теневая радиоголография в бистатической радиолокации // Радиотехника. – 2009. – № 3. – С. 52–69.
4. Nezhlin D.V., et al. Bistatic Radar. Principles and Practice / Ed. M. Cherniakov. – England: Wiley, 2007. – 504 p.
5. Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Особенности угломерно-дальномерного метода определения местоположения цели в просветных бистатических радиолокаторах // Журнал Радиоэлектроники: электронный журнал. – 2014. – № 4. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/1/text.pdf>
6. Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Фазовая пеленгация в системах радиолокации на просвет // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 455, № 4. – С. 401–403.
7. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение разности расстояний до движущегося объекта в просветных радиолокационных системах с разнесенным приемом // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2014. – Т. LVII, № 6. – С. 491–496.
8. Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Устранение неоднозначности измерений угловых координат фазовым методом в просветных радиолокаторах // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. – 2014. – № 3 (123). – С. 31–35.
9. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение знака угла в фазовых пеленгаторах просветных радиолокаторов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 48. – С. 137–140.
10. Ковалев, Ф.Н. Устранение неоднозначности угловых измерений в просветном радиолокаторе с антенной решеткой // Информационные системы и технологии, ИСТ-2014: тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию проф. Г.В. Глебовича. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – С. 38–39. – 1 электрон. опг. диск.
11. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Статистические характеристики ошибок местоопределения цели в бистатической радиолокационной системе просветного типа // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 3. – С. 3–9.
12. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Точность определения параметров траектории цели в просветной бистатической радиолокационной системе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 47. – С. 58–62.
13. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение координат движущейся цели в просветной многопозиционной радиолокационной системе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 4-1 (46). – С. 46–49.
14. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение момента пересечения объектом отрезка между приемником и передатчиком в системах радиолокации на просвет // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4 (12). – С. 30–36.
15. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

**METHODS OF LIQUIDATION THE AMBIGUITY OF MEASUREMENTS
OF THE ANGLES IN PHASE DIRECTION-FINDERS
IN FORWARD-SCATTERING RADAR SYSTEMS**

A.N. Kovalev, F.N. Kovalev, V.V. Kondratiev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Methods of liquidation the ambiguity of measurements of the angular coordinates in forward scattering radar system with amplitude detection of interference signal are considered. Methods are obtained by the analysis of the change in the time of the Doppler frequency and the direction of the scattered signal, when target is moving in the plane of positioning the radar system. Also individual method is proposed for the case of target movement above the plane of positioning the radar system. In this method should be compared the phase of the received signals of two vertically spaced receivers.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ И ЧИСЛО КОЛЕБАНИЙ ТЕНЕВОГО РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА

к.т.н. Ковалев А.Н., к.т.н. Ковалев Ф.Н., член-корр. РАН Кондратьев В.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Просветная радиолокация и связанный с ней метод теневого инверсного радиолокационного синтеза апертур имеют большие перспективы развития, поскольку охватывают задачи обнаружения и распознавания малоразмерных объектов, объектов с противорадиолокационной маскировкой (Stealth), и задачи создания слабоуязвимых систем с предельно низкой мощностью излучения [1,2,3,4].

Просветную радиолокационную систему (РЛС) можно построить, используя передатчик монохроматического излучения с длиной волны λ , меньшей размеров обнаруживаемого объекта, и удаленный от передатчика приемник с амплитудным детектированием суммарного сигнала, состоящего из прямого сигнала передатчика и сигнала, рассеянного на объекте [3,5,6]. Геометрия двухкоординатной РЛС показана на рис. 1, где использованы обозначения: $Oxuz$ – декартова система координат; Пр – приемник (расположен в точке O – начале координат); П – передатчик (расположен в точке с координатами $(a, 0)$), отрезок между приемником и передатчиком длиной a называется базой [3,7]; Q – условный центр объекта, относительно которого производится расчет доплеровской частоты и диаграммы вторичного излучения [6,8] (на рис. 1 условный центр находится в горизонтальной плоскости xOy); l_T и h_T – горизонтальный и вертикальный размеры объекта (для упрощения рисунка на нем показана только теневая апертюра объекта, имеющая прямоугольную форму); r_{Π} , $r_{\text{Пр}}$ – расстояния от передатчика до объекта и от объекта до приемника; β – бистатический угол. Объект движется со скоростью \vec{v} в плоскости xOy , пересекая в момент времени t линию базы под углом ψ в точке $(s, 0)$. Обнаружение объекта осуществляется при больших бистатических углах ($\beta \rightarrow \pi$), то есть в узкой зоне в окрестности линии базы [2,3].

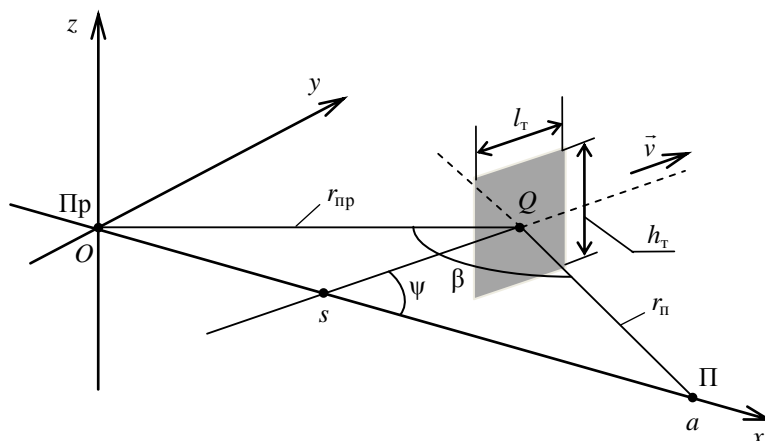


Рис. 1. Взаимное расположение прямоугольной теневой апертюры объекта и элементов системы

Особенностями рассеянного на объекте сигнала (теневого радиоголографического сигнала – ТРГС) является высокая интенсивность и малый уровень флуктуаций [3,4] в сравнении с сигналом, отраженным в направлении передатчика.

Математическая модель ТРГС строится на представлении рассеивающего объекта теневой апертюрой, принципе Бабинне о дополнительных экранах [8] и использовании интеграла Кирхгофа для зоны Фраунгофера [3,4]:

$$\dot{E}(t) = \dot{E}_d(t) \dot{E}_T(t) / r_{\Pi}(t) r_{\text{Пр}}(t), \quad (1)$$

где

$$\dot{E}_d(t) = j\varphi_d(t)$$

– быстроменяющаяся доплеровская компонента,

$$\varphi_d(t) = k \{ r_{\Pi}(t) + r_{\text{Пр}}(t) \} \quad (2)$$

– доплеровская фаза (ее производная определяет доплеровскую частоту), $k = 2\pi/\lambda$,

Перспективные радиотехнические системы

$\dot{E}_T(t)$ – медленная компонента, обусловленная диаграммой вторичного излучения объекта (эта диаграмма при больших бистатических углах, $\beta \rightarrow \pi$, совпадает с диаграммой направленности теневой апертуры [2,3,4,6]). В (1), (2) принята зависимость от времени $\exp(-j\omega t)$; за начало отсчета времени $t = 0$ здесь и далее взят момент τ пересечения объектом линии базы.

Для объекта с прямоугольной теневой апертурой (рис. 1), движущегося равномерно и прямолинейно с углами ψ близкими к $\pi/2$ в плоскости xOy из (1), (2) можно получить простые выражения для доплеровской фазы и амплитуды ТРГС [6]:

$$\varphi_d(t) \approx \gamma t^2 / 2 + ka, \quad (3)$$

$$|\dot{E}(t)| = \frac{S_T}{s(a-s)} \frac{\sin(\gamma l_T t / 2v)}{\gamma l_T t / 2v}, \quad (4)$$

где $\gamma = 2\pi v^2 \sin^2 \psi / R_\Phi^2$ – скорость доплеровской частотной модуляции, выражаемая через скорость v , курсовой угол ψ и радиус R_Φ первой зоны Френеля [3,7]:

$$R_\Phi = \sqrt{\frac{\lambda s(a-s)}{a}}, \quad (5)$$

S_T – площадь теневой апертуры.

Длительность ТРГС рассматриваемого объекта по первым нулям (соответствующим нулям главного лепестка диаграммы вторичного излучения объекта) согласно (4) составит величину:

$$T_{гл} = \frac{4\pi v}{\gamma l_T}. \quad (6)$$

Длительности боковых лепестков сигнала в два раза меньше $T_{гл}$:

$$T_6 = T_{гл} / 2. \quad (7)$$

Формула (3) зависимости доплеровской фазы от времени и формула (6) для расчета длительности главного лепестка дают возможность оценить количество $N_{гл}$ колебаний на интервале $(0, T_{гл}/2)$ и соответственно количество $\bar{N}_{гл}$ колебаний за время $T_{гл}$, т.е. на интервале $(-T_{гл}/2, T_{гл}/2)$:

$$\varphi_d(T_{гл}/2) - \varphi_d(0) = 2\pi N_{гл}, \quad \bar{N}_{гл} = 2N_{гл}, \quad (8)$$

откуда

$$N_{гл} = \frac{B}{8} = \frac{R_\Phi^2}{2l_T^2 \sin^2 \psi}, \quad \bar{N}_{гл} = \frac{B}{4} = \frac{R_\Phi^2}{l_T^2 \sin^2 \psi}, \quad (9)$$

где

$$B = \frac{\gamma T_{гл}}{2\pi} T_{гл} = \frac{\gamma T_{гл}^2}{2\pi} = \frac{4R_\Phi^2}{l_T^2 \sin^2 \psi}$$

– база ТРГС по главному лепестку [3]. Согласно (9) число колебаний сигнала на интервале $(-T_{гл}/2, T_{гл}/2)$ определяется отношением квадратов величин радиуса зоны Френеля R_Φ и проекции длины объекта на плоскость, перпендикулярную линии базы (при $\psi \rightarrow \pi/2$ – отношением квадратов R_Φ и длины l_T объекта).

Аналогично (8) можно оценить и число n колебаний сигнала на любом другом временном интервале (t_1, t_2) , $t_1 < t_2$, $t_1 > 0$:

$$\varphi_d(t_2) - \varphi_d(t_1) = 2\pi n. \quad (10)$$

Например, за время i -го бокового лепестка, т.е. на интервале $(iT_6, (i+1)T_6)$, $i = 1, 2, \dots$ в соответствие с (3), (10) произойдет

$$N_{6i} = \frac{\gamma T_6^2 (2i+1)}{4\pi} = N_{гл} (2i+1) \quad (11)$$

колебаний. В (11) учтено, что длительности боковых лепестков в 2 раза меньше длительности $T_{гл}$ главного лепестка (7) и первый боковой лепесток расположен в интервале $(T_{гл}/2, T_{гл})$.

Числа $\bar{N}_{гл}$ и N_{6i} обогащают и делают более наглядным представление о структуре рассеянного сигнала и совместно со скоростью доплеровской частотной модуляции γ , базой сигнала по главному лепестку [3] и базами по боковым лепесткам и скоростью спада уровня боковых лепестков могут служить основой для построения пространственно-временной обработки сигнала в просветных РЛС [2,3,5,9,10,11] и для выбора интервала первичных измерений [12]. Но самое главное, что эти числа

наряду с шириной спектра ТРГС, временем его корреляции и эффективной длительностью [3] являются параметрами, по которым можно оценивать размер (длину l_T) объекта.

Действительно, формула (9) показывает инвариантность числа $\overline{N}_{\text{гл}}$ относительно скорости v и, как указывалось выше, его зависимость от двух геометрических параметров: R_ϕ и l_T (предполагается, что курсовой угол ψ близок к $\pi/2$, и незначительное его отклонение от $\pi/2$ несущественно влияет на $\overline{N}_{\text{гл}}$). То есть из (9) следует возможность определения длины объекта по результатам вычисления $\overline{N}_{\text{гл}}$ и радиуса R_ϕ первой зоны Френеля, который в свою очередь зависит от абсциссы s объекта (5):

$$l_T \sin \psi = \frac{R_\phi(s)}{\sqrt{\overline{N}_{\text{гл}}}}.$$

При этом относительно грубая оценка абсциссы объекта s позволяет получать достаточно точные сведения о длине l_T объекта. В качестве примера, иллюстрирующего степень влияния s на R_ϕ , на рис. 2 показан график функции $R_\phi(s)$ (5), построенный для системы с параметрами $a = 40$ км и $\lambda = 0,5$ м.

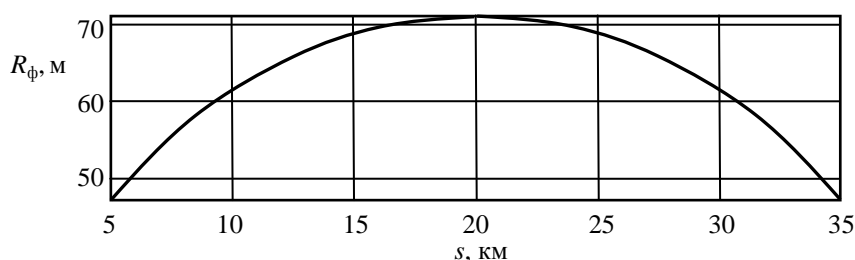


Рис. 2. Зависимость параметра R_ϕ от абсциссы s объекта

Вследствие использования амплитудного детектирования, о чем упоминалось в начале доклада, в приемнике получают напряжение доплеровской частоты, соответствующее одной квадратуре ТРГС [3]:

$$u(t) = k_1 \{1 + k_2 E_T(t) \cos(\varphi_T(t) + \varphi_d(t))\}, \quad (12)$$

где k_1 , k_2 – коэффициенты, характеризующие излучение и ослабление прямого и рассеянного сигналов, $\varphi_T(t) = \arg \dot{E}_T(t)$. Из сравнения (12) и (1) видно, что выводы относительно числа колебаний на характерных интервалах для действительного сигнала (12) в целом сохраняются. Кроме того режекция постоянной составляющей сигнала (12) [2,3] делает полезным для определения длины объекта и оценку количества N_{61} и N_{62} колебаний в ближайших к главному боковых лепестках.

В докладе рассмотрен случай прямоугольной теневой апертуры. Тем не менее, его результаты с определенными допущениями можно распространить и на другие объекты, имеющие вытянутые формы [3] (например, ракеты, снаряды, фюзеляжи самолетов). Это позволяет использовать оценки количества колебаний за характерные временные интервалы для анализа размеров (длины) различных объектов. Также можно предположить, что не только информация о числе колебаний за время существования главного или боковых лепестков, но и сведения о сочетании количества колебаний за характерные временные интервалы при заранее известных теневых профилях объектов найдут применение в задаче распознавания.

Литература

1. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. – М.: БИНОМ, 2011. – 351 с.
2. Бляхман А.Б., Рунова И.А. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации на просвет // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 424–432.
3. Чапурский В.В. Синтезированная теневая радиолокация в бистатической радиолокации // Радиотехника. – 2009. – № 3. – С. 52–69.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
5. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение разности расстояний до движущегося объекта в просветных радиолокационных системах с разнесенным приемом // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2014. – Т. LVII, № 6. – С. 491–496.
6. Реутов А.П., Чапурский В.В. Разрешающая способность обращенных радиолограмм при регистрации рассеянного "вперед" поля // Радиотехника. – 1987. – № 6. – С. 78–83.

7. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Разрешающая способность просветного радиолокатора // Журнал Радиоэлектроники: электронный журнал. – 2015. – № 3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar15/4/text.html>
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / пер. с англ. – М.: Наука, 1973 г. – 720 с.
9. Ковалев Ф.Н., Кондратьев В.В. Фазовая пеленгация в системах радиолокации на просвет // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 455, № 4. – С. 401–403.
10. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение момента пересечения объектом отрезка между приемником и передатчиком в системах радиолокации на просвет // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4 (12). – С. 30–36.
11. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Определение координат движущейся цели в просветной многопозиционной радиолокационной системе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 4-1 (46). – С. 46–49.
12. Ковалев Ф.Н. Оптимизация первичных измерений в бистатической "просветной" РЛС // Науч.-техн. конф. факультета информационных систем и технологий, посвященная 80-летию Нижегородской радиолaborатории: тез. докл. – Н. Новгород: НГТУ, 1998. – С. 11–12.

THE DURATION AND NUMBER OF VIBRATIONS OF SHADOW RADIO HOLOGRAPHIC SIGNAL

A.N. Kovalev, F.N. Kovalev, V.V. Kondratiev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Characteristics of shadow radio holographic signal (signal in forward scattering radar system) are considered. Expressions for calculating the number of oscillations of a signal for a definite time are specified. In particular, the expression for the number of oscillations in the range of action of the main lobe (where the power of signal is greatest) are shown. It is shown, that counts the number of oscillations at the characteristic time intervals can be used to estimate the size of located object.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ

к.т.н. Кротова Е.И.

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), наряду с системами мобильной связи, стали неотъемлемой частью человеческой деятельности. Технологии спутникового координатно-временного обеспечения используются в различных технических системах, быту, науке и образовании, в экономике и т.д. Для реализации потребностей в высокоточном координатно-временном обеспечении разработаны, созданы и введены в эксплуатацию СРНС ГЛОНАСС (Россия), OP8 (США), а в настоящее время разрабатываются аналогичные системы GALILEO (Европейский Союз), Compass (Китай).

Важность проблем глобального координатно-временного обеспечения регулярно подчеркивается руководством России [1].

В реальной обстановке работа СРНС осложняется отсутствием атомных часов в большинстве навигационных приёмников. Этот недостаток обычно устраняется требованием получения информации не менее чем с трёх (2-мерная навигация при известной высоте) или четырёх (3-мерная навигация) спутников; (при наличии сигнала хотя бы с одного спутника можно определить текущее время с хорошей точностью). Гравитационное поле Земли оказывает влияние на орбиты спутников; неоднородность атмосферы, из-за которой направление и скорость распространения радиоволн меняется в некоторых пределах, отражение сигналов от наземных объектов, что особенно сказывается в городе; ограниченность по мощности передатчиков, из-за чего прием сигналов возможен в зоне прямой видимости и на открытом воздухе. Поэтому контроль качества работы СРНС является актуальной задачей. Имеющиеся модели навигационных систем обычно учитывают влияние гауссовских помех [2].

Целью данных исследований является разработка имитационной модели радионавигационной системы с возможностью контроля качества работы при воздействии негауссовских помех [3].

Для разработки модели был выбран Matlab (Simulink), так как это весьма развитый пакет моделирования с большим количеством различных блоков, у которых есть возможность индивидуальной настройки. Для моделирования использовались стандартные блоки. Для каждого из которых были подобраны собственные параметры. Модель изображена на рис. 1.

Перспективные радиотехнические системы

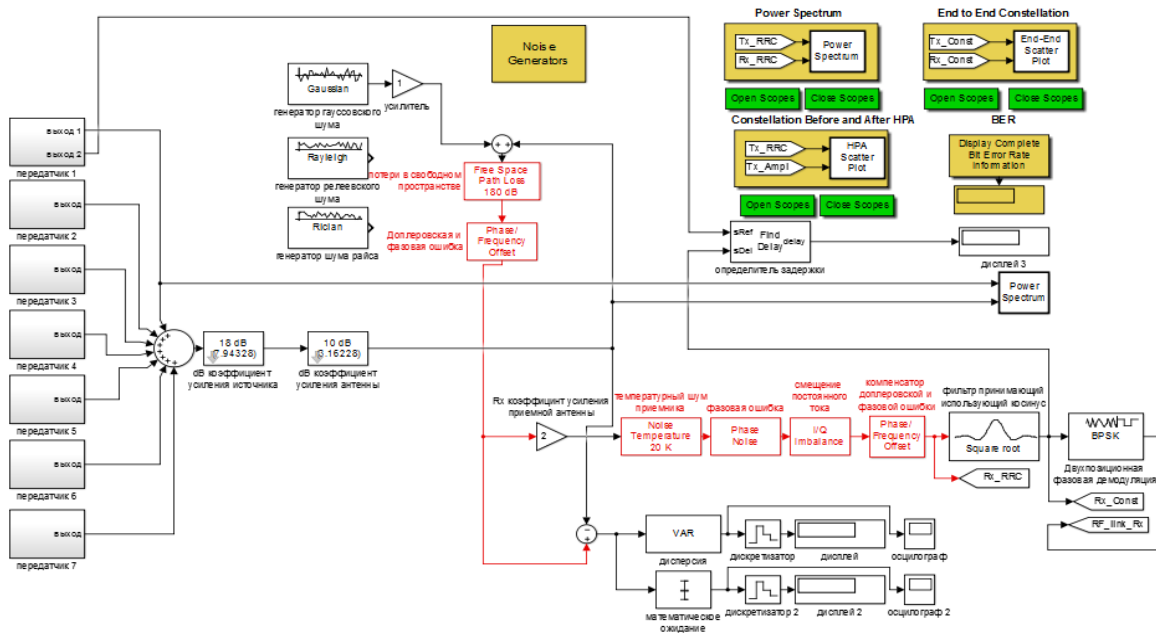


Рис. 1. Имитационная модель спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС

В имитационную модель (рис. 1) входит четыре основные части:

- имитационная модель передатчика спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС;
- имитационная модель генератора спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС;
- имитационная модель канала связи спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС;
- имитационная модель приёмника спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС.

Модель представляет собой спутник, обращающийся по орбите, рассчитанной на передачу эталонного сигнала на приёмник, с учетом релятивистских эффектов и взаимодействия планеты со спутником в различных системах координат. Положение спутников непрерывно меняются с большой скоростью. Поэтому необходимо постоянное высокоточное определение координат радионавигационного спутника. Это достигается путем измерения координат спутника в процессе полёта в зоне видимости, вычисляются орбиты. Эти данные прогнозируются на фиксированные промежутки времени. Спрогнозированные координаты передаются на спутник а затем в радионавигационный сигнал спутника.

Средняя погрешность альманаха спутника ГЛОНАСС относительно реальной траектории по нормали = 4,19 м.

Средняя погрешность имитационной модели траектории спутника ГЛОНАСС по нормали = 4,46 м.

Результаты СКО траекторий спутника схожи с аналогичными измерениями для системы NAVSTAR и лежат в пределах отклонений, обусловленных техническим заданием ГЛОНАСС.

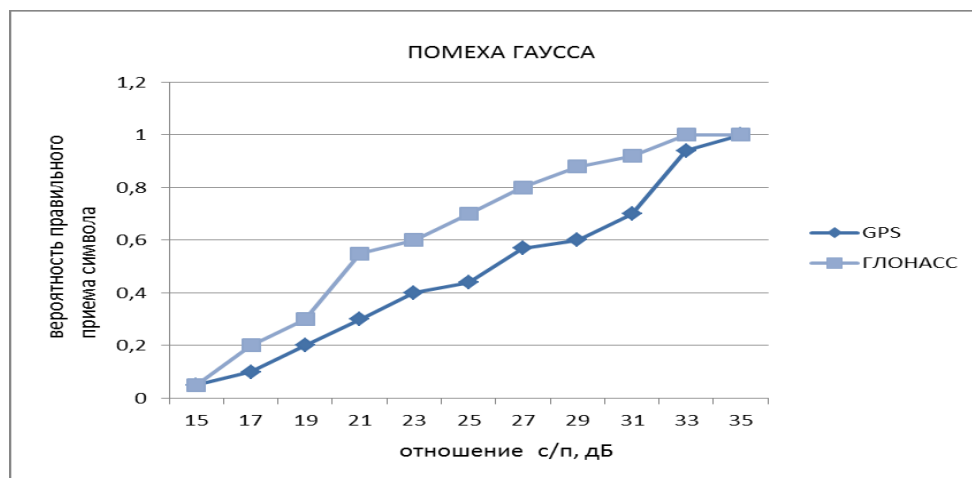


Рис. 2. Зависимость правильного приёма символа от отношения сигнал/шум в канале связи с гауссовским видом помех

Перспективные радиотехнические системы

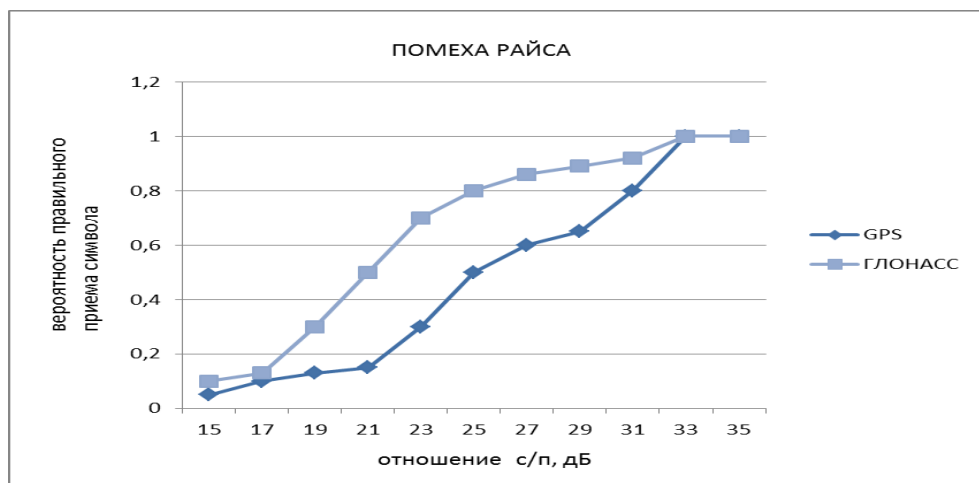


Рис. 3. Зависимость правильного приёма символа от отношения сигнал/шум в канале связи с райсовским видом помех

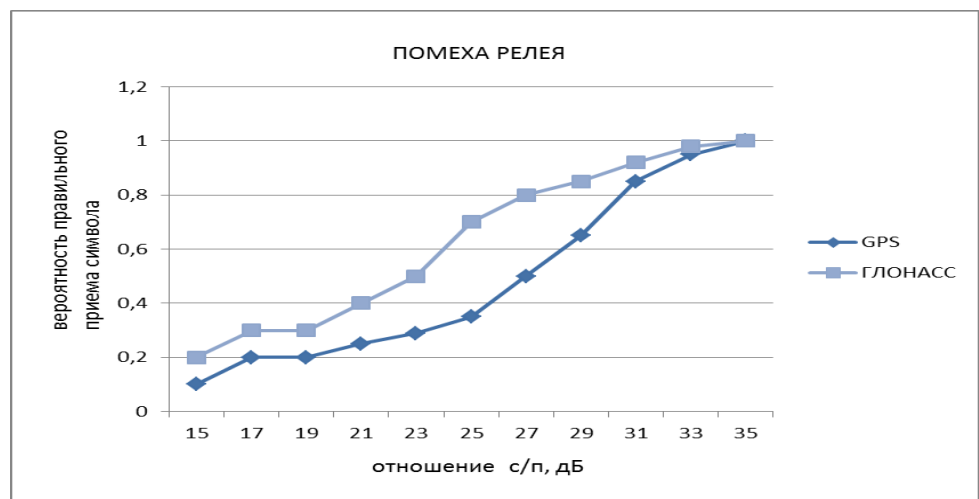


Рис. 4. Зависимость правильного приёма символа от отношения сигнал/шум в канале связи с релейским видом помех

Таблица 1. Результаты определения погрешностей параметров системы

система	псевдодальность	Доплеровский сдвиг	С/п = 32 дБ
GPS	0,35 м	0,01 Гц	гауссов шум
	0,4 м	0,006 Гц	помеха Релея
	0,41 м	0,028 Гц	помеха Райса
ГЛОНАСС	0,09 м	0,004 Гц	гауссов шум
	0,18 м	0,019 Гц	помеха Релея
	0,13 м	0,012 Гц	помеха Райса

С помощью разработанной модели проводились экспериментальные исследования зависимости вероятности правильного приема символов от отношения сигнал/шум (SNR) для помех типа Релея, Райса и Гаусса. Для радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Графики для этих зависимостей изображены на рис. 2, 3, 4. Результаты определения погрешностей параметров системы представлены в таблице 1.

Исследования показали, что наибольшая вероятность правильного приёма символа получена при отношении с/п 35 дБ для всех видов помех. Этого достаточно для передачи 100% информации.

Вероятность ошибочного приёма сигнала при отношении с/п менее 35 дБ выше всех у помехи Релея, что указывает на сильное влияние эффекта многолучёвости на спутниковый сигнал.

Для системы ГЛОНАСС наиболее высокую погрешность вносит помеха Релея: для псевдодальности 0,18 м, для доплеровского смещения 0,019 Гц.

Недостатками разработанной модели является малое количество рассмотренных помех, замена реального радионавигационного сигнала идеализированной копией, были соблюдены лишь временные и частотные параметры. Однако, модель, позволяет менять параметры отдельных блоков, что обеспечивает ее универсальность. Результаты контроля позволяют точнее скорректировать параметры системы.

Литература

1. Ярлыков М. С, Болдин В. А., Богачев А. С. Авиационные радионавигационные устройства и системы. — М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1980. 235 с
2. Кантор Л.Я., Тимофеев В.В. Спутниковая связь и проблемы геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988. 267 с.
3. Кротова Е. И. Метод оценки влияния аддитивных помех на входе приемника сигналов с помощью идентификации видов законов распределения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2010., № 5. С. 116-121.

INVESTIGATION OF QUALITY OF WORK OF SRNS GLONASS IN THE FRAMEWORK OF SIMULATION MODELLING UNDER THE INFLUENCE OF NONGAUSSIAN NOISES

E. I. Krotova

Yaroslavl State University n. a. P. G. Demidiv

In work results of researches of influence of handicapes on quality of work of receiver SRNS GLONASS with the help of specially developed model on parameter of probability of correct reception of a symbol, pseudo-range and Doppler - shift are submitted.

СОГЛАСОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИМПЕДАНСА СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

к.т.н. Боголюбов Б.Н., к.ф.-м.н. Бритенков А.К., к.т.н. Кирсанов А.В.,
Перфилов В.А., Смирнов С.А., Фарфель В.А.

Институт прикладной физики РАН

Увеличение дальности приёма и передачи информации в гидроакустике связано с использованием низкочастотных звуковых сигналов. Однако, понижение частоты уменьшает пропускную способность информационного канала [1] из-за сужения рабочей полосы [2]. Тем не менее, в качестве перспективного диапазона для подводной сверхдальней связи, могут рассматриваться и частоты в сотни Гц [3], так как известны эксперименты по передаче информации на таких частотах со скоростью выше 100 битрейт на расстояния более 1000 км [4]. В гидроакустических приложениях для частот порядка 1 кГц ввиду компактности и эффективности наибольшее распространение получили излучатели продольно-изгибного типа с компенсаторами гидростатического давления и пьезоэлектрическими активными элементами [5]. Сконструированный мощный НЧ излучатель с полосой частот в несколько октав может использоваться без компенсатора, имеет высокие эксплуатационные характеристики и способен излучать звук высокой интенсивности для обеспечения надёжной сверхдальней связи [6]. Другие существующие технические решения для излучателей в аналогичной полосе частот либо более громоздки [7], либо ограничены максимальной мощностью излучения или набором сигналов специального вида [4].

Малогабаритный гидроакустический преобразователь

Активным элементом разработанного гидроакустического преобразователя (рис. 1) является размещенный внутри металлического корпуса пьезокерамический столб, склеенный из колец,

выполненных из состава ЦТБС-3 [5]. С торцов активный элемент зажат гайками через пьезокерамические изоляторы. Корпус выполнен в виде симметричных конусов, соединённых с помощью опорной пластины и кольца-пружины (рис. 1). Благодаря такой конструкции продольные колебания активного элемента трансформируются в колебания соединительного кольца и стенок корпуса подобно колебаниям поршня. Данная конструкция излучателя позволяет без компенсаторов выдерживать гидростатическое давление до 200 м и более. Центральная пластина центрирует пьезокерамический столб, исключая паразитные изгибные колебания активного элемента и повышает жёсткость корпуса излучателя, что снизит уровень гармоник и рассеяние энергии излучения в побочные моды.

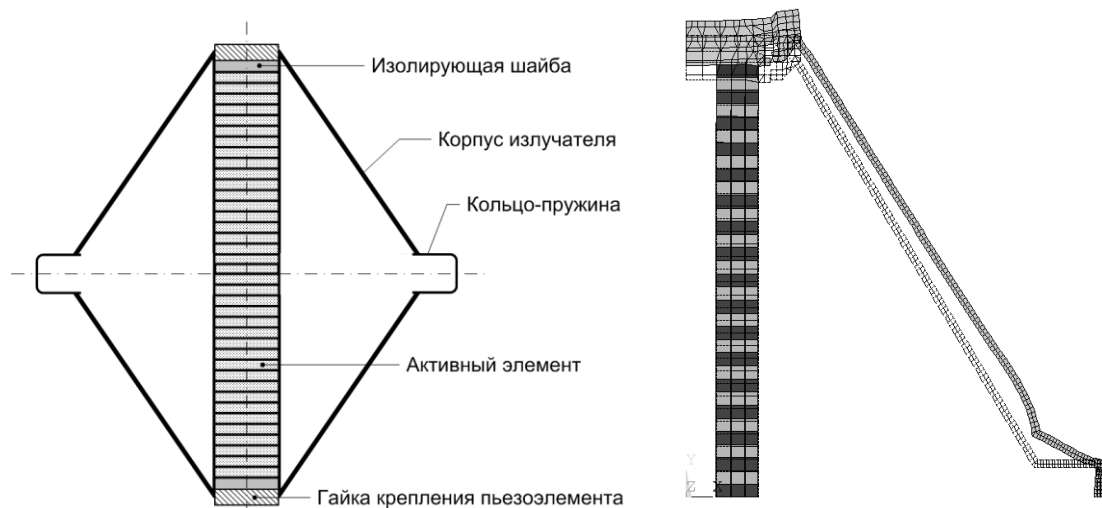


Рис. 1. Конструкция излучателя и форма колебаний излучателя в воде на резонансной частоте под воздействием на активный элемент импульсами переменного напряжения амплитудой 1 кВ. Масштаб колебаний увеличен в 1000 раз по сравнению с масштабом корпуса излучателя.

Расчёт излучателя и моделирование его основных характеристик

Основные параметры излучателя и распределение звукового поля рассчитаны методом конечно-элементного моделирования. Резонансные частоты, уровень излучения, поле механических нагрузок при колебаниях при наличии гидростатического давления рассчитаны исходя из предположения, что для данного диапазона частот такой излучатель можно считать точечным источником на расстоянии более 2 его максимальных линейных размеров. Ввиду симметрии для расчёта достаточен сектор, составляющий четверть полусферы, и ограниченный центром излучателя (рис. 2).

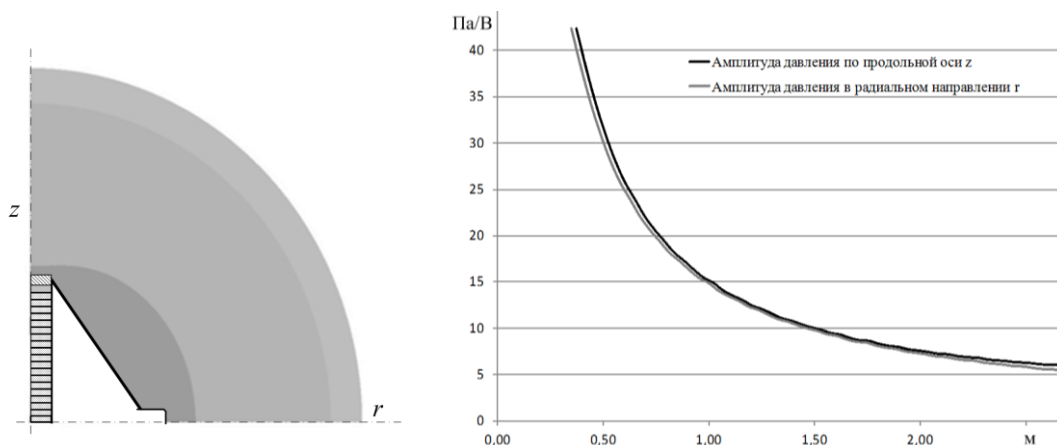


Рис. 2. Поле амплитуды создаваемого излучателем звукового давления, рассчитанного в продольном и поперечном направлениях методом конечно-элементного моделирования по размерам экспериментального образца

Эквивалентная схема (рис. 3) преобразователя в отличие от принятой [8], не имеет активного сопротивления, параллельного ёмкости конденсатора C_0 , так как активное сопротивление пьезокерамического элемента, состоящего из керамических колец $\Pi_1-\Pi_N$, составляет сотни мОм. Для эффективной работы излучателя требуется согласование электрического импеданса преобразователя Z_{in} с

характеристиками усилителя мощности. Однако на практике точно рассчитать импеданс Z_{in} невозможно из-за влияния конструкционных механических составляющих колебательной системы на характеристики эквивалентной электрической схемы. Параметры L , C , C_0 и R эквивалентной схемы уточняются из экспериментальных зависимостей реальной и мнимой частей импеданса излучателя $Z_{in}=U/I$ от частоты после проведения натурных испытаний опытного образца для нагрузке в воде. Значения добавочных элементов, включённых для формирования частотной характеристики преобразователя, известны ($R_1=37,5$ Ом, $L_1=0,1$ Гн).

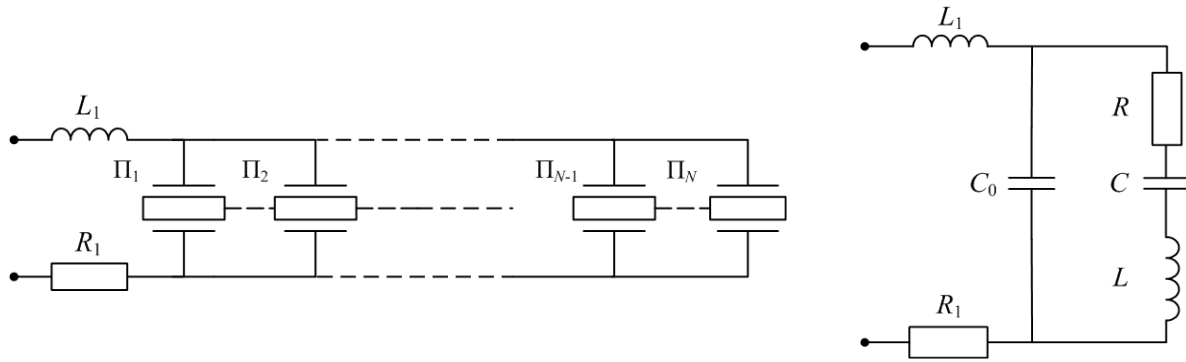


Рис. 3. Принципиальная электрическая (слева) и эквивалентная (справа) схемы излучателя

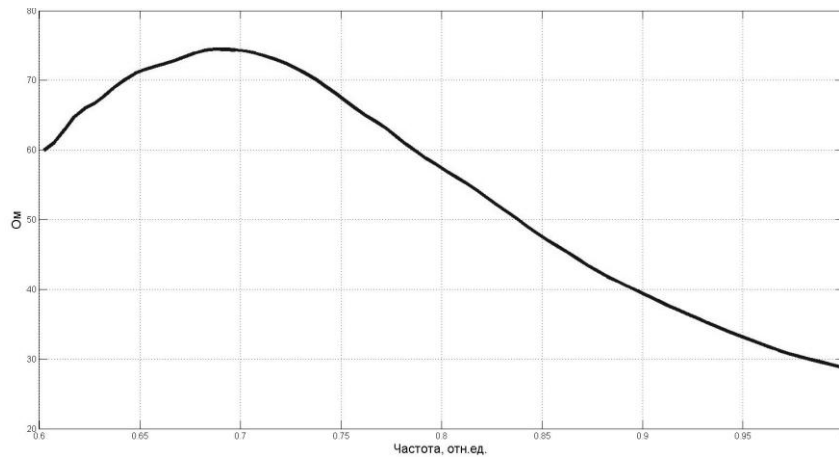


Рис. 4. Экспериментальная зависимость реальной части импеданса $\text{Re } Z_{in}$ от частоты

Для определения L , C , C_0 и R эквивалентной схемы из экспериментальных зависимостей реальная и мнимая части импеданса, рассчитанного в соответствии со схемой (рис. 3), сопоставляются в нескольких точках с известными из измерений значениями импеданса Z_{in}

$$Z_{in} = \frac{Z_{C_0}(Z_R + Z_L + Z_C)}{Z_{C_0} + R + Z_L + Z_C} + R_1 + Z_{L_1}, \text{ где } Z_C = \frac{1}{i\omega C}, Z_{C_0} = \frac{1}{i\omega C_0}, Z_L = i\omega L, Z_{L_1} = i\omega L_1. \quad (1)$$

В таком случае реальная составляющая импеданса:

$$\text{Re} Z_{in}(\omega) = \frac{R}{\omega^2 C_0^2 \left(R^2 + \omega^2 L^2 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC_1} \right)^2 \right)} + R_1, \text{ где } C_1 = \frac{C_0 C}{C_0 + C}, \quad (2)$$

имеет максимум на частоте:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}, \quad (3)$$

которая определяется измерениями $\omega_{\max}=2\pi f_{\max}$. Соотношение для максимума $\text{Re } Z_{in}(\omega)$ реального значения импеданса:

$$\max(\text{Re} Z_{in}) = R_1 + \frac{1}{R\omega_{\max}^2 C_0^2} \quad (4)$$

задаёт C_1 на основе максимума экспериментальной кривой $\text{Re } Z_{in}(\omega)$ (рис. 5). Далее, выражение

$$\text{Im } Z_{in}(\omega_{\max}) = \omega_{\max} L_1 - \frac{1}{\omega_{\max} C_0}, \quad (5)$$

при $\omega = \omega_{\max}$, определяет значение C_0 , которое для приведённой на рис. 3 эквивалентной схемы составляет 1,51 мкФ. Значение $R = 637$ Ом получено из (4) после подстановки ω_{\max} и C_0 . Индуктивность L можно найти из (2) для $\text{Re } Z_{in}(\omega)$, подставляя известные величины и измеренное значение функции $\text{Re } Z_{in}$ в другой точке экспериментальной кривой, приведённой на рис. 5. Рассчитанные согласно (1, 2) и (4) параметры используемой эквивалентной схемы L , C , C_0 и R оказались близки к параметрам, полученными с помощью анализатора импедансных спектров EIS.

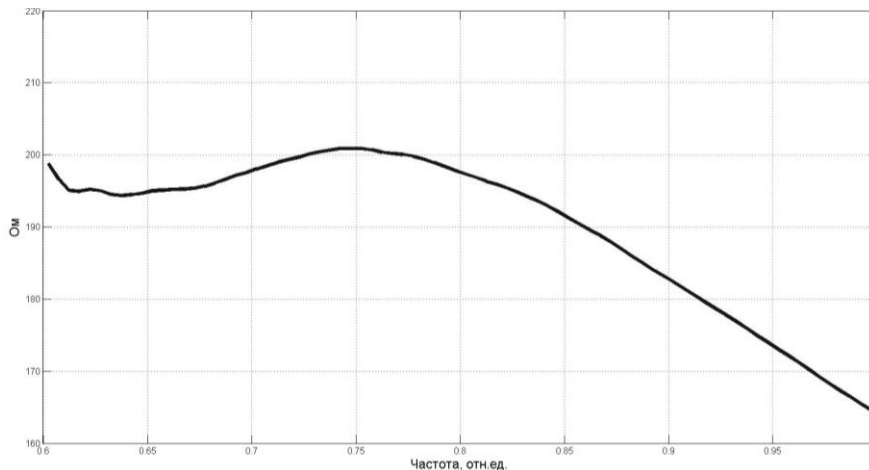


Рис. 5. Экспериментальная зависимость модуля мнимой части импеданса $\text{Im } Z_{in}(\omega)$ от частоты

Определение параметров излучателя и экспериментальные данные

Эффективная работа преобразователя зависит от настройки системы возбуждения, параметры которой в свою очередь связаны с электрическими характеристиками эквивалентной схемы L , C , C_0 и R . Для получения этих характеристик (рис. 4, 5) и резонансной частоты преобразователя f_{\max} проведены испытания излучателя под водой на глубине около 10 м (рис. 6). Формирование импульсов в виде серии ЛЧМ-сигналов с диапазоном изменения частоты от 400 до 700 Гц реализовано с помощью пакета LabVIEW. Амплитуда ЛЧМ-сигнала, подаваемого через АЦП и усилитель мощности на блок излучателя для обеспечения плавного пуска и остановки усилителя, амплитуда импульса медленно нарастала от нуля до номинального значения в течение 0,25 с в начале импульса и уменьшалась до нуля в конце импульса в течение такого же времени. Сигнал приёмного гидрофона, установленного на расстоянии 1 м от излучателя, сигнал управления усилителем, ток и напряжение преобразователя контролировались на 4х-канальном цифровом осциллографе Tektronix DDS-2024 с синхронной регистрацией.

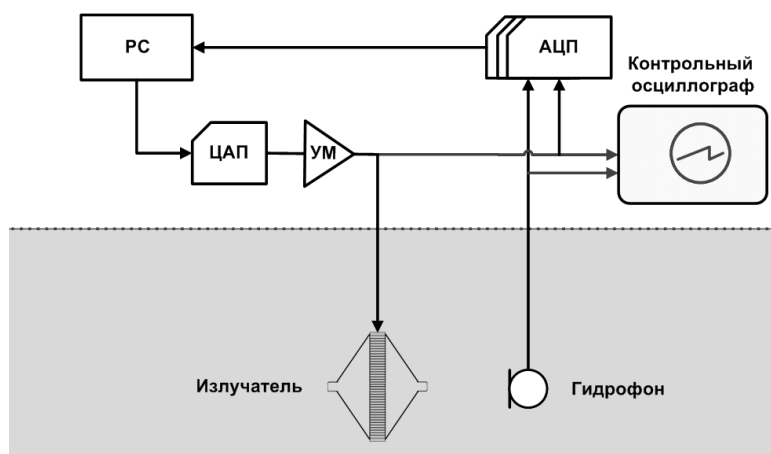


Рис. 6. Схема эксперимента и оборудование для измерения характеристик излучателя

Максимальное давление, развиваемое преобразователем на резонансной частоте составляет 30 кПа/м/В. Расширение рабочей полосы может быть достигнуто при помощи резонансного инвертора,

увеличивающего чувствительность на краях полосы, а также генератора сигналов специального вида, выполненного для испытаний как виртуального прибора в пакете программ LabVIEW. Для настройки такого инвертора использованы электрические параметры эквивалентной схемы (рис. 3), определённые согласно (2, 4, 5) из экспериментальных зависимостей реальной и мнимой частей импеданса излучателя.

Результаты работы и выводы

Разработанный НЧ гидроакустический преобразователь имеет КПД 80%, развивая давление до 210 дБ на расстоянии 1 м. Широкая полоса частот (более 30% несущей частоты), высокие показатели чувствительности и акустической мощности преобразователя позволяют успешно использовать его для создания подводных низкочастотных распределённых гидроакустических излучающих антенн [8].

Литература

1. Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 329 с.
2. Справочник по технической акустике / Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
3. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Санкт-Петербург: Наука, 2004. 410 с.
4. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // J. Acoust. Soc. Am. Vol. 133(1). January 2013. P. EL61–EL67.
5. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Ключин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы, 2010. № 12. С. 51–55.
6. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с.
7. Quer R., Dasseux Ch. Increasing depth capability of “Diabolo” flextensional transducer for active linear arrays // Proc. of the Institute of Acoustics. 1999. Vol. 21. P. 117–125.
8. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.

COORDINATION OF LOW-FREQUENCY IMPEDANCE OF HIGH POWER HYDROACOUSTIC EMITTER EXCITATION SYSTEM WITH ELECTROMECHANICAL CONVERTER BASED ON PIEZOCERAMIC ACTIVE ELEMENT

B.N. Bogolybov, A.K. Britenkov, A.V. Kirsanov,
V.A. Perfilov, S.A. Smirnov, V.A. Farfel

Institute of Applied Physics of RAS

The range increase of information transmission and reception is connected in hydroacoustics to the use of low-frequency sound. Nevertheless, the frequency of hundreds of Hz can be considered as the perspective ultralong range for underwater communication as some experiments show the possibility to transmit information on these frequencies at speeds above 100 bitrate on distances more than 1000 km. Transducers of longitudinal-bending type with piezoelectric active elements are widely used in sonar applications for frequencies of about 1 kHz due to their compactness and efficiency. The designed powerful bass transmitter with a bandwidth of several octaves showed high test results in performance of high intensity sound radiation to ensure the reliability of information super-range communication and sonar channel information download. Other technical solutions of similar emitters are either more bulky or have restricted ability to transmit a limited set of special signals.

ГИДРОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА

Элбакидзе А.В., к.ф.м.н. Разманов В.М., Смольянинов И.В.,
к.ф.м.н. Кривцов А.П., Денисов Е.Ю.

Фрязинский Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

При проведении изыскательских работ на прокладку кабеля по морскому и речному дну часть работ приходится проводить с маломерного катера (шлюпки). Для этой цели комплекс, совмещающий в себе несколько функций гораздо удобнее нескольких отдельных приборов. Кроме того, сбор данных о качке и положении судна осуществляется программой микропроцессора в реальном времени, а не каждой ПЭВМ приборов в отдельности. Также обеспечивается одновременность излучения зондирующих импульсов, что снижает влияние приборов друг на друга. В ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработан такой

комплекс, совмещающий в себе интерференционный и амплитудный гидролокатор, промерный высокочастотный эхолот и низкочастотный профилограф с единым управляющим контроллером и одной регистрирующей вычислительной машиной. Прототип комплекса может стать прототипом для создания отечественного прибора.

Структурная схема комплекса осуществляющего формирование зондирующих ЛЧМ сигналов, многоканальный ввод в вычислительную машину и когерентную обработку сигналов представлена на рис. 1.

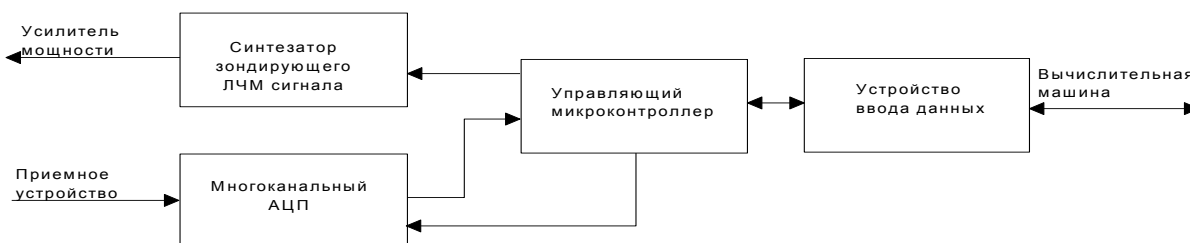


Рис. 1. Структурная схема устройства осуществляющего формирование зондирующих ЛЧМ сигналов, многоканальный ввод в вычислительную машину и когерентную обработку сигналов

В качестве управляющего контроллера в данном случае был взят микропроцессор фирмы Atmel AT91SAM9260 с архитектурой ARM9 [1]. Для генерации управляющих временных диаграмм используются 4 таймера микропроцессора, первый из которых используется в качестве широтно-импульсного модулятора для формирования интервала времени оцифровки и интервала времени излучения сигнала. Второй таймер используется для формирования интервала времени дискретизации для АЦП, а третий и четвертый таймер для формирования частоты гетеродина. По окончании интервала оцифровки производится сброс счетчиков таймеров дискретизации и гетеродинов, что обеспечивает идентичность их фазы на последовательных интервалах измерений. Данные с АЦП передаются в память микропроцессора через канал прямого доступа. Схема формирования ЛЧМ сигналов [2] накачки для левого и правого борта интерферометра, эхолота и профилографа выполнена на постоянных запоминающих устройствах (флэш-памяти). В основе схемы синтеза сигналов лежит принцип воспроизведения рассчитанной и записанной заранее последовательностей нулей и единиц с достаточно высокой частотой, задаваемой кварцевым генератором, много большей рабочей частоты. Обмен данными гидроакустической системы с вычислительной машиной осуществляется по сетевому интерфейсу Ethernet 100 Mb/c на расстояние до 100 м.

Комплекс состоит из интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО) с рабочей частотой 240 и полосой ЛЧМ 27 кГц, высокочастотного эхолота на 200 и полосой 13.5 КГц и низкочастотного профилографа на 4.5-9КГц. Такой выбор частот позволил установить единую частоту оцифровки в 54 КГц, кратную двойной полосе пропускания каждого устройства.

В состав экспериментального образца комплекса входят:

1. Две приемо-передающие антенны интерферометра, приёмно-передающие антенны высокочастотного эхолота и низкочастотного профилографа.
2. Шесть приемных антенн интерферометра (по 3 на каждый борт).
3. Десяти канальный приемник (8+1+1).
4. Устройство формирования зондирующих ЛЧМ сигналов в трех диапазонах частот, многоканального ввода в вычислительную машину и когерентной обработки сигналов.
5. Вычислительная машина.
6. Программно-технические средства реального времени.
7. Программно-технические средства пост-обработки.

Экспериментальный образец комплекса собран в евроконструктиве высотой 3U (рис. 2).

Встроенное программное обеспечение микроконтроллера по включению питания производит инициализацию системы и ожидает приёма командных пакетов от вычислительной машины. По приходу командного пакета управляющая программа задает параметры работы таймеров времени излучения и регистрации строки данных, работающих непрерывно, параметры работы таймеров дискретизации данных и гетеродинов, работающих во время интервала регистрации строки, задает адрес памяти временных диаграмм воспроизводимых сигналов ЛЧМ, разрешает тактовый сигнал системы таймеров и данные с АЦП начинают передаваться в память по каналу прямого доступа, по окончании регистрации строки счетчики таймеров дискретизации данных и гетеродинов сбрасываются в 0 и запускается передача данных в ПЭВМ через Ethernet интерфейс. Сброс счетчиков в 0 обеспечивает когерентность и приём последовательных зондирующих импульсов. Процесс регистрации повторяется непрерывно до прихода пакета остановки от ПЭВМ. Данные датчиков спутниковой навигации, крена, дифферента, вертикальных перемещений и курса принимаются и передаются в ПЭВМ отдельными пакетами.

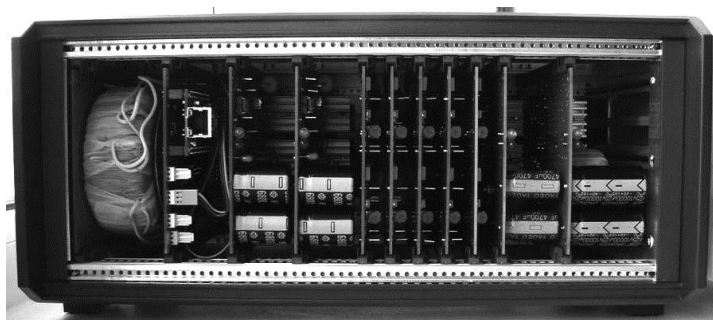


Рис. 2. Фото прибора без передней стенки. Слева направо – 1-плата питания, 2- контроллер с трёхканальным синтезатором ЛЧМ и АЦП, 3,4- усилители мощности 240 КГц, 5-8 –приемники 240КГц, 9-приемники эхолота и профилографа, 10- усилитель мощности эхолота, 11 - усилитель мощности профилографа

Программное обеспечение ввода и регистрации данных комплекса предназначено для:

1. Ввода и регистрации данных от комплекса.
2. Ввода и регистрации данных спутниковой навигации от устройства через Ethernet или по com-портам ПЭВМ.
3. Ввода и регистрации данных от датчиков крена, дифферента, вертикальных перемещений и курса.
4. Тестирования работы аппаратуры комплекса в лабораторных условиях.
5. Оценка качества регистрируемой информации в режиме реального времени.
6. Просмотр зарегистрированных данных.

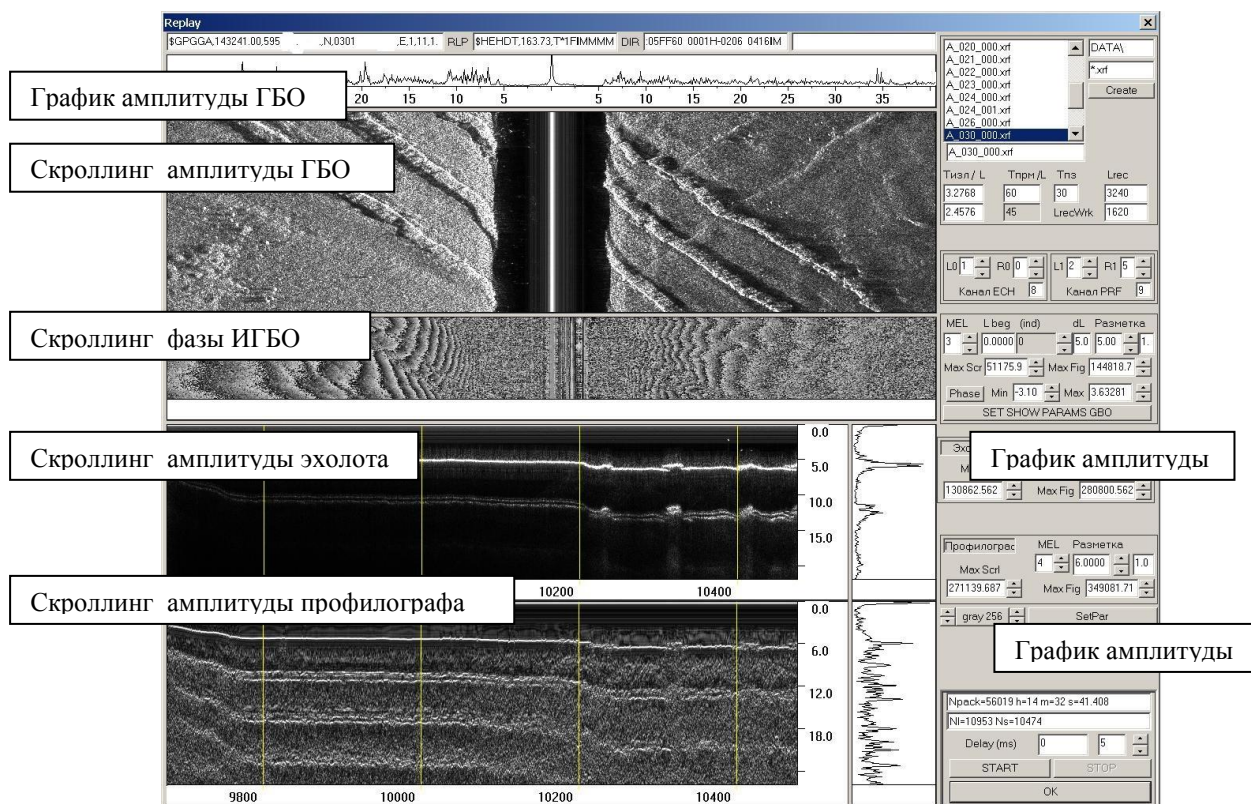


Рис. 3. Окно программы регистрации данных комплекса

Испытания узлов прибора проводились в акватории Финского залива. На рис. 3 и 4 приведены результаты обработки данных ИГБО, эхолота и профилографа в реальном времени.

Для сравнения результатов, был проведен контрольный промер с помощью ИГБО и однолучевым эхолотом. На рисунке 5 представлен фрагмент карты глубин морского дна полученный после

Перспективные радиотехнические системы

постобработки данных ИГБО. На рисунке 5, также для сравнения нанесены результаты промера проведенного навигационным эхолотом катера (цифры в центре галса).

Анализ фрагмента карты глубин показывает хорошее совпадение данных полученных с помощью промера однолучевым эхолотом и ИГБО. Разработанное устройство формирования зондирующих ЛЧМ сигналов, многоканального ввода в вычислительную машину и когерентной обработки сигналов показало свою полную работоспособность в составе ИГБО для рабочей частоты 240 кГц.

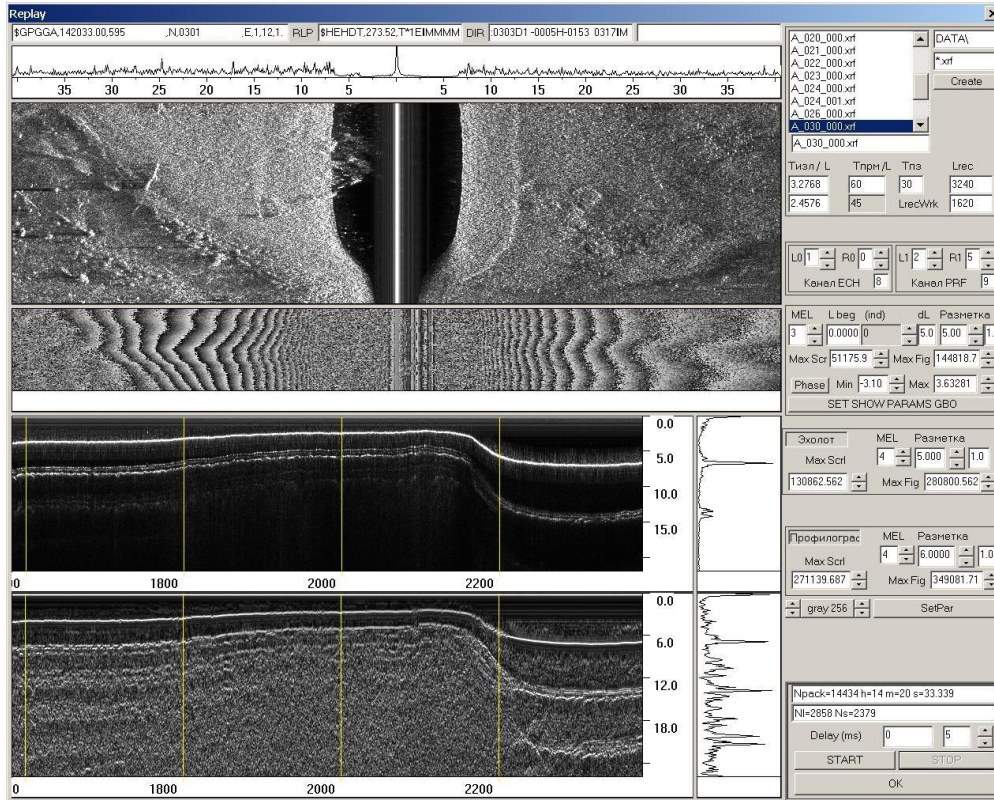


Рис. 4. Окно программы регистрации данных комплекса, другой участок пути

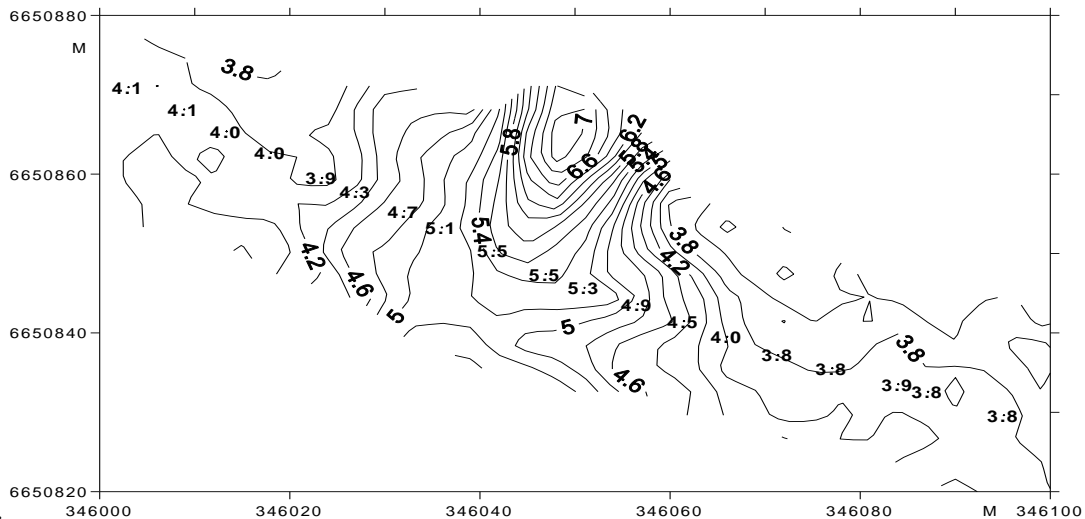


Рис. 5. Фрагмент карты глубин морского дна полученный после постобработки данных ИГБО

Заключение

Создан единый комплекс из нескольких гидроакустических систем. Благодаря применению в составе устройства нескольких синтезаторов зондирующих сигналов, синхронному формированию зондирующих ЛЧМ сигналов, многоканальному вводу в ПЭВМ, приему контроллером информации о положении судна в реальном времени позволило уменьшить размеры комплекса, повысить точность компенсации качки и взаимовлияние проводимых измерений разными методами.

Литература

1. AT91 ARM Thumb Microcontrollers AT91SAM9260 User manual, 768 p. Atmel Corporation., 2008, www.atmel.com
2. Метод Устройство для ввода и когерентной обработки сигнала. Элбакидзе А. В., Смольянинов И. В. Патент на полезную модель № 124503 от 14.09.2012.
3. Денисов Е.Ю., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Гидролокационные системы с когерентным формированием ЛЧМ зондирующих импульсов и регистрацией эхо сигналов. Тезисы доклада на двенадцатой Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург, 2014.

E-mail: eldrey@ms.ire.rssi.ru

SONAR SEABED SURVEY

A.V. Elbakidze, V.M. Razmanov ,
I.V. Smoljaninov, A.P. Krivtsov , E.Y. Denisov

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (Fryazino Branch)

The report presents a mixed-use complex consisting of interferometric side-scan sonar, high-frequency and low frequency sonar profiler. The complex consists of a microprocessor controller module, power amplifier module probing signals and a number of amplifier channels of the received signals. The microprocessor controller provides simultaneous formation of the probe chirp signals in three frequency bands, multi-channel analog-to-digital conversion and the transfer of the digitized echo signals to a computer over a LAN. Synchronization of formation of probe pulses and digitization is produced from a highly stable oscillator that provides coherent formation and processing the echo signals. The software provides real-time reception on LAN, processing and visualization of the digitized echo signal reception GPS, roll, pitch, vertical movement and course of the vessel and record all data on external memory PC for further processing. The software allows you to build a post-processing the depth map, acoustic imaging and geophysical profile of the seabed in view of the position sensors vessel. The report also provides examples of visualization of the results presented location bottom firmware multifunctional complex.

МЕТОД БЫСТРОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ

д. т. н. Петров Е.П., к. т. н. Харина Н.Л., Сухих П.Н.

Вятский государственный университет

В настоящее время использование цифровых изображений в различных сферах деятельности, таких как медицина, геодезия, картография, системы мониторинга и т.п. привело к необходимости использования различных методов сжатия изображений. Существующие методы сжатия, такие как JPEG-LS, JPEG2000 успешно справляются с этой задачей [1,2]. Однако существует ряд приложений, где использование этих методов не всегда возможно из-за ограничений на вычислительные и энергетические ресурсы, например, системы дистанционного зондирования Земли, формирующие на борту космического аппарата огромные объемы информационных потоков, значительная часть которых связана с передачей изображений. Необходимость сжатия на борту космического аппарата изображений, обусловлена ростом генерируемых современными космическими системами дистанционного зондирования информационных потоков (до нескольких сотен Мбит/с). Это связано с увеличением как пространственного, так и спектрального разрешения съемочной аппаратуры при сохранении широкой полосы обзора, сравнительно невысокой пропускной способности радиоканалов и ограниченности частотного диапазона при передаче изображений на наземные приемные станции. В большинстве современных систем дистанционного зондирования используется непрерывный режим непосредственной передачи или хранения изображений на бортовых записывающих устройствах. Большинство современных спутников обладают энергетическими возможностями для обеспечения непрерывного режима передачи информации, которого требуют больших вычислительных ресурсов на борту космического аппарата. Намечившаяся в последнее время тенденция на «миниатюризацию» космических средств наблюдения (малые спутники) и увеличение разрядности передаваемых цифровых изображений привели к необходимости сокращения вычислительных ресурсов на реализацию алгоритмов сжатия изображений, что не позволяет реализовать вышеперечисленные методы. Таким образом, для малых космических

аппаратов необходимы новые методы сжатия изображений, не уступающие по своей эффективности известным методам, но требующие меньших вычислительных ресурсов.

В данной работе предлагается метод сжатия цифровых изображений (как панхроматических так и цветных), удовлетворяющий указанным требованиям. Предложенный метод позволяет максимально удалить статистическую избыточность изображения, не имеет спектральных преобразований и вычислительных операций (таких как, умножение, сложение). Сжатие осуществляется по битовым плоскостям, что позволяет обрабатывать их параллельно независимо друг от друга.

Будем полагать, что g -разрядное ЦИ является двумерным марковским процессом с несколькими состояниями $N = 2^g$ с вектором вероятностей начальных состояний $P = \|p_1, p_2, \dots, p_N\|^T$ и матрицами вероятностей переходов (МВП) ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из M_i в соседнее M_j состояние ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

$${}^1\Pi = \begin{pmatrix} {}^1\pi_{11} & {}^1\pi_{12} & \dots & {}^1\pi_{1N} \\ {}^1\pi_{21} & {}^1\pi_{22} & \dots & {}^1\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^1\pi_{N1} & {}^1\pi_{N2} & \dots & {}^1\pi_{NN} \end{pmatrix}, \quad {}^2\Pi = \begin{pmatrix} {}^2\pi_{11} & {}^2\pi_{12} & \dots & {}^2\pi_{1N} \\ {}^2\pi_{21} & {}^2\pi_{22} & \dots & {}^2\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^2\pi_{N1} & {}^2\pi_{N2} & \dots & {}^2\pi_{NN} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Разработка метода сжатия ЦИ в таком представлении требует больших вычислительных ресурсов, особенно для ЦИ с большим разрешением ($g > 8$). Поэтому предлагается разделить g -разрядное ЦИ на g разрядных двоичных изображений (РДИ).

Каждое РДИ представляет собой двумерный марковский процесс с двумя ($N = 2$) равновероятными состояниями ($p_1 = p_2$) и МВП ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из M_i в соседнее состояние M_j ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

$${}^1\Pi = \begin{pmatrix} {}^1\pi_{11} & {}^1\pi_{12} \\ {}^1\pi_{21} & {}^1\pi_{22} \end{pmatrix}, \quad {}^2\Pi = \begin{pmatrix} {}^2\pi_{11} & {}^2\pi_{12} \\ {}^2\pi_{21} & {}^2\pi_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Элементы МВП (2) удовлетворяют условию нормировки

$$\sum_{j=1}^N {}^q\pi_{ij} = 1, \quad i \in N, \quad q = \overline{1, 2}; \quad (3)$$

и стационарности

$$p_i = \sum_{j=1}^N p_j \pi_{ij}, \quad i \in N. \quad (4)$$

РДИ представляет марковское случайное поле размером $m \times n$ на несимметричной полуплоскости, полученной классической разверткой с левого верхнего угла слева направо вниз (рис. 1).

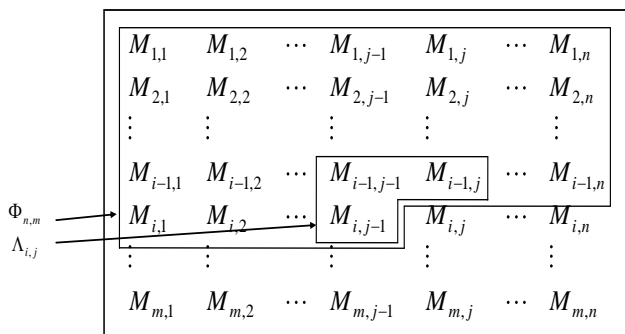


Рис. 1. Модель РДИ

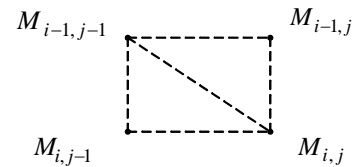


Рис. 2. Окрестность предсказываемого элемента РДИ

Состояние элемента $M_{i,j}$ ($i \in m, j \in n$) зависит только от известных элементов некоторого подмножества $\Lambda_{i,j}$, называемого окрестностью элемента $M_{i,j}$. Лучшим образом удовлетворяющее условию каузальности является конфигурация окрестности (рис. 2) [3], где приняты обозначения

$$\Lambda_{i,j} = \{M_{i,j-1}, M_{i-1,j}, M_{i-1,j-1}\}. \quad (5)$$

Вероятности перехода от состояний элементов $\Lambda_{i,j}$ к состоянию $M_{i,j}$ образуют МВП вида [3]:

$$\Pi = \begin{vmatrix} \pi_{111} & \pi_{121} & \pi_{211} & \pi_{221} \\ \pi_{112} & \pi_{122} & \pi_{212} & \pi_{222} \end{vmatrix}^T. \quad (6)$$

Основой алгоритма является процедура предсказания каждого элемента РДИ на основе известной окрестности $\Lambda_{i,j}$ и МВП (6), используя критерий максимальной вероятности. В результате предсказания формируется РДИ по следующему правилу– если элемент предсказан верно, то обозначим 0, иначе 1. При восстановлении РДИ нулевые элементы заменяются результатов предсказания, а единичные – инверсией результата предсказания.

В качестве примера на рис. 3,4 приведен результат предсказания старшего разряда ЦИ, белым показаны области, присутствующие в битовом потоке (рис. 4).



Рис. 3. Старший разряд ЦИ

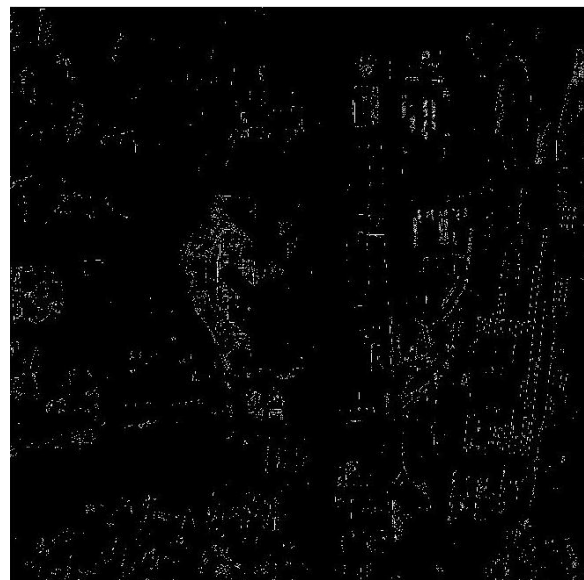


Рис. 4. Сжатый старший разряд ЦИ

РДИ после предсказания представляет собой разреженную матрицу, что позволяет эффективно применять алгоритмы кодирования RLE и Хаффмана.

Формализованное описание алгоритма [4,5]:

1. ЦИ разбивается на g РДИ;
2. Для каждого РДИ вычисляются МВП по горизонтали ${}^1\Pi$ и вертикали ${}^2\Pi$, соответственно;
3. Исходя из МВП ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ вычисляется МВП ${}^3\Pi$.
4. Прогнозируется элемент \hat{M}_{ij} на основе МВП Π и окрестности $\Lambda_{i,j}$.
5. Если $M_{ij} = \hat{M}_{ij}$, то элемент предсказан верно;
6. Если $M_{ij} \neq \hat{M}_{ij}$, элемент M_{ij} предсказан неверно;
7. Формирование РДИ после предсказания;
8. РДИ сжимается кодом RLE в одномерный поток;
9. Одномерный поток сжимается кодом Хаффмана;
10. Сжатые данные записываются в файл.

Младшие РДИ содержат значительные области с фоном, характеристики которого близки к белому гауссовскому шуму. Процедура предсказания в этом случае мало эффективна, поэтому данные РДИ подвергаются кодированию без процедуры предсказания. Для принятия решения о необходимости применения процедуры предсказания используется пороговое значение элементов ${}^1\pi_{ii}$ и ${}^2\pi_{ii}$ МВП (2), равное $N=0,6$.

Для исследования эффективности предложенного алгоритма (выходной формат MRK) произведено сжатие 100 снимков поверхности земли со спутника и беспилотного летательного аппарата (рис. 5). Исходное разрешение снимков 1920x1200 пикселей.

В качестве аналогов представлены известные алгоритмы сжатия без потерь PNG, JPEG-LS и JPEG2000. На рис. 6 представлен график зависимости усредненного коэффициента сжатия в зависимости от размера изображения. Для оценки быстродействия алгоритма на рис. 7 представлена

Перспективные радиотехнические системы

усредненная зависимость скорости сжатия одного изображения в МБ/с, от его размера. Оценка быстродействия производилась с учетом параллельной обработки РДИ.

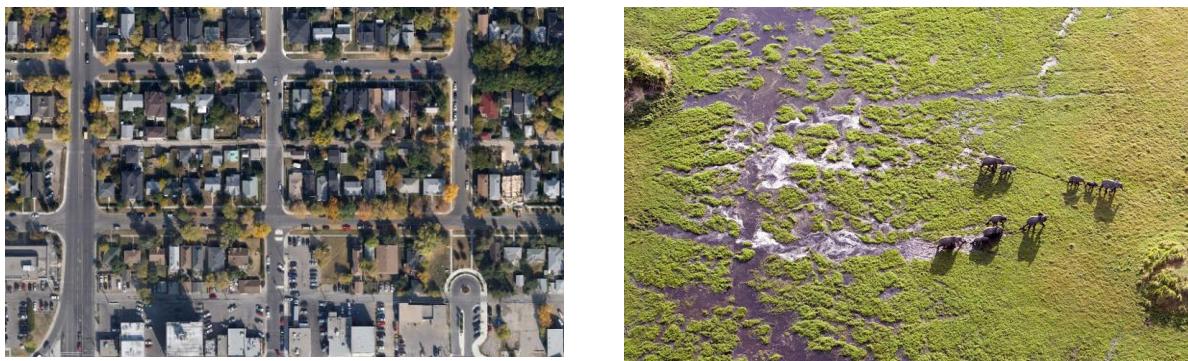


Рис. 5. Образцы тестовых снимков

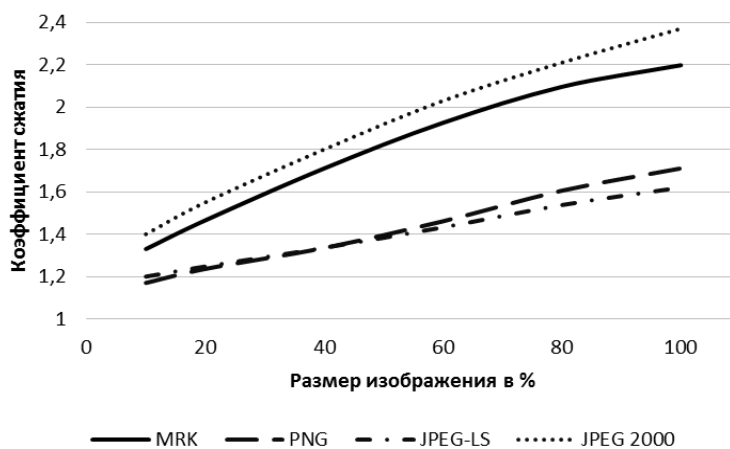


Рис. 6. Зависимость степени сжатия от размера изображения тестовых снимков

По результатам исследования видно, что предложенный алгоритм не уступает аналогам по степени сжатия и значительно превосходит по скорости обработки изображений.

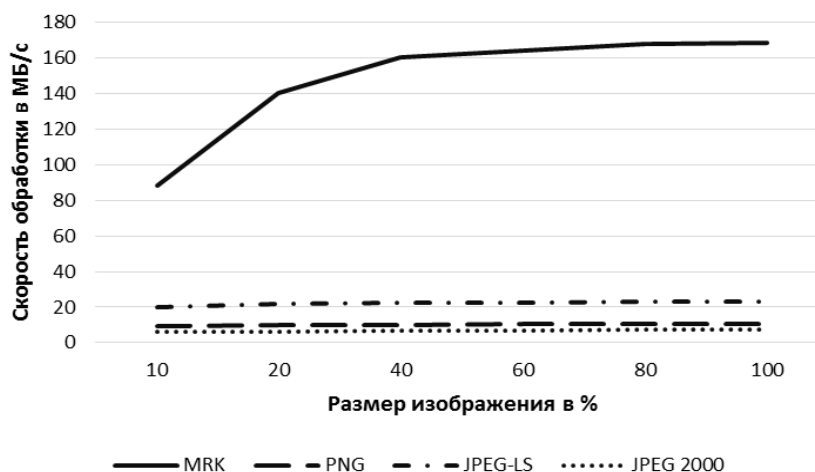


Рис. 7. Зависимость скорости сжатия (МБ/с) от размера изображения тестовых снимков

Алгоритм имеет ряд преимуществ:

- сжатие каждого РДИ происходит независимо друг от друга, это дает возможность увеличения быстродействия за счет параллельной обработки РДИ;
- алгоритм позволяет обрабатывать изображения любой разрядности;
- алгоритм строится на простых вычислительных операциях, что снижает требования к элементной базе. Так, реализовав данный алгоритм на ПЛИС можно существенно сократить

энергетические затраты, не теряя в быстродействии, что актуально для использования в системах ДЗЗ на борту КА.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. - 584с.
3. Петров Е.П., Медведева Е.В., Харина Н.Л. Математическая модель цифровых полутоновых изображений Земли из космоса // II Всероссийская НТК «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара. 2011. С. 179-185.
4. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями// Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – М., 2013. Выпуск: XV-1, - с. 132-135
5. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями//Материалы III Всероссийской НТК «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (III Козловские чтения) – Самара, 2013. – с.163-170
6. Яндекс.Карты // Яндекс [сайт]. [2014]. URL: <http://market.yandex.ru> (дата обращения: 15.09.2014).

METHOD OF FAST IMAGE LOSSLESS COMPRESSION

E.P. Petrov, N.L. Kharina, P.N. Sukhikh

Vyatka State University

The modern remote-sensing instruments of the Earth create huge volumes of information flows which considerable part is connected to transmission of the digital images (DI) onboard the spacecraft. Now for coding of DI different algorithms which are based on the following main methods are used: sectional block coding, differential pulse code modulation, discrete cosine transform, the discrete wavelet transform. The tendency which was outlined recently on "miniaturization" of space watch facilities (small satellites) carries to toughening of requirements to efficiency of use of energy resources, and not always allows to realize above-mentioned methods of compression of DI, especially DI with big permission. It follows that for compression of DI onboard small spacecraft it is necessary to solve the problem of development of the new methods which aren't conceding by the efficiency to known methods of compression of DI, and requiring smaller computing resources.

An algorithm of digital images lossless compression by the minimum computing resources is represented. The method provides division of the digital image into binary images (BI). Each BI is considered as two-dimensional Markov process with two equally probable statuses. Thus two-dimensional Markov process is provided as superposition of two one-dimensional Markov processes (across and verticals). It allows to make a matrix of probabilities of one-step transition of one status to another taking into account statuses of neighborhood of the considered BI element. A basis of algorithm is procedure of a prediction of each BI element on the basis of a matrix of transition probabilities, using criterion of the maximum probability. After procedure of a prediction coding on the basis of algorithms of RLE and Huffman is used. For it's the implementation the algorithm uses only logical operations, thereby reducing the computational and energy resources.

On subjective and objective evaluation of the developed algorithm is not inferior to the famous lossless compression algorithms. The offered algorithm has the following advantages:

- compression of each BI happens independent others, it allows to increase in high-speed performance due to parallel processing of BI;
- the algorithm allows to process images of any digit capacity;
- the algorithm is built on simple computing operations that reduces requirements to element basis.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Дерендяев Д. Н.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Исследованию электродинамических характеристик антенн, расположенных в магнитоактивной плазме, посвящено значительное число работ. Большой интерес для разнообразных приложений вызывают параметры антенных систем в частотных интервалах, отвечающих так называемым резонансным условиям [1], когда показатель преломления одной из нормальных волн плазменной среды при некотором значении угла между волновым вектором и направлением внешнего магнитного поля стремится к бесконечности. Такие условия реализуются во многих экспериментах по генерации

электромагнитных излучений в лабораторной и космической плазме. В большинстве работ по исследованию характеристик антенн в магнитоактивной плазме рассматривались излучатели дипольного типа с заданным распределением тока вдоль антенного провода, представляющим собой стоячую волну (в пределе короткой антенны переходящим в «треугольное» распределение). Как известно, в настоящее время достаточно широкое распространение получили антенны бегущей волны. Такие антенны применяются и для космической радиосвязи с искусственными спутниками Земли, находящимися в ионосферной плазме. В то же время, теория антенн бегущей волны в магнитоактивной плазме не получила достаточного освещения в научной литературе. В работе [2] исследовалось излучение антенны бесконечно длинной антенны бегущей волны в магнитоактивной плазме. Вполне понятно, что такая идеализация не является вполне удовлетворительной и учет конечной длины антенны может существенно влиять на ее электродинамические характеристики.

В настоящей работе исследуется электрическое поле в дальней зоне, диаграмма направленности, а также сопротивление излучения антенны бегущей волны, ориентированной в плазме вдоль внешнего магнитного поля и работающей в резонансной области свистового диапазона частот.

Рассматривается излучение электромагнитных волн антенной длины l , расположенной в холодной бесстолкновительной магнитоактивной плазме и ориентированной вдоль внешнего магнитного поля $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{z}_0$ (см. рис. 1). Плотность электрического тока антенны задается в виде:

$$\mathbf{j} = z_0 I_0 \delta(x) \delta(y) \exp(ihz - i\omega t) \left[U\left(z + \frac{l}{2}\right) - U\left(z - \frac{l}{2}\right) \right], \quad (1)$$

где U – единичная функция Хевисайда, δ – дельта-функция Дирака, I_0 – полный ток в антенне, h – постоянная распространения тока вдоль антенны.

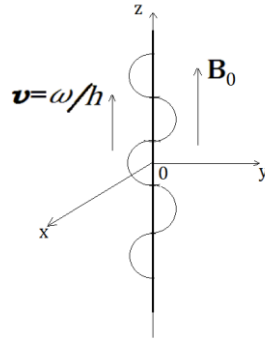


Рис. 1. Геометрия задачи

Считаем, что частота поля ω лежит в диапазоне $\omega_{LH} < \omega < \omega_H/2$ (здесь ω_{LH} – нижняя гибридная частота, ω_H – гирочастота электронов).

Электродинамические свойства плазмы при пренебрежении пространственной дисперсией характеризуются тензором комплексной диэлектрической проницаемости [3]. Было получено решение дисперсионного уравнения для нормальных волн в плазме [3], возбуждаемых током (1). Это уравнение имеет два решения, их появление обусловлено анизотропией среды:

$$n_{z\varepsilon,0}^2 = \varepsilon - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon}{\eta} \right) n_{\perp}^2 \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\eta} \right)^2 n_{\perp}^4 - \frac{4n_{\perp}^2 g^2}{\eta} + 4g^2}, \quad (2)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{k}/k_0, \quad n^2 = k^2/k_0^2 = n_{\perp}^2 + n_z^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2, \quad k_0 = \omega/c.$$

Величины $n_{z\varepsilon}$ и n_{z0} как функции n_{\perp} определяют поверхности показателя преломления двух нормальных волн («обыкновенной» и «необыкновенной»), которые соответствуют знакам «-» и «+» в выражении (2). Величина n_{z0} в рассматриваемом диапазоне частот – чисто мнимая. Поэтому распространяющейся волной в свистовом диапазоне частот является только необыкновенная волна. Для функции $n_{z\varepsilon}(n_{\perp})$ можно получить обратную зависимость, то есть $n_{\perp}(n_z)$. Данная зависимость будет двузначной, то есть одному значению n_z отвечают два значения n_{\perp} :

$$n_{\perp 1,2}^2(n_z) = \frac{\varepsilon^2 - g^2 + \varepsilon\eta - (\eta + \varepsilon)n_z^2 \pm R}{2\varepsilon},$$

$$R = \sqrt{(\eta - \varepsilon)^2 n_z^4 + 2[g^2(\eta + \varepsilon) - \varepsilon(\eta - \varepsilon)^2] n_z^2 + (\varepsilon^2 - g^2 - \varepsilon\eta)^2},$$

ε, g, η – компоненты тензора комплексной диэлектрической проницаемости [2].

Расчет поля источника (1) в дальней зоне проводится стандартным образом: применяя преобразование Фурье, из уравнений Максвелла находим связь между пространственными спектрами компонент поля и тока. Вычисляя далее Фурье-интегралы с использованием принципа предельного

поглощения и метода стационарной фазы [4], для компонент электрического поля в дальней зоне в сферической системе координат (r, θ, φ) приходим к характерным выражениям следующего вида:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_r(r, \theta, \varphi) \\ B_r(r, \theta, \varphi) \end{pmatrix} &= \sum_{\gamma=1}^2 u_1(n_{z\gamma}) \begin{pmatrix} p_1^E(n_{z\gamma}) \\ p_1^B(n_{z\gamma}) \end{pmatrix} + u_2(n_{z3}) \begin{pmatrix} p_2^E(n_{z3}) \\ p_2^B(n_{z3}) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} E_\theta(r, \theta, \varphi) \\ B_\theta(r, \theta, \varphi) \end{pmatrix} &= \sum_{\gamma=1}^2 u_1(n_{z\gamma}) \begin{pmatrix} p_3^E(n_{z\gamma}) \\ p_3^B(n_{z\gamma}) \end{pmatrix} + u_2(n_{z3}) \begin{pmatrix} p_4^E(n_{z3}) \\ p_4^B(n_{z3}) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} E_\varphi(r, \theta, \varphi) \\ B_\varphi(r, \theta, \varphi) \end{pmatrix} &= \sum_{\gamma=1}^2 u_1(n_{z\gamma}) \begin{pmatrix} p_5^E(n_{z\gamma}) \\ p_5^B(n_{z\gamma}) \end{pmatrix} + u_2(n_{z3}) \begin{pmatrix} p_6^E(n_{z3}) \\ p_6^B(n_{z3}) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} u_1(n_z) &= \frac{2A_1}{(n_{11}^2 - n_{12}^2)\varepsilon} \exp(ir k_0(n_{11}(n_z) + n_z \cos\theta)), \\ u_2(n_z) &= \frac{2A_2}{(n_{11}^2 - n_{12}^2)\varepsilon} \exp(ir k_0(n_{12}(n_z) + n_z \cos\theta)), \\ A_1 &= \frac{2I_0}{c\varepsilon\rho} \frac{1}{\sqrt{|n_{11}''(n_z)|n_{11}(n_z)}} \frac{\sin[(h_1 - n_z)k_0 l/2]}{h_1 - n_z}, \\ A_2 &= \frac{2I_0}{c\varepsilon\rho} \frac{1}{\sqrt{|n_{12}''(n_z)|n_{12}(n_z)}} \frac{\sin[(h_1 - n_z)k_0 l/2]}{h_1 - n_z}, \end{aligned}$$

θ – угол между направлением магнитного поля и направлением на точку наблюдения, $\rho = r \sin\theta$, $h_1 = h/k_0$, выражения для функций $p_i^{E,B}$, $i = \overline{1,6}$ здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Суммирование в (3) проводится по всем стационарным точкам, удовлетворяющим соотношению

$$dn_{1,2}/dn_z = -\text{ctg}\theta. \quad (4)$$

Лучевая картина в рассматриваемом диапазоне частот показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, в интервале углов $0 < \theta < \theta_1$ (θ_1 – угол, отвечающий плазменному резонансу [1]) соотношению (4) удовлетворяет три разных значения n_{z1}, n_{z2}, n_{z3} и в точку наблюдения может приходиться три луча S_1, S_2, S_3 . В интервале углов $\theta_1 < \theta < \theta_2$ (θ_2 – угол Стори) имеем два значения n_{z1}, n_{z2} и два луча S_1, S_2 . При углах $\theta > \theta_2$ соотношению (4) не удовлетворяет ни одно из действительных значений n_z . Поле, отвечающее лучу S_γ , обозначим E_γ , $\gamma = 1, 2, 3$. На рис. 2 справа показан пространственный спектр тока (1) $j_z(n_z)$. Данная функция входит сомножителем в выражения для амплитуды поля (3). Очевидно, что длина антенны определяет характерную ширину пространственного спектра (см. рис. 2), а постоянная распространения – положение максимума пространственного спектра тока. Поэтому изменение этих параметров существенно влияет на количество и амплитуду лучевых компонент электромагнитного поля. Проведенные численные расчеты наглядно демонстрируют отмеченные особенности. Расчеты проводились для следующих заданных параметров, отвечающих условиям земной ионосферы [5]: $B_0=0.5$ Гс, $\omega_H=8.7 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_H=300 \text{ с}^{-1}$, $\omega_p=5.6 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$, $N=10^6 \text{ см}^{-3}$. При данных параметрах плазмы углы, отвечающие каустическим направлениям, принимают следующие значения: $\theta_1 = 3.28^\circ$, $\theta_2 = 16.82^\circ$. При расчетах полагалось, что частота тока в антенне $\omega = 5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$.

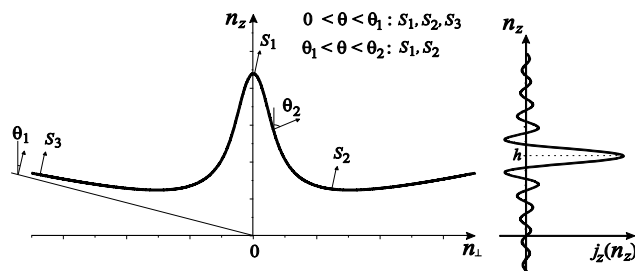


Рис. 2. Лучевая картина в рассматриваемом диапазоне частот

После вычисления компонент электромагнитного поля несложно вычислить радиальную компоненту вектора Пойнтинга:

$$S_r = \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re} [E_\theta H_\phi^* - E_\phi H_\theta^*].$$

Как известно, диаграмма направленности излучения рассчитывается по формуле:

$$f(\theta) = S_r r^2. \quad (5)$$

Полная излучаемая антенной мощность может быть вычислена как работа в единицу времени электрического поля над током (реакция излучения на ток):

$$W = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int \mathbf{j}^*(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (6)$$

где интегрирование выполняется по объему, занятому током. Для лучшей сходимости интеграла (6) удобно учесть конечную толщину антенного провода. Рассмотрим «размытое» распределение электрического тока в антенне:

$$\mathbf{j} = z_0 \frac{I_0}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right) \exp(ihz - i\omega t) \left[U\left(z + \frac{l}{2}\right) - U\left(z - \frac{l}{2}\right)\right], \quad (8)$$

где a - характерная толщина антенного провода.

Как известно, сопротивление излучения антенны рассчитывается как $R = 2W/I_0^2$.

Расчеты диаграммы направленности и сопротивления излучения проводились для вышеуказанных параметров, отвечающих условиям земной ионосферы [5]. Характерная толщина провода $a = 10$ см. Следует отметить, что выражения (3) становятся неприменимыми вблизи каустических направлений где меняется количество лучей, проходящих в точку наблюдения, и метод стационарной фазы требует соответствующего уточнения. Однако поскольку в пределе $r \rightarrow \infty$ угловая ширина областей нарушения геометрического приближения стремится к нулю, полученные формулы корректно описывают диаграмму направленности за исключением самих особых точек $\theta, \theta_1, \theta_2$.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием № 3.1252.2014/К.

Литература

1. Андронов А.А., Чугунов Ю.В. Квазистационарные электрические поля источников в разреженной плазме //УФН. 1975. Т. 116, вып.1. С. 79-113.
2. Pridmore-Brown D. C. Radiation from a line source carrying a traveling wave in a magnetoplasma // Radio Science. 1975. V. 10. N 12. P. 1063-1069.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. 683 с.
4. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн. Т. 1.- М.:Мир, 1978, 547 с.
5. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. – М.: Наука, 1981. 256 с.

E-mail: derendyaevdm@mail.ru

ELECTRODYNAMICS CHARACTERISTICS OF RADIATION OF TRAVELLING-WAVE ANTENNA

D. N. Derendyaev

Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod

Research of this paper is the electromagnetic field in far field region, antenna pattern and radiation resistance of travelling-wave antenna in plasma which is focused lengthways external magnetic field and working in resonance region of whistler frequency range. It is shown how the main characteristics of antenna depend from the length of antenna and the constant of distribution of current along the antenna wire.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ «ВИРТУАЛЬНЫХ» АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ И СВЯЗИ

д.т.н. Ашихмин А.В.,¹ к.т.н. Негрбов В.В.², д.т.н. Пастернак Ю.Г.³,
д.т.н. Рембовский Ю.А.¹, к.т.н. Федоров С.М.³

¹ АО «ИРКОС», Москва

² НКТБ «Феррит», Воронеж

³ Воронежский государственный технический университет

Известные публикации [1-12], посвященные методам формирования «виртуальных» антенных решеток (в литературе встречаются термины «virtual antenna array» [2, 5-11], «interpolated array» [1, 3, 4], «фантомная решетка» [12]), основаны на использовании двух основных подходов: 1) – натурном измерении (или расчете) диаграмм направленности элементов антенной решетки с учетом влияния корпуса носителя и подстилающей поверхности [2, 5-9, 11]; 2) – интерполяции поля в точках пространства, расположенных между элементами антенной решетки [1, 10, 12]. В работах [1-12] показано, что формирование «виртуальной» антенной решетки позволяет, благодаря формированию дополнительных, «виртуальных», каналов приема повысить разрешающую способность аппаратуры по угловым координатам и точность пеленгования источников радиоизлучения [1-11] и акустических волн [12].

Однако, эти подходы к формированию «виртуальных» антенных решеток имеют и недостатки. Процедуры измерения (или расчета) комплексных векторных диаграмм направленности элементов антенной решетки с учетом рассеяния волн на корпусе носителя и подстилающей поверхности весьма трудоемки, учитывая, что: коэффициент частотного перекрытия современных радиопеленгаторов часто превышает 1000; проводимость подстилающей поверхности может изменяться в десятки раз; геометрия и материальные свойства корпуса носителя могут значительно изменяться в процессе эксплуатации.

Процедуры формирования «виртуальных» антенных решеток с размерами, приблизительно в 2 раза большими, чем у «реальной» антенной системы [2], основанные на использовании статистических кумулянтов принимаемых сигналов с порядком более 2, характеризуются весьма слабой устойчивостью к погрешностям измерения параметров принимаемых сигналов и пока не нашли практического использования. Наконец, подход, основанный на использовании интерполяции поля в точках, лежащих между антенными элементами, не позволяет увеличить размеры «виртуальной» антенной решетки относительно «реальной» антенной системы, поэтому он не позволяет повысить точность пеленгования.

Известна также идея замещения рассеивателей, искажающих структуру наблюдаемого поля, рассеивателями простой формы, в частности, проводящими сферами [13], или - цилиндрами. Для ее реализации требуется знание координат расположения центров рассеивателей. Отметим также, что, несмотря на то, что авторы [13] утверждают, что при реализации разработанной ими итеративной процедуры коррекции значения измеренного пеленга не требуется знания формы рассеивателей, не всякий рассеиватель можно заменить идеально проводящими сферой или цилиндром. Очевидным является ограниченность подобного подхода в случае необходимости замещения объекта сложной формы.

Цель работы состоит в иллюстрации возможности существенного повышения точности пеленгования источников радиоизлучения на основе формирования «виртуальной» антенной решетки с размерами, до (2-3) раз большими, чем у «реальной» антенной системы, без использования какой-либо информации о геометрии и материальных свойствах близлежащих объектов – корпуса носителя антенной решетки, подстилающей поверхности. Входными данными процедуры формирования «виртуальной» антенной решетки являются комплексные амплитуды сигналов на выходах элементов «реальной» антенной системы $u_1^p, u_2^p, \dots, u_M^p$, измеренные на определенной частоте f_0 . Выходные данные – оценки значений комплексных амплитуд сигналов на выходах воображаемых антенных элементов $u_1^e, u_2^e, \dots, u_M^e$, размещенных на окружности радиуса r_e , большего, по сравнению с радиусом «реальной» антенной решетки r_p .

В качестве элементов «реальной» кольцевой антенной решетки использовались электрически короткие симметричные вибраторы, нагруженные на усилители высокой частоты. Пространственная ориентация всех вибраторов – вдоль вертикальной оси z . Полученные с их помощью оценки комплексных амплитуд E_z - компоненты поля в соответствующих точках использовались в качестве узловых значений процедуры аппроксимации скалярного поля $E_z(x, y)$ в точках расположения фазовых центров «виртуальных» антенных элементов.

Возможность формирования «виртуальной» антенной решетки путем аппроксимации поля, измеренного в множестве точек пространства, вытекает из принципа Гюйгенса-Кирхгофа, описанием которого, в векторном случае, является лемма Лоренца, а в скалярном случае – интеграл Кирхгофа [14].

В работе [15], путем перехода к конечному числу вспомогательных источников поля, расположенных на замкнутой поверхности интегрирования S_u , внутри которой расположен объект с поверхностью S_o , показано, что при отношении размеров поверхностей S_u и S_o в пределах (1.5 ... 2), удается существенно (до 50 раз) снизить порядок системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решением которой являются комплексные амплитуды вспомогательных источников поля.

При формировании «виртуальной» решетки на основе использования интеграла Кирхгофа [16], в качестве базового метода представления поля мы выбрали метод вспомогательных источников поля [15]. Учитывая, что нас интересуют значения поля в точках, лежащих в одной плоскости с фазовыми центрами симметричных электрических вибраторов «реальной» антенной решетки, в качестве базисных функций представления поля мы использовали скалярные функции Грина линейных источников:

$$G(P, Q) = -\frac{\pi \cdot i}{2} \cdot H_0^1(k_0 r_{P,Q}) \quad (1)$$

где: $H_0^1(z)$ - функция Ганкеля первого рода нулевого порядка; $i = \sqrt{-1}$; k_0 - волновое число; $r_{P,Q}$ - расстояние между точкой наблюдения P и источника Q .

Задача формирования «виртуальной» антенной решетки сводится к решению следующей СЛАУ относительно неизвестных комплексных амплитуд U_k вспомогательных линейных источников:

$$\sum_{k=1}^N U_k \cdot G(P_n, Q_k) = u_{\text{реал}}(P_n), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где: $u_{\text{реал}}(P_n) = u_n^p$ - комплексная амплитуда сигнал на выходе n -го элемента «реальной» антенной решетки с числом элементов N .

Тогда сигналы на выходах «виртуальной» антенной решетки (оценки значения E_z - компоненты поля в точках p_m) вычисляются как:

$$u_{\text{вирт}}(p_m) = u_m^e = \sum_{k=1}^N U_k \cdot G(p_m, Q_k), \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Для уменьшения влияния погрешности измерения комплексных амплитуд сигналов u_n^p на точность аппроксимации поля желательно использовать число вспомогательных источников поля $K < N$. В этом случае величины U_k находятся с помощью следующего выражения, минимизирующего невязку по критерию наименьших квадратов [17]:

$$\vec{U} = [U_1, \dots, U_K]^T = \left([G_{n,k}]^H \cdot [G_{n,k}] \right)^{-1} \cdot [G_{n,k}]^H \cdot [u_1^p, \dots, u_N^p]^T, \quad (4)$$

где: $\vec{U} = [U_1, \dots, U_K]^T$ - вектор, состоящий из комплексных амплитуд U_k вспомогательных линейных источников; $G_{n,k} = G(P_n, Q_k)$ - элементы матрицы с N строками и K столбцами; H - знак эрмитова транспонирования; $[u_1^p, \dots, u_N^p]^T$ - вектор, элементами которого являются комплексные амплитуды сигналов на выходах элементов «реальной» антенной решетки.

В работах [18, 19] проведено исследование влияния погрешностей измерения амплитуд и фаз сигналов, принимаемых «реальной» антенной решеткой, на точность аппроксимации поля на окружностях большого радиуса. В них были получены выражения для оценки погрешности аппроксимации поля и приведены соответствующие численные зависимости, которые мы не приводим в настоящей статье в силу значительного объема данных материалов. Было выяснено [18, 19], что выигрыш в точности пеленгования источников радиоизлучения, получаемый при формировании «виртуальной» антенной решетки (за счет того, что ее радиус и число сформированных пространственных отсчетов поля больше, чем у «реальной» антенной решетки), может составлять до (2 ... 3) и даже более раз, при условии того, что погрешность измерения фаз принимаемых сигналов не превышает (1 ... 3)⁰, а погрешность измерения амплитуд – не более (0.5 ... 1) дБ.

Установлено также, что при значениях диаметра «реальной» антенной решетки, меньших длины волны: $2r_p < \lambda_0$, другим способом формирования «виртуальной» антенной решетки является аналитическое продолжение поля, измеренного антенной системой, с помощью методов теории

аналитических функций комплексного переменного $z = x + iy$, в частности – интеграла Коши [20, 21] или ряда Лорана [22]. Возможность подобного подхода мы объясняем возможностью использования квазистатического описания поля в электрически малой области пространства: при величине $k_0^2 = (2\pi/\lambda_0)^2 \ll 1$ уравнение Гельмгольца может быть заменено уравнением Лапласа, решением которого, по определению, являются гармонические функции. А любая аналитическая функция комплексного переменного может быть представлена в виде суммы гармонической функции и гармонически сопряженной функции, умноженной на $\sqrt{-1}$ [17]. Следовательно, аналитические функции комплексного переменного могут быть использованы для приближенного описания поля в квазистатическом приближении.

На контуре эквидистантной кольцевой антенной решетки с радиусом r_p составляющая поля E_z - может быть описана, на основании измеренных значений поля $u_1^p, u_2^p, \dots, u_N^p$, с использованием следующего полинома [20, 21]:

$$U_{AP}(z = r_p \cdot \exp[i\varphi]) = \sum_{n=1}^N B_n \cdot \exp[i(n-1)\varphi / N], \quad (5)$$

коэффициенты B_n которого находятся с помощью метода наименьших квадратов [17].

Используя интеграл Пуассона (частный случай интеграла Коши для контура в виде окружности [17]), можно записать интегральное уравнение 1-го рода, связывающее поля на контурах «реальной» и «виртуальной» решеток:

$$U_{AP}(z = r_p \cdot \exp[i\varphi]) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{k=1}^K X_k \cdot \exp[i(k-1)\psi / K] \right\} \frac{r_e^2 - r_p^2}{r_e^2 - 2r_e r_p \cdot \cos(\psi - \varphi) + r_p^2} d\psi, \quad (6)$$

решаемое относительно неизвестных коэффициентов X_k , с помощью метода коллокаций и использования метода ограниченной порчи [17] в качестве метода регуляризации.

Другой способ аппроксимации поля, основанный на использовании аналитических функций комплексного переменного, основан на разложении функции $U_{AP}(z)$ в узком кольце шириной δ , внутри которого расположены фазовые центры элементов «реальной» антенной решетки, $r_p - \delta/2 \leq r \leq r_p + \delta/2$ (где $\delta \ll r_p$, $\delta \ll \lambda_0$) в ряд Лорана [22]:

$$U_{AP}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k z^k, \quad \text{где } c_k = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{U(\zeta) d\zeta}{\zeta^{k+1}} \quad (7)$$

Далее, с помощью (7), находим производные функции $U_{AP}(z)$ в радиальных направлениях $\partial U(\varphi, r) / \partial r$, $\partial^2 U(\varphi, r) / \partial r^2$, и т.д., и оцениваем значения функции $U_{BAP}(\varphi, r_e)$ на окружности радиуса $r_e = r_p + L$ с помощью отрезка ряда Тейлора (на значительном удалении от контура «реальной» антенной решетки: $L \gg \delta$, где аппроксимация (7) уже неприменима в силу того, что с ее помощью мы описываем поле лишь в узком кольце шириной δ):

$$U(\varphi, r_e) \approx U(\varphi, r_p) + L \cdot \partial U(\varphi, r) / \partial r + 0.5L^2 \cdot \partial^2 U(\varphi, r) / \partial r^2 + \dots \quad (8)$$

В статье [23], путем численного электродинамического анализа, проведенного с использованием метода Вейланда [24], показано, что наличие (или, наоборот - отсутствие) люка размером 680×350 мм² в крыше корпуса носителя (микроавтобуса «Газель») радиопеленгаторной антенной решетки, расположенного непосредственно под антенной системой с радиусом 500 мм, а также люка смещенного на 1.5 м в сторону кормы автомобиля, не приводит к существенному снижению эффективности коррекции пеленга с помощью метода «виртуальной» антенной решетки (в вышеупомянутых случаях достигнуто снижение среднеквадратической погрешности пеленгования в полосе частот от 25 до 150 МГц, соответственно, в 1.932, 1.709 и 1.948 раза). При этом максимальная погрешность пеленгования уменьшается до 4-х и более раз [23]. Анализируемая антенная система состояла из 9 симметричных электрических вибраторов длиной 160 мм и диаметром 20 мм, нагруженных на высокочастотные усилители со средним значением входного сопротивления около 1000 Ом.

В работах [25-27] представлен метод аппроксимации поля на плоскости антенной системы мобильного телефона, основанный на использовании метода вспомогательных источников поля, сведении векторной трехмерной задачи к эквивалентной двумерной задаче и метода квазирешения переопределенной системы уравнений. Особенностью метода является отсутствие необходимости использования какой-либо информации о геометрии и материальных свойствах рассеивателей.

Литература

1. B. Friedlander // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Albuquerque, NM, 1990.
2. Tuncer E., Friedlander B. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation, USA, New York, Academic Press, 2009.
3. M. Pesavento, A. B. Gershman, Zhi-Quan Luo // Robust array interpolation using second-order cone programming, IEEE Signal Processing Letters, vol. 9 no. 1, Jan. 2002, P. 8.
4. M. Buhren, M. Pesavento, J. F. Bohme // Proceedings IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Proces. (ICASSP), 2003.
5. Hyberg P. Antenna Array Mapping for DOA Estimation in Radio Signal Reconnaissance. PhD thesis., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2005.
6. F. Belloni, A. Richter, and V. Koivunen. Reducing Excess Variance in Beamspace Methods for Uniform Circular Array, In Proceedings of the IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP), Bordeaux, France, 2005.
7. S. Chen, B. Mulgrew, P. M. Grant. A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks // IEEE Trans., 1993, V. 4, Neural Networks, P. 570.
8. Belloni F., Richter A., Koivunen V. DOA Estimation via Manifold Separation For Arbitrary Array Structures // IEEE Trans. Signal Processing, 2007, vol. 55, № 10, P. 4800.
9. S. Chandran Advances in Direction-of-Arrival Estimation, Norwood: Artech House, 2006.
10. Antenna Array Including Virtual Antenna. P. van Rooyen, P. Roux. Patent US 7,605,755B2, 20.10.2009 (prior publication data US 2008/0303719 A1, 11.12.2008).
11. I. Salonen, P. Vainikainen. Optimal Virtual Element Patterns for Adaptive Arrays // IEEE Transactions On Antennas And Propagation, V. 54, N. 1, P. 204.
12. Глазьев В.И., Зацерковский Р.А., Смилович О.В. Метод фантомов в теории антенных решеток // Материалы акустического симпозиума «Консонанс-2003», Киев, Изд-во НАН Украины, 2003.
13. I. Ahmed, W. Perger. Direction Finding In The Presence Of Near Zone Resonant Size Scatterers // Progress In Electromagnetics Research B, 2013. V. 56, P. 219.
14. Ильинский А.С., Кравцов В.В., Свешников А.Г. Математические модели электродинамики. М.: Высшая школа, 1991.
15. Бахвалов Ю.А., Князев С.Ю., Щербаков А.А. Математическое моделирование физических полей методом точечных источников // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72, № 9. С. 1259.
16. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Использование интеграла Кирхгофа для формирования «виртуальной» антенной решетки вблизи произвольного рассеивателя // Антенны. 2009. № 8. С. 40.
17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.
18. Ашихмин А.В., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Исследование физико-математической модели, описывающей «виртуальную» антенную решетку, сформированную вблизи трехмерного рассеивателя // Антенны, 2010. № 6 (157) С. 43.
19. Рембовский Ю.А. Теория и методы проектирования сверхширокополосных антенных систем аппаратуры радиопеленгации стационарного и мобильного базирования. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 442 с.
20. Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Структура поля в области расположения кольцевой антенной решетки мобильного базирования // Антенны, 2007. № 1(116). С. 30.
21. Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Метод восстановления электромагнитного поля на плоскости вблизи трехмерного рассеивателя // Антенны, 2007. № 7(122). С. 43.
22. Ашихмин А.В., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Исследование возможности описания пространственного распределения поля вблизи антенной системы мобильного радиопеленгатора с помощью ряда Лорана // Телекоммуникации, 2009. № 11. С. 18.
23. Ашихмин А.В., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г. и др. Исследование эффективности метода «виртуальной» антенной решетки при изменении геометрии корпуса носителя мобильного радиопеленгатора // Антенны, 2010. № 1(152). С. 49.
24. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication, 1977. V. 31. PP. 116.
25. Способ формирования "виртуальных" каналов приема сигналов (Патент РФ)). Пастернак Ю.Г., Негроров В.В. Патент РФ RU 2530320, Патентообладатель: ВГТУ. Опубликовано: 10.10.2014. Бюл. № 28.
26. Аппроксимация электромагнитного поля на плоскости антенной системы портативной радиостанции. Ашихмин А.В., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г., Ситников А.В. Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. № 3. С. 98-104.
27. Формирование «виртуальной» антенной решетки с помощью непрерывного распределения вспомогательных источников. Акулинин С.А., Ашихмин А.В., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г. Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. № 3. С. 121-127.

METHODS OF "VIRTUAL" ANTENNA ARRAYS FORMATION AND THEIR APPLICATION IN DIRECTION FINDING AND COMMUNICATION

A.V. Ashikhmin¹, V.V. Negrobov², Yu.G. Pasternak³,
Yu.A. Rembovsky¹, S.M. Fedorov³

¹ SC "IRCOS", Moscow

² NCTB "Ferrit", Voronezh

³ Voronezh State Technical University

The possibility of a significant increase in accuracy of direction-finding of radio sources through development of "virtual" array with dimensions up to 2-3 times bigger than the "real" antenna system without use of any information of geometry, material properties, as well as - of characteristics of wave scattering nearby objects - body carrier array, the underlying surface. Input data of approximation procedure are signals at outputs of "real" array elements; it does not require use of any information, explicitly or implicitly, about geometry and material parameters of surrounding objects as well - their characteristics of wave scattering.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗРЕАКТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА МЕМРИСТОРАХ

к.т.н. Ракитин В.В.^{1,2}, чл.-корр. РАН Русаков С.Г.¹

¹ Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

² ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»

Введение

Мемристор – пассивный двухполюсник, сопротивление которого зависит от временного интеграла от тока в приборе [1]. Как результат, вольт-амперная характеристика (ВАХ) мемристора нелинейна и обладает гистерезисом. Благодаря свойствам мемристоры ожидается их широкое использование в различных областях микро и наносистемной техники. Так, используя инерционные свойства мемристоры, возможно построение генераторов различного типа [2]. В частности, замена резисторов мемристорами позволяет расширить функциональные возможности традиционных RC автогенераторов [3].

Благодаря особенностям мемристоры оказывается возможным конструирование безреактивных генераторов, т.е. генераторов, не содержащих реактивные элементы – индуктивности и емкости [4-5]. В этом случае заряд и разряд реактивных элементов в генераторах заменяется изменением сопротивления мемристора с помощью специальной схемы управления. Перспективы применения таких генераторов связаны, в первую очередь, с разработкой маломощных низкочастотных генераторных схем для нейроморфных систем и биомедицинской аппаратуры. Варианты безреактивных мемристорных генераторов обсуждались в работе [5]. Компаратор с двумя пороговыми уровнями использован как схема управления при переключении направлении тока в генераторных схемах.

В сравнении с этими результатами ниже обсуждается обобщенная структура безреактивных генераторов на базе мемристоры. Рассматриваются общие требования к элементу, соединяющему мемристор с источником питания. Нагрузочный двухполюсный элемент может включать источники питания и обеспечивает переключение тока. Такое обобщение позволяет получить новые схемотехнические решения для рассматриваемого класса генераторов.

Принцип действия генераторов на мемристорах

Простейшая структура генераторов на базе мемристоры приведена рис. 1а. Схема включает мемристорный прибор и двухполюсный нагрузочный элемент с вольтамперной характеристикой (ВАХ) $v(i)$. В общем случае нагрузочный элемент включает источники напряжения или тока. Далее такой тип нагрузочного элемента называется активным. Направление тока будем считать положительным, если ток вытекает из узла в прибор (см. рис. 1,а) и отрицательным, если ток вытекает из прибора.

Для описания поведения генераторов далее применяется линейно-дрейфовая модель мемристора [6]. В этом случае поведение может быть представлено "мгновенной" ВАХ для текущего сопротивления мемристора

$$u = Ri \quad (1)$$

и характеристикой управления, заданной дифференциальным уравнением

$$\frac{dR}{dt} = -\mu \left(\frac{R_{off} - R_{on}}{D^2} \right) R_{on} i = -\gamma i \quad (2)$$

Здесь R_{off} - максимальное сопротивление мемристора, R_{on} - минимальное сопротивление мемристора, μ подвижность ионов, D - толщина полупроводниковой плёнки мемристора, γ - инерционный параметр. Эти параметры имеют следующие типовые значения $R_{off}=100$ кОм, $R_{on}=1$ кОм, $\mu=10^{-14} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, $D=10$ нм [6], $\gamma=10^{10} \text{ В} \text{ А}^{-2} \text{ с}^{-1}$

С учётом соотношения (1) модельное уравнение для цепи (рис.1,а) может быть записано следующим образом:

$$v(-i) = Ri \quad (3)$$

Система уравнений (2) и (3) описывает поведение схемы во времени. Рис. 2 иллюстрирует на координатной плоскости «ток-напряжение» цикл работы генераторной схемы в соответствии с системой уравнений (2,3). Условия генерации незатухающих колебаний определяются при рассмотрении равновесных состояний системы. На рис.2 красная кривая иллюстрирует условную ВАХ $v(-i)$ нагрузочного элемента, которая определена в диапазоне изменения сопротивления резистора $[R_{off}, R_{on}]$. Эта функция не должна быть определена вне такого диапазона.

В соответствии с модельным уравнением (2) величина сопротивления R уменьшается при положительном токе: $i \geq 0$. Процесс уменьшения сопротивления R ограничен значением минимального сопротивления мемристора R_{on} . Точка пересечения нагрузочной кривой $v(-i)$ с $1/R_{on}$ прямой линией соответствует равновесному состоянию. Аналогично сопротивления R увеличивается при отрицательном токе: $i \leq 0$ до достижения максимального сопротивления мемристора R_{off} . На координатной плоскости (рис.2) равновесные состояния соответствуют точкам пересечения, а также точке $i = 0$. Эти равновесные состояния должны быть исключены из рабочего цикла генераторных схем для обеспечения незатухающих колебаний.

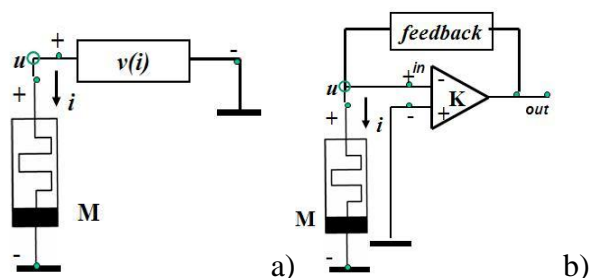


Рис. 1. (а) структура генераторов на базе мемристоров, включающая мемристорный прибор М и двухполюсный нагрузочный элемент с вольтамперной характеристикой $v(i)$, (б) пример активного нагрузочного элемента

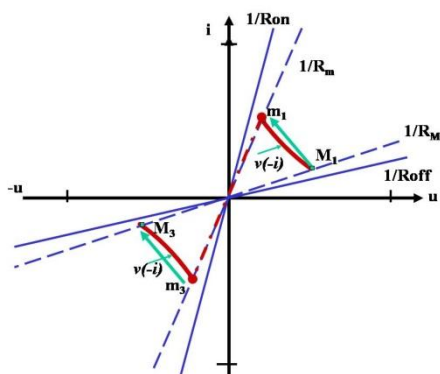


Рис. 2. Иллюстративный пример рабочего цикла генераторной схемы на базе мемристоров. Синие линии иллюстрируют вольт-амперные характеристики мемристора, красные линии - вольт-амперные характеристики $v(-i)$ нагрузочного элемента

Таким образом, диапазон изменения значения сопротивления R в ходе рабочего цикла должен быть ограничен. Для исключения равновесных состояний из траектории (рис.2) следует установить верхнюю $R_M < R_{off}$ и нижнюю $R_m \geq R_{on}$ границы такого изменения. Из необходимости выполнения приведённых ограничений следуют требования к вольт-амперным характеристикам $v(-i)$ нагрузочного элемента, которые могут быть сформулированы в форме неравенств:

$$v(-i) \geq R_m \times i \text{ при } i \geq 0 \text{ и } v(-i) \geq R_M \times i \text{ при } i \leq 0. \quad (4)$$

Эти неравенства означают, что направление тока меняется при достижении заданной границы. С учётом исключения равновесных состояний может быть сформулировано следующее утверждение: если функция $v(-i)$ удовлетворяет требованиям (4) для всех значений R в первом и третьем квадрантах (рис.2), то система (2, 3) имеет периодическое решение.

Периодический цикл работы генератора может быть проиллюстрирован траекторией на $i-v$ плоскости. Точка, отражающая состояние системы (2, 3), движется в соответствии с решением дифференциального уравнения. Пусть при уменьшении значения R состояние системы (2, 3) меняется от M_1 до m_1 (рис.2). В точке m_1 траектория имеет разрыв. В этой точке траектория скачкообразно переходит в точку m_3 . Следующий шаг включает движение по траектории от точки m_3 до точки M_3 . Точка M_3 – очередная точка разрыва траектории, переход в M_1 осуществляется скачкообразно. Цикл замкнут.

Такая траектория соответствует циклу релаксационных колебаний. Амплитуды импульсов токов и напряжений определяются расстоянием от функции $v(-i)$ (точки m_1 и M_3) до точки до начала координат на $i-v$ плоскости.

Таким образом, вольт-амперная характеристика нагрузочного элемента $v(-i)$ должна включать две точки переключения (точки m_1 и M_3 на рис. 2). Двухпороговая схема компаратора (рис.1b), представленная в [4], может быть рассмотрена как пример нагрузочного элемента с переключательной функцией $v(-i)$. В общем случае использование разных нелинейных переключательных функций для нагрузочных элементов позволяет получить различные типы периодических колебательных процессов.

Система (2, 3) может быть преобразована в одно дифференциальное уравнение для переменной R .

$$\frac{R}{\gamma} \frac{dR}{dt} + v\left(\frac{1}{\gamma} \frac{dR}{dt}\right) = 0 \quad (5)$$

Здесь $R_m < R \leq R_M$ и $v(\cdot)$ удовлетворяет условиям (4).

После исключения переменной R из системы (2, 3) следующее дифференциальное уравнение для переменной i может быть получено:

$$\frac{di}{dt} = \gamma \frac{i^3}{\frac{dv(-i)}{di} i + v(-i)} \quad (6)$$

Следующие задачи могут быть решены с помощью уравнений (5) и (6):

- анализ поведения генераторов для заданной характеристики нагрузочного элемента $v(-i)$;
- синтез характеристики нагрузочного элемента $v(-i)$ для заданных параметров генераторов.

Анализ поведения генераторов при заданных характеристиках нагрузочного элемента

Ниже показана возможность анализа поведения генераторных схем с заданными вольт-амперными характеристиками нагрузочного элемента на примере кусочно-линейной функции. Пусть кусочно-линейная функция задана в виде:

$$v(-i) = -r_1 \times i + V_1 \geq R_m i, \quad i > 0 \quad (7)$$

$$v(-i) = -r_2 \times i - V_2 \geq R_M i, \quad i < 0 \quad (8)$$

Здесь r_1 и r_2 - дифференциальные сопротивления нагрузочных функций в первом и третьем квадрантах, V_1 и V_2 - значения напряжений эквивалентных источников активных нагрузочных функций в первом и третьем квадрантах. В частности, эти источники могут представлять выходные напряжения двухпорогового компаратора.

После подстановки (7) и (8) в уравнение (5) и последующего решения (5) относительно зависимости сопротивления от времени может быть получена. Зависимость имеет следующий вид для первого квадранта при движении от точки M_1 до m_1 : $R = -r_1 + \sqrt{(r_1 + R_M)^2 - 2V_1 \gamma}$ и, соответственно, для третьего квадранта при движении от точки m_3 до M_3 : $R = -r_2 + \sqrt{(r_2 + R_m)^2 + 2V_2 \gamma}$. Из этих

соотношений могут быть также получены временные длительности перехода из состояния в состояние:

$$t'_{M1m1} = \frac{(R_M - R_m)(R_M + R_m + 2r_1)}{2V_1\gamma}; \quad t'_{m3M3} = \frac{(R_M - R_m)(R_M + R_m + 2r_2)}{2V_2\gamma}. \quad \text{Сумма этих величин}$$

определяет период релаксационных колебаний.

Синтез функции нагрузки для заданных параметров генераторов

В секции обсуждается следующая постановка задачи синтеза: определить характеристики нагрузочного элемента генератора на мемристорах, обеспечивающие заданную форму генерируемых колебаний. Ниже делается попытка обеспечить колебания с формой, близкой к гармонической. Следует отметить, что возможность генерации гармонических колебаний безреактивных генераторов на мемристорах является предметом специального интереса.

Задача заключается в синтезе вольт-амперной характеристики $v(-i)$, обеспечивающей косинусоидальную форму токовых колебаний $i(t) = I \cos(\omega t)$. В соответствии с (2) временная зависимость сопротивления имеет следующую функциональную зависимость $R(t) = R_0(1 + \alpha \sin(\omega t))$. Здесь R_0 – среднее значение сопротивления, $\alpha < 1$, ω – круговая частота колебаний. Учитывая уравнение (2), после исключения временной переменной может быть получено соотношение между током и сопротивлением R :

$$i = \pm \frac{\omega R_0}{\gamma} \sqrt{\alpha^2 - (1 - R/R_0)^2} \quad (9)$$

а также соотношение амплитуды тока и круговой частоты колебаний $I = \alpha \frac{\omega R_0}{\gamma}$. Как и раньше,

$R_m < R \leq R_M$. Отметим также, что синусоидальный характер выходного сигнала не сохраняется в точках переключения.

Следующие шаги выполняются для определения требуемых нагрузочных характеристик:

1) Для заданного решения (6) преобразуется в уравнение относительно $v(-i)$. 2) Определение характеристик $v(-i)$. В рассматриваемом случае определяется следующая функция $v(-i) = iR_0 \left(1 + \alpha \sqrt{1 - (\gamma i / \omega \alpha R_0)^2} \right)$. 3) Проверка найденной функции. Прямая подстановка (10) в уравнение

(6) показывает, что $i(t) = I \cos(\omega t)$ является решением уравнения (6). Подстановкой граничных значений сопротивления в (9) могут быть получены значения токов переключения. Подстановка даёт также нижнюю границу коэффициента α : $\alpha > \frac{R_M - R_m}{R_M + R_m}$. Амплитуда изменения сопротивления для

рассматриваемого генератора равна αR_0 . Следует отметить также, что функция выходного напряжения в рассматриваемом случае включает высшие гармоники.

Для полученного генератора был проведён цикл моделирования. Некоторые результаты моделирования генератора на базе мемристора приведены на рисунке 3. Следующие значения параметров применялись в процессе моделирования: $R_M = 1.4$ кОм, $R_m = 0.6$ кОм, $R_0 = 1.0$ кОм, $\alpha = 0.41$, $\gamma = 10^9 \text{VA}^{-2}\text{c}^{-1}$, $\omega = 10^3 \text{rad.s}^{-1}\text{V}^{-1}$.

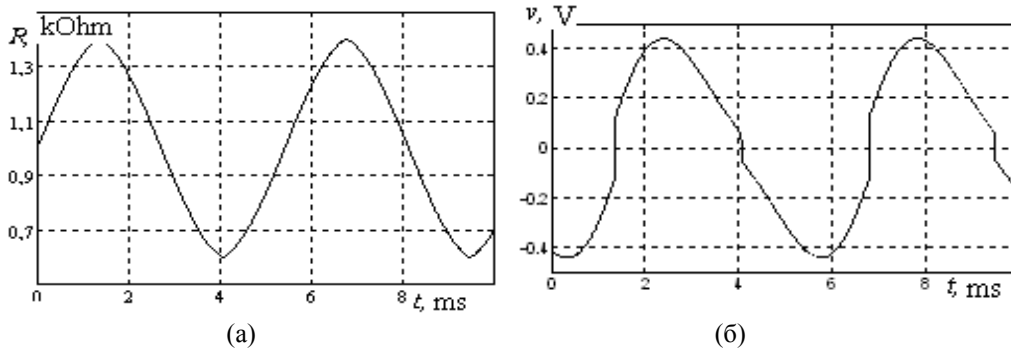


Рис. 3. Характер периодического изменения сопротивления во времени (а), вычисленное периодическое изменение напряжения на мемристоре (б)

Небольшое отклонение от гармонического сигнала для вычисленной формы выходного напряжения можно наблюдать на рис. 3,б. В рассматриваемом примере выбрано условие $\alpha > 0.4$. Зависимость тока от напряжения имеет петлю гистерезиса. Скачки тока и напряжения соответствуют фрагментам с прямой линией на гистерезисе.

Литература

1. Chua L.O. Memristor—Missing Circuit Element, IEEE Trans. Circuit Theory, 1971, V. 18, no. 9, pp. 507–519.
2. Itoh M., Chua L. O. Memristor Oscillators, Int. J. Bifurcation Chaos, 2008, V.18, no. 11, pp. 3183–3206.
3. Talukdar A., Radwan A.G., Salama K.N. Generalized Model for Memristor Based Wien Family Oscillators, Microelectronics Journal, 2011, V. 42, no. 9, pp. 1032–1038.
4. Zidan M., Omran H, Radwan A.G., Salama K.N. Memristor-Based Reactance-Less Oscillator, Electronics Letters, 2011, V. 47, no. 22, pp. 1220–1221.
5. Zidan M., Omran H, Smith Casey, Radwan A.G, Salama K.N. A Family of Memristor Based Reactance Less Oscillators, Int. J. Circuit Theory and Applications, 2014, V 42, no. 11, pp. 1103–1122.
6. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R. The Missing Memristor Found, Nature, 2008, V. 453, pp. 80–83.

THE FEATURES OF THE REACTANCE-LESS MEMRISTOR-BASED OSCILLATORS DESIGN

V.V. Rakitin^{1,2}, S.G. Rusakov¹

¹ Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS

² Research Institute for Physical Problems n. a. F. V. Lukin

The problem of memristor-based oscillators without reactances is considered. The generalized requirements to reactance-less load elements are formulated that provide the oscillation conditions for the reactance-less memristor-based oscillators. The analysis of reactance-less memristor-based oscillator with the specified characteristic of active load components is illustrated by example of piecewise characteristic. The opportunity to generate the periodic oscillations with form closing to harmonic is shown. The example of the synthesis of load voltage-current characteristics to generate such oscillations is given.

НОВЫЕ УРАВНЕНИЯ В ДРОБНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ МЕМРИСТОРА НА ОСНОВЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

д.ф.-м.н Потапов А.А.¹, д.ф.-м.н. Рехвиашвили С.Ш.²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова

1. В докладе получены новые уравнения с дробной производной, которые связывают ток и напряжение, для произвольного мемристора (четвертого базового пассивного элемента электронных схем наряду с резистором, конденсатором и катушкой индуктивности). Обсуждается смысл дробного дифференцирования применительно к мемристор. Показано, что в качестве физической основы функционирования мемристора может выступить целочисленный квантовый эффект Холла.

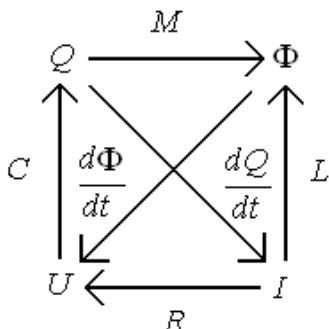


Рис. 1. Связи между четырьмя основными характеристиками электрических схем

В 1971 году Л.О. Чуа в работе [1] предложил и рассмотрел новый пассивный элемент – мемристор (memristor от англ. memory – «память» и resistor – «сопротивление»). До недавнего времени мемристор считался теоретическим элементом, который можно выполнить только с помощью достаточно громоздких электронных схем на транзисторах или операционных усилителях, что лишено практического значения. Но в последнее время эта точка зрения изменилась [2, 3], поэтому представляет интерес подробно исследовать свойства мемристора. Изложение доклада основано на ранее вышедшей статье авторов [4].

2. Рассмотрим идею о мемристоре. На рис. 1 показан квадрат, вершинам которого соответствуют основные характеристики элементов цепей – заряд Q , магнитный поток Φ , электрический ток I , электрическое напряжение U . Вершины квадрата соединяются линиями со стрелками, указывающими на связи между двумя отдельными характеристиками.

Из соображений симметрии следует, что всего должно иметься шесть таких связей [1 - 3], которые задаются уравнениями

$$Q = CU, \quad \Phi = LI, \quad U = RI, \quad \Phi = MQ, \quad (1)$$

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad U = \frac{d\Phi}{dt},$$

где C – емкость, L – индуктивность, R – сопротивление, M – мемристинность (отсутствующий в общепринятой теории параметр).

Как видно из уравнений (1), мемристинность связывает заряд с магнитным потоком и имеет размерность сопротивления. На основании (1) для мемристинности можно написать два выражения:

$$M = \frac{L}{RC}, \quad M = \frac{\Phi(0) + \int_0^t U(\tau) d\tau}{Q(0) + \int_0^t I(\tau) d\tau}. \quad (2)$$

Первое выражение в (2) имеет простой физический смысл и не нуждается в специальных комментариях. Из второго выражения в (2) можно заключить, что простейший мемристор представляет собой замкнутый контур с током, а мемристинность равна сопротивлению этого контура. В общем случае, однако, мемристинность является нелокальной функцией времени, то есть может зависеть от продолжительности сигнала. Причем сам элемент в данном случае уже не обязательно должен представлять собой простое соединение резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей. Из (2) находим уравнение, которое устанавливает связь между напряжением и током

$$U(t) = M(t) \left[I(t) + \left(Q(0) + \int_0^t I(\tau) d\tau \right) \frac{d \ln M(t)}{dt} \right]. \quad (3)$$

Мемристор может обладать свойствами, типичными для объектов синергетики (память, гистерезис вольтамперной характеристики и др.). В связи с этим, предпринимаются попытки разработать мемристор на основе аналоговых схем с применением математического аппарата дробного интегро-дифференцирования [5], который широко используется в синергетике и физике фракталов [6 - 9].

3. По нашему мнению в качестве обобщения дробные операторы по времени от электрического заряда и магнитного потока целесообразно вводить непосредственно в определение (1). Дробные операторы запишем в виде [6, 10]:

$$z(x) = D_{0x}^{m-1} \frac{dy(x)}{dx} = \partial_{0x}^m y(x), \quad 0 \leq m \leq 1, \quad (4)$$

$$D_{sx}^m y(x) = \begin{cases} \frac{\text{sign}(x-s)}{\Gamma(-m)} \int_s^x \frac{y(x') dx'}{|x-x'|^{m+1}}, & m < 0, \\ y(x), & m = 0, \\ \text{sign}^n(x-s) \frac{d^n}{dx^n} D_{sx}^{m-n} y(x), & n-1 < m \leq n, n \in \mathbb{N}, \end{cases}$$

$$\partial_{sx}^m y(x) = \text{sign}^n(x-s) D_{sx}^{m-n} \frac{d^n y(x)}{dx^n}, \quad n-1 < m \leq n, n \in \mathbb{N},$$

где $\Gamma(-m)$ – гамма-функция Эйлера, D_{sx}^m и ∂_{sx}^m – дробные интегро-дифференциальные операторы Римана-Лиувилля и Капуто порядка m .

Из соотношений (4) находим приращение функции

$$\Delta y = y(x + \Delta x) - y(x) \approx \frac{(\Delta x)^m}{\Gamma(m)} \int_0^1 \xi^{m-1} z(x + \Delta x - \xi \Delta x) d\xi.$$

Согласно теореме о среднем, можно отыскать такую точку $\theta \in [0,1]$, что последний интеграл преобразуется в виде

$$\int_0^1 \xi^{m-1} z(x + \Delta x - \xi \Delta x) d\xi = z(x + \Delta x - \theta \Delta x) \int_0^1 \xi^{m-1} d\xi = \frac{1}{m} z(x + \Delta x - \theta \Delta x) \approx \frac{z(x)}{m}.$$

Окончательно получаем

$$z(x) \approx \Gamma(1+m) \frac{\Delta y}{(\Delta x)^m}. \quad (5)$$

Отношение $\Delta y / (\Delta x)^m$ в выражении (5) определяет т.н. гельдеровскую производную, которая вводится для фрактальных функций вместо обычной производной и выражает закон нелинейных приращений. Эту производную и, следовательно, выражение (4) вполне правомерно использовать в определении (1) для учета возможной дробной динамики заряда и магнитного потока при функционировании мемристора.

Для наглядности на рис. 2 приведен график некоторой фрактальной функции, которая может определять динамику изменения заряда или магнитного потока в мемристоре. Такая функция является непрерывной, но всюду недифференцируемой.

С помощью показателя m выделяется характерный масштаб неоднородностей функции, поэтому он близок по смыслу к показателю Херста [7, 8]. Его приближенно можно оценить по следующей формуле:
 $m \approx \ln \Delta y / \ln \Delta x$.

При $m = 1/2$ имеет место классический винеровский процесс. Если $1/2 < m \leq 1$, то процесс является быстрым (или персистентным). Если $0 < m < 1/2$, то процесс считается медленным (или антиперсистентным).

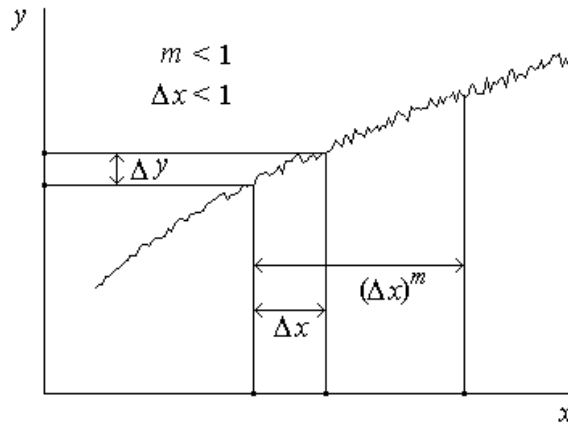


Рис. 2. График фрактальной функции

Знак приближенного равенства в (5) нужно понимать следующим образом. При $\Delta x \rightarrow 0$ выражение (5) строго не переходит в (4). Однако величину интервала времени Δx в (5) почти всегда можно подобрать так, чтобы приближенное равенство между (4) и (5) сохранилось.

Таким образом, заменяя первые производные в (1) на операторы вида (4), после ряда преобразований находим

$$U(x) = D_{0x}^\alpha \left[M(x) \left(\frac{Q(0)}{t_0} + D_{0x}^{-\beta} I(x) \right) \right] - \frac{\Phi(0)}{t_0} \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)x^\alpha}, \quad (6)$$

где α и β – характеризуют хаотичность и фрактальность во временных изменениях магнитного потока и электрического заряда, $x = t/t_0$ – безразмерное время, t_0 – некоторое характерное время.

В частном случае при $M = \text{const}$ уравнение (6) упрощается

$$U(x) = M \left(\frac{Q(0)}{t_0} \frac{1}{\Gamma(1-\beta)x^\beta} + D_{0x}^{\alpha-\beta} I(x) \right) - \frac{\Phi(0)}{t_0} \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)x^\alpha}. \quad (7)$$

Полученные уравнения (3) и (6), (7) описывают соответственно процессы с идеальной и частичной памятью. Наличие памяти означает, что напряжение на мемристоре будет зависеть от особенностей

протекания тока от начала включения и до момента времени t . При $\alpha = \beta = 1$ уравнение (6) переходит в уравнение (3), а уравнение (7) – в закон Ома. Заметим, что имеется качественная аналогия между уравнениями (6) и (7) и уравнениями, которые возникают в теории вязкоупругости и наследственной механике [6, 8].

4. Создание мемристоров с использованием тех или иных физических принципов является актуальной задачей [2, 3, 11 - 15]. В работе [3] описывается мемристор без магнитного поля, но с возможностью электрического переключения, основанный на ионной проводимости в тонких пленках диоксида титана. В статьях [11, 12] авторами предложен мемристор из проводящего полимерного материала, который в определенном смысле аналогичен синапсу в нейронах. Перспективными для создания мемристоров являются также элементы спинтроники, в которых имеет место высокоскоростной спин-поляризованный транспорт [13 - 15].

Прямое преобразование магнитного потока в электрический сигнал, как нетрудно догадаться, можно осуществлять с помощью магнетосопротивления или эффекта Холла в классических или квантовых магнитных полях. В настоящей работе в связи с реализацией мемристора нас будет интересовать целочисленный квантовый эффект Холла.

Энергетический спектр двумерного электронного газа в магнитном поле является дискретным, а каждый уровень Ландау имеет вырождение

$$N = \Phi / \Phi_0 = q\Phi / (2\pi\hbar), \quad (8)$$

где \hbar и q – постоянная Планка и заряд электрона, $\Phi_0 = 2\pi\hbar/q$ – квант магнитного потока, $\Phi = B\Omega$ – магнитный поток, пронизывающий область площадью Ω , B – магнитная индукция.

Полный заряд, который имеют электроны на уровнях Ландау, есть

$$Q = qN\nu = q\Phi\nu / (2\pi\hbar), \quad (9)$$

где ν – фактор заполнения уровней.

Отсюда сразу получаем выражение для мемристивности

$$M = \frac{2\pi\hbar}{\nu q^2}, \quad \nu = 1, 2, 3... \quad (10)$$

Таким образом, мы приходим к важному выводу, что мемристивность в квантовом магнитном поле совпадает с холловским сопротивлением.

При высокой магнитной индукции B холловская проводимость равна нулю, так как электроны сконцентрированы в капли, размер которых мал по сравнению с размером образца. По мере уменьшения B холловские капли увеличиваются в размерах и сливаются, обуславливая перколяционный ток между электродами. Когда это происходит, продольное сопротивление структуры равно нулю, а холловское сопротивление и мемристивность пропорциональны $2\pi\hbar/q^2$.

5. В режиме целочисленного эффекта для холловского сопротивления при увеличении и уменьшении магнитного поля наблюдается гигантский гистерезис [16, 17], что в изложенной выше модели связывается с эффектом памяти. Гистерезис наблюдается в центрах плато холловского сопротивления при четных и нечетных факторах заполнения и не зависит от знака магнитного поля, а также его продольной компоненты, что исключает спиновую природу явления. Гистерезис нивелируется при увеличении температуры и практически не зависит от скорости изменения магнитного поля. Данное явление, по-видимому, обусловлено изменением вихревой структуры токов и, как следствие, возникновением и разрушением перколяционного холловского кластера при целых факторах заполнения.

Таким образом, для произвольного мемристора (четвертого базового пассивного элемента электронных схем помимо резистора, конденсатора и катушки индуктивности) получены новые уравнения с дробной производной, которые связывают ток и напряжение. Выявлен физический смысл дробного дифференцирования применительно к мемристорам. Показано, что в качестве физической основы функционирования мемристора может выступить целочисленный квантовый эффект Холла.

Отметим, что в книге [18, с. 195] в подразделе «Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров. Материалы для микро- и наноэлектроники. Нано- и микросистемная техника. Твердотельная электроника», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» приведен следующий текст по нашему научному достижению: «Установлено, что в физической основе функционирования мемристора лежит целочисленный квантовый эффект Холла. Получены соотношения между током и напряжением для произвольного типа мемристора. Результаты направлены на практическую реализацию мемристоров как новых элементов электронных схем. (НИИ ПМА КБНЦ РАН, ИРЭ РАН)» – 2012 г., опубликовано в 2013 г.

Литература

1. Chua L.O. // IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971. V. CT-18. N. 5. P. 507.
2. James M. Tour, Tao He // Nature. 2008. V. 453. N. 1. P. 42.

3. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. // Nature. 2008. V. 453. N. 1. P. 80.
4. Рехвиашвили С.Ш., Потапов А.А. Мемристор и целочисленный квантовый эффект Холла // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 2. С. 207 - 210.
5. Coormans C., Petras I., Chen Y.Q. // Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. USA, California, San Diego, 2009. P. 1.
6. Нахушев А.М. Дробное исчисление и его применение. М.: Физматлит., 2003. 273 с.
7. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
8. Учайкин В.В. Метод дробных производных. Ульяновск: Издательство «Артишок», 2008. 512 с.
9. Подосенов С.А., Потапов А.А., Фоукзон Дж., Менькова Е.Р. Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии: В 3-х т. / Под ред. А.А. Потапова. М.: ЛЕНАНД, 2015. 1200 с.
10. Псху А.В. Уравнения в частных производных дробного порядка. М.: Наука, 2005.
11. Smerieri A., Berzina T., Erokhin V., Fontana M.P. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. N. 11. P. 114513.
12. Berzina T., Smerieri A., Bernabo M. et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. N. 12. P. 124515.
13. Wang X., Chen Y., Xi H., Dimitrov D.V. // IEEE Electron Device Letters. 2007. V. 30. N. 3. P. 294.
14. Krzysteczko P., Reiss G., Thomas A. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. N. 11. P. 112508.
15. Pershin Y.V., Di Ventra M. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. N. 11. P. 113309.
16. Буданцев М.В., Погосов А.Г., Плотников А.Е. и др. Гигантский гистерезис магнетосопротивления в режиме квантового эффекта Холла // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 4. С. 294 - 298.
17. Рехвиашвили С.Ш. Размерные явления в физике конденсированного состояния и нанотехнологиях. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2014. 250 с.
18. Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2012 году.- М.: Наука, 2013. 616 с.

FRACTIONAL DERIVATIVES NEW EQUATIONS FOR A MEMRISTOR BASING ON THE INTEGER QUANTUM HALL EFFECT

A.A. Potapov¹, S. Sh. Rekhviashvili²

¹V.A.Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

²Kabardino-Balkarian State University n. a. H. M. Berbekov

New equations with a fractional derivative, which relate current and voltage, are obtained for an arbitrary memristor (one of four basic passive elements of electronic circuits, along with resistor, capacitor, and inductor). The physical meaning of fractional differentiation in application to a memristor is clarified. It is shown that the integral quantum Hall effect can be the physical basis of memristor's operational principle.

ОДНОМЕРНЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ pnp-СТРУКТУРЫ

д.т.н. Евдокимов Ю.К.¹, к.т.н. Храмов Л.Д.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева

²Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

Под одномерным распределенным датчиком (ОРД) понимается датчик, множество чувствительных элементов которого электрически соединены в одномерную «цепочку» и размещены в измеряемом поле, Особенностью ОРД является то, что для электрического подключения доступны лишь концы ОРД. По результатам измерений тока и напряжения на концах ОРД восстанавливается структура измеряемого физического поля вдоль ОРД [1-4]. Несомненным достоинством ОРД перед традиционными многоканальными системами измерения физических полей является отсутствие большого числа измерительных каналов и соединительных кабелей.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) pn-перехода зависит от многих физических величин (температуры, освещенности, давления и т.д.). Это позволяет использовать pn-переход в качестве чувствительного элемента датчиков физических величин различной природы. Для определенности, дальнейшие рассуждения будем вести на примере датчика температуры. Известно, что рост температуры приводит к уменьшению прямого падения напряжения (около 2 мВ/град.) и росту обратного тока (примерно в 2 раза на 5...10 град.).

В докладе обсуждается ОРД, чувствительный элемент которого представляет собой двухполосник, состоящий из двух встречно-последовательно включенных рп-переходов (рис. 1, а). На рис. 1, б показаны ВАХ чувствительного элемента при разных температурах. Дифференциальная проводимость G_D такого двухполосника при $U_D=0$ принимает максимальное значение, определяемое измеряемой физической величиной (например, температурой).

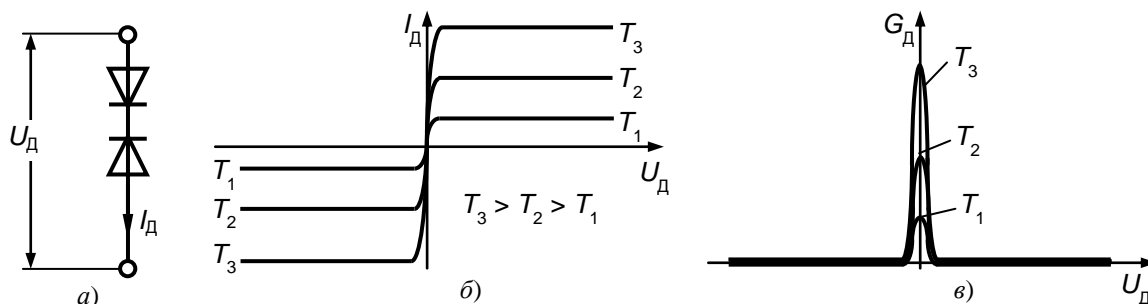


Рис. 1. Чувствительный элемент ОРД (а), его ВАХ (б) и зависимость дифференциальной проводимости от напряжения (в) при разных температурах

Рассматриваемый ОРД (рис. 2) состоит из N чувствительных элементов рпр-структуры D_n ($n=1, N$), соединенных в одномерную «цепочку» через резисторы с сопротивлением R_0 , как показано на рис. 2.

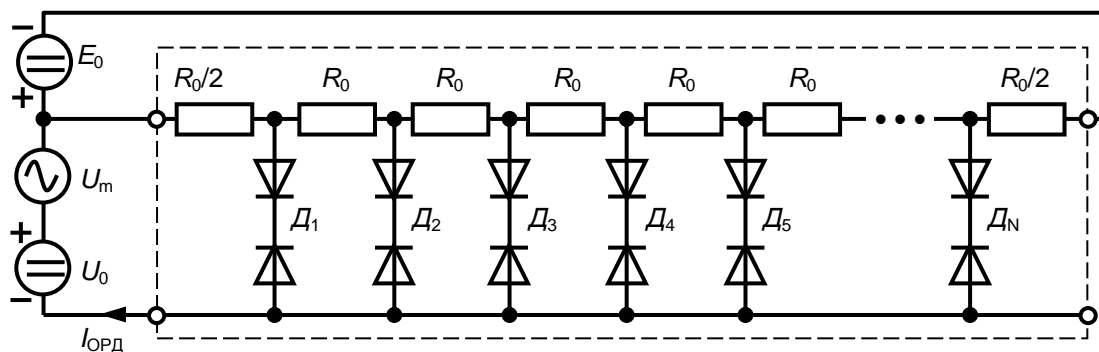


Рис. 2. ОРД на основе полупроводниковой рпр-структуры

Сопротивления R_0 выбираются малыми, чтобы под действием источника постоянного напряжения E_0 вдоль резисторов установилось распределение потенциала, близкое к линейной. Для этого необходимо выполнение условия

$$\frac{E_0}{N \cdot R_0} \gg I_{\text{ОРД max}} \text{ или } R_0 \ll \frac{E_0}{N \cdot I_{\text{ОРД max}}},$$

где $I_{\text{ОРД max}}$ – максимально возможное значение тока, равного суммарному току через все N чувствительных элементов ОРД (рис. 2). Величина напряжения E_0 не должна превышать напряжения пробоя рпр-элемента.

Синусоидальное напряжение малой амплитуды U_m предназначено для измерения дифференциальной проводимости ОРД $G_{\text{ОРД}}$, вычисляемой как

где $I_{\text{ОРД m}}$ – амплитуда переменной составляющей тока. Дифференциальная проводимость $G_{\text{ОРД}}$ является информативным выходным параметром ОРД.

Постоянное напряжение U_0 может принимать значение в интервале от 0 В до $+E_0$. Под действием напряжений E_0 и U_0 , вдоль ОРД устанавливается линейное распределение напряжения. При этом, напряжение на элементе D_n ($n=1, N$) окажется равным

$$U_{Dn} = U_0 - \frac{n-1}{N-1} \cdot E_0.$$

Элемент, находящийся под напряжением 0 В является «активным», так как имеет максимальную дифференциальную проводимость G_D (рис. 1, в) и определяет дифференциальную проводимость $G_{\text{ОРД}}$ всего ОРД, поскольку все остальные $N-1$ элементы будут заперты обратным смещением. Для активации элемента D_n с номером n , напряжение U_0 устанавливается равным

$$U_0 = \frac{n-1}{N-1} \cdot E_0.$$

Изменением напряжения U_0 в интервале от 0В до $+E_0$ и одновременным измерением дифференциальной проводимости $G_{ОРД}$, производится последовательное сканирование и измерение дифференциальных проводимостей $G_{Дн}$ всех N чувствительных элементов ОРД. Максимальное количество подключаемых датчиков N_{max} может достигать нескольких десятков или сотен и оценивается как

$$N_{max} = E_0 / \varphi_T,$$

где $\varphi_T = k \cdot T / e$ – температурная разность потенциалов pn-перехода.

Отметим, что рассмотренный ОРД может быть построен также в виде однородной полупроводниковой трехслойной пластинчатой структуры в интегральном исполнении.

Литература

1. Евдокимов Ю.К. Распределенные измерительные среды // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Казань, 1995.
2. Evdokimov Yu.K., Martemianov S. Continuously distributed sensors for steady-state temperature profile measurements: main principles and numerical algorithm // Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Т. 47. №2. С. 329-340.
3. Храмов Л.Д. Распределенные электродиффузионные датчики и методы измерения гидродинамических полей. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары, 2000.
4. Евдокимов Ю.К., Краев В.В. Одномерный распределенный датчик на полупроводниковых структурах для измерения пространственных характеристик физических полей: устройство и исследование. // Тезисы докладов Всероссийской НТК с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» («Датчик-94»). Москва-Гурзуф, 1994. Т.1, с. 94 – 95.

ONE-DIMENSIONAL DISTRIBUTED SENSOR BASED ON SEMICONDUCTOR pnp-STRUCTURE

Yu. K. Evdokimov¹, L. D. Hramov²

¹ Kazan National Research Technical University n. a. A.N. Tupolev

² Chuvashsky State University n. a. I. N. Ulyanov

The report discusses a one-dimensional distributed sensor based on semiconductor pnp-structure (pnp-ODS). The pnp-ODS contains a lot of sensitive elements placed in the measuring physical field. The number of sensitive elements can reach several hundred. Each sensitive element of the pnp-ODS consists of two anti-serially connected pn-junctions. Informative parameter of this sensitive element is the differential conductance at zero voltage. The structure of the physical field along pnp-ODS reconstructed from measurements of current and voltage at the ends of pnp-ODS. Advantage of the pnp-ODS is the absence of a large number of measuring channels and connecting cables.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

д. т. н. Львович И.Я.¹, к. ф.-м. н. Преображенский А.П.²,
д. т. н. Чопоров О.Н.², Тюрин Н.Г.², Гащенко И.А.²

¹Панъевропейский университет, Словакия

²Воронежский институт высоких технологий

При проведении анализа для различных технических современных объектов, связанного с процессами рассеяния электромагнитных волн можно убедиться, что они в весьма большом числе случаев имеют в составе сложные объекты. Для того, чтобы осуществлять процессы, направленные на анализ и синтез таких объектов необходимо привлекать модели и методы, приводящие к достаточно малым ошибкам.

Для многих случаев сложные электродинамические объекты исследуют на основе систем автоматизированного проектирования (САПР). С их привлечением появляются возможности по тому, чтобы заметным образом расширять классы объектов, для которых получают соответствующие электродинамические характеристики рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) [1-3].

Когда решают задачи дифракции радиоволн и проектируют соответствующих технические объекты, то во многих случаях анализируют структуры, на поверхностях которых размещают магнитоэлектрические материалы, которые дают поглощение электромагнитного излучения [4].

Вследствие того, что закономерности рассеяния ЭМВ в структурах с поглощающими материалами весьма сложны, приходится привлекать эвристические методы, методы искусственного интеллекта, пример таких задач рассматривается в настоящей работе.

Мы проводим рассмотрение двумерной модель рассеяния ЭМВ. Это связано с тем, что проводить решение трехмерных задач можно в ряде случаев с привлечением двумерного приближения.

Целью данной работы является исследование характеристик рассеяния ЭМВ для полых структур, имеющих магнитоэлектрические покрытия на своей поверхности на основе методов искусственного интеллекта.

Мы рассматриваем рассеяние ЭМВ на двумерной полый структуре, ее внутренние стенки покрыты магнитоэлектрическим материалом, имеющем постоянную толщину (рис.1).

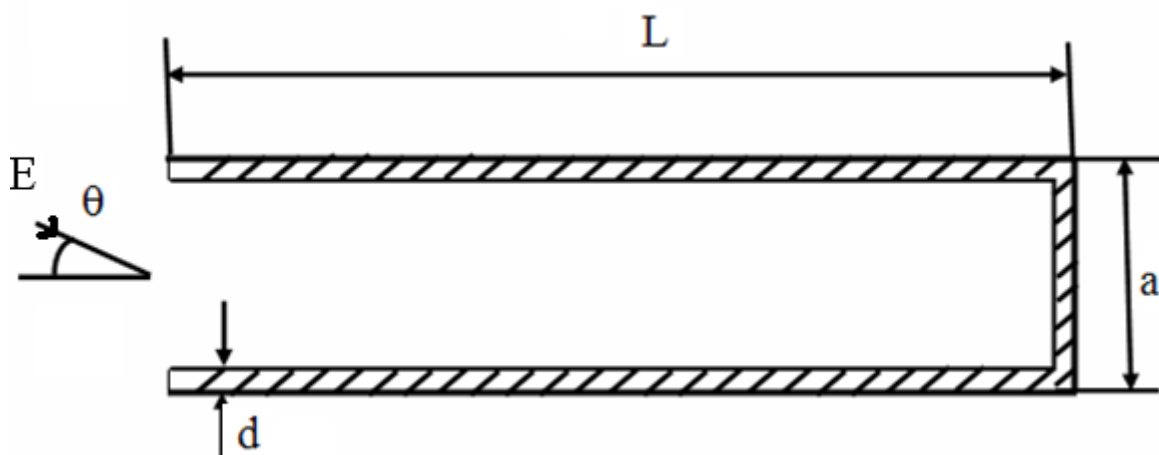


Рис. 1. Схема рассеяния ЭМВ на двумерной полый структуре, на внутренние стенки которой нанесен магнитоэлектрический материал (a , L – размеры полый структуры, d – толщина материала, θ – угол, под которым падает плоская ЭМВ)

Мы считаем, что электрическое поле (для случая E-поляризации) в произвольной точке наблюдения будет равно $E(x_0, y_0)$. Точка (x_0, y_0) размещается в сечении М магнитоэлектрического материала, и еще ее рассматривают на металлическом контуре. Вследствие того, что применяют граничные условия, происходит построение системы интегральных уравнений. Говорят об уравнениях Фредгольма 1-го рода [5].

$$\begin{aligned}
 E_0(x_0, y_0) + \int_{L_x} z_1(t) B_1(r) f(t) dt + \int_{L_w} w_1(t) B_1(r) f(t) dt &= 0, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_x \\
 \int_{L_x} z_2(t) B_2(r) f(t) dt + \int_{L_w} w_2(t) B_2(r) f(t) dt &= 0, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_x \\
 - \int_{L_w} w_1(t) B_1(r) f(t) dt + \int_{L_w} w_2(t) B_2(r) f(t) dt - \int_{L_x} z_1(t) B_1(r) f(t) dt + \\
 + \int_{L_x} z_2(t) B_2(r) f(t) dt &= E_0(x_0, y_0), \text{ для } (x_0, y_0) \in L_w \\
 - \frac{1}{2} w_1(\rho) - \frac{1}{2} w_2(\rho) + \int_{L_m} w_1(t) \frac{\partial B_1(r)}{\partial n} f(t) dt - \int_{L_m} w_2(t) \frac{\partial B_2(r)}{\partial n} f(t) dt - \\
 - \frac{i}{4} \int_{L_x} z_1(t) \frac{\partial B_1(r)}{\partial n} f(t) dt - \int_{L_x} z_2(t) \frac{\partial B_2(r)}{\partial n} f(t) dt &= \frac{E_0(x_0, y_0)}{\partial n}, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_w
 \end{aligned}$$

Перспективные радиотехнические системы

Здесь z_1, w_1 – являются плотностями потенциалов по внешним сторонам контура L_x и L_w соответственно; z_2, w_2 – показывают значения по плотностям потенциалов для внутренних сторон соответствующих контуров, $E_0(x_0, y_0)$ – обозначает падающую плоскую электромагнитную волну (рис. 1)), $V_1(r)$ – является двумерной функцией Грина, относящейся к бесконечной области, при волновом числе $k=2\pi/\lambda$, λ – равно длине волны для свободного пространства, $V_2(r)$ – является двумерной функцией Грина, которая относится к бесконечной области, соответствующей волновому числу $k=(2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon\mu}$, r – равно расстоянию между первичной точкой и точкой наблюдения, f – равно коэффициенту Ламе для контура L .

Провести расчет рассеянного электромагнитного поля можно исходя из соответствующих формул [6].

С использованием генетического алгоритма (ГА) [7] проводилась оптимизация параметров материала, который размещался на внутренних стенках полой структуры, с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon_1 + j \cdot \epsilon_2$, где $2 < \epsilon_1 < 4$, $4 < \epsilon_2 < 5$, $\mu = 1$, при этом толщины, которые лежат в диапазоне $0.3\lambda < d < 1.0\lambda$ должны обеспечить уровень нормированной эффективной площади рассеяния (ЭПР) не более, чем 11 дБ.

Как результат проведенной процедуры оптимизации были найдены такие значения диэлектрической проницаемости: при угле наблюдения $\theta = 0^\circ$ и размеров полой структуры: $a = 3.05\lambda$, $L = 3.05\lambda$: $\epsilon = 3.05 - j \cdot 4.4$.

С использованием подобных процедур можно сформировать соответствующие зависимости по значениям ЭПР для разных толщин магнитоэлектрических материалов. Их можно размещать в БД, а потом использовать в подсистеме САПР для проектирования сложных объектов, которые характеризуются заданными характеристиками рассеяния.

Когда идет расчет характеристик рассеяния, то отдельно проводят расчет для металлической поверхности и для магнитоэлектрического материала. Проводится оптимизация значений амплитуд рассеянного поля [7].

На рис. 2 дана предлагаемая схема подсистемы САПР, позволяющая проводить проектирование полых структур с необходимыми характеристиками рассеяния.

В качестве выходных результатов мы полагали значения параметров магнитоэлектрического материала при заданной толщине.

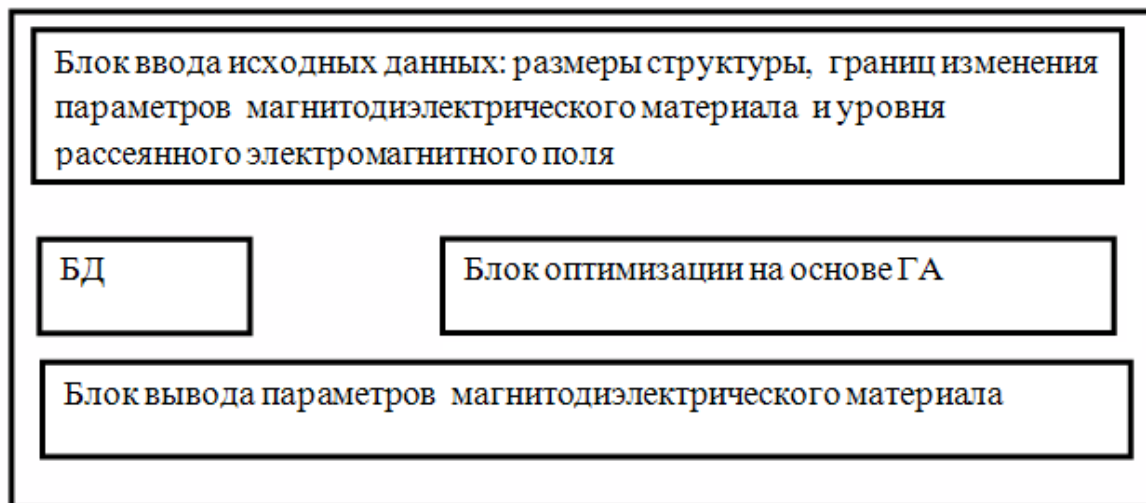


Рис. 2. Структура подсистемы САПР для оптимизации характеристик объектов

Таким образом, рассмотренный в данной работе способ и результаты анализа позволяют говорить о том, что в предлагаемой подсистеме существуют возможности для проектирования объектов, содержащих в своем составе полые структуры, для широкого диапазона параметров магнитоэлектрических материалов и размеров структур, лежащих в резонансной области.

Литература

1. Марков Г. Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г. Т. Марков, А. Ф. Чаплин. - М.: Радио и связь, 1983. - 295 с.
2. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В.Никольский - М.: Наука, 1978. - 543 с.
3. Пастернак Ю. Г. Автоматизация проектирования мобильных антенных решеток на основе моделирования и оптимизации дифракционных структур / Ю. Г.Пастернак - Диссертация : докт. техн наук., Воронеж, 2000. - 275 с.

4. Рючин А.С. О применении радиопоглощающих материалов / А.С. Рючин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 185-188.
5. Юдин В. А. Аналитическое описание корреляционного многочастотного способа оценки радиальных размеров воздушных целей / В.А.Юдин // Электронный математический и медико-биологический журнал. - 2009. -Вып. 4. – <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-24-html/yudin-2/yudin-2.htm> .
6. Захаров Е. В. Численные методы решения задач дифракции. / Е. В.Захаров, Ю.В.Пименов // М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
7. Карпенко А.П. Гибридные популяционные алгоритмы параметрической оптимизации проектных решений / А.П.Карпенко // Информационные технологии. 2013. № S12. С. 6-15.

Контакты: Преображенский Андрей Петрович, e-mail Komkovvvt@yandex.ru

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN RADAR DATA PROCESSING FOR COMPLEX OBJECTS

I.Ya.Lvovich¹, A.P. Preobrazhensky², O.N. Choporov²,
N.G. Tyurin², I.A. Gaschenko²

¹ Paneuropean University

² Voronezh Institute of High Technologies

In this paper we consider the problem of scattering of electromagnetic waves on the hollow structure that has an magnitodielectric material on its inner walls. We write the system of integral equations, which allows us to consider a density potentials, Green's function and the incident electromagnetic wave. After solving this system of equations with the method of moments we can estimate the values of radar cross section. Genetic algorithm was used for optimizing the parameters of magnitodielectric material with given constraints on scattering characteristics. The structure of proposed CAD subsystem is given.

АВТОНОМНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ РОБОТ ДЛЯ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

д. т. н. Евдокимов Ю.К., д. т. н. Гильмутдинов А.Х., к.т.н. Моклюков В.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева

Авторами предложен новый импедансный метод диагностики трубопроводов на основе представления стенки трубопровода как распределенной резистивной электропроводящей среды применительно к автономному диагностическому трубопроводному роботу. В докладе рассмотрены вопросы построения такого робота для газотранспортных магистральных трубопроводов. В первой части доклада обсуждаются особенности и недостатки диагностики дефектов в трубопроводах различными методами, которые можно применить в диагностическом роботе. Во второй части рассмотрены основные системные характеристики и особенности построения робота для магистральных газопроводов.

В настоящее время основными методами диагностики дефектов стенки трубопровода являются вихревой (электромагнитный) и ультразвуковой методы. Оба эти метода имеют высокую пространственную разрешающую способность, позволяющая обнаруживать различного рода дефекты размерами, начиная от долей миллиметра. Недостатком этих методов является продолжением их достоинств. А именно - высокой локальностью измерений. Поэтому при диагностике труб большого диаметра площадь обследуемой поверхности становится значительной, что приводит к необходимости использования в трубопроводном роботе кольцевой матрицы с большим количеством вихревых или ультразвуковых датчиков. Т.е. необходима многоканальная измерительная система, обеспечивающая скоростной параллельный съем измерительной информации с матрицы датчиков в процессе движения робота по трубопроводу.

Недостатком ультразвуковых датчиков также является необходимость плотного и непосредственного контакта рабочей поверхности датчика с поверхностью трубы без воздушных зазоров. Наличие зазоров приводит к неконтролируемому изменению акустического импеданса и невозможность проведения измерений при движении робота.

Вихревые датчики также требуют плотного контакта с поверхностью трубы, что практически невозможно осуществить при движущемся роботе. Вторичная электронная аппаратура вихревых и ультразвуковых датчиков является достаточно сложной как по объему электроники, так по сложности

обработки измерительной информации. Что приводит к значительному удорожанию стоимости аппаратуры и стоимости ее эксплуатации в реальных условиях.

Авторами предложен **импедансный метод диагностики состояния стенки трубопровода** как распределенной резистивной электропроводящей среды, позволяющий избежать перечисленных выше недостатков. Суть метода состоит в измерении частотной характеристики импеданса поверхностного слоя трубы. Ввод и съем сигнала в стенку трубы осуществляется через электроды - бесконтактно емкостным способом. Глубина зондирования при этом зависит от частоты зондирующего сигнала. Так, например, на частоте 10 кГц, глубина проникновения электрического сигнала в стальную пластину приблизительно составляет 16 мм, на частоте 1 МГц – 1,6 мм, на частоте 10 МГц – 50 мкм. Располагая, например, всего двумя кольцевыми электродами на измерительном (базовом) расстоянии l при диаметре трубопровода D , получаем диагностируемую площадь равную $S=\pi D l$ при одноканальной измерительной системе. Техничко-экономически такой подход намного эффективнее многоканальных ультразвукового или вихретокового методов.

Ниже перечислены основные системные характеристики диагностического автономного робота для газотранспортных трубопроводов:

Назначение робота – диагностика состояния внутренней поверхности и стенки магистральных газопроводов.

Способ передвижения робота – за счет избыточного давления потока газа. Регулирование скорости движения – фрикционное электромагнитное или механическое.

Центрирование робота относительно оси трубопровода – самоцентрирование на упругих направляющих салазках.

Измерение положения робота относительно вертикали (углового положения робота) – на основе МЭМС датчиков – акселерометров.

Методы диагностики состояния внутренней поверхности и стенки трубопровода – интегрированные в одну систему оптический и импедансный методы:

Оптический метод - на основе системы технического зрения (СТЗ), в состав которой входят - 6 или 8 цифровых камер; система круговой светодиодной подсветки; контроллер; флеш-накопитель; алгоритмы и программы обработки изображений внутренней поверхности трубы;

Импедансный метод - метод частотного зондирования дефектов и неоднородностей стенки трубы токами различной частоты по глубине стенки и длине трубопровода. Состав диагностической системы: кольцевые электроды или матрица плавающих электродов с круговым расположением; контроллер; флеш-накопитель; «импедансные» изображения по глубине стенки трубы; алгоритмы и программы обработки «импедансных» изображений стенки трубы.

Измерение местоположения дефекта в трубе – расстояния от начальной точки ввода робота – взаимокорреляционный – обработкой изображений внутренней поверхности трубы, а также по фланцам или местам стыка труб известной длины - как дополняющих реперных точек.

Основная цель измерений, проведенных роботом – получение оптических изображений внутренней поверхности и «импедансных» изображений по глубине стенки газопровода и локализация местоположения дефектов. Последующей диагностической процедурой является применение метода «сличения-сравнения» (дифференциального метода) оптических и «импедансных» изображений поверхности и стенки трубопровода, полученных ранее на исправном бездефектном трубопроводе, с текущими изображениями, полученными в процессе эксплуатации трубопровода. Дифференциальный метод позволяет выделять деградационные участки или места постепенного дефектного изменения поверхности.

Контакты: Евдокимов Юрий Кириллович, e-mail: evdokimov1@mail.ru

AUTONOMOUS DIAGNOSTIC ROBOT FOR GAS PIPELINE SYSTEM

Yu.K. Evdokimov, A.H. Gilmudinov, V.A. Moklyukov

Kazan National Research Technical University n. a. A.N. Tupolev

In the report the authors discuss issues of building an autonomous robot for the diagnostic gas transportation trunk pipelines. In the first part of the report discusses the features and shortcomings of diagnostics of defects in pipelines by various methods that can be applied in a diagnostic robot. The authors propose a new method of diagnosing an impedance-based presentation of the pipeline wall as the distributive resistive conductive medium. The second part contains the basic system characteristics and peculiarities of building an autonomous robot for gas mains.

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ ГРУППЫ МАЛЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЛОКАТОРОВ

Анурин А. А.¹, Беспалов Д. А.¹, Дубков А. А.¹,
д.ф.-м.н. Ермолаев В. Т.¹, Павличенко И. А.¹, Кирюшин А. А.¹,
Коротков Л. Ф.², к.ф.-м.н. Умнов А. Л.¹, д.т.н. Флакман А.Г.¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

² АО «КБ «Горизонт», Нижний Новгород

В ходе исследований тенденций развития средств радиолокационного метеорологического мониторинга [1,2] был установлен повышенный интерес к разработкам, направленным на переход от больших мощных стационарных локаторов к группам совместно работающих метеорологических локаторов, позволяющих создавать системы, нечувствительные к проблеме кривизны земной поверхности, сложностям ландшафта, а также системы, расширяющие возможности радиолокационного мониторинга на приземный слой атмосферы при снижении материальных затрат и повышении мобильности локаторов.

В рамках концепции перехода к группам малых локаторов была предложена новая архитектура метеорологической радиолокационной системы, предполагающая использование сети отдельно расположенных передающих и приемных узлов, оборудованных фазированными антенными решетками, которые позволяют выделять лоцируемый объем исследуемых объектов на пересечении диаграмм направленности (рис.1). Предполагается, что метеоролокаторы будут использовать непрерывные и квазинепрерывные лоцирующие сигналы трехсантиметрового диапазона. Организация отдельных приемных и передающих узлов в общую радиолокационную сеть производится с помощью облачной платформы Интернета вещей. Базовым кластером системы является система, состоящая из одного передающего и четырех приемных узлов, обеспечивающих обзор пространства на территории 20×20 км² на высотах от 1 до 8 км.

Схема работы группы малых метеорологических локаторов (ММРЛ)

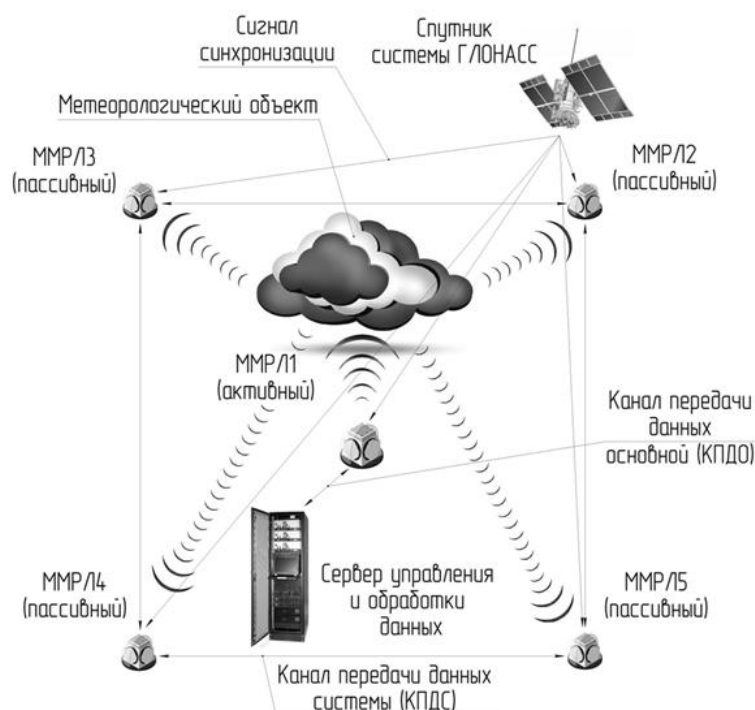


Рис. 1. Схема работы группы малых метеорологических локаторов (ММРЛ)

Использование непрерывных и квазинепрерывных сложных сигналов позволяет снизить мощность передающего устройства, что в свою очередь, снижает сложность и цену этого устройства, а также облегчает выбор системы питания.

Использование многопозиционной схемы локации позволяет решить актуальную при использовании непрерывных и квазинепрерывных сигналов проблему прямого прохода зондирующего сигнала на вход

приемника, ограничивающего мощности передатчика и, следовательно, ограничивающего дальность локации при однопозиционной схеме.

Для уменьшения цены одного узла радиолокационной системы предлагается использовать в качестве ФАР узла зеркало, образованное массивом управляемых рассеивателей [3,4]. Подобные ФАР при низкой цене, достигаемой за счет минимизации числа дорогих СВЧ элементов в их конструкции позволяют осуществлять сканирование главного лепестка диаграммы направленности в большом диапазоне углов.

Порядок функционирования метеолокатора может быть понят из показанной на рис. 2 схемы. Функционирование метеолокатора начинается с задания координат точки наблюдения в блоке «Задание координат точки пространства». Из этого блока идет команда на вычисление угловых координат передающего и приемного лучей, дистанций до точки наблюдения, задержки полезного сигнала, объема рассеивающей области, а также определяется выбор приемной антенны и параметров приемника. После определения всех параметров лоатора дается команда передатчику на генерацию зондирующего сигнала. Синусоидальный сигнал передатчика несущей частоты f_0 модулируется псевдослучайной M -последовательностью выбранной длины и поступает на передающую антенну. Между M -последовательностями необходимо предусмотреть интервалы «молчания», в течение которых происходит затухание помех от местных предметов. В эти интервалы приемник оценивает уровень внешних помех. Принятый сигнал поступает сначала на вход оптимального фильтра (когерентного накопителя), а затем некогерентного накопителя. Модулятор M -последовательности и оптимальный фильтр должны быть синхронизированы по времени с помощью сигналов GPS или ГЛОНАСС. Далее выполняется оценка мощности принятого сигнала и оценка отражаемости Z выбранной области пространства.



Рис. 2. Функциональная схема метеолокатора

Для пересчета данных локации в метеорологические величины были созданы две математические модели многопозиционной локации, основанные как на интерпретации данных отражения сигнала от выделенного объема метеорологического объекта, так и на интерпретации данных интегрированных по лучам радаров (интегральный - томографический подход). В рамках каждой модели проведены расчеты, направленные на выяснение преимуществ этих моделей и перспектив их использования.

Кроме оценки отражаемости, метеорадиолокатор дает возможность определить динамические характеристики метеобъекта. Для этого в схеме предусмотрен блок, выполняющий преобразование Фурье над последовательностью комплексных амплитуд, полученных с выхода когерентного накопителя. В результате этого преобразования можно наблюдать доплеровский спектр принятых сигналов. По величине смещения максимума доплеровского спектра определяется средняя скорость переноса метеобъекта, а расширение спектра дает представление о разбросе скоростей частиц внутри метеобъекта.

Проведено численное моделирование работы предлагаемой радиолокационной системы как единого комплекса, продемонстрировавшее работоспособность предлагаемой архитектуры радиолокационной системы. Изготовлены и испытаны отдельные элементы системы: приемника и передатчика для приемного и передающего узлов, ФАР на основе массива управляемых рассеивателей, системы управления распределенными по большим территориям узлами. Экспериментально показана

работоспособность разработанных узлов. В ближайшее время планируется интеграция всех узлов в единую радиолокационную систему и проведение испытаний данной системы.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (соглашение № 14.578.21.0033 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор: RFMEFI57814X0033).

Литература

1. Горелик А.Г. Радиолокационная метеорология и перспективы ее развития // Труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г, с. 400.
2. DJ McLaughlin, V Chandrasekar Shot-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems, Radar Conference, 2009 IEEE, 1-3
3. Мэйнваринг А., Умнов А.Л., Шуралев М.О., Ельцов А.Ю. Управляемая отражательная антенная решетка на основе нагруженных дипольных рассеивателей // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 8. С. 504 – 518.
4. Mainwaring A., Умнов А.Л., Шуралев М.О., Ельцов А.Ю. Управляемая отражательная антенная решетка, образованная нагруженными электрическими диполями // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 4. С. 68 – 75.

A SYSTEM OF METEOROLOGICAL CONTROL BASED ON THE USE OF A NETWORK OF SMALL RADARS OPERATING JOINTLY

A. A. Anurin¹, D. A. Bespalov¹, A. A. Dubkov¹,
V. T. Ermolaev¹, I. A. Pavlichenko¹, A. A. Kiryushin¹,
L. F. Korotkov², A. L. Umnov¹, A. G. Flaksman¹

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

² SC “DD Horizon”, Nizhny Novgorod

A system of meteorological radar monitoring facilities based on the use of a network of small radars jointly carrying out multistatic radiolocation process is described.

**ВОПРОСЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
В НАНО-, МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Вопросы профессионального образования в нано-, микро- и радиоэлектронике. Автоматизация проектирования в нано-, микро- и радиоэлектронике. Проблемы обеспечения качества подготовки отечественных специалистов по элементной базе по дисциплинам математического цикла.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ
НАНО- МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА (В 5-И ЧАСТЯХ).**

**ЧАСТЬ 1: НАНОУСТРОЙСТВА НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ КОГЕРЕНТНЫХ
ПОЛЯРИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ**

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Отмечаются достижения микроэлектроники и зарождение нанозлектроники. Анализируются фундаментальные проблемы естествознания: Периодическая система элементов Д.И. Менделеева и ее современная формулировка, приводятся примеры использования групп симметрии в науке, рассматриваются свойства барионов. Эти подходы используются при определении группы симметрии Периодической системы.

Введение

Развитие нанотехнологии и нанозлектроники базируется на достижениях технологий XX века. При производстве изделий микро- и нанозлектроники совокупность технологических процессов, их последовательность и повторяемость приобретают фундаментальное значение и определяют надежность функционирования изделий и систем.

Открытие в 1874 г. Брауном выпрямляющих свойств системы металл-полупроводник (PbS) явилось началом твердотельной электроники, но изобретение в конце XIX века приемника электромагнитного излучения белорусским ученым Якубом Оттоновичем Наркевичем-Иодкой (1892г.), установление радиосвязи (система передатчик – приемник) Александром Степановичем Поповым (1895г.) и усовершенствование системы передатчик – приемник Гульельмо Маркони (1896г.), создание вакуумного диода Флемингом (1904 г.) и триода Ли де Форестом (1906г.) надолго прервали развитие твердотельной электроники. Твердотельная электроника возродилась только в 50-х годах XX века после изобретения биполярного транзистора (1947г., Джон Бардин, Уолтер Браттейн, Уильям Шоккли). Необходимо отметить идею Лелиенфильда о создании полевого транзистора (1925г., реализован в 1958г.) и работы Олега Владимировича Лосева по изобретению и реализации кристадина и светодиода.

В шестидесятых годах совершенствование технологических процессов микроэлектроники привело к созданию объекта принципиально нового типа, интегральной микросхемы. Технологические методы производства микросхем включают металлургические, химические, плазменные, ионно – лучевые, оптические и механические технологии. Переход к изделиям нанозлектроники связан с радикальными изменениями в конструкциях приборов и материалах, обусловленных новыми физическими явлениями и принципами функционирования изделий нанозлектроники.

В начале XXI века открыты пятое и шестое агрегатные состояния вещества (в газе атомов щелочных металлов при низком давлении Эриком Корнеллом (Eric Allin Cornell), Карлом Виманом (Carl Wieman) и Вольфгангом Кеттерле (Wolfgang Ketterle) обнаружено состояние вещества, представляющее собой конденсат Бозе-Эйнштейна – 5- е состояние вещества; Рудольфом Гриммом (Rudolf Grimm) с сотрудниками газ из атомов калия был охлажден до температуры $3,0 \times 10^{-7} \text{K}$, что привело к образованию конденсата Ферми-Дирака – 6- е состояние вещества).

В XXI исследования в области нанотехнологий и нанозлектроники ведутся во всех развитых странах и не только. В различных источниках ежегодные расходы оцениваются величинами порядка 7–8 млрд. долларов, при этом не менее 25% этой суммы приходится на США. Исследования в области нанотехнологии ведутся и в различных научных, образовательных и производственных организациях Республики Беларусь. Ряд результаты в этих направлениях опубликованы Гурским Л.И. с сотрудниками в статьях и обобщены в двух монографиях. В монографии Л.И. Гурского и Н.А. Каланды развиты теория и технологии синтеза наноматериалов на основе оксидов различных металлов (в основном

высокотемпературных сверхпроводников) [1]. В монографии Г.В. Крыловой и Л.И. Гурского «Спиновая поляризация в сильно-коррелированных наносистемах (Обобщенные когерентные состояния спинполяризованных наногетероструктур: теория, эксперимент, квантовые приборы)» представлены результаты исследования явлений и процессов в многослойных наногетероструктурах, содержащих различные комбинации слоев с элементами структуры нанометровых размеров [2].

1. Наноустройства на квантовых эффектах когерентных поляритонных состояний

Биосенсор на экранирующем эффекте. Его функционирование обеспечивают два явления: когерентные поляритонные состояния, изменяющие магнитные свойства активной области при воздействии электрического поля, и одно из свойств углеродных нанотрубок – большая длина релаксации спина. Биосенсор формально является вариантом структур с гигантским магнетосопротивлением типа спинового вентиля, рисунок 1. Каждый из электродов сенсора имеет диэлектрическое покрытие, представляющее собой анодный нанопористый оксид оксид алюминия или гидрофобизованный оксид сплава индий-олово с нанесенной металлосодержащей ЛБ-пленкой, рисунок 2. Используя антитела к вирусу в качестве биполярного монослоя, получим многослойную гетероструктуру для регистрации реакции молекулярной идентификации типа антиген – антитело, в том числе и специфического и неспецифического взаимодействия вирусов гриппа А и В с антителами.

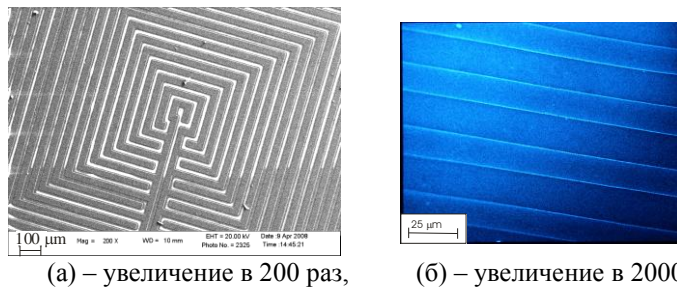
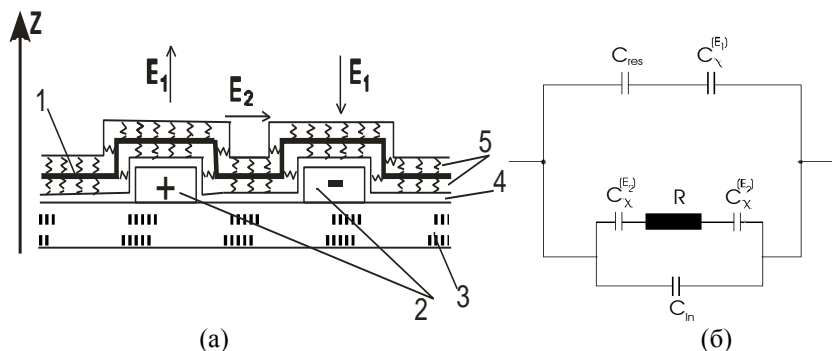


Рис. 1.– РЭМ-изображение поверхности биосенсора на основе экранирующего эффекта



1 – проводящая метало-содержащая гидрофильная часть ЛБ-плёнки (2 монослоя), 2 – электроды, 3 – подложка, на которую напылены электроды, 4 – нанопористый оксид алюминия, 5 – гидрофобная часть ЛБ-плёнки

Рис. 2. Структура биосенсора на основе экранирующего эффекта в разрезе (а) и его эквивалентная электрическая схема (б)

Полевой транзистор на спин-поляризованных состояниях электронов. Транзистор может быть реализован на многослойной гетероструктуре: слой полупроводникового материала (*S*) (исток транзистора); два слоя Ленгмюра-Блоджетт-пленки: первый ЛБ-монослой образован проводящими углеродными нанотрубками (затвор *G*, на рисунке 3 – УНТ). Слой УНТ защищает от повреждений второй ЛБ- монослой, образованный ферромагнитным металлосодержащим материалом, обладающим эффектом экранирования в сильных электромагнитных полях (на рисунке 3 – ЛБ-ФМ). Этот слой служит подводящими контактами для когерентного переноса электронов и одновременно диэлектрическим разделительным слоем между расположенной на нем системой подводящих контактов и нанопористым оксидом алюминия (Al_2O_3), сформированным на окисленной поверхности танталовой подложки. Подложка состоит из трех слоев: тантал – ФМ-электрод из проводящей ферромагнитной ЛБ-ФМ-пленки (на рисунке 3 – ФМ) – тантал. Слой тантала над слоем ФМ-электрода служит управляющим электродом *V*. ФМ-электрод является стоком (*D*). На электроды подаются: на исток (*S*) – положительное напряжение

($+V_S$), на затвор G – отрицательный потенциал, обуславливающий инжекцию электронов со спином «вверх» ($-V_G$), на электрод B и сток D – отрицательные потенциалы ($-V_B$) и ($-V_D$). Эффективно со стороны затвора G и управляющего электрода B на ферромагнитную ЛБ-плёнку действует слабое электрическое поле $\vec{E}_{LB} = \vec{E}_G - \vec{E}_B$. Величины поля \vec{E}_{LB} недостаточна для перехода ЛБ-ФМ-плёнки в

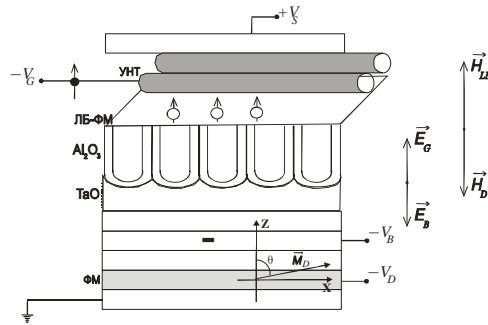
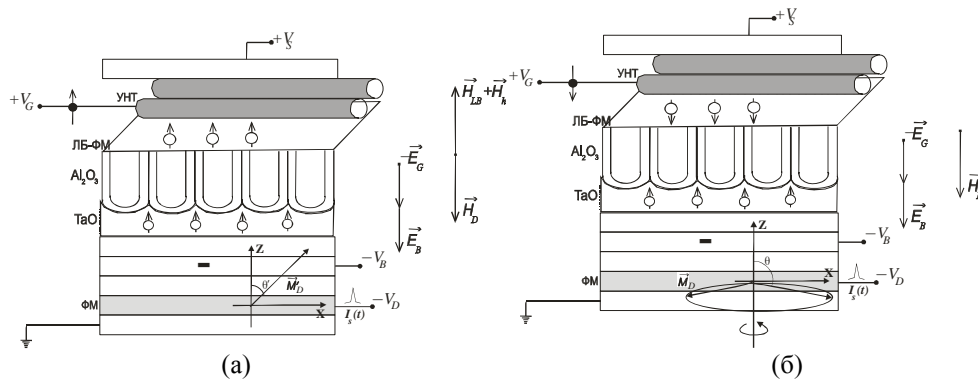


Рис. 3. Структура функционирующего на основе когерентного переноса спин-поляризованных электронов полевого транзистора



(а) затворные электроны со спином «вверх», (б) затворные электроны со спином «вниз»

Рис. 4. Схема управления ориентацией вектора намагниченности \vec{M} в полевого транзисторе на когерентных поляритонных состояниях

проводящее состояние. Спин-поляризованные состояния носителей заряда в УНТ намагничивают ЛБ-ФМ-плёнку, в которой вектор намагниченности \vec{M}_{LB} направлен вдоль оси Z (на рисунке не обозначен), а намагничивание ФМ-электрода осуществляется внешним магнитным полем \vec{H}_{ex} , приложенным вдоль оси X , вектор намагниченности обозначен как \vec{M}_D . Магнитное поле ЛБ-ФМ-плёнки \vec{H}_{LB}^z с вектором намагниченности \vec{M}_{LB} равно $\mathcal{H}_{LB}^z = 4\pi M_{LB}$ и стремится в равновесии направить вектор \vec{M}_D вдоль оси Z . Выход вектора \vec{M}_D из плоскости XY сопровождается появлением размагничивающего вдоль оси Z поля напряженности \mathcal{H}_D^z . Из условия непрерывности нормальной компоненты вектора магнитной индукции B_z ($B_z = \mathcal{H}_{LB}^z + \mathcal{H}_D^z = 0$) при взаимодействии магнитных полей ЛБ-ФМ-плёнки и ФМ-электрода находим напряженность \mathcal{H}_D^z магнитного поля. Магнитное поле \mathcal{H}_{LB}^z компенсируется полем \mathcal{H}_D^z . При положительном потенциал ($+V_G$) на затворе G и отрицательном потенциале на управляющем электроде B эффективное сильное электрическое поле $\vec{E}_{LB} = -(\vec{E}_G + \vec{E}_B)$ воздействует на ЛБ-ФМ-плёнку, которая переходит в состояние полуметаллической проводимости. Под воздействием сильного электромагнитного излучения, прошедшего через ЛБ-ФМ-плёнку и нанопористый оксид алюминия, в оксиде тантала рождаются электрон-дырочные пары (экситоны), при этом имеет место отражение ЛБ-ФМ-плёнкой части рассеянного оксидом тантала электромагнитного излучения обратно в нанопористый оксид алюминия, что приводит к многократному внутреннему отражению в его нанопорах, рисунок 4. Образование экситонов в оксиде тантала означает появление носителей электрического заряда в его зоне

проводимости и, следовательно, даёт импульс тока на стоковом электроде D . На рисунке 4 этот ток обозначен как $I_s(t)$.

Управление спиновой поляризацией электронов стока D осуществляется следующим образом. Если, как на рисунке 4 а, магнитное поле \vec{H}_n , обусловленное ориентацией спинов дырок по направлению совпадает с вектором \mathcal{H}_{LB}^z , то величина выхода вектора \vec{M}'_D из плоскости XU больше и размагничивающее вдоль оси Z поле напряженностью \mathcal{H}_D^z увеличивается до величины \mathcal{H}'_D^z . Прецессия магнитного момента \vec{M}'_D ФМ-электрода вокруг вектора \mathcal{H}_D^z изменяет спиновую поляризацию тока на электроде D . Из рисунка 4 б видно, что изменение направления спиновой поляризации носителей электрического заряда происходит при изменении \mathcal{H}_D^z до \mathcal{H}'_D^z и обратно.

Квантовый логический элемент на возбужденных экситонных состояниях. Из двух полевых транзисторов, рассмотренных выше, можно сконструировать логический элемент типа квантового сумматора (рис. 5).

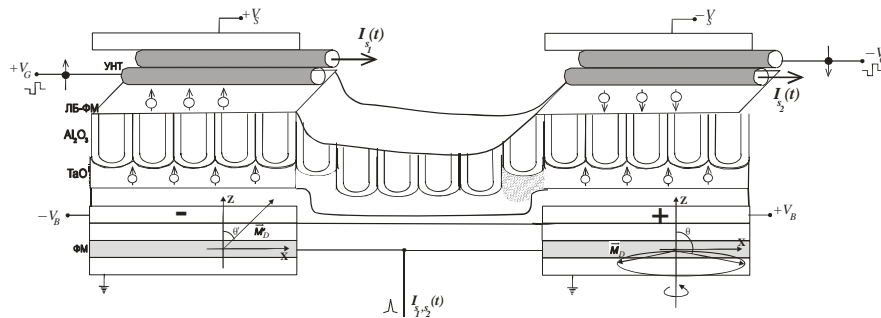


Рис. 5. Схема квантового логического устройства, действие которого основано на эффекте спин-поляризованных состояний, обусловленных возбуждением экситонных состояний в двух полевых транзисторах со структурой, приведённой на рис. 3

Последовательность и режимы формирования слоев, параметры возбуждающих электрического и магнитного полей и электромагнитного излучения, а также особенности функционирования биосенсора с экранирующим эффектом, полевого транзистора на спин-поляризованных состояниях электронов, квантового логического элемента на возбужденных экситонных состояниях и других приборов приведены в монографии [2].

Литература к ЧАСТИ 1

1. Гурский Л.И. Каланда Н.А. Технологии синтеза, фазовые превращения, структура и свойства металлооксидных материалов: Минск : Бестпринт, 2012 – С. 262.
2. Галина Крылова, Леонид Гурский Спиновая поляризация в сильно-коррелированных наносистемах (Обобщенные когерентные состояния спинполяризованных наногетероструктур: теория, эксперимент, квантовые приборы), LAP LAMBERT Academic Publishing, AV Akademikerverlag GmbH & Co., Saarbrücken, Germany, 2013, С. 334).

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF NATURAL SCIENCE ARE THEORETICAL BASIS OF PROFESSIONAL EDUCATION OF SPECIALISTS FOR NANO-, MICRO- AND RADIOELECTRONICS ON DISCIPLINES OF MATHEMATICAL CYCLE (IN 5 PARTS).

PART 1: NANODEVICES ON QUANTUM EFFECTS OF COHERENT POLARITON STATES

L. I. Gursky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The results of discovery of the periodic law by D.I.Mendeleev and the current wording of the periodic dependence of the properties of chemical elements are presented. It is noted that in mathematics, one relate to the periodic functions those which values do not change by addition of the definite but not equal to zero number to the argument. Some examples of using the symmetry groups in the science, as well as the methods of representation of atomic and electron states in quantum mechanics based on the regularities defining the

structure and properties of matter are given. The group-based method of classification of chemical elements for definition of their place in the Mendeleev's periodic system of elements is proposed. The elements are considered as the states of the quantum system, and their atoms are defined as vectors in the space where the irreducible unitary representation of the concrete symmetry group subject to determination is acting. At that, the operators of such group sequentially generate the whole set of elements and place them into corresponding multiplets (periods) of the Mendeleev's periodic system of elements. Using the $SU(3)$ symmetry group, the properties of the eight most-studied baryons having equal spin of $1/2$ and equal intrinsic parity (+) are considered. The ten-dimensional irreducible representation for baryons is built analogous to building of the eight-dimensional one. These approaches are used for defining the symmetry group of the periodic system of elements. At that, the way of symmetry violation relatively to transformations from the sub-group $O(4)$ for the first time shows the possibility to remain in the framework of the representation of the dynamical symmetry group, using the Casimir operators of the sub-groups of this group as operators violating the symmetry. The splitting of the infinite-dimensional unitary representation of the $SO(4,2)$ group to finite-dimensional multiplets defined by the quantum numbers describing electron states in atoms has been carried out. It is shown that the content of multiplets is in complete accordance with the experimentally established structure of atomic electron cells for all chemical elements.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ
НАНО- МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА (В 5-И ЧАСТЯХ).**

**ЧАСТЬ 2: ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА;
ГРУППЫ СИММЕТРИИ В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ; ОСНОВНЫЕ
ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МАТЕРИИ**

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

2. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева

В настоящее время трудно представить, какие перспективы наноэлектроники при использовании результатов фундаментальных исследований в естествознании откроются при дальнейшем развитии теории и технологии. Тем не менее, руководствуясь чрезвычайно большими успехами использования групповых подходов в математике и теоретической физике, можно предположить и перспективность их применения в различных областях нано-, микро- и радиоэлектроники. Теоретические основы групп и алгебр С. Ли заложены в 1840 – 1910 гг. работами С. Ли, В. Киллинга и Э. Картона [3]. В физике использование групп и алгебр Ли получило развитие, благодаря работам Гелл-Манна и Неймана [4 – 6].

Перспективным направлением для различных приложений, включая и электронную технику, является проблема строгой математической формулировки скрытых закономерностей, которые позволили бы ученым предложить теоретическое обоснование Периодической системы.

Д.И. Менделеевым в начале 1869 г. была предложена система классификации элементов, основанная на открытом им периодическом законе. Проблема теоретического обоснования классификации элементов привлекала внимание многих исследователей. Систематические исследования в этой области с использованием группового подхода были начаты российскими учеными Ю. Б. Румером, А. И. Фетом, Б. Г. Конопельченко в 70-х годах XX века [7–11, 18], ряд работ в этом направлении опубликованы белорусскими учеными Л.И. Гурским, Л.И. Комаровым, А.М. Солодухиным [12–15] и французским ученым Киблером с сотрудниками [16– 17].

Д.И. Менделеев формулировал свойства элементов следующим образом: «...если все элементы расположить в порядке по величине их атомного веса, то получится периодическое повторение свойств. Это выражается законом периодичности: свойства простых тел, также формы и свойства соединений элементов, находятся в периодической зависимости (или, выражаясь алгебраически, образуют периодическую функцию) от величины атомных весов элементов» [19, 20]. В этом же в 1869г. Д.И. Менделеевым была предложена система классификации элементов в виде короткой формы, в которой известные в то время элементы располагались по 9-ти группам (0, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII) и 12 рядам. На основе результатов исследований многих ученых, особенно Н. Бора [21] и А. Зоммерфельда [22], сегодня периодический закон формулируется следующим образом: «...периодическая зависимость свойств элементов определяется числом положительных зарядов ядра атома или же числом электронов в свободном атоме». Первая попытка классификации химических элементов с помощью музыкального «закона октав» (кратность 7) была предпринята в 1863–1865 гг. английским ученым Д.А.

Ньюэлэндсом. В 1870 г. опубликована работа немецкого ученого Ю.Л. Мейера, содержащая результаты, близкие к результатам Д.И. Менделеева. В 1913г. английский ученый Мозли установил следующий закон:

$$\nu = (3/4)R_0(Z - a)^2 = R_0(Z - a)^2(1/1^2 - 1/2^2),$$

где ν – частота, R_0 – постоянная Ридберга, a – константа экранирования, ($a \approx 1$ для всех элементов). Этим законом была установлена однозначная связь между значениями квадратного корня из частоты K_α – спектральных линий и номерами элементов Z в Периодической системе.

Термин «периодическая зависимость» (или по Д.И. Менделееву – «...выражаясь алгебраически, образуют периодическую функцию...») требует пояснений: значения периодических функций $f(x)$ не изменяются при добавлении к аргументу не равного нулю числа – периода функции T . При любом $x \in X \subset \mathbb{R}$ (или $X \subset \mathbb{C}$) числа $x \pm T$ также принадлежат множеству X и выполняется равенство $f(x \pm T) = f(x)$. Числа $\pm nT$, где n – натуральное число, также являются периодом функции $f(x)$. Периодическую

функцию можно представить в виде ряда Фурье: $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos \frac{2k\pi}{T}x + b_k \sin \frac{2k\pi}{T}x)$. Для тригоно-

метрических рядов коэффициенты определяются по формулам Эйлера – Фурье через $f(x)$. С этих позиций закономерности, определяющие расположение элементов в Периодической системе по периодам не являются периодическими функциями, и попытки описать свойства элементов с использованием периодических функций не имели успеха. Не удалось это сделать и с использованием, так называемых,

почти периодических функций, например, функции $\cos x + \cos x \sqrt{2x}$, для которой периоды являются несоизмеримыми, и которым можно сопоставить ряд Фурье: $f(x) \approx \sum_n e^{i\lambda_n x}$, где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – любая

последовательность действительных чисел λ_n , $\lambda_n = M\{f(x)e^{-i\lambda_n x}\}$, при этом M определяется

равенством Парьеваля: $M\{|f(x)|^2\} = \sum_{n=1}^{\infty} |\lambda_n|^2$, или теоремой единства: $M\{|f(x)e^{-i\lambda x}\} = 0$ [23].

3. Группы симметрии в теоретической физике

При решении различных задач в теоретической физике успешно применялись широко известные сегодня группы симметрии, а именно, группа вращений, группа Галилея, группа Лоренца и группа Пуанкаре. С использованием этих групп получили объяснения фундаментальные законы природы [24].

Использование группы вращений $O(n)$, где n – размерность пространства, привела к установлению закона сохранения углового момента J . Перспективными для описания свойств различных объектов являются группы вращений с $n > 3$, например, группа $O(4)$ позволяет определять состояния атома водорода [25].

С использованием группы Галилея в XVII веке сформулирован основной принцип классической механики – инвариантность законов механического движения относительно замены инерционных систем отсчёта (принцип относительности Галилея, который выполняется при скоростях $v \ll c$, c – скорость света [24]).

Обобщения на электромагнитные явления при скоростях, близких к скорости света c , являются основой специальной теории относительности. В этом случае системы отсчета связаны между собой преобразованиями Лоренца. Относительно преобразований Лоренца инвариантны все физические законы, кроме законов гравитации (принцип относительности Эйнштейна). Группа Лоренца является подгруппой группы Пуанкаре [26].

Группа Пуанкаре – это группа всех вещественных преобразований 4-векторов пространства Минковского вида $x'^\mu = \Lambda^\mu_\nu x^\nu + a^\mu$, где Λ – преобразование из группы Лоренца, a^μ – 4-вектор трансляции. Эта группа и ее компоненты позволяют описывать свойства частиц, а именно, значения массы m , спина s и знака энергии при $m^2 > 0$. Представления об однородности и изотропии пространства-времени приводят к тому, что для любой замкнутой системы действие должно быть инвариантно относительно преобразований группы Пуанкаре. Это с учетом теоремы Нётер приводит к существованию 10 фундаментальных сохраняющихся величин: энергии, 3-х компонент импульса и 6-и компонент 4-момента [27].

4. Основные закономерности, определяющие строение и свойства материи

Наименьшими структурными единицами веществ являются их атомы. Для определения состояний атома используются дискретные значения 4-х физических величин: энергии E , орбитального момента M_l , проекции M_{l_z} орбитального момента M_l на произвольное направление Z , проекции M_{s_z} спинового момента

M_s на произвольное направление Z . Электроны в атоме располагаются на уровнях, подуровнях и орбиталях [22, 28].

Луи де Бройлю принадлежит гипотеза о волновых свойствах материальных частиц [29]. Принцип неопределённости в виде: $\Delta(mv_x) \times \Delta > h/2\pi$ или $\Delta(v_x) \times \Delta > h/2\pi n$, Δ – погрешность определения, т.е. неопределенность) сформулирован В. Гейзенбергом [30]. Согласно правилу Паули два электрона в атоме не могут иметь четыре одинаковых квантовых числа [31]. На орбитали может содержаться не более двух электронов, на подуровне – не более $2(2l+1)$ электронов, на уровне – не более $2n^2$ электронов, при этом волновая функция электрона является двухкомпонентной: $\Psi = (r, t) = \begin{pmatrix} f_1(r, t) \\ f_2(r, t) \end{pmatrix}$

и называется спинором [22, 28]. В соответствии с правилом Маделунга-Клечковского электронные подуровни заполняются в порядке увеличения суммы квантовых чисел $(n+l)$. При одинаковой сумме $(n+l)$ заполнение подуровней происходит в порядке увеличения главного квантового числа n , при этом порядок заполнения имеет вид: $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p, 8s, \dots$ [32, 33]. Электронные конфигурации ряда атомов отличаются от определенных по правилу Маделунга-Клечковского. Так, по этому правилу для Си должно быть: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^8, 4s^2, 3d^6, 4p^1$, а фактически имеем: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^1$. Электронные конфигурации атомов можно записать по уровням, подуровням, орбиталям. Например, электронная формула Р ($Z=15$) может быть записана: а) по уровням, как – 2) 8) 5); б) по подуровням, как – $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$; в) по орбиталям, как – 2 2 2 2 2 2 1.

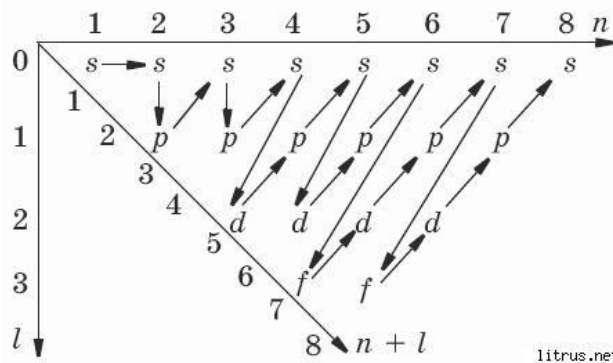


Рис. 6. Графическая форма, поясняющая правило Маделунга-Клечковского

Правило Хунда (Гунда) определяет порядок заполнения орбиталей определённого подслоя и формулируется следующим образом: суммарное значение спинового квантового числа электронов данного подслоя должно быть максимальным. Согласно правилу Хунда наименьшей энергией обладают состояния многоэлектронной системы заданной конфигурации с наибольшим возможным значением полного спина и наибольшим возможным при заданном полном спине значением полного орбитального момента [34].

Точное описание электронного строения из первых принципов с использованием уравнения Шредингера, несмотря на огромные возможности современной вычислительной техники, даже для сравнительно простых атомных систем, является практически неразрешимой задачей. При этом в тех случаях, когда численное решение уравнения Шредингера с достаточно высокой точностью может быть найдено, это решение будет являться принципиально ограниченным в приложении к анализу реальных физических систем. Это обусловлено следующими причинами: а) численные решения не позволяют исследовать свойства физических систем в широком диапазоне параметров, б) численные решения не позволяют выявлять в различных внешних условиях качественные закономерности поведения реальных физических систем. В связи с этим разработка и применение новых эффективных методов, которые делали бы возможным аналитический анализ качественных особенностей поведения атомно-молекулярных систем, являются важной и актуальной задачей, решению которой и посвящены исследования настоящей работы (ЧАСТИ 3 – 5).

Литература к ЧАСТИ 2

- Бурбаки Н. Группы и алгебры Ли. – Москва.: Мир, 1972, 1976, 1978.
- Gell-Mann M. The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry. Report No. CTSL-20, California Institute of Technology, March 15, 1961.
- Néeman Y. Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance // Nucl. Phys. – 1961. – Vol. 26, N 2. – P.222 – 229.
- Gell-Mann M. Symmetries of Barions and Mesons // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 125, N 3. – P. 1067 – 1084.

7. Румер Ю. Б., Фет А. И. Группа Spin(4) и таблица Менделеева // Теоретическая и математическая физика. –1971. – Т. 9, № 2. – С. 203 – 210.
8. Конопельченко Б. Г. Группа $SO(2,4) + R$ и таблица Менделеева / СО АН СССР. Институт ядерной физики. – Препринт. – Новосибирск, 1972.
9. Novaro O.A., Barrondo M. Approximate Symmetry of the Periodic Table // Jornal Phys., B. – 1972. – Vol. 5, N 6. – P. 1104 – 1110.
10. Фет А.И. Группа симметрии химических элементов. – В кн. Математическое моделирование в биологии и химии: новые подходы. Новосибирск. 1992. С.118 – 203.
11. Zhuvikin G.V., Hefferlin R. Symmetry principles for periodic systems of molecules. JR-PHYS-SC/SPBU 1 (Joint Report №1 of the Physics Departments Southern College, Colledgeate, USA, St. Petersburg University, St. Peter-burg, Russia). 1994.
12. Гурский Л.И., Комаров Л.И.// Доклады АН Беларуси. Вириал в статистической модели атома. 1997. Т.41 №4. с.49-52.
13. Гурский Л.И., Комаров Л.И., Солодухин А.М. // Группа симметрии периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева. Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат.наук. №2. 1998. С. 58 – 65.
14. Gurskii L.I., Komarov L.I., Solodukhin A.M. // Group of Symmetry of the Periodic System of Chemical Elements, International Journal of Quantum Chemistry. 1999. V.72. P. 499–508.
15. Гурский Л.И. // Группа динамической симметрии изовалентных водороду квантовых систем и симметричные свойства многоэлектронных атомов. Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2004. №3(29), С. 61–79.
16. M. Kibler, M. Daoud // An Alternative Basis for the Wigner-Racah Algebra of the Group SU(2). Institut de Physique Nucltaire de Lyon, LYCEN 9757, Dtcember 1997, С. 1–11/
17. Maurice Kibler, Leon G. Mardoyan, George S. Pogosyan //On a Generalized Oscillator System: Interbasis Expansions. International Journal of Quantum Chemistry. 1997. V.63, NO1. P. 133–148.
18. Фет А.И. Группа симметрии химических элементов. – Новосибирск. «Наука». 2010.
19. Меншуткин Н.А. (от имени Д.И. Менделеева). Соотношение свойств с атомным весом элементов // Журнал Русского химического общества. – 1869. – Т. 1. – С. 60 – 77.
20. Менделеев Д.И., Основы химии, т.2, 13 изд., 1947.
21. Bohr N. Atomic Theory and the Description of Nature, Cambridge University Press, 1934
22. Зоммерфельд А. Строение атомов и спектры.–Москва: Гостехиздат, 1956. – Т. 1. – 593 с; Т. 2. – 694 с.
23. Левитан Б.М. Почти периодические функции. Москва. 1953.
24. Петрашень М.И., Трифонов Е.Д. Применение теории групп в квантовой механике. Москва. 1967.
25. Фок В.А. Атом водорода и неевклидова геометрия // Изв. АН СССР. Сер. VII. Отделение математических и естественных наук. — 1935. — № 2. – С. 169-179.
26. Федоров Ф.И. Группа Лоренца. Москва.1979.
27. Эллиот Дж., Добер П. Симметрия в физике. Т. 1, Т. 2. Москва.1983.
28. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. – Москва.:Физматгиз, 1962.
29. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. – Москва.: Наука, 1985.
30. Гейзенберг В. Избранные труды. – Москва.: Эдиториал УРСС, 2001. – 616 с.
31. Паули В., Физические очерки, Сб. статей [пер. с англ.], Москва, 1975, с. 65.32. Маделунг Э. Математический аппарат физики. Москва. Гостехиздат. 1960.
33. Клечковский В.М. Распределение атомных электронов и правило последовательного заполнения (n + l)- групп. Москва.: 1968.
34. М. Борн, Атомная физика.– М.: Мир, 1967.

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF NATURAL SCIENCE ARE THEORETICAL BASIS OF PROFESSIONAL EDUCATION OF SPECIALISTS FOR NANO-, MICRO- AND RADIOELECTRONICS ON DISCIPLINES OF MATHEMATICAL CYCLE (IN 5 PARTS).

PART 2: PERIODICAL SYSTEM OF ELEMENTS OF D. I. MENDELEEV; GROUPS OF SYMMETRY IN THEORETICAL PHYSICS; BASIC REGULARITIES DETERMINING STRUCTURE AND PROPERTIES OF MATTER

L. I. Gursky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The results of discovery of the periodic law by D.I.Mendeleev and the current wording of the periodic dependence of the properties of chemical elements are presented. It is noted that in mathematics, one relate to the

periodic functions those which values do not change by addition of the definite but not equal to zero number to the argument. Some examples of using the symmetry groups in the science, as well as the methods of representation of atomic and electron states in quantum mechanics based on the regularities defining the structure and properties of matter are given. The group-based method of classification of chemical elements for definition of their place in the Mendeleev's periodic system of elements is proposed. The elements are considered as the states of the quantum system, and their atoms are defined as vectors in the space where the irreducible unitary representation of the concrete symmetry group subject to determination is acting. At that, the operators of such group sequentially generate the whole set of elements and place them into corresponding multiplets (periods) of the Mendeleev's periodic system of elements. Using the $SU(3)$ symmetry group, the properties of the eight most-studied baryons having equal spin of $1/2$ and equal intrinsic parity (+) are considered. The ten-dimensional irreducible representation for baryons is built analogous to building of the eight-dimensional one. These approaches are used for defining the symmetry group of the periodic system of elements. At that, the way of symmetry violation relatively to transformations from the sub-group $O(4)$ for the first time shows the possibility to remain in the framework of the representation of the dynamical symmetry group, using the Casimir operators of the sub-groups of this group as operators violating the symmetry. The splitting of the infinite-dimensional unitary representation of the $SO(4,2)$ group to finite-dimensional multiplets defined by the quantum numbers describing electron states in atoms has been carried out. It is shown that the content of multiplets is in complete accordance with the experimentally established structure of atomic electron cells for all chemical elements.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ
НАНО- МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА (В 5-И ЧАСТЯХ).
ЧАСТЬ 3: ГРУППА $SO(4,2)$ И СИММЕТРИЙНЫЕ СВОЙСТВА
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ**

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

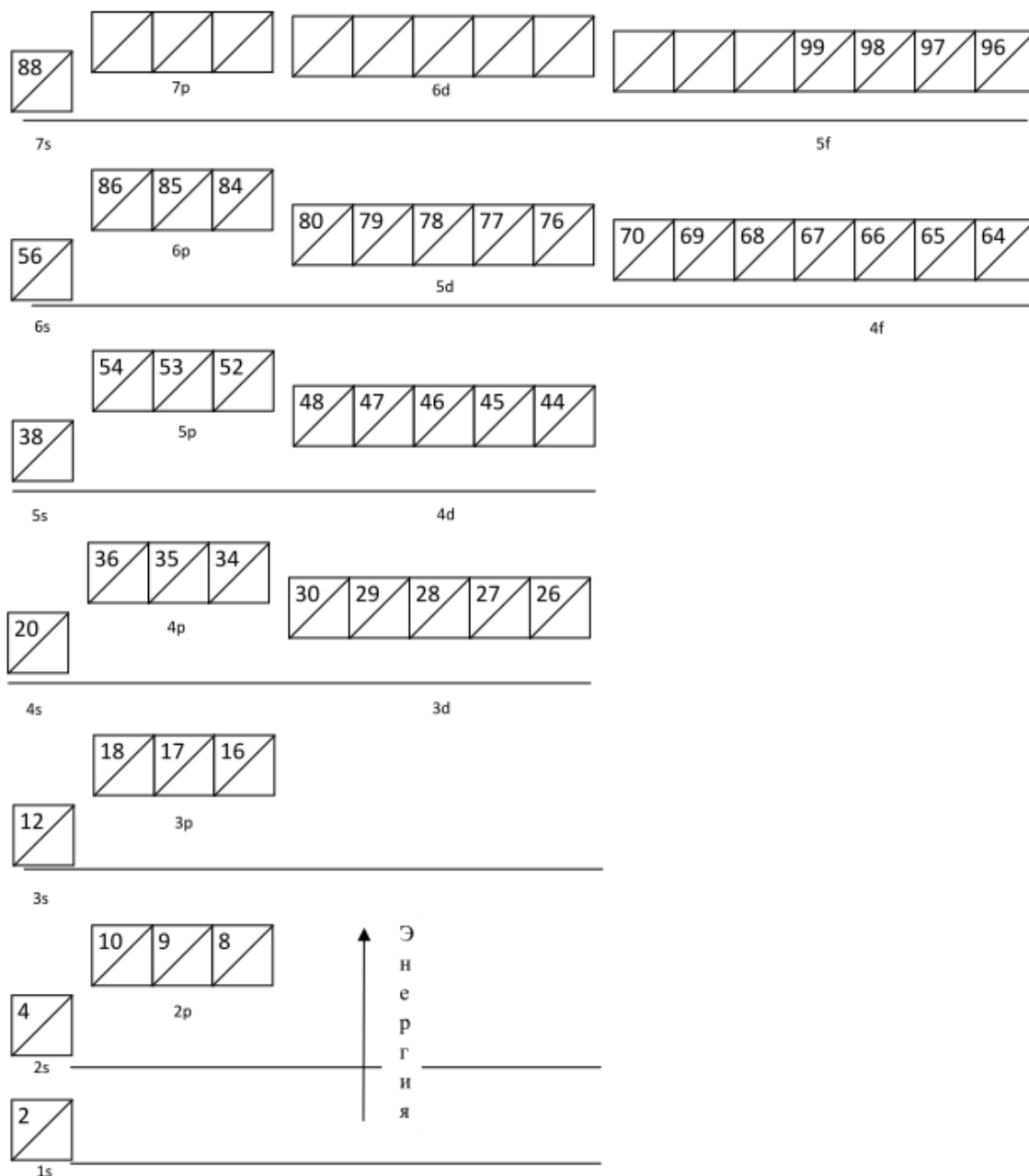
5. Группа $SO(4,2)$ и симметричные свойства Периодической системы элементов

После открытия периодического закона Д. И. Менделеевым и до настоящего времени задача по установлению закономерностей заполнения электронных оболочек атомов химических элементов является объектом исследований химиков, физиков и учёных других специальностей в её фундаментальных и прикладных аспектах. Известно, что вся совокупность явлений в атомной и молекулярной физике определяется с использованием законов квантовой механики, учитывающих особенности электромагнитных взаимодействий, а электронное строение вещества описывается с полностью определённым гамильтонианом соответствующими решениями уравнения Шредингера. Однако, несмотря на достаточно точное описание свойств атомов на основе численного решения уравнений Хартри-Фока, проблема систематизации одноэлектронных состояний остаётся открытой. В работах [13 –15, см. ЧАСТЬ 2] показано, что использование группы $SO(4,2)$ динамической симметрии изовалентной водороду квантовой системы с введением однопараметрического нарушения симметрии относительно подгруппы $O(4)$ позволяет установить порядок заполнения электронных оболочек элементов в полном соответствии с экспериментом. Эти результаты не исчерпывают всю проблему в целом, так как включают феноменологический параметр и оставляют открытым вопрос о характере атомного потенциала, соответствующего обнаруженной симметрии, но являются важным этапом в решении данной задачи.

В основу теоретического анализа фундаментальных свойств классификации химических элементов следует положить известные данные заполнения энергетических уровней электронных оболочек элементов, обобщающей результаты экспериментального изучения строения атомов, таблица 1 [22, 28, см. ЧАСТЬ 2]. Общепринятым при обсуждении строения атомов является использование представлений модели независимых частиц [35, 36]. Именно поэтому в соответствии правилу Паули [31, см. ЧАСТЬ 2] клетки на диаграмме снабжены символами, указывающими значения главного n и орбитального l квантовых чисел. Здесь $2l+1$ – число проекций орбитального момента на заданное направление, удвоение $2(2l+1)$ обусловлено числом возможных ориентаций спина электрона. При сферической симметрии самосогласованного поля энергии этих электронов будут одинаковыми, вследствие чего

$2l + 1$ клеток расположены на одном уровне. Цифры внутри клеток указывают атомный номер элемента Z и равное ему количество электронов в нейтральном атоме.

Таблица 1. Диаграмма энергетических уровней экспериментально установленных электронных оболочек элементов [34–36]

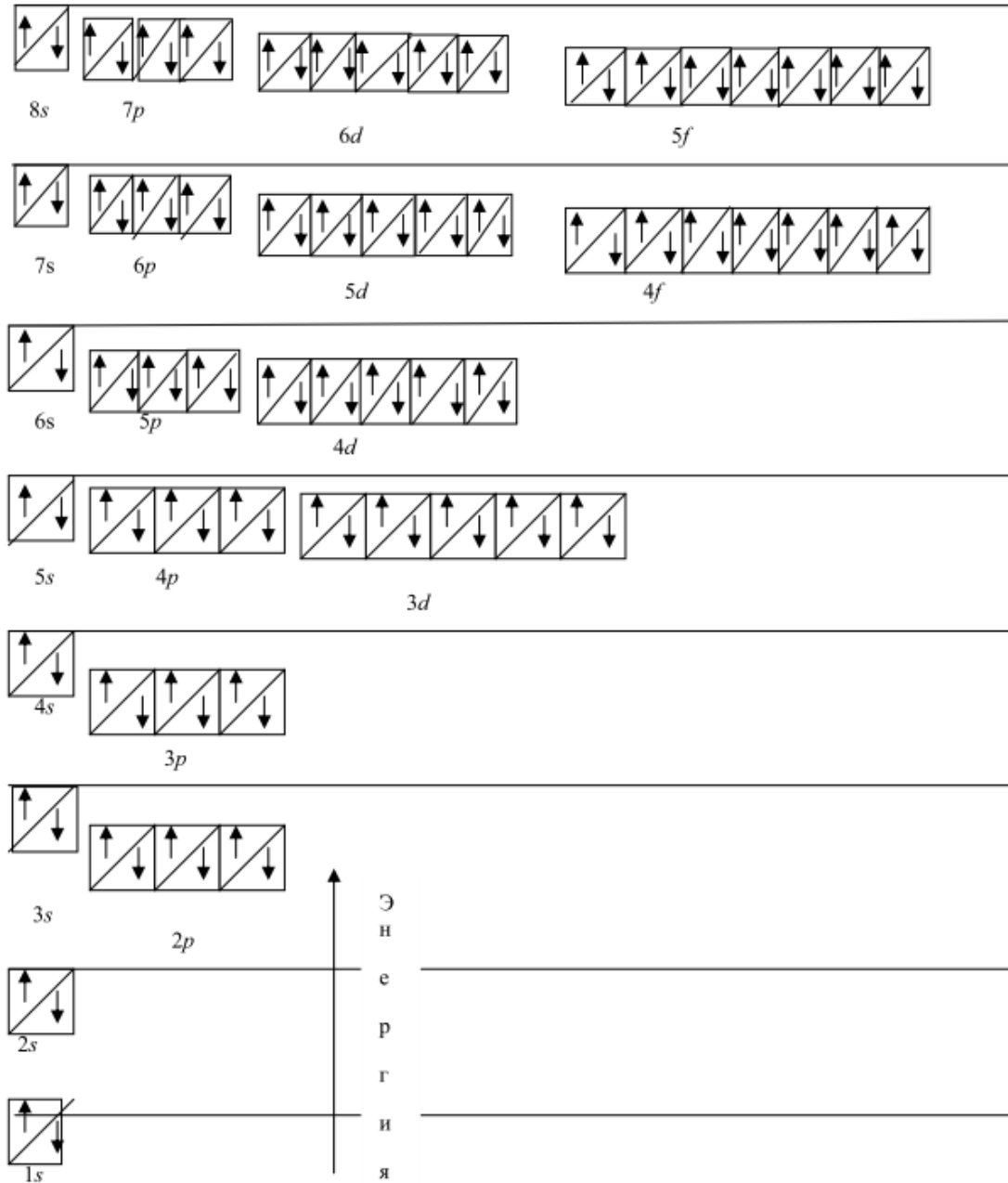


Их расположение в определенной клетке указывает на занятость электронами последнего и всех предшествующих состояний. Нижней части клетки соответствует ориентация спина «вниз \downarrow », а верхней – ориентация спина «вверх \uparrow ». Последовательность заполнения клеток при увеличении атомного номера и числа электронов определяется правилом Хунда. Электронные оболочки разделены на схеме горизонтальными линиями, а расположение на разной высоте клеток, изображающих электронные состояния, схематически отражает различие в энергиях этих состояний.

Свойства элементов обусловлены особенностями строения электронных оболочек атомов. Распределение электронов внешней оболочки определяется, прежде всего, значениями орбитального квантового числа l . Эти закономерности ясно видны на диаграмме, таблица 1, – атомы, размещенные в одном вертикальном столбце, обладают подобными химическими свойствами. Например, атомы, размещенные в одном из столбцов для элементов: $_{10}\text{Ne}$, $_{18}\text{Ar}$, $_{36}\text{Kr}$, $_{54}\text{Xe}$, $_{86}\text{Rn}$ – инертные газы; для

элементов: ${}^3\text{Li}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{19}\text{K}$, ${}^{37}\text{Rb}$, ${}^{55}\text{Cs}$, ${}^{87}\text{Fr}$ – щелочные металлы; для элементов: ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{79}\text{Au}$ – благородные металлы; и. т. д. Приведенная диаграмма в таблице 1 без детализации содержания, приводимого в клетках Периодической системы, отражает экспериментальные данные о строении электронных оболочек атомов, и дальнейший теоретический анализ, как указывалось выше, выполняется на ее основе.

Таблица 2. Лексикографическое упорядочение энергетических уровней электронных оболочек элементов по правилам Маделунга-Клечковского



Главная цель исследователей, которые пытались найти математическое обоснование схемы заполнения электронных оболочек атомов, заключается в поиске такой группы симметрии, представление которой расщеплялось бы на мультиплеты, подобные периодам Периодической системы, приведенным в горизонтальных рядах диаграммы, таблица 1. Содержание этих мультиплетов соответствует составу экспериментально определённых электронных оболочек, а порядок заполнения этих мультиплетов – порядку атомных номеров элементов. В исследованиях [7 –11, 18, см. ЧАСТЬ 2] показано, что использование классификации состояний, основанной на модели независимых частиц и восходящей к классификации состояний водородоподобной системы, не соответствует действительности. Поэтому не следует связывать введенные в этих работах квантовые числа с

общепринятыми квантовыми числами. Наборы состояний водородоподобной системы, т. е. представление группы $SO(4,2)$, и наборы состояний в электронных оболочках атомов, приведенные на диаграмме, таблица 1, – это наборы, между которыми можно установить некоторое соответствие.

Соответствие можно существенно улучшить, если произвести «реорганизацию» мультиплетов, на которые расщепляется представление группы $SO(4,2)$, исключив группу $O(4)$ из списка подгрупп этой группы. Эта «реорганизация» осуществляется с помощью правил лексикографического упорядочения Маделунга-Клечковского [32, 33]. Описанное правило при использовании «реорганизации» мультиплетов представления группы $SO(4,2)$ фактически дает определение электронной оболочки значениями суммы чисел $n+l$ и относит к мультиpletу состояний, составляющих оболочку, состояния с одинаковыми значениями суммы чисел $n+l$. Результат, полученный с использованием правил лексикографического упорядочения Маделунга-Клечковского, представлен диаграммой, таблица 2.

Сопоставление диаграмм таблицы 1 и таблицы 2 показывает, что, используя представления группы $SO(4,2)$, возможно существенно приблизить теоретическое истолкование для представлений групп классификации состояний электронов в многоэлектронном атоме к экспериментальным результатам, таблица 1. Группа $SO(4,2)$ или конформная группа (группа конформных сохраняющих углы) преобразований пространства Минковского) – это 15-параметрическая группа непрерывных ортогональных преобразований с детерминантом, равным единице, оставляющих инвариантными «квадраты расстояния» в шестимерном пространстве: $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - x_5^2 - x_6^2$. Необходимо отметить, что полного совпадения количества и состава мультиплетов, образующих электронную оболочку, с экспериментальными результатами, однако, не получилось. В Периодической системе отсутствуют два периода, содержащие по два элемента в каждом. Одна из главных причин, объясняющих особенности диаграммы, таблица 2, заключается в том, что у этих эмпирических правил, с помощью которых «деформировалось» представление группы $SO(4,2)$, нет теоретического обоснования и, более того, и не может быть. Это обусловлено тем, что главное квантовое число n является собственным значением одного из генераторов группы $SO(4,2)$, тогда как ни квантовое число l , ни сумма чисел $n+l$ не могут быть собственными значениями каких-либо эрмитовых операторов, так как число l возникает только при определении собственных значений оператора квадрата орбитального момента, которые, как известно, равны $l(l+1)$. Таким образом, на основании изложенного нельзя однозначно сделать вывод о невозможности осуществить необходимую для приведения к эмпирически наблюдаемому составу электронных оболочек «реорганизацию» представлений группы $SO(4,2)$ и определить «правильный» порядок заполнения электронных оболочек. Можно предположить, что динамическое правило определения состава электронных оболочек многоэлектронных атомов позволит выполнить необходимую для приведения к эмпирически наблюдаемому составу электронных оболочек «реорганизацию» представлений группы $SO(4,2)$ и определить «правильный» порядок заполнения электронных оболочек атомов элементов. Эти вопросы детально рассматриваются в ЧАСТИ 4 настоящей статьи.

Литература к ЧАСТИ 3

35. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика. Нерелятивистская теория, 4 изд., Москва.: 1989.
36. Полинг Л., Полинг П. Химия. Москва.: Мир, 1978.

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF NATURAL SCIENCE ARE THEORETICAL BASIS OF PROFESSIONAL EDUCATION OF SPECIALISTS FOR NANO-, MICRO- AND RADIOELECTRONICS ON DISCIPLINES OF MATHEMATICAL CYCLE (IN 5 PARTS).

PART 3: GROUP $SO(4,2)$ AND SYMMETRICAL PROPERTIES OF PERIODICAL SYSTEM OF ELEMENTS

L. I. Gursky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The results of discovery of the periodic law by D.I.Mendeleev and the current wording of the periodic dependence of the properties of chemical elements are presented. It is noted that in mathematics, one relate to the periodic functions those which values do not change by addition of the definite but not equal to zero number to the argument. Some examples of using the symmetry groups in the science, as well as the methods of representation of atomic and electron states in quantum mechanics based on the regularities defining the structure and properties of matter are given. The group-based method of classification of chemical elements for definition of their place in the Mendeleev's periodic system of elements is proposed. The elements are considered as the states of the quantum system, and their atoms are defined as vectors in the space where the

irreducible unitary representation of the concrete symmetry group subject to determination is acting. At that, the operators of such group sequentially generate the whole set of elements and place them into corresponding multiplets (periods) of the Mendeleev's periodic system of elements. Using the $SU(3)$ symmetry group, the properties of the eight most-studied baryons having equal spin of $1/2$ and equal intrinsic parity (+) are considered. The ten-dimensional irreducible representation for baryons is built analogous to building of the eight-dimensional one. These approaches are used for defining the symmetry group of the periodic system of elements. At that, the way of symmetry violation relatively to transformations from the sub-group $O(4)$ for the first time shows the possibility to remain in the framework of the representation of the dynamical symmetry group, using the Casimir operators of the sub-groups of this group as operators violating the symmetry. The splitting of the infinite-dimensional unitary representation of the $SO(4,2)$ group to finite-dimensional multiplets defined by the quantum numbers describing electron states in atoms has been carried out. It is shown that the content of multiplets is in complete accordance with the experimentally established structure of atomic electron cells for all chemical elements.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ
НАНО- МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА (В 5-И ЧАСТЯХ).
ЧАСТЬ 4: ГРУППЫ СИММЕТРИИ В КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ; ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРАВИЛО ДЛЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОННЫХ
ОБОЛОЧЕК МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ АТОМОВ**

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

6. Группы симметрии в классификации элементарных частиц

Основы групповой классификации элементарных частиц заложены в работах Гелл-Мана [37] Неймана [38], в которых в гамильтониан вводятся члены, частично нарушающие исходную симметрию. Детальный анализ таких подходов содержится в работе [18, см. ЧАСТЬ 2]. Элементарные частицы определяются значениями их массы покоя, спина, зарядов – барионного, электрического, лептонного, изотопического спина и его проекции, странности и основной схемы распада [39]. Понятие спина является одним из важных параметров, спин электрона не имеет классического аналога, для описания спина Паули предложил в 1926 г. изображать состояния электрона двухкомпонентными волновыми

функциями: $\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1(x, y, z) \\ \Psi_2(x, y, z) \end{bmatrix}$ [31, см. ЧАСТЬ 2,]. Двухкомпонентные волновыми функции Ψ ,

которые описывают в нерелятивистской теории состояния электрона с учетом спина, образуют гильбертово пространство, т.е. векторное пространство с положительно определенным скалярным произведением ($\langle \Psi | \varphi \rangle > 0$).

По массе различают легкие частицы – лептоны (электроны, мюоны, различные типы нейтрино и их античастицы) и тяжелые частицы – адроны (мезоны, имеющие целый спин и барионы, имеющие полуцелый спин); фотон в классификацию не включается. Элементарные частицы имеют не одинаковые массы и отличаются характером взаимодействий между собой и с другими частицами. В зависимости от особенностей взаимодействующих частиц различают три вида взаимодействий: сильное, электромагнитное и слабое.

Сильное взаимодействие элементарных частиц, рассмотренное на примере октета барионов, является первым семейством элементарных частиц, описанным с помощью группы симметрии $SU(3)$. При разработке теории унитарной симметрии первоначально рассматривались свойства восьми наиболее изученных барионов с одинаковым спином $1/2$ и одинаковой внутренней четностью (+). Перечислим эти восемь барионов: две Ξ (кси) - частицы: Ξ^- – кси-минус-гиперон и Ξ^0 – кси-нейтральный-гиперон с близкими значениями масс, составляющие изотопический дублет; три Σ (сигма) - частицы: Σ^- – сигма-минус-гиперон, Σ^0 – сигма-нейтральный-гиперон и Σ^+ – сигма-плюс-гиперон, составляющие изотопический триплет (индексы сверху для Ξ - и Σ -частиц указывают заряд в единицах заряда электрона $(-1,602176565(35) \cdot 10^{-19} \text{ Кл})$); Λ^0 (лямбда)-частица с нулевым зарядом и отличающаяся по массе от всех частиц, Λ^0 -частицу связывают с одномерным представлением группы $SU(2)$ и называют

изотопическим синглетом; протон P и нейтрон N с очень близки ми массами, которые составляют изотопический дублет.

Согласно схеме приведенной классификации частиц восемь барионов описывались как состояния с определенным значением массы некоторой квантовой системы («октета»), пространство состояний которой должно было быть пространством восьмимерного неприводимого представления группы $SU(3)$. Использование группы $SU(3)$ позволило установить, что: а) для октета барионов существует связь с восьмимерным неприводимым представлением группы $SU(3)$, б) операторы T_3, Q, Y представляют собой операторы изоспина, заряда и гиперонного заряда (гиперзаряда, обозначаемого буквой Y), $Y = B + S + 2\bar{z}$, здесь B – барионный заряд, S – странность, $2\bar{z}$ – средний электрический заряд зарядового мультиплетта частиц. Использование алгебры Ли с определенными перестановочными соотношениями позволяет определить представление группы $SU(3)$ в пространстве C^8 , которое оказывается неприводимым. При определенном выборе ортонормированного базиса в пространстве C^8 все базисные векторы будут одновременно собственными векторами перестановочных операторов A_1^1 и A_3^3 , а вместе с тем и $T_3 = A_1^1 + 1/2(A_3^3)$. Соответствующие собственные значения, при определенной нумерации базиса, приведены в табл. 3 (таблица 2, глава 4 в работе [18, см. ЧАСТЬ 2]).

$$C^{10} = C^1 \oplus C^2 \oplus C^3 \oplus C^4$$

Смысл квантового числа $\bar{\lambda}_3^3$ заключается в том, что наблюдаемая $(-A_3^3)$ – это $2\bar{z}$ – средний электрический заряд зарядового мультиплетта частиц. Наблюдаемая величина $(-A_3^3)$ как и изоспин является «коллективной» характеристикой частицы и для всех частиц имеет целочисленные значения.

Таблица 3. Свойства 8 барионов (две Ξ -частицы, три Σ - частицы, Λ -частица, N -нейтрон, P - протон) [18, см. ЧАСТЬ 2]

№ частицы	Обозначение частицы	Масса частицы	Перестановочный оператор A_1^1	Перестановочный оператор A_3^3	$T_3 = A_1^1 + 1/2(A_3^3)$
1	Ξ	1320,8	-1	1	1/2
2	Ξ^0	1314,3	0	1	1/2
3	Σ^-	1197,1	-1	0	1
4	Σ^0	1192,4	0	0	1
5	Σ^+	1189,4	0	0	1
6	Λ	1115,4	0	0	0
7	N	939,5	-1	-1	1/2
8	P	938,3	-1	-1	1/2

Эти результаты использовались и для декуплета барионов. Десятимерное неприводимое представление группы $SU(3)$ строится аналогично построению восьмимерного представления. При редукции представления по подгруппе $SU(2)$ получается разложение в пространстве C^{10} , содержащее следующие неприводимые подпространства $SU(2)$: а) одно одномерное C^1 , б) одно двумерное C^2 , в) одно трехмерное C^3 и г) одно четырехмерное C^4 : в качестве базисных векторов выбираются общие собственные векторы e_k операторов A_1^1 и A_3^3 , которые задаются следующим образом: e_1 порождает подпространство C^1 ; e^2 и e^3 – подпространство C^2 ; e^4, e^5 и e^6 – подпространство C^3 ; e^7, e^8, e^9 и e^{10} – подпространство C^4 . Соответствующие собственные значения A_1^1, A_3^3 и операторов изоспина T_3 и T^2 (вместо $T(T+1)$ приводится T) представлены в таблице 4 (таблица 4, глава 4, в работе [18, см. ЧАСТЬ 2]).

Физический смысл десятимерного представления получается при сопоставлении с известными частицами. В таблице 4 под № 1 представлена гипотетическая частица, параметры которой не соответствовали ни одной из экспериментально обнаруженных девяти частиц (по данным 1961г.). В этой связи необходимо особо отметить то, что девять барионов не могут описываться неприводимым представлением группы $SU(3)$, поскольку эта группа не имеет девятимерного неприводимого представления. Описание изотопических мультиплеттов и зарядов свидетельствовало, что эти частицы связаны с десятимерным представлением. Это позволило предсказать десятую, экспериментально не установленную частицу. Частица под №1 в таблице 2 должна быть синглетом, т.е. не иметь «изотопически родственных» частиц, и ее заряд должен быть равен - 1. Параметры известных частиц (№№ 2 – 10), представленных в таблице 4, позволили определить свойства и гипотетической частицы.

В 1964 г. была предложена более широкая группа симметрии $SU(6)$, содержащая $SU(3)$ в качестве подгруппы. В этом же году гипотетическая частица, представленная в таблице 4 под № 1, была экспериментально обнаружена и имела все предсказанные свойства. Эта частица получила название Ω^- (омега-минус-гиперон). В XIX веке Д.И. Менделеевым было предсказано существование неизвестных в то время элементов. Таким же выдающимся достижением следует считать и предсказанную в XX веке с использованием теории групп симметрии частицу Ω^- .

Таблица 4. Десять барионов представлены как состояния с определенным значением массы некоторой квантовой системы («декуплета» с указанием собственных значений перестановочных операторов A_1^1 и A_3^3 и операторов изоспина T_3 и T^2 (вместо $T(T+1)$ приводится T) группы $SU(3)$, [18, см. ЧАСТЬ 2]

№ частицы	Символ частицы	Масса частицы	A_1^1 – квантовое число для зарядов частиц	A_3^3 – квантовое число для мультиплетов с одинаковым числом частиц ($-A_3^3$ – гиперзаряд частицы)	T – оператор Казимира подгруппы $SU(2)$
1	Ω^-	1679,0	-1	2	0
2	Ξ_δ^-	1535,0	-1	1	1/2
3	Ξ_δ^0	1535,0	0	1	1/2
4	Σ_δ^-	1197,6	-1	0	1
5	Σ_δ^0	1192,4	0	0	1
6	Σ_δ^+	1189,4	1	0	1
7	Δ_δ^-	1238,0	-1	-1	3/2
8	Δ_δ^0	1238,0	0	-1	3/2
9	Δ_δ^+	1238,0	1	-1	3/2
10	Δ_δ^{++}	1238,0	2	-1	3/2

Основная идея принципа групповой классификации состояний квантовых систем на основании изложенного в 4-х частях данной работы и содержания цитируемой литературы формулируется следующим образом: принципы групповой классификации состояний квантовых систем применимы к таким системам как «изотопический мультиплет», «октет», «декуплет» и т.д., так и к классическим системам (атом, молекула, элементарная частица). Эта идея используется далее при классификации химических элементов.

7. Динамическое правило для состава электронных оболочек многоэлектронных атомов

До сих пор, обсуждая симметричные свойства Периодической системы, классификацию электронных состояний и их отношение к представлениям группы динамической симметрии водородоподобного атома, не рассматривался вопрос: а какими волновыми функциями в рамках модели независимых частиц описываются электроны в атомах. Ответ на этот вопрос может быть следующим. В многоэлектронном атоме движение электрона происходит не только в кулоновском поле ядра, но и в поле остальных электронов. В результате его энергия определяется не только главным квантовым числом, но и орбитальным, что и объясняет структуру диаграммы, таблица 1 (см. ЧАСТЬ 3). При этом для определения явного вида «наилучшей» волновой функции в модели независимых частиц необходимо решить уравнение Хартри-Фока для рассматриваемого атома. Приведенное рассуждение ведет к заключению, что волновые функции электрона в многоэлектронном атоме будут значительно отличаться от водородоподобных волновых функций, а отсюда, в свою очередь, к тому, что состояния, принадлежащие представлению группы $SO(4,2)$, могут и не иметь никакого отношения к состояниям электронов в атомах, отличных от атома водорода. В этой важной проблеме такое заключение оказывается не соответствующим действительности.

В работах [40,41] показано, что «водородоподобные» волновые функции с должным образом определенным эффективным зарядом являются удивительно хорошим приближением к волновым функциям метода Хартри-Фока. Этот вывод основан на вычислении эффективных зарядов для поля, действующего на электрон, из значений моментов хартри-фовских волновых функций. Хорошо известно [35, см. ЧАСТЬ 2], что моменты

$$\langle r^k \rangle = \int_0^{\infty} dr r^{k+2} |R_{nl}(r)|^2 \quad (1)$$

водородоподобных радиальных волновых функций однозначно определяются эффективным зарядом данного состояния, и наоборот, эффективный заряд однозначно определяется любым из моментов:

$$Z_{\text{эфф}} = n \sqrt{\frac{5n^2 + 1 - 3l(l+1)}{2\langle r^2 \rangle}}; \quad Z_{\text{эфф}} = \frac{3n^2 - l(l+1)}{2\langle r \rangle}; \quad Z_{\text{эфф}} = n^2 \left\langle \frac{1}{r} \right\rangle; \quad Z_{\text{эфф}} = n \sqrt{\left(l + \frac{1}{2}\right) \left\langle \frac{1}{r^2} \right\rangle}. \quad (2)$$

Таблица 5. Эффективные заряды электронных состояний в $^{55}\text{Cs}^+$ [40]

$Z_{\text{эфф}}$	$\langle r^2 \rangle$	$\langle r \rangle$	$\langle r^{-1} \rangle$	$\langle r^{-2} \rangle$	Среднее значение $Z_{\text{эфф}}$
Z_{1s}	54,2	54,30	54,47	54,55	54,38±0,10
Z_{2s}	50,4	50,60	50,22	50,58	50,56±0,10
Z_{2p}	49,1	49,49	50,15	50,51	49,83±0,40
Z_{3s}	43,2	43,42	41,70	42,13	42,62±0,75
Z_{3p}	41,2	41,36	40,97	42,02	41,05±0,16
Z_{3d}	37,8	38,44	39,73	40,45	39,12±0,60
Z_{4s}	33,1	33,20	30,45	30,31	31,79±1,3
Z_{4p}	30,6	30,62	28,87	29,91	30,00±0,06
Z_{4d}	25,0	25,26	25,25	26,74	25,33±0,20
Z_{5s}	20,3	20,39	17,48	16,13	18,58 ±1,8
Z_{5p}	17,3	17,37	15,21	15,12	16,25±1,0

Если хартри-фоковские волновые функции действительно хорошо представляются водородоподобными волновыми функциями, то эффективные заряды, вычисленные по формулам (2) через моменты одной и той же хартри-фоковской волновой функции, не должны сильно отличаться. Это подтверждается для различных *s*-, *p*- и *d*- состояний атомов Cs – см. таблицу 5 из работы [40].

Изложенное позволяет утверждать, что состояния водородоподобной системы имеют непосредственное отношение к состояниям диаграммы таблицы 1(см. ЧАСТЬ 3) для электронов в многоэлектронных атомах, если удастся изменить характер вырождения собственных значений одноэлектронного гамильтониана водородоподобной системы, не изменяя принадлежащие этому гамильтониану собственные функции. Речь должна идти именно о характере вырождения собственных значений, так как и близость величин эффективных зарядов состояний, принадлежащих данной электронной оболочке и порядок заполнения электронами состояний в оболочке явно свидетельствует об энергетической близости этих «соревнующихся» состояний [40,41].

Литература к ЧАСТИ 4

37. Gell-Mann M. Calif. Inst. of Technology, Synchrotron Laboratory Report CTSL-20. - 1961.
38. Néeman Y. Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance // Nucl. Phys. - 1961. - Vol. 26, N 2. - P. 222-229.
39. Боголюбов Н.Н. Сборник «Физика высоких энергий и теория элементарных частиц». Киев, 1967. С. 5 – 112.
40. Kregar M. // Physica Scripta. 1984. V.29. P. 438 – 437.
41. Kregar M. // Physica Scripta. 1985. V.29. P. 246 – 254.

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF NATURAL SCIENCE ARE THEORETICAL BASIS OF PROFESSIONAL EDUCATION OF SPECIALISTS FOR NANO-, MICRO- AND RADIOELECTRONICS ON DISCIPLINES OF MATHEMATICAL CYCLE (IN 5 PARTS).

PART 4: GROUPS OF SYMMETRY IN CLASSIFICATION OF ELEMENTARY PARTICLES; DYNAMICAL RULE FOR COMPOSITION OF ELECTRONIC SHELLS OF MULTIELECTRONIC ATOMS

L. I. Gursky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The results of discovery of the periodic law by D.I.Mendeleev and the current wording of the periodic dependence of the properties of chemical elements are presented. It is noted that in mathematics, one relate to the periodic functions those which values do not change by addition of the definite but not equal to zero number to the argument. Some examples of using the symmetry groups in the science, as well as the methods of representation of atomic and electron states in quantum mechanics based on the regularities defining the structure and properties of matter are given. The group-based method of classification of chemical elements for definition of their place in the Mendeleev's periodic system of elements is proposed. The elements are considered as the states of the quantum system, and their atoms are defined as vectors in the space where the irreducible unitary representation of the concrete symmetry group subject to determination is acting. At that, the operators of such group sequentially generate the whole set of elements and place them into corresponding multiplets (periods) of the Mendeleev's periodic system of elements. Using the $SU(3)$ symmetry group, the properties of the eight most-studied baryons having equal spin of $1/2$ and equal intrinsic parity (+) are considered. The ten-dimensional irreducible representation for baryons is built analogous to building of the eight-dimensional one. These approaches are used for defining the symmetry group of the periodic system of elements. At that, the way of symmetry violation relatively to transformations from the sub-group $O(4)$ for the first time shows the possibility to remain in the framework of the representation of the dynamical symmetry group, using the Casimir operators of the sub-groups of this group as operators violating the symmetry. The splitting of the infinite-dimensional unitary representation of the $SO(4,2)$ group to finite-dimensional multiplets defined by the quantum numbers describing electron states in atoms has been carried out. It is shown that the content of multiplets is in complete accordance with the experimentally established structure of atomic electron cells for all chemical elements.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАНО- МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА (В 5-И ЧАСТЯХ). ЧАСТЬ 5: ДИНАМИЧЕСКАЯ ГРУППА СИММЕТРИИ; ВОДОРОДОПОДОБНЫЙ АТОМ И ГРУППА $SO(4,2)$

член-корр. НАНБ Гурский Л.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

8. Динамическая группа симметрии

Результаты, приведенные в ЧАСТИ 4 (раздел 8.) позволяют утверждать, что сущность исследований заключается в изменении характера вырождения собственных значений одноэлектронного гамильтониана водородоподобной системы, но: 1) без изменения его собственных функций, 2) с сохранением близости эффективных зарядов почти вырожденных состояний и 3) с сохранением группы $SO(4,2)$ в качестве группы динамической симметрии. Группа $SO(4,2)$ или конформная группа (группа конформных сохраняющих углы) преобразований пространства Минковского) – это 15-параметрическая группа непрерывных ортогональных преобразований с детерминантом, равным единице, оставляющих инвариантными «квадраты расстояния» в шестимерном пространстве: $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - x_5^2 - x_6^2$. Решить эту проблему можно, введя в гамильтониан член, выражающийся через операторы алгебры Ли группы $SO(4,2)$ и нарушающий симметрию относительно преобразований из подгруппы $O(4)$ этой группы. Для этого вполне достаточно включить в гамильтониан член, содержащий оператор квадрата орбитального момента, т.е. сделать допущение, что состояние электрона в многоэлектронном атоме моделируется уравнением

$$(\omega/2)(2 + N + 2f(\hat{I}^2)) |\psi\rangle = Z_{\gamma\delta} |\psi\rangle, \quad (3)$$

где $f(\hat{I}^2)$ – функция, максимально приближенная к эмпирическому характеру вырождения одноэлектронных состояний в многоэлектронных атомах. Перепишем уравнение (3) в обычных трёхмерных координатах и получим для «физических» состояний

$$\{-(1/2)\Delta + (\omega/r)f(\hat{I}^2) - (Z_{y\delta\delta}/r)\}\psi(r) = E\psi(r). \quad (4)$$

Необычная зависимость от r в члене, содержащейся в $f(\hat{I}^2)$ обусловлено тем, что одночастичное уравнение типа (4) получается обычно в предположении, что влияние поля ядра и поля других электронов можно отобразить с помощью введения операторов одночастичных потенциалов φ_i в виде:

$$(-(1/2)\Delta_i + \varphi(r_i))\psi_i(r_i) = E_i\psi_i(r_i), \quad (5)$$

где i – номер электрона.

Для систем частиц с кулоновским взаимодействием имеет место тождество

$$W = \sum_i r_i F_i = U, \quad (6)$$

где U – полная потенциальная энергия системы: $U = -\sum_i Z/r_i + (1/2)\sum_{i \neq j} 1/|r_i - r_j|$ и F_i – сила,

действующая на i -й электрон: $F_i = -(\partial U / \partial r_i)$.

В выражении (6) вириал W выглядит формально как сумма одночастичных слагаемых [12, см. ЧАСТЬ 2] и даёт возможность моделировать одночастичное уравнение Шредингера выражением

$$(-(1/2)\Delta_i + r_i F_i)\psi_i(r_i) = E_i\psi_i(r_i). \quad (7)$$

Сопоставляя (5) и (7) в предположении, что

$$F_i = -(\partial \varphi_i / \partial r_i), \quad (8)$$

приходим к уравнениям

$$(-r_i(\partial \varphi_i / \partial r_i) = \varphi_i), \quad (9)$$

среди решений которых имеются с учётом того, что оператор \hat{I}_i^2 коммутирует с оператором $r_i(\partial / \partial r_i)$, и решения вида:

$$\varphi_i = -(Z_{y\delta\delta}/r_i) + (1/r_i)f(\hat{I}_i^2). \quad (10)$$

Как следует из (2), линейные комбинации состояний (10), отвечающие заданным значениям квадрата орбитального момента, по-прежнему являются собственными состояниями оператора $2 + N$ и, если собственное значение последнего равно $2n$, принадлежат энергии E :

$$E = -(Z_{эфф}^2) / (2[n + f(l(l+1))]^2). \quad (11)$$

Таблица 6. Состояния, принадлежащие последовательным значениям $n^*(n, l)$ при $\Delta_d \ll 1,0$ $\Delta_f \ll 1$

$n^*(n, l)$ из (12)	Состояния nl		$n^*(n, l)$ из (12)	Состояния nl
2 $7/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	2s 2p		$5,5 + \Delta_d$ $16/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	5s,4d 5p
3 $10/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	3s 3p		$6,6 + \Delta_f, 6 + \Delta_d$ $19/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	6s,4f,5d 6p
$4,4 + \Delta_d$ $13/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	4s,3d 4p		$7,7 + \Delta_f, 7 + \Delta_d$ $22/3 + (5\Delta_d - \Delta_f)/9$	7s,5f,6d 7p

Уравнение (11) показывает, что энергии состояний определяются числами

$$n^*(n, l) = n + f(l(l+1)). \quad (12)$$

Значения этих чисел могут быть близкими для состояний с разными значениями чисел n и l . Если считать, что

$$f(l(l+1)) = \alpha l(l+1) - \beta l^2(l+1)^2, \quad (13)$$

где $\alpha = 1/6 + (1/12)(4\Delta_d - \Delta_f)$, $\beta = (1/72)(2\Delta_d - \Delta_f)$, Δ_d и Δ_f – малые числа, удовлетворяющие условиям $\Delta_d > \Delta_f > 0$, то данные таблицы 6 показывают, какие состояния для этого случая являются почти вырожденными. Если объединить эти состояния с ближайшими к ним р-состояниями (по значению числа) $n^*(n, l)$ и образовать таким образом “оболочку” (в таблице 6 такие оболочки отделены друг от друга горизонтальными линиями), то, сопоставляя содержание этих “оболочек” с содержанием многоэлектронных оболочек в многоэлектронных атомах, обнаруживаем их полное соответствие друг другу. Таким образом, получившаяся из (12) определенность по энергии состояний тоже находится в соответствии с эмпирическими данными. Рассмотрение этих закономерностей будет представлено в следующем разделе.

9. Водородоподобный атом и группа $SO(4,2)$

В работах [13–15, см. ЧАСТЬ 2] обсуждается вопрос, нельзя ли расширить группу $SO(4)$, чтобы для расширенной группы все пространство Фока стало неприводимым и показано, что такое расширение действительно возможно. Такой подход был впервые применен к атому водорода [42], при этом группой, содержащей $SO(4)$, оказалась так называемая конформная группа, или $SO(4,2)$ группа, введенная в физику в 1937 г. Дираком для других целей. Название этой группы связано с ее первоначальным определением как группы конформных (сохраняющих углы) преобразований пространства Минковского [43]. Группа $SO(4,2)$ является группой динамической симметрии изовалентных водороду квантовых систем [13–15, см. ЧАСТЬ 2]. Это значит, что все решения уравнения Шредингера для водородоподобного атома, принадлежащие дискретному спектру, переходят друг в друга под действием генераторов этой группы. Далее рассматривается вопрос, почему совпадение группы симметрии системы химических элементов и группы динамической симметрии изовалентных водороду квантовых систем совсем не является случайным и может быть эффективно использовано при теоретическом исследовании многоэлектронных атомов.

В качестве математического дополнения к вышеприведенным результатам приводится формулировка задачи об изовалентной водороду квантовой системе, которая в компактном и явном виде демонстрирует все симметричные свойства этой системы [13–15, см. ЧАСТЬ 2]. Рассмотрим уравнение Шредингера для изотропного гармонического осциллятора в двухмерном пространстве с комплексными координатами ξ_s ($s = 1, 2$), которые представляют собой компоненты спинора. Уравнение имеет следующий вид:

$$H\psi = \left(-\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \xi_s^* \partial \xi_s} + \frac{1}{2} \omega^2 \xi_s^* \xi_s \right) \psi = K\psi, \quad (14)$$

звёздочка обозначает операцию комплексного сопряжения, под дважды повторяющимся индексом подразумевается суммирование, ω – вещественное положительное число, K – собственное значение оператора H . Из свойств симметрии уравнения (14), помимо тех, что заключены в определении « ξ_s – двухкомпонентный спинор», отметим существенную для дальнейшего инвариантность относительно преобразования

$$\xi_s \rightarrow \xi_s e^{i\varphi}, \quad \xi_s^* \rightarrow \xi_s^* e^{-i\varphi}, \quad (15)$$

следствием которой является равенство нулю коммутатора оператора H с оператором

$$Q = \xi_s^* \partial / \partial \xi_s^* - \xi_s \partial / \partial \xi_s. \quad (16)$$

Перейдём в уравнении (14) к новым переменным:

$$x_\lambda = \xi_s^* (\sigma_\lambda)_{st} \xi_t \quad (\lambda = 1, 2, 3), \quad \chi = \arctg(\xi_1^* / \xi_1) \quad (17)$$

где $(\sigma_\lambda)_{st}$ обозначают элементы матриц Паули σ_λ , $\xi_s = \text{Re} \xi_s$ и $\xi_s^* = \text{Im} \xi_s$. Вследствие заданных свойств ξ_s вещественные числа x_λ являются компонентами трёхмерного вектора r . В переменных (17) уравнение (14) выглядит следующим образом:

$$-1/2 \left[r\Delta - \frac{1}{r+x_3} 1/r + x_3 (x_1(\partial/\partial x_2) - x_2(\partial/\partial x_1)) \partial/\partial \chi + 1/2(r+x_3) \partial^2/\partial \chi^2 \right] \psi + 1/2(\omega^2 r\psi) = K\psi \quad (18)$$

где $r = |r|$, Δ – оператор Лапласа. Если отнести к «физическим» те решения уравнения (5), которые не зависят от χ , т.е. принадлежат нулевому собственному значению оператора Q , имеющему в переменных (17) вид

$$Q = i(\partial/\partial \chi), \quad (19)$$

то, как это следует из (18), эти «физические» решения являются решениями трёхмерного уравнения Шредингера для частицы, движущейся в кулоновском поле ядра с зарядом Z и имеющей энергию

$$E = -1/2(\omega^2), \quad (20)$$

(используются так называемые атомные единицы: масса частицы, её заряд и постоянная Планка \hbar приняты за единицы измерения).

Устанавливаемая таким образом связь между уравнением Шредингера, описывающим водородоподобный атом, и уравнением Шредингера для изотропного гармонического осциллятора в двумерном комплексном пространстве позволяет придать решениям этих уравнений простую алгебраическую форму, делающую очевидными их симметричные свойства. Будем считать, что скалярное произведение волновых функций в ξ – пространстве определяется соотношением

$$\langle \phi | \psi \rangle = \int d^4 \xi \phi^*(\xi_1^*, \xi_2^*, \xi_1, \xi_2) \psi(\xi_1^*, \xi_2^*, \xi_1, \xi_2), \quad (21)$$

где $d^4 \xi = d\xi_1^* d\xi_2^* d\xi_1 d\xi_2$. Введём операторы

$$a_s = \sqrt{\omega/2(\xi_s + 1/\omega(\partial/\partial \xi_s^*))}, \quad b_s = \sqrt{\omega/2(\xi_s^* + 1/\omega(\partial/\partial \xi_s))} \quad (22)$$

и эрмитовски сопряжённые к ним (относительно скалярного произведения (21))

$$a_s^+ = \sqrt{\omega/2(\xi_s^* - 1/\omega(\partial/\partial \xi_s))}, \quad b_s^+ = \sqrt{\omega/2(\xi_s - 1/\omega(\partial/\partial \xi_s^*))} \quad (23)$$

Эти операторы удовлетворяют перестановочным соотношениям

$$[a_s, a_t^+] = \delta_{st}, \quad [b_s, b_t^+] = \delta_{st} \quad (24)$$

(не равные нулю коммутаторы опущены).

Выражая операторы, входящие в уравнение (1), через операторы (22) и (23), приходим к уравнению

$$\omega/2(2 + a_s^+ a_s + b_s^+ b_s) |\psi\rangle = K |\psi\rangle, \quad (25)$$

решения которого легко находятся.

Определяя состояние «вакуума» уравнениями

$$a_s |0\rangle = b_s |0\rangle = 0 \quad (26)$$

и используя перестановочные соотношения (24), убеждаемся в том, что одночлены

$$|n_1^a n_1^b n_2^a n_2^b\rangle = (a_1^+)^{n_1^a} (b_1^+)^{n_1^b} (a_2^+)^{n_2^a} (b_2^+)^{n_2^b} |0\rangle \quad (27)$$

($n_1^a, n_1^b, n_2^a, n_2^b$ – неотрицательные целые числа) являются собственными векторами взаимно коммутирующих операторов $a_1^+ a_1, b_1^+ b_1, a_2^+ a_2, b_2^+ b_2$, принадлежащих соответственно собственным значениям $n_1^a, n_1^b, n_2^a, n_2^b$. Отсюда следует, что состояния (27) будут решениями уравнения (25), если установить

$$\omega = 2K/(2 + n_1^a + n_1^b + n_2^a + n_2^b) \quad (28)$$

Тогда из (20) вытекает, что

$$E = -2K^2/(2 + n_1^a + n_1^b + n_2^a + n_2^b)^2. \quad (29)$$

«Физические» решения отбираются условием равенства нулю собственного значения интеграла движения Q , который с использованием операторов (23) и (24) выражается следующим образом

$$Q = a_s^+ a_s - b_s^+ b_s. \quad (30)$$

Это значит, что «физическими» являются значения чисел, $n_1^a, n_1^b, n_2^a, n_2^b$ удовлетворяющие условию

$$n_1^a + n_2^a = n_1^b + n_2^b. \quad (31)$$

Определяя, наконец, операторы, коммутирующие с оператором Q

$$m_\lambda = (\sigma_\lambda)_{st} a_s b_s, \text{ и } m_\lambda^+ = (\sigma_\lambda)_{st} a_s^+ b_t^+; \quad n_\lambda^a = (\sigma_\lambda)_{st} a_s^+ a_t \text{ и } n_\lambda^b = (\sigma_\lambda)_{st} b_t^+ b_s; \quad M = a_s b_s, \text{ и } M^+ = a_s^+ b_s^+; \quad (32)$$

$$2 + N = 2 + a_s^+ a_s + b_s^+ b_s$$

и используя перестановочные соотношения (24), обнаруживаем, что эти пятнадцать операторов образуют замкнутую алгебру, изоморфную алгебре Ли группы $SO(4,2)$ [44].

Под действием операторов (32) состояния (27), удовлетворяющие условию (31), переходят друг в друга, образуя тем самым бесконечномерное унитарное представление $SO(4,2)$. Связь состояний (27) с принятой в спектроскопии классификацией состояний водородоподобного атома устанавливается следующим образом. Значение энергии определяется главным квантовым числом $n = 1 + n_1^a + n_2^a = 1 + n_1^b + n_2^b$, которое может принимать значения 1,2,3,... С ростом n энергия возрастает. Заданному значению орбитального (операторами проекций орбитального момента в

рассматриваемом представлении являются операторы $l_\lambda = (n_\lambda^a - n_\lambda^b) / 2$ квантового числа l ($l = 0, 1, \dots, n - 1$ при заданном n) принадлежат состояния (нормировочные множители опущены) $l = 0; (M^+)^k | 0 \rangle$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $l = 1; m_\lambda^+ (M^+)^k | 0 \rangle$, $\lambda = 1, 2, 3$, $k = 0, 1, 2, \dots$, которые являются линейными комбинациями состояний (26). Обычно принято обозначать значения орбитального квантового числа буквами s , p , d , f , g .

Подводя итог этому обсуждению связи состояний водородоподобного атома с представлением группы $SO(4,2)$ полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

- предложено динамическое обоснование использованию представлений группы динамической симметрии изовалентной водороду квантовой системы для математического описания симметричных свойств Периодической системы элементов Д.И.Менделеева;
- с использованием динамического обоснования осуществлено расщепление бесконечномерного унитарного представления группы $SO(4,2)$ на конечномерные мультиплеты, определяющиеся квантовыми числами, описывающими состояния электронов;
- показано, что критерии совпадения группы симметрии Периодической системы элементов Д.И. Менделеева и группы $SO(4,2)$ динамической симметрии изовалентной водороду квантовой системы не являются случайными и могут эффективно использоваться при введении однопараметрического нарушения симметрии относительно подгруппы $O(4)$, что позволяет установить порядок заполнения электронных оболочек химических элементов в полном соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в Таблице 1 ЧАСТЬ 3.

Литература к ЧАСТИ 5

42. Малкин И.А., Манько В.И. Динамические симметрии и когерентные состояния квантовых систем. Москва.: 1979.
43. Dirac P.A.M. // Ann. Math. - 1937. - P. 36.
44. Komarov L.I., Romanova T.S. // J.Phys.B: At.Mol.Phys. 1985. V.18. P.859-865.

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF NATURAL SCIENCE ARE THEORETICAL BASIS OF PROFESSIONAL EDUCATION OF SPECIALISTS FOR NANO-, MICRO- AND RADIOELECTRONICS ON DISCIPLINES OF MATHEMATICAL CYCLE (IN 5 PARTS). PART 5: DYNAMICAL GROUP OF SYMMETRY; HYDROGEN-LIKE ATOM AND GROUP $SO(4,2)$

L. I. Gursky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

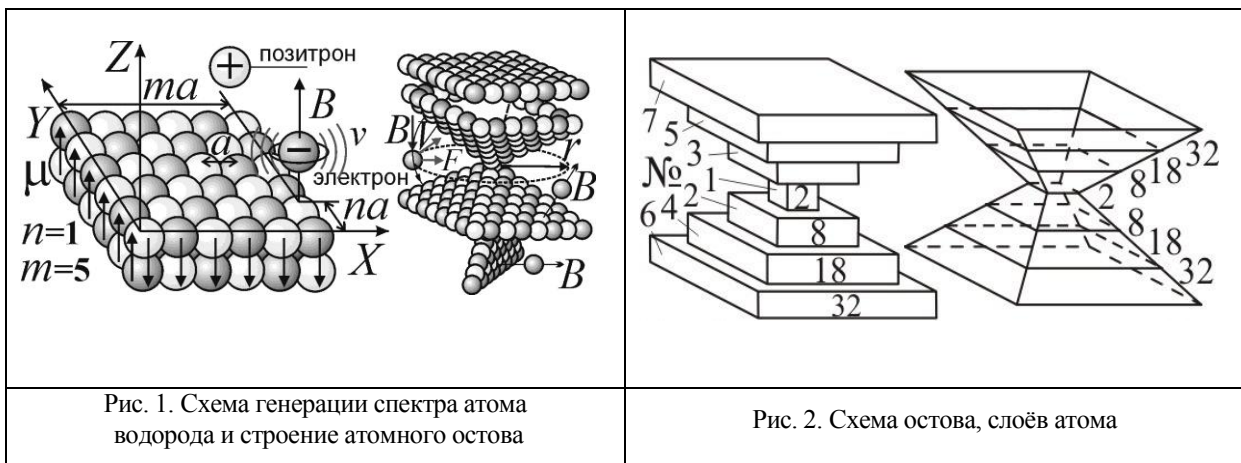
The results of discovery of the periodic law by D.I.Mendeleev and the current wording of the periodic dependence of the properties of chemical elements are presented. It is noted that in mathematics, one relate to the periodic functions those which values do not change by addition of the definite but not equal to zero number to the argument. Some examples of using the symmetry groups in the science, as well as the methods of representation of atomic and electron states in quantum mechanics based on the regularities defining the structure and properties of matter are given. The group-based method of classification of chemical elements for definition of their place in the Mendeleev's periodic system of elements is proposed. The elements are considered as the states of the quantum system, and their atoms are defined as vectors in the space where the irreducible unitary representation of the concrete symmetry group subject to determination is acting. At that, the operators of such group sequentially generate the whole set of elements and place them into corresponding multiplets (periods) of the Mendeleev's periodic system of elements. Using the $SU(3)$ symmetry group, the properties of the eight most-studied baryons having equal spin of $1/2$ and equal intrinsic parity (+) are considered. The ten-dimensional irreducible representation for baryons is built analogous to building of the eight-dimensional one. These approaches are used for defining the symmetry group of the periodic system of elements. At that, the way of symmetry violation relatively to transformations from the sub-group $O(4)$ for the first time shows the possibility to remain in the framework of the representation of the dynamical symmetry group, using the Casimir operators of the sub-groups of this group as operators violating the symmetry. The splitting of the infinite-dimensional unitary representation of the $SO(4,2)$ group to finite-dimensional multiplets defined by the quantum numbers describing electron states in atoms has been carried out. It is shown that the content of multiplets is in complete accordance with the experimentally established structure of atomic electron cells for all chemical elements.

МАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Семиков С.А.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время общепринята квантовая модель атома. Однако она не объясняет ряд эффектов [1–4], ведёт к теоретическим парадоксам [5] и математическим трудностям расчёта спектров многоэлектронных атомов [6]. Формулы квантовой механики приводят к расходимостям и бесконечностям, например, при анализе поля электрона и при учёте в спектре энергий нулевых колебаний в виде энергии $h\nu/2$, существующей на любой частоте ν и стремящейся к бесконечности при росте ν . То есть, квантовая физика ведёт к тем же парадоксам, которые в начале XX в. заставили отказаться от классической физики при анализе спектра теплового излучения и «ультрафиолетовой катастрофы» – бесконечного роста энергии в области высоких частот ν . Поэтому обратимся к анализу классической магнитной модели атома, предложенной В. Ритцем [7] и Дж.Дж. Томсоном [8] в начале XX в. – одновременно с квантовой. Эта модель объясняла спектры и решала все парадоксы классической физики в рамках классической механики [7, 9].



Согласно магнитной модели атома, электроны занимают ряд устойчивых положений-узлов в атомном остове-ядре (рис. 1). При внешних воздействиях электроны массы M и заряда e начинают вращаться возле положений равновесия в магнитном поле B атома, излучая на циклотронной частоте $\omega = eB/M$ своего вращения. Ряд узлов (положений равновесия электронов) соответствует узлам сетки периода a вдоль осей X и Y , у которых магнитные поля $B_1 = \mu_0/2\pi g_0 y^2$ и $B_2 = \mu_0/2\pi g_0 x^2$ перпендикулярны к плоскости сетки и противонаправлены. Здесь μ – магнитный момент электрона, μ_0 – магнитная постоянная, g_0 – классический радиус электрона. Такую структуру узлов и поля $B = B_1 - B_2$ могут формировать цепочки электронов и позитронов, образующих подобие кристаллической решётки [9]. Вопреки теореме Ирншоу, такие системы зарядов стабильны при малых отклонениях от закона Кулона [8]. Примером такой плоской решётки служит графен, где атомы углерода образуют слой, вдоль которого электроны движутся по узлам решётки.

Электроны колеблются лишь на частотах, соответствующих магнитному полю B в узлах. Как показал В. Ритц, это объясняет линейчатые спектры водорода и металлов [7]. Так, спектр атома водорода в магнитной модели естественно получается в виде набора частот $\omega = eB/M = (1/y^2 - 1/x^2)e\mu_0/2\pi g_0 M$, где $x = ma$ и $y = na$ – координаты электрона, a период a порядка размера атома водорода $\sim 10^{-10}$ м. Отсюда спектр частот водорода $\nu = \omega/2\pi = Rc(1/n^2 - 1/m^2)$, где R – постоянная Ридберга, c – скорость света в вакууме, n и m – целые числа. Интенсивность спектральных линий определяется степенью устойчивости положений электронов в узлах. Чем устойчивей узел, тем выше процент атомов с электронами, расположенными в соответствующих узлах и тем выше интенсивность излучения соответствующей спектральной линии.

Магнитная модель атома естественно объясняет эффекты Зеемана и Штарка [9, 10]. В эффекте Штарка электрическое поле E смещает электроны от положений равновесия. Соответственно значению поля B' в новом положении меняется и частота $\omega' = eB'/M$. В зависимости от расположения электронов в атоме, дипольные моменты атомов принимают несколько возможных значений и направлений по отношению к оси атомного остова. Поэтому внешнее поле, ориентируя атомы, смещает электроны в разных направлениях и в разной степени, отчего каждая спектральная линия расщепляется на несколько, с близкими частотами и разными направлениями колебаний (поляризации): в этом суть эффекта Штарка

[10]. Это объясняет экспериментальный факт, выявленный ещё И. Штарком: неоднородное электрическое поле разделяет поток атомов на несколько потоков, в зависимости от величины дипольного момента, и каждый поток излучает лишь одну спектральную компоненту [10]. В согласии с магнитной моделью атома, и вопреки квантовой, интенсивность линий зависит от направления поля E к вектору скорости пучка атомов.

Эффект Зеемана Ритца объяснил наложением на внутриатомное поле V внешнего поля ΔV [7]. В новом поле $V' = V \pm \Delta V \sin \theta$ меняются частоты колебаний электронов $\omega' = eV'/M$. Т.к. магнитный момент атомов сонаправлен с ΔV и ориентируется, в зависимости от размещения электронов, под разными углами θ к плоскости колебаний электронов, то их частоты принимают лишь ряд значений ω' , в зависимости от типа линии, атома и поля ΔV . В итоге каждая линия спектра расщепится на ряд близких с разными поляризациями, с чем и связан эффект Зеемана [10]. Согласно Ритцу, это объясняет нормальный и аномальный эффект Зеемана, где максимальное значение $\Delta\omega = e\Delta V/M$, вопреки теории Лоренца ($\Delta\omega = e\Delta V/2M$).

Магнитная модель объясняет и структуру таблицы Менделеева, представляя остов атома в форме бипирамиды, рёбра которой образованы магнитными осями [9]. Такой остов в виде пустотелого многогранника формируется при росте электрон-позитронной решётки в электрическом и магнитном поле ядра, по аналогии с формированием снежинок [11], фуллеренов, белков и белковых оболочек вирусов. Электроны заполняют остов плоскими квадратными слоями растущей площади и ёмкости $2n^2$. Это объясняет, почему числа элементов в периодах №1–7 (рис. 2) – это удвоенные квадраты: $2 \cdot 1^2, 2 \cdot 2^2, 2 \cdot 2^2, 2 \cdot 3^2, 2 \cdot 3^2, 2 \cdot 4^2, 2 \cdot 4^2$. Каждый слой соответствует периоду. После заполнения слоя начинает заполняться следующий, соответствующий следующему периоду. Так объясняются свойства инертных газов, лантаноидов и актиноидов, для которых квантовая модель атома не объясняет атипичные валентности [9].

Магнитная модель естественно объясняет и фотоэффект. Магнитные оси создают бочкообразную структуру поля V (рис. 1): оно перпендикулярно средней плоскости остова атома и равно $V = \mu_0 \mu / \pi r_0^2$. На электрон, летящий по орбите радиуса r , действует сила Лоренца $F = eVB = e2\nu\mu_0\mu/r_0r = MV^2/r$ (с учётом $V = 2\pi r\nu$). Отсюда энергия электрона $MV^2/2 = \nu e\mu_0\mu/r_0$, где $e\mu_0\mu/r_0 = h$, т.е. $W = h\nu$. Эти электроны вылетают из атома при облучении светом частоты ν , вызывающим резонансную раскачку, сход электрона с орбиты и вылет из атома с сохранением энергии $W = h\nu$. Объясняет модель и планковский спектр излучения и эффект Комптона [9].

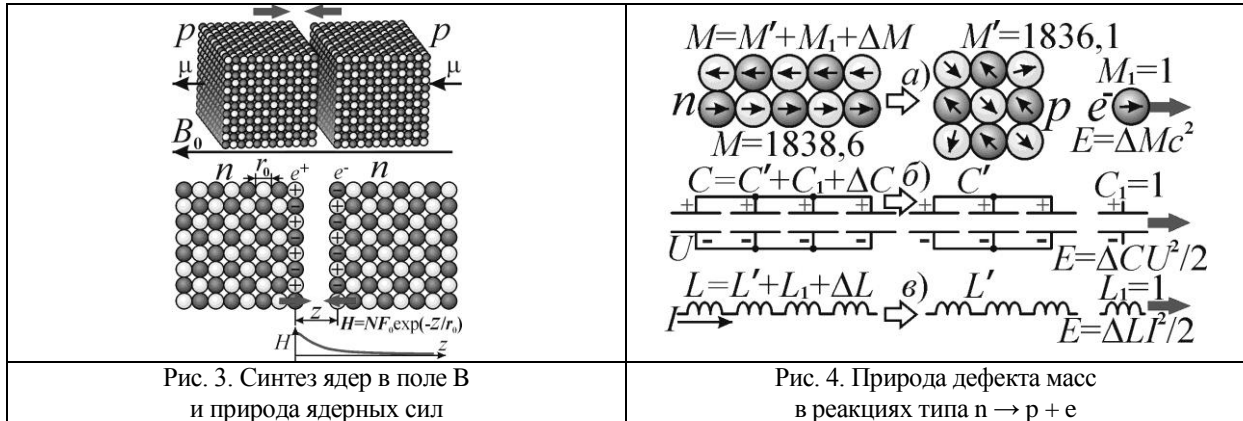
Модель Ритца классически объясняет свойства газов и твёрдых тел [9], включая металлы и полупроводники. Так, спад теплоёмкости при охлаждении объясняется не квантовым вымерзанием степеней свободы, а упорядочением, ростом числа связей атомов при охлаждении. В твёрдом теле образуются всё более крупные конгломераты атомов – жёсткие молекулы, где атомы колеблются как одно целое с энергией $\sim 3kT$, где k – постоянная Больцмана. С падением температуры T число N отдельных молекул и атомов тела снижается, за счёт слияния, и теплоёмкость $C_V = dU/dT = 3Nk$ падает. Возле абсолютного нуля остаётся одна жёсткая молекула, включающая весь кристалл с энергией $\sim kT$ и $C_V = k \approx 0$, вместо обычной молярной теплоёмкости $C_V = 3kN_a = 3R$, т.к. $k/R = 1/N_a \ll 1$. Это классически объясняет спад теплоёмкости до нуля. У свинца атомы связаны слабо, отсюда его пластичность и $C_V = 3R$ даже при $T \sim 50$ К. Зато у твёрдого алмаза и бериллия $C_V < 3R$ даже при $T \sim 500$ К. И лишь при $T > 1000$ К их теплоёмкость $C_V = 3R$, ввиду разрушения связей. Т.е. при T ниже температуры Дебая Θ_D нет отклонений от классического закона Дюлонга-Пти $C_V = 3R$, если пересчитать теплоёмкость для нового числа молекул. А классически Θ_D – это температура $T_S = W_S/k$, при которой кинетическая энергия атомов $\sim kT$ равна энергии W_S их полностью насыщенных связей. Поэтому $T_S = \Theta_D$ определяет скорость звука, коэффициенты упругости, проводимости, и велика у твёрдых тел с высоким W_S (бор, алмаз, кремний), но мала у свинца, щелочных металлов.

Модель объясняет также механизм генерации и усиления света фиксированной частоты в твердотельных лазерах, в полупроводниковых светодиодах. Например, если электроны проходят в полупроводнике разность потенциалов U , приобретая энергию $W = eU$, то при захвате магнитной ловушкой атома они начинают вращаться в поле V остова с фиксированной частотой $\nu = W/h$, излучая на этой частоте (рис. 1).

Отметим ряд возможных применений магнитной модели в микроэлектронике. Например, атомы охлаждённого вещества, не испытывая соударений и внешних воздействий, смогут длительно сохранять электроны в узлах. Это позволит записывать и хранить информацию на атомарном уровне или использовать атом как триггер, переводя электроны в заданные узлы решётки pump -импульсом лазера. Считывание информации производят probe -импульсом с частотой, соответствующей данному узлу. Присутствие электрона в узле выявят по резонансному отклику электрона. В качестве рабочего вещества для таких устройств удобны атомы переходных элементов, включая атомы редкоземельных элементов, с богатым спектром частот, т.е. вариантов размещения электронов в атоме. Не случайно в лазерной

технике в качестве активных центров используют элементы переходных групп – хром, эрбий, иттербий, неодим и т.д.

На некоторых типах атомов, где электроны с трудом занимают отдельные узлы, но легко их покидают (генерируя запрещённые линии), можно устроить аналоги диодов и транзисторов. Тогда атом с набором узлов будет работать как микросхема, ячейка памяти. Более надёжны элементы на электронах внутренних оболочек, с резонансными частотами в рентгеновской области (их частоты ν выше, ввиду меньшего шага a), т.к. на них не влияют соседние атомы и температура. Ансамбль атомов образует кристалл рекордного быстродействия, малых размеров и низкого энергопотребления. Переключение элементов, считывание и запись информации осуществит луч лазера, послойно сканирующий кристалл. Более удобен ВУФ- или рентгеновский лазер, облучающий наноразмерную область и поатомно сканирующий образец [12]. Т.к. рентген-микроскопия достигла разрешения в один атом, то X-лучи особенно удобны для записи и считывания информации с отдельных атомов. В кристалле с рёбрами ~ 1 см число элементов $\sim 10^{23}$.



Описание таких устройств возможно и на языке квантовой физики, где узлам и излучению электронов в них соответствуют энергетические уровни и переходы. А квантовые компьютеры отчасти аналогичны рассмотренным атомарным компьютерам. Другое применение магнитной модели – создание трёхмерных изображений-голограмм в воздухе. Для этого следует переводить молекулы воздуха в возбуждённое метастабильное состояние, пропуская воздух через область облучения УФ-лучами или лазерными рипр-импульсами, а затем облучая воздух в заданных точках ргобе-импульсом, ведущим к высвечиванию запасённой энергии. Обновление воздуха в области экспонирования позволит формировать динамические картины – движущиеся изображения, объёмные фильмы, для реализации 3D-телевидения.

Кристаллическая магнитная модель атома объясняет и свойства атомного ядра, представляя его в виде квазикристалла из протонов и нейтронов, в свою очередь имеющих форму электрон-позитронных кристаллов, где позитроны e^+ и электроны e^- чередуются как ионы Na^+ и Cl^- в кристаллах соли (рис. 3). В нейтроне числа электронов и позитронов одинаковы, а в протоне позитронов на один больше, чем электронов, отсюда его положительный заряд. Тогда ядерные силы сцепления нуклонов, как показал В. Мантуров, электрической природы – это силы притяжения электронов и позитронов на гранях [9, 13].

Эта модель протона, нейтрона и других элементарных частиц объясняет значения их масс, размеров, заряда, магнитного момента, механизм взаимодействий и распадов. Так, ядерное взаимодействие двух протонов, превышающее их кулоновское отталкивание, – это прямое следствие их мультипольного взаимодействия. Если два протона p в форме кубических кристаллов контактируют гранями, так что напротив электронов окажутся позитроны и наоборот, их притяжение превысит кулоновское отталкивание протонов (рис. 3). Как показывает расчёт [9], сила притяжения H экспоненциально убывает при росте дистанции z меж гранями: $H \approx F_0 N \exp(-z/r_0)$, где F_0 – элементарная сила притяжения электрона к позитрону на расстоянии порядка r_0 , а N – число частиц, образующих каждую грань (для нуклонов $N \sim 100$). То есть ядерная сила H в 100 раз интенсивней кулоновского взаимодействия, и быстро убывает с расстоянием, в согласии с опытом. Та же сила притяжения H возникнет между двумя нейтронами n , и между протоном p и нейтроном n , имеющими близкие массы, размеры и формы.

Итак, кристаллическая модель нуклонов объясняет все свойства ядерных сил: равенство их в связях типа p - r , n - n , p - n ; высокую интенсивность; короткодействующий характер и быстрый спад с расстоянием (ввиду мультипольного взаимодействия), насыщение (взаимодействуют грани соседних нуклонов). Модель приводит к значению радиуса действия ядерных сил $\sim r_0$ (классического радиуса электрона), чего квантовая физика не объясняет. Прочность связей типа p - r , n - n чуть выше, чем p - n (энергия спаривания, повышающая стабильность чётно-чётных ядер), т.к. у протонов и нейтронов от малой разницы в размере граней число связей N и сила H максимальны при контакте однотипных частиц, ввиду равенства граней.

Поскольку шаг r_0 электрон-позитронной решётки в 10^5 раз меньше шага а атомного остова, ядерные частоты колебаний ν в 10^8-10^{10} раз больше частот оптических атомных спектров, то есть лежат в гамма-диапазоне, в согласии с опытом. Размещение электронов или протонов в узлах электрон-позитронного «кристалла» открывает ещё один способ записи и обработки информации – не на атомном, а на ядерном уровне. Информация записана в виде координат электронов или протонов в ядре. Т.к. энергии связи в ядрах много выше, чем в атомах, то для хранения информации не обязательно охлаждать вещество до температур близких к абсолютному нулю. Таким образом, можно построить сверхёмкие носители информации и ядерные компьютеры, функционирующие при комнатной температуре.

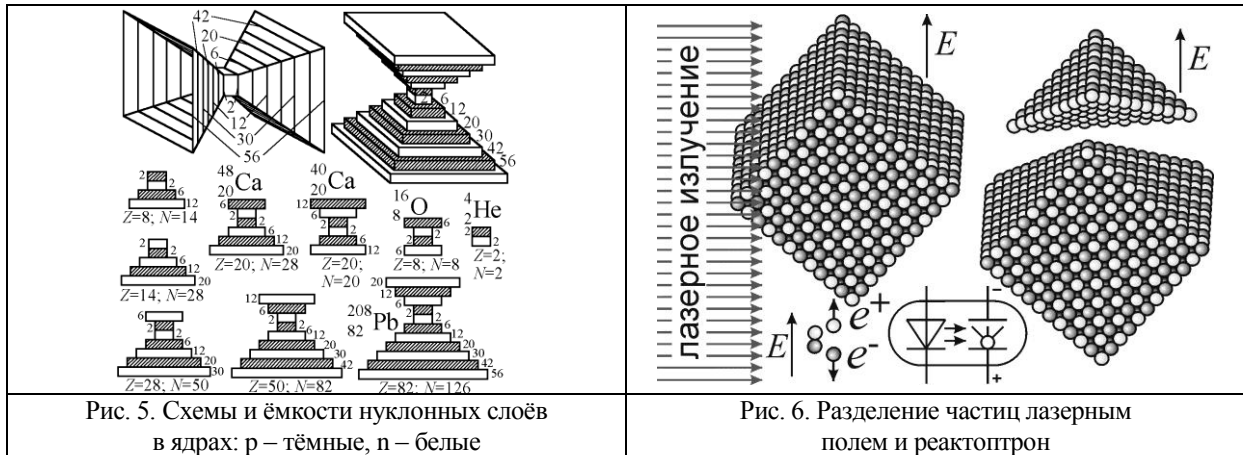


Рис. 5. Схемы и ёмкости нуклонных слоёв в ядрах: р – тёмные, n – белые

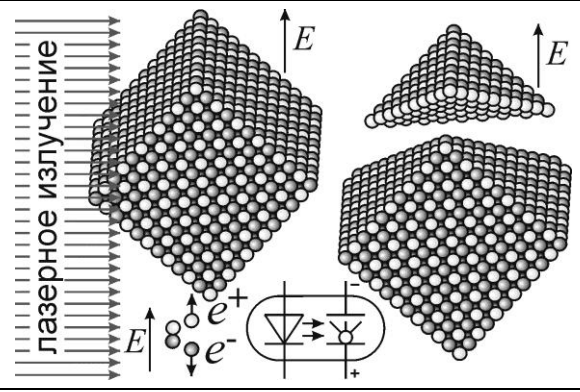


Рис. 6. Разделение частиц лазерным полем и реактоптон

Электрическая природа ядерных сил объясняет энергетику ядерных реакций и обнаруженный в них дефект масс. Как показал Ритц [9], опираясь на идеи Лоренца, взаимодействие зарядов при их ускорении приводит к появлению не скомпенсированной электромагнитной силы, т.е. к появлению добавочной инертной массы. Отталкивающее взаимодействие зарядов создаёт положительную инертную массу, а притягивающее – отрицательную. Тогда присоединение или отделение частиц и связанных с ними зарядов изменяет массу частиц, ядер не только на величину присоединённой или отделённой части, но и на величину электромагнитной массы ΔM , связанной с их взаимодействием. Этот дефект массы ΔM пропорционален выделенной или поглощённой в реакции энергии $\Delta W = \Delta M c^2$ – соотношение, полученное в XIX в. Дж.Дж. Томсоном ещё в рамках классической физики. Так и в электростатике энергия $W = CU^2/2$ и общая ёмкость C складывается из собственных энергий и ёмкостей конденсаторов и из малых взаимных энергий и ёмкостей ΔC , от взаимодействия обкладок конденсаторов (рис. 4). Извлечение конденсатора единичной ёмкости снижает общую энергию и ёмкость цепи больше, чем на единицу. Эта выделенная энергия взаимодействия $\Delta W = \Delta CU^2/2$ пропорциональна «исчезнувшей» паразитной ёмкости ΔC .

То же верно для цепи с индуктивностями L . Не зря инерционную роль ёмкости C и индуктивности L в контурах сравнивают с ролью массы M груза на пружине. Так и при отделении электрона от нейтрона, тот, став протоном, меняет форму и энергию взаимодействия ΔW образующих его электронов и позитронов и связанную с ней электромагнитную добавку массы $\Delta M = \Delta W/c^2$. Изменение структуры протона, образованного из нейтрона, следует из различия их магнитных моментов в 1,5 раза. То есть различаются распределения моментов электронов и позитронов, в сумме дающих магнитный момент нуклона.

Нуклоны в ядре, как электроны в магнитной модели атома, уложены в форме двойной пирамиды, где нейтронные слои чередуются с протонными (рис. 5). Это объясняет магические числа нуклонов, образующих особо стабильные сочетания: 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82, 126 [14]. Значения 2, 8, 20 – это удвоенные пирамидальные числа вида $n(n+1)(n+2)/3$. Прочие числа находятся как удвоенная сумма n -го треугольного числа и $(n-2)$ -го пирамидального: $n(n+1) + n(n-1)(n-2)/3 = (n^3 + 5n)/3$. Действительно, у ядер выявлены свойства, говорящие о кристаллической структуре и пирамидальной форме ядра [15, 16]. Пирамида может обладать квадратным основанием в случае кубических нуклонов [9], либо треугольным, если спаренные нуклоны имеют форму ромбододекаэдров, соединяясь в подобие пчелиных сот [11].

Гипотезу легко проверить методом Лауэ: облучая атомы гамма-лучами с длиной волны $\lambda < 10^{-15}$ м, по дифракционной картине можно установить шаг и тип кристаллической решётки. Мощное электрическое поле и лазерное излучение может вести к распаду таких ядер, при достижении порога $E \sim e/4\pi\epsilon_0 r_0^2 \sim 10^{19}$ В/см, при котором поле E разделяет электроны и позитроны, приводя к дезинтеграции частиц, распаду ядер, нарушая баланс сил притяжения и отталкивания (рис. 6). Для нестабильных ядер лазерное облучение и сильные поля E будут менять скорость распада. Такие эффекты, подтверждающие электрическую природу ядерных сил, обнаружены в экспериментах [17, 18]. Повысить КПД таких

процессов можно, ориентируя ядра электрическим или магнитным полем и действуя лазерным полем в направлении наименьшей интенсивности сил связи между зарядами ядер [19]. Также можно рассекать ядерный «кристалл» по «плоскостям спайности» «лазерным скальпелем», последовательно разрывая связи, создавая дислокации и другие дефекты, как в реальных кристаллах облегчающие деформацию и разрыв.

Модель позволяет осуществить и реакции ядерного синтеза, если соединять ядра, ориентируя их для максимизации ядерных сил и плавно сближая пондеромоторными силами в лазерном поле. Применение для этих целей полупроводниковых лазеров и KLM-лазерных микрочипов позволит реализовать компактные и почти неисчерпаемые источники энергии (реактоптроны, рис. 6), встроенные в микросхемы, для их автономного питания. В таком источнике, усиливая α - или β -распад [18], дабы излучённые одним электродом α -частицы или электроны осаждались на другом, можно создать электродвижущую силу, регулируемую интенсивностью света. Микропроцессор не потребует усиленной защиты от излучений, т.к. проникающая способность α - и β -лучей мала.

Итак, подобно атомным вихрям и шестерням в теории Максвелла, напомнившим современникам станки и заводы, в магнитной модели атом и атомное ядро напоминают электронные приборы (циклотрон, гиротрон, рупорную антенну и т.д.), полупроводниковые кристаллы, где по узлам решётки перемещаются заряды. Магнитная модель атома не только объясняет свойства атомов, ядер, но и открывает пути создания перспективных электронных устройств и источников питания для микроэлектроники.

Литература

1. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. М.: Интеллект, 2008.
2. Фаддеев Л.Д., Якубовский О.А. Лекции по квантовой механике для студентов-математиков. Л., 1980.
3. Макки Дж. Лекции по математическим основам квантовой механики. М.: Мир, 1965.
4. Нейман И. Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.
5. Маслов В.П. Квантование термодинамики и ультравторичное квантование. М., 2001, 384 с.
6. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. М.–Л.: Физматлит, 1963. 640 с.
7. Ельяшевич М.А., Кембровская Н.Г., Томильчик Л.М. // УФН. 1995. Т. 165, №4. С. 457–480.
8. Thomson J.J. // Phil. Mag. 1919. P. 418–447.
9. Семиков С.А. Баллистическая теория Ритца и картина мироздания. Н. Новгород: Пресс-контур, 2009.
10. Семиков С.А. // Инженер. 2015. №5–6. С. 16.
11. Кеплер И. О шестиугольных снежинках. М.: Наука, 1982. 192 с.
12. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. СПб.: Лань, 2011. 544 с.
13. Мантуров В.В. // Техника-молодёжи. 2006. №2. С. 2–5.
14. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. Т. 2. М.: Наука, 1980.
15. Dudek J., Gozdz A., Schunck N., et al. // PRL. 2002. V. 88, №25, P. 252502.
16. Dudek J., Curien D., Dubray N., et al. // PRL. 2006. V. 97. P. 072501.
17. Запретные превращения элементов // Химия и жизнь. 2015, №8. С. 27–31.
18. Симакин А.В., Шафеев Г.А. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 7. С. 614–618.
19. Семиков С.А. // Инженер. 2015. №1. С. 26–31.

MAGNETIC ATOMIC MODEL AND ITS APPLICATIONS IN MICROELECTRONICS

S.A. Semikov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

It is shown that the classical magnetic atomic model proposed by the Swiss physicist W. Ritz in 1908 and developed by J.J. Thomson explains the basic quantum effects and properties of the atom – the atomic spectra, photoelectric effect, Zeeman and Stark effects, as well as the properties of solids and gases. Schemes of electronic storage devices, microprocessors, which are based on the magnetic model of the atom are studied. It is shown that the model also explains the properties of atomic nuclei, establishes their structure and explains their energy and allows us to design a device for the implementation of nuclear reactions induced by laser radiation.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

д. ф.м. н. Богданов Ю.И.^{1,2,3}, к. ф.м. н. Богданова Н.А.²,
Кулько Д.Ю.^{1,3}, член-корр. РАН Лукичев В.Ф.¹

¹ Физико-технологический институт РАН

² Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Введение

Идея квантовых компьютеров и квантовых симуляторов впервые была выдвинута в 1982 году Р. Фейнманом [1]. Основываясь на том, что моделирование квантовомеханических состояний является экспоненциально сложной задачей для классического компьютера, он предложил строить решение таких задач на новой элементной квантовой базе, когда одни квантовые системы используются для моделирования других. В случае оптического квантового симулятора речь идет об использовании состояний квантованного электромагнитного поля в многоканальных оптических квантовых интерференционных устройствах для расчета структуры сложных молекулярных систем и свойств новых материалов. В 1994 году в работе Цайленгера и сотрудников [2] было показано, что любое конечномерное унитарное преобразование может быть реализовано посредством стандартных элементов квантовой оптики. В 1996 году была предложена схема универсального квантового симулятора [3], а в 2010 году были выполнены первые демонстрационные эксперименты по оценке энергетических уровней молекул [4].

В настоящем исследовании представлен метод дополнения произвольной классической динамической системы до квантовой системы. Исследование динамических систем имеет фундаментальное значение для задач управления физическими, техническими и социально-экономическими системами.

С точки зрения квантовой оптики реализация развиваемого здесь подхода может быть осуществлена посредством квантованного электромагнитного поля в нелинейной среде. С вычислительной точки зрения развитый формализм даёт основу для анализа сложных динамических систем с помощью квантовых симуляторов и компьютеров. Настоящая работа является продолжением наших исследований, выполненных в работах [5,6].

Представление классических динамических систем на языке статистических ансамблей

Классическая динамическая система описывается посредством стационарной (автономной) системы дифференциальных уравнений следующего вида (см., например, [7]):

$$\frac{dx_j}{dt} = F_j(x_1, \dots, x_n), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Описание динамической системы на языке статистических ансамблей предполагает введение соответствующей плотности распределения $\rho(x_1, \dots, x_n, t)$ в фазовом пространстве. При этом вместо системы (1) рассматривается уравнение непрерывности для плотности распределения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (F_j \rho) = 0 \quad (2)$$

Здесь и далее предполагается суммирование по повторяющемуся индексу (в формуле (2) предполагается суммирование по индексу j).

Уравнение (2) нетрудно привести к виду, который напоминает уравнение Шредингера:

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L \rho, \quad L = -i F_j \frac{\partial}{\partial x_j} - i \frac{\partial F_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

Уравнение типа (3) широко используется в работах по статистической механике, среди которых отметим работы И. Пригожина и его учеников [8].

Важно, что в случае, когда дивергенция скорости не равна нулю ($\text{div } \vec{F} \neq 0$), оператор Лиувилля оказывается неэрмитовым ($L \neq L^+$). С другой стороны, в случае несжимаемого потока в фазовом пространстве, когда дивергенция скорости оказывается равной нулю ($\frac{\partial F_j}{\partial x_j} = 0$), оператор Лиувилля становится эрмитовым ($L = L^+$). Пример такого несжимаемого потока дает гамильтонова динамика классической динамической системы.

В настоящей работе мы будем рассматриваются динамические системы, для которых оператор Лиувилля (3) не является эрмитовым. Для таких систем движение в фазовом пространстве не сводится к движению несжимаемой жидкости и не выполняется теорема Лиувилля для сохранения фазового объема.

В качестве иллюстраций рассмотрим систему Рабиновича-Фабриканта [9], которая оказывается полезной при описании процессов, протекающих в вязкой среде (жидкой или газообразной), при

возникновении волн Толлмина-Шлихтинга («Tollmien-Schlichting waves» [10]), ленгмюровских волн в плазме [11] и др. Данная система задаёт движение точки в трехмерном пространстве (x_1, x_2, x_3) . Компоненты скорости для системы Рабиновича-Фабриканта есть:

$$F_1 = \gamma x_1 + (x_3 - 1 + x_1^2)x_2, \quad F_2 = (3x_3 + 1 - x_1^2)x_1 + \gamma x_2, \quad F_3 = -2(\alpha + x_1 x_2)x_3 \quad (4)$$

Будем считать, что параметры модели имеют следующие значения, чаще всего используемые в численных экспериментах: $\gamma = 0.87$, $\alpha = 1.1$.

При «стандартных» значениях параметров, упомянутых выше, в модели Рабиновича-Фабриканта наблюдается детерминированный хаос, а её притягивающее множество представляет собой странный аттрактор [7]. В частности, значение дивергенции скорости $\frac{\partial F_j}{\partial x_j} = -2(\alpha - \gamma) < 0$, что говорит об экспоненциальном сжатии фазового объёма.

Описание на основе формализма Гамильтона-Якоби

Путем явного вычисления можно показать, что уравнение непрерывности в фазовом пространстве (2) может рассматриваться как следствие уравнения Шредингера для пси-функции (в общем случае комплексной):

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi, \quad H = -iF_j \frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{i}{2} \frac{\partial F_j}{\partial x_j} \quad (5)$$

В случае комплексной пси-функции уравнение (5) распадается на два уравнения для действительной и мнимой части функции ψ , которые решаются аналогично, поэтому далее для простоты будем предполагать, что ψ -функция действительна. Оказывается удобным представить пси-функцию в виде:

$$\psi = e^{X(x,t)} \quad (6)$$

Подстановка (6) в (5) даёт следующее уравнение для функции $X(x, t)$:

$$\frac{\partial X(x, t)}{\partial t} + F_j(x) \frac{\partial X(x, t)}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \operatorname{div} \vec{F} = 0 \quad (7)$$

Анализ уравнения первого порядка (7) может быть выполнен на основе теории, разработанной Коши, Гамильтоном и Якоби в первой половине 19 века. Соответствующий формализм оказывается близок к методу Гамильтона-Якоби в аналитической механике. В соответствии с основами этого метода введем канонические импульсы:

$$\pi_j = \frac{\partial X}{\partial x_j} \quad (8)$$

Тогда уравнение (7) примет форму уравнения Гамильтона-Якоби:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + H_x = 0, \quad H_x = F_j \pi_j + \frac{1}{2} \operatorname{div} \vec{F} \quad (9)$$

Функция Гамильтона H_x в (9) в соответствии с каноническими уравнениями порождает динамику координат и импульсов механической системы:

$$\frac{dx_j}{dt} = \frac{\partial H_x}{\partial p_j} = F_j(x_1, \dots, x_n) \quad (10)$$

$$\frac{d\pi_j}{dt} = -\frac{\partial H_x}{\partial x_j} = B_{jk} \pi_k - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\operatorname{div} \vec{F}) \quad (11)$$

где $B_{jk} = -\frac{\partial F_k}{\partial x_j}$. Уравнения для канонических координат (10) совпадают с исходными уравнениями динамической системы (1). Уравнения для канонических импульсов (11) дают нам дополнительную информацию, которая характеризует эволюцию градиента волновой функции.

В духе описания Лагранжа рассмотрим полную (субстанциональную) производную от функции $X(x, t)$. Эта величина характеризует скорость изменения волновой функции в системе координат, сопутствующей с рассматриваемой движущейся точкой. С учётом уравнения Гамильтона-Якоби (9) получаем:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{2} \operatorname{div} \vec{F} \quad (12)$$

Соотношение (12) показывает, что амплитуда волновой функции меняется в соответствии с дивергенцией скорости \vec{F} .

В частном случае системы Рабиновича-Фабриканта второе слагаемое в правой части (11) обнуляется. Матрица B для системы Рабиновича-Фабриканта есть:

$$B = \begin{pmatrix} -\gamma - 2x_1 x_2 & 3x_1^2 - 3x_3 - 1 & 2x_2 x_3 \\ 1 - x_3 - x_1^2 & -\gamma & 2x_1 x_3 \\ -x_2 & -3x_1 & 2\alpha + 2x_1 x_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

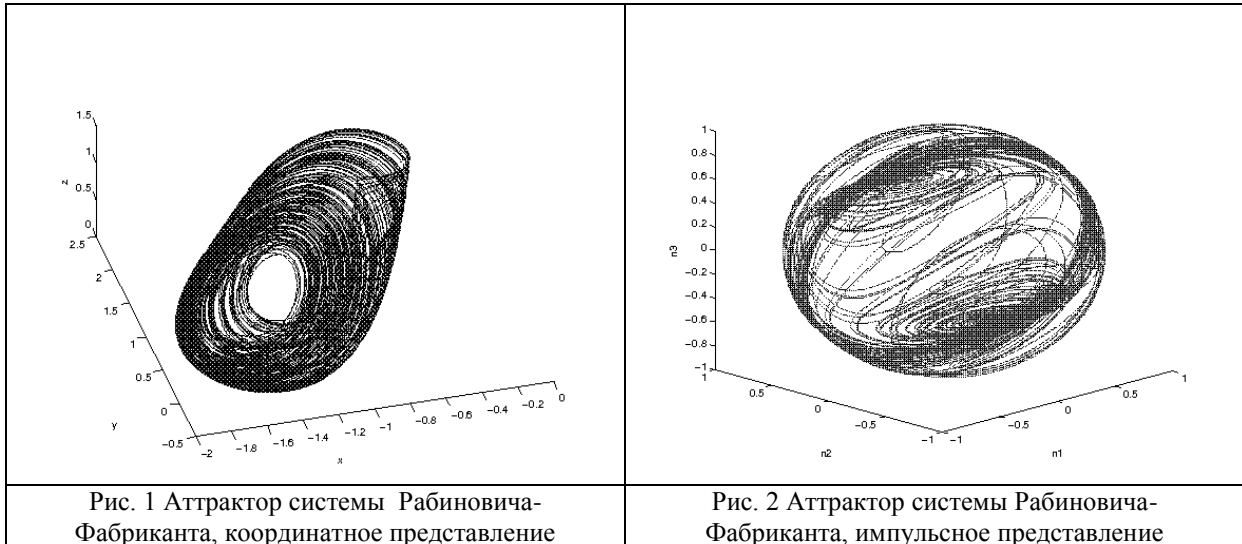
Уравнение (12) для логарифмического градиента амплитуды поля $X(x, t)$ в случае системы

Рабиновича-Фабриканта следующее:

$$\frac{dX}{dt} = \alpha - \gamma \quad (14)$$

Уравнение (14) характеризуют экспоненциальный рост во времени амплитуды поля в выделенной движущейся точке. Этот рост является отражением экспоненциального падения фазового объема со временем.

Фазовые портреты координатного и импульсного представлений для системы Рабиновича-Фабриканта представлены на рис. 1 и рис. 2.



Расчёт показателей (экспонент) Ляпунова

Спектр показателей Ляпунова характеризует устойчивость статистического ансамбля в фазовом пространстве. В силу диссипативности рассматриваемых систем, сумма показателей Ляпунова должна быть отрицательной. Благодаря условию диссипативности, аттрактор является притягивающим множеством нулевой меры в фазовом пространстве. Все точки, независимо от их начального положения, экспоненциально быстро приближаются к аттрактору и концентрируются на нём с течением времени.

Направление, задаваемое единичным вектором $\vec{n} = \frac{\vec{\pi}}{|\vec{\pi}|}$ вдоль логарифмического градиента, задает направление максимального сжатия фазового объема. В этом случае показатель Ляпунова наименьший (максимален по модулю и отрицателен). Направление максимального сжатия \vec{n} ортогонально другому направлению, которое определяется скоростью движения системы в фазовом пространстве: $\vec{V} = (F_1, F_2, F_3)$. Соответствующий единичный вектор есть: $\vec{v} = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}$. В этом направлении фазовый объем системы в среднем не сжимается и не расширяется, соответствующий показатель Ляпунова равен нулю. Наличие нулевого показателя является обязательным для любого аттрактора, кроме неподвижной точки, что связано с ограниченностью решений в координатном представлении. Можно показать, что возмущение, отвечающее сдвигу вдоль траектории, как раз, характеризуется нулевым показателем Ляпунова [1]. Наконец введём единичный вектор $\vec{\tau}$, который ортогонален двум первым. В направлении $\vec{\tau}$ фазовый объем в среднем расширяется, что соответствует положительному показателю Ляпунова. Наличие положительного показателя является характерной чертой странного аттрактора (в противном случае аттрактор не был бы «странным»). Именно положительный показатель Ляпунова приводит к возникновению в динамической системе неустойчивости и, соответственно, хаоса.

Введем проекторы, отвечающие трем представленным выше направлениям:

$$P_n = |n\rangle\langle n| = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} (n_1 \ n_2 \ n_3), P_v = |v\rangle\langle v| = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} (v_1 \ v_2 \ v_3), P_\tau = |\tau\rangle\langle \tau| = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3) \quad (15) \text{У}$$

казанные проекторы образуют ортогональное разложение единицы: $P_n + P_v + P_\tau = I$, здесь I - единичная матрица размерности 3×3 .

Соответствующие показатели Ляпунова в импульсном представлении определяются средними значениями оператора B в состояниях $|n\rangle$, $|v\rangle$, и $|\tau\rangle$. Мы хотим представить показатели Ляпунова в координатном пространстве, поэтому необходимо поставить общий знак «минус».

$$\lambda_3 = \lambda_n = -\langle\langle n|B|n\rangle\rangle = -\langle Tr(BP_n) \rangle, \lambda_2 = \lambda_v = -\langle\langle v|B|v\rangle\rangle = -\langle Tr(BP_v) \rangle, \lambda_1 = \lambda_\tau = -\langle\langle \tau|B|\tau\rangle\rangle = -\langle Tr(BP_\tau) \rangle \quad (16)$$

Здесь символ “Tr”, как обычно, означает след матрицы. Угловые скобки обозначают процедуру

усреднения по времени при движении точки по аттрактору.

Результаты численных расчетов показателей Ляпунова для аттрактора Рабиновича-Фабриканта:
 $\lambda_1 = 0.19872 \pm 0.00018$, $\lambda_2 = 0.0000056 \pm 0.00015$, $\lambda_3 = -0.65871 \pm 0.00018$

Полученные нами значения близки к значениям, полученным Дж. К. Шпроттом (Spratt J. C.) [12]
 $\lambda_1 = 0.1981$, $\lambda_3 = -0.6581$ (Spratt J. S.)

Аттракторы Лоренца Рёсслера и Рабиновича-Фабриканта являются фракталами. Фрактальная размерность Каплана-Йоррке (Kaplan-Yorke) имеет вид: $d_{KY} = 2 + \frac{\lambda_1}{|\lambda_3|}$
 $d_{KY} = 2.302$ для аттрактора Рабиновича-Фабриканта.

Выводы

Представлен метод дополнения произвольной классической динамической системы до квантовой системы. В качестве примера рассмотрена динамическая система Рабиновича-Фабриканта.

В терминах формализма Гамильтона-Якоби описано уравнение Шредингера для соответствующего квантового статистического ансамбля. Показано, что совместное рассмотрение взаимно-дополнительных координатного и импульсного описаний обеспечивает более глубокое понимание природы хаотического поведения в динамических системах. Новый формализм обеспечивает значительное упрощение расчетов показателей Ляпунова.

Результаты исследования имеют существенное значение для разработки квантовых симуляторов и компьютеров.

Данная работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (проект 13-07-00711), а также программой Российской академии наук в области фундаментальных исследований

Литература

1. Feynman R.P. Simulating physics with computers // Int. J. Theor. Phys. 1982. Vol. 21, № 6-7. P. 467–488.
2. Reck M. et al. Experimental realization of any discrete unitary operator // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73, № 1. P. 58–61.
3. Lloyd S. Universal Quantum Simulators // Science (80-). American Association for the Advancement of Science, 1996. Vol. 273, № 5278. P. 1073–1078.
4. Lanyon B.P. et al. Towards quantum chemistry on a quantum computer. // Nat. Chem. Nature Publishing Group, 2010. Vol. 2, № 2. P. 106–111.
5. Yu. I. Bogdanov and N. A. Bogdanova The study of Lorenz and Rössler strange attractors by means of quantum theory // Laser Physics 2015. V.25. 035203. 5p., arXiv:1412.2242 [nlin.CD].
6. Богданов Ю.И., Богданова Н.А., Кулько Д.Ю. Исследование устойчивости динамических систем методами квантовой информатики // Экономические и социально- гуманитарные исследования. 2015. №2(6). с.35-40.
7. Кузнецов С. П. Динамический хаос. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2006. 356 с. (Современная теория колебаний и волн).
8. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика / Пер. с англ.; ред. Д. Н. Зубарев. М.: Мир, 1964. 314 с.
9. Рабинович М.И., Фабрикант А.Л. Стохастическая автомодуляция волн в неравновесных средах // ЖЭТФ, 1979. Т. 77, вып. 2 (8). С. 617-629.
10. L. M. Hocking, K. Stewartson On the nonlinear response of marginally unstable plane parallel flow to a two-dimensional disturbance // Proc. R. Soc. London Ser. A. 1972. V 326. p.289-313.
11. N. R. Pereira, L. Stenflo Nonlinear Schrödinger equation including growth and damping // Phys. Fluids. 1979.V. 20. p.1733-1734.
12. Spratt J. C. Chaos and Time-Series Analysis. Oxford: Oxford University Press, 2003. 433 p.

MODELING OF CLASSICAL DYNAMICAL SYSTEMS BY MEANS OF QUANTUM PHYSICS METHODS

Yu. I. Bogdanov^{1,2,3}, N.A. Bogdanova²,
D.Yu. Kulko³, V.F. Luckichev¹

¹Institute of Physics and Technology of RAS

²National Research University of Electronic Technology MIET

³Moscow National Research Nuclear University “МЭФТИ”

A general approach to modeling of classical dynamical systems through their complement to quantum states is presented. As an example we consider the Rabinovich- Fabrikant dynamical system. The developed methods

and algorithms by using quantum simulators and computers will allow us to solve a wide range of problems that have scientific and practical significance.

О РЕГУЛЯРНЫХ СТРУКТУРНО УСТОЙЧИВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

д. ф.-м. н. Починка О.В.

Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики

Понятие грубой динамической системы родилось в Нижнем Новгороде (тогда Горьком) в 1937 году. А.А. Андронов и Л.С. Понтрягин рассматривали систему дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = v(x),$$

где $v(x)$ -- C^1 -векторных поле на плоскости, $x \in R^2$ и предложили назвать её *грубой*, если для любого достаточно малого в C^1 -метрике возмущения правой части системы, существует гомеоморфизм, близкий к тождественному отображению, который преобразует орбиты исходной динамической системы в орбиты возмущенной системы (возмущенная система *топологически эквивалентна* исходной посредством близкого к тождественному *сопрягающего гомеоморфизма*). В работе [1] для описанной динамической системы, заданной в круге, граница которого является кривой без контакта, был установлен следующий критерий грубости:

- 1) число состояний равновесия и периодических орбит конечно, и все они гиперболические;
- 2) нет седловых связок (траекторий, идущих из седла в седло).

Топологическая классификация (разбиение на классы эквивалентности по отношению топологической эквивалентности) структурно устойчивых *потоков* (динамические системы с непрерывным временем) на ограниченной части плоскости, и на двумерной сфере следует из результатов Е.А. Леонтович-Андроновой и А.Г. Майера 1937 и 1955 годов. В работах [2], [3] в действительности рассматривался более общий класс динамических систем и их классификация была основана на идеях Пуанкаре-Бендиксона о выделении множества специальных траекторий, относительное положение которых (*схема Леонтович-Майера*) полностью определяет качественную структуру разбиения фазового пространства динамической системы на траектории.

Основной трудностью в обобщении этого результата на случай произвольных ориентируемых поверхностей положительного рода является возможность нового типа движения -- *незамкнутая рекуррентная траектория*. Отсутствие таких траекторий для грубых потоков без особенностей на 2-торе была доказана А.Г. Майером в 1939 году. На самом деле в статье [4] он ввел понятие грубости для каскадов (дискретных динамических систем), нашёл условия грубости каскадов на окружности, а также получил их топологическую классификацию. Говоря современным языком, он доказал, что грубое преобразования окружности имеет конечное гиперболическое неблуждающее множество и класс его топологической сопряженности полностью определяется числом и периодом неблуждающих точек, а также порядковым числом, которое для сохраняющего ориентацию отображения определяется так. Пусть n и k – число и период периодических точек (все неблуждающие точки имеют одинаковый период) грубого преобразования окружности f и эти точки пронумерованы по часовой стрелке p_0, p_1, \dots, p_{2nk} ($p_0 = p_{2nk}$). Тогда число l такое, что $f(p_0) = p_{2nl}$, называется *порядковым числом* отображения f .

С таким успехом начавшиеся в Горьком исследования структурной устойчивости динамических систем, к сожалению прервались на двадцать лет и новый всплеск открытий в этой области был уже далеко-далеко от России – в Бразилии. В 1959 году М. Пейшото [5] ввёл понятие структурной устойчивости потоков, обобщающее понятие грубости. Поток f^t называется *структурно устойчивым*, если для любого достаточно близкого к нему потока g^t существует гомеоморфизм h , переводящий траектории системы f^t в траектории системы g^t . В определении грубого потока есть дополнительное требование C^0 -близости к тождественному отображению гомеоморфизма h . М. Пейшото доказал, что понятия грубости и структурной устойчивости для потоков на 2-сфере эквивалентны. В 1962 году Пейшото [6], [7] доказал, что условия 1), 2) выше, плюс условие

- 3) все ω - и α -предельные множества содержатся в объединении состояний равновесия и предельных циклов

являются необходимыми и достаточными для структурной устойчивости потока на произвольной ориентируемой замкнутой (компактной без края) поверхности и показал, что такие потоки плотны в пространстве всех C^1 -потоков.

Непосредственное обобщение свойств грубых потоков на ориентируемых поверхностях приводит к *системам Морса-Смейла* (непрерывным и дискретным). Неблуждающее множество такой системы

состоит из конечного числа неподвижных точек и периодических орбит, каждая из которых является гиперболической, а их устойчивые и неустойчивые многообразия пересекаются трансверсально. Своё название системы Морса-Смейла получили в 1960 году после работы [8] С. Смейла, где он представил потоки с указанными выше свойствами (на многообразиях размерности, большей 2) и доказал, что они удовлетворяют неравенствам аналогичные неравенства Морса. Приведём любопытную цитату из работы [8].

“Системы, удовлетворяющие условиям 1)-3), могут оказаться крайне важными по следующим причинам. (А) Кажется правдоподобным, что системы, удовлетворяющие условиям 1)-3), образуют открытое плотное множество в пространстве (с C^1 -топологией) всех векторных полей на замкнутом n -многообразии.

(В) Похоже, что условия 1)-3) необходимы и достаточны для того, чтобы поток был структурно устойчивым в смысле А. Андронова и Л. С. Понтрягина (1937).”

Позже, в 1969 году С. Смейл и Дж. Палис показали в [9], что системы Морса-Смейла являются структурно устойчивыми. Тем не менее, уже в 1961 году сам С. Смейл в [10] доказал, что такие системы не исчерпываются классом всех структурно устойчивых систем, построив структурно устойчивый диффеоморфизм на двумерной сфере с бесконечным множеством периодических точек. Этот диффеоморфизм известен теперь как *подкова Смейла*. Таким образом, обе гипотезы (А) и (В) оказались неверными для потоков на многообразии размерности большей двух. Однако системы Морса-Смейла активно изучаются, поскольку имеют тесную связь с топологией многообразия, на котором они заданы и являются адекватными моделями для описания структурно устойчивой регулярной динамики.

В 1971 в работе [11] М. Пейшото обобщил схему Леонтович-Майера для потоков Морса-Смейла на произвольных поверхностях, рассмотрев *ориентированный граф*, вершины которого находятся во взаимно однозначном соответствии с неподвижными точками и замкнутыми траекториями потока, а ребра соответствуют компонентам связности инвариантных многообразий неподвижных точек и замкнутых траекторий. Он доказал, что класс изоморфности (где изоморфизм сохраняет выделенные подграфы) такого ориентированного графа является полным топологическим инвариантом в классе систем Морса-Смейла на поверхностях.

В работе А. А. Ошемкова, В. В. Шарко [12] 1998 года отмечена неточность инварианта Пейшото, связанная с тем, что изоморфизм графов не различает типы разбиения на траектории для области, ограниченной двумя периодическими орбитами, а также предложена другая идея классификации. Именно, в качестве полного топологического инварианта потока Морса-Смейла без замкнутых траекторий было предложено использовать трёхцветный граф, вершины которого соответствуют треугольным областям, на которые несущая поверхность разбивается специальными траекториями потока, при этом две вершины графа инцидентны ребру, если границы соответствующих этим вершинам треугольных областей имеют непустое пересечение.

Каскады Морса-Смейла, заданные на 2-многообразиях, обладают новым, по сравнению с потоками, типом движения, связанным с возможностью пересечений инвариантных многообразий различных седловых точек – *гетероклинических пересечений*. Каскад Морса-Смейла называется *градиентно-подобным*, если его гетероклинические пересечения не содержат компонент связности, являющихся точками. Пусть $f^t: M^n \rightarrow M^n$ ($f: M^n \rightarrow M^n$) поток или градиентно-подобный диффеоморфизм на n -многообразии M^n . Возникает естественный вопрос “Будет ли комбинаторный объект, подобный ориентированному или трёхцветному графу, полным топологическим инвариантом для такой динамической системы?” Ответ оказался положительным для широкого класса систем Морса-Смейла:

- потоки на поверхностях (Е.А. Леонтович-Андронова, А.Г. Майер [2], [3]; М. Пейшото [11]; А.А. Ошемкова, В.В. Шарко [12])
- диффеоморфизмы поверхности с конечным числом гетероклинических орбит (А.Н. Безденежных, В.З. Гринес [13], [14]; В.З. Гринес [15]; В.З. Гринес, С.Х. Капкаева, О.В. Починка [16])
- потоки на 3-многообразиях (Дж. Флейтас [17]; Я.Л. Уманский [18])
- потоки и диффеоморфизмы без гетероклинических пересечений на n -мерной ($n > 3$) сфере (С.Ю. Пилюгин [19]; В.З. Гринес, Е.Я. Гуревич, В.С. Медведев [20]).

Топологическая классификация даже простейших диффеоморфизмов Морса-Смейла на 3-многообразиях не вписывается в концепцию выделения каркаса, состоящего из устойчивых и неустойчивых многообразий периодических орбит. Причина этого эффекта кроется прежде всего в возможности “дикого” поведения сепаратрис седловых точек. А именно, замыкание сепаратрисы может отличаться от сепаратрисы всего одной точкой, но не быть при этом даже топологическим подмногообразием. Первый диффеоморфизм с дикими сепаратрисами был построен Д. Пикстоном [21] в 1977 г. В работах Х. Бонатти, В. З. Гринеса, В.С. Медведева, Э. Пеку, О.В. Починки [22], [23] в 2000-2006 гг. была решена проблема топологической классификации каскадов Морса-Смейла на 3-многообразиях либо без гетероклинических точек, либо без гетероклинических кривых. Полная топологическая классификация для множества сохраняющих ориентацию диффеоморфизмов Морса-

Смейла, заданных на замкнутых ориентируемых 3-многообразиях получена в работах О. В. Починки [24], [25].

Литература

1. А.А. Андронов, Л.С. Понтрягин. Грубые системы. Доклады Академии наук СССР. 1937 14 (5): 247-250.
2. Е.А. Леонтович, А.Г. Майер. О траекториях, определяющих качественную структуру разбиения сферы на траектории. Докл. Акад. АН СССР. 1937 14 (5), 251-257.
3. Е.А. Леонтович, А.Г. Майер. О схеме, определяющей топологическую структуру разбиения на траектории. Докл. Акад. АН СССР. 1955. 103 (4), 557-560.
4. А.Г. Майер. Грубые преобразования окружности. Уч. Зап. ГГУ. 1939 Горький, публикации. ГГУ, 12, 215-229.
5. M. Peixoto. On Structural Stability. *Annals of Math.*, 69, 199-222.
6. M. Peixoto. Structural stability on two-dimensional manifolds. *Topology*. 1962. V. 1, 2, 101-120.
7. M. Peixoto. Structural stability on two-dimensional manifolds (a further remarks). *Topology*. 1963. V. 2, 2, 179-180.
8. S. Smale. Morse inequalities for a dynamical systems. *Bull. Am. math. Soc.* 1960. V. 66, 43-49.
9. J. Palis, S. Smale. Structural stability Theorems. *Proceedings of the Institute on Global Analysis, American Math. Society.* 1970. V. 14, 223-231.
10. S. Smale. A structurally stable differentiable homeomorphism with an infinite number of periodic points, Report on the Symposium on non-linear oscillations, Kiev Mathematical Institute, 1961.
11. M. Peixoto. On the classification of flows on two-manifolds. *Dynamical systems Proc. Symp. held at the Univ. of Bahia, Salvador, Brasil.* 1971. M. Peixoto (ed.) N.Y. London: Acad. press. 1973, 389-419.
12. А.А. Ошемков, В.В. Шарко. О классификации потоков Морса-Смейла на двумерных многообразиях, Матем. Сб., 189:8 (1998), 93-140.
13. А.Н. Безденежных, В. З. Гринес. Динамические свойства и топологическая классификация градиентно-подобных диффеоморфизмов на двумерных многообразиях. I. Методы качественной теории дифференциальных уравнений, Горьк. гос. ун-т, Горький, 1984, 22-38.
14. А.Н. Безденежных, В.З. Гринес. Динамические свойства и топологическая классификация градиентно-подобных диффеоморфизмов на двумерных многообразиях. II. Методы качественной теории дифференциальных уравнений, Горьк. гос. ун-т, Горький, 1987, 24-32.
15. В.З. Гринес. Топологическая классификация диффеоморфизмов Морса-Смейла с конечным множеством гетероклинических траекторий на поверхностях. Матем. заметки, 54:3 (1993), 3-17.
16. В. З. Гринес, С. Х. Капкаева, О. В. Починка. Трехцветный граф как полный топологический инвариант для градиентно-подобных диффеоморфизмов поверхностей. Матем. сб., 2014, том 205, номер 10, 19-46.
17. G. Fleitas. Classification of gradient-like flows on dimensions two and three. *Bol. Soc. Brasil Math.* 1975. V.6. 565-597.
18. Я. Л. Уманский. Необходимые и достаточные условия топологической эквивалентности трехмерных динамических систем Морса-Смейла с конечным числом особых траекторий. Матем. сб., 181:2 (1990), 212-239.
19. С. Ю. Пилюгин. Фазовые диаграммы, определяющие системы Морса-Смейла без периодических траекторий на сферах”, *Дифференц. уравнения*, 14:2 (1978), 245-254.
20. В. З. Гринес, Е. Я. Гуревич, В. С. Медведев. Граф Пейкшото диффеоморфизмов Морса-Смейла на многообразиях размерности, большей трех. *Дифференциальные уравнения и динамические системы, Сборник статей*, Тр. МИАН, 261, МАИК, М., 2008, 61-86.
21. D. Pixton. Wild unstable manifolds. *Topology*, 16:2 (1977), 167-172.
22. C. Bonatti, V. Grines, V. Medvedev, E. P'ecou, "Three-manifolds admitting Morse-Smale diffeomorphisms without heteroclinic curves", *Topology Appl.*, 117:3 (2002), 335-344.
23. Ch. Bonatti, V. Grines, O. Pochinka, "Classification of Morse-Smale diffeomorphisms with the chain of saddles on 3-manifolds", *Foliations 2005*, World Sci. Publ., Hackensack, NJ, 2006, 121-147.
24. О.В. Починка. Необходимые и достаточные условия топологической сопряженности каскадов Морса-Смейла на 3-многообразиях. *Нелинейная динамика*, 7:2 (2011), 227-238.
25. О.В. Починка. Классификация диффеоморфизмов Морса-Смейла на 3-многообразиях. Докл. РАН, 440:6 (2011), 747-750.

ON REGULAR STRUCTURAL STABLE DYNAMICAL SYSTEMS

O. V. Pochinka

Higher School of Economics National Research University

In this review we will focus on a traditional subject for Nizhny Novgorod school of non-linear oscillations -- the topological classification of the dynamical systems. This section of the qualitative theory is dedicated to finding of properties are preserving under the topological conjugacy and which are sufficient to construct a homeomorphism sending trajectories of one system to the trajectories of other one. We restrict attention to the structurally stable systems -- systems that do not change a class of the topological conjugacy after a small perturbation. First such continuous dynamical systems on the plane, as well as the notion of structural stability (roughness), were described by A. Andronov and L. Pontryagin in 1937. In the same year they were classified by Nizhny Novgorod mathematicians E. Leontovich-Andronov and A. Mayer. To date, significant progress is achieved in the topological classification of the structurally stable systems, both discrete and continuous, both regular and chaotic dynamics. In the paper we give results for regular systems, starting with the dynamic systems on a circle and finishing with systems on multidimensional manifolds.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕСТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЛГОРИТМОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

к.т.н. Соловьев Р.А., к.т.н. Тельпухов Д.В.,
Рухлов В.С., к.ф.-м.н. Щелоков А.Н.

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Увеличение надежности логических схем является одной из ключевых задач во многих отраслях промышленности. Множество исследователей занимаются этой проблемой. Разработано большое число алгоритмов для решения этой задачи [1-3]. Однако в большинстве своем, сравнение разработанных методов производится с методом Triple Modular Redundancy (TMR) [4]. В части работ не учитывается влияние надежности декодеров на общую надежность схем, так как считается, что декодеры или мажоритарные элементы не подвержены сбоям [5,6]. Однако в реальном маршруте проектирования это не верно, особенно для случаев, когда схема вместе с мажоритарными элементами синтезируется в рамках единой технологической библиотеки. Как следствие разработчикам трудно определить, какой из методов использовать для защиты микросхем, в связи с отсутствием явной классификации методов по их эффективности. Поэтому обычно выбор делается в пользу TMR – как самого простого метода. В данной работе предлагается автоматизированная система тестов (АСТ), которая будет ранжировать различные алгоритмы увеличения надежности по некоторому критерию, характеризующему их эффективность. Используя данные АСТ разработчики микроэлектронных схем смогут использовать методики, более продвинутые, чем TMR.

В работе приводится описание методики создания набора тестов, которые будут выступать своеобразным эталоном при сравнении различных алгоритмов защиты логических схем от сбоев. Тестовая система реализована на базе онлайн системы оценки решений SPOJ [7], которая разработана специально для ранжирования эффективности алгоритмов. Предполагается, что система будет использоваться различными группами исследователей, работающими над задачей защиты логических и арифметических схем. Для использования тестовой системы потребуется написать программу, реализующую разработанный метод и соответствующую формальным параметрам. Ценность тестовой системы будет тем выше, чем больше исследователей пришлют свои программные реализации алгоритмов для защиты схем. Программа на первом месте рейтинга будет считаться наиболее эффективной. Таким образом, независимые исследователи получат возможность сравнить свои результаты с результатами других групп, не вступая в непосредственный контакт.

1. Состав тестовой системы АСТ

Система АСТ состоит из:

- 1) формализованного описания задачи защиты логических схем в текстовом виде с картинками;
- 2) набора входных данных в машиночитаемом виде, закрытых от пользователя и доступных только для тестируемой программы. Входные данные – это, по сути, набор схем и данные о внешних условиях;
- 3) программы судьи, которая обрабатывает данные, поступившие от тестируемой программы и выдает количество полученных алгоритмом очков.

Поток данных в системе схематично представлен на рисунке 1. Пользователь не имеет доступа к точному набору входных данных, чтобы исключить подгонку алгоритма под конкретные схемы и конкретные условия окружающей среды. Пользователю дано только описание используемых схем и ограничения на входные данные.

2. Набор входных данных

Поскольку мы ориентируемся на современные средства разработки с методом проектирования на основе стандартных ячеек, то схемы можно задать в виде набора логических ячеек и связей между ними. Технологические библиотеки обычно содержат сотни элементов. Чтобы не усложнять чтение входных данных и последующее решение задачи, выберем только небольшую часть базовых ячеек, которые заведомо присутствуют в технологических библиотеках и которых достаточно для построения любой логической схемы: инвертор (INV), логическое «И», логическое «ИЛИ», «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ» и исключающее «ИЛИ».

Наряду с остальными параметрами в технологической библиотеке, такими как площадь (S), каждая стандартная ячейка может характеризоваться, в том числе и вероятностью отказа (P). Это нелинейный параметр, который может зависеть от ряда факторов, но для упрощения можно считать, что такой параметр задан однозначно, одним числом для каждого типа ячейки.

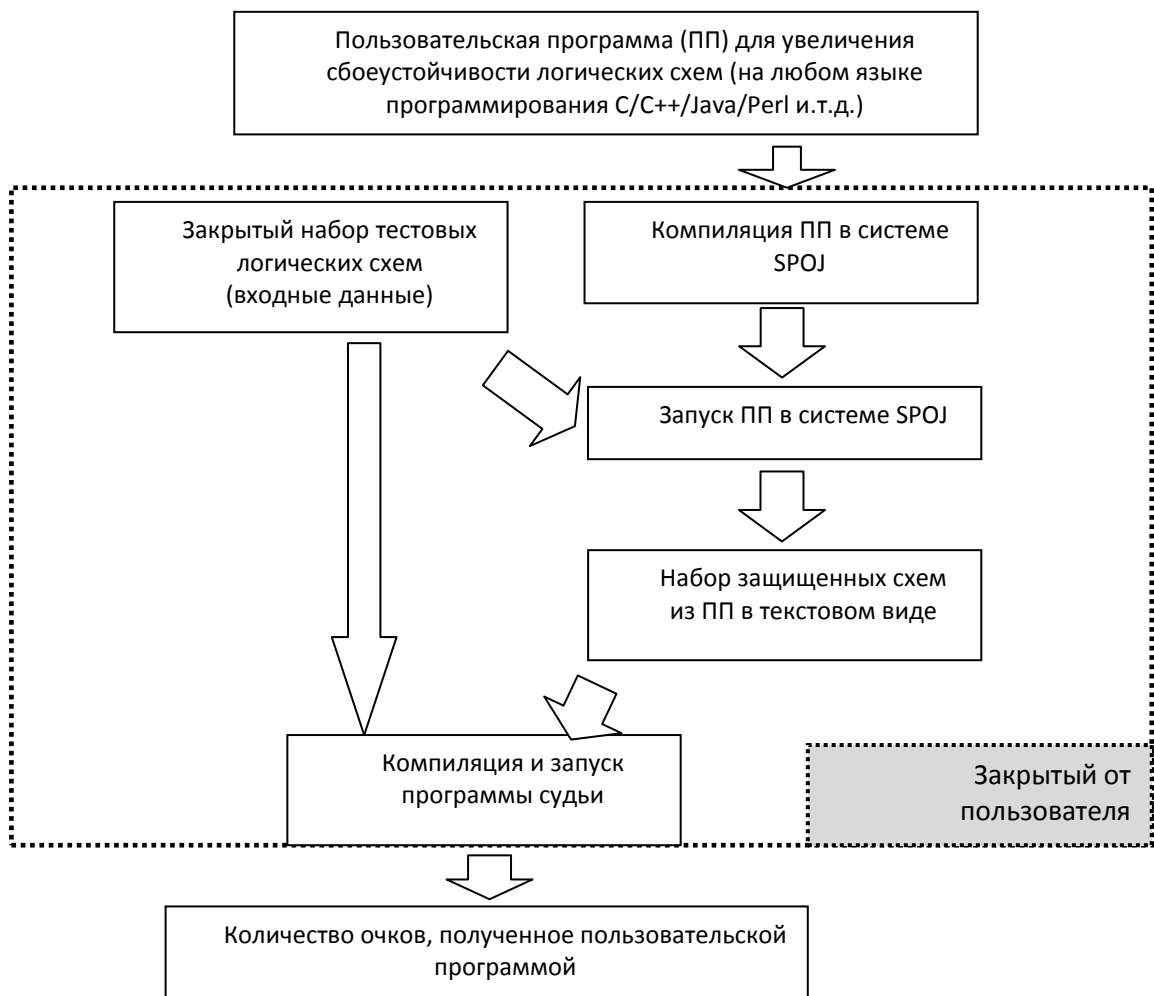


Рис. 1. Поток данных в системе АСТ

Задача увеличения надежности встает после проектирования первой версии схемы, когда известен её первоначальный размер. Из теории кодирования известно, что чем больше избыточность, тем большего показателя надежности схемы можно достичь, однако производственные нормы накладывают ограничения на максимальный размер проекта. В задаче будем считать, что для каждой схемы нам задано число K – во сколько раз площадь защищенной схемы может превышать исходную. K может изменяться в довольно широких пределах от 2 и выше.

Чтобы разработчики алгоритма не тратили время на чтение входных данных, данные подготовлены сразу в машиночитаемом формате. На первой строке указано число тестовых схем Z . Далее следует Z

схем, для каждой из которых, сначала заданы требуемые параметры технологической библиотеки. В первой строке K максимальная избыточность схемы по площади. На размер K требуется наложить некоторые ограничения, в нашем тестовом наборе $2 \leq K \leq 20$. В следующих 6 строках указаны по два числа площадь S ($1 \leq S \leq 100$) и вероятность сбоя q ($0 \leq q \leq 20$) в процентах, параметры каждого из логических элементов в следующем порядке: INV, AND, OR, NAND, NOR, XOR. А затем идет описание самой схемы в следующем формате:

- Число входов схемы: I ($0 < I \leq 250$), затем следует I названий входных узлов схемы не более 20 символов в каждом, разделенных пробелами.
- Число выходов схемы: O ($0 < O \leq 150$), затем следует O названий входных узлов схемы не более 20 символов в каждом, разделенных пробелами.
- Число логических вентилях в схеме N , после чего следуют N строк с описанием каждого вентиля. Описание каждого вентиля начинается с его типа (один из 6: INV, AND, OR, NAND, NOR, XOR), далее идут имена входных узлов, затем следует имя выходного узла. Входных узлов ровно два для каждого вентиля кроме инвертора, где входной узел один. Выходной узел всегда один для всех вентилях.

В целом описание схем, напоминает структурный Verilog, но сделанный в более удобном для чтения из программ виде.

3. Выходные данные

Программа, реализующая алгоритм защиты должна на основе исходной логической схемы (ИЛС) вывести модифицированную логическую схему (МЛС) которая выполняет ту же самую логическую функцию. То есть при любом наборе входных данных значения на всех выходах ИЛС и МЛС должны быть одинаковыми. Соответственно у МЛС должны быть в наличии все входные и выходные узлы, определенные в ИЛС. МЛС должна состоять из 6 типов элементов, определенных в библиотеке и её площадь не должна превышать площадь ИЛС более чем в K раз.

Формат вывода результирующей схемы похож на формат входных данных. На первой строке число N – количество логических элементов в МЛС. Далее следует N строк с описанием логических вентилях. Описание каждого вентиля начинается с его типа, далее имена входных узлов, затем имя выходного узла.

Такую схему требуется вывести для каждого из Z тестов.

4. Описание и генерация схем

Поскольку задача поставлена для защиты логических схем, то в наборе из тестовых схем используются только схемы без обратных связей. Для тестов было принято решение использовать схемы из известного бенчмарка ISCAS85 [8], а также несколько автоматически сгенерированных схем, поскольку набор ISCAS85 состоит всего из 11 схем, что недостаточно для полноценной тестовой системы. Некоторые схемы из набора ISCAS85 используются несколько раз, но с различными параметрами вероятности сбоя и избыточности. В реальности ошибки в схемах происходят крайне редко. Поскольку процесс моделирования ошибок будет запускаться много раз, то желательно пропускать те случаи, когда схема работает верно. Иначе на моделирование будет потрачено очень много времени. Поэтому для сочетания «библиотека плюс схема» необходимо подобрать вероятности таким образом, чтобы хотя бы одна ошибка вносилась в схему достаточно часто. И чтобы ошибок в схеме не было слишком много. Лучшим будет случай распределения близкого к нормальному, пик которого находится около значения одна ошибка на схему. В ходе исследований была разработана формула генерации вероятности для ячейки, чтобы выполнялись условия моделирования, близкие к требуемым.

$$P = \frac{1}{kN}, \quad (1)$$

где k – некий случайный коэффициент от 1 до 2, а N – число логических элементов в схеме. Количество ошибок на схему для всего тестового набора (даже для самых больших схем) редко превышает 12 и пик приходится на одиночную ошибку (SEU – single event upset) [12]. Для генерации случайных схем был разработан специализированный алгоритм. Для его реализации используется функция, которая принимает на вход два числа W и H – желаемую «длину» и «высоту» логической схемы.

1. Количество входов и выходов схемы берется как целое случайное число на промежутке от $H/2$ до H .
2. Генерируемая схема имеет W уровней, на каждом из которых число логических элементов считается по формуле $1 + \text{rand}(0, H-1)$
3. Тип логического элемента выбирается случайным образом из набора из 6 элементов: INV, AND, NAND, AND, NOR, OR, XOR.
4. Соединения между элементами выбираются следующим образом. В массив $wires$ помещаем все входные узлы. Далее двигаемся последовательно по уровням от входов к выходам схемы. Для входов элементов из каждого уровня случайным образом выбираем два различных элемента из массива $wires$

(для инвертора один элемент). По окончании этого процесса, для заданного уровня добавляем в массив *wires* все выходные узлы элементов из данного уровня. Повторяем процесс для всех уровней, включая выходные узлы схемы.

5. Система начисления очков

Для сравнения двух различных алгоритмов между собой, требуется сгенерировать защищенную версию исходной схемы каждым из алгоритмов. Затем промоделировать полученные схемы. Очевидно, что более эффективным можно считать алгоритм, который сгенерировал схему, количество отказов на выходах которой, в результате моделирования сбоеустойчивости будет меньше.

Для оценки алгоритмов используется метод Монте-Карло [9] и метрика *COF* (correct output factor) [10]. Метод Монте-Карло это статистический метод, который характеризуется числом запусков моделирования *TN*. Чем больше *TN* – тем более точными получаются результаты моделирования. Обычно используют *TN* от 1000 и выше. По итогам каждого отдельного моделирования возможно два результата: 1) на всех выходах схемы получены значения, совпадающие с эталоном – то есть сбоя не было или сбой не привел к некорректному функционированию схемы 2) хотя бы на одном выходе результат отличается от эталона – то есть в схеме произошел сбой, и он привел к неверному значению на выходе схемы.

Обозначим число сбойных тестов как *ET*. Тогда значение *COF* можно рассчитать по формуле:

$$COF = \frac{TN - ET}{TN} \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что значение *COF* лежит на промежутке от 0 до 1. Чем ближе значение к единице, тем более эффективно защищена схема. Надо также отметить, что в обычных условиях даже для схемы без защиты значение *COF* не равно 0. И даже для наиболее эффективно защищенных схем значение *COF* не равно единице из-за возможности сбоя на элементе, который присоединен к выходу.

Чтобы сравнить эффективность алгоритмов защиты недостаточно сравнить их работу только на одной схеме и при одних условиях работы. Для этого требуется некоторый набор тестовых схем. Так как значение *COF* нормировано на интервале от 0 до 1, то для сравнения достаточно посчитать эффективность *SCORE* как сумму COF_i для всех *TN* тестов:

$$SCORE = \sum_{i=0}^{TN} COF_i \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что значение *SCORE* находится на интервале от 0 до *N*.

6. Задача в системе SPOJ

Задача была реализована в системе SPOJ и доступна онлайн [11] для всех разработчиков алгоритмов для защиты логических схем от сбоев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00005а.

Литература

1. C. Huang. Robust Computing with Nano-scale Devices. – Springer, 2010. – P. 180.
2. J. Han, E. Leung, L. Liu, F. Lombardi. A Fault-Tolerant Technique using Quadded Logic and Quadded Transistors. – IEEE Transactions on VLSI Systems, 2014. – P. 1-5.
3. M. Poolakparambil, J. Mathew, A. Jabir. Multiple Bit Error Tolerant Galois Field Architectures Over GF(2^m). – Electronics, 2012. – P. 3-22.
4. C.A. Shubham, M.T. Kolte. Fault Tolerant and Correction System Using Triple Modular Redundancy. – International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, 2014. – V. 2. – P. 187-191.
5. Vial J. et al. Using TMR architectures for yield improvement //Defect and Fault Tolerance of VLSI Systems, 2008. DFTVS'08. IEEE International Symposium on. – IEEE, 2008. – С. 7-15.
6. Ebrahimi M., Miremadi S. G., Asadi H. ScTMR: A scan chain-based error recovery technique for TMR systems in safety-critical applications //Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011. – IEEE, 2011. – С. 1-4.
7. <http://www.spoj.com/info/>
8. Bryan D. The ISCAS'85 benchmark circuits and netlist format //North Carolina State University. – 1985.
9. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М-: Изд-во «Наука», 1973.-312 с.
10. А. Л. Стемпковский, Д. В. Тельпухов, Р. А. Соловьев, А. Н. Соловьев, М. В. Мячиков, Моделирование возникновения неисправностей для оценки надежностных характеристик логических схем // ЖУРНАЛ "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" №11, 2014, с. 30-36
11. <http://www.spoj.com/problems/ZRELY1/> - английская версия задачи
12. Dodd P. E., Massengill L. W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics //Nuclear Science, IEEE Transactions on. – 2003. – Т. 50. – №. 3. – С. 583-602.

AUTOMATIC TEST SYSTEM FOR THE EVALUATION OF LOGIC CIRCUITS RELIABILITY ENHANCEMENT ALGORITHMS

R.A. Soloviev, D.V. Telpukhov,
V.S. Rukhlov, A.N. Schelokov

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS

Description of the system which consists of special set of tests and a judge program is proposed. The system is used for comparing arbitrary algorithms of protection of logic circuits. The paper presents the details of the system and of the scoring methodology. Details of the judge program work are revealed. The developed test system is freely available online for all reliability professionals. The system ranks the algorithms and arranges them in a list according to their total score. The more points the algorithm received, the more reliable circuits based on the initial version it generated.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АЛГОРИТМАХ ВЫЧИСЛЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ НЕПРЕРЫВНОГО АРГУМЕНТА И НОВЫЙ КЛАСС СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

к.ф.-м.н. Бритенков А.К.¹, д.ф.-м.н. Степанов Н.С.²

¹ НРО РНТОРЭС им. А. С. Попова

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Ортогональные базисы на основе классических полиномов непрерывного аргумента (там, где гармонические ряды Фурье менее эффективны) позволяют широко применять их для различных задач описания негармонических сигналов. Однако прямое вычисление таких ортогональных функций приводит к возникновению неустойчивости вычислительного процесса, похожее на резонансные явления. Возникновение, затухание и использование счётной неустойчивости рассмотрено на примере функций Лагерра и Эрмита по аналогии с экстремальными волнами. Приведены способы вычислений функций высокого порядка, исключающие нарушение счётной устойчивости и накопление ошибки.

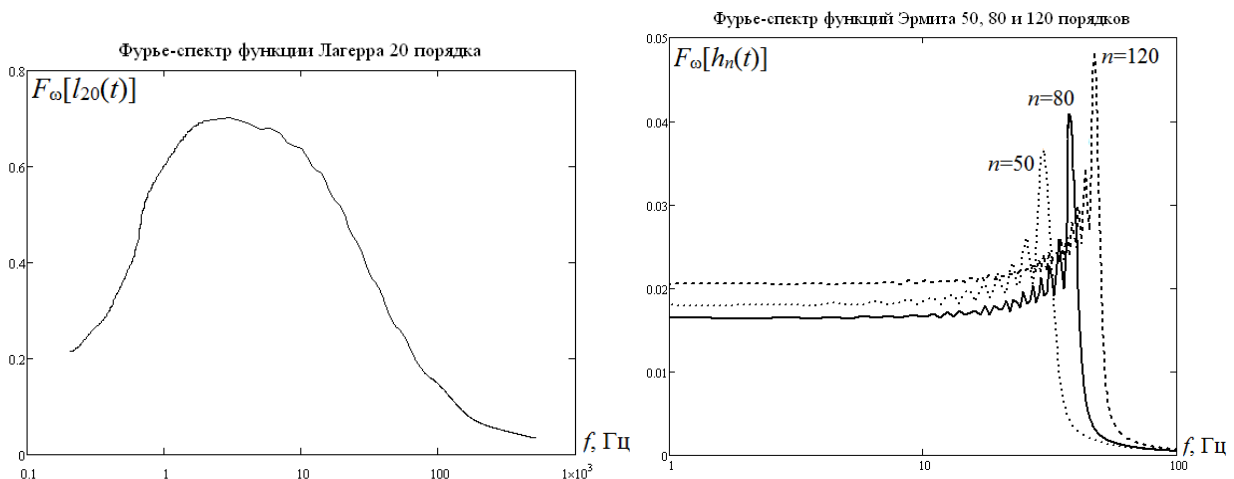


Рис. 1. Слева: спектральная плотность функции Лагерра $l_n(t)$, $n=20$, $m=1$.
Справа: нормированная спектральная плотность функций Эрмита $h_n(t)$, $n=50, 80, 120$.

Описание, распознавание и синтез сигналов с помощью классических ортогональных функций

Сравнение спектров гармонического Фурье-анализа (рис. 1) базисных функций высокого порядка [1] на основе классических полиномов непрерывного аргумента [2, 3], вибро-акустических [4, 5] и других сигналов [6] обнаруживает сходство некоторых таких функций [7] с подобными сигналами [8]. Многие ортогональные функции [3] напоминают реальные звуки, и на их основе удобно синтезировать соответствующие им сигналы [4, 9]. Так, функции Лагерра

$$l_n(t) = \sqrt{me}^{-0,5mt} \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!^3} (-mt)^k \quad (1)$$

идеальны для звуков типа звона колокола или выстрела из ружья, а функции Эрмита

$$h_n(x) = \sqrt{\exp(-x^2)} \sum_{k=0}^{[n/2]} \frac{(-1)^k n!}{k!(n-2k)!} (2x)^{n-2k} \quad (2)$$

похожи на мяуканье, или речевые фонемы. Функции Лагерра могут быть удобны также для переходных процессов, ЛЧМ-сигналов и сигналов вида $f(t)=1-\eta(t)$ (где $\eta(t)$ – функция Хевисайда) [8].

Нарушение ортогональности базисов непрерывного аргумента и дискретные квадратуры

Использование ортогональных систем связано с некоторыми вычислительными проблемами [5], в частности потерей ортогональности при численном интегрировании скалярного произведения $\xi_{n,m}=(\varphi_n(t)\varphi_m(t))$ – матрицы Грама (рис. 2).

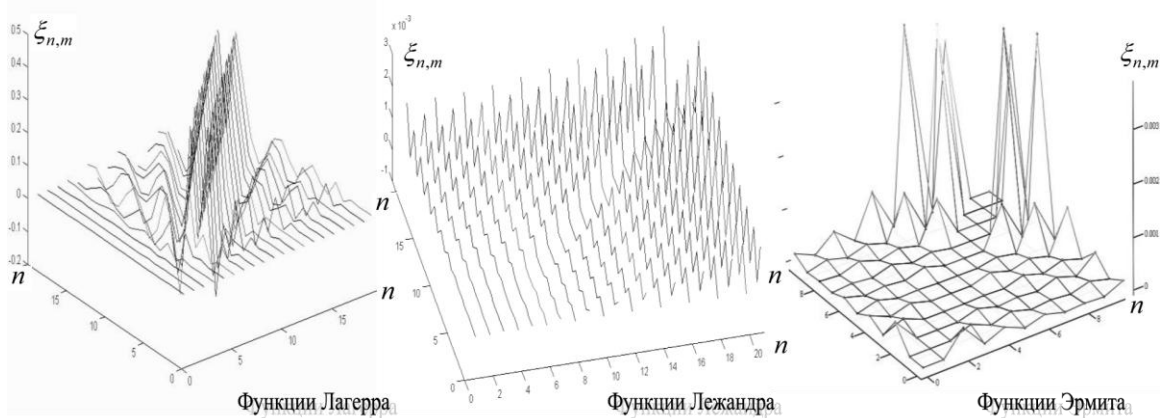


Рис. 2. Исследование нарушения ортогональности первых функций Лагерра, Лежандра и Эрмита ($n=1 \div 20$), вызванное численным интегрированием методом трапеций на отрезке $[0, 1]$ с шагом $d=0,1$

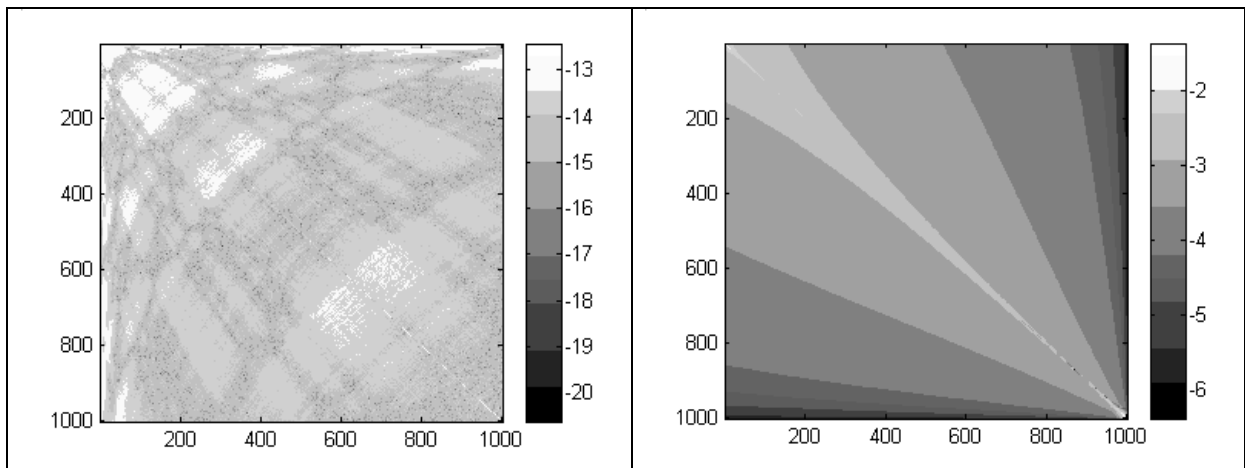


Рис. 3. Порядок ошибки вычисления элементов матрицы Грама $\xi_{n,m}$ для функций Лагерра ($0 \leq n < 1000$) методом Гаусса (справа) и методом прямоугольников (слева). Порядок ошибки нарушения ортогональности показан градациями серого, шкала ошибок приведена в правых столбцах у соответствующих матриц

Предложенная задолго до появления производительных вычислительных машин квадратурная формула Гаусса [5] аппроксимирует несобственные интегралы от функции вида $e^{-x}f(t)$, поэтому проблему потери ортогональности можно решить переходом к дискретному аналогу скалярного произведения:

$$\int_a^b x(t)y(t)p(t)dt = \sum_{i=1}^m x(t_i)y(t_i)w_i \quad (3)$$

на заданной сетке при специальном выборе узлов t_i и весов w_i для базиса $\varphi_n(t)=be^{-\alpha x}p_k$ на основе ортогонального полинома p_k с коэффициентом a_k при старшей степени [7], где b_k и a_k – некоторые константы. Согласно общим соотношениям [4] веса дискретного аналога скалярного произведения $\xi_{n,m}$

$$w_i = \frac{a_k(p_{k-1}(x_i), p_{k-1}(x_i))}{a_{k-1}p'_k(x_i)p_{k-1}(x_i)}. \quad (4)$$

Точность вычисления матрицы Грама (меры ортогональности) $\xi_{n,m}$ методом квадратур Гаусса–Лагерра (3) по сравнению с методом прямоугольников превышает 9 порядков (рис. 3) [5].

Потеря счётной устойчивости при вычислении функций высокого порядка

Прямое вычисление функций высокого порядка (1, 2) приводит к счётной неустойчивости (рис. 4-6) и искажению формы вычисляемых функций. Это явление, обнаруженное также и в пакетах прикладных программ для наиболее употребительных специальных функций, позволяет говорить о новом классе объектов (детерминированных процессах), в которых возможно возникновение динамического хаоса.

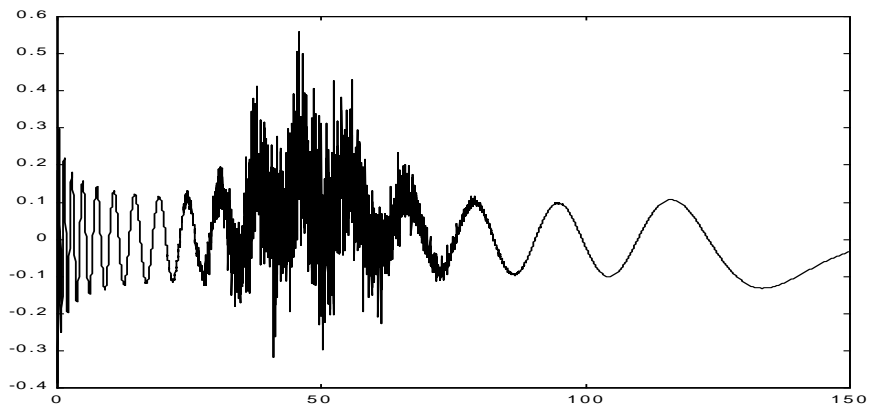


Рис. 4. Потеря счётной устойчивости и искажение формы функции Лагерра при вычислении $l_n(t)$ напрямую из (1), $n=35, m=1$

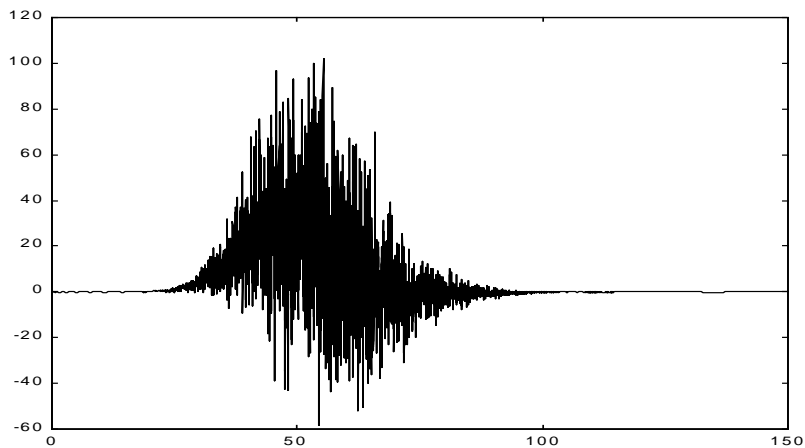


Рис. 5. Потеря счётной устойчивости и искажение формы функции Лагерра $l_n(t)$, вычисленной напрямую по формуле (1) при $n=40, m=1$

Проблемы вычисления классических ортогональных функций высокого порядка характерны для всех типов полиномов и функций на их основе [1, 3], так же как и проблемы вычисления скалярного произведения на дискретной сетке (рис. 1). Это объясняется принадлежностью таких ортогональных систем к единому классу функций [3]. Кроме того, одни ортогональные функции на основе классических ортогональных полиномов выражаются через другие. Так, функцию Эрмита (рис. 6), записанную в явном виде (2), можно выразить через функции Лагерра [2]. Поэтому потеря счётной устойчивости при

вычислении классических ортогональных функций высокого порядка (как и нарушение ортогональности) является препятствием для их эффективного использования в описании и синтезе сигналов.

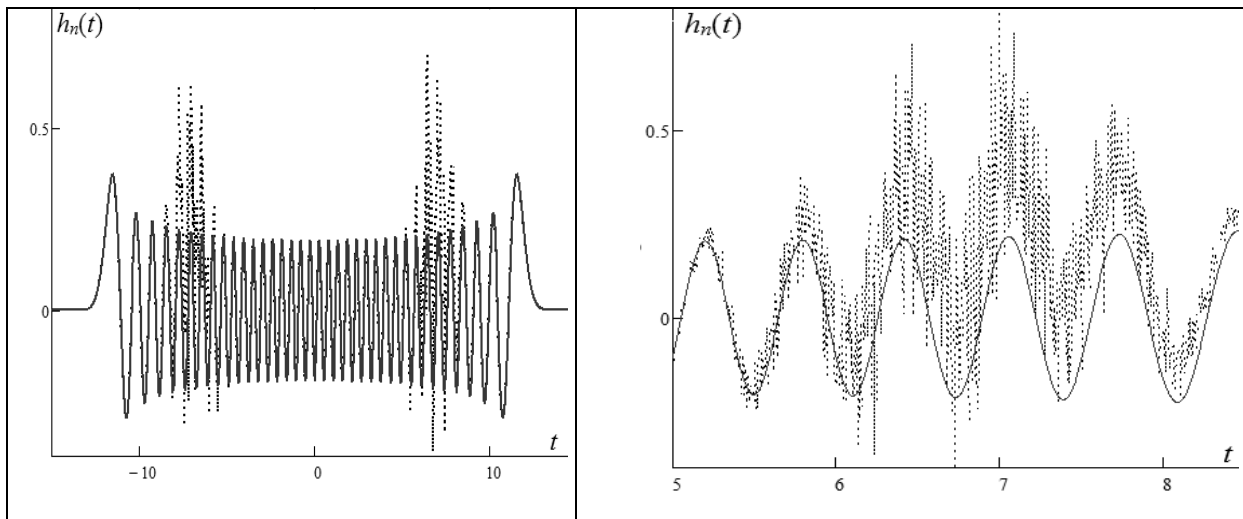


Рис. 6. Искажение функции Эрмита $h_n(t)$, $n=70$ (сплошная линия). Число нулей вычисленной напрямую (2) функции (пунктир) на небольшом отрезке (справа) многократно превышает её порядок

Устойчивое вычисление ортогональных функций Лагерра по рекуррентным формулам (когда $\varphi_i(t) = a\varphi_i(t) + b\varphi_{i-1}(t) + c$) [7, 10] реализовано в разработанном А.Н. Панкратовым алгоритме с использованием затухания (отрицательной обратной связи) в рекуррентном процессе [5]. В этом алгоритме на каждом шаге итерационного процесса вычисляемые величины $\varphi_i(t)$, $\varphi_{i-1}(t)$ умножаются на $e^{-t/2n}$, где n – порядок функции (1). За n циклов общий множитель составляет $e^{-t/2}$, т.е. величину весового множителя для определения функции (1), что снимает ограничения на максимальный порядок вычисляемой функции [9].

Потеря счётной устойчивости как динамический хаос детерминированной системы

Детерминированный хаос вычислительного процесса функции Лагерра (и производных от неё) (рис. 6) можно применить для генерации псевдослучайных или шумоподобных сигналов (рис. 7). Такой генератор можно реализовать, например, произвольно задавая порядок вычисляемой функции. Нормализацию размаха амплитуды функции на выходе счётного алгоритма можно производить стандартными методами обработки, принятыми в радиотехнике [10].



Рис. 7. Функция Лагерра l_n , вычисленная на отрезке $[40, 40+\delta]$ по формуле (1) для $n=40$, $m=1$, $\delta=3 \cdot 10^{-12}$. Число нулей функции $l_n(t)$ на отрезке многократно превышает порядок образующего её полинома $L_n(t)$.

Классические ортогональные функции непрерывного аргумента [1, 3, 6, 7] эффективны в различных практических приложениях [8–11]. Однако, как показали исследования функций Лагерра и Эрмита, для обеспечения устойчивости вычислений таких функций следует использовать специальные алгоритмы [5] для устранения описанных эффектов нарушения ортогональности и потери счётной устойчивости.

Литература

1. Обобщённый спектрально-аналитический метод обработки информационных массивов. Задачи анализа изображений и распознавания образов / Ф.Ф. Дедус [и др.] – М.: Машиностроение, 1999. – 357 с.

2. Справочник по специальным функциям / под ред. Абрамовица М. и Стиган И. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
3. Kazuhiko, A. Theory of Hypergeometric Functions / A. Kazuhiko, K. Michitake // Springer Monographs in Mathematics Series. – 2011. – Vol. 305. – 317 p.
4. Эмпирические ортогональные функции в гидроакустических экспериментах / А.Л. Вировлянский [и др.] // Тез. докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. «Методы и средства измерения физических величин». – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1998. – С. 33.
5. Britenkov, A.K. Stable algorithms of adaptive approximation for acoustic signals description by orthogonal polynomials / A.K. Britenkov, A.N. Pankratov // Physics of Wave Phenomena. – 2004. – Vol. 12(3). – P. 168–174.
6. Горелик, Г. С. Колебания и волны / Г. С. Горелик. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.
7. Никифоров, А.Ф. Специальные функции математической физики / А.Ф. Никифоров, В.Б. Уваров. – М.: Наука, 1984. – 344 с.
8. Бритенков, А.К. Подавление мультипликативных помех с помощью обобщённого спектрально-аналитического метода в условиях дискретных отражений / А.К. Бритенков, А.Н. Панкратов // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия «Радиофизика». – Н.Новгород, 2006. – Вып. № 1(4). – С. 50–57.
9. Бритенков, А.К. Анализ звуковых и вибрационных сигналов с помощью обобщённого спектрально-аналитического метода / А.К. Бритенков, Н.С. Степанов // Машиностроение и инженерное образование. – 2014. – Вып. № 3. – С. 20–31.
10. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
11. Shen, J. Stable and Efficient Spectral Methods in Unbounded Domains Using Laguerre Functions // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 2000. – Vol. 38(4). – P. 1113-1133.

THE APPEARANCE OF INSTABILITY IN DETERMINISTIC CALCULATING ALGORITHM FOR THE CLASSICAL ORTHOGONAL FUNCTIONS OF CONTINUOUS ARGUMENTS AND NEW CLASS OF DYNAMIC CHAOS

A.K. Britenkov¹, N.S. Stepanov²

¹Nizhny Novgorod Regional Division of Scientific and Technical Society of
Radio Engineering, Electronics and Communication n. a. A.S. Popov
²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Fourier-analysis used traditionally in signal processing is not always effective for short signals description. To use orthogonal functions on base classical polynomials which are the cornerstone of Generalized Spectral Analytical Method in vibroacoustics tasks and researching similar signals is more optimal. However experimental signals description using such orthogonal functions can face certain problems in numerical realization. The appearance of the attenuation and the use of the counting instability considered by the example of Hermite and Laguerre functions by analogy with extreme waves. A stable and efficient algorithm has been suggested to solve the situation with orthogonality violating in numerical realization and losing calculation stability. Accuracy of the described algorithm is higher by several orders analogues ones.

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ ФЕЙНМАНА ОТ ЭКСПОНЕНТ С ПОЛИНОМАМИ ЧЕТВЁРТОГО ПОРЯДКА В ПОКАЗАТЕЛЕ

к.ф.-м.н. Кравцева А.К., д.ф.-м.н. Смолянов О.Г., д.ф.-м.н. Шавгулидзе Е.Т.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В работе рассматривается задача бесконечномерного анализа. А именно, строится асимптотическое разложение фейнмановского интеграла от функционала, имеющего экспоненциальный вид с полиномом четвёртого порядка в показателе. Рассматривается определение интеграла Фейнмана в смысле аналитического продолжения [1,2]. Решения широкого класса эволюционных уравнений, например, уравнение Шрёдингера и уравнение теплопроводности, представляются функциональными интегралами. Такие представления были получены в работах [1,2,5-11] и других. Результаты данной работы могут быть использованы при исследовании квазиасимптотик в квантовой физике, для вычисления асимптотики интегралов, возникающих в квантовой теории поля [3,4], в частности, для асимптотики интегралов, описывающих решения эволюционных уравнений.

Пусть $F(\lambda) = \int_H e^{-i\lambda Q(x)} G(x) e^{-i\lambda(T^{-1}xx)/2} dx$, где H – вещественное гильбертово сепарабельное пространство, T – самосопряжённый, положительно-определённый ядерный оператор,

$Q(x) = \sum_{k=0}^4 m_k(x)$, $G(x) = \sum_{k=0}^p n_k(x)$, λ – большой положительный параметр. Пусть также $H^{\mathbb{C}}$ – комплексификация пространства H . Предполагается, что m_k и n_k – однородные полиномы степени k , т. е. для каждого k найдутся полилинейные непрерывные симметричные отображения $M_k: H \times \dots \times H \rightarrow \mathbb{R}$, $N_k: H \times \dots \times H \rightarrow \mathbb{R}$ такие, что $m_k(x) = M_k(x, \dots, x)$, $n_k(x) = N_k(x, \dots, x)$. Пусть для произвольного вектора $x \in H$, отличного от нулевого, $m_4(x) > 0$; для всех $x, y \in H$ $(m_4(x+y))^{1/4} \leq (m_4(x))^{1/4} + (m_4(y))^{1/4}$ и $m_4(x) \leq \|x\|^4$.

Далее будем использовать определение аналитического разложения в смысле Пуанкаре, приведённое в монографии [12], для случая, когда параметр λ стремится к бесконечности.

Определение 1. Последовательность $\{\varphi_n(\lambda)\}$ называется асимптотической при $\lambda \rightarrow \infty$, если при любом целом $n \geq 0$ $\varphi_{n+1}(\lambda) = o(\varphi_n(\lambda))$ при $\lambda \rightarrow \infty$.

Определение 2. Пусть $\{\varphi_n(\lambda)\}$ – асимптотическая последовательность при $\lambda \rightarrow \infty$. Функция $f(\lambda)$ разлагается в асимптотический ряд $f(\lambda) \sim \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(\lambda)$ при $\lambda \rightarrow \infty$, где a_n – постоянные, если при любом целом $N \geq 0$ $f(\lambda) - \sum_{n=0}^N a_n \varphi_n(\lambda) = o(\varphi_N(\lambda))$ при $\lambda \rightarrow \infty$.

Пусть для любого гильбертова пространства V символ $B(V)$ обозначает пространство линейных ограниченных по норме операторов на этом пространстве. Через символ ν_A будем обозначать семейство гауссовских мер на $H^{\mathbb{C}}$ нулевыми средними и корреляционными операторами $A^{-1}T(A^*)^{-1}$, где A – обратимый оператор, принадлежащий пространству $B(H)$.

Определение 3. Будем называть функцию $g: B(H^{\mathbb{C}}) \times \mathbb{C} \times H \rightarrow \mathbb{C}$ интегрируемой по мере Фейнмана, если в некоторой непустой области $V \subset B(H) \times B(H) \times \mathbb{R}$ функция $G(A, B, \lambda) = \int_H g(B, \lambda, x) \nu_A(dx)$ определена, т. е. данный интеграл существует, и обладает аналитическим продолжением в некоторую область $W \subset B(H^{\mathbb{C}}) \times B(H^{\mathbb{C}}) \times \mathbb{C}$, содержащую область V . Величину этого аналитического продолжения при комплексных A, B, λ называют интегралом Фейнмана от функции g и обозначают через $\int_H g(B, \lambda, x) e^{-(T^{-1}Ax, Ax)/2} dx$.

Теорема. Предположим, что существует $z_0 \in H^{\mathbb{C}}$ такое, что $Q'(z_0) + T^{-1}z_0 = 0$. Пусть после замены $x = \tau z_0 + y$ многочлен $Q(x)$ переходит в многочлен $\sum_{k=0}^4 r_k(\tau, y)$, многочлен $G(x)$ – в многочлен $\sum_{k=0}^p g_k(\tau, y)$. Пусть также $r_2(\tau, y) = (\tilde{B}(\tau)y, y)/2$ и $\|\tilde{B}(\tau)\| \leq 1/(4\|T\|)$. Тогда существует обратимый непрерывный оператор A , действующий в $H^{\mathbb{C}}$ такой, что $F(\lambda)$ соответствует асимптотический ряд

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} (1/k!) (-i/\lambda)^k T r T \left(T r T \left(\dots T r T \left(\left(\sum_{k=0}^p g_k(1, A^{-1}x) \right) e^{i\lambda \sum_{k=3}^4 r_k(1, A^{-1}x)} \right) \right) \right) \right) \Big|_{x=0} \Big) \times e^{-i\lambda Q(z_0) - i\lambda(T^{-1}z_0, z_0)/2} \left(1 / \sqrt{\det(I + T\tilde{B}(1))} \right)$$

Схема доказательства.

Используя аналитичность, в интеграле $F(\lambda)$ сделаем замену $x = z_0 + y$:

$$F(\lambda) = \left(1 / \sqrt{\det(I + T\tilde{B}(1))} \right) e^{-i\lambda Q(z_0) - i\lambda(T^{-1}z_0, z_0)/2} \times \int_H e^{-i\lambda(\sum_{k=3}^4 r_k(1, y))} \left(\sum_{k=0}^p g_k(1, y) \right) e^{-i\lambda((T^{-1}x, x) + (\tilde{B}(1)y, y))/2} dy$$

Существует обратимый оператор $A \in B(H^{\mathbb{C}})$ такой, что $i((T^{-1} + B)y, y) = (T^{-1}Ay, Ay)$. Заменяем теперь оператор A вещественным оператором из $B(H)$, i – положительным числом β , и применим к полученному интегралу формулу Тейлора с остаточным членом в интегральной форме. Используя аналитичность по оператору A и числу β и применяя теорему о существовании интеграла Фейнмана и его представление в виде гауссовского интеграла в случае, когда подынтегральная функция имеет вид экспоненты от полинома, из работы [2] к остаточному члену, получаем утверждение теоремы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-01-00516 А).

Литература

1. О.Г. Смолянов, Е.Т. Шавгулидзе, Континуальные интегралы, М.: ЛЕНАНД, 2015.

2. A.K. Kravtseva, Infinite-dimensional evolution equations and their presentation of their solutions in the form of Feynman integrals, Russian Journal of Mathematical Physics, 2013, 20, 2, pp. 189-213.
3. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков, Введение в теорию квантованных полей, М.: Наука, 1984.
4. J. Glimm, A. Jaffe, Quantum Physics: A Functional Integral Point of View, Springer-Verlag New York Inc., 1987.
5. О.Г. Смолянов, Е.Т. Шавгулидзе, Бесконечномерные уравнения Шрёдингера с полиномиальными потенциалами и интегралы Фейнмана по траекториям, Доклады РАН, 2006, 408, №1, с. 28-33.
6. Я.А. Бутко, Формулы Фейнмана и функциональные интегралы для диффузии со сносом в области многообразия, Математические заметки, 2008, 83, № 3, с. 333-349.
7. О.Г. Смолянов, Н.Н. Шамаров, М. Клеппасси, Формулы Фейнмана-Каца и Фейнмана для бесконечномерных уравнений с оператором Владимирова, Доклады РАН, 2011, 438, №5, с. 609-614.
8. С. Альбеверлио, О.Г. Смолянов, Бесконечномерные стохастические уравнения Шрёдингера-Белавкина, Успехи математических наук, 1997, 52, №4, с. 197-198.
9. H. Doss, Sur une resolution stochastique de l'equation de Schrodinger a coefficients analytiques, Communications in Mathematical Physics, 1980, 73, №3, pp. 247-264.
10. О.Г. Смолянов, А. Трумен, Уравнения Шрёдингера-Белавкина и ассоциированные с ними уравнения Колмогорова и Линдблада, Теоретическая и математическая физика, 1999, 120, №2, с. 193-207.
11. О.Г. Смолянов, Д.С. Толстыга, Формулы Фейнмана для стохастической и квантовой динамики частиц в многомерных областях, Доклады РАН, 2013, 452, №3.
12. М.В. Федорюк, Асимптотика: Интегралы и ряды, М.: Наука, 1987.

ASYMPTOTIC EXPANSIONS OF FEYNMAN INTEGRALS OF EXPONENTIALS WITH FOURTH-POWER POLYNOMIALS IN THE INDEX

A.K. Kravtseva, O.G. Smolyanov, E.T. Shavgulidze

Lomonosov Moscow State University

The asymptotic expansion of Feynman integral of the exponential functional with a fourth-power polynomial in the index are constructed. The definition of Feynman integral in a sense of analytic continuation is considered.

СЕМЕЙСТВО КВАЗИИНВАРИАНТНЫХ МЕР В ПРОСТРАНСТВЕ ТРАЕКТОРИЙ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГРУППЫ ДИФФЕОМОРФИЗМОВ

Романов Е.Д.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Введение

В докладе предъявляется семейство борелевских мер, квазиинвариантных относительно стандартного действия достаточно гладких диффеоморфизмов d -мерного евклидова пространства \mathbb{R}^d . Меры строятся на пространстве $\Omega = C^2([0,1], \mathbb{R}^d) \times C^1([0,1], M_d^+)$, где под M_d^+ понимается множество всех невырожденных вещественных матриц размера $d \times d$. В качестве геометрической интерпретации пространства Ω можно предложить множество гладких траекторий конечномерного евклидова пространства, вдоль которых определён нигде не вырожденный координатный репер; диффеоморфизмы можно понимать как гладкие замены координат в исходном пространстве. Тогда рассматриваемое действие будет отвечать указанной интерпретации, а именно диффеоморфизмы будут переводить траекторию в её образ, а на матричную компоненту действовать посредством дифференциала.

Идея построения данного семейства мер принадлежит Е.Т. Шавгулидзе. Основным результатом автора является получения явного аналитического вида производной Радона-Никодима построенных мер и доказательство неприводимости некоторых индуцированных представлений группы диффеоморфизмов. Кроме того, в докладе пойдёт речь о применении стохастического интеграла Ито, которое позволяет упростить доказательство и сформулировать результат для более широкого класса диффеоморфизмов. Данная техника представляет интерес и в связи с функциональными интегралами по траекториям, в частности с интегралом Фейнмана.

Квазиинвариантные меры тесно связаны с функциональными интегралами на пространствах траекторий. Группа диффеоморфизмов и её представления достаточно широко используется в физических теориях, например в связи с принципом общей ковариантности или с симметриями в

калибровочных теориях, в частности в теории Янга - Миллса. О связи с группой петель можно прочитать в [1]. Исследования мер, квазиинвариантных относительно действия групп диффеоморфизмов многообразий, и связанных с ними представлений, начались в начале 1970-х годов в работе Р.С. Исмагилова, где рассматривались квазиинвариантные меры на множестве сходящихся последовательностей на окружности [2]. В статье А.М. Вершика, И.М. Гельфанда, М.И. Граева [3] строилась мера на пространстве конфигураций на многообразии. В работах Е.Т. Шавгулидзе [4,5,6] квазиинвариантные меры строятся на множествах диффеоморфизмов отрезка. В статье А.А. Досовицкого [7] рассматривались меры на множестве кусочно-гладких гомеоморфизмов окружности и связанные с ними представления.

Конструкция меры

Согласно сказанному выше, группа диффеоморфизмов действует на Ω по формуле:

$$L_g: \Omega \rightarrow \Omega : (x(t), X(t)) \rightarrow (g(x(t)), g'(x(t))X(t)), \quad g \in \text{Diff}^1(\mathbb{R}^d).$$

Для построения меры выбирается базовое пространство $\Omega_I = C^1([0,1], \mathbb{R}^d) \times C([0,1], M_d) \times \mathbb{R}^d \times M_d^*$, где под M_d понимается множество всех матриц без условия новорожденности. На этом пространстве задаётся базовая мера $\mu = \mu_1 \otimes \mu_2 \otimes \mu_3 \otimes \mu_4$ путём выбора произвольной радоновой меры μ_1 на первой компоненте Ω_I , стандартной винеровской меры W в качестве μ_2 на второй и произвольных, достаточно хороших (например, гауссовских) μ_3 и μ_4 на оставшихся. Возможность задания различных базовых мер порождает в результате некоторое семейство. С пространства Ω_I на пространство Ω мера поднимается с помощью биекции:

$$\Phi: \Omega \rightarrow \Omega_I: (x(t), X(t)) \rightarrow (X^{-1}(t)x'(t), X^{-1}(t)X'(t), x(0), X(0)), \quad t \in [0,1].$$

Обратное отображение задаётся формулой:

$$\Phi^{-1}: (z(t), Z(t), \hat{z}, \hat{Z}) \rightarrow (x(t), X(t)) = (\hat{z} + \hat{Z} \int_0^t T(\tau) z(\tau) d\tau, \hat{Z}T(t)), \quad t \in [0,1],$$

где $T(t) = T \exp(\int_0^t Z(\tau) d\tau)$ суть оператор хронологической экспоненты [8].

С помощью отображения Φ можно перенести L_g на Ω_I , положив $\tilde{L}_g(z, Z, \hat{z}, \hat{Z}) = L_g(\Phi(x, X))$. Кроме того, отображение Φ подобрано таким образом, что на первой компоненте пространства Ω_I порождается им действие тождественно, а на второй вносит лишь малую, в некотором смысле, аддитивную добавку Q . Более точно, для $g \in \text{Diff}^2(\mathbb{R}^d)$

$$(u, U, \hat{u}, \hat{U}) = \tilde{L}_g(z, Z, \hat{z}, \hat{Z}), \quad \begin{cases} u(t) = z(t) \\ U(t) = Z(t) + Q(t) = Z(t) + X^{-1}(t) (g'(x(t)))^{-1} \left(\frac{d}{dt} g'(x(t)) \right) X(t) \\ \hat{u} = g(\hat{z}) \\ \hat{U} = g'(\hat{z})\hat{Z} \end{cases}$$

Считая выбор базовых мер μ_i фиксированным, будем обозначать меру на Ω_I через μ , а на Ω через ν . Под действием L_g мера μ переходит в μ^g , а мера ν , уже под действием \tilde{L}_g - в ν^g . Кроме того будем считать, что на последних двух компонентах пространства Ω_I выбраны меры μ_3 и μ_4 с всюду положительными плотностями ρ_3 и ρ_4 соответственно.

В качестве группы G рассмотрим $g \in \text{Diff}^2(\mathbb{R}^d)$ такие, что g''' - локально ограниченная измеримая функция. Тогда имеет место

Теорема 1. Существует -почти всюду определённая производная Радона-Никоидима $\frac{d\nu^g}{d\nu}$, причём

$$\frac{d\nu^g}{d\nu}(x, X) = \frac{d\mu^g}{d\mu}(z(x, X), Z(x, X), \hat{z}(x, X), \hat{Z}(x, X))$$

$$\frac{d\mu^g}{d\mu}(z, Z, \hat{z}, \hat{Z}) = \frac{\rho_3(g(\hat{z})) \rho_4(g'(\hat{z})\hat{Z})}{\rho_3(\hat{z}) \rho_4(\hat{Z})} |g'(\hat{z})|^2 e^{-\frac{1}{2} \int_0^1 \text{tr} Q'(t) Q'^T(t) dt} - \int_0^1 Q'(t) dZ^T(t),$$

где $\int_0^1 Q'(t) dZ^T(t)$ существует -почти всюду и понимается как стохастический интеграл Ито [9].

Легко видеть, что $\frac{d\mu_1^g}{d\mu_1} = 1$, $\frac{d\mu_3^g}{d\mu_3} = \frac{\rho_3(g(\hat{z}))}{\rho_3(\hat{z})} |g'(\hat{z})|$, $\frac{d\mu_4^g}{d\mu_4} = \frac{\rho_4(g'(\hat{z})\hat{Z})}{\rho_4(\hat{Z})} |g'(\hat{z})|$. Содержательной частью доказательства является анализ изменения винеровской меры под действием \tilde{L}_g , для чего берётся предел по проекциям на цилиндрические множества, а именно по кусочно-линейным траекториям, плотность меры на которых известна [10].

Можно заметить, что для множителя, содержащего стохастический интеграл, нет предела в обычном смысле. В некоторых работах, упомянутых выше, для работы с подобными объектами предполагаются более сильные ограничения на гладкость диффеоморфизмов, что даёт возможность выразить производную Радона-Никодима в классическом смысле. Однако для получения соответствующих представлений группы диффеоморфизмов недостатком такого подхода будет необходимость последующего снятия ограничений на гладкость, например, в виде перехода к пределу в слабом смысле. Использование же естественной конструкции стохастического интеграла позволяет в этом случае значительно упростить вычисления.

Для анализа дискретных приближений основную сложность представляет наличие в выражении для Q хронологической экспоненты, значение $T(t)$ которой зависит от всей траектории до момента t . Для получения интеграла Ито как предельного выражения нужно иметь предсказуемые, то есть не зависящие будущего, выражения. Кроме того, правильный выбор предсказуемых функций облегчает вычисление якобиана дискретных приближений.

В данном случае, для получения приближения T^n функции T по выбранному разбиению $\{t_k\}_{k=1}^n$ отрезка $[0,1]$, $t_0 = 0$, зададим $T^n(t) = \text{step}(T_0, \dots, T_{n-1})(t)$, где $T_k = \prod_{i=1}^k (E + (t_k - t_{k-1})Z(t_k))$, E – единичная матрица, произведение понимается в порядке возрастания индексов, а step – ступенчатая функция по указанным точкам согласно разбиению $\{t_k\}_{k=1}^n$. Можно показать, что такое приближение для стохастической экспоненты сходится к ней в $L_2(C[0,1], W)$. Итоговое дискретное приближение для Q теперь получается согласно стандартной конструкции интеграла Ито, а именно путём взятия значения $Q(t_{k-1})$ на отрезке $[t_{k-1}, t_k]$.

Представления

В гильбертовом пространстве $H = L_2(\Omega, \nu)$ стандартным образом [11] строится серия представлений, ассоциированная с квазиинвариантной мерой. Пусть $F \in H, \omega \in \Omega$, тогда представления U_g^λ задаются формулой:

$$(U_g^\lambda F)(\omega) = \left(\frac{d\nu^g}{d\nu}(\omega) \right)^{\frac{1}{2} + i\lambda} F(L_g(\omega))$$

Данные представления оказываются унитарными и непрерывными, однако в общем случае вопрос о неприводимости таких представлений остаётся открытым.

Для одномерного случая при специальном выборе меры на базовом пространстве удаётся показать неприводимость получаемых представлений. Более строго, имеет место:

Теорема 2. Пусть $\mathfrak{D} = \{g \in G: g(0) = 0, g'(0) = 1\}$, в качестве базовой меры на $C^1([0,1], \mathbb{R})$ выбрана дельта-мера Дирака, сосредоточенная на некоей всюду положительной кривой z , а на последних двух компонентах Ω_T – дельта-мера в нуле и в единице соответственно. Тогда имеет место результат, аналогичный теореме 1, а именно

$$\frac{d\mu^g}{d\mu}(z, Z, \hat{z}, \hat{Z}) = e^{-\frac{1}{2} \int_0^1 (Q'(t))^2 dt - \int_0^1 Q'(t) dZ(t)}, \quad Q(t) = Z(t) + (g'(x(t)))^{-1} \left(\frac{d}{dt} g'(x(t)) \right),$$

причём соответствующие непрерывные унитарные представления указанной группы диффеоморфизмов оказываются неприводимыми.

Для этого случая в качестве интерпретации получаем представление группы диффеоморфизмов специального вида, построенное по винеровской мере, «взвешенной» вдоль фиксированной траектории z . Положительность этой траектории позволяет трактовать конструкцию как винеровский процесс, дисперсия которого зависит от времени. Выбор дельта-мер в нуле и в единице на оставшихся компонентах сделан только для удобства, фактически это лишь сдвиг и множитель к выбранной траектории z , содержательно новые представления можно будет получить, рассматривая данные меры сконцентрированными не в одной, а в нескольких точках.

Для доказательства теоремы используется сведение к лемме Шура, то есть показывается, что для произвольного линейного непрерывного оператора $S: H \rightarrow H$ из $[S, U_g^\lambda] = 0, \forall g \in G$ следует, что оператор S скалярен. Заметим, что оператор представления U_g^λ является композицией оператора умножения на степень производной Радона-Никодима и оператора замены аргумента посредством действия L_g . Ключевая идея состоит в выборе последовательности диффеоморфизмов $\{g_n\}$ так, чтобы поточечно она сходилась к тождественному диффеоморфизму, а чезаровское среднее соответствующих операторов умножения на степень производной Радона-Никодима сходилась по мере к некоторой достаточно хорошей функции. Это позволяет рассматривать в лемме Шура не любой линейный непрерывный

оператор, а только оператор умножения на функцию, после чего необходимое утверждение выводится довольно стандартным образом.

Последовательность $\{g_n\}$ строится следующим образом. Для $x_0 \in \mathbb{R}$ выбирается монотонная последовательность $\{x_k\} \rightarrow x_0 +$ и задаются диффеоморфизмы:

$$h_k(x) = x + \frac{(x - x_0)^2 \theta(x - x_0) - (x - x_k)^2 \theta(x - x_k)}{6\sqrt{x_k - x_0}}, \quad \theta(x) - \text{функция Хевисайда}$$

Сами по себе h_k не обладают необходимыми свойствами: если рассматривать $\frac{dv^{h_k}}{dv}$ как функцию от винеровского процесса, то, в некотором смысле, она ведёт себя как $e^{c(z)\xi_k}$, где ξ_k – стандартная нормальная величина, так что последовательность из соответствующих операторов умножения на степень производной Радона-Никодима не сходится в обычном смысле. Однако если выбрать последовательность $\{x_n\}$ достаточно быстро сходящейся к нулю, то соответствующие операторы умножения будут слабо зависимы, и чезаровское среднее вида $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_k$ будет иметь предел в силу закона больших чисел для слабо коррелированных случайных величин [12].

Литература

1. А. Пресли, Г. Сигал. Группы петель. М.: Мир, 1990.
2. Р.С. Исмаилов., “Об унитарных представлениях группы диффеоморфизмов окружности”, Функциональный анализ, 5:3 (1971), 45–53
3. А.М. Вершик, И.М. Гельфанд, М.И. Граев, “Представления группы диффеоморфизмов”, УМН, 30 (6), 3-50 (1975)
4. Е.Т. Шавгулидзе, “Один пример меры, квазиинвариантной относительно действия группы диффеоморфизмов окружности”, Функциональный анализ и его прилож., 12:3 (1978), 55–60
5. Е.Т. Шавгулидзе, “Об одной мере, квазиинвариантной относительно действия группы диффеоморфизмов конечномерного многообразия”, Докл. АН СССР, 303:4 (1988), 811–814
6. E.T. Shavgulidze, Some Properties of Quasi-Invariant Measures on Groups of Diffeomorphisms of the Circle, Russian Journal of Mathematical Physics, 7, N. 4, 2000, pp. 464-472.
7. A.A. Dosovitskii, Quasi-invariant measures on sets of piecewise smooth homeomorphisms of closed intervals and circles and representations of diffeomorphism groups. Russ. J. Math. Phys. 18 (2011), no. 3, 258-296.
8. А.А. Аграчев, Р. В. Гамкредидзе, “Экспоненциальное представление потоков и хронологическое исчисление”, Матем. сб., 107(149) (1978), 468–532
9. Оксендаль Б. Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения. Перевод с 5го исправленного английского издания. «Издательство АСТ», 2003.
10. Х.-С. Го. Гауссовские меры в банаховых пространствах. Москва, издательство «МИР», 1979.
11. Ю.А. Неретин, “Представления алгебры Вирасоро и аффинных алгебр”, Теория представлений и некоммутативный гармонический анализ – 1, Итоги науки и техн. Сер. Современ. пробл. мат. Фундам. направления, 22, ВИНТИ, М., 1988, 163–224
12. С.Н. Бернштейн, “О законе больших чисел”, Сообщ. Харьков. матем. о-ва. Сер. 2, 1918, 16. 82-87

A FAMILY OF QUASI-INVARIANT MEASURES IN THE SPACE OF CURVES AND RELATED REPRESENTATIONS OF THE DIFFEOMORPHISM GROUP

E. D. Romanov

Lomonosov Moscow State University

A family of quasi-invariant measures on the special functional space of curves in a finite-dimensional Euclidean space with respect to the action of diffeomorphisms is constructed. These measures can be used to obtain irreducible unitary representations of the diffeomorphisms group.

The main result is an explicit expression for the Radon-Nikodym derivative of the transformed measure relative to the original one. The irreducibility proved in the case of the special one dimensional measure choice. The stochastic Ito integral allows to express the result in an invariant form for a wider class of diffeomorphisms and to simplify calculations related with unitary representation.

A geometric interpretation of the action considered together with a generalization to the multidimensional case makes such representations applicable to problems of quantum mechanics.

ОПЕРАТОРЫ ДЕФОРМАЦИИ И ВИХРЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ С КРАТНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

д. ф.-м. н. Исламов Г.Г.

Удмуртский государственный университет

Операторы деформации и вихря для квантовомеханических систем определены в работе [1]. В монографии [2] на с. 467 рассматривается система из N микрочастиц, совершающих малые колебания около положения равновесия. В обозначениях нормальных координат q_s , $s = 1, 2, \dots, 3N$, стационарное уравнение Шредингера такой системы записывается в виде

$$H\psi \equiv \sum_{s=1}^{3N} \left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{\partial^2}{\partial q_s^2} + \frac{\mu\omega_s^2}{2} q_s^2 \right) \cdot \psi(q_1, q_2, \dots, q_{3N}) = E\psi(q_1, q_2, \dots, q_{3N}).$$

Здесь \hbar – приведённая постоянная Планка, μ – масса частиц, ω_s – частоты нормальных колебаний, E – энергия системы независимых осцилляторов. Кратность $M(E)$ энергетического уровня E системы связанных осцилляторов определяется числом решений диофантового уравнения

$$\sum_{s=1}^{3N} \omega_s n_s = \frac{E - E_0}{\hbar}$$

в целых неотрицательных наборах $(n_1, n_2, \dots, n_{3N})$, где $E_0 = \frac{\hbar}{2} \sum_{s=1}^{3N} \omega_s$ есть минимальная энергия системы квантовых осцилляторов. При помощи специального алгоритма упорядочим собственные значения E , не превосходящие заданного уровня E_{\max} , в порядке убывания их кратности $M(E)$. По схеме работы [3] эффективно построим конечномерный оператор K , для которого спектр возмущения $H - K$ состоит из нуля и всех собственных значений гамильтониана H , которые больше E_{\max} . При этом оператор K будет иметь минимально возможный ранг, равный максимальной кратности энергетических уровней $E \leq E_{\max}$. Теперь можем явно записать оператор деформации $Re K = \frac{K + K^*}{2}$ и оператор вихря $Im K = \frac{K - K^*}{2i}$, где i – мнимая единица.

Литература

1. Исламов Г.Г. Расчёт вихревых полей минимального ранга для квантового осциллятора // Материалы Девятой международной Конференции-семинара «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». Владимир, 2-3 ноября 2009 г., Владимирский госуниверситет, Владимир, 2009. – 438 с. (с. 190-194).
2. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Наука, 1983. – 664 с.
3. Исламов Г.Г. Экстремальные возмущения замкнутых операторов // Известия вузов. Математика, 1989, № 1, с. 35-41.

DEFORMATION AND VORTEX OPERATORS FOR A SYSTEM OF QUANTUM OSCILLATORS WITH MULTIPLE ENERGY SPECTRUM

G. G. Islamov

Udmurt State University

Let H be the Hamiltonian of the system of N microparticles, that are making small oscillations around the equilibrium position. In our work we are building finite-dimensional operator K , for which the spectrum of the perturbation $H - K$ consists of zero and the eigenvalues of the Hamiltonian H , which are greater than fixed energy level E_{\max} . Deformation and vortex operators are defined respectively as $Re K = \frac{K + K^*}{2}$ and $Im K = \frac{K - K^*}{2i}$, where i is imaginary unit.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДИОДНОГО ВОЛНОВОДНОГО УДВОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ 26-40 ГГц

Березин В.В.¹, д.т.н. Щитов А.М.²

¹АО «ФНПЦ «Нижегородский НИИ радиотехники»

²ОАО «ФНПЦ Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» им. А.П. Горшкова»

1. Введение

В [1] предложена методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц, сочетающая электродинамический расчет волноведущих структур с анализом нелинейных характеристик устройства. В [2] с применением данной методики рассчитан и оптимизирован утроитель частоты на диапазон 110-170 ГГц. Экспериментальные данные измерения потерь преобразования хорошо согласуются с расчетом.

В настоящей работе предпринята попытка распространить методику для расчета и проектирования волноводных диодных удвоителей КВЧ-диапазона. Ставилась задача подтверждения работоспособности методики, а так же определение потенциальных возможностей совершенствования технических характеристик (в первую очередь эффективности преобразования) ранее экспериментально разработанной модели волноводного удвоителя частоты [3-4].

2. Схемно-конструктивные особенности удвоителя частоты

Удвоитель частоты выполнен по схеме двухполупериодного выпрямителя (рис. 1).

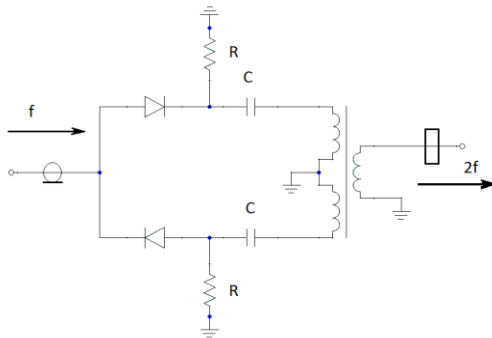


Рис. 1. Эквивалентная схема удвоителя 26-40 ГГц

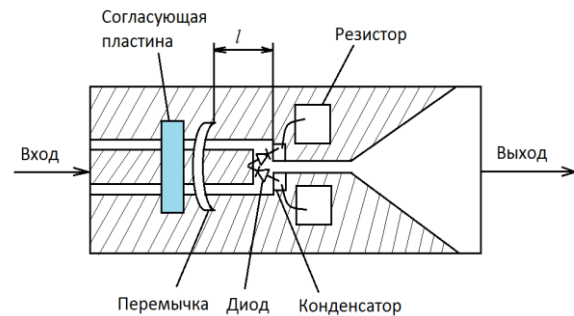


Рис. 2. Эскиз удвоителя частоты 26-40 ГГц

Конструктивно удвоитель частоты выполняется в виде комбинации двух линий передачи: входной – копланарного волновода – и выходной – щелевой линии, имеющей плавный или ступенчатый переход на волноводный тракт WR-28 (рис. 2). Линии изготавливаются на тонкой диэлектрической подложке, размещенной в разрезе по центру широкой стенки волновода; диоды включены в плоскости соединения линий. Входной сигнал подается через коаксиально-полосковый переход. Со стороны входа «земляные» обкладки копланарного волновода замкнуты перемычкой на расстоянии l от плоскости включения диодов, образуя отрезок линии четвертьволновой длины на средней частоте выходного сигнала. Короткозамкнутый отрезок, благодаря шунтирующему действию, уменьшает уровень 4-й гармоники в спектре выходного сигнала, так как составляет для нее половину длины волны.

Фильтрация 1-й гармоники, помимо баланса схемы, осуществляется выходным волноводным трактом, так как для нее волновод является запердельным. С целью достижения минимума потерь преобразования в заданном динамическом диапазоне входных сигналов используют цепи внешнего смещения или внутреннего самосмещения. До сих пор в литературе нет детального теоретического анализа и расчета основных характеристик умножителя частоты.



Рис. 3. Внешний вид удвоителя частоты 26-40 ГГц

Наиболее приоритетными техническими характеристиками широкополосных умножителей частоты являются: эффективность (потери) преобразования, максимально достижимая выходная мощность, неравномерность выходной мощности в диапазоне частот и уровень паразитных составляющих в спектре выходного сигнала. На повышение и оптимизацию именно этих характеристик удвоителя частоты направлена настоящая работа.

На рисунке 3 показан внешний вид удвоителя.

3. Моделирование удвоителя частоты

При моделировании удвоителя использовалась система автоматизированного проектирования компании Ansys (HFSS и Designer). На первом этапе моделирования удвоителя частоты использовалась среда HFSS.

Процесс проектирования с помощью HFSS включает в себя ряд стандартных шагов:

1. Создание модели анализируемой структуры (рис. 4), в том числе:
 - создание трехмерной графической модели структуры (чертежа);
 - задание параметров материалов, из которых состоит структура.
2. Определение электродинамических параметров структуры, включающее:
 - задание граничных условий на поверхностях, формирующих анализируемый объект;
 - определение и калибровка портов;
 - задание параметров решения.
3. Электродинамический анализ исследуемого объекта, в том числе:
 - анализ объекта в полосе частот;
 - параметрический анализ объекта;
 - параметрическая оптимизация объекта.
4. Получение S -параметров устройства, визуализация распределения электромагнитного поля в продольном сечении тракта.

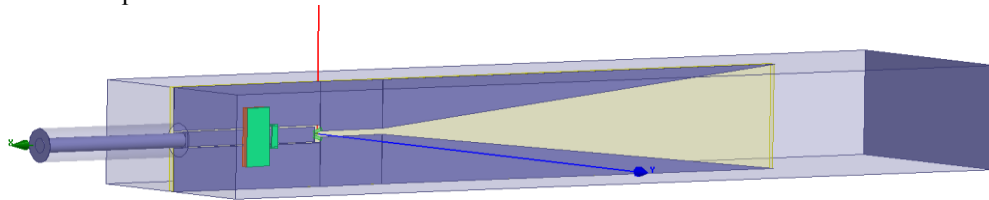


Рис. 4. Модель из программы HFSS

На втором этапе использовалась среда Designer. Процесс проектирования с помощью Designer включает в себя следующее:

1. Создание схемы умножителя с цепями автосмещения (рис. 5), в том числе:
 - экспорт решения модели из среды HFSS;
 - задание параметров диодов и элементов цепи.
2. Определение параметров структуры, включающее:
 - определение и калибровка портов;
 - задание параметров решения.
3. Анализ исследуемого объекта, включает:
 - анализ объекта в полосе частот;
 - параметрический анализ объекта;
 - параметрическая оптимизация объекта.
4. Получение уровня мощности гармоник и визуализация их в полосе частот.

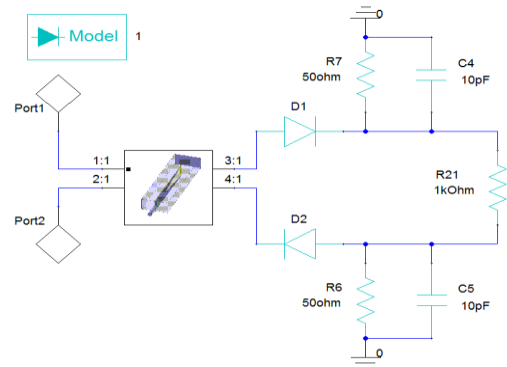


Рис. 5. Модель из программы Designer

4. Результаты анализа

Анализ удвоителя проведен при следующих условиях:

- диапазон частот входного сигнала 13-20 ГГц;
- уровень мощности входного сигнала 100 мВт (20 дБм);
- диоды предполагались идентичными, соответствующими использованным в экспериментальных образцах A92220-3 $C_0=0,2$ пФ, $R_s=3$ Ом (НПО «Салют» г. Н. Новгород), при расчетах использовалась модель D LEVEL=7 из программы Designer;
- номиналы элементов цепей автосмещения: $C = 10$ пФ, $R = 50$ Ом.

Результатом анализа является рассчитанный уровень мощности гармоник входного сигнала на выходе удвоителя частоты. На рисунке 6 приведен уровень второй гармоники при наличии и отсутствии регулировочных элементов. Размеры элементов и их местоположение выбирались оптимальными путем

нескольких итераций для достижения максимального и равномерного уровня мощности в диапазоне частот 26-40 ГГц.

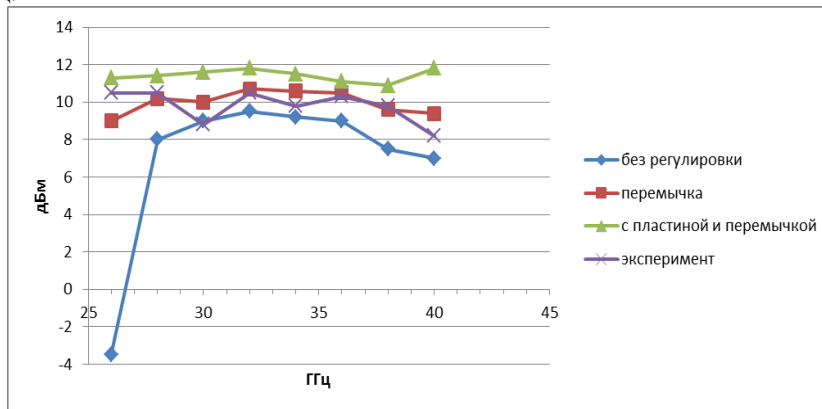


Рис. 6. Уровень 2-й гармоники в зависимости от установленных регулировочных элементов

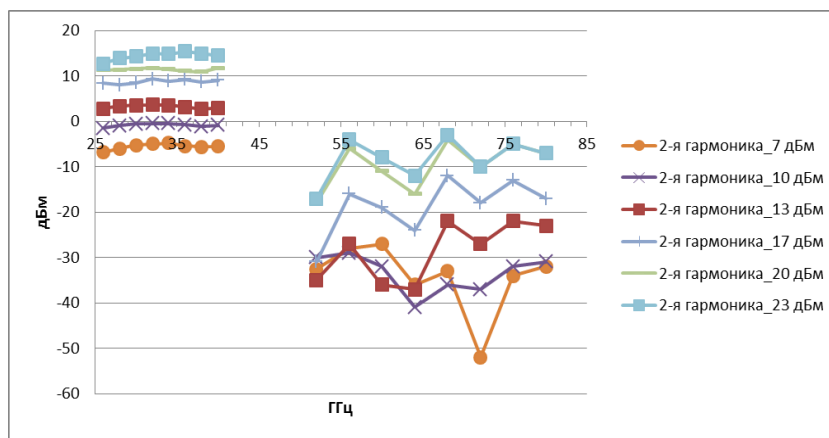


Рис. 7. Уровень 4-й гармоники относительно 2-ой

Из графиков видно, что установка регулировочных элементов при их оптимальном расположении относительно диодов позволяет снизить неравномерность уровня выходной мощности в диапазоне частот, а также повысить его средний уровень на ~4 дБ. Там же (рис. 6) дана экспериментальная зависимость уровня мощности, усредненная по десяти образцам. Сравнение показывает, что потенциально выходная мощность экспериментальных образцов может быть повышена, как минимум на 2 дБ.

На рисунке 7 показан уровень 4-й гармоники. При $P_{вх.} = 20$ дБм она подавлена относительно второй на 17-35 дБ, что согласуется с экспериментальными результатами. При уменьшении $P_{вх.}$ до 10 дБм подавление 4-й гармоники существенно возрастает.

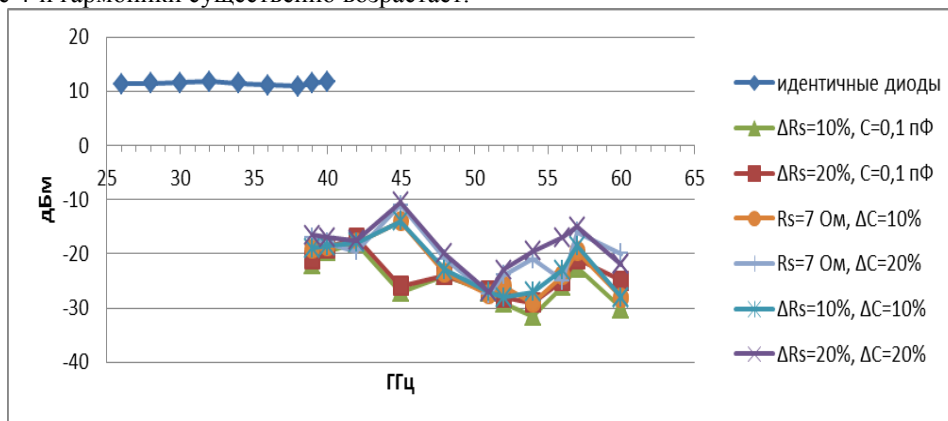


Рис. 8. Уровень третьей гармоники в зависимости от неидентичности параметров диодов по C_0 и R_s

При идентичных параметрах диодов в удвоителе частоты нечетные гармоники входного сигнала не генерируются. Однако, на практике всегда имеет место разброс параметров диодов, даже подобранных в пары по ВАХ и ВФХ. На рисунке 8 даны зависимости уровня мощности третьей гармоники при различной степени неидентичности диодов по C_0 и R_s .

Анализ результатов показывает, что при минимально достижимой на практике неидентичности C_0 и R_s в 10% третья гармоника относительно второй подавлена на 25 дБ. Заметим, что в широкополосном удвоителе частоты 26-40 ГГц третья гармоника не может быть отфильтрована, поскольку находится в рабочем диапазоне частот, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки.

Важным этапом в проектировании удвоителя частоты является оптимальный выбор номиналов элементов цепей автосмещения диодов R , C . На рисунке 9 приведены характеристики выходного уровня мощности утроителя при $C = 10$ пФ и различных номиналах R .

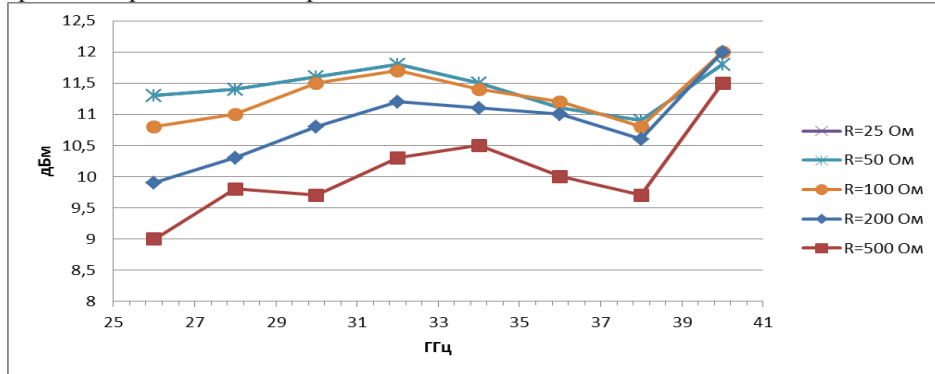


Рис. 9. Графики уровня выходной мощности при фиксированной емкости $C=10$ пФ и различных номиналах R

Очевидно, оптимальным значением сопротивления для достижения равномерной $P_{\text{вых}}$ при $P_{\text{вх}}=100$ мВт является 50 Ом.

На рисунке 10 представлены зависимости уровня выходной мощности при $R = 50$ Ом и различных номиналах C .

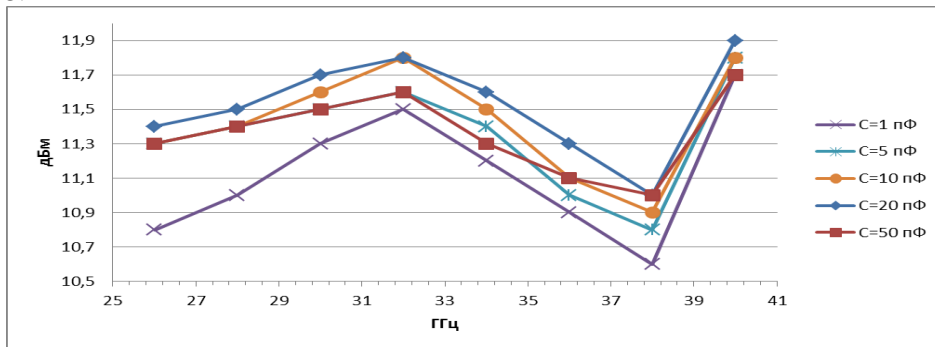


Рис. 10. Графики уровня выходной мощности при фиксированном сопротивлении $R = 50$ Ом и различных номиналах C .

При вариации емкости в широких пределах от 5 пФ до 50 пФ результат практически не меняется. Оптимальным значением является $C = 20$ пФ.

Одной из важнейших характеристик умножителей частоты является динамический диапазон входных сигналов. На рисунке 11 даны зависимости уровня мощности на выходе удвоителя от уровня мощности на входе.

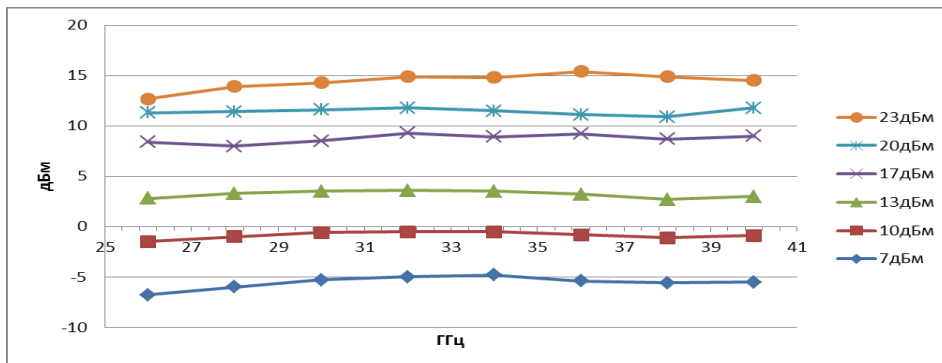


Рис. 11. Мощность выходного сигнала в зависимости от уровня входного сигнала

В диапазоне входных мощностей $P_{\text{вх}}=15-23$ дБм зависимость $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{вх}}$ близка к линейной. С уменьшением $P_{\text{вх}}$ линейная зависимость нарушается. Следует заметить, что большой динамический диапазон (не менее 30 дБ) изменения уровня выходной мощности с однозначной зависимостью $P_{\text{вых}}$ от

$P_{\text{вх}}$ позволяет осуществлять регулировку уровня выходной мощности изменением входной. Это обстоятельство существенно упрощает построение широкополосных источников сигналов на умножителях частоты с регулируемым и стабилизированным уровнем выходной мощности.

5. Заключение

Учитывая хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов по всем основным характеристикам удвоителя частоты можем констатировать, что предложенная в [1] методика может быть распространена для расчета и проектирования волноводных диодных удвоителей КВЧ-диапазона.

Методика позволяет проводить оптимизацию итерационным методом любых схемно-конструктивных элементов умножителя, как волноводных трактов, так и параметров нелинейных элементов (диодов), включая степень и характер нелинейности по ВАХ и ВФХ, и позволяет априорно определять потенциально возможные характеристики нелинейного устройства без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований.

Литература

1. В.В. Березин, А.М. Щитов, С.В. Оболенский. Методика расчета и проектирования волноводного диодного удвоителя частоты 75-110 ГГц // XXI Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии (ИСТ-2015)». НГТУ им. Р.Е.Алексеева: Материалы конференции. 17 апреля 2015г., г.Нижний Новгород. 2015. С. 62-63.
2. Щитов А.М., Березин В.В. Автоматизированный расчет широкополосных волноводных диодных удвоителей частоты в диапазонах 75-110 ГГц и 110-170 ГГц // СевГУ: 25-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико 2015)» 12 сентября 2015г. г.Севастополь. 2015. С. 75-76.
3. Щитов А.М., Серебряков А.Е. Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5-110 ГГц). – Вестник ВВО АТН РФ, серия Высокие технологии в радиоэлектронике, 1997, №1(3), с. 91-96.
4. Щитов А.М. Диодные умножители частоты. – Системы и средства связи телевидения и радиовещания, №1, 2, 2002, с. 45-51.

E-mails: vvb87@yandex.ru, schitoff@mail.ru

THE AUTOMATIC ANALYSIS OF THE 26 to 40 GHz BROADBAND WAVEGUIDE DIODE FREQUENCY DOUBLER

V. V. Berezin¹, A. M. Schitov²

¹ JSC "FRPC "Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering"

² JSC "FSPC "Institute of Electronic Measurements "Kvarz" n.a. A. P. Gorshkov"

Waveguide diode frequency doubler in the range of 26 to 40 GHz analysis and design method, based on using HFSS and Designer programs, combining electrodynamic waveguide structures and nonlinear characteristics analysis, was proposed. Comparison of frequency doubler rated and measured parameters are given.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ СХЕМ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

к.т.н. Гурарий М.М., к.т.н. Жаров М.М.,
член-корр. РАН Русаков С.Г., д.т.н. Ульянов С.Л.

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Введение

Автономные генераторы являются одним из важнейших компонентов электронных схем и широко применяются для получения сигналов с заданной частотой. При схемотехническом проектировании автогенераторных схем с помощью систем автоматизации схемотехнического проектирования необходимо определение периодического установившегося режима и частоты колебаний, расчет фазового шума. При проектировании автогенераторов с внешним возбуждением необходимо определение условий синхронизации генератора, т.е. характеристик внешнего сигнала, при которых реализуется периодический режим работы генератора. При размещении нескольких автогенераторов на одном кристалле актуальна задача анализа системы нескольких связанных генераторов для определения

такого режима синхронизации, когда в результате взаимного влияния в системе возникают периодические колебания с общей частотой. Для решения перечисленных задач системы автоматизации схемотехнического проектирования должны иметь специализированные вычислительные методы и эффективные алгоритмы моделирования режимов автогенераторных схем. В работе кратко рассмотрены основные проблемы построения таких методов и алгоритмов и проведен анализ основных подходов повышения их вычислительной эффективности.

Определение периодического установившегося режима является базовым видом моделирования автогенераторных схем. Моделирование многопериодных нелинейных колебаний с помощью стандартного анализа переходных процессов требует значительных временных затрат особенно при расчётах высокочастотных генераторов. Поэтому для моделирования автогенераторных схем более эффективны специализированные методы, которые позволяют непосредственно находить установившийся периодический режим без моделирования переходного процесса. Такие методы разработаны как в частотной, так и во временной области [1]. В основе частотных методов анализа периодических режимов лежит гармонический баланс [2-4]. Частотные методы предпочтительны при анализе радиочастотных и микроволновых схем, которые содержат большое число элементов с распределенными параметрами. Эти методы эффективны для схем с невысокой степенью нелинейности. Методы анализа установившегося периодического режима во временной области основаны либо на методе конечных разностей либо на методе пристрелки [3, 4]. При анализе сильно нелинейных схем временные методы могут оказаться более эффективными. По сравнению с неавтономными схемами определение установившегося режима автогенераторов вызывает дополнительные трудности, связанные с неизвестной заранее частотой колебаний, что приводит к недоопределенной системе уравнений и сходимостью метода к вырожденному решению. Сложность решения этих проблем существенно различается для частотных и временных методов.

Поведение электронной схемы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [3,4]

$$r(x(t)) = i(x(t)) + \frac{d}{dt}q(x(t)) + u(t) = 0. \quad (1)$$

Здесь $x(t)$, $i(x)$, $q(x)$ – векторы узловых переменных, токов, зарядов и $u(t)$ – вектор входных воздействий.

При воздействии на схему периодического входного сигнала с периодом T (и частотой $\omega = 2\pi/T$) установившийся периодический режим в схеме может быть определен решением системы (1) с условием периодичности

$$x(0) = x(T). \quad (2)$$

Другим способом нахождения установившегося режима является метод гармонического баланса, в рамках которого решение (1) представляется в виде ряда Фурье $x_l(t) = \sum_k X_{kl} e^{jk\omega t}$, $l = 1, \dots, L$, где X_{kl} – это амплитуда k -й гармоники напряжения в l -м узле схемы. Уравнения метода ГБ имеют вид [3,4]

$$R(X) = I(X) + j\Omega Q(X) + U = 0. \quad (3)$$

Здесь X , I , Q – векторы амплитуд гармоник узловых напряжений, токов и зарядов; Ω – блочно-диагональная матрица гармоник собственной частоты ω . Для автономных схем входное воздействие отсутствует ($U=0$), а частота ω включается в вектор неизвестных. Для того, чтобы число переменных соответствовало числу уравнений вводится дополнительное условие нулевой фазы первой гармоники напряжения в заданном p -ом узле. Система уравнений ГБ принимает в этом случае вид [3,4]:

$$R(X, \omega) = I(X) + j\Omega Q(X) = 0, \quad \text{Im}(X_{1,p}) = 0 \quad (4)$$

Для решения системы (4) применяется, как правило, метод Ньютона, на каждом шаге которого решается система линейных алгебраических уравнений

$$J\Delta X + \Lambda\Delta\omega = -R(X, \omega) \quad \text{Im}(\Delta X_{1,p}) = 0, \quad (5)$$

Здесь ΔX , $\Delta\omega$ – это коррекции решения на шаге Ньютона, $J = \partial R(X, \omega) / \partial X$ – матрица Якоби системы (4), $\Lambda = \partial R(X, \omega) / \partial \omega$. Проблема применения метода Ньютона (5) для решения (4) связана с исключением сходимости к вырожденному решению [3-5]. Поэтому для улучшения сходимости при моделировании генераторных схем введена концепция искусственного зонда [5], который представляет собой соединение источника напряжения или тока с идеальным фильтром первой гармоники. Введение зонда в схему автогенератора позволяет свести автономную систему уравнений к неавтономной системе уравнений с дополнительными условиями [5]

$$\text{Re}\{I_{probe}(V_{probe}, \omega)\} = 0, \quad \text{Im}\{I_{probe}(V_{probe}, \omega)\} = 0, \quad (6)$$

где I_{probe} , V_{probe} – ток и напряжение искусственного зонда. Вычислительная схема в этом случае состоит из внешнего и внутреннего блока. Во внешнем блоке решается система двух уравнений (6), относительно амплитуды и частоты искусственного зонда. Во внутреннем блоке решается неавтономная система уравнений гармонического баланса (3) с найденными значениями амплитуды и частоты искусственного

зонда. Полученное решение для схемы с зондом является решением для исходной схемы (4) так как выполнение условий нулевого тока (6) эквивалентно отсутствию зонда. Применение такого подхода позволяет задавать начальные значения только для двух неизвестных: V_{probe} и ω . Дальнейшее совершенствование метода основано на полной автоматизации оценки начального приближения [6-9]. Основной недостаток подхода [5] состоит в его недостаточной надежности. Как показано в работах [10,11] для высокооборотных автогенераторов зависимость $|I_{probe}(V_{probe})|$ часто может не иметь локального минимума. Предложен новый тип искусственно встраиваемого зонда с фиксацией не частоты зонда, а фазы его тока, которая принимается нулевой относительно сигнала зонда. При изменении амплитуды (процесс продолжения по параметру) частота зонда меняется так, чтобы обеспечивалась нулевая фаза тока зонда. Вычислительная схема метода включает процедуру трассировки траектории кривой $\text{Re}(I_{probe}(V_{probe}, \omega(V_{probe})))$ при определении зависимости $\omega(V_{probe})$ из решения уравнения $\text{Im}(I_{probe}(V_{probe}, \omega(V_{probe}))) = 0$. В процедуре продолжения осуществляется управление величиной шага, а также автоматическое изменение параметра продолжения для вычисления траектории в случае её неоднозначности [12]. Процесс завершается, когда величина отклика схемы (действительная часть тока зонда) становится равной нулю.

Метод анализа во временной области основан на замене решения задачи (1) с условием периодичности (2) на решение системы нелинейных алгебраических уравнений относительно вектора состояния в начальный момент времени $x(0)$.

$$\varphi(x(0), 0, T) - x(0) = 0. \quad (7)$$

Здесь вектор-функция $\varphi(x(t_0), t_0, t)$ отражает переход состояния $x(t_0)$ в момент времени t_0 в состояние $x(t)$ в момент времени t . На каждом шаге итерационного процесса решения (7) вектор $x(T) = \varphi(x(0), 0, T)$ находится решением задачи Коши с соответствующими начальными условиями [3,4].

Применение метода Ньютона для решения алгебраической системы (7) приводит к линейной системе относительно вектора ньютоновской поправки на каждой итерации

$$[\varphi_x - E] \Delta x^j(0) = -(\varphi(x^j(0), 0, T) - x^j(0)), \quad (8)$$

где j – номер ньютоновской итерации, $\Delta x^j(0) = x^{j+1}(0) - x^j(0)$ – вектор ньютоновской поправки, E – единичная матрица и $\varphi_x = \frac{\partial \varphi(x(0), 0, T)}{\partial x(0)}$ – фундаментальная матрица уравнений в вариациях.

Особенностью метода пристрелки для моделирования автономных генераторов является то, что величина периода и соответственно частота колебаний заранее неизвестна и ее требуется определять в процессе решения. Поэтому для обеспечения однозначности периодического решения необходимо дополнительное условие, которое позволило бы либо сократить на 1 количество неизвестных, либо увеличить на 1 количество уравнений. Выбор такого условия и определяет вариант метода пристрелки для автономных систем. В работах [13, 14], было предложено использовать фиксацию начального значения одной из переменных состояния. Основной недостаток этого метода состоит в том, что он не гарантирует совместности полученной системы уравнений пристрелки. Поэтому более удобным может оказаться фиксация некоторой линейной комбинации начальных значений всех переменных [3]. Однако этот подход все же полностью не устраняет указанный недостаток метода с фиксацией начального значения, тем более, что часто желательно не требовать от пользователя задания лишней входной информации. В работе [15] предложен метод пристрелки, в котором момент окончания интегрирования при решении задачи Коши определяется с помощью метода сечений Пуанкаре.

Расчет фазового шума

Для выполнения шумового анализа и расчета спектральной плотности мощности (СПМ) шума предложено несколько методов, различающихся способом представления математической модели схемы и принятой системой допущений. Допущение о малости шумового воздействия по сравнению с полезным сигналом позволяет строить методы шумового анализа на основе теории возмущений и линеаризации нелинейных систем. Теория линейных стационарных систем позволяет на качественном уровне предсказывать шумовые характеристики. Полученные на основе этой теории выражения для расчета шума приводят к значительным отклонениям от экспериментальных результатов. Теория фазового шума в автогенераторах, основанная на декомпозиции возмущённого отклика на составляющие, обуславливающие фазовый и амплитудный шум, разработана в работах [16, 17]. Показано, что спектр автогенератора имеет характер лоренциана около каждой гармоники. Несмотря на то, что эта теория позволяет находить спектр и определять дисперсию фазового шума, вычислительные методы, построенные на базе этой теории, имеют ряд ограничений. Достоинством линейной периодически нестационарной модели является простота и удобство ее внедрения в программы

схмотехнического моделирования в рамках периодического малосигнального анализа [18]. При малом периодическом возбуждении поведение автогенератора описывается линейной системой с периодическими коэффициентами. В частотной области линейная периодически нестационарная модель для автогенераторов имеет вид [4]

$$J(\Delta\omega)\Delta X = B. \quad (9)$$

Здесь B – это вектор гармоник возбуждения, где компоненты B_{kl} – гармонические сигналы частотой $k\omega_0 + \Delta\omega$, приложенные к узлу l ; ΔX – вектор малосигнального решения, $J(\Delta\omega)$ – матрица якобиана при заданном отклонении $\Delta\omega$ частоты возбуждения от собственной частоты генератора ω_0 . Матрица $J(\Delta\omega)$ при $\Delta\omega = 0$ совпадает с матрицей J_0 , $J(0) = J_0$. Матрица J_0 является вырожденной, что вызывает рост численной погрешности и приводит к нестабильности оценки СПМ в области малых отклонений от собственной частоты. Поэтому на практике такой подход не позволяет охватить весь диапазон частот. Численный метод расчета СПМ шума, свободный от указанных недостатков, предложен в работе [19]. Метод основан на эквивалентном преобразовании системы уравнений периодического малосигнального анализа. Показано, что предложенное эквивалентное преобразование системы позволяет исключить сингулярность матрицы при нулевых смещениях частоты и соответственно устранить вычислительные трудности при расчетах вблизи частоты колебаний.

Анализ генератора с внешней синхронизацией

При воздействии внешнего периодического сигнала на схему автогенератора в зависимости от некоторых условий устанавливается режим колебаний с частотой равной, кратной или дробно-кратной частоте внешнего возбуждения. Условия, при которых реализуется такой режим синхронизации, определяются амплитудой и частотой воздействия, а также свойствами самой схемы. В простейшем случае синхронизация на частоте воздействия происходит при достаточно больших значениях амплитуды и частотах внешнего воздействия близких к собственной частоте колебаний. Спектр сигнала автогенератора содержит гармоники частоты внешнего воздействия. Если внешнее воздействие не удовлетворяет условиям синхронизации (захвата частоты), то реализуется квазипериодический режим, при котором спектр сигнала автогенератора содержит комбинационные компоненты двух фундаментальных частот, одна из которых – это частота внешнего воздействия, а вторая зависит от параметров генератора и сигнала возбуждения. Целью анализа является определение условий синхронизации генератора, т.е. характеристик внешнего сигнала, при которых реализуется чисто периодический режим работы генератора.

Известное уравнение Адлера [20] применимо только к слабо нелинейным LC генераторам и синусоидальным внешним воздействиям. Фазовое дифференциальное уравнение [16] может применяться к произвольной автогенераторной схеме, но не позволяет получить условия захвата. Метод анализа режима синхронизации автогенераторных схем при периодическом воздействии произвольной формы предложен в работах [21, 22]. Получено нелинейное уравнение относительно фазы синхронизированных колебаний и общее выражение для допустимого диапазона частот внешнего возбуждения. В работе [23] метод распространен на случай дробно-кратной частоты внешнего возбуждения.

Анализ режима взаимной синхронизации взаимосвязанных генераторов

Различают режим взаимной синхронизации для обеспечения требуемого функционирования схемы и режим нежелательной взаимной синхронизации, возникающей вследствие паразитных взаимосвязей в интегральных схемах. Известные методы анализа применимы лишь к синусоидальным и слабо-нелинейным автогенераторам. При этом взаимодействие генераторов обычно задается постоянным коэффициентом передачи. Указанные ограничения сняты в работе [24], где рассматриваются n генераторов с близкими собственными частотами ω_i . Случай дробно-кратного соотношения частот взаимосвязанных генераторов рассмотрен в работе [25].

Литература

1. Русаков С.Г. Моделирование нелинейных радиочастотных схем в системах автоматизации схмотехнического проектирования // Автоматизация проектирования. -1997. - № 2. - С. 2-8.
2. Алексеев О.В., Асович П.Л., Соловьев А.А. Спектральные методы анализа нелинейных радиоустройств с помощью ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1985. - 152 с.
3. Kundert K.S., White J., Sangiovanni-Vincentelli A. Steady-State Methods for Simulating Analog and Microwave Circuits – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990.- 247 P.
4. Актуальные проблемы моделирования в системах автоматизации схмотехнического проектирования/ под ред. А.Л. Стемповского – М.: Наука, 2003.-430 с.

5. Ngoya E., Suarez A., Sommet R., Quer R., Steady-state analysis of free or forced oscillators by harmonic balance and stability investigation of periodic and quasi-periodic regimes // *Int. J. of Microwave and Millimeter-Wave Comp.-Aided Eng.* – 1995. - vol. 5. - No. 3. - P. 210-223.
6. Lampe S., Laur R., Global optimization applied to the oscillator problems // in *Proc. of Design Automation and Test in Europe Conf.* – 2002. - P. 322-326.
7. Duan X., Mayaram K., Frequency domain simulation of high-Q oscillators with homotopy methods // in *Proc. of IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design.* – 2004. - P. 683-686.
8. Boianapally K., Mei T., Roychowdhury J., A multi-harmonic probe technique for computing oscillator steady states // in *Proc. IEEE/ICM Int. Conf. Comput.-Aided Des.* – 2005. - P. 609–612.
9. Brambilla A., Gruosso G., Gajani G., Robust harmonic-probe method for the simulation of oscillators // *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers.* – 2010. - vol. 57. - No. 9. - P. 2531–2541.
10. M. Gourary, S. Ulyanov, M. Zharov, S. Rusakov, et al., Simulation of high-Q oscillators // in *Proc. of IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design* – 1998. - P. 162-169.
11. Gourary M., Ulyanov S., Zharov M., Rusakov S., et al., A robust and efficient oscillator analysis technique using harmonic balance // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 2000. - vol. 181. - P. 451-466.
12. Gourary M., Rusakov S., Ulyanov S., Zharov M., et al., Frequency adjusting numerical technique for oscillator simulation // *Proc. European Conf. on Circuit Theory and Design. Cork, Ireland.* – 2005. - v. 3. - P. 121-124.
13. Aprille T. J., Trick. T. N. A computer algorithm to determine the steady-state response of nonlinear oscillators// *IEEE Trans. on Circuit Theory, Vol. CT-19, No.4, July 1972.* - P. 354-360.
14. Гу р а р и й М. М., Р у с а к о в С. Г., З а р у д н ы й Д. И. Мод е л и р о в а н и е н а Э Ц В М п е р и о д и ч е с к и х п р о ц е с с о в в и н т е г р а л ь н ы х с х е м а х // *А в т о м а т и к а и в ы ч и с л . т е х н и к а*, No. 1, 1973. - С. 83-85
15. У л ь я н о в С. Л., Г у р а р и й М. М. М е т о д п р и с т р е л к и д л я р а с ч е т а у с т а н о в и в ш е г о с я п е р и о д и ч е с к о г о р е ж и м а а в т о н о м н ы х г е н е р а т о р о в // *И з в. в у з о в. Э л е к т р о н и к а.* – 2009. – № 4(78). – С. 78–83.
16. Demir A., Mehrotra A., Roychowdhury J. Phase Noise in Oscillators: A Unifying Theory and Numerical Methods for Characterization // *IEEE Trans. on Circuits and Systems - I.* - 2000. - Vol. 47. - P. 655-674
17. Demir A. Phase Noise and Timing Jitter in Oscillators with Colored-Noise Sources. // *IEEE Trans. on Circuits and Systems - I.* - 2002. - Vol. 49. - No 12. - P. 1782-1791.
18. Kundert K.S. Introduction to RF Simulation and Its Application // *J. of Solid-State Circuits.* - 1999. - Vol. 34. - No 9. - P. 1298-1319.
19. Gourary M. M. New Numerical Technique for Cyclostationary Noise Analysis of Oscillators / M.M. Gourary, S.G. Rusakov, S.L. Ulyanov, M.M. Zharov et al // *Proc. of the 37th European Microwave Conf., Munich.* – 2007. - P. 1173-1176.
20. Adler R. A study of locking phenomena in oscillators // *Proc. of the IRE and Waves and Electrons.* - June 1946. - № 34. - P. 351-357.
21. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Mulvaney B. J., Analysis of oscillator injection locking by harmonic balance method // *Proc. of Design Automation and Test in Europe Conf.* – 2008. - P. 318-323.
22. Гу р а р и й М. М., У л ь я н о в С. Л. А н а л и з у с л о в и й с и н х р о н и з а ц и и а в т о г е н е р а т о р а // *И з в. в у з о в. Э л е к т р о н и к а.* – 2009. – № 5(79). – С. 57–65.
23. Гу р а р и й М. М., Ж а р о в М. М., Р у с а к о в С. Г., У л ь я н о в С. Л. М е т о д а н а л и з а р е ж и м о в с и н х р о н и з а ц и и и б и е н и й а в т о г е н е р а т о р а п р и п а р а з и т н о м в о з б у ж д е н и и с и г н а л о м п р о и з в о л ь н о й ф о р м ы и ч а с т о т ы // *И з в. в у з о в. Э л е к т р о н и к а.* – 2013. – № 3(101). – С. 73–82.
24. Gourary M.M., Rusakov S.G., Ulyanov S.L., Zharov M.M. Mutual injection locking of oscillators under parasitic couplings // in *Scientific Computing in Electrical Engineering, Book series: Mathematics in Industry*, 2012. - vol. 16. - P. 303-312.
25. Гу р а р и й М. М., Р у с а к о в С. Г., У л ь я н о в С. Л. Р а з р а б о т к а м е т о д о в а н а л и з а р е ж и м а в з а и м н о й с и н х р о н и з а ц и и а в т о г е н е р а т о р о в в и н т е г р а л ь н ы х с х е м а х // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. Сб. трудов/под ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010.* - С. 138-143.

THE PROBLEMS OF OSCILLATORS ANALYSIS IN CIRCUIT SIMULATORS

M.M. Gourary, M.M. Zharov, S.G. Rusakov, S.L. Ulyanov

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS

The circuit simulators are widely used in design process of oscillators. The periodic steady state, oscillation frequency and phase noise are primary characteristics of interest. The analysis of oscillators under external periodic excitation and mutual injection locking of weakly coupled oscillators is needed for oscillators to be designed in a single chip. To provide the above mentioned analyses and characteristics the circuit simulators must have special purpose methods and efficient algorithms. The paper discusses main problems in constructing these methods and algorithms. The techniques for enhancement of simulation efficiency of oscillators are considered.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ГИРОТРОНЕ

д. ф.-м. н. Мануилов В.Н., Климов А.В.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Среди источников когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн наиболее перспективными являются гиротроны. Они используются в таких приложениях как нагрев и стабилизация плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, СВЧ обработка материалов и диагностика различных сред [1]. Характеристики данного прибора, в частности – электронный КПД, в значительной степени определяются качеством формируемого магнетронно-инжекторной пушкой (МИП) винтового электронного пучка (ВЭП), прежде всего – питч-фактором g , величиной скоростного разброса δv_{\perp} и функцией распределения электронов в пучке по осцилляторным скоростям $f(v_{\perp}) = dI/dv_{\perp}$ [2-4]. Таким образом, для создания гиротронов с высокими выходными характеристиками требуется точное определение указанных параметров ВЭП [3-5].

Отработка МИП включает два этапа. Сначала на базе двумерных статических моделей численными методами производится поиск геометрии и электрического режима МИП с приемлемыми характеристиками g , δv_{\perp} и $f(v_{\perp})$ формируемого ВЭП. Далее с помощью анализатора методом тормозящего поля производится экспериментальное измерение перечисленных параметров и сравнение с расчетными с целью получения надежных данных о скоростном распределении в пучке. Метод тормозящего электрического поля [6], основан на предположении, что указанное поле направлено строго вдоль оси системы. Реальная трехмерная конструкция анализатора приводит к появлению тангенциальных компонент электрического поля и, соответственно, – ошибкам при измерении g , δv_{\perp} и $f(v_{\perp})$. До сих пор конструкция таких анализаторов строилась на чисто качественных соображениях о распределении тормозящего поля в пространстве и методах минимизации ошибки измерений, а точные количественные данные о вносимой ошибке отсутствовали.

В настоящей работе представлена впервые созданная методика численного расчета анализатора электронных пучков, работающего на принципе тормозящего электрического поля [6], учитывающая 3-мерность распределения электрического поля в области торможения электронного пучка. Для траекторного анализа используется пакет CST STUDIO SUITE, позволяющий найти решение самосогласованной системы уравнений пучка в статическом режиме. Моделирование пучка основывается на методе трубок тока, для реализации которого проводится дискретизация электронного пучка (разбиение его на фракции с разными значениями осцилляторной скорости, фазы вращения - по ларморовской окружности и положением ведущего центра электронной орбиты) и для каждой трубки тока задаются координаты и скорости частиц на входе в анализатор. Обработка данных численного расчета производится с помощью препроцессора и постпроцессора, написанных в среде программирования MATLAB. Постпроцессор позволяет восстановить функцию распределения по осцилляторным скоростям и сравнить ее с заданной на входе анализатора и на этой основе вычислить ошибки измерений параметров пучка, вносимые анализатором.

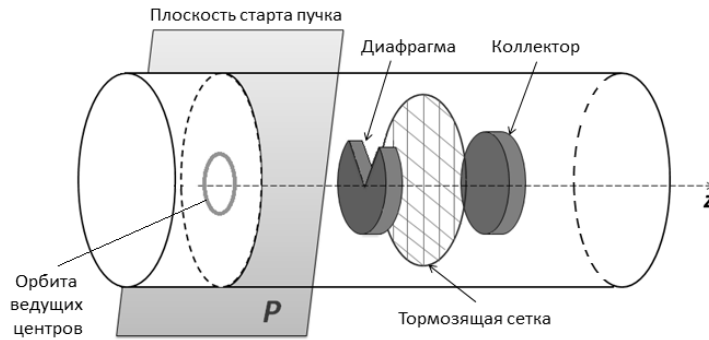


Рис. 1. Внешний вид рассматриваемой модели анализатора

По развитой методике проведен траекторный анализ простейшей схемы анализатора ВЭП, где за тормозящей сеткой находится дисковый коллектор (рис.1).

Показано, что основными факторами, влияющими на искажение измеряемых параметров пучка, являются наличие тангенциальных компонент тормозящего электрического поля в области пролета пучка и пространственный заряд пучка. Наличие тангенциальной компоненты электрического поля приводит к заметному искажению (уширению) функции распределения в области больших осцилляторных скоростей, близких к полным (рис.2). Такое поведение функции распределения наблюдается и при измерениях в реальном анализаторе. При большом токе пучка кулоновское поле пучка вызывает дополнительное искажение функции распределения и приводит к значительному увеличению измеренного скоростного разброса по сравнению с реальной величиной разброса в пучке.

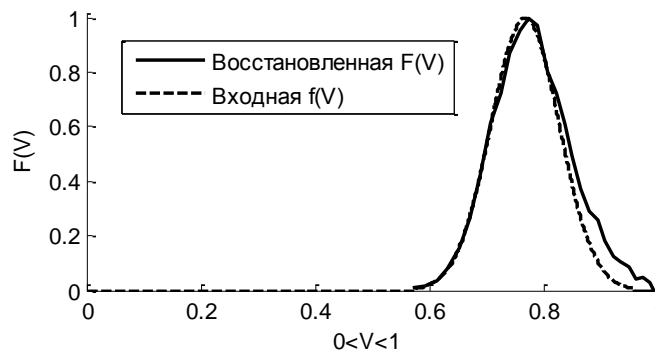


Рис. 2. Сравнение функции распределения по осцилляторным скоростям на входе $f(v_{\perp})$ и выходе $F(v_{\perp})$

Литература

1. A.G.Litvak, G.G.Denisov, V.E.Myasnikov, E.M.Tai, E.A.Azizov, V.I.Ilin. Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion. // Int. J. IRMM&THz Waves, 2011, V.32, No.3, pp.337-342.
2. M.Thumm, State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013), KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1-138, 2014.
3. G.S.Nusonovich. Introduction to the Physics of Gyrotrons, John Hopkins University press, 2004, 352 p.
4. Ергаков В.С. Моисеев М.А. Эрм Р.Э. Влияние разброса скоростей на характеристики гиротрона. - Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1980, №3, с.20.
5. Зарницына И.Г. Нусинович Г.С. Конкуренция мод, резонансных с разными гармониками циклотронной частоты. - Изв. Вузов, Радиофизика, 1977, т.20, №3, с. 461-467.
6. A.N.Kuftin, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, A.S.Postnikova, V.E.Zapevalov. Advanced numerical and experimental investigation for gyrotrons helical electron beams. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1999, V.20, No.3, pp.361-382.

METHOD OF NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROSTATIC ELECTRON BEAM PROPERTIES ANALYZER IN A GYROTRON

V.N. Manuilov, A.V. Klimov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The method of numerical simulation of the electron beam properties analyzer taking into account the 3-dimensional electric field distribution has been developed. The code CST STUDIO SUITE was applied for calculations. The current pipes approach was used for numerical simulation. MATLAB preprocessor and postprocessor scripts were applied for data processing. As an example the simplest version of the analyzer employing the electric field retarding technique was calculated. It is shown that the major factors that affect distortion of the measured beam parameters are the tangential component of the decelerating electric field in the vicinity of the beam and beam space charge forces.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ РТЦ

д. ф.-м. н. Денисов Б.Н., Зазулин Я.А., Козлов Н.Н.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

В настоящее время для получения сигналов различной формы широко используются цифровые многофункциональные генераторы АК ИП-3407/1А или аналоговые «Г6-34». Вместе с осциллографом и анализатором спектра эти приборы являются основой измерительного комплекса большого числа лабораторных работ по радиотехнике. Сейчас идет интенсивная замена всего парка аналоговой измерительной техники на цифровую. Большинство цифровых осциллографов имеют функцию быстрого преобразования Фурье, и поэтому при создании лабораторных работ надобность в анализаторах спектра отпадает. Функцию анализаторов спектра выполняют осциллографы. К сожалению, качество быстрого преобразования Фурье в большинстве бюджетных осциллографов, закупаемых для лабораторных работ, крайне низко, например осциллограф АК ИП-4116/1А. На рис.1а приведена рассчитанная теоретически спектрограмма меандра со скажностью $g=2$. На рис.1б приведена спектрограмма осциллографа АК ИП-4116/1А с использованием быстрого преобразования Фурье.

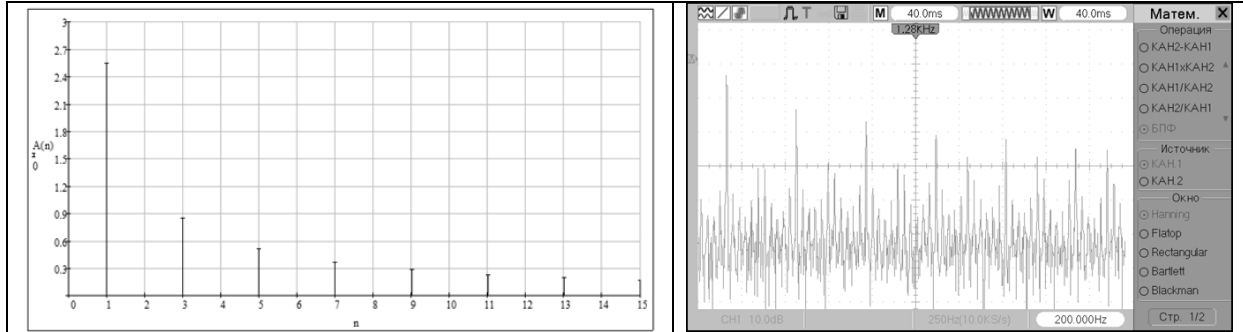


Рис. 1. Спектры меандра: а – рассчитанный теоретически,
б – полученный с помощью функции БПФ осциллографа АК ИП-4116/1А

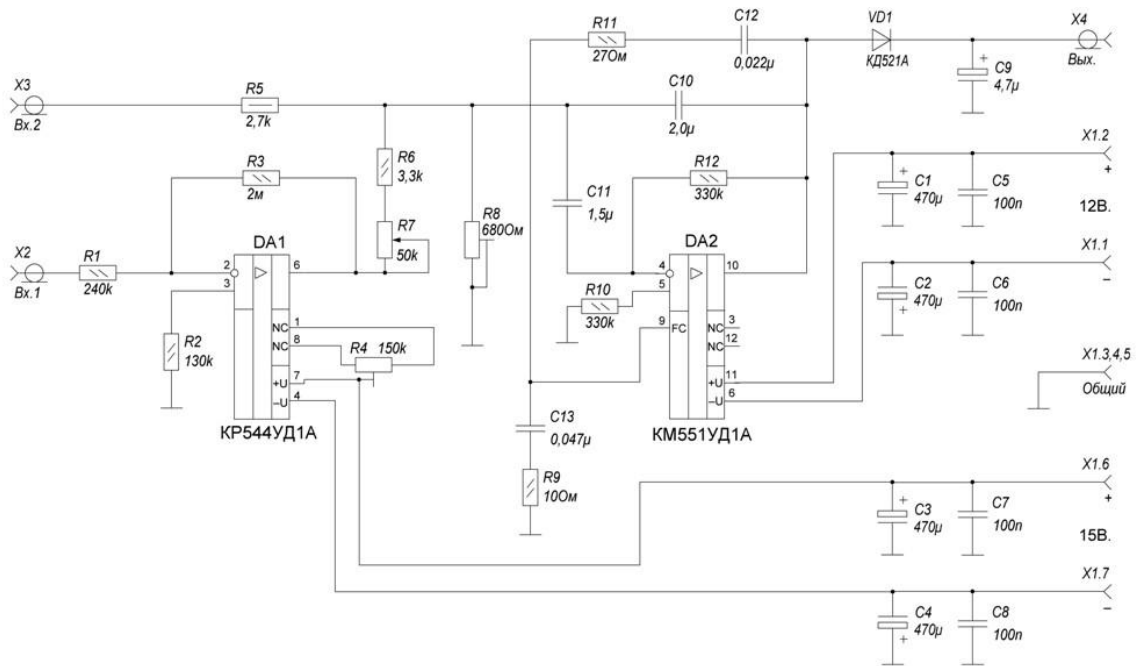


Рис. 2. Схема узкополосного фильтра с полосой пропускания 10 Гц

Наличие шумов на спектрограмме осциллографа, значительно снижает точность при измерении малых гармоник. Нами предлагается усовершенствование цифрового многофункционального генератора АКПП-3407/1А и аналогового «Г6-34», которое превращает его в качественный анализатор спектра сигналов. В цифровом генераторе АКПП-3407/1А и аналоговом «Г6-34» есть функция перемножения сигналов, один из которых может быть вырабатываемый генератором перестраиваемый по частоте гармонический сигнал. Следовательно, этот сигнал может выполнять роль сигнала гетеродина. Единственными элементами, отсутствующими в генераторе, который превращает его в анализатор спектра – это узкополосный фильтр и регистрирующий напряжение прибор. В анализаторах спектра обычно этот фильтр изготавливается на частоту 10Гц. Нами был изготовлен такой фильтр на основе микросхемы КМ551УД1МА. На рис. 2 приведена принципиальная схема разработанного фильтра.

Для превращения многофункционального генератора в анализатор спектра АКПП-3407/1А необходимо:

1. перевести генератор в режим перемножения сигналов.
2. выставить гармонический сигнал в первом канале
3. анализируемый сигнал выбрать из сигналов заложенных в программу генератора, или подать внешний, для этого перевести генератор в режим внешний сигнал.
4. На выход генератора подключить фильтр и сигнал с фильтра подать на вольтметр. В качестве вольтметра, можно использовать цифровой или аналоговый прибор. Изменяя частоту гармонического генератора, добиться максимального отклонения показания вольтметра. Максимальное значение вольтметра будет пропорционально амплитуде гармоники. Частота генератора - это частота исследуемой гармоники.
5. Если использовать генератор, имеющий режим ЛЧМ, то для автоматической записи спектрограммы, необходимо генератор перевести в режим ЛЧМ и сигнал с выхода фильтра подать на вход осциллографа. Время развертки ЛЧМ и время развертки луча на весь экран осциллографа должны совпадать. После этого провести измерения спектра и записать его на «флэш-память» с помощью функции осциллографа «запись на USB».

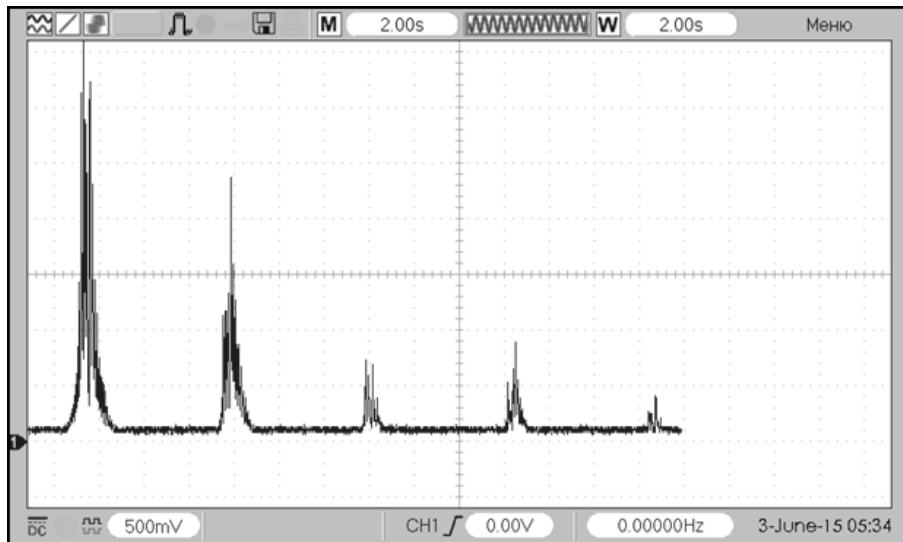


Рис. 3. Спектрограмма меандра со скважностью $g=2$ измеренная с помощью приставки к генератору

В случае аналогового многофункционального генератора «Г6-34» для использования его в качестве анализатора спектра, необходимо:

1. Подать анализируемый сигнал на вход АМ.
2. Сигнал с выхода генератора подать на полосовой фильтр.
3. Сигнал с полосового фильтра подать на вольтметр или любой другой прибор измеряющий напряжение.
4. Изменяя частоту генератора, измерить с помощью вольтметра амплитуды гармоник спектра сигнала, поданного на вход «АМ» генератора «Г6-34».

Нами проведено сравнительное исследование качества спектрограмм полученных с помощью разработанного нами устройства и промышленного прибора осциллографа АКПП-4116/1. На рис. 3 приведён спектр сигнала, полученный с помощью нашего анализатора спектра. Для этого мы использовали смеситель многофункционального генератора «Г6-34». На модулирующий вход генератора был подан ЛЧМ сигнал, и скорость развертки осциллографа была согласована со скоростью развертки частоты. На рис.1б приведена спектрограмма этого же сигнала полученного с помощью БПФ осциллографа АКПП-4116/1. Качество спектра полученного с помощью разработанного нами устройства значительно выше. Практически полностью отсутствуют шумы. Следовательно, разработанная нами приставка позволит более наглядно проводить эксперименты по исследованию спектров различных сигналов.

На рис. 2 приведена спектрограмма меандра со скважностью $g=2$, измеренная с помощью приставки к генератору АКПП-3407/1А. Запись спектрограммы осуществлена с помощью осциллографа АКПП-4116/1А. На рис.3 Приведена спектрограмма этого же меандра измеренная с помощью функции БПФ осциллографа АКПП-4116/1А. Из рис. 3 видно, что качество спектрограммы на рис.2 значительно выше, практически отсутствуют шумы. В этом случае возможна запись осциллограмм на внешний носитель.

MULTIFUNCTIONAL MEASURING ATTITUDE FOR LABORATORY WORKS ON COURSE OF REC

B. N. Denisov, Ya. A. Zazulin, N. N. Kozlov

Mordovsky State University n. a. N. P. Ogaryov

The article describes a method creating a spectrum analyzer based on the function generator. The mathematical model of the offered device, results of experimental researches is given

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Гиацингов А.М., к.т.н. Мамросенко К.А.

НИИ системных исследований РАН

В настоящее время ощущается нехватка квалифицированных специалистов, способных проводить исследования и разработки в областях создания логических и запоминающих функциональных элементов перспективной микро- и наноэлектроники, микро-электро-механических (MEMS), микроэлектронных и других структур на основе активных материалов [1]. Причем потребности в квалифицированных специалистах по ряду направлений, в ближайшие годы будут только расти. Требуется увеличение производительности образовательных центров, в том числе за счет внедрения новых методик подготовки, создания более совершенных технических средств обучения.

Под тренажерно-обучающей системой (ТОС) будем понимать техническое средство для подготовки специалистов в едином информационном окружении, отвечающее требованиям методик подготовки, создающее условия для получения знаний, навыков и умений, реализующее модель таких систем и обеспечивающее контроль над действиями обучаемого, а также для исследований. ТОС возможно использовать при подготовке специалистов в широком спектре проблемно-ориентированных областей [2], [3]. Использование мультимедийных технологий при построении ТОС позволяет создавать банки данных учебных материалов, содержащие изображения, тексты, сопровождающиеся аудио, видео и другими визуальными эффектами; включают в себя интерактивный интерфейс; позволяют эффективно использовать накопленную информацию при организации дистанционного и распределенного обучения.

Особый интерес представляют следующие виды аудиовизуальной учебной информации:

- динамические графики развития реальных процессов;
- диаграммы, гистограммы для анализа массивов данных;
- иллюстративные материалы изучаемых объектов;
- мнемосхемы;
- трехмерные модели объектов, их частей;
- функциональные схемы взаимодействия отдельных подсистем, а также обобщенные схемы работы изучаемой системы в целом;
- результаты работы моделирующих комплексов в форме видео-образов, с сохранением управляемости приложения;
- видеоматериалы реальных объектов.

Виртуальное трехмерное окружение является контейнером, в котором происходит объединение разнородной информации. Одно из применений видеоматериалов в ТОС - отображение графического виртуального образа инструктора, получаемого в реальном масштабе времени с видеокамеры. Кроме того, одновременное воспроизведение видеоматериалов может использоваться для отображения результатов моделирования нескольких параллельно выполняемых процессов.

Воспроизведение видеоматериалов внутри виртуальной трехмерной сцены является сложной задачей, так как необходимо учитывать факторы, не актуальные при воспроизведении в медиаплеерах. Подсистема визуализации должна обеспечивать отображение трехмерной сцены с приемлемой частотой кадров (не менее 25 кадров в секунду), и должна быть способна при этом реагировать на внешние воздействия, в том числе на изменения параметров трёхмерной сцены или загрузку дополнительных объектов. Для отображения нескольких видеоматериалов высокой четкости в виртуальной трехмерной сцене была разработана и внедрена архитектура декодера видеоматериалов. Также были созданы методы эффективной передачи данных в видеокарту для обеспечения высокой производительности подсистемы визуализации при отображении видеоматериалов высокой четкости.

Разработанная архитектура графической подсистемы позволяет декодировать и отображать одновременно несколько видео высокой четкости в трехмерной сцене. Состав архитектуры включает: декодер видео, в котором происходит декодирование видео и аудио пакетов; подсистема воспроизведения декодированного звука; управляющая структура, необходимая для запуска видео, паузы воспроизведения, выставления громкости воспроизводимого видео и т.д.; интерфейс взаимодействия с движком, необходимый для обновления видеокадров; интерфейс управления графической подсистемой.

Процесс декодирования является ресурсоёмким процессом. Например, декодирование одного видео пакета видео с разрешением 1280 на 720 (720p) на процессоре Intel Core 2 Quad 2,66 ГГц занимает от пяти до десяти миллисекунд, для видео размером 1920 на 1080 (1080p) – от 10 до 20 мс. Декодирование пакета звуковых данных занимает значительно меньше времени (0,5 – 2 мс), но, если одновременно декодируется звук для нескольких воспроизводимых видео, это также может серьезно снизить производительность. Скорость получения пакетов из видео файла ограничивается производительностью системы хранения данных (СХД), что в свою очередь влияет на производительность подсистемы визуализации. Задержки образуются, если в момент считывания пакетов из видеофайла СХД обрабатывала другие команды, либо файл являлся фрагментированным, что заставило бы СХД искать фрагменты данного файла. Для преодоления проблем с производительностью была использована многопоточность.

Алгоритм воспроизведения видео и синхронизации видео и звука в приложениях-медиаплеерах зачастую проще, чем разработанный алгоритм, так как в этих приложениях фактор производительности менее значим. Наиболее часто применяемым методом синхронизации является синхронизация видео по звуку, то есть скорость воспроизведения звука считается постоянной величиной (определяется на основании информации о частоте дискретизации и количестве каналов, указанной в видеофайле), а время отображения видеокadra рассчитывается на основании времени, записанном в пакетах, и времени, прошедшим с начала воспроизведения звука. В разработанном алгоритме скорость воспроизведения звука считается величиной постоянной, а время вывода видеотекстуры на экран рассчитывается с учетом производительности (кадров в секунду) подсистемы визуализации. Для корректной синхронизации видео и звука необходимо, чтобы их воспроизведение началось одновременно. Для обеспечения синхронизации видео и звука, после кэширования и запуска аудиопотока, вводится задержка исполнения потока декодера (для преодоления задержки генерации звуковых буферов звуковой картой, которая составляет примерно 100-250 миллисекунд). После указанной задержки запускается процесс воспроизведения видео.

Одним из видов мультимедийной информации, использующейся в тренажерно-обучающих системах, является графический виртуальный образ инструктора. Для его внедрения в единое синтезированное трехмерное окружение создан метод рир-проекции, базирующийся на методе 3D кеинга. Основной идеей технологии кеинга является выделение объекта с однородного фона. Данный процесс можно описать как процесс создания маски, содержащей информацию о прозрачности изображения, отделяющей объект от остального изображения. В компьютерной графике маска является изображением с одним каналом, используемым для определения прозрачных областей переднего плана и фона на скомбинированном изображении. Также маска прозрачности часто называется «альфа каналом» [4].

Создание качественной маски прозрачности является трудоемкой задачей. Наиболее простым решением является создание маски, которая делает фон изображения полностью прозрачным, а объекты переднего плана полностью видимыми. Однако, такой подход неприменим для сложных сцен – объекты переднего плана будут иметь резкие края и, соответственно, будут выглядеть нереалистично. Для отображения таких объектов, как волосы и дым необходимо, чтобы маска прозрачности поддерживала не только дискретные значения прозрачности (0 – прозрачный объект, 1 – непрозрачный объект), но и значения в пределах от 0 и 1 для обеспечения частичной прозрачности объекта.

Существует несколько подходов, используемых для выделения объектов с фона. Наиболее распространенным подходом является использование однородного фона, например, синего или зеленого. Недостатком является необходимость точной калибровки света для получения однородного фона. Еще один подход состоит в использовании нескольких изображений, на которых присутствует объект, который необходимо выделить. Однако данный подход требует строгих условий съемки и применим только для статических объектов. Третий подход основывается на том, что объекты фона и переднего плана заранее известны. Пользователь выделяет объекты на переднем плане и фоне, а оставшаяся часть изображения – границы объекта на переднем плане – считаются зоной перехода. Данный подход не может быть использован в реальном масштабе времени, соответственно, неприменим для использования в подсистеме визуализации ТОС[5].

Метод кеинга, реализованный в подсистеме визуализации ТОС, базируется на методе 3D кеинга. Так как любая реализации кеинга является ресурсоемкой, то при обработке изображений большого размера на центральном процессоре затруднительно достигнуть работы подсистемы визуализации в режиме реального времени (не менее 25 кадров в секунду), что является одним из базовых требований к подсистеме визуализации. Даже использование современных многоядерных процессоров для выполнения процесса кеинга не гарантирует существенного увеличения скорости обработки. На сегодняшний день производительные многоядерные процессоры состоят из 8-12 ядер, и способны одновременно обрабатывать от одного до восьми (при использовании различных оптимизаций) пикселей изображения на каждом ядре. Современные видеокарты состоят из тысяч шейдерных процессоров, способных одновременно обрабатывать пиксели изображения. Учитывая данное обстоятельство, было принято решение использовать вычислительные мощности графического процессора для реализации кеинга.

Одним из основных методов формирования управляющих воздействий для системы предтренажерной подготовки (СПП) является выполнение программируемых сценариев. Пользователь создаёт сценарии, в которых определяет алгоритмы взаимодействия компонентов системы между собой и системы в целом. Например, сценарий может содержать алгоритмы для определения взаимодействий объектов виртуальной трехмерной сцены между собой, такие как просчет динамики столкновений объектов друг с другом в соответствии с физическими законами. Сценарии задаются пользователем в графическом интерфейсе и обрабатываются соответствующей подсистемой.

Архитектурно, взаимодействие пользователя с системой предтренажерной подготовки при помощи программируемых сценариев реализовано согласно концепции (паттерну) «модель – представление –

контроллер» (Model-View-Controller, MVC). Паттерн распределяет обработку взаимодействия с пользовательским интерфейсом между тремя участниками: моделью, представлением и контроллером. Типовое решение модель-представление-контроллер подразумевает выделение трех отдельных ролей. Модель - это объект, предоставляющий некоторую информацию об объекте. У модели нет визуального интерфейса, она содержит в себе все данные и поведение, не связанные с пользовательским интерфейсом. Представление отображает содержимое модели средствами графического интерфейса. Функции представления заключаются только в отображении информации на экране. Все изменения информации обрабатываются контроллером. Контроллер получает входные данные от пользователя, выполняет операции над моделью и указывает представлению на необходимость соответствующего обновления. В этом плане графический интерфейс можно рассматривать как совокупность представления и контроллера[6].

По умолчанию многие динамические языки используют интерпретатор для обработки введенных команд. Однако использование интерпретатора в значительной степени снижает производительность обработки сценариев и способно снизить производительность всей системы предтренажерной подготовки в целом. Чтобы избежать проблем с производительностью было принято решение обрабатывать сценарии при помощи так называемой компиляции «на лету» (Just-In-Time compilation, JIT compilation).

Апробация результатов работы осуществлена в МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского при создании мультимедийного курса «Космические телекоммуникации».

Литература

1. Кафедра микро- и наноэлектроники — Московский физико-технический институт [Электронный ресурс]. URL: <https://mipt.ru/education/chairs/kafedra-mikro-i-nanoelektroniki.php> (дата обращения: 08.10.2015).
2. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А., Решетников В.Н. Инструментальные средства предтренажерной и тренажерной подготовки операторов сложных технических систем // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2014. № 1. С. <http://swsys-web.ru/simulator-training-operators.html>.
3. В.Н. Решетников. Космические телекоммуникации. Тригонометрические воспоминания. Санкт-Петербург: ООО «РИП СПб», 2015. 138 С.
4. Bill Schnarr. How Chroma Keying Works [Электронный ресурс]. URL: <http://www.signvideo.com/chromaku-wks.htm> (дата обращения: 30.09.2014).
5. Михайлюк М.В., Брагин В.И. Технологии виртуальной реальности в имитационно-тренажерных комплексах подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 2(7). С. 82–93.
6. Обобщенный Model-View-Controller [Электронный ресурс]. URL: <http://rsdn.ru/article/patterns/generic-mvc.xml> (дата обращения: 24.02.2014).

Giatsintov A.M. e-mail: algts@inbox.ru , Mamrosenko K.A. e-mail: kirillam@ya.ru

USE OF MULTIMEDIA TECHNOLOGIES IN TRAINING SPECIALISTS OF MICROELECTRONIC INDUSTRY

A.M. Giatsintov, K.A. Mamrosenko

Scientific Research Institute for System Analysis of RAS

Today in many industry sectors (for example, in microelectronics industry) there is a shortage of qualified specialists, capable of controlling complex technical systems. A massive increase of performance of training centers is needed, particularly with adaption of new methods of training and developing of more effective training complexes. Using multimedia technologies in development of training-simulation systems allows creating data banks of training materials, that include images, texts, accompanied by audio, video and visual effects; interactive interface; provide an effective way of using collected information in development of distant and distributed training.

This article describes a new method of playing heterogeneous videos on edges of objects in virtual 3d scene. Architecture of video files decoder is presented, algorithms for syncing audio and video data are depicted. Limitations and issues of video playback in virtual scene are analyzed.

One way of using multimedia data in training simulation systems is to insert a graphical representation of instructor into virtual environment. Article presents a method for correct visualization of instructor image in a 3d virtual scene. Its main function is to separate an object from a uniform background. This process can be described as a process of creating a mask that contains information about image translucency – information that can be used to separate object from other parts of image.

Профессиональное образование в нано-, микро- и радиоэлектронике

Article describes methods of interaction with training simulation system with the use of programmable scenarios, and provides the description of their principles of operation.

Полиэдры, их триангуляции и f -векторы

В.Н. Шевченко

Нижегородский Государственный Университет им. Лобачевского, просп. Гагарина 23, 603950 Нижний Новгород, Россия
shev@vmk.unn.ru

1. Цель доклада - познакомить слушателей с некоторыми результатами о полиэдрах, то есть множествах $P(A, b)$ решений систем линейных неоднородных неравенств

$$Ax \leq b, \tag{1}$$

множеством граней $\Gamma(A, b)$ полиэдра $P(A, b)$, множеством $T(A, b)$ его триангуляций и множеством граней $\Gamma^T(A, b)$ триангуляций множества $T(A, b)$.

Приведу два примера математических задач, возникающих в связи с этими понятиями.

Задача 1 На плоскости задан выпуклый n -угольник P_n (n -polygon) координатами своих вершин (a_j, b_j) и каждой вершине приписан вес c_j . Найти триангуляцию (то есть разбиение P_n на треугольники) P_n наименьшего веса.

Эта задача - основа многих задач вычислительной геометрии, имеющих много приложений в синтезе сверхбольших интегральных схем (СБИС), в обработке изображений и проектировании баз данных. Имеется много алгоритмов для ее решения с разными оценками трудоемкости и требуемой оперативной памяти [6, 7, 11, 13, 15].

Задача 2 Сколько тетраэдров может иметь триангуляция трехмерного куба (и ее d -мерный вариант)?

Если в (1) на все переменные x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) или на их часть x_j ($j \in J$) наложить ограничение целочисленности, то круг возможных приложений неизмеримо возрастает (существует даже точка зрения, что на таком языке можно сформулировать любой осмысленный вопрос), но, к сожалению, при этом сложность тоже возрастает. Например, область изменения x_j при $j \in J$ перестает быть непрерывной и, следовательно, мы лишены возможности пользоваться мощным аппаратом дифференциального и интегрального исчислений.

С математической точки зрения это дискретный (булев) вариант классической задачи аппроксимации функции полиномами. Слушатель сам найдет примеры так или иначе связанные с похожими задачами, я же сошлюсь на Приложение 2 из [12]. Приведу одну из задач, рассмотренных там - оптимизацию комплекса связи с n абонентами.

Задача 3 Пусть в распоряжении комплекса радиосвязи имеется m частот и известна скорость телеграфирования c_{ij} (предполагается, что $c_{ij} \in \mathbb{Z}_+$) абонента с номером j ($j = 1, \dots, n$) на i -ой частоте ($i = 1, \dots, m$). Требуется каждому абоненту выделить некоторую частоту так, чтобы не было взаимных помех (то есть на i -ой частоте может работать только один абонент) и чтобы суммарная скорость телеграфирования была максимальной, причем для некоторых абонентов некоторые частоты использовать запрещено (в этом случае соответствующие $c_{ij} = 0$).

Вводя переменные x_{ij} , равные единице если j -му абоненту выделяется i -ая частота, и равными нулю в противном случае, получаем математическую постановку, известную как задача о назначениях:

$$\max \sum_{ij} c_{ij} x_{ij}, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n, \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, m \tag{4}$$

$$x_{ij} \leq c_{ij} \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

При проектировании комплекса связи важно не только уметь решать поставленную задачу при заданных c_{ij} , но и получить условия совместности системы (2)-(5), а также оценить число несовместных задач. Применение теоремы Гейла [1] дает необходимые и достаточные условия совместности системы (2)-(5) в следующем виде: $J \subset \{1, \dots, n\}$

$$\sum_{i=1}^m \min \left\{ 1, \sum_{j \in J} c_{ij} \right\} \geq |J|.$$

Логический анализ последнего условия позволил получить рекуррентную формулу для подсчета числа несовместных систем (2)-(5) в зависимости от m , n и m' (m' – величина, ограничивающая сверху число положительных c_{ij} в каждом столбце матрицы (c_{ij})).

Рассмотрим теперь ситуацию, в которой можно пойти на взаимные помехи, если это сулит значительный выигрыш в суммарной скорости. Потребуем, чтобы выбранные частоты для разных абонентов совпадали не более k раз (если частота с номером i_ν ($\nu = 1, \dots, n$) выбрана для y абонентов, то число совпадений будем считать равным $\sum_{\nu=1}^n \max \{0, y_\nu - 1\}$). Получается при этом обобщение задачи о назначениях. Полученный в [9] критерий совместности и потоковая интерпретация поставленной задачи позволили находить минимальное k , при котором еще происходит увеличение суммарной скорости телеграфирования, а также просчитать долю несовместных задач при различных m , n и k [8].

2. Примером внешней аппроксимации, упрощающей форму объекта $X = Z^n \cap P(A, b)$, может служить классическая выпуклая оболочка $\text{conv}(X)$. Однако, использование в целях аппроксимации классической выпуклости для ряда важных с точки зрения приложений классов геометрических объектов приводит к результатам низкого качества - значительному росту отходов при раскрое материала, существенному снижению плотности размещения блоков интегральных схем и т. п. Более того, для геометрии СВИС и задач прямоугольного раскроя характерны так называемые изотетические области (*isothetic polygon*), граница которых образуется отрезками, параллельными координатным осям. Применение же традиционной выпуклой оболочки к такого рода области нарушает условие изотетичности.

Прежде всего необходимо точное определение термина триангуляция, которое можно сделать на языке $(0, 1)$ -матриц, позволяющем описать дискретные управляющие системы.

Известно, что любая функция алгебры логики единственным образом представляется полиномом Жегалкина. В теоретической криптографии исследуется взаимосвязь двух свойств булевых функций: алгебраической иммунности и порядке нелинейности. В основе анализа криптографической устойчивости потоковых шифров, в котором, как правило, рассматривается вопрос, удовлетворяет ли булева функция f некоторым критериям (нередко конфликтующим между собой), позволяющим противостоять криптографическим атакам. Пусть

$$A_2^3 = \begin{pmatrix} I \times I \times E \\ I \times E \times I \\ E \times I \times I \end{pmatrix},$$

где \times – кронекерово произведение. Для целочисленной $d \times n$ -матрицы B со столбцами b_j ($j = 1, 2, \dots, n$) обозначим через $B^< = \{\sum_{j=1}^n b_j y_j \mid y_j \geq 0\}$ множество неотрицательных линейных комбинаций ее столбцов и предположим, что $B^<$ совпадает со множеством решений системы

$$\sum_{k=1}^d a_{ik} x_k \geq 0, \quad (i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

где $a_{ik} \in Z$, $A = (a_{ik}) \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, d$.

Если известна матрица $C = AB$, то ее нулевые элементы (а, следовательно, и ненулевые) дают возможность описать решетку граней (частично упорядоченное множество), и, в частности, найти ее f -вектор. Соответствующие определения можно посмотреть в [3-5].

Триангуляцией конуса K с узлами из множества B назовем множество $T(B) = \{S_1, \dots, S_t\}$ таких S_τ , для которых выполнены следующие условия:

- 1) $S_\tau \subseteq \{1, \dots, n\}$,
- 2) $|S_\tau| = r = \text{rank} B(S_\tau)$,
- 3) $B^\angle = \bigcup_{\tau=1}^t B^\angle(S_\tau)$,
- 4) $B^\angle(S_\tau) \cap B^\angle(S_\sigma) = B^\angle(S_\tau \cap S_\sigma)$.

Множество $\Delta(T(B)) = \bigcup_{\tau=1}^t \Gamma(S_\tau)$ дает пример геометрической реализации d -мерного однородного симплицеального комплекса (с.к.). При $k = 0, \dots, d$ обозначим через $\Delta_k = \bigcup_{\tau=1}^t \Gamma_k(S_\tau)$ множество k -мерных граней с.к. Δ , положим $f_k(\Delta) = |\Delta_k|$, $f(\Delta) = (f_0(\Delta), \dots, f_d(\Delta))$ и $f(\lambda, \Delta) = \sum_{k=0}^d f_k(\Delta) \lambda^k$.

Известно [10, 13, 14], что многочлен $f(\lambda, \Delta)$ можно представить в виде $f(\lambda, \Delta) = \sum_{k \in \mathbf{Z}_+} \gamma_k(\Delta) \lambda^k (1 + \lambda)^{d-k}$, где $\gamma_0(\Delta) = 1$. Назовем целочисленную последовательность $\gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots)$ (d, n) -реализуемой, если $\gamma_k = \gamma_k(\Delta)$ при $k = 0, 1, \dots, d$ и $\gamma_k = 0$ при $k > d$. Критерий реализуемости можно найти в [6].

3. Для решения аналогичного вопроса в неоднородном случае окаймим матрицу A элементами a_{00} , a_{i0} $i = 1, \dots, m$, a_{0j} $j = 1, \dots, n$ и рассмотрим пару двойственных задач линейного программирования:

$$\begin{aligned} \max \sum_{j=1}^n a_{0j} x_j & \qquad \min \sum_{i=1}^m u_i a_{i0} \\ x_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n) & \qquad \sum_{i=1}^m a_{ij} u_i \geq a_{0j}, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq a_{i0}, \quad (i = 1, \dots, m) & \qquad u_i \geq 0 \end{aligned}$$

Хорошо известно [3], что структуры многогранников прямой и двойственной задач можно описать множеством неотрицательных решений однородной системы неравенств $Kz \geq 0$, где K – кососимметрическая матрица порядка $(1 + m + n)$. Главное оружие здесь – собственные числа матрицы $A \cdot A^T$.

Этот подход в ряде случаев позволяет определять f -векторы триангуляций, не находя матрицы B . Применения указанного подхода в целочисленном программировании будут приведены.

Полученный критерий позволяет поставить вопрос о „наиболее экономной“ реализации f -вектора (точнее говоря, γ -вектора). Предполагается ознакомить слушателей с результатами, полученными на этом пути.

Утверждение. При $d \leq 4$ множества (d, n) -реализуемых f -векторов полностью характеризуются следующими условиями: целочисленный неотрицательный вектор $\gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_d)(d, n)$ -реализуем тогда и только тогда, когда $\gamma_0 = 1$, $\gamma_1 \leq n - d - 1$

$$\gamma_2 \leq \gamma_1 \quad d = 2, \quad \gamma_3 \leq \gamma_2 \leq (\gamma_1)^{\langle 1 \rangle}, \quad \gamma_3 \leq \gamma_1 \quad d = 3,$$

$$\gamma_4 \leq \gamma_3 \leq \gamma_2 \leq (\gamma_1)^{\langle 1 \rangle}, \quad \gamma_4 \leq \gamma_1, \quad \gamma_2 - \gamma_3 \leq (\gamma_1 - \gamma_4)^{\langle 1 \rangle} \quad d = 4,$$

где $(a)^{\langle 1 \rangle} = a(a + 1)/2$.

4. Анализ характеристического многочлена матрицы AA^T позволяет получить ряд качественных результатов о минимальных триангуляциях кубов небольшой размерности [6],

поскольку все его корни целые, а число различных среди них зависит только от n . Предлагается распространить этот подход на перманенты и подперманенты той же матрицы, обладающие аналогичными свойствами (см. [11]). В частности, этот подход позволяет уточнить понятие "небольшая размерность".

Задача оценки средней величины миноров матриц некоторого типа играет важную роль во многих разделах математики, особенно в целочисленном программировании. Так, например, хорошо известно [2], что если матрица многоиндексной транспортной задачи неунимодулярная, то в некоторых случаях транспортный многогранник имеет вершины с дробными координатами и максимальный из знаменателей дробных компонент вершин многогранников не превосходит абсолютной величины базисного минора матрицы задачи.

Обозначим через $B_{n,k}$ булеву матрицу из n строк и $\binom{n}{k}$ столбцов, столбцами которой являются всевозможные булевы векторы, содержащие ровно k единиц. Заметим, что в случае $k = 2$ матрица $B_{n,k}$ представляет собой матрицу инцидентности полного графа. В случае $k \geq 3$ матрицу $B_{n,k}$ можно рассматривать как матрицу инцидентности полного гиперграфа.

Литература

1. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. - М.: Наука, 1974
2. Гэри М. Р., Джонсон Д. С. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи // М.: Мир, 1982
3. Емеличев В. А., Ковалёв М. М., Кравцов М. К. Многогранники, графы, оптимизация. М.: Наука, 1981.
4. Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И. Лекции по теории графов. Наука, Москва, 1990 г.
5. Кудрявцев В. Б., Гасанов Э. Э., Подколзин А. С. Введение в теорию интеллектуальных систем. - М.: Изд-во ф-та ВМиК МГУ, 2006
6. Осокин В. В. Асимптотически оптимальный алгоритм расшифровки разбиения булевого куба на подкубы // Интеллектуальные системы. - 2007. - т.11. - с. 587-606
7. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. Введение. М.: Мир, 1989 - 478 с.
8. Рогачев И. Б., Здравомыслова О. А. О числе несовместных задач транспортного типа, связанных с оптимизацией систем радиосвязи // Техника средств связи. Серия техника радиосвязи. - 1978. - № 9 (25). - с. 12 - 15
9. Таланов В. А., Шевченко В. Н. Об одной задаче на динамической транспортной сети // Изв. вузов. Радиофизика. - 1972. - Т.15, № 7. - с. 1113 - 1114.
10. Титова Е. Б., Шевченко В. Н. О минорах матрицы ограничений многоиндексных транспортных задач, Дискретная математика. - 2012. - Т.24, N 4. - с. 147 - 157
11. Цветкович Д., Дуб М., Захс Х. Спектры графов. Теория и применения. Киев. Наукова думка.
12. Шевченко В. Н. Качественные вопросы целочисленного программирования. - Москва, Физматлит, 1995 г.
13. Шевченко В. Н., Груздев Д. В. Модификация алгоритма Фурье-Мощкина для построения триангуляции и её звёздной развёртки. // Дискретный анализ и исследование операций. Сер. 2. Новосибирск: Изд-во ин-та математики, 2006. т.13, № 1. 1-101.
14. Шевченко В. Н. Триангуляции выпуклых многогранников и их булевы функции // Математические вопросы кибернетики. Вып. 16. М.: Физматлит, 2007. С. 43-56
15. Шульц М. М. Аналитическая и вычислительная геометрия. Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2010, 126 с.

POLIHEDRA, THEIR TRIANGULATIONS AND F-VECTORS

V. N. Shevchenko

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

We consider the set solutions to a system of linear inequalities (rational, integer), triangulations of polyhedra and convex cones and the f-vectors. The examples of applied problems are considered.

РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

к.ф.-м.н. Горюнов Б.М.

Московский технический университет связи и информатики
Волго-Вятский филиал

Для целей развития дальней, в том числе космической связи, а так же дальнейшей микроминиатюризации вычислительной техники, снижения ее энергопотребления в 70-х годах прошлого столетия в технологию изготовления дискретных полупроводниковых (п/п) приборов и интегральных схем (ИС) СВЧ диапазона произошло внедрение новых материалов на базе сложных п/п соединений, в частности арсенида галлия (АГ). Известные к тому времени методы контроля приповерхностных электрофизических свойств п/п материалов опирались на многократное до десяти раз прецизионное стравливание слоев толщиной до 200 ангстрем, измерение напряжения Холла методом Ван дер Пау и поверхностного сопотривления на оставшемся слое, не поддавались автоматизации и приводили к полному уничтожению рабочего слоя необходимого для изготовления п/п приборов и ИС.

Альтернативой методу прецизионного травления является дифференциальный метод определения профиля концентрации основных носителей заряда и их подвижности в субмикронных слоях АГ, заключающийся в создании на поверхности п/п пластины структуры полевого транзистора с барьером Шоттки и измерении вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик последнего [1]. Представляется, что этот метод интересен не только специалистам в области разработки СВЧ микроэлектронной аппаратуры, но и преподавателям высшей школы в области микроэлектроники.

В основе метода лежит решение одного из уравнений Максвелла в интегральной форме

$$dS = \frac{1}{\epsilon} \int_V \rho dV \quad (1)$$

где E - напряженность электрического поля в обедненном слое под затвором полевого транзистора, ϵ - абсолютная диэлектрическая проницаемость полупроводника, ρ - плотность заряда в обедненном слое, S_p - произвольная замкнутая поверхность внутри обедненного слоя, V - объем, заключенный внутри этой поверхности.

Выбирая в качестве пределов интегрирования поверхность параллелепипеда, в основании которого лежит затвор полевого транзистора площадью $S = W \cdot L$, где W и L - ширина и длина канала полевого транзистора соответственно, высотой $h = y - y_0$, где y - координата произвольной плоскости параллельной плоскости затвора внутри обедненного слоя, а y_0 - толщина обедненного слоя при заданном смещении U_g на затворе транзистора, получаем из уравнения (1) следующее выражение для напряженности электрического поля в произвольной точке внутри обедненного слоя с координатой y

$$-E_y = \dots \quad (2)$$

где $Q(y_0)$ и $Q(y)$ - полный заряд обедненного слоя под затвором и часть этого заряда под затвором до плоскости с координатой y .

Используя связь между напряжённостью электрического поля и потенциалом $\vec{E} = -grad\phi$ и интегрируя повторно уравнение (2), получаем интегральную связь разности потенциалов между точками канала и затвора с концентрацией ионизованных примесей под затвором и толщиной обедненной области

$$\phi_c - \phi_z = \frac{q}{\epsilon} \int_0^{y_0} y \cdot n(y) dy, \quad (3)$$

где q - модуль заряда электрона.

Из эквивалентной электрической схемы полевого транзистора на основании закона Ома для неоднородного участка цепи легко показать, что

$$\phi_c - \phi_z = I_d \cdot R_s + U_g + \Phi_k \quad (4)$$

где I_d - ток стока транзистора, R_s - сопротивление истока, U_g - напряжение на затворе относительно истока, Φ_k - контактная разность потенциалов на затворе.

Таким образом, можем записать, что

$$I_d \cdot R_s + U_g + \Phi_k = \frac{q}{\epsilon} \int_0^{y_0} y \cdot n(y) dy \quad (5)$$

Дифференцируя выражение (5) по напряжению U_g и используя определение крутизны управления

током стока $g_m = -\frac{\partial I_d}{\partial U_g}$, находим связь между электрическими параметрами полевого транзистора и геометрическими размерами обедненного слоя

$$y_0 = \varepsilon WL, \quad (6)$$

где c – емкость затвора полевого транзистора.

Используя выражения, связывающие ток стока с напряжением U_d на нем $I_d = \frac{U_d}{R_T}$, где $R_T = R_S + R_C + R_d$ – суммарное сопротивление истока, канала и стока, и сопротивление канала с его электрическими и геометрическими параметрами

$$R_c^{-1} = q \frac{W}{L} \int_{y_0}^a \mu(y) \cdot n(y) dy,$$

где a – толщина активного слоя полевого транзистора, аналогичным путем устанавливаем связь между подвижностью $\mu(y_0)$ основных носителей заряда на границе обедненного слоя с каналом и электрическими параметрами транзистора в виде

$$\mu(y_0) = \left(\frac{LRT}{Rc} \right)^2 \frac{gm}{U_d C}.$$

Поскольку $R_T \approx R_c$ для полевых транзисторов с широким затвором, то с высокой степенью точности для них можно считать, что

$$\mu(y_0) = L^2 \frac{gm}{U_d C}. \quad (7)$$

Измеряя параметры полевого транзистора (g_m , C , R_S) при изменении напряжения U_g , по формулам (7) и (6) можно рассчитать профиль распределения подвижности основных носителей заряда по глубине канала полевого транзистора, т.е. по глубине легированного слоя, на основе которого изготовлен полевой транзистор. Для измерения концентрации основных носителей заряда в этом случае удобно воспользоваться известными формулами вольт-фарадного метода

$$n(y) = \frac{c}{\varepsilon q S} \cdot \left(\frac{dc}{dU_g} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$y = \frac{\varepsilon S}{c} \quad (9)$$

Как видно из полученных выражений, модель полевого транзистора позволяет достаточно просто исследовать распределение основных носителей заряда и их дрейфовой подвижности по глубине субмикронных слоев арсенида галлия на полуизолирующей подложке этого материала.

Литература

1. R.A.Pucel, C.F.Krumm. Simple method of measuring drift-mobility profiles of thin semi-conductor films. "Electron Lett.", 1976, 12, №10, 240-242.

SOLUTION OF SOME MICROELECTRONICS PROBLEMS BY MEANS OF ELECTRODYNAMICAL METHODS

B. M. Goryunov

Moscow Technical University of Communication and Informatics
Volgo-Vyatka branch

The differential method for determining the distribution of the concentration profile of the major carriers and their mobility in the depth submicron layers of the gallium arsenide on the solution of Maxwell's equations in integral form for the one-dimensional model of Schottky barrier gate FET. This method is supposed to be of interest to specialists in the field of microwave microelectronic devices, and high school teachers in the field of microelectronics and solid-state physics.

НАНО-, МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ

*Нано-, микро- и радиоэлектроника в медицине и микробиологии.
Грид-технологии в телемедицине*

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ

академик РАН Кузнецов Н.А.¹, к. т. н. Григорьев Ф.Н.¹,
к. ф. н. Гречишкина Н.А.¹, Халуп С.Ю.²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Исследование вызванных потенциалов (ВП) стало одним из перспективных методов нейрофизиологии, позволяющих получать информацию о работе центральной нервной системы. В связи с высокой чувствительностью, специфичностью, экспериментальной простотой и доступностью оборудования ВП становятся одним из основных инструментов врача для ранней диагностики поражений сенсорных систем, в экспертной практике и во время операций. Успехи экспериментальной и теоретической неврологии с использованием метода ВП давно привлекали внимание клинической нейрофизиологии, однако стандартное использование метода встречает существенные трудности. При регистрации ВП от интактных покровов головы дополнительно регистрируется электрическая активность в виде ЭЭГ, электромиограмм, аппаратурных шумов и любых артефактов; ее амплитуда в норме достигает 100 мкВ, а при патологии – 200, 500 и даже 1000 мкВ.

Сигнал ВП обычно не превышает 15 мкВ и выделить его из фона ЭЭГ весьма затруднительно. Зрительные ВП имеют амплитуду до 10 мкВ, соматосенсорные ВП при стимуляции нервов – около 2 мкВ, некоторые компоненты стволовых ВП – до 0,5 мкВ. Отношение сигнала ВП к спонтанной ЭЭГ для зрительных ВП составляет 1/5, для соматосенсорных – 1/25, а для стволовых компонентов менее 1/100. Поэтому практически ни один из сигналов ВП нельзя видеть на обычной записи ЭЭГ. Для того, чтобы их увидеть и зарегистрировать, нужно, чтобы это отношение составляло хотя бы 2/1. Кроме того, ВП генерируется несколькими типами активности с различными временными и, возможно, пространственными характеристиками. В итоге образуется ВП сложной волновой конфигурации.

Выделение повторяющегося сигнала на фоне шума, в случаях, когда известны моменты появления самого сигнала, содержит два аспекта: обнаружение сигнала и выделение его с наименьшей ошибкой. Для решения этой задачи используется методика синхронного накопления, когда электрическая активность на участках фиксированной длительности, следующих за подачей стимула, т.е. эпохой анализа, последовательно суммируется. Начало анализируемых отрезков ЭЭГ должно совпадать по времени с моментом подачи стимула. При этом колебания ВП, возникающие синхронно со стимулом, накапливаются синфазно и дают прирост амплитуды пропорционально числу суммирований. Спонтанная же активность суммируется несинхронно, в результате прирост ее амплитуды происходит пропорционально квадратному корню из числа суммирований, и в результате ВП проявляется отчетливой.

Синхронное усреднение – мощный метод, позволяющий выделить сигнал практически при любом соотношении уровня сигнал/шум. Однако он обладает рядом серьезных недостатков, из которых главный – необходимость последовательной подачи большого числа стимулов. Диапазон применяемого числа усреднений для выделения ответов мозга весьма разнообразен: для одних достаточно нескольких суммирований, чтобы обнаружить ответ, для других, например, стволовых и ряда коротколатентных соматосенсорных, порядка нескольких тысяч. При каждой подаче ВП мозг реагирует активно, изменяя свой ответ на один и тот же потенциал. В результате возникает эффект привыкания и другие связанные с этим процессы в ЦНС. Кроме того, есть стимулы, которые по своей природе не могут подаваться многократно, например, болевые, обонятельные и вкусовые. Это снижает физиологичность действия процедуры.

Использование разнообразных математических методов как инструментов исследования массивов экспериментальных данных позволяет вычленивать и изучать их информативную часть на фоне неизбежных, часто превышающих по интенсивности полезный сигнал, шумов. Поэтому определение наличия ВП у обследуемого пациента при возможно меньшем числе усреднений является актуальной задачей. Тогда, в случае отсутствия ВП у пациента, становится возможным отменить его дальнейшее обследование. Если же ВП обнаружен, то можно продолжить обследование для уточнения его формы.

Развитие компьютерных методов позволяет подойти к решению проблемы разработки интеллектуальных алгоритмов обработки цифровых записей, представляющих собой протокол

проведения медицинских исследований по диагностике, выявлению и лечению патологических состояний. Однако разработка методов принятия решений в медицинской практике (продолжение данного вида терапии, его изменение, прекращение и т.п.) возможна только на основе решения другой принципиально важной проблемы - задачи идентификации математической модели ВП сигналов.

В данной работе рассматривается метод выделения ВП с использованием стохастической теории фильтрации.

Использование математического аппарата стохастических дифференциальных уравнений – нового метода в данной области знаний, позволило разработать математические модели электроэнцефалограмм (ЭЭГ) без ВП и ЭЭГ с ВП для различных отведений ЭЭГ и различных ВП, на основе этих моделей разработать алгоритмы обнаружения ВП в записях ЭЭГ и выделения ВП в случае наличия ВП в записях, создать компьютерные программы и оформить конечные результаты исследования в виде, доступном для медицинских работников с тем, чтобы широко использовать их в специализированных медицинских центрах.

К настоящему времени решены следующие задачи:

- используя методы корреляционного анализа и методы оценивания параметров с помощью теории стохастических дифференциальных уравнений, получены алгоритмы обнаружения сигналов ВП в записях электроэнцефалограмм (ЭЭГ);
- построена математическая модель, описывающая ВП в электрической активности головного мозга человека. разработаны алгоритмы выделения ВП из записей различных отведений электроэнцефалограмм с целью оценивания параметров ВП, в качестве параметров выбраны средние значения амплитуд пиков и пиковых латентностей основных компонентов ВП;
- с помощью теории стохастических дифференциальных уравнений, методов идентификации параметров таких уравнений и методов корреляционного анализа созданы алгоритмы и компьютерные программы для моделирования ЭЭГ и ВП;
- проведено сравнение эффективности разрабатываемых методов обнаружения и выделения ВП с существующими (простое усреднение), с помощью новых методов обнаружения и выделения ВП удалось существенно уменьшить число воздействий на обследуемого пациента, не уменьшая при этом качества проводимого анализа состояния ЦНС пациента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-01-00885.

e-mail: kuznetsov@cplire.ru, grigor@cplire.ru, nata19682A@cplire.ru, halup@frtk.ru

DETECTION AND ESTIMATION OF EVOKED POTENTIALS WITH APPLICATION OF THE THEORY OF STOCHASTIC FILTERING

N.A. Kuznetsov¹, F.N. Grigoriev¹, N.A. Grechishkina¹, S.Yu. Halup²

¹ V.A.Kotel'nikov Institute of radio engineering and electronics of RAS

² Moscow Institute for Physics and Technology (State University)

For the detection of evoked potentials (EP) in the signals of the electroencephalogram (EEG) is proposed to use the methods of the theory of stochastic filtering. The mathematical models of the electroencephalogram, without the EP and EEG with EP for a variety of different EEG and EP have been created. Algorithms to detect EP in the EEG and the allocation of the EP have been developed on the basis of these models. The effectiveness of the proposed algorithms is confirmed by computer simulation.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ ТОКОВ ПРИ СТИМУЛЯЦИИ МОЗГА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ИНДУКТОРА

к.т.н. Давыдов М.В., д.т.н. Лыньков Л.М., Квартальный М.А., Сагай Маруф Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В данной работе предложен результат моделирования магнитотерапевтического воздействия на мозг человека при проведении транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС), построена и описана многослойная модель головы человека, а также модели индукторов, применяемых при ТМС. На основании проведенных вычислений выполнен теоретический анализ плотности индуцированных токов и их локализации в различных тканях мозга в зависимости от типа применяемого индуктора.

Теоретическое обоснование работы

Процедура ТМС предполагает помещение электромагнитной катушки (индуктора) на скальп пациента. При протекании в катушке переменного тока большой амплитуды возникает импульсное магнитное поле с продолжительностью импульса от 100 до 200 мкс величиной около 2 Тл, которое в свою очередь генерирует электрическое поле в глубине нервных тканей головного мозга [1,2].

Моделирование проводилось в интерактивной среде моделирования методом конечных элементов COMSOL Multiphysics.

Метод конечных элементов является одним из численных приближенных методов расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение.

В случае, если состояние системы описывается некоторой функцией, и эта функция является единственным решением математической задачи, сформулированной на основе физических законов, решение состоит в отыскании из бесконечного множества функций такой, которая удовлетворяет уравнениям задачи. Если задача достаточно сложная, то ее точное решение невозможно. Вместо того чтобы искать требуемую функцию среди бесконечного множества разнообразных функций, задача упрощается. Рассматривается некоторое семейство функций, определяемых конечным числом параметров. Как правило, среди таких функций нет точного решения задачи. Однако соответствующим подбором параметров можно попытаться приближенно удовлетворить уравнениям задачи и тем самым построить ее приближенное решение. Такой общий подход характерен для многих приближенных методов. Специфическим в методе конечных элементов является построение семейства функций, определяемых конечным числом параметров [3,4].

Описание модели

Построена следующая схема модели: плоский соленоид располагается в воздухе над многослойным объектом, геометрические и электрические параметры которого соответствуют параметрам головного мозга человека (рис. 1).

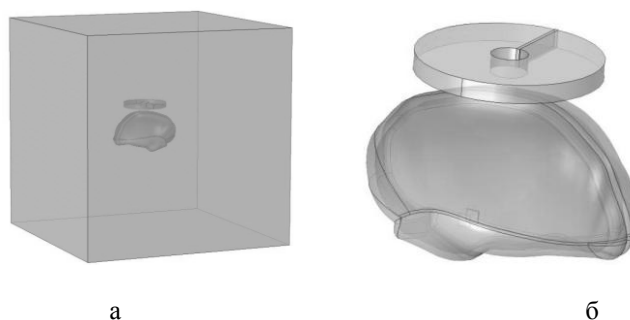


Рис. 1. Общий вид схемы модели: а – модель мозга и индуктор в кубе, имитирующем воздушную среду, б – негомогенная модель и расположенный над ней индуктор

Воздушную среду имитирует куб со стороной 500 мм, объему которого присваиваются соответствующие электрические свойства.

Индуктор расположен на расстоянии 12 мм от поверхности негомогенной модели.

Конструкция индуктора представляет собой цилиндрическую катушку, как правило, многослойную, имеющую длину, существенно меньшую по сравнению с диаметром (рис. 2).

Режим воздействия выбирался исходя из параметров современных магнитотерапевтических аппаратов, используемых для магнитоимпульсной стимуляции мозга: индукция магнитного поля – до 2 Тл, максимальная сила тока составляет 3 – 4 кА (суммарный ток увеличивается пропорционально

количеству витков), частота тока в индукторах задавалась равной 4 кГц исходя из длительности импульсов, подаваемых на индуктор аппаратом магнитостимуляции (250 мкс). В таблице 1 представлены геометрические размеры индукторов и параметры токов используемых при моделировании.

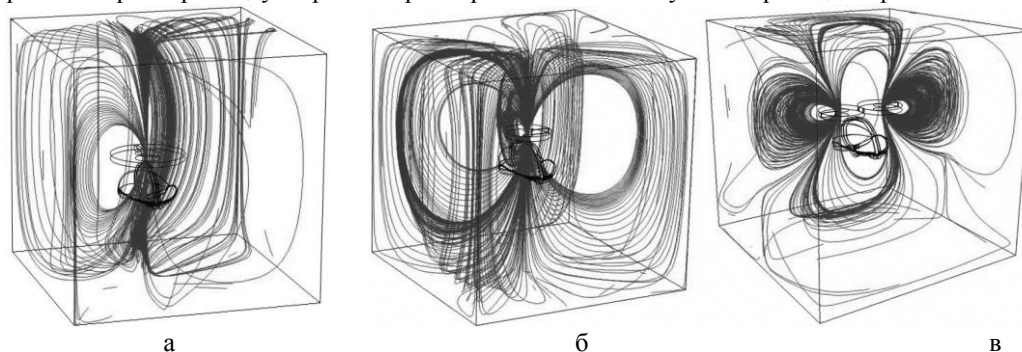


Рис. 2. Картина распределения силовых линий магнитного поля:

а – «кольцевой большой», б – «кольцевой малый», в – индуктор типа «восьмерка»

Таблица 1. Параметры индукторов

Тип индуктора	Диаметр внешний, см	Диаметр внутренний, см	Высота кольца, см	Суммарная сила тока I_{ext} , кА	Частота тока I_{ext} , кГц
«Кольцевой малый»	10	2	1	50	4
«Кольцевой большой»	15	5	1	50	4
«Восьмерка»	10	3	1	50	4

Негомогенная модель головного мозга представляет собой совокупность областей (табл. 2), характеризующихся электропроводностью (σ), относительной диэлектрической постоянной (ϵ_r), относительной магнитной проницаемостью (μ) [5,6].

Таблица 2. Характеристики областей модели

Область	Электропроводность(σ)	Относительная диэлектрическая постоянная(ϵ_r)	Относительная магнитная проницаемость (μ)
воздух	0,0006	1	1
индуктор	10^6	1	1
серое вещество мозга	0,45	20	1
белое вещество мозга	0,147	20	1

Геометрические размеры модели: сагитальный – 160 мм, поперечный – 130 мм, вертикальный – 110 мм.

Сетка конечных элементов, построенная для проведения моделирования включает 102759 элементов, из них 92482 – четырехугольные, 10277 – треугольные. Минимальный размер элемента – 0,984 мм, средний размер – 6,7 мм.

COMSOL Multiphysics были рассчитаны следующие параметры электрических и магнитных полей а также индукционных токов: индукция магнитного поля, плотность и направление индуцированного тока, что позволяет оценить глубину проникновения и площадь воздействия МП для различных типов индукторов. Представлена картина распределения силовых линий магнитного поля.

Результаты и их обсуждение

При использовании кольцевых индукторов линии магнитной индукции выходят перпендикулярно плоскости индуктора, в результате чего образуются вихревые токи, которые замыкаются в тканях под индуктором что и определяет характер создаваемого поля. Характерной особенностью кольцевых индукторов является отсутствие стимулирующего эффекта непосредственно под их геометрическим центром. Картина распределения силовых линий магнитного поля на индукторах «кольцевой большой», «кольцевой малый», индуктор типа «восьмерка» представлена на рисунке 2. Направление и плотность индукционного тока на поверхности модели при использовании большого кольцевого индукторов «кольцевой большой», «кольцевой малый», индуктор типа «восьмерка» представлены на рисунках 3 и 4 и в таблице 3.

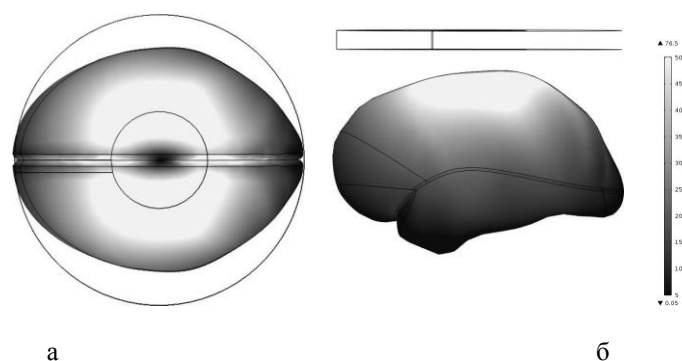


Рис. 3. Направление и плотность индукционного тока на поверхности модели при использовании большого кольцевого индуктора: а – вид сверху, б – вид сбоку

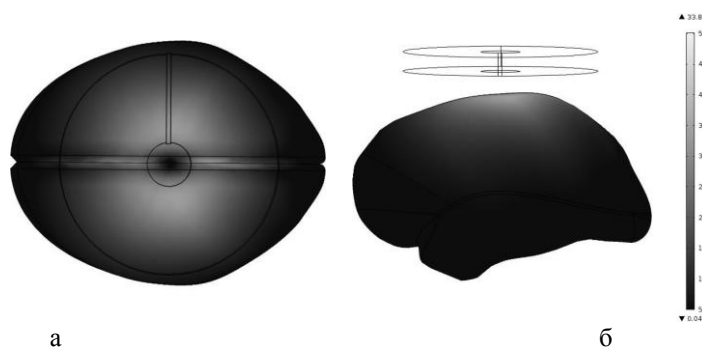


Рис. 4. Направление и плотность индукционного тока на поверхности модели при использовании малого кольцевого индуктора: а – вид сверху, б – вид сбоку

Таблица 3. Результаты моделирования

Тип индуктора	Плотность индуцированного тока, А/м ²		Магнитная индукция, Тл		Глубина эффективного воздействия, см	Диаметр зоны эффективного воздействия, см
	Серое вещество мозга	Белое вещество мозга	Вблизи индуктора	Максимальная в объеме модели		
«Кольцевой малый»	33,8	12,3	3,67	0,56	3 – 3,5	6-7
«Кольцевой большой»	76,5	24,8	2,67	0,66	8,5 - 9	10
«Восьмерка»	38,7	11,4	3,44	0,27	5 – 5,5	5

Таким образом, при приведенном взаиморасположении индукторов и модели большой кольцевой индуктор имеет наибольшую зону стимуляции. Данная зона находится под контуром индуктора, внешний диаметр зоны составляет 10 см, внутренний порядка 1 см.

Эффективная глубина стимуляции при использовании большого кольцевого индуктора составляет 8,5 – 9 см. Максимальная плотность стимулирующих индукционных токов в сером и белом веществе при использовании большого кольцевого индуктора достигает 76,5 А/м² и 24,8 А/м² соответственно (рис. 3).

Малый кольцевой индуктор имеет меньшую зону стимуляции: внешний диаметр зоны составляет 6-7 см, внутренний порядка 1 см. Эффективная глубина стимуляции при использовании малого кольцевого индуктора: 3 – 3,5 см. Максимальная плотность стимулирующих индукционных токов в сером и белом веществе достигает 33,8 А/м² и 12,3 А/м² (рис. 4).

Индуктор типа «восьмерка» генерирует иной характер поля. Из-за того, что токи в первом и втором кольце индуктора направлены встречно, линии магнитной индукции замыкаются в стимулируемых тканях, при этом максимум тока наблюдается в тканях под местом соединения двух контуров индуктора.

При использовании индуктора типа «восьмерка» индукция в объеме модели принимает наименьшее из зафиксированных значений. Зона стимуляции при этом более локализована и компактна по сравнению

с большим и малым кольцевыми индукторами. Диаметр зоны эффективного воздействия наименьший из всех, создаваемых индукторами - порядка 5 см.

Эффективная глубина стимуляции составляет: 5 – 5,5 см. Максимальная плотность стимулирующих индукционных токов достигает 38,7 А/м² и 11,4 А/м² в сером и белом веществе соответственно.

Полученные в ходе исследования характеристики моделей индукторов, использующиеся для проведения процедуры ТМС могут быть использованы для развития подхода персонализации ТМС терапии. Совмещение расчетных модельных значений индукции магнитного поля и плотности индуцированного тока в тканях с данными магниторезонансной томографии и электроэнцефалограмм позволяет локализовать электромагнитное воздействие и проводить стимуляцию заданных структур мозга.

Заключение

В результате моделирования визуализированы конфигурации, а также получены численные характеристики электрического и магнитного полей, создаваемых различными типами индукторов, наиболее широко применяемыми при проведении процедуры транскраниальной магнитной стимуляции.

Наибольшей площадью и глубиной воздействия обладает большой кольцевой индуктор - максимальное значение плотности индуцированного тока в сером веществе мозга 76,5 А/м², эффективная глубина стимуляции 8,5 – 9 см, диаметр зоны эффективного воздействия порядка 10 см.

Малый кольцевой индуктор имеет меньшую зону стимуляции: диаметр зоны составляет 6-7 см. Эффективная глубина стимуляции при использовании малого кольцевого индуктора: 3 – 3,5 см. Характерной особенностью кольцевых индукторов является отсутствие стимулирующего эффекта непосредственно под их геометрическим центром в зоне диаметром порядка 2 см.

Индуктор типа «восьмерка» создает магнитное поле с наименьшей интенсивностью, однако наблюдается наилучшая локализация стимулирующего индуцированного тока: диаметр зоны стимуляции 5 см, эффективная глубина стимуляции 5 – 5,5 см. (максимальное значение плотности индуцированного тока в сером веществе мозга 38,7 А/м²).

Полученные данные могут быть использованы для развития подхода персонализации ТМС терапии. Совмещение расчетных модельных значений с данными магниторезонансной томографии и электроэнцефалограмм конкретного пациента позволяет локализовать электромагнитное воздействие и проводить стимуляцию заданных структур мозга, что в конечном итоге может способствовать увеличению эффективности метода и расширению показаний для его применения.

Литература

1. Кистень, О.В. Давыдов М.В., Евстигнеев В.В. // *ArsMedica*, 2010. - № 12(32). – С. 79-85.
2. Давыдов М.В. , Осипов А.Н. , Кистень О.В. и др. Моделирование магнитотерапевтического воздействия на ткани мозга человека. Доклады БГУИР , 2011.
3. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.
4. Зинкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
5. Salinas F. S., Lancaster J. L., Fox P. T. // *Phys. Med. Biol.*, 2009, № 54 P. 3631-3647.
6. Wolters C.H. Anwander A., Tricoche X.// *NeuroImage*, Vol. 30, Iss. 3, 2006, P. 813-826.

MODELING OF DEPENDENCE OF INDUCTIVE CURRENTS UNDER BRAIN STIMULATION ON KIND OF INDUCTOR

M. V. Davydov, L. M. Lynkov, M. A. Kvartal'ny, G. Sagay Maruf

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

A method for modeling magnetotherapeutic impact produced by two common configurations of transcranial magnetic stimulating coils is simulated in a multilayer human brain model. The contributions of coil shape on the propagation of the induced in transcranial currents is modeled in the stimulated brain tissue.

ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

д. т. н. Медведева Е. В., к. т. н. Курбатова Е. Е., Прозорова Т. Г.

Вятский государственный университет

Задачи предварительной обработки и анализа изображений с целью выделения объекта интереса в условия действия белого гауссовского шума (БГШ) большой интенсивности в силу многомерности сигналов и отсутствия априорных данных об их статистических характеристиках, требуют больших вычислительных ресурсов. Примером может служить выделение объектов на медицинских изображениях, передаваемых по зашумленному радиоканалу для оперативного обмена информацией с подвижным медицинским пунктом [1]. Наличие на изображениях шума, безусловно, снижает качество диагностики заболеваний. В этом случае сначала необходимо отфильтровать изображение от имеющегося шума, а затем, для сегментации, выделить контуры контрастных областей. Известные методы фильтрации не всегда обеспечивают надлежащее качество изображений и сохранение малоразмерных объектов и границ в условиях действия шумов большой интенсивности [2,3]. Эти факторы для медицинских изображений являются не всегда приемлемыми, поскольку иногда совсем небольшая, второстепенная на взгляд непрофессионала область на медицинском изображении может оказаться индикатором болезни. Поэтому предварительная обработка изображений, позволяющая четко выделять контура и сохранять небольшие объекты на изображениях является актуальной задачей.

В данной работе предложен двухэтапный алгоритм предварительной обработки, позволяющий на первом этапе восстановить цифровые полутоновые изображения (ЦПИ), разрушенные БГШ, а на втором этапе выделить границы интересующей области небольшими вычислительными ресурсами.

Пусть ЦПИ – двумерное поле двоичных g -разрядных чисел, представлено в виде набора из g разрядных двоичных изображений (РДИ). Будем считать, что l -е РДИ ($l = \overline{1, g}$) представляет собой двоичное случайное марковское поле с разделяемой корреляционной функцией вида [4]

$$r_{f,s} = \sigma_{\mu}^2 \exp\{-\alpha_1 |f| - \alpha_2 |s|\}, \quad (1)$$

где σ_{μ}^2 – дисперсия двумерного дискретнозначного марковского процесса; α_1, α_2 – множители, зависящие от ширины спектральной плотности мощности случайных процессов по двум измерениям; f, s – шаги корреляции по горизонтали и вертикали.

В этом случае РДИ можно представить как суперпозицию двух одномерных цепей Маркова по горизонтали и вертикали с двумя равновероятными ($p_1^{(l)} = p_2^{(l)}$) состояниями $M_1^{(l)}, M_2^{(l)}$ и матрицами вероятностей переходов (МВП) по горизонтали ${}^1\Pi = \|\pi_{ij}^{(l)}\|_{2 \times 2}$ и вертикали ${}^2\Pi = \|\pi_{ij}^{(l)}\|_{2 \times 2}$ [4].

На рис. 1 представлено l -ое РДИ, разделенное на области $F_i^{(l)}$ ($i = \overline{1, 4}$), элементы которых являются цепью Маркова различной размерности. Элемент $v_4^{(l)} = \mu_{i,j,k}^{(l)}$ области $F_4^{(l)}$ зависит от трех соседних элементов, входящих в окрестность $\Lambda_{i,j}^{(l)} = \{v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}\}$. На рис.2 представлен фрагмент двумерного l -го РДИ, соответствующего области $F_4^{(l)}$ марковского случайного поля.

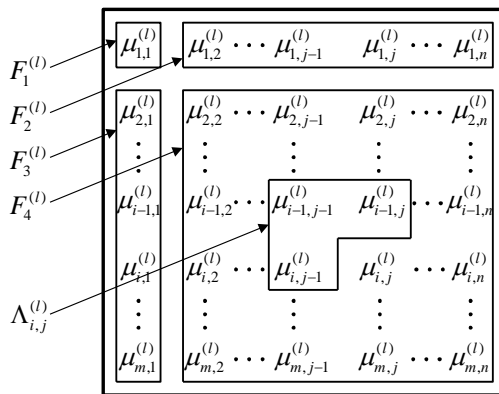


Рис. 1. Области l -го РДИ

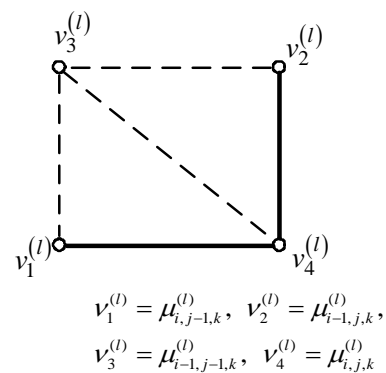


Рис. 2. Фрагмент изображения с окрестностью $\Lambda_{i,j}^{(l)}$

Предполагалось, что двоичные символы разрядов ЦПИ, передаются бинарными импульсными сигналами по радиоканалу независимо друг от друга в присутствии аддитивного БГШ $n(t)$ с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 .

Используя аппроксимацию РДИ двумерной цепью Маркова с двумя состояниями, в [5] разработан алгоритм нелинейной фильтрации l -го РДИ:

$$u(v_4^{(l)}) = \left[f(M_1(v_4^{(l)})) - f(M_2(v_4^{(l)})) \right] + u(v_1^{(l)}) + z_1(u(v_1^{(l)}), {}^1\hat{\pi}_{ij}^{(l)}) + u(v_2^{(l)}) + z_2(u(v_2^{(l)}), {}^2\hat{\pi}_{ij}^{(l)}) - u(v_3^{(l)}) - z_3(u(v_3^{(l)}), {}^3\hat{\pi}_{ij}^{(l)}) \geq H, \quad (2)$$

где $u(v_4^{(l)}) = \ln \frac{p_1(v_4^{(l)})}{p_2(v_4^{(l)})}$ - логарифм отношения апостериорных вероятностей состояния фильтруемого

элемента $v_4^{(l)}$ 1-го РДИ; $\left[f(M_1(v_4^{(l)})) - f(M_2(v_4^{(l)})) \right]$ - разность логарифмов функций правдоподобия состояний элемента $v_4^{(l)}$; H - порог, выбранный в соответствии с критерием идеального наблюдателя (для данного алгоритма $H = 0$);

$$z_r(u(v_r^{(l)}), {}^r\hat{\pi}_{ij}^{(l)}) = \ln \frac{{}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)} + {}^r\hat{\pi}_{jj}^{(l)} \exp(-u(v_r^{(l)}))}{{}^r\hat{\pi}_{jj}^{(l)} + {}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)} \exp(u(v_r^{(l)})} \quad (3)$$

где ${}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$, $(i, j = \overline{1,2}; r = \overline{1,3})$ - оценки элементов МВП в одномерных цепях Маркова с двумя состояниями ${}^1\Pi^{(l)}$, ${}^2\Pi^{(l)}$ и ${}^3\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \cdot {}^2\Pi^{(l)}$.

При неизвестных статистических характеристиках применяется адаптивный алгоритм обработки, позволяющий непосредственно в процессе приема изображений вычислять оценки элементов МВП и выполнять адаптацию параметров алгоритма фильтрации (2).

На следующем этапе, для выделения контуров, производится оценка величины количества информации в элементе РДИ $v_4^{(l)}$ относительно элементов окрестности $\Lambda_{i,j}^{(l)}$ [6]:

$$I(v_4^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)}) = -\log \frac{w(v_4^{(l)} | v_1^{(l)}) w(v_4^{(l)} | v_2^{(l)})}{w(v_4^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)})} \quad (4)$$

где $w(v_4^{(l)} | v_1^{(l)})$, $w(v_4^{(l)} | v_2^{(l)})$ - одномерные плотности вероятностей перехода между соседними значениями; $w(v_4^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)})$ - плотность вероятности перехода в двумерной цепи Маркова.

Плотность вероятности переходов в трехмерной двоичной цепи Маркова $w(v_4^{(l)} | \Lambda_{i,j}^{(l)})$ можно представить в форме:

$$w(v_4^{(l)} | \Lambda_{ij}^{(l)}) = \sum_{j,q=1}^2 \pi(v_4^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_j^{(l)}; v_2^{(l)} = M_q^{(l)}) \delta(v_1^{(l)} - M_j^{(l)}) \delta(v_2^{(l)} - M_q^{(l)}), \quad (5)$$

где $\delta(\cdot)$ - дельта функция.

Для 1-го РДИ количество информации в элементе $v_4^{(l)}$ относительно различных сочетаний элементов окрестности $\Lambda_{i,j}^{(l)}$ можно определить по следующим выражениям [4, 6]:

$$I(v_4^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_i^{(l)}, v_2^{(l)} = M_i^{(l)}) = -\log \frac{{}^1\pi_{ii}^{(l)} {}^2\pi_{ii}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)}};$$

$$I(v_4^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_i^{(l)}, v_2^{(l)} = M_j^{(l)}) = -\log \frac{{}^1\pi_{ii}^{(l)} {}^2\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ij}^{(l)}};$$

$$I(v_4^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_j^{(l)}, v_2^{(l)} = M_i^{(l)}) = -\log \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} {}^2\pi_{ii}^{(l)}}{{}^3\pi_{ij}^{(l)}};$$

$$I(v_4^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_j^{(l)}, v_2^{(l)} = M_j^{(l)}) = -\log \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} {}^2\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)}}. \quad (6)$$

Количество информации в элементе РДИ будет минимально, если окрестные элементы $v_1^{(i)}$, $v_2^{(i)}$ имеют состояния одинаковые с $v_4^{(i)}$. В случае появления на РДИ областей другой яркости, на границе области один или два окрестных элемента будут иметь разные с $v_4^{(i)}$ состояния, и количество информации в элементе $v_4^{(i)}$ увеличивается. Сравнивая значения вычисленной величины количества информации в элементе изображения с порогом, определяем принадлежность данной точки контуру.

Значение порога вычисляют для каждого РДИ с учетом вычисленного минимального количества информации и количества информации, когда хотя бы один из элементов окрестности будет принимать другое состояние:

$$H = \frac{I(v_4 = M_1 | v_1 = M_1, v_2 = M_1) + I(v_4 = M_1 | v_1 = M_1, v_2 = M_2)}{2}. \quad (7)$$

Для восьмиразрядного ЦПИ, представленного 256 уровнями яркости, старшему РДИ будут соответствовать 128 уровней яркости. Поэтому по старшему РДИ можно выделить все светлые области с яркостью от 128 до 255 на темном фоне, либо, наоборот, все темные объекты - на фоне с яркостью выше 128. Для выделения менее контрастных областей или объектов с нечетко выраженными границами необходимо выделить контуры на следующих РДИ (7-м, 6-м или 5-м). Контурное изображение, в этом случае, будет представлять сумму контурных изображений нескольких РДИ. Младшие РДИ (при $\pi_{ii} \rightarrow 0,5$) будут составлять фон изображения в виде двумерного шума.

Предложенный метод выделения контуров интересующих областей требует небольших вычислительных ресурсов, определяемых операциями сравнения с двумя окрестными элементами. На рис. 3 приведено сравнение во времени обработки изображений разной размерности предложенным и известными методами: Робертса, Превитта, Собела и Канни [2].

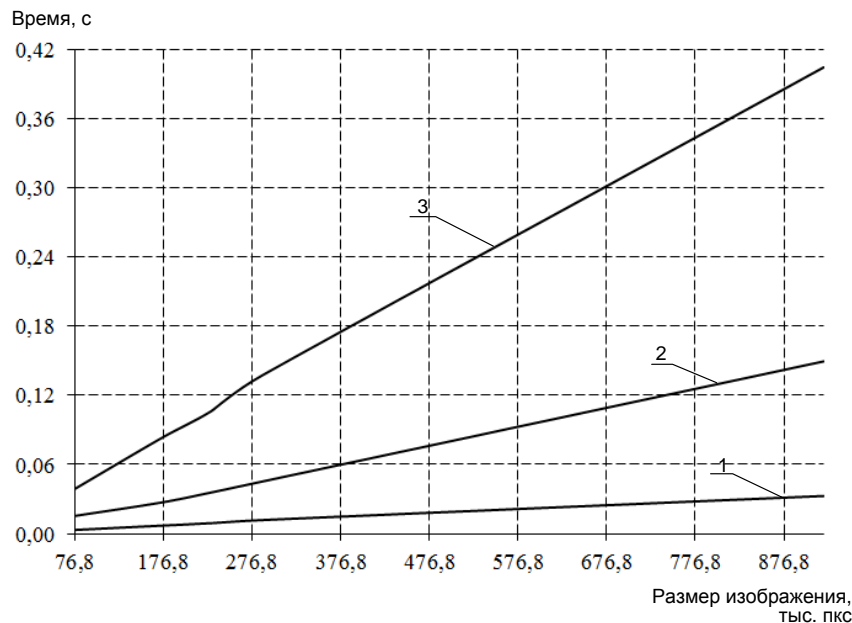


Рис. 3. Время обработки изображений методами: (1) – на основе двумерной цепи Маркова; (2)-Робертса, Превитта и Собела; (3) –Канни

Исследование проводилось в операционной системе Windows 7 на процессоре Intel Core i7-3770, 3,4 ГГц. Полученные оценки по времени разработанного метода свидетельствуют о его преимуществах по сравнению с распространенными методами выделения границ (до 2-12 раз).

После выделения контуров определяется область, соответствующая выделяемому объекту. Для этого задается диапазон значений яркости $[Y_{\min}; Y_{\max}]$, которые может принимать объект и всем элементам внутри области объекта присваивается среднее значение яркости Y_{cp} .

Наиболее эффективным методом заполнения областей является построчный алгоритм заполнения с затравкой [7]. Он дает существенный выигрыш в объеме памяти и времени обработки за счет хранения только одного затравочного элемента для каждого заполняемого участка.

Задав несколько диапазонов яркости, можно выделить несколько различных сегментов на контурном изображении, которые закрашиваются разными цветами.

Для типовых изображений, на которых объекты интереса имеют близкую по значению яркость, число РДИ с выделенными контурами и диапазон значений затравки будут принимать постоянные значения. Поэтому разработанный метод может быть применен для автоматической сегментации изображений.

На рис. 4а приведено изображение магнитно-резонансной томографии при кровоизлиянии в мозг. Область кровоизлияния представляет собой светлое пятно удлиненной формы. На рис.4в показана сегментация области кровоизлияния по контурному изображению (рис.4б), полученному по трем старшим РДИ незашумленного ЦПИ. На рис. 4г представлено изображение, зашумленное БГШ при $\rho_{\text{вх}}^2 = -3$ дБ; на рис. 4д - отфильтрованное ЦПИ; на рис.4е – сегментация для зашумленного ЦПИ.

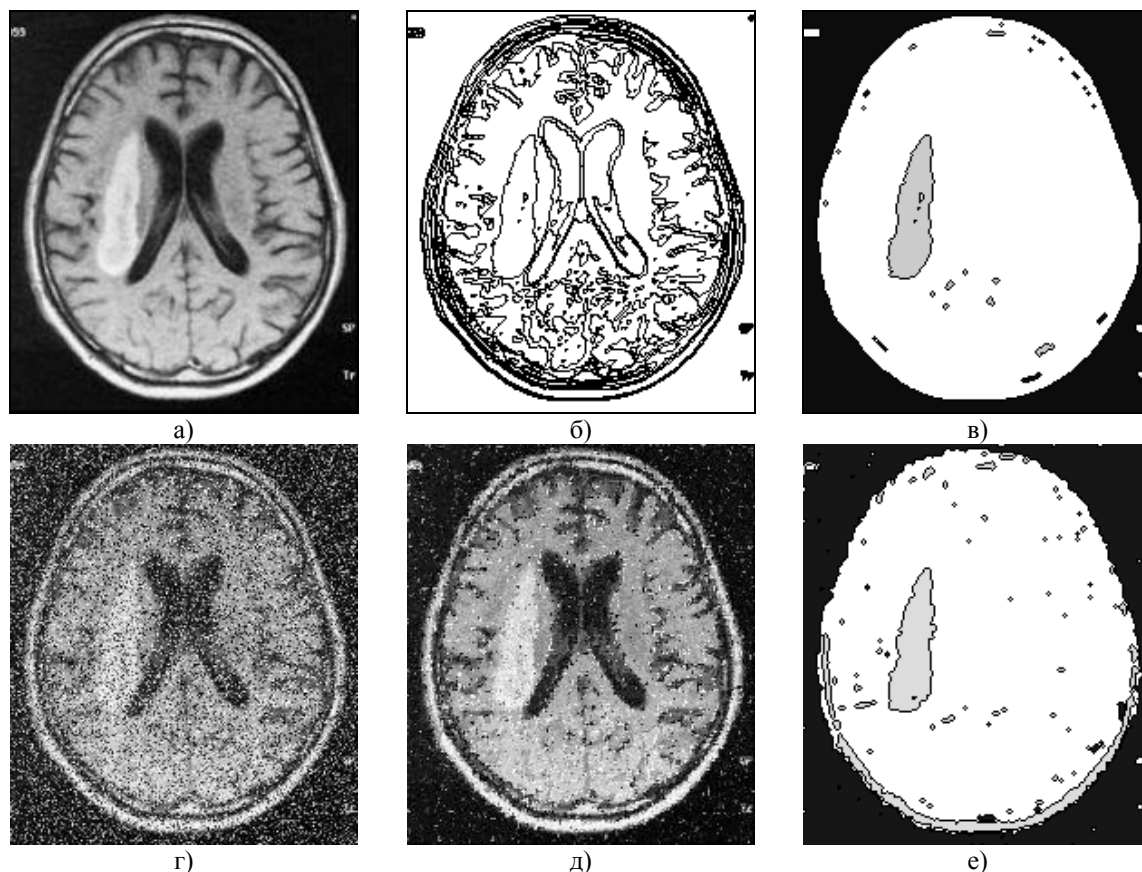


Рис. 4. Пример сегментации медицинских изображений

Из анализа изображений следует, что даже после обработки зашумленного изображения можно определить наличие патологии.

Таким образом, на основе представления ЦПИ двумерными цепями Маркова, разработан двухэтапный алгоритм предварительной обработки изображений, позволяющий эффективно выделить границы объектов интереса на сильно зашумленных изображениях. Разработанный алгоритм требует небольших вычислительных ресурсов и ориентирован на современную элементную базу.

Литература

1. Медицинские информационные технологии и системы / С.В. Абламейко и др. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – 176 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
3. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering, IEEE Transactions on Image Processing. – Aug.2007.- vol. 16. – issue 8. – P. 2080-2095.
4. Петров Е.П. Метод синтеза математических моделей видеоизображений на основе многомерных цепей Маркова / Е.П. Петров, Е. В. Медведева, А.П. Метелев // Нелинейный мир, № 4, 2011. - С.213-231.
5. Петров Е.П. Адаптивная нелинейная фильтрация сильно зашумленных видеопоследовательностей / Е.П. Петров, И.С. Трубин, Е.В. Медведева, И.А. Частиков - Информатика, 2009, №2. – С.49-56.
6. Курбатова Е.Е. Комбинированный алгоритм выделения контуров объектов интереса в мониторинговых системах / Е.Е. Курбатова, Е.В. Медведева, И.Я. Орлов // Вестник ННГУ. – 2013. - № 2(1). – с. 62-67.
7. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. – М.: Мир, 1989. – 512с.

**THE TWO-STAGE PREPROCESSING ALGORITHM
OF DIGITAL MEDICAL IMAGES**

E. V. Medvedeva, E. E. Kurbatova, T. G. Prozorova

Vyatka State University

We consider the two-stage preprocessing algorithm, which allows us to restore digital halftone images in the case of low signal-to-noise and allocates objects of interest on the non-uniform background. The algorithm requires little computational resources and is oriented to the modern element base.

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АКТИВНО-ПАССИВНЫЙ
СВЧ РАДИОМЕТР 8 ММ ДИАПАЗОНА**

к.ф.-м.н. Ракуть И.В.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Активно – пассивный радиометр восьмимиллиметрового диапазона является измерительной частью созданного в НИРФИ лабораторного образца комплекса построения радиоизображения распределения теплового излучения исследуемых поверхностей путём двумерного сканирования в горизонтальной плоскости. Комплекс разрабатывался для помощи врачу при проведении медицинской диагностики [1-4]. По мере совершенствования характеристик прибора для повышения качества диагностической информации по обнаружению тепловых неоднородностей изменялись элементная база радиометра и антенная система. Так вместо сферической антенны, вытаскиваемой из цилиндра дюрали на токарном станке, стали применять антенну с образующей эллипса со смещённым фокусом, выдавливаемую на соответствующей металлической форме из листового алюминия. Это улучшило фокусировку, уменьшив размер пятна разрешения, глубину резкости, реакцию малого зеркала на сигнал подсветки и уровни паразитных сигналов. Добавилась система однопозиционной подсветки через приёмную антенну для облучения исследуемых поверхностей шумовым широкополосным сигналом. Для этого между входом радиометра и антенной установили вентиляющую развязку с полупроводниковым генератором широкополосного шумового излучения. Активно-пассивный режим позволил определять коэффициент отражения поверхности тела пациента. В пассивном режиме измеряется интенсивность излучения. Их совокупность позволяет определять физическую температуру у излучающего приповерхностного слоя. Однако активно-пассивный режим можно использовать как самостоятельный для обнаружения диэлектрических неоднородностей под песком и в сухом грунте [5-8], на поверхности воды в виде нефтяных плёнок [9], под одеждой, сквозь медицинские марлевые повязки [10-11], сквозь заграждающие конструкции [12-13] и строительные материалы. В процессе исследований характеристик стенда и различных сред и объектов было определено, что имеются неоднозначности при оценке полученной информации [14-15] из-за сложности антенной системы [16], многослойности поверхностных тканей человека, формы его тела и внутренних органов. Это требует совершенствования соответствующей математической модели и учёта коэффициента отражения исследуемых поверхностей, обследуемых пациентов в СВЧ диапазоне. Сумма этих факторов создаёт условия для искажения диагностической информации [14,17] при наличии в диагностическом помещении сторонних источников теплового излучения. К ним относятся: окружающая среда за окнами, отопительные, осветительные, вентиляционные системы, работающая аппаратура и медицинский персонал, проводящий обследование.

В работе [8] достаточно подробно представлены устройство и характеристики комплекса, его фокусирующие свойства и возможности по обнаружению объёмных диэлектрических неоднородностей в глубине песчаного грунта в условиях сложного поверхностного рельефа. Эти и множество других результатов исследований по распространению теплового излучения различных объектов и шумового сигнала подсветки способствовали проведению клинической апробации комплекса активно-пассивного радиовидения 8 мм диапазона в Республиканском ожоговом центре ННИИТО. При этом осуществлялась диагностика пациентов с ожоговыми поражениями различной природы, степени их тяжести и стадии лечения. В полученных положительных результатах [10] отмечалось сходство и стабильность радиоизображений в измерениях с повязками и без них, с хорошим отграничением областей раны и интактной кожи. При наблюдении эхо-сигналов в активно-пассивном режиме удавалось локализовать очаги ожоговых поражений. Пассивная диагностика давала информацию о распределении температуры по травмированной области, а активно-пассивная диагностика - об изменении структуры внешнего покрова относительно здоровой кожи. Аналогичные картины наблюдались при исследованиях рубцов после ожога. Эти результаты создают предпосылки для использования активно-пассивной микроволновой радиометрии в контроле процесса реабилитации ожоговых травм.

Однако имеются характеристики, требующие улучшения или адекватного применения. Показано влияние параметров радиометра и форм-фактора исследуемых объектов на формирование радиоизображений, получаемых в обоих режимах. Так в активно-пассивном режиме значимая информация сосредоточена в областях поверхности, направление нормали которых близко к вертикали. В пассивном режиме процент приёма собственного излучения исследуемой поверхности зависит от ориентации поляризации входного волновода тракта радиометра относительно этой поверхности и её кривизны в области пятна разрешения антенны [15].

Результаты применения системы активно-пассивного ближнего радиовидения позволили наметить пути её дальнейшего развития в части усовершенствования системы калибровки исследуемых сигналов и повышения чувствительности радиометра в режиме пассивных измерений для уменьшения времени обзора исследуемых участков с патологией. При этом кардинального изменения комплекса не предлагалось. Основным вывод был положителен. Опыт применения радиотермометрии 8 мм диапазона в ожоговой клинике показал принципиальную возможность объективизации ожоговой раны и рубцово-перерождённых кожных участков, как открытых поверхностей, так и через стандартную марлевую повязку, и целесообразности продолжения этих работ совместно с медиками для выявления эффектов значимых для диагностики.

Отметим, что при обследовании больного важным фактором является время. Это и общее время обследования, и время когда при обследовании пациенту необходимо удерживать неподвижное положение части своего тела. Особо это важно, когда принимаемое пациентом положение неудобно по каким-либо причинам. Например, его общее состояние ослаблено, мышцы детренированы, т.к. большее время пациент должен лежать, кожные покровы нарушены ожогом и напряжение мышц под ними болезненно, ряд лечебных мероприятий требует специального относительного расположения отдельных частей тела, например, при пересадке участка кожи. Поэтому только определённая направленность измерительного устройства, что характерно для множества громоздких диагностических приборов, порой не даёт возможности провести измерение необходимого участка поверхности тела пациента, т.к. больной должен под них подстраиваться, а ему это трудно и даже невозможно.

К тому же плоских участков поверхности тела человека не так много, поэтому, даже ориентируя их квазигоризонтально, мы не сможем избавиться от форм-фактора. Делались попытки коррекции влияния формы путем создания перемещающих систем специального профиля. Например, при обследовании головы делали специальные дуги – рельсы, повторяющие часть формы головы, чтобы ось антенны радиометра в каждой точке при сканировании смотрела перпендикулярно поверхности, но размер головы и её форма у разных пациентов отличны. Или устанавливают датчики, или генераторы на специальные гибкие ленты, или шарнирные штативы, но и это не обеспечивает одинакового прилегания в одних и тех же участках тела разных пациентов. Поэтому возникают погрешности при измерениях и воздействиях для различных больных и даже для одного пациента при периодических приёмах.

Также, к уже отмеченным выше явлениям искажения информации в обоих режимах, необходимо учитывать коэффициент отражения тела пациента, т.к. в радиодиапазоне он существенно зависит от частоты принимаемого радиометром излучения и всегда гораздо больше, чем в ИК диапазоне. Поскольку антенна имеет диаграмму направленности и в нашем случае она около 60 градусов, то при обследовании криволинейной поверхности на негоризонтальных участках тела к собственному излучению примешивается излучение, пришедшее со стороны. Если там располагается тепловая неоднородность, то соответствующая область тела обследуемого будет давать ложную информацию. Такое же явление наблюдается и в ИК диапазоне, хотя и коэффициент отражения тела человека при этом около 3 %. Оно будет заметным при наличии источников с достаточно высокой температурой. Например, системы отопления имеют температуру до 70°C, лампы накаливания до 150°C, ИК электрокамины до 420°C, лицо человека до 33°C, стекло окна зимой до 6°C. Таким образом, при температуре помещения 20°C получаются соответствующие температурные контрасты: 50°, 130°, 400°, 13°, - 14° и соответствующие им температурные аномалии уже на теле человека: 1.5°, 3.9°, 12°, 0.39°, - 0.42°. Как видно из цифр, даже лицо человека и окно зимой в ИК диапазоне способны создавать тепловую неоднородность на теле пациента, сравнимую с патологической разностью между левой и правой сторонами человека. Не исключена возможность и суммирования нескольких тепловых аномалий.

При радиометрии 8 мм диапазона коэффициент отражения тела человека около 0.4, поэтому даже присутствие врача около пациента будет существенно искажать картину наблюдения, создавая температурную аномалию в $0.4 * 13^\circ = 5.2^\circ$. Поэтому и указывалось в [17] на необходимость создания условий в помещении диагностики, чтобы не возникали ситуации ложной неоднородности. При этом предлагались соответствующие методы и средства, а также способы коррекции возможных аномалий. Все методики предполагали применения имеющихся приёмных устройств. Однако можно пойти дальше и принципиально изменить методику измерений в 8 мм диапазоне. Для этого необходимо объединить все плюсы и минусы в одном решении. И, похоже, оно может быть реализовано на современной базе микроэлектроники. Для этого необходимо использовать все возможности миниатюризации для

облегчения приёмного СВЧ блока с вынесением максимального числа элементов, которые могли бы выполнять свои функции в некотором удалении от перемещаемой части в стационарном блоке. Взаимодействие между этими частями обеспечить с помощью миниатюрных связанных элементов. Таким образом, остается лёгкий приёмник с высокочастотной основой, который должен перемещаться в пространстве вокруг пациента, находящегося в любом удобном для него положении, так, чтобы всегда была возможность направить ось антенны перпендикулярно любой точке поверхности тела пациента. Тогда решаются все указанные выше вопросы: принимаемый сигнал всегда максимален, никакое внешнее излучение не может переотразиться телом пациента в антенну, коэффициент отражения в обоих режимах одинаков, поляризационные эффекты не возникают. Осталось только выбрать способ перемещения существенно облегченного ВЧ блока. Основой предложения является то, что управлять перемещением ВЧ блока должен врач, а не программа в ЭВМ, написанная программистом. Выглядеть методика измерения может так. Врач говорит кодовые слова, например, «Режим измерения» и при этом выставляет в пространстве перед собой правую ладонь. Одновременно «оживает» гибкая рука робота, на конце которой укреплен ВЧ блок радиометра. Ось его антенны направляется параллельно нормали к ладони врача. Одновременно на экране мониторов (большого на стене, чтобы могли видеть присутствующие врачи, мониторов в других помещениях любой точки мира для возможности консилиума и монитора в очках самого врача) появляется видео изображение помещения и объектов в нём в направлении оси антенны ВЧ блока. Врач видит, где находится пациент, и ведет свою ладонь так, чтобы увидеть ближе ту часть тела пациента, которая его интересует. При этом на экране монитора имеется сразу несколько изображений: визуальное, ИК и СВЧ изображения в обоих режимах. Эти изображения могут быть, и разделены, и наложены друг на друга по желанию врача в любом сочетании по его голосовой команде или движением пальцев ладони. А пока такого робота нет, но ВЧ блок стал лёгким, двигать им может сам врач, «надев» его себе на ладонь как перчатку. Антенна при этом будет выглядеть как продолжение ладони и поэтому ею удобно управлять. Что мы добиваемся таким способом перемещения ВЧ блока? Основа в том, что врач лучше знает куда, по какой траектории и с какой скоростью ему вести руку при обследовании конкретного пациента. С такой мобильностью врач может в любой момент без указаний для робота или ЭВМ самостоятельно менять эти параметры. Это обеспечит быстроту проведения обследования и его качество даже, если пациент захочет повернуться. При этом все перемещения и получаемые данные записываются в память ЭВМ, а на экран выводится накопительная информация по пройденным точкам. В результате врач может собрать полное радиоизображение, как мозаику из набора кусочков стекла, проводя по тем точкам видео картинки, где ещё нет радиоизображения. Можно также сначала сделать быстрый последовательный осмотр всей интересующей площади. Затем, в случае обнаружения областей с тепловой или отражательной неоднородностями, исследовать эти участки более тщательно медленными перемещениями, проверяя полученные данные путем многократного прохода по важным точкам. На промежуточном этапе создания комплекса от только ручного до управления с помощью супер робота можно использовать подобие робота, например, как противовесы при перемещении линейки кульмана, или аналог экзоскелета. Это облегчит работу врача, т.к. вес ВЧ блока ляжет на эти механизмы, плюс будет возможность фиксации ВЧ блок в некотором положении относительно тела пациента.

Какие дополнительные возможности устройства, дающего 4-е представления одного объекта. У полностью мобильного прибора появляется многофункциональность. Отметим, что встроенный в радиовизор ИК датчик много проще ИК тепловизора, т.к. он даёт температуру только в направлении наблюдения радиометра, а распределение ИК и радиотемпературы получаются при его движении. При этом ИК даёт поверхностную температуру, а радиометр - глубинную плюс распределение коэффициента отражения по глубине и даже сквозь ряд материалов и сред в зависимости от их толщины. При дополнении комплекса мобильным генератором широкополосного шумового излучения его возможности станут ещё шире. Можно будет просматривать внутреннюю структуру множества сред и объектов, как на отражение, так и на просвет. Меняя положение мобильного генератора относительно ВЧ блока с разных сторон найденной в некотором объекте неоднородности, можно рассматривать её в разных ракурсах. Таких объектов много в строительстве: провода, трубы, металлические и диэлектрические конструкции сложной формы, качество залегания креплений конструкций в стенах и перекрытиях, полости, влага в стенах, потолках, полах и т.д. Можно вместо рентгена просматривать непрозрачные для видео и ИК диапазонов шкафы, тумбочки, коробки из дерева, бумаги, картона, пластика. Можно применять устройство при археологических исследованиях. Обследовать людей сквозь одежду в поиске оружия металлического и диэлектрического. Отметим, что радиометр принимает излучение на много порядков меньшей мощности, чем минимально допустимый уровень облучения человека. Можно применять систему для обследования деревьев на предмет их влажности, трухлявости, поражения личинками и жуками. Можно определять и контролировать влажность заготавливаемой древесины, как на производстве древесных материалов, так и на складах, при производстве мебели и саму мебель. Можно исследовать пищевые продукты в упаковках из древесины, бумаги, картона, полиэтилена на

наличие влаги, если её там не должно быть, или на отсутствие влаги, если она там должна быть. Контроль влажности бумаги в коробках и рулонах, одежды в упаковках, в сыпучих строительных смесях внутри прозрачной и непрозрачной упаковки и множества других строительных материалов. Можно контролировать влажность жидкостей, в которых влаги не должно быть: бензин, керосин, масло, мазут, спирт и т.д. Можно контролировать качество изготовления множества плоских прозрачных и непрозрачных для света одно- и многослойных материалов по их толщине и диэлектрическим свойствам, например, стекло, доска, ДВП, ДСП, МДФ, гипсокартон, пластиковые панели, кирпичи, строительные блоки и т.п. Можно использовать комплекс без изменения для контроля поверхности водоёмов на наличие плёнки нефтепродукта. Можно заменить антенную систему, дополнить поляризатором и использовать модификацию для измерения толщины разливов нефтепродуктов на водной поверхности уже на большем расстоянии, как в носимых приборах - «ПРИНТ-3», так и в летающих лабораториях экологического патрулирования. Можно применить комплекс для обследования местности при поиске невидимых визуально очагов будущего возгорания. При этом смена антенной системы позволяет менять расстояние обнаружения теплового источника. Если увеличить мощность генератора подсветки, то глубина проникания увеличится и появится возможность обнаружения диэлектрических неоднородностей активно-пассивным радиовидением в более крупных объектах и на большей глубине в средах, полупрозрачных для СВЧ диапазона.

Литература

1. С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть Активно- Пассивный Радиометрический модуль с бифокальной антенной системой //Сб. докл. 6-й Всероссийской научно-технической конф. Радиоприём и обработка сигналов. Н-Новгород, 1993, С.54.
2. С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть, В.А.Конаков Сканирующий радиометр- рефлектометр 8-ми миллиметрового диапазона для медицинской диагностики //Сб. докл. Междун. конф. " ТЕМП – 94 ". Санкт-Петербург. 1994, С. 70-72.
3. А.Г.Кисляков, С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть, М.Е.Орлова, С.Н.Колесов Активно- Пассивный радиовизор для медицинской диагностики в 8 мм диапазоне длин волн //Сб. докл. Междун. конф. Радиоэлектроника в Медицинской диагностике. Москва. 17-19 окт.1995, С. 99.
4. А.Г.Кисляков, С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть, М.Е.Орлова, С.Н.Колесов Новый вариант лаборат. образца 8-мм активно-пассивного радиовизора для медицинской диагностики //Сб. докл. Междун. конф. "Прикладная оптика-96. ТЕМП-96". С-Петербург, 17-19 сент, 1996, С. 23-26.
5. A.G.Kislakov, S.A.Pelyushenko, I.V.Rakut A Scanning Dual- Mode Radiometer for Biomedical Researches and Detection of Weapons Under Cloching // Trans Black Sea Region Symposium On applied electromagnetism. 17-19 April, 1996, Metsovo, Epirus-Hellas, p. 63.
6. S.A.Pelyushenko, I.V.Racut Microwave sensor for detection of anti-infantry mines in subsurface. //SPIE's 11 th Annual International Symposium On AeroSpace,20 - 25 April, 1997,Orlando, Florida Usa, Conference 3079, Monday-Thursday 21-24 April 1997 SPIE Proceedings Vol. 3079. pp.643-651.
7. С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть Подповерхностное зондирование пространственно неоднородных сред //Тр. 20 Всеросс. научн. конф. «Распростран. радиоволн», Н. Новгород: Талам, 2002, С. 386.
8. И.В.Ракуть, С.А.Пелюшенко, А.С.Пелюшенко, Ю.А.Железняков Исследование неоднородностей протяженных сред методом пассивно-активной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн //Известия вузов. Радиофизика. Т.48, №10-11, 2005, с. 890-898. Н. Новгород.
9. A.G.Kislakov, S.A.Pelyushenko, I.V.Racut 8-mm Radiometer-Reflectometer for Laboratory Remote Sensing Measurements. //Proceedings of the 21st Annual Conference of the Remote Sensing Society (RSS95), University of Southampton, Great Britain, 11-14 September 1995, pp. 669-676.
10. А. Г. Кисляков, С. А. Пелюшенко, И. В. Ракуть, С. Н. Колесов, П. В. Кислицын, И. Ю. Арефьев Первый опыт применения дистанционного пассивно-активного ближнего радиовидения при ожоговой патологии на различных этапах лечения // Тез. докл. Всеросс. семинар по радиофизике мм и субмм диапазона. РАН ИПФ, 12-15 марта 2007г, Н.Новгород, С. 63-64.
11. И.В.Ракуть Исследование многослойных диэлектрических структур методами миллиметрового пассивно - активного ближнего радиовидения //Тр. 10-й Научн. конф. по радиофизике, посвященной 90–летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г.С.Горелика. ННГУ. 2006. С.16-17.
12. И.В.Ракуть, П.Т.Крамаренко Теплообмен излучением через светопрозрачные ограждающие конструкции помещений.//Приволжский научн. ж-л, - Н.Новгород: ННГАСУ, 2007, 2(2), С.41-48.
13. И.В.Ракуть, П.Т.Крамаренко Теплофизическая модель теплообмена излучением через стекло. - Приволжский научный журнал. Период. научн. изд. Н.Новгород, 2009, 1(9), с.77-83.
14. И.В.Ракуть Негативные факторы при диагностике людей методами бесконтактной термометрии //Тр. 10-й научн. конф. по радиофизике, посвященной 90–летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г.С.Горелика. ННГУ. Н. Новгород. 2006. С.18.

15. А.Г.Кисляков, И.Н.Мордвинкин, И.В.Ракуть Искажения изображений, полученных в ближней зоне антенны по тепловому радиоизлучению объектов. //Тр. 7 науч. конф. по радиофизике, посвящ. 90-летию со дня рождения В.С.Троицкого, ННГУ, 7 мая 2003 г, Н. Новгород, С.130-131.
16. В.А.Канаков, Ю.И.Орехов, С.А.Пелюшенко, И.В.Ракуть, А.В. Курбаков Антенны для систем радиовидения КВЧ диапазона //Антенны. Н. Новгород. 2006, Выпуск 5 (108), С. 13-16.
17. И.В.Ракуть Развитие методов тепло и радиовидения для медицинской диагностики. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 10-й межд. научн.-техн. конф.– Владимир: 2012. Книга 3. С. 55-60.

MULTIFUNCTIONAL ACTIVE-PASSIVE MICROWAVE RADIOMETER 8 mm RANGE

I. V. Rakut

Radiophysical Research Institute

The radiometer eight-millimeter band is a measuring instrument of the complex construct radio images of the investigated surfaces by two-dimensional scanning in the horizontal plane. The radiometer was augmented by the elements radio illumination via a receiving antenna for irradiation of the examined surface by the broadband noise signal. Passive diagnostics gives information about the distribution of the intensity of thermal radiation. Active-passive diagnostics gives information about the distribution of the reflection coefficient. The results of studies using the complex in the burn clinic has shown the principal possibility of objectification of the burn wound and scar-restored areas of the skin, as on open surfaces, and through a standard gauze bandage. The antenna of radiometer should be always directed perpendicular to the sample surface to prevent distortion of the diagnostic data from the influence of the shape and external radiation. For this purpose it is proposed scanning of the high-frequency block in manual mode. It is shown that active – passive radiometer eight millimeter range can be used to find the thermal and dielectric inhomogeneities in various objects and environments.

О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗБУДИМЫХ БИОМЕМБРАНАХ

Фомин Л.Б.

Специализированная кардиохирургическая клиническая больница Нижнего Новгорода

Цель работы - оценка адекватности модели типа Ван-дер-Поля-Дуффинга (ФитцХью-Нагумо) реальным изменениям токов в возбудимых биомембранах (ВБМ) и использовании данной модели для работы с ВБМ.

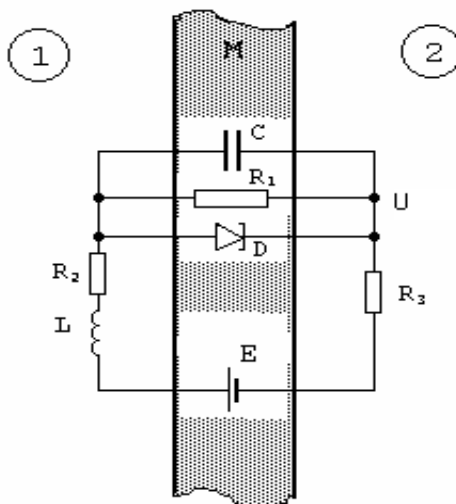


Рис. 1 Участок клетки с ВМ и его эквивалентная электрическая схема в виде замкнутой цепи с полным током I , D- генератор на туннельном диоде. U – трансмембранный потенциал (ТМП)

Вкратце, эволюция математических моделей ВБМ такова: от Ходжкина-Хаксли (уравнение 4-го порядка) [1] до Хиндмарша-Розе (3-го порядка) [4], Зимана (3-го порядка) [2] и Ван-дер-Поля-Дуффинга (Бонхоффера) [5] – 2-го порядка и Фитц-Хью-Нагумо (1962г – рис. 1) [3] – 2-го порядка.

Классическая система уравнений для туннельного генератора (ТГ):

$$L \cdot \frac{di}{dt} = E - i \cdot R - u \quad C \cdot \frac{du}{dt} = i - u^3 - a \cdot u^2 - b \cdot u \quad (1)$$

где L, C, E, R, a, b – электрические параметры ВБМ

В безразмерных переменных:

$$\tau = \frac{R \cdot t}{L}, \quad x = \frac{R \cdot i}{E}, \quad \delta = \frac{R^2 \cdot C}{L}, \quad y = \frac{u}{E} \quad (2)$$

система (1) выглядит следующим образом:

$$x' = 1 - x - y \quad \delta \cdot y' = x - y^3 - a \cdot y^2 - b \cdot y, \quad (3)$$

где штрих означает дифференцирование по безразмерному времени τ .

Классическое уравнение уравнение Ван-дер-Поля-Дуффинга (ВПД) [5]:

$$x'' + (x^2 + x + c) \cdot x' + \omega_0^2 \cdot x + d \cdot x^2 + e \cdot x^3. \quad (4)$$

Уравнение ВПД для ТГ (с малым параметром $\delta \ll 1$):

$$\delta \cdot x'' + (\beta \cdot x^2 + \gamma \cdot x + \delta) \cdot x' + b \cdot x + \lambda \cdot x^2 + p \cdot x^3 - 1 = 0, \quad (5)$$

где $\omega_0^2 = b/\delta$.

Грубая оценка частоты осциллятора ВПД

При условии $\delta \ll 1$ (релаксационные, разрывные колебания) и, например: $R < 0,1 \text{ Ом}$, $C = 10^{-6} \text{ Ф}$, $L = 10^{-6} \text{ Н}$, $E = 0,1 \text{ В}$, $b = 10$, $a = -6,2$ (наличие падающего участка ВАХ ВБМ, отрицательного сопротивления) получаем: $\omega_0 > 100 \text{ Гц}$ (ЧСС $> 6000 \text{ уд/мин}$).

Частота генерации автоколебаний зависит от угла α (рис. 2):

$$\text{arctg}(3 \cdot u_0^2 + 2 \cdot a \cdot u_0 + b) < \alpha < \pi/2. \quad (6)$$

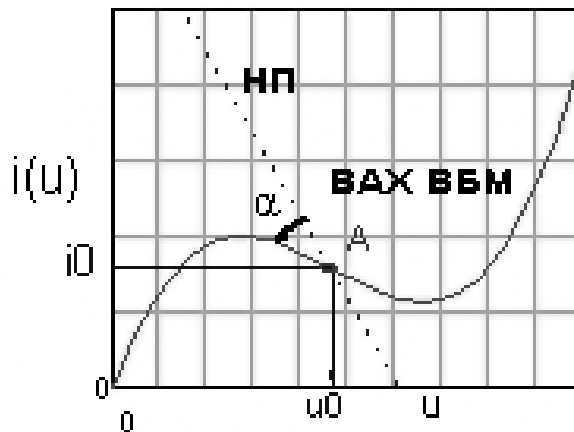


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ВБМ и “нагрузочная” прямая

Численное исследование решений уравнения ВПД (ФитцХью-Нагумо) (режим медленных движений) дает зависимость периода T релаксационных автоколебаний ($R^2 C/L \ll 1$) в ТГ от потерь R :

$$T(R) = \frac{2 \cdot L}{R} \cdot \int_A^B \frac{3 \cdot x^2 + 2 \cdot a \cdot x + b}{4 - (b + 1/R) \cdot x - a \cdot x^2 - x^3 + 2/R} \cdot dx, \quad (7)$$

где

$$A = C \cdot \frac{C^2 + a \cdot C + b}{B^2 + a \cdot B + b}, \quad B = \frac{-a - \sqrt{a^2 - 3 \cdot b}}{3}, \quad C = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 3 \cdot b}}{3}. \quad (8)$$

График функции (7) приведён на рис. 3.

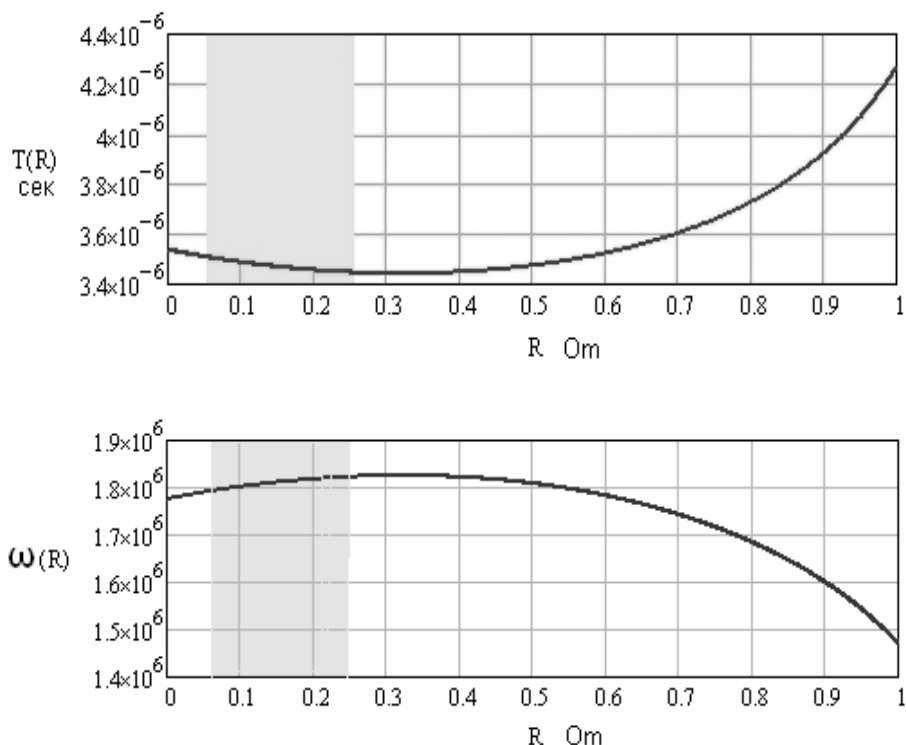


Рис. 3. Зависимость периода T релаксационных автоколебаний ($\delta \ll 1$) в ТГ от потерь R . Закрашенные области – релаксационные автоколебания.

Выводы

Адекватность модели определяется соответствием расчетных и экспериментальных данных, наличием определенного биофизического смысла переменных и параметров, входящих в состав модели.

В данном случае такое соответствие нарушено в количественном отношении.

Если считать, что частота электрических автоколебаний в ВБМ задает частоту кардиомиоцитопейсмекера и сердечных сокращений в целом, то моделирование работы ВБМ с помощью уравнений ВПД не корректно, так как в реальных ВБМ измеренные частоты на три порядка ниже, например рекордные ЧСС (колибри, землеройки) ~ 1300 уд/мин (~ 20 Гц).

Поэтому такой способ моделирования, на наш взгляд, неприменим к описанию формирования сердечного пульса (ЧСС).

Однако, если модель (рис. 1) адекватна, то высокочастотным решениям уравнений для ВБМ-ТГ должны соответствовать реальные ВЧ электрические колебания в ВБМ, которые могут быть обнаружены и измерены при определенных биофизических параметрах ВБМ.

Литература

1. Hodgkin, A., and Huxley, A. (1952): A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J. Physiol.* 117:500-544
2. Zeeman E. C. *Differential Equations for the Heartbeat and Nerve impulse* (1973), Salvador Symposium on Dynamical Systems, Academic Press.
3. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Bull. Math. Biophysics.* 1955. Vol. 17. P. 257.
4. Hindmarsh J. L., Rose R. M. A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // *Proc R Soc Lond B Biol Sci.* — 1984. — V. 221, No. 1222. — P. 87–102.
5. Duffing G., *Brzwungene Schwingungen bei veranderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung*, Braunschweig, 1918.
6. Фомин Л. Б. О применимости математических моделей типа Ван-дер-Поля-Дуффинга к описанию работы возбудимых биомембран, *Материалы IV Съезда биофизиков России, Нижний Новгород, 2012 г.*

E-mail: ddeejj@yandex.ru

ABOUT THE POSSIBILITY OF GENERATION OF THE HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD IN EXCITABLE BIOMEMBRANES

Fomin L.B.

Specialised Cardiosurgery Clinical Hospital of Nizhny Novgorod

It is shown that application of mathematical models of type of the Van-der-Pol-Duffing for exposition of work of excitable biomembrane has restrictions on a frequency range. Such exposition makes sense only for possible high-frequency electric oscillations.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТООТДЕЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА И АДСОРБИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Стасишина А.М.¹, к. т. н. Давыдов М.В.¹, д. м. н. Стебунов С.С.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

² ООО «ЛОДЭ», Минск

Потоотделение – это нормальная физиологическая функция человеческого организма, которая регулирует обмен веществ, поддерживает водно-солевой баланс, выводит опасные для организма токсичные продукты и участвует в терморегуляции. Потоотделение имеет большое значение для охлаждения при повышении температуры тела, физической нагрузке или во время эмоционального напряжения, стресса [1].

Первичный гипергидроз, которым по статистике страдает 1-2% населения [2], является мощным психотравмирующим фактором и приводит к психологической, социальной и профессиональной дезадаптации. Традиционными методами диагностики первичного гипергидроза являются колориметрический метод Минора [3] и весовой метод Хекманна [4], результативность использования которых зависит от опыта и квалификации врача [5]. В настоящее время наиболее распространенным электрическим методом оценки потоотделения человека является метод импедансометрии (измерение электрического сопротивления кожи), однако данный метод требует учета анатомо-физиологических особенностей строения кожи человека, которые влияют на объективность получаемых результатов измерений [6]. Рядом преимуществ по сравнению с импедансометрией обладает емкостной метод [7] (основанный на измерении электрической емкости кожи): отсутствие гальванического тока и поляризационных эффектов, независимость результатов измерений от химического состава кожи. При этом все вышеуказанные методы не позволяют осуществлять накопление влаги (выделяемого пота) в течение определенного промежутка времени, что является необходимым при диагностике первичного гипергидроза. Для устранения данного недостатка целесообразно использовать адсорбирующий элемент.

Разработанная методика измерения потоотделения человека на основе использования емкостного датчика и адсорбирующего элемента базируется на взаимосвязи электрической емкости системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент» и показателя влагосодержания адсорбирующего элемента ($V_{\text{лсод}}_{0-100\%}$), установленной в работах [8, 9]. Сущность методики заключается в оценке потоотделительной функции кожи человека на основе показателя влагосодержания адсорбирующего элемента $V_{\text{лсод}}_{0-100\%}$.

Методика измерения потоотделения человека включает следующие этапы:

1. Моделирование системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент».
2. Выбор временного интервала, в течение которого адсорбирующий элемент будет накапливать выделяемый человеком пот.
3. Измерение электрической емкости системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент».
4. Расчет показателя влагосодержания адсорбирующего элемента.
5. Количественная оценка потоотделения человека на основе показателя влагосодержания адсорбирующего элемента.

Для реализации разработанной методики предложен алгоритм измерения потоотделения человека на основе расчета показателя влагосодержания адсорбирующего элемента (рисунок 1).

Этап моделирования системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент» позволяет определить зависимость абсолютного приращения электрической емкости адсорбирующего элемента от содержания в нем влаги ($\Delta C = f(V_{\text{лсод}}_{0-100\%})$) при использовании новых параметров емкостного датчика и адсорбирующего элемента:

- материала, конфигурации и геометрических размеров подложки и электродов датчика;

- материала и толщины диэлектрического покрытия датчика;
- материала, площади и толщины адсорбирующего элемента.

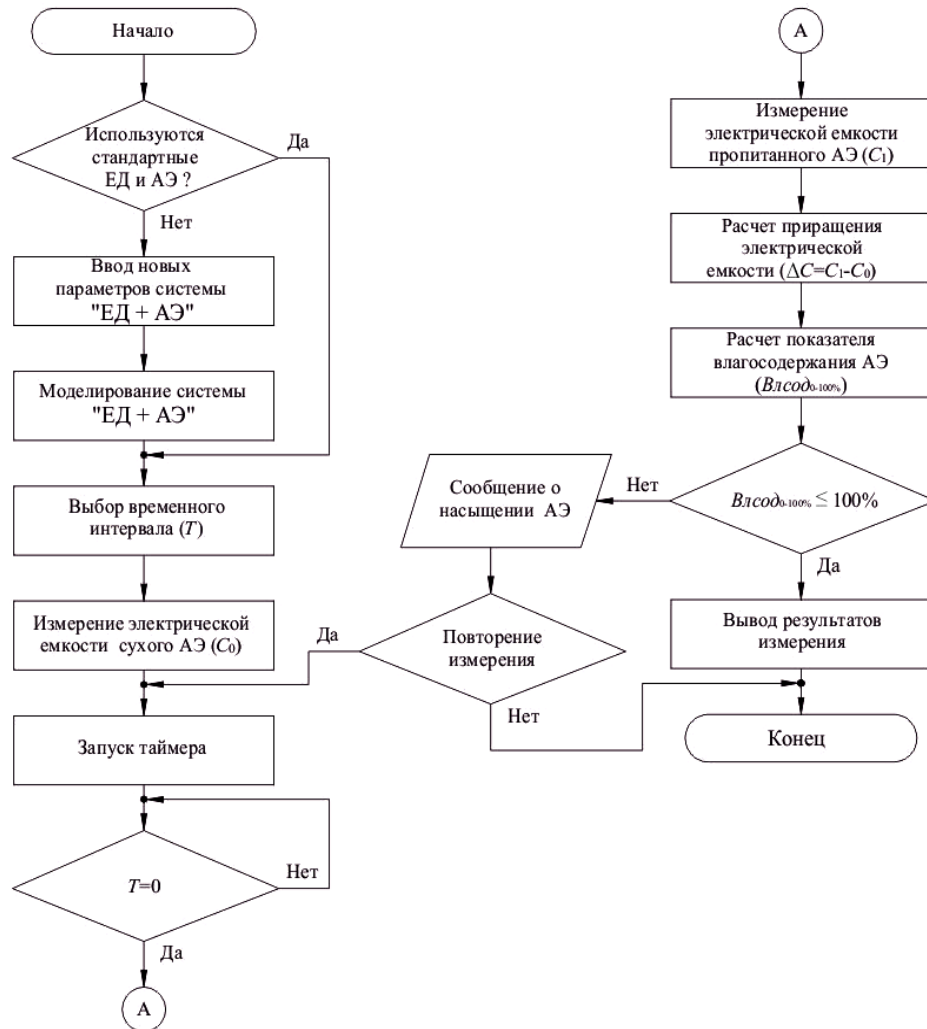


Рис. 1. Алгоритм измерения потоотделения человека на основе использования емкостного датчика и адсорбирующего элемента (ЕД – емкостной датчик; АЭ – адсорбирующий элемент)

При использовании стандартных параметров емкостного датчика (типоразмера 640x7000 встречно-штыревой структуры электродов) и адсорбирующего элемента (на основе целлюлозы плотностью 85 г/м² и толщиной 190 мкм) применяется установленная в работе [9] зависимость между абсолютным приращением электрической емкости системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент» и показателем влагосодержания адсорбирующего элемента (рисунок 2).

Временной интервал (T), в течение которого адсорбирующий элемент будет накапливать выделяемый человеком пот, задается вручную либо выбирается исходя из стандартных настроек: 35 минут для диагностики первичного гипергидроза.

Этап измерения электрической емкости системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент» включает следующие действия:

- измерение электрической емкости сухого адсорбирующего элемента C_0 ;
- накопление адсорбирующим элементом выделяемого человеком пота в течение заданного временного интервала T ;
- измерение электрической емкости пропитанного адсорбирующего элемента C_1 ;
- расчет абсолютного приращения электрической емкости системы «емкостной датчик + адсорбирующий элемент» по формуле:

$$\Delta C = C_1 - C_0. \quad (1)$$

Расчет величины ΔC позволяет исключить влияние условий внешней среды (температуры, давления и влажности воздуха) на результаты исследований.

Расчет показателя влагосодержания адсорбирующего элемента $Влсод_{0-100\%}$ выполняется по результатам рассчитанного значения ΔC и в соответствии с установленной ранее [9] либо полученной на этапе моделирования новой зависимостью $\Delta C = f(Влсод_{0-100\%})$.

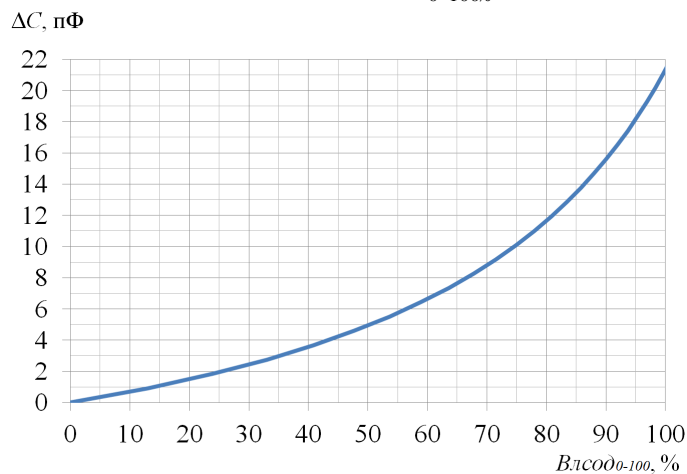


Рис. 2. Градуировочный график зависимости абсолютного приращения электрической емкости от влагосодержания адсорбирующего элемента

Этап количественной оценки потоотделения человека основан на анализе полученного значения показателя влагосодержания адсорбирующего элемента $Влсод_{0-100\%}$: чем выше данный показатель, тем больше пота сорбиривал целлюлозный адсорбирующий элемент за заданный промежуток времени T . Целесообразность расчета данного показателя выявлена в результате проведенных экспериментальных исследований потоотделения человека в норме и патологии (первичный гипергидроз): патологическое потоотделение человека характеризуется увеличенным в 2 раза и более показателем влагосодержания адсорбирующего элемента по сравнению с нормальным (физиологическим) потоотделением. Например, для ладони показатель $Влсод_{0-100\%}$ составил $(9,0 \pm 5,7)\%$ в норме и $(33,9 \pm 10,6)\%$ при патологии, достоверность различий по сравнению с нормой составила $p < 0,05$ при $n = 17$. Таким образом, показатель $Влсод_{0-100\%}$ является мерой количественной оценки потоотделительной функции кожи человека в норме и патологии (первичный гипергидроз).

При диагностике первичного гипергидроза (т.е. в случае выбора стандартных настроек) используются следующие уровни градации состояния потоотделительной функции кожи человека: состояние нормы и состояние патологии. Заключение о соответствии показателя влагосодержания адсорбирующего элемента исследуемого участка кожи одному из вышеназванных состояний формируется по результатам сравнения полученного значения показателя $Влсод_{0-100\%}$ с соответствующими показателями данного участка кожи, зарегистрированными в норме и патологии (первичный гипергидроз). Так как среднеарифметические значения и среднеквадратичные отклонения показателя влагосодержания адсорбирующего элемента в норме и патологии различны для каждого участка кожи ладони человека в силу ее анатомо-физиологических особенностей строения, то предлагается:

1. Ставить в соответствие состоянию нормы для каждого участка кожи ладони человека усредненные значения показателя влагосодержания адсорбирующего элемента, зарегистрированные у здоровых лиц.

2. Ставить в соответствие состоянию патологии для каждого участка кожи ладони человека усредненные значения показателя влагосодержания адсорбирующего элемента, зарегистрированные у пациентов с патологическим повышенным потоотделительным процессом (первичный гипергидроз).

С учетом вышеизложенного, а также руководствуясь результатами экспериментальных исследований потоотделения человека в норме и патологии (первичный гипергидроз), анализ показателя влагосодержания адсорбирующего элемента выполняется исходя из следующих возможных случаев:

1. Величина показателя влагосодержания адсорбирующего элемента, имеющая величину менее порога патологических значений ($Влсод_{0-100\%} < Влсод_{cp\ pathology}$), свидетельствует о нормальном (физиологическом) потоотделительном процессе исследуемого участка кожи ладони человека.

2. Величина показателя влагосодержания адсорбирующего элемента, равная или превышающая порог патологических значений ($Влсод_{0-100\%} \geq Влсод_{cp\ pathology}$), свидетельствует о патологическом потоотделительном процессе исследуемого участка кожи ладони человека.

В работе алгоритма измерения потоотделения человека предусмотрена самостоятельная интерпретация полученных результатов исследования в случае задания временного интервала измерения потоотделения человека вручную.

Разработанная методика измерения потоотделения человека на основе использования емкостного датчика и адсорбирующего элемента позволяет получать объективные данные о степени выраженности потоотделения кожных покровов человека при диагностике первичного гипергидроза и использовать полученную информацию для повышения эффективности отбора пациентов с целью проведения оперативного лечения данного заболевания (торакоскопической симпатэктомии – операции, заключающейся в пересечении или пережатии клипсой нервов, иннервирующих потовые железы).

Литература

1. Дерматология: учеб. пособие : в 2 ч. / В. Г. Панкратов [и др.] ; под ред. В. Г. Панкратова ; 3-е изд., испр. и доп. – Минск: БГМУ, 2012. – Ч. 1: Общая и инфекционная дерматология. – 227 с.
2. Стебунов, С.С. Первичный гипергидроз: диагностика и лечение / С. С. Стебунов. – Минск, 2007. – 209 с.
3. Minor, V. Ein neues Verfahren zu der klinischen Untersuchung der Schweißabsonderung / V. Minor. // Deutsche Zeitschrift für Nervenheilkunde. – 1927. – № 101. – S. 302-308.
4. Heckmann, M. Axillare Hyperhidrose: Erfolgreiche Behandlung mit Botulinumtoxin A / M. Heckmann [u.a.] // Der Hautarzt. – 1998. – № 49. – S. 101-103.
5. Солоха, О.А. Фокальный гипергидроз: проблема, нашедшая свое решение / О.А. Солоха // Неврологический журнал. – 2004. – №6. – С. 43-48.
6. Grimnes, S. Bioimpedance and Bioelectricity Basics / S. Grimnes, O. G. Martinsen – San Diego, CA: Academic Press, 2000. – 749 p.
7. Tronnier, H Differenzierte Feuchtigkeitsmessungen an der menschlichen Haut / H. Tronnier // Ärztliche Kosmetologie. – 1980. – №10. – S. 291-308.
8. Воробей, А.М. Моделирование емкостного датчика влажности кожи / А.М. Воробей, Д.В. Рымарев, М.В. Давыдов, С.С. Стебунов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 50–55.
9. Воробей, А. М. Диагностический аппаратно-программного комплекс количественной оценки потоотделительной функции кожи человека / А.М. Воробей // Доклады БГУИР. – 2015. – №5 (91).– С. 112-118.

METHODOLOGY OF HUMAN SKIN PERSPIRATION MEASUREMENT ON THE BASIS OF USING A CAPACITIVE TRANSDUCER AND AN ADSORBING ELEMENT

A.M. Stasishina¹, M.V. Davydov¹, S.S. Stebunov¹

¹ Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

² “LODE” LLC, Minsk

In the article the quantitative measurement methodology of human skin perspiration on the basis of using the capacitive transducer and the adsorbing element is presented. The main point of the methodology is in evaluation of human skin perspiration function using a moisture content figure of the adsorbing element. The developed methodology allows to receive objective data about the secretion degree of human skin integument perspiration while diagnosing preliminary hyperhidrosis, and to use the obtained information for enhancing of patients` selection effectivity with an aim of surgical treatment of this disease.

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НОВОГО ТИПА ДЛЯ МОНИТОРИНГА
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА**

Фомин Л.Б.¹, д. м. н. Борисов В.И.², Вдовина Н.В.², к. м. н. Радаева Т.М.², Чижиков Д. А.³

¹ Специализированная кардиохирургическая клиническая больница, Нижний Новгород;

² Нижегородская государственная медицинская академия;

³ Гороховецкая Центральная районная больница

Введение

Реально-временная коррекция разных видов лечения больных заболеваниями сердца требует различных видов мониторинга состояния кровообращения и угрожаемых жизни осложнений (стенокардии, инфаркта миокарда, внезапной смерти и т.п.). Однако, мониторинг кровообращения сложно проводить в обычной обстановке и при консервативном лечении сердечно-сосудистых заболеваний из-за необходимости выполнения инвазивных (“кровавых”) исследований или чрезмерной громоздкости аппаратуры.

Нами было найдено, что о состоянии кровообращения можно судить по уровню управляющих сигналов на генерацию автоколебательных процессов в сердце (т.е. без прямого измерения параметров кровообращения), что информацию об уровне таких сигналов и об угрожаемых жизни осложнениях можно получить по специфическим параметрам электрокардиограммы (ЭКГ), а соответствующие малогабаритные технические средства можно было бы создавать и использовать на практике. [1, 2, 3, 4, 5 и др.].

ЦЕЛЬ работы: создание аппаратных комплексов, позволяющих в реальном времени мониторировать состояние организма в обычной обстановке и при проведении консервативного лечения сердечно-сосудистых заболеваний, и оценить эффективность применения таких комплексов.

Материалы и методы

Для реализации цели использованы устройства – специализированные кардиомониторы (СКМ), разработанные при нашем участии, в которых использовались элементы искусственного интеллекта для выявления и предотвращения различных состояний, особенно, угрожающих здоровью и жизни пациентов. Отличие разработанных СКМ от приборов с холтеровской регистрацией ЭКГ заключается в следующем. Холтеровские «мониторы» предназначены для записи ЭКГ в память в течение многих часов (до 3-х суток) с последующей обработкой данных. То есть они являются не столько мониторами (цель которых предупреждать об опасности!), сколько регистраторами. А СКМ параллельно выполняют запись ЭКГ в память и осуществляют одновременную автоматическую обработку с выявлением предвестников неблагоприятных реакций и сообщением врачу или пациенту об этом. Эти сообщения позволяют избежать опасности и скорректировать тактику лечения, реабилитации и физических тренировок. Такие возможности в настоящее время имеются в основном у стационарных мониторов для лежачих больных в отделениях интенсивной терапии.

В СКМ слежение проводится за ЭКГ-сигналом с определением его особенностей (сдвиги сегмента ST, интервала QT) и изменений параметров сердечного ритма (пульс, вариабельность длительности кардиоинтервалов, число аритмических сокращений). Такая логика реализована в аппаратурно-программных комплексах (АПК) «Риттерм», «Кардиотестер», «МABPC». Обобщенная блок схема этих АПК (на примере АПК «Риттерм») – см. рис.1.

АПК "Риттерм" – мобильная установка, предназначенная для оценки состояния как в ходе моделирования простейших жизненных ситуаций (положения лежа, сидя, стоя, ходьба на месте), так и при проведении дозированных нагрузок (велозргометрия, стресс-ЭхоКГ) и лекарственных проб и терапии.

АПК "Кардиотестер" реализован в “карманном“ виде и предназначен для контроля состояния пациента в стационаре и амбулаторных условиях. Используется как режим вышеуказанного мониторингования, так и фрагментарный холтеровский режим с записями показателей и фрагментов ЭКГ.

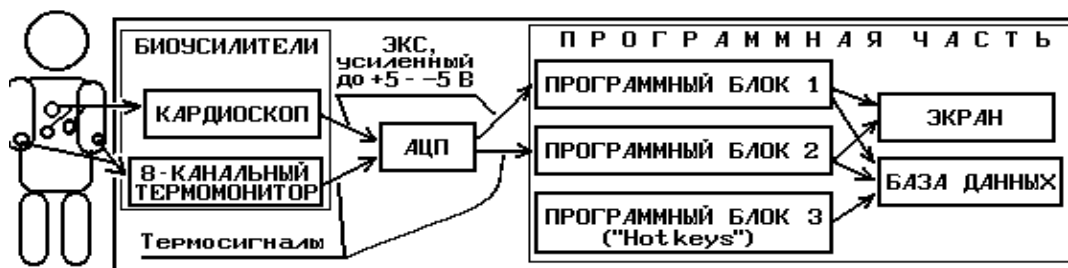
АПК “МABPC” - прибор карманного типа полифункционального и многопользовательского назначения. Предназначен прежде всего для получения визуальной информации о состоянии ритма сердца и его регуляции у обследуемого для принятия экстренных преимущественно врачебных решений непосредственно в момент обследования. Дальнейший анализ позволяет более детально изучить характеристики вегетативного статуса у обследуемого в динамике.

Исследования выполнены у 753 человек в возрасте от 17 до 86 лет ; мужчин – 657, женщин – 96. 454 человек в возрасте от 34 до 82 лет, имели разные виды ишемической болезни сердца. Контрольную группу для больных с нарушениями коронарного и системного кровообращения и поражениями сердца составили 77 здоровых мужчин. Оценка эффективности применения АПК проведена у 56

Нано-, микро- и радиоэлектроника в медицине

кардиологических и кардиохирургических больных в ходе выполнения как диагностических тестов, так и тренирующей терапии. Больные разделены на две группы: в 1 группе разработанные нами следящие устройства использованы как регистраторы, а во 2 – как мониторы (когда использовались интеллектуальные возможности АПК).

А. БЛОК-СХЕМА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА "РИТТЕРМ"



Б. СХЕМА ОБРАБОТКИ ЭКС

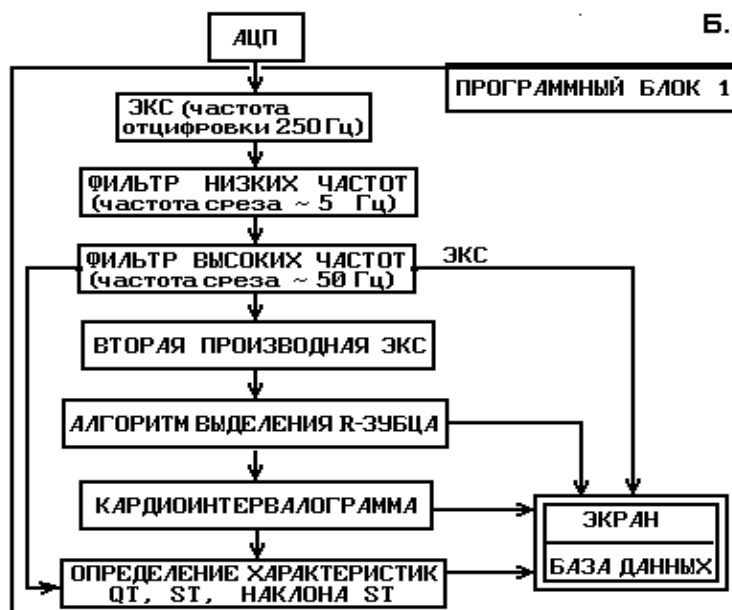


Рис. 1. Блок-схема комплекса «Риттерм»

Результаты

Мониторинг с использованием интеллектуальных возможностей АПК позволил резко снизить частоту нежелательных эффектов диагностических и тренирующих нагрузок. Он обеспечил более оптимальные уровни нагрузок во 2-й группе по сравнению с 1-й группой. Во 2-й группе нежелательные эффекты (предшественники угрожаемых жизни осложнений) возникали в 2,2 раза реже ($P_{\chi^2}=0,0001$) (см. рис. 2).

Полученные данные использованы при модификации стандартных методик физической реабилитации. Это дало возможность достигать индивидуального максимально допустимого уровня физической активности при устранении потенциально опасных побочных эффектов тренировки.

Заключение

Использование АПК в клинических условиях показало их высокую практическую и научную значимость из-за существенного ускорения диагностики и оценки состояния пациентов, в ряде случаев их использование стало элементом лечебного процесса.

Разработанный анализ параметров синусового ритма с одновременным его мониторингом позволил в режиме реального времени уточнять особенности механизмов регуляции и уровень управляющих сигналов на генерацию автоколебательных процессов в сердце в норме и при нарушениях сердечной деятельности и коронарного кровообращения. Реализация этого анализа в СПК дала возможность оперативно оценивать состояние сердечно-сосудистой системы, оптимизировать технологию выполнения двигательного режима за счет дозирования интенсивности нагрузок; в результате этого частота нежелательных эффектов диагностических и тренирующих нагрузок снижается 2,2 раза.

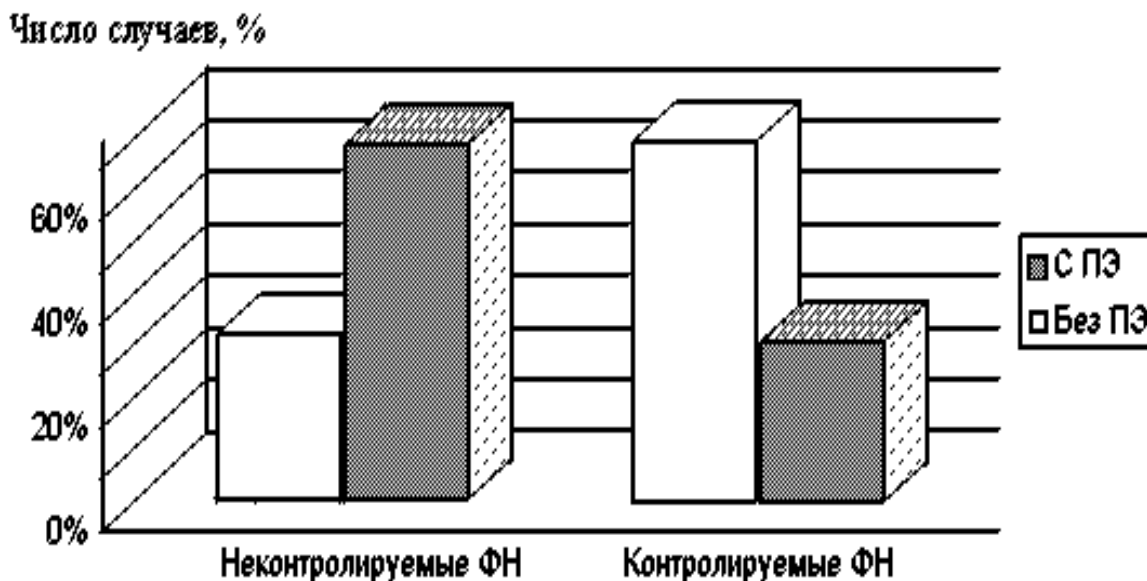


Рис. 2. Результаты применения комплекса «Риттерм»

Мониторинг показал свою эффективность при ведении больных ИБС разных классов, включая и пациентов с тяжелым течением заболевания и низкой толерантностью к ФН, а также при коррекции двигательного режима и фармакотерапии.

Такой подход показал свою перспективность и в других областях медицинской науки, таких как физиология, педиатрия, неврология и др.

Л и т е р а т у р а

1. Королев В.И., Борисов В.И., Максина И.В., Пасека А.А., Фомин Л.Б. Электрическая модель клетки синусового узла. - Нижний Новгород: Нижегородский университет, 1999. - 22 с.
2. Борисов В.И., Мудрова Л.А. Стандартные методики оценки регуляции синусового ритма сердца: Метод. рек. – Нижний Новгород: Изд-во НГМА, 1997. - 16 с.
3. Борисов В.И., Матусова А.П., Мудрова Л.А., Рейман А.М. Значение изучения парасимпатической активности для оценки состояния больных инфарктом миокарда //Нижегородский мед. ж. – 1998. - N 2. - С. 15 - 20.
4. Проблема создания портативных кардиомониторов. / Сидоренко Г.И., Якубович В.М., Никитин Я.Г., Усачев О.И. //Кардиология. - 1980. - N 12. - С. 30-33.
5. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: Учеб. пособие для вузов / А. Л. Барановский, А. Н. Калинин, Л. А. Манило и др.; Под ред. А. Л. Барановского и А. П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. - 248 с.
6. Борисов В.И. Механизмы вегетативного управления сердечным ритмом в условиях нарушения коронарного кровообращения и сердечной деятельности: патофизиологическое, диагностическое и лечебное значение. - Дис. докт. мед. наук. - Нижний Новгород, 2005 г.

E-mail: viborissov@mail.ru

HARDWARE COMPLEXES OF REAL TIME OF NEW TYPE FOR MONITORING AND DEFINITION OF A CONDITION OF CARDIOVASCULAR SYSTEM: AN EFFICIENCY ESTIMATION

L.B. Fomin¹, V.I. Borissov², N.V. Vdovina², T.M. Radaeva², D. A. Chizhikov³

¹ Specialised Cardiosurgery Clinical Hospital of Nizhny Novgorod

² Nizhny Novgorod State Medical Academy

³ Central District Hospital of Gorokhovets

Hardware complexes for monitoring and an estimation of a condition of the person in a mode of real time for usual conditions are created and at carrying out of treatment of heart diseases. They have allowed to optimise medical influences at the expense of authentic decrease in frequency of occurrence of the adverse reactions, capable to lead to development of a stenocardia, a heart attack of a myocardium and sudden warm death.

**ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЗИОТЕРАПИИ**

к.т.н. Давыдов М.В.¹, к.т.н. Зайцева Е.Г.², Грабцевич Е.В.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

² Белорусский национальный технический университет

В настоящее время все шире в физиотерапии начинает применяться комплексное воздействие двумя и более факторами [1,2].

В случае большого числа факторов воздействия перебор возможных вариантов вызывает затруднения. Чтобы проанализировать все возможные варианты многофакторной терапии, целесообразно использовать метод морфологического анализа. Применительно к данной задаче метод заключается в классификации всех возможных подвидов для каждого воздействующего фактора и анализе приемлемости сочетаний подвидов, соответствующих разным факторам [3]. Например, одним из подвидов магнитотерапии является воздействие постоянным полем, механотерапии – вибромассаж с заданной частотой, оптического излучения импульсное облучение определенного спектрального состава. Указанное сочетание этих подвидов должно быть проанализировано с точки зрения эффективности воздействия на пациента.

В таблице 1 представлены основные известные методы физиотерапии и разновидности этих методов.

Таблица 1. Методы физиотерапии и их разновидности

1 Магнитное поле	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇
2 Электролечение	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇
3 Светолечение	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃	a ₃₄	0	0	0
4 Водолечение	a ₄₁	a ₄₂	a ₄₃	a ₄₄	a ₄₅	a ₄₆	a ₄₇
5 Тепловое лечение	a ₅₁	a ₅₂	a ₅₃	a ₅₄	0	0	0
6 Механическое воздействие	a ₆₁	a ₆₂	a ₆₃	0	0	0	0
7 Звукотерапия	a ₇₁	a ₇₂	a ₇₃	a ₇₄	a ₇₅	a ₇₆	0

В первой строке отображены все виды магнитного поля: a₁₁ – ПМП (постоянное магнитное поле), a₁₂ – ПеМП (переменное магнитное поле), a₁₃ – ПуМП (пульсовое магнитное поле), a₁₄ – ВМП (вращающееся магнитное поле), a₁₅ – ИМП (импульсное магнитное поле), a₁₆ – ИБМП (бегущее магнитное поле), a₁₇ – СиМП (случайное магнитное поле).

Во второй строке указываются виды воздействия электролечения: a₂₁ – гальванизация, a₂₂ – ионогальванизация, a₂₃ – фарадизация, a₂₄ – дарсонвализация, a₂₅ – диатермия, a₂₆ – индуктотермия, a₂₇ – магнитотерапия.

В третьей строке отображены возможные методы светолечения: a₃₁ –ИК, a₃₂ –УФ(лазер), a₃₃ –ультразвук, a₃₄ –свет.

В четвертой строке указываются виды водолечения: a₄₁ –душ, a₄₂ –местные ванны, a₄₃ –струя, a₄₄ –минеральные воды, a₄₅ –влажные укутывания, a₄₆ –тепло, a₄₇ –холод.

В пятой строке – виды теплового лечения: a₅₁ –лечебные грязи, a₅₂ –песок, a₅₃ –пар, a₅₄ –сухой воздух.

В шестой строке – виды механического воздействия: a₆₁ –вибротерапия, a₆₂ –массаж, a₆₃ –мануальная терапия.

В седьмой, заключительной строке, отображены виды звукотерапии: a₇₁ –любимая музыка пациента, a₇₂ –шум дождя, a₇₃ –пение птиц, a₇₄ –живой звук, a₇₅ –поющие чаши, a₇₆ –лечение запахами растений (ароматерапия).

С учетом потенциальной совместимости воздействий по литературным источникам [1,2] были составлены совместимые комбинации. С использованием этих комбинаций можно сформулировать концепцию комплексного физиотерапевтического воздействия, на основе которой необходимо проектировать соответствующий комплекс. Ниже приведены примеры таких сочетаний.

A₁=a₁₁*a₃₂*a₇₂ (ПМП + УФ + шум дождя) – сочетание магнитного поля с низкоинтенсивным лазерным излучением. Как магнитному полю, так и лазерному излучению присущи противовоспалительный, иммуномодулирующий и другие эффекты. Оба физических факторов однонаправленно влияют на ряд обменных и физиологических процессов. Сочетание их в приборе усиливает воздействие. В данный момент, на таком сочетании работают такие приборы: «Фоторон», «Люзар-МП», «Родник-1» и т.д.

A₂=a₆₃*a₇₁ (Мануальная терапия + любимая музыка пациента) – система лечения, воздействия чаще всего при помощи рук. Метод чаще всего используется для восстановления подвижности отдельных позвоночных двигательных сегментов.

$A_3 = a_{12} * a_{31}$ (ПеМП+ИК) - использование низкоэнергетического инфракрасного излучения и переменного магнитного поля для лечения сахарного диабета. Сочетание таких компонентов способствует восстановлению.

$A_4 = a_{16} * a_{12}$ (БеМП+ПеМП) – целесообразно и эффективно использовать БеМП и ПеМП в комплексном лечении больных бронхиальной астмой.

$A_5 = a_{27} * a_{44}$ (магнитотерапия+минеральные воды) - сочетание магнитотерапии и акватерапии. В данном аквамагнитотерапевтическом комплексе заложено регулирование целого ряда параметров: подбор оптимального температурного режима, выбор растворов воздействия (минеральные воды) примером такого сочетания служит прибор «АкваСПОК».

$A_6 = a_{33} * a_{62}$ (ультразвук + массаж) – метод, предназначенный для лечения ультразвуковыми колебаниями. В основе лечебного действия лежит способность ультразвука выполнять микро массаж тканей и отдельных клеток. Примером такого сочетания служит прибор «Стриж» - аппарат высокочастотной ультразвуковой терапии.

$A_7 = a_{27} * a_{61}$ (магнитотерапия + вибротерапия) – магнитовиброакустическое воздействие на организм человека в стационарных условиях с целью профилактики и лечения различных органов и систем. Пример такого сочетания «Магофон-01»

$A_8 = a_{26} * a_{46}$ (индуктотермия + тепло) – сочетание переменного высокочастотного электромагнитного поля с теплом. Определенные участки тела нагреваются. Индуктотермия приводит к расширению сосудов, тормозит процессы возбуждения в ЦНС, нормализует нарушенный процесс обмена веществ. Для проведения лечения применяются следующие аппараты: ДКВ-1, ДКВ-2, ИКВ-4. С той же целью могут быть использованы аппараты для УВЧ-терапии при частоте 27, 12 МГц.

$A_9 = a_{51} * a_{46} * a_{71}$ (лечебные грязи + тепло + любимая музыка пациента) – под влиянием теплового фактора в области воздействия наблюдается соответствующее силе температурного раздражения расширение сосудов, ускорение кровотока в них, повышение температуры в подлежащих тканях и обусловленное этим ускорение обменных процессов, изменение диффузии и проницаемости. Рекомендуется также особое внимание уделить атмосфере процедуры. Любимая музыка пациента расслабит и даст почувствовать ему комфорт и удовлетворение от процедуры.

$A_{10} = a_{42} * a_{52} * a_{46} * a_{73}$ (местные ванны + тепло + пение птиц) – физиологическое воздействие нагретого песка, основано на тепловом эффекте и механическом раздражении кожных рецепторов его острыми крупинками. Лечение песком проводят в виде местных ванн. Звуки природы, как на примере данного сочетания: пение птиц, позволят быть пациенту в гармонии с самим собой. Ощущения отдыха гарантированы.

$A_{11} = a_{62} * a_{76}$ (массаж + ароматерапия) – терапевтические возможности ароматерапии во многом обусловлены хорошим проникновением эфирных масел через кожу и быстрым попаданием в систему кровообращения. Наиболее часто эфирные масла используют при общем или местном массаже. Для каждого больного подбирается своя композиция эфирных масел.

Анализ определенных сочетаний позволил выявить ниже перечисленные методы, не имеющие в настоящее время аппаратной реализации.

$A_1 = a_{61} * a_{43} * a_{11} * a_{71}$ (ПМП + вибротерапия + струя воды + любимая музыка пациента) – с использованием лабильной методики. В такой методике осуществляется постоянное перемещение вибротода (например, струи воды).

$A_2 = a_{61} * a_{52}$ (вибротерапия + вид теплового лечения (песком)) – вибротерапию можно назначать в комплексе с тепловым лечением. В данном случае частицы песка оказывают воздействие на различные участки человека. Это можно осуществить в вибраторе с различными насадками.

$A_3 = a_{33} * a_{62}$ (ультразвук и вакуумный массаж) – комбинированный физиотерапевтический аппарат, позволяет проводить ряд процедур. Может применяться при отеках. Ультразвуком можно улучшать циркуляцию крови, а массаж так же будет способствовать терапии.

Анализ вышеперечисленных сочетаний воздействия показал, что для ряда из них не разработаны соответствующие комплексы, хотя не исключена высокая эффективность их применения.

Для повышения эффективности физиотерапии предложено дополнить данную концепцию введением психофизического воздействия, тренинга для активных пациентов и контролем утомляемости от процедуры. В качестве активных рассматриваются пациенты, имеющие возможность выполнять в процессе сеанса физиотерапии задания, связанные с напряжением и расслаблением мышц, а также проходить тесты на утомляемость. Содержание тестов определяется индивидуальными особенностями пациента.

Таким образом, на основе анализа сочетаний методов физиотерапии предложен ряд вариантов комплексной терапии, эффективность каждого из которых, возможно, выше, чем воздействие отдельными факторами. Такой последовательный перебор вариантов позволяет полностью охватить все возможные сочетания и усовершенствовать систематизацию исследований в области многофакторной физиотерапии.

Литература

1. Улащик В.С. Физиотерапия. Универсальная медицинская энциклопедия. – Мн.: Книжный дом, 2008. - 640 с.
2. Улащик В.С. Большой справочник физиотерапевта. - Мн.: Интерпрессервис, Книжный Дом, 2012. - 640 с.
3. Зайцева Е.Г., Грабцевич Е.В.. Анализ и синтез методов многофакторной физиотерапии с помощью морфологических карт - В кн.: 5-я Международная научно-техническая конференция «Новые направления развития приборостроения» Минск, БНТУ, 2012, с.99

**APPLICATION OF MORPHOLOGY ANALYSIS
FOR BROADENING OF ABILITIES OF PHYSIOTHERAPY**

M. V. Davidov¹, E. G. Zaitseva², E. V. Grabtsevich²

¹ Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

² Belarussian National Technical University

Concept of a new generation of physiotherapeutic complexes is analyzed. The method of morphology analysis for them development is formulated. List of problems that should be addressed to create such complexes is given.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ
МИКРО- И НАНОБИОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ЭНЕРГИЕЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

д.т.н. Морозов Г.А.¹, к.т.н. Стахова Н.Е.¹, д.т.н. Морозов О.Г.¹,
Абдуллаева А.З.¹, Зайцева Т.В.², Тимаков Н.П.¹, Кокурин О.Е.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева

² Казанский национальный исследовательский технологический университет

Введение

В двадцать первом веке продолжается поиск экологически чистых и экономически целесообразных, технологий повышения продуктивности, эффективности медицинских и лекарственных средств, качества продуктов питания.

Одним из проверенных методов и средств является обработка исходного сырья или биологических объектов: низкоинтенсивной энергией КВЧ диапазона. Известно, что использование неинвазивных уровней электромагнитных полей впервые началось в СССР, в научной школе Н.Д. Девяткова, который в 1976 году на международном конгрессе в США изложил концепцию медицинских методов и средств поддержки жизнедеятельности космонавтов. Одним из методов является метод использования низкоэнергетических ЭМП крайне высоких частот. А уже в 1978 году в Пензе началось серийное производство аппаратов Явь – 7,1 и Явь – 5,6 для медицинской физиотерапевтической практики, с соответствующими рекомендациями по классам и видам заболеваний.

В настоящее время, ведутся активные исследования воздействия ЭМП СВЧ и КВЧ на живые организмы, биологические системы и объекты, в том числе и на клеточном уровне. [1]

Интерес представляют также исследования возможности управления наименьшими объектами живых объектов в биологии – микро и наноразмерности. [2]

Особый интерес вызывают исследования в области ветеринарной медицины и производстве лекарственных средств и пищевых дрожжей.

Поэтому очевидно, что изменения в биосистеме полученные за счет внешнего воздействия электромагнитных, низкоэнергетических, неинвазивных ЭМП СВЧ являются необходимыми и современными.

1. Цель настоящей работы

Исследование возможности создания биотехнологий получения наиболее максимального эффекта за счет обработки биообъектов микро и наноразмерности неинвазивным уровнем энергии ЭМП КВЧ.

2. Методы и средства

В качестве основного метода используется метод предпосевной обработки семян различных биологических сред, а так же общеизвестные методики и Госты. Для жидких лекарственных средств использовались методики выращивания различных культур в кюветах, а затем перенос опытов на животных. Все опыты проводились под руководством опытных докторов наук в соответствующей научной специализации.

Особенностью проводимых нами исследований является оценка комплексных результатов для сельскохозяйственных агроценозов, структуры деревьев, общего состояния здоровья и продуктивности животных.

Экспериментальные исследования проводились по следующей обобщенной структурной схеме:



Рис. 1. Обобщенная структурная схема экспериментальных исследований

3. Экспериментальные исследования

3.1. Экспериментальные исследования деревьев и лесных культур

Исследования проводились нашей организацией совместно с лесхозами Министерства лесной промышленности: Пригородный, Арский, Сабинский и другими, под контролем Татарской лесной опытной станции ВНИЛМ (проф. Н.М. Ведерникова), НИИ «Физиологии и ботаники» АН РТ, профессора Ратушняка А.А. [3, 4]

Многолетние исследования показали высокую эффективность по всем стадиям развития, от проростков до взрослых деревьев, при однократной предпосевной обработке семян: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L) и ели европейской (*Picea abies* Karst) энергией ЭМП КВЧ мощностью 0,05 МкВА. В частности, впервые было доказано, что высокая эффективность: значительно повышает энергию прорастания, всхожесть, улучшает величину проростков, за счет того, что снизилась степень поражения болезнями, плесневение, все виды грибов. Впервые было обнаружено, что в период прорастания значительно увеличилось (в 3-5 раз, по сравнению с контролем) азотобактерн и все виды азотофиксаторов в ризосфере корней.

Нами экспериментально доказан эффект комплексности воздействия низкоинтенсивной энергии ЭМП КВЧ на биологические системы микроуровневых биообъектов.

3.2. Исследование воздействия ЭМП КВЧ на зерновые сельскохозяйственные культуры

Исследования проводились, начиная с 2003 г. по настоящее время, совместно с ТАТ НИИ СХ РФ заведующий опытной станцией, к.т.н. В.И. Блохин, зав. лабораторией с/х микробиологии Т.В. Зайцевой. Кратно можно сделать следующий вывод: для основных зерновых культур (рожь, пшеница, овес) получены положительные результаты: увеличения урожайности, (15-30%) устойчивости к погодным условиям. Доказано, что однократная обработка семян яровых и озимых культур неинвазивными уровнями энергии (10^{-29} Ватт на поверхность семечка) управляет биообъектом меньше 10^{-6} например, таких как в опытах 2015 г.: обработка в лаборатории семян ярового ячменя сорта Камашевский селекции ТАТ НИИ СХ с лабораторной всхожестью 95 % получены оригинальные результаты на фоне увеличения всех показателей: всхожесть, энергия прорастания и др. полностью уничтожены следующие виды грибов: фузариоз = 20-70 мкм, гельминтоспориоз=50-150 мкм, альтернариоз=20-60 мкм, бактериозы = 0,5-0,8x1-2,5 мкм, плесневые = (пеницилловые грибы)= 2-8 мкм [4, 5].

3.3. Исследования дрожжевых культур

Исследование проводилось НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ совместно с КНИТУ-КХТИ (доцент Крыницкая А.Ю.) г. Казань с 2006 г. по настоящее время.

Исследовано влияние ЭМИ КВЧ в широком диапазоне изменения частот на физиологические, морфологические и технологические характеристики роста хлебопекарных дрожжей. Определены частоты, позволяющие значительно повысить физиологическую активность дрожжей. Показано, что эффект воздействия сохраняется как минимум в течение 250 генераций.

В качестве объекта исследования использовали хлебопекарные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* 509. Облучение культуры проводили с участием генератора электромагнитного излучения Г4-142 соответствующего частотного диапазона с выходной мощностью 100 мВт/см². Расстояние между рупором облучателя и объектом составляло 15 см. Облучение культуры проводили в диапазоне от 54 до 67 ГГц с шагом 0,2 ГГц. Время экспозиции составляло 5 минут [6].

3.4. Исследования воздействия ЭМП КВЧ на маститы коров

Маститы вымени коров - это проблема номер один современного животноводства. Мастит наносит серьезный экономический ущерб всей отрасли сельского хозяйства. Из-за мастита резко снижается удой молока. Кроме того, молоко от больных животных запрещено к употреблению. На отдельных фермах маститом могут болеть сразу около 35 % животных. До недавнего времени мастит лечили только с помощью антибактериальной терапии, при этом лечебные препараты имеют свойство накапливаться в клетках животного, т.е. оно не пригодно для пищевой промышленности. [7]

Исследование воздействия ЭМП КВЧ проводилось совместно с Казанской ветеринарной академией, профессор Р.Г. Каримова. [8] Тема исследования: «Создание новых технологических приемов, обеспечивающих защиту организма животных на уровне «клетка-патоген» с целью обеспечения безопасности продуктов питания».

Исследования воздействия ЭМП КВЧ на мастит коров изучалось путем введения изотенического раствора крайне обработанного ЭМП КВЧ в цистерну вымени коров и привело к полному излечению [8].

Изучено влияние электромагнитного излучения крайне высоких частот на живые системы различного уровня организации (бактерии, клещи, крысы). Установлено, что высокоорганизованные живые системы (организм млекопитающих) реагируют на КВЧ излучение повышением активности регуляторных механизмов, а системы менее высокой организации (бактерии) – снижением, что проявляется нарушением воспроизводительных функций или гибелью коров.

Заключение

Результаты исследования проведенные в НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ показали, что разработана биотехнология управления макро-, микро-, нано- биообъектами и биосистемами. Технология является экологически чистой, безопасной для жизнедеятельности.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ- технологии (проблемы и реализации)/ Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. – М.: «Радиотехника», 2003.– 112с.
2. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов / Под ред. С.В. Калужного. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 528 с. – ISBN 987-5-9221-1266-6.
3. Н. М. Ведерников, Г.А. Морозов, А.А.Назирова Влияние микроволновой обработки семян сосны и ели на их посевные качества и устойчивость сеянцев к болезням в лесных питомниках Леса, лесной сектор и экология Республики Татарстан: Сборник научных статей. – Выпуск 1. – Казань: РИЦ «Школа», 2005. – стр. 38-44.
4. G. A. Morozov, Ratushnyak A.A., Andreeva M.G., Morozova O.V., Trushin M.V. Effekt of extremely high frequency electromagnetic fields on the microbiological community in rhizo sphere of plants / International Agrophysics INSTITUTE OF AGROPHYSICS.POLISH ACADEMY OF SCIENCES Vol.22 No1 pp71-75.
5. G.A.Morozov, N.Ye.Stakhova, Ya.N.Shangaraeva Stimulating and inactivating effects of microwave processing on plant seeds and associated with them microflora and microorganisms / Proceedings of the 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICAAT). – 2013. - pp.80-85.
6. G. A. Morozov and P. P. Krynitskiy MICROWAVE FIELD ENERGY AS BAKER'S YEAST METABOLISM REGULATOR / X anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques, 21-24 April, 2015, Kharkiv, Ukraine pp. 370-372.
7. <http://krugznaniy.ru/article/mastit-u-korov/>
8. Каримова Р.Г., Морозов Г.А., Гарипов Т.В. Влияние электромагнитного излучения крайне высоких частот на живые системы различного уровня организации / Нелинейный мир, Т.12.-№10.- С.69-73. – 2014.

E-mail: gmorozov@mail.ru

RESEARCH METHODS AND CONTROL OF MICRO- AND NANOBIOLOGICAL SYSTEMS WITH ENERGY OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN THE MICROWAVE RANGE

G. A. Morozov¹, N.E. Stakhova¹, O. G. Morozov¹, A. Z. Abdulaeva¹,
T. V. Zaitseva², N.P. Timakov¹, O.E. Kokurin¹

¹Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev

²Kazan National Research Technological University

The paper discusses the results of the study methods and means of control dimension macro, mini, nano, bio facilities in biological systems agrocenosis, veterinary medicine at increasing the efficiency of food production. Offers innovative methods and means of the processing of seed and agricultural production environments noninvasive liquid dosage levels of power frequency electromagnetic ENF.

ПОРТАТИВНЫЕ АППАРАТЫ КВЧ-ТЕРАПИИ ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

к. т. н. Кревский М. А.¹, Зинина Е. С.¹, д. б. н. Григорьева Г. И.²,
к. б. н. Гаврилова А. А.³, Доронин П. А.³

¹ООО «Элм электроника-медицина», Нижний Новгород

²Нижегородский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии
им. академика И. Н. Блохиной

³Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

В ветеринарии и зоотехнии всё чаще применяются различные электромагнитные излучения в широком диапазоне длин волн. Одним из наиболее перспективных направлений является применение миллиметровых (КВЧ) волн, к которым относятся волны с длиной от 1 до 10 мм и частотой от 30 до 300 ГГц. Биологическое воздействие КВЧ-волн на живой организм объясняется рядом теорий, которые базируются на основных биофизических эффектах воздействия низкоинтенсивного КВЧ-излучения: возбуждение акустоэлектрических колебаний в плазматических мембранах клетки – колебания Фрелиха, механизм гидратации белка под действием КВЧ-излучения, механизм формирования «памяти воды», – все они характеризуются нетепловым «информационным» действием [1, 2].

В ветеринарной практике использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения является методом, который принципиально и выгодно отличается от существующих медикаментозных и физиотерапевтических подходов [7]. В ряде случаев оно заменяет медикаментозные методы лечения, в других – дополняет. Это обстоятельство крайне важно, так как многие лекарственные препараты, в т.ч. антибиотики, обладают кумулятивными свойствами, накапливаются в тканях и органах животного. Для потребителей употребление такого мяса в пищу небезопасно, т.к. может вызвать ряд нежелательных реакций организма, в том числе и аллергических. Предлагаемый метод позволит получать экологически чистые продукты питания животного происхождения: молоко и мясо.

В условиях современного животноводства, а особенно молочного скотоводства отчетливо проявляется проблема нарушения иммунного статуса животного организма. Основными причинами сложившейся ситуации справедливо можно признать интенсивную эксплуатацию (в зарубежных хозяйствах и некоторых развитых отечественных предприятиях) и несбалансированное кормление (в большинстве российских хозяйств), а также ряд других причин. Как следствие дестабилизации иммунитета широкое распространение приобрели заболевания, причинами которых являются условно патогенные микроорганизмы и дистрофические процессы невоспалительного характера. Из них среди взрослого поголовья крупного рогатого скота наибольшее распространение приобрели различные виды гинекологической патологии: маститы, эндометриты, гипофункция яичников и ряд других заболеваний. Применение низкоинтенсивного излучения миллиметрового диапазона позволяет проводить лечение и профилактику заболеваний, связанных с воспалительными процессами и депрессией иммунной системы.

Стоит обратить особое внимание на снижение иммунного статуса у телят и гибель молодняка.

В области птицеводства сохранение и вывод потомства также является первоочередной задачей. В бройлерном птицеводстве также остро стоит получение привеса птицы экологически безопасным способом.

С этой целью на базе предприятия ООО «ЭЛМ» была специально разработана линейка портативных КВЧ аппаратов сельскохозяйственного назначения:

- 1) аппарат КВЧ терапии нетепловой интенсивности «ПОРТ» для медико-биологических исследований модифицированный для ветеринарии;
- 2) портативный аппарат «ПОРТ-ЭЛМ/НН»;

Нано-, микро- и радиоэлектроника в медицине

- 3) портативный аппарат КВЧ терапии для профилактики и лечения маститов «Вита-1»;
- 4) портативный аппарат КВЧ терапии для профилактики и лечения заболеваний, связанный со снижением иммунного статуса «Вита-2»;
- 5) портативные КВЧ аппараты для птицеводства;
- 6) портативное автономное устройство для холодильников и рефрижераторных установок, предназначенное для поддержания продуктов в свежем состоянии;
- 7) разработка аппаратуры и методик для производства натурального антибиотика Pediocin, синтезированного при выделении молочного фермента *Pediococcus pentosaceus* из капусты кимчи.

Ниже приведены технические характеристики некоторых аппаратов.

1. Аппарат КВЧ терапии нетепловой интенсивности «ПОРТ» для медико-биологических исследований модифицированный для ветеринарии.

Технические характеристики: рабочая частота 42,2 ГГц или 53,56 ГГц, выходная мощность 12 мВт. Время непрерывной работы 6 час с последующей зарядкой аккумуляторов.

2. Портативный аппарат «ПОРТ-ЭЛМ/НН» с частотой 42,2 ГГц, мощностью 30 мВт на фланце волновода (на выходе аппарата), в том числе в режиме с дополнительной низкочастотной модуляцией в режиме сканирования от 1 до 10 Гц, уровень мощности на выходе 15 мВт. Уровень мощности непосредственно на области воздействия с учетом реального затухания составляет не менее 1,5 мВт.

3. Портативный аппарат КВЧ терапии для профилактики и лечения маститов «Вита-1».

Технические характеристики: напряжение питания 2,4 В; рабочая частота 42,2 ГГц, или 53,56 ГГц; выходная мощность 2 мВт; время непрерывной работы 8 час с последующей зарядкой аккумуляторов. Габариты – 85x30x35мм, вес 180 г. Аппарат выполнен в монолитном герметичном корпусе с излучающей антенной. С целью профилактики заболеваний мастита у коров крепится непосредственно на стакан доильного аппарата во время дойки (для чего имеет специальные зажимы); аппарат автоматически включается после установки.

4. Портативный аппарат КВЧ терапии для профилактики и лечения заболеваний, связанный со снижением иммунного статуса «Вита-2».

Технические характеристики: напряжение питания 2,4 В; 2 аккумулятора типа ААА емкостью 800 мА/час; рабочая частота 42,25 ГГц или 53,56 ГГц; мощность излучения 7 мВт; время непрерывной работы 8 час. Габаритные размеры 95x80x30 мм, вес 180 г. Выносная антенна 26 мм. Крепление КВЧ-аппарата с помощью ошейника или ременной шлейки в области подчелюстного лимфоузла.

Полученные результаты

Применение миллиметровой технологии в ветеринарии велось сразу в нескольких направлениях: профилактика заболеваний мастита и эндометритов у коров, повышение иммунного статуса у коров и новорожденных телят.

В результате применения миллиметровой технологии получено достоверное уменьшение показателей развития мастита у коров на 40%, при лечении катаральных форм мастита дает уменьшение концентрации соматических клеток в молоке на 52% , а в сочетании с ИК излучением до 95% [4].

Профилактическое воздействие КВЧ излучения против эндометритов у коров осуществлялось во время последнего месяца беременности. В результате применения технологии получено достоверное уменьшение показателей развития эндометрита у коров на 80%. Кроме того, телята , родившиеся от обработанных коров были более жизнестойкими и физиологически развитыми.

В результате применения технологии миллиметрового излучения низкой интенсивности в целях профилактики заболеваний, связанных со снижением иммунного статуса у телят получено достоверное уменьшение показателей развития заболеваний, связанных со снижением иммунного статуса (бронхиты, желудочные инфекции) у телят на 80%, кроме того в экспериментальной группе не было отмечено ни одного случая гибели животного, в то время как в контрольной группе смертность составила 30% [3]. Нетепловое КВЧ воздействие позволяет предотвращать следующие осложнения: исключить задержание последа у коров, до 100%; практически исключить развитие катарального эндометрита; произвести иммунокоррекцию у стельных коров с целью снижения послеродовых заболеваний, повысить сохранность новорожденных телят до 100% [5].

Применение аппаратов «Вита-2» и «Порт» обеспечивает физиологическое стимулирующее воздействие на лимфоидную ткань, повышая функции иммунной системы в целом. При этом достоверно улучшались показатели иммунитета: бактерицидная активность сыворотки крови на 18,6%; Т-лимфоциты на 83,9%; В-лимфоциты в 4,8 раза. Возрастает антиоксидантная защита (АОЗ) организма животных по показателям каталазы, нормализуются показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ): снижаются диеновые конъюгаты, малоновый диальдегид.

Применение аппаратного воздействия повышало эффективность лечебных мероприятий при комплексной терапии.

Нано-, микро- и радиоэлектроника в медицине

Опыт проводили на коровах черно-пестрой породы в возрасте 3-7 лет с молочной продуктивностью 3000-3200 кг в год. Первая группа - контрольная, в количестве 20 голов, получала только ОР кормления. Вторая группа - опытная, также в количестве 20 голов, получала ОР кормления и дополнительно получала воздействие ЭМИ КВЧ-диапазона на биологически активные точки поясницы и крестца. Воздействие осуществляли портативным аппаратом КВЧ-терапии «ПОРТ-ЭЛМ/НН» с частотой 42,2 ГГц и мощностью 30 мВт. Обработку проводили двукратно: первое воздействие - в количестве 10-12 сеансов по 12-15 минут на биологически активные точки поясницы и крестца проводят за 30-45 дней до отела соответственно по 5-6 сеансов на каждый отдел; второе воздействие в количестве 2-3 сеансов проводят за 7-10 дней до отела, аналогично на те же точки. Всего 12-15 сеансов на курс обработки.

Таблица 1. Эффективность воздействия ЭМИ КВЧ на стельных коровах (зимний стойловый период)

Показатели	Группы коров	
	контрольная	Опытная
Количество животных, гол.	20	20
Получено телят, гол. (%)	16 (80,0)	19 (93,0)
Родившихся мертворожд., гол. (%)	4 (20,0)	1 (5,0)
Заболело телят, гол. (%)	10 (62,5)	8 (42,1)
Пало, гол. (%)	4 (20,0)	3 (15,0)
Сохранность телят, % (с учетом мертворожденных)	60,0	80,0
Послеродовые заболевания		
Задержание последа, гол. (%)	10 (50,0)	7 (35,0)
Эндометрит катаральный, гол. (%)	8 (40,0)	6 (30,0)
Эндометрит катар.-гнойный, гол. (%)	2 (10,0)	-
Проведено осеменение:		
В течение 23-31 дн после отела, гол. (%)	-	-
В течение 50-79 дн после отела, гол. (%)	6 (30,0)	8 (40,0)
В течение 90-120 дн после отела, гол. (%)	4 (20,0)	6 (30)

Таблица 2. Показатели крови коров на 3-5 сутки после отела (зимний стойловый период)

Показатели	Группы коров	
	контрольная	опытная
Лейкоциты, 10^9 /л	6,8±0,6	7,3±0,4
Эритроциты, 10^{12} /л	5,3±0,1	5,6±0,1
Гемоглобин, г/л	97,7±2,6	102,3±1,4
Общий белок, г/л	68,3±2,3	72,0±1,2
Бактерицидная активность, %	81,9±3,4	86,0±2,0
Лизоцимная активность, %	2,7±0,7	4,7±0,3
Глюкоза, ммоль/л	2,0±0,2	2,5±0,1
Общие липиды, г/л	3,5±0,15	5,5±0,2
T-лимфоциты, %	20,2±2,9	29,6±1,8
V-лимфоциты, %	3,3±0,5	5,8±0,6
Диеновые конъюгаты, ед. А/мл	0,34±0,04	0,3±0,02
Кетодиены, ед. А/мл	0,1±0,02	0,08±0,01
Малоновый диальдегид, мкмоль/л	2,8±0,2	2,4±0,1
Каталаза, мкаг/л	72,1±6,6	73,3±3,7

В течение всего периода опыта (два месяца стельности и четыре месяца после отела) за контрольными и опытными животными велись клинические наблюдения. Ежедневно учитывалось клиническое состояние, поедаемость кормов, функционирование пищеварительной системы, характер течения родов, послеродовые заболевания и сохранность телят. После отела, на 3-5 сутки, от 10 коров каждой группы брали кровь для оценки состояния иммунобиохимического гомеостаза по показателям лейкоцитов, эритроцитов, гемоглобина, общего белка сыворотки крови, общих иммуноглобулинов, глюкозы - ортотолундиновым методом, общих липидов - по методу Криницкого А.Ф. в модификации Волгина В.И., лизоцимной активности сыворотки крови по методу Дорофейчук В.Г, бактерицидной активности сыворотки крови - по методу Смирновой О.В. и Кузьминой Т.А., T- и V-лимфоцитов - методом розеткообразования, продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) - диеновых конъюгатов и кетодиенов по методу Плацера, малонового диальдегида - в реакции с тиобарбитуровой кислотой,

активность каталазы - в реакции с молибдатом аммония. Результаты исследования представлены в табл. 1 и 2.

Применение КВЧ излучения низкой интенсивности в области бройлерного птицеводства получено достоверное увеличение привеса птицы на 9%. Однократное облучение яйца перед закладкой в инкубатор давало достоверное увеличение вывода на (2-4)%, при этом основной вклад в повышение вывода вносит снижение смертности эмбрионов на начальных стадиях развития [6]. Стоит отметить, что применяемые технологии КВЧ обработки хорошо интегрируются в существующую технологию выращивания птицы.

Литература

1. Девятков Н. Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, О. В. Бецкий.- М.: Радио и связь, 1991. С. 13 – 15.
2. Девятков Н. Д. Особенности медико-биологического применения миллиметровых волн / Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий // М.: ИРЭ РАН, 1994. С. 6-43.
3. Коррекция иммунодефицитов для профилактики желудочно-кишечных болезней новорожденных телят / Исаев В. В. [и др.] // Ветеринарная патология – 2005. – №4. – С.113 - 116.
4. Изучение терапевтической и профилактической эффективности ЭМИ КВЧ при маститах у коров / Андронов О. В. [и др.] // Ветеринарная патология – 2006. – №1. – С.17 - 21.
5. Патент RU 2 323 752 МПК А01К А61N Способ иммунокоррекции у стельных коров для снижения послеродовых заболеваний / Кревский М. А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «МикроМед-биоТех». – опубл. 10.05.2008. –
6. Патент RU 2 327 345 МПК А01К45/00 Способ повышения иммунитета птицы в условиях промышленного производства / Кирасиров К. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «МикроМед-биоТех». – заявл. 10.10.2006; опубл. 27.06.2008. –
7. Управление микроэкологией организма продуктивных животных – альтернативный метод оздоровления и обеспечения продовольственной безопасности / Арбузова А. А. [и др.] // Ветеринарная патология – 2007. – №2. – С.88 - 91.

Контакты: Гаврилова Анна Александровна тел.: 8-910-149-65-44; 8-920-017-92-16.
e-mail: anna-gavrilova-65@mail.ru

PORTABLE DEVICES OF EHF-THERAPY FOR AGRICULTURAL ANIMALS

M. A. Krevsky¹, E. S. Zinina¹, G. I. Grigorieva²,
A. A. Gavrilova³, P. A. Doronin³

¹ "Elm electronics-medicine" LLC., Nizhny Novgorod

² Nizhny Novgorod Research Institute for epidemiology and microbiology n. a. academician I. N. Blokhina

³ Nizhny Novgorod State Agricultural Academy

The article describes various devices for EHF therapy, developed for veterinary purposes and the results of their application. Millimeter waves of low intensity is a promising method for the treatment and prevention of several diseases of agricultural animals and can be successfully used in livestock and poultry. Effect on the skin surface of newborn calves EHF radiation of low intensity stimulates the immune system, increases the overall resistance to diseases and can be used for prevention of gastrointestinal diseases. The use of microwaves of low intensity technologies reduces the risk of mastitis and endometritis in cows, improves weight gain in broiler breeds of chickens, enhance the hatching. It is shown that technology of low-intensity radiation millimeters band is well integrates with the existing technology of cultivation of agricultural animals and birds.

МУЛЬТИЯДЕРНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАРМПРЕПАРАТОВ

д. ф.-м. н. Пирогов Ю.А.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

На основе новых методов МРТ визуализации, разработанных в Центре магнитной томографии и спектроскопии МГУ [1], были проведены преклинические исследования малых лабораторных животных на 7-Тл биоспектротомографе фирмы Bruker BioSpec 70/30 URS. Их целью было изучить возможности целевой доставки фармпредпарата к очагам онкологического поражения [2] и научиться неинвазивно (без

хирургического вмешательства, *in vivo*) определять по спектру ЯМР степень поражения тканей живых организмов [3].

Наиболее интересными оказались результаты, полученные при совместном применении опций магнитно-резонансной томографии и ЯМР спектроскопии. Последняя на 7-Тл сканере может реализоваться не только на протонах, но и на ряде тяжелых ядер – ^{13}C , ^{19}F , ^{29}Si и ^{31}P . Благодаря этому удается локализовать в интересующей ткани воксел с поперечным размером 2.5-3 мм и произвести в нем измерения спектров ЯМР как на протонах, так и на тяжелых ядрах. По расположению в спектре (химическому сдвигу) и амплитуде спектральных линий, ответственных за характерные метаболиты ткани, можно судить о степени ишемизации ткани, типе опухолевых образований, в реальном времени измерять *in vivo* локальный метаболический портрет и температуру внутренних органов [4]. Такой подход комбинированного использования МРТ и ЯМР спектроскопии (так называемая локальная ЯМР спектроскопия) являет собой неинвазивные аналоги биопсии, метаболомики и внутритканевой термометрии.

Недостаточно высокие значения ЯМР сигнала от тяжелых ядер рекомендуется увеличить за счет применения методик гиперполяризации, основанной на двух- или трехступенчатой намагниченности ядерного ансамбля. Так, в случае нанопрепаратов, содержащих углерод ^{13}C , посредством микроволновой накачки при гелиевых температурах и в высоких магнитных полях осуществляется намагниченность квазисвободных электронов (эффект ЭПР), которая за счет электрон-ядерного эффекта Оверхаузера передается затем ядрам ^{13}C . Сформированное таким образом гиперполяризованное состояние сохраняется в течение десятка секунд, достаточных для размораживания препарата, разведения его в растворителе, инъекции в кровоток и регистрации МРТ сигнала, по уровню сравнимого с протонным ЯМР откликом [5]. Весьма короткое время деполяризации, создающее понятные трудности при выполнении диагностических процедур, может быть, однако, существенно увеличено (до десятков минут) посредством сценария, аналогичного описанной в работе [6] трехступенчатой гиперполяризации заключенных в полимерную оболочку микрочастиц ^{29}Si размером 1-2 мкм. В этом случае сначала также посредством ЭПР намагничивается поверхностный подоболочечный электронный ансамбль, намагниченность которого посредством электрон-ядерного эффекта Оверхаузера передается близким к поверхности ядрам ^{29}Si . Затем намагниченность поверхностных слоев диффундирует в область глубинных слоев за счет ядер-ядерного эффекта Оверхаузера. Созданная в результате гиперполяризация микрочастиц кремния после размораживания и удаления из магнитного поля сохраняется длительное (до 30 минут) время. Тому способствует медленная обратная диффузия намагничивания поверхностных слоев во внутренние слои гиперполяризованной частицы, что и обеспечивает значительную задержку тотальной деполяризации. Гиперполяризация позволяет реализовать высокого качества МРТ имиджинг даже при очень малых магнитных полях значением в сотые доли Тесла и создавать МРТ устройства, свободные от применения криогенных магнитов.

Обсуждаются также разработки новых эффективных методик подавления злокачественных опухолей посредством магнитной гипертермии, основанной на применении капсулированных декстран-ферритовых наночастиц, нагреваемых высокочастотным (с частотой 10 МГц) магнитным полем [7].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-02-00287 и Минобрнауки №14.604.21.0060 (RFMEFI60414X0060).

Литература

1. Анисимов Н., Батова С., Пирогов Ю. – Магнитно-резонансная томография: управление контрастом и междисциплинарные приложения. – М.: МАКС Пресс, 2013, 244 с.
2. Yusubalieva G., Baklaushev V., Gurina O., et al. – Antitumor effects of monoclonal antibodies to connexin 43 extracellular fragment in induced low-differentiated glioma. – Bull. Exp. Biol. Med., 2012, 153(1), 163-169.
3. Гуляев М., Губский Л., Черкашова Э. и др. – Локальная ЯМР спектроскопия в изучении ишемии головного мозга. – Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2013, № 1.
4. Гуляев М., Ханов С., Наместникова Д. и др. – Магнитно-резонансная термометрия головного мозга крыс методом локальной ЯМР спектроскопии. – Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2013, №10.
5. Ross B., Lin A., Harris K., et al. – Review Article: Clinical experience with ^{13}C MRS *in vivo*. – NMR Biomed., 2003, 16, 358-369.
6. Cassidy M., Chan H., Ross B., et al. – *In vivo* magnetic resonance imaging of hyperpolarized silicon particles. – Nature Nanotechnology, 2013, 8, 363-368.
7. Brusentsov N., Pirogov Yu., Polyanskiy V., et al. – Magnetohydrodynamic thermochemotherapy and MRI of malignant tumorigenesis. – Solid State Phenomena, 2012, 190, 717-720.

**MULTI-NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE VISUALISATION
OF THERAPEUTICAL PROCEDURES WITH USING
NANO-DIMENSIONAL MEDICINES**

Yu.A. Pirogov

Lomonosov Moscow State University

On the base of some new MRI visualization methods developed in the Research Center for Magnetic Tomography and Spectroscopy, pre-clinic investigations were carried out with experimental animals on the 7-T MRI scanner Bruker BioSpec 70|30 URS. The goal of the study was to research possibilities of targeted delivery of medicine preparations to tumor or ischemia sites and to learn a non-invasive approach (without any surgical operations, in vivo) to define the stage of living tissues involvement with help of NMR spectroscopy.

**СВЧ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХНИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

к. б. н. Гаврилова А. А., к. б. н. В. Г. Егорашин

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Повышение продуктивности сельскохозяйственных животных и культурных растений является первоочередной задачей в животноводстве и растениеводстве. Большое значение имеет защита ценных сельскохозяйственных от вредителей и болезней. В настоящее время в связи с ухудшающейся неблагоприятной экологической обстановкой необходимо, чтобы применяемые технологии были экологически чистыми. В условиях импортозамещения важно также использование отечественных комплектующих и материалов, применение энергосберегающих технологий, что значительно удешевляет продукцию, используемую в качестве технических устройств для предпосевной обработки семян или при их хранении.

Целью настоящих исследований являлось изучение возможности применения СВЧ технологий нетепловой интенсивности в сельском хозяйстве.

Материал и методика исследований

В наших работах был применен генератор электромагнитного излучения сверхнизкой интенсивности сантиметрового диапазона «Биоритм-1», с диапазоном частот электромагнитных колебаний – 2,0 ÷ 4,0 ГГц и управляемой выходной мощностью (0,01 - 2,0) мВт. Уровень сигнала на выходе этого устройства составляет (-20 +5) дБм с шагом 0,01 дБ. В качестве модельных биообъектов были выбраны дождевые черви *Lumbricina*, личинки колорадских жуков *Leptinotarsa decemlineata* и семена растений – гороха *Pisum sativum L.* и кукурузы *Zea mays L.*

Эффективность воздействия ЭМИ СВЧ сверхнизкой интенсивности оценивали по биологическому эффекту (БЭ), являющимся по сути процентом к контролю показателей жизнеспособности животных или прорастания семян. Обработку данных проводили по стандартным методикам [3] с доверительной вероятностью $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Применяемый в исследованиях сверхширокополосный генератор, управляемый напряжением на биполярном транзисторе, представляет собой усилитель, в обратную связь которого включен перестраиваемый контур. Перестройка частоты генератора осуществляется напряжением, изменяющимся на переменной емкости — варакторе.

Сохранение и повышение плодородия почвы – основа эффективного развития всего агропромышленного комплекса [6]. Выращивание ценных зерновых и кормовых культур невозможно без целого ряда мероприятий, улучшающих состояние почвы – содержание гумуса и питательных элементов, необходимых для нормального развития растений [4]. В последнее время с этими целями широко используется технология выращивания дождевых червей – вермикультура [7]. В наших исследованиях почву облучали ЭМИ СВЧ с частотой $f = 2450$ МГц и выходной мощностью $P = 0,01$ мВт. Обработка почвы проводилась в течение двух суток согласно четырем выбранным режимам: 1) облучение почвы вместе с червями в течение 15 ч ночью; 2) облучение почвы вместе с червями в течение 8 ч днем; 3) облучение почвы без червей в течение 15 ч ночью (червей помещали в почву после окончания облучения); 4) облучение почвы без червей в течение 8 ч днем. После проведенных исследований проводили анализ почвы, включающий гигроскопическую влагу, рН, азота (нитраты), оксид фосфора

(V), оксид калия и органические вещества. Некоторые предварительные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты влияния низкоинтенсивного СВЧ излучения на показатели качества почвы

Образец	Гигроскопическая влага		рН		NO ₃		P ₂ O ₅		K ₂ O		органического вещества	
		БЭ, %		БЭ, %	мг/100г	БЭ, %	мг/100г	БЭ, %	мг/100г	БЭ, %	%	БЭ, %
Опыт 1	8,25	9,1	5,9	-0,8	1,75	-25,2	3,14	-21,1	19,04	6,8	67,56	13,8
Опыт 2	8,5	12,4	5,75	-3,36	5,12	118,8	8,79	120,9	9,80	-45,0	74,64	25,7
Контроль	7,56		5,95		2,34		3,98		17,82		59,38	

Как видно из приведенных данных, дневное облучение в течение 8 ч давало лучшие результаты по сравнению с контролем: почти все показатели (кроме калия) весьма существенные положительные результаты. Этот вывод подтверждают и данные по привесу массы червей – в этом варианте опыта он увеличился более чем в 1,5 раза. Однако в целом, по результатам двух опытов, можно сказать, что СВЧ обработка почвы существенно улучшает органику: биологический эффект составил 13,8% в первом случае и 25,7% во втором.

В опытах с личинками жуков *Leptinotarsa decemlineata* изучали поведенческие реакции под воздействием низкоинтенсивного СВЧ излучения, характеристики которого не отличались от предыдущих опытов. Изменение поведенческих реакций было заметно в течение первых суток после воздействия СВЧ и зависело от светового режима. Обработку ЭМИ СВЧ проводили в течение 2-х суток по 2 часа. Затем тара с личинками помещалась в естественные световые условия (смена дня и ночи, на подоконнике) и контрольная группа, другие находились в изолированной темной комнате (опытная и контрольная группа соответственно). Наблюдались формы движения личинок, положение тела и аппетит. При этом в течение первых суток контрольная группа на свету (КС) демонстрировала самый активный образ жизни: 100 % животных активно питались и двигались. Обработанные СВЧ излучением личинки в этом опыте (ОС) имели сниженный аппетит и заметно хуже двигались – только 15% от общего числа животных проявляли тягу к движениям. Примерно такую же двигательную активность (ДА) проявляли личинки жука в контроле в темноте (КТ) – 10%. В опытных образцах (ОТ) личинки демонстрировали несколько более активные поведенческие реакции – 30%. В последующие двое суток наиболее заметное снижение двигательной активности проявлялось в опытной группе, находящейся в темноте – только 5%. Затем начала снижаться активность в контрольной группе на свету (20%), которая к 3-м суткам снизилась практически до нуля. На второй день снова активность личинок в опытном варианте на свету и контрольном в темноте имела сходный характер: 40 и 50% соответственно (рис. 1).

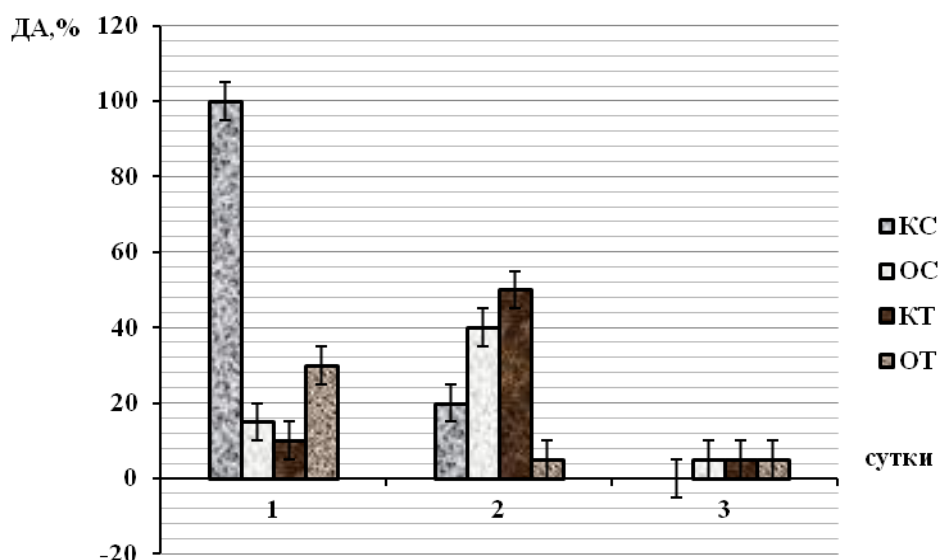


Рис. 1. Влияние СВЧ излучения низкой интенсивности на двигательную активность личинок колорадского жука

В области влияния СВЧ излучения на прорастание семян выбрали два направления: влияние СВЧ волн на семена с большим сроком хранения и семена с меньшим фотопериодом. Характеристики СВЧ волн были те же, что и в предыдущих исследованиях – частота излучения составляла $f = 2450$ МГц, выходная мощность $P = 0,01$ мВт. В ранних работах [1, 2] в качестве исследуемых семян растений были взяты семена ячменя и гороха. Сохраненные семена гороха были использованы нами в данных исследованиях. Срок их хранения составлял 9 лет. Режим длительности воздействия СВЧ излучения 6 ч (днем) был выбран как самый оптимальный для данных семян (процент к контролю составлял в выше указанных исследованиях более 20%). Как и раньше, варианты воздействия различались по степени увлажнения: в опыте 1 семена облучались сухими, в опыте 2 во влажном состоянии. Результаты показали, что данный способ СВЧ воздействия оказывает положительное влияние на всхожесть долго хранившихся семян, процент к контролю практически совпал с более ранними данными и составлял 18,4%. При облучении сухих семян примерно на столько же снижался эффект воздействия на среднюю длину первичных корешков и листочков соответственно -20,8 и -25,1% соответственно.

Как известно, у растений существует система фитохромов, чувствительно реагирующая на продолжительность светового воздействия [8]. В ранее проводимых исследованиях [2] использовались семена длиннодневных и нейтральных по фотопериоду растений. В настоящих опытах решено было исследовать влияние СВЧ волн низкой интенсивности на короткодневные растения. В качестве таковых были взяты семена кукурузы. Варианты воздействия на семена кукурузы были следующими: все опытные семена облучались в течение 2-х суток в замоченном состоянии в течение 15 ч ночью (опыт 1) и в течение 8 ч днем (опыт 2). В целом воздействие оказало на прорастание семян кукурузы негативное воздействие. Особенно сильно реагировали на облучение семена ночью в течение 15 ч: их показатели эффективности по всхожести, средней длине корешка и листочков снижались наиболее заметно – на -13,3%, -10,2% и -15,2%. Зато другие показатели этих же семян положительно отреагировали на данный вид воздействия. Так, среднее число корешков у проростка увеличилось на 19,2%, а скорость, выражающая частоту прорастания семян по дням возросла на 14%.

В целом, обобщая все приводимые здесь исследования, можно сделать следующие выводы:

1. СВЧ излучение низкой интенсивности оказывает регулируемую роль на процессы развития живых организмов независимо от степени их сложности, что было отмечено при обнаружении данного феномена [5].

2. впервые отмечено существенное воздействие волн СВЧ диапазона нетеплового характера воздействия на показатели плодородия почвы: pH, питательные элементы – азот, фосфор, калий, органику.

3. получены новые результаты влияния СВЧ воздействия на поведенческие реакции личинок жуков, что не противоречит ранее полученным данным.

4. проведенные исследования подтвердили, что шестичасовое дневное воздействие при $f = 2450$ МГц и выходной мощности $P = 0,01$ мВт оказывает положительное влияние на всхожесть семян гороха того же сорта даже при их длительном хранении.

5. полученные предварительные данные по показателям прорастания семян кукурузы дают основание предположить, что влияние СВЧ излучения нетепловой интенсивности может оказывать негативное воздействие на растения, которые по типу фотопериода относят к растениям короткого дня.

Литература

1. Гаврилова А. А. Эколого-физиологические особенности действия озона и информационных СВЧ и КВЧ электромагнитных излучений на модельные биосистемы: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. / А. А. Гаврилова, НГСХА. – Нижний Новгород, 2012. – 25 с.
2. Гаврилова А. А. Применение СВЧ технологии сверхнизкой интенсивности в сельском хозяйстве. / А. А. Гаврилова, В. Г. Егорашин, А. В. Чурмасов, М. А. Кревский. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. – № 11. – <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/14/text.pdf>.
3. Лакин Г.Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин. – М.: Высшая школа., 1990. – 300 с.
4. Марчик Т. П. Почвоведение с основами растениеводства: учебное пособие / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 249 с.
5. Орлов Б. Н., Борисов Д. С. Закономерность информационного воздействия ЭМ излучения СВЧ природных интенсивностей на цирканнуальные ритмы живых организмов. Диплом № 230 на открытие, М., регистр. № 273, 7 октября 2003 г.
6. Программа по развитию АПК Нижегородской области // Агрорынок. – 2013. – апрель – с. 3. Режим доступа: <http://www.agrorinok.ru>
7. Титов И. Н. Вермикультура как возобновляемый источник животного белка из органических отходов. / И. Н. Титов, В. М. Усоев. // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 2 (18). – С. 74-80.

8. Тихомиров А.А. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы. Учеб. пособие. / А. А.Тихомиров, В. П. Шарупич, Т. М. Лисовский. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2000. – 213 с.

Контакты: Гаврилова Анна Александровна, e-mail: anna-gavrilova-65@mail.ru

TECHNOLOGY OF MICROWAVE RADIATION OF ULTRALOW INTENSITY IN AGRICULTURE

A. A. Gavrilova, V. G. Egorashin

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy

This paper considers a method of increasing the productivity of animals and plants by microwave radiation waves of non-thermal nature of the soil invertebrates (earthworms, larvae of the Colorado potato beetles), plant seeds (peas, corn) as governing their activity factor, is the closest to natural and giving a noticeable performance. First, data were obtained on effects of this type of radiation on the elemental composition of the soil and its fertility, which showed that the eight-hour treatment of soil and earthworms of microwave radiation of low intensity at a frequency of 2450 MHz and power output $P = 0,01$ mW significantly increased the content of nitrogen, phosphorus and organic matter. The obtained data on larvae of beetles and seeds of peas have confirmed previously obtained data, in particular, that the microwave radiation of this intensity has a significant influence on behavioral reactions of animals and the irradiation of pea seeds at a given frequency and intensity during the 6 hours increases the germination rate is 18.4% even after prolonged storage. Irradiation of corn seeds for 15 hours at night and for 8 hours a day has an inhibitory effect on many indicators. Especially bad reaction to the irradiation of corn seeds at night for 15 h: the indicators of germination, the average length of root and leaves decreased on average by almost 13%. But these same seeds was the observed increase in the average number rootlets one seedling at 19% and acceleration of growth processes by 14%. Summing up, the authors note that the microwave radiation of low intensity exerts a regulatory role on the processes of development of living organisms regardless of their complexity, which was noted upon detection of this phenomenon.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абашин А.Е. 35
Абдуллаева А.З. 497
Аветисов И.Х. 249
Авосопянц Г.В. 209
Алешкин В.Я. 161
Аношин О.С. 241, 270
Анурин А.А. 396
Артёмов А.Н. 279
Ашихмин А.В. 185, 377

Б

Бабич А.В. 22
Бадиев М.К. 11
Байдусь Н.В. 161
Балбеков А.О. 102
Бальшева О.Л. 171
Баранов А.В. 334
Баранова А.В. 318
Баталов Р.И. 140
Баязитов Р.М. 140
Белинский Л.В. 209
Белотелов Н.В. 312
Белоус А.И. 223
Беляев А.В. 298
Беляков В.А. 199
Березин В.В. 447
Беспалов Д.А. 396
Беспалов Н.Н. 43
Бессчетнов В.П. 325
Бессчетнова Н.Н. 325
Бобрешов А.М. 157
Богданов Ю.И. 209, 213, 425
Богданова Н.А. 213, 425
Боголюбов Б.Н. 361
Бойправ О.В. 189
Бойцова О.В. 22
Борботько Т.В. 189
Борисов В.И. 492
Бородин А. В. 286
Бритенков А.К. 322, 361, 436

В

Васбиева А.Ф. 331
Василевич В.П. 298
Васильев А.П. 199
Вдовина Н.В. 492
Великовский Л.Э. 253
Венедиктов О.В. 30
Вихорев Р.В. 110
Власова К.В. 275
Волков В.В. 30, 253
Волков П.В. 226
Волхонская Е.В. 275
Вопилкин Е.А. 59
Воронцов С.В. 113

Воротницкий Е.Д. 298
Втюрин А.Н. 167
Вьюгинов В.Н. 30

Г

Гавриленко А.Н. 14
Гаврилов С.В. 66
Гаврилова А.А. 325, 500, 505
Гаганов В.В. 119
Гайшун В.Е. 18
Галеев Р.Г. 167
Гарин Б.М. 30
Гарцев Н.А. 75
Гашенко И.А. 391
Гиацинтов А.М. 460
Гейфман Е.М. 75
Гильмутдинов А.Х. 394
Гильметдинов М.М. 181
Гильмутдинов А.Х. 181
Гимпилевич Ю.Б. 342
Глебовский В.Г. 249, 289
Глявин М.Ю. 268
Гольденберг А.Л. 268
Гордеев В.С. 113
Гордеева А.В. 35
Городкин Г.Р. 283
Горюнов А.В. 226
Горюнов Б.М. 468
Грабцевич Е.В. 495
Гречишкина Н.А. 471
Григорьев А.Д. 30
Григорьев Ф.Н. 471
Григорьева Г. И. 500
Грицкевич В.С. 298
Гришаев В.Я. 51
Гришнова Н.Д. 270
Грунин А.В. 113, 119
Гулякович Г.Н. 144
Гурина Т.И. 163
Гурский Л.И. 7, 245, 399, 403, 407, 411, 415
Гусев В.В. 119
Гурарий М.М. 451

Д

Давыдов М.В. 473, 488, 495
Деяткин А.А. 113
Денисов Е.Ю. 365
Денисов Б.Н. 458
Дерендяев Д.Н. 373
Добычин Н.А. 217
Донской Е.Н. 113
Доронин П.А. 329, 500
Достанко А.П. 298
Дроздов И.Ю. 119

Дроздов М.Н. 226
Дубина О.Н. 298
Дубинов А.А. 161
Дубков А.А. 396

Е

Евдокимов Ю.К. 389, 394
Евишев А.В. 43
Егорашин В.Г. 505
Ермолаев В.Т. 396
Ещик Т.Н. 237

Ж

Жаров М.М. 451
Жигулин Д.В. 230

З

Забавичев И.Ю. 70, 98
Заварин Е.Е. 253
Завьялов Н.В. 113
Зазулин Я.А. 458
Зайцева Е.Г. 495
Зайцева Т.В. 497
Залесский В.Б. 138, 149
Залялов А.Н. 113
Звонков Б.Н. 161
Здоровейцев А.В. 191
Земляков В.Е. 253
Зима В.Н. 218
Зинина Е.С. 500
Золотухин Е.В. 157
Зоткин И.И. 322

И

Иванов В.В. 205
Иванова Г.А. 66, 144
Ивлев Г.Д. 140
Игнатов К.А. 119
Икусов Д.Г. 226
Ильин М.В. 43
Ильинская Н.Д. 152
Индришенок В.И. 195
Исаев Д.В. 258
Исайкин А.В. 75
Исламов Г.Г. 446
Иськив В.М. 342

К

Казаков А.А. 167
Каланда Н.А. 245
Калентьева И.Л. 191
Калинина К.В. 163
Капитонов С.С. 43
Карандашев С.А. 152

Карзанов В.В. 217
Карпухина Н.Г. 152
Катамадзе К.Г. 209
Квартальный М.А. 473
Кетько А.В. 64
Кижаяев С.С. 163
Кирсанов А.В. 361
Кирюшин А.А. 396
Киселев Ф.К. 113, 119
Китаев А.Е. 294
Климов А.В. 456
Клушин А.М. 55
Ковалев А.Н. 350, 355
Ковалев Ф.Н. 350, 355
Козлов А.Г. 218
Козлов Н.Н. 458
Козырева О.А. 30
Козюхин С.А. 22
Кокурин О.Е. 497
Колос В.В. 18
Колосько А.Г. 26, 79
Колпаков Д.А. 161
Колпащиков В.Л. 283
Кондратьев В.В. 350, 355
Копкин А.Ю. 130
Коровкина М.М. 30
Королёв С.А. 232
Коротей Е.В. 275
Коротков Л.Ф. 396
Котков А.П. 241, 258, 270, 279
Кошелев А.Г. 157
Кравцева А.К. 440
Кревский М.А. 500
Креготень Н.А. 237
Кривцов А.П. 365
Кротова Е.И. 358
Кротова О.С. 113
Крылевский Е.Н. 119
Крылов Г.Г. 7
Крылова Г.В. 7
Кудрин А.В. 191
Кудрявцев Ю.Г. 119
Кузнецов Н.А. 471
Кузнецова Н.В. 322
Кузьменков А.Г. 199
Кузьмин Л.С. 35, 59
Кулагина М.М. 199
Кулаков А.Б. 59
Кулько Д.Ю. 425
Кунцевич А.Д. 261
Курбатова Е.Е. 477

Л

Ладенков И.В. 199
Лавров А.А. 152
Лазарев С.А. 113, 119
Лазаренко П.И. 22
Латыпова А.Ф. 185
Левичев М.Ю. 55

Лещева К.А. 261, 268
Лундин В.В. 253
Лукичев В.Ф. 209, 213, 425
Лукьянов А.Ю. 226
Лукьянчиков А.В. 342
Лыньков Л.М. 189, 473
Львович И.Я. 391

М

Максимов К.О. 177
Максимов Н.А. 202
Малеев Н.А. 199
Малеев С.Н. 199
Малышев В.С. 149
Мамросенко К.А. 460
Мануилов В.Н. 261, 268, 456
Мастеров Д.В. 59
Матвеев Б.А. 152
Магухин В.Л. 14
Машахабде С. 35
Медведев Г.В. 279
Медведева Е.В. 477
Мизеров М.Н. 253
Мироненко Л.П. 119
Миронова А.Н. 163
Михайлов Н.Н. 226
Михайлюк Ю.П. 342
Многогрешнов А.А. 167
Мозжевитина Е.Н. 249
Моклюков В.А. 394
Мокляков В.А. 181
Морозов Г.А. 497
Морозов О.Г. 497
Музюкин К.М. 113, 119
Муртазаев А.К. 11
Мухин А.С. 35

Н

Негробов В.В. 377
Некоркин С.М. 161
Никишин Е.В. 51
Новиков А.В. 226
Новиков М.А. 205

О

Оболенская Е.С. 90
Оболенский С.В. 70, 199

П

Павличенко И.А. 396
Павлов С.А. 59
Падеров В.П. 38
Панас А.И. 202
Панкратов А.Л. 35, 59
Панфиленко А.К. 64, 223, 230, 237
Панченко А.Н. 130, 33
Парафин А.Е. 59

Паршин В.В. 30
Пастернак Ю.Г. 185, 377
Пахотин В.А. 275
Певцов Е.Ф. 195
Перфилов В.А. 361
Пескова Е.Е. 51
Пестов Е.Е. 55
Петлицкая Т.В. 230, 237
Петлицкий А.Н. 223, 230, 237
Петричкович Я.Я. 119
Петров Е.П. 369
Петухов А.А. 163
Пикарь В.А. 133
Пилипенко В.А. 230
Пирогов Ю.А. 503
Плотникова А.Ю. 85
Погорельцев А.И. 14
Покровский И.А. 303
Понуровский Я.Я. 270
Попов Е.О. 26, 79
Посягин А.И. 331
Потапов А.А. 294, 346, 385
Потехин А.А. 70, 106
Починка О.В. 429
Преображенский А.П. 391
Прозорова Т.Г. 477
Пугачёв А.А. 144
Пузанов А.С. 70
Пузырьков Д.В. 144
Пухов С.П. 126

Р

Радаева Т.М. 492
Разманов В.М. 365
Ракитин В.В. 381
Ракуть И.В. 481
Рамазанов М.К. 11
Рассадин А.Э. 294
Ребров А.Н. 30
Ревин Л.С. 35, 59
Ревин М.В. 279
Резник А.Н. 232
Рембовский Ю.А. 377
Ременный М.А. 152
Реушев М.Ю. 167
Рехвиашвили С.Ш. 385
Рогачев А.В. 18
Родигин А.В. 126
Родченков В.И. 258
Романов Е.Д. 442
Романов П.А. 26, 79
Русаков С.Г. 381, 451
Рухлов В.С. 432
Рыков А.В. 161

С

Савочкин А.А. 342
Сагай Маруф Г. 473
Сазонова Е.В. 279
Салихов Х.М. 163

Сахаров А.В. 253
Свинков Н.В. 279
Северцев В.Н. 144
Семиков С.А. 420
Семченко А.В. 18
Сенников П.Г. 241
Серов Е.А. 30
Сидский В.В. 18
Силаев А.В. 119
Силкин Д.С. 38
Скрипаль Ал.В. 264
Скрипаль Ан.В. 264
Скоробогатов А.П. 94
Скосырев А.И. 241, 270
Смирнов С.А. 361
Смолянинов И.В. 365
Смолянов О.Г. 440
Соболев Н.А. 245
Соловьев Р.А. 432
Солодуха В.А. 64, 138, 149,
223, 230, 237
Солонин С.А. 75
Спирин В.Г. 173
Сташишина А.М. 488
Стахова Н.Е. 497
Стебунов С.С. 488
Стемпковский А.Л. 66
Степанов А.А. 205
Степанов Н.С. 436
Столер Д.В. 189
Стоянов Н.Д. 163
Стрельчук А.М. 46
Стусь Н.М. 152
Сухих П.Н. 369

Т

Танская Т.Н. 218
Тарасов А.В. 177
Тарасова Е.А. 83
Тарасова Е.Ю. 113
Тельпухов Д.В. 432
Тетеревков А.В. 130, 133
Тертышник А.Д. 226
Тимаков Н.П. 497
Тимошенко С.П. 22
Травин Н.К. 30
Тропанова А.Н. 59

Турцевич А.С. 18
Тюкальцев Р.В. 79
Тюрин Н.Г. 391

У

Ужаков И.Н. 226
Ульянов С.Л. 451
Умнов А.Л. 396
Урманов Д.М. 314
Усанов Д.А. 264
Усикова А.А. 152
Уставщиков С.С. 205
Устинов В.М. 253
Ушаков П.А. 177

Ф

Фарфель В.А. 361
Фастовец Д.В. 213
Федичкин И.Л. 26, 79
Федоров С.М. 377
Феклистов К.В. 41
Фефелова Е.Л. 199
Филипеня В.А. 230
Филиппов С.В. 26, 79
Флакман А.Г. 396
Фомин Л.Б. 485, 492

Х

Халуп С.Ю. 471
Хананова А.В. 83
Харина Н.Л. 369
Ходорович В.Г. 195
Хоршев С.К. 55
Храмов Л.Д. 389
Храмов Р.Н. 325
Худолей А.Л. 283
Хышов А.А. 205

Ц

Цацульников А.Ф. 253
Цыганков Б.В. 119
Цымбал В.С. 138, 149

Ч

Чепурнов А.С. 249, 289

Чернявский А.Ю. 213
Черняев А.В. 163
Чибирик В.В. 75
Чигинев А.В. 59
Чигиринский Ю.И. 22
Чигирь Г.Г. 223
Чижиков Д. А. 492
Чопоров О.Н. 391
Чуб А.В. 249
Чумаков А.В. 298

Ш

Шабалина С.В. 230
Шавгулидзе Е.Т. 440
Шапошников Д.Е. 338
Шведов С.В. 64, 138, 149,
223, 230, 237
Шевченко В.Н. 464
Шерченков А.А. 22
Ширяев Д.Б. 286
Шмидт Е.В. 14
Шовкун А.Д. 59
Шулешова И.Ю. 59

Щ

Щеглов В.Н. 113
Щекатурин А.А. 342
Щелоков А.Н. 144, 432
Щитов А.М. 447

Э

Элбакидзе А.В. 365
Эльяш С.Л. 126

Ю

Юдин М.В. 286
Южаков А.А. 331
Юрасов Д.В. 226
Юрьев А.Л. 126

Я

Ямпурин Н.П. 317
Ярмолич М.В. 245