

ПРЕДИСЛОВИЕ

*Внукам Александру и Аленушке,
которые будут жить
в век нанотехнологий
и наноэлектроники*

Возникшая в середине прошлого столетия полупроводниковая электроника стала самым крупным достижением второй половины XX века. К концу столетия полупроводниковая электроника в определенной степени трансформировалась в микроэлектронику. Основные изделия микроэлектроники — интегральные схемы, микропроцессоры, запоминающие устройства — стали основной информационной техники, бытовой электроники, медицины, автомобилестроения, авиации и т. д. Перечень отраслей не имеет конца, потому что логика развития любой отрасли занятий, любой отрасли техники в настоящее время немыслима без использования основных продуктов микроэлектронного производства — интегральных схем или микрочипов.

Следует отметить, что с возрастанием производительности микрочипов они становятся дешевле и потребляют меньше энергии по сравнению с чипами предшествующего поколения. Приведем несколько ярких примеров последних достижений микроэлектроники. Сегодня количество транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок, составляет 10^9 – 10^{20} штук. Плотность упаковки на чипе транзисторных структур такова, что на булавочной головке можно разместить 200 млн транзисторов ($\sim 10^8$ шт.), причем расстояние между двумя соседними транзисторами составляет 1/10000 толщины человеческого волоса. В корпорации «Intel» себестоимость производства транзисторов упала до такой степени, что цена транзистора стала сопоставимой с ценой печатания типографского знака в книге, например, запятой. Такие достижения — следствие развитой стратегии получения микроизделий «сверху–вниз».

Однако на пути продолжения тенденций роста степени интеграции встают барьеры: технологический, физический, энергетический... Так, фотолитографическая технология, лежащая в основе технологии производства интегральных схем, достигла своего физического совершенства. На подходе рентгеновская литография, лазерная литография. Лазерная литография позволяет получить разрешение элементов схемы лучше 10 нм, а процесс печати схемы занимает всего 250 наносекунд. На преодоление технологического барьера направлена, например, американская программа The National Tehnology Roadmap for Semiconductors. В соответствии с этой программой, к 2015 г. будут проектироваться транзисторы с шириной затвора 20 нм при технологической норме 30 нм. Площади кристаллов интегральных схем будут увеличены до 10 см². Это позволит разместить на кристалле более 10⁹ вентилялей. При этом рабочая частота составляет 30 Гц — 30 ГГц. Это в проекте.

Однако много вопросов не решено на пути преодоления физических барьеров. Среди них известная проблема «тирании межсоединений» в современных интегральных схемах, в которых большая часть площади кристалла занята межсоединениями. Масштабирование элементов транзисторных структур с целью перехода от микро- к нанометровым масштабам — весьма деликатный процесс. Создать транзисторные структуры в нанометровом масштабе сегодня уже под силу серьезным фирмам. Однако не решены вопросы их интеграции, вопросы создания групповой технологии производства интегральных схем в нанометровом масштабе, изготовление новых или традиционных элементов и компонентов интегральных схем.

В традиционных схемах микроэлектронной схемотехники устройства всегда имеют «вход» и «выход», которые пространственно разделены и локализованы в электрической схеме, а также в определенных контактах интегральной схемы. Все связи в интегральных схемах реализованы с помощью гальванических или емкостных связей. Реализация таких связей осуществляется благодаря изменению типов проводимости исходной подложки, созданием различных энергетических барьеров на пути потока носителей (электроны, дырки). Информация обрабатывается и хранится в виде отдельных битов (логические «0» и «1»), физически

реализованных в виде тока, напряжения, заряда в определенной точке интегральной схемы. Процесс сохранения состояния в логической цепи «0» или «1» обеспечивается в микроэлектронике, как правило, «переносом» через полупроводниковый переход транзистора ~100 тысяч электронов. Для передачи одного бита информации такой подход выглядит несколько расточительно. К тому же часть из этих сотен тысяч электронов создаст тепловой шум, другая часть, из-за туннельного эффекта, вообще «улетит» через подложку, отказавшись выполнять полезную работу, еще одна часть просто рассеется теплом в окружающее пространство. Все перечисленные недостатки, как и многие другие, являются неотъемлемой частью современных методов создания микроэлектронных устройств.

Магистральное направление развития микроэлектроники — уменьшение топологических норм транзисторных структур, другими словами, переход от микрометрового в нанометровый диапазон линейных размеров или создание низкоразмерных структур. В этом случае говорят о нанoeлектронике, и здесь рисуется совсем иная физическая картина. Уменьшение размеров на несколько порядков практически меняет физические основы работы наноэлементов. В наноэлементе используются уже не электроны как частицы, переносящие электрический заряд, а их волновые функции, наконец, спины.

Процессы дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных элементов, в нанoeлектронных элементах отсутствуют вовсе. В основе наноэлементов лежат полевые связи, сформированные потенциальные барьеры. «Вход» и «выход» элемента локализованы не в пространстве, а во времени. В нанoeлектронных структурах определить «вход» или «выход» возможно в определенные промежутки времени, когда существует определенный порог внешних воздействий, соответствующий «входу» или «выходу». Этот промежуток времени получил название рефлекторного периода, с его помощью обеспечивается распространение сигнала в определенном направлении. Переход от одного устойчивого состояния наноструктуры к другому происходит через возбужденные неустойчивые состояния.

Физика низкоразмерных структур сегодня представляется одним из актуальнейших и динамично развивающихся направле-

ний электроники. Именно в этой области ожидается исследование и приспособление фундаментальных физических явлений для практического применения: целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе, вигнеровская кристаллизация квазидвумерных электронов и дырок, высокочастотные блоховские осцилляции, перенос информации солитонами и флюксонами, самоорганизация систем на квантовых точках, а также многое другое из нового мира низкоразмерных структур.

Возникло новое направление конструирования приборов и устройств электроники, получившее название «зонная инженерия», или «инженерия волновых функций». Элементной базой этого направления электроники стали низкоразмерные структуры (нанoeлектронные элементы). Как правило, нанoeлектронный элемент состоит из набора квантовых ям и потенциальных барьеров. Энергетический спектр таких элементов зависит от размеров, а добавление лишь одного электрона существенно меняет энергетическую диаграмму нанoeлектронного элемента. В нанoeлектронике структурированные компоненты обладают свойством многофункциональности, способны выполнять сложные динамические функции.

В качестве материалов изделий микроэлектроники используются легированные полупроводники, в нанoeлектронике — гетероструктуры, наноструктурированные материалы, кластеры, органические материалы. Технология формирования наноструктур или инженерия волновых функций основана на процессах направленного роста, методах сканирующей туннельной микроскопии, атомной силовой микроскопии. Если плотность размещения активных элементов в интегральных схемах достигает 10^8 см^{-2} , то в устройствах нанoeлектроники она может достигать 10^9 – 10^{10} элементов на квадратный сантиметр.

Таким образом, под нанoeлектроникой будем понимать направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разрабатываются технологии (нанотехнология) создания приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации.

Исключительно малая инерционность электронов позволяет эффективно использовать взаимодействие электронов с микро-

полями внутри атома, молекулы или кристаллической решетки для создания приборов и устройств нового поколения, отличающихся высокой производительностью, ничтожным потреблением энергии, сверхминиатюрными размерами.

Нанoeлектроника — логическое развитие микроэлектроники в соответствии со стратегией «сверху–вниз». Стратегия «снизу–вверх» пока более характерна для мира живой природы. В этом процессе отдельные атомы или молекулы группируются по заданному закону в микроблоки с заданными функциями. Заметим, что для живой природы характерны следующие особенности:

- используются не отдельные природные элементы и материалы, а их композиты;
- сочетаются иерархические уровни организации и/или самоорганизации;
- используемые для синтеза материалы отличаются гибкостью и мягкостью;
- основные технологические процессы — самосборка, репликация, деление на основе явлений самоорганизации;
- формирование новой структуры осуществляется с использованием определенного шаблона или матрицы, например, записанной информации в ДНК.

Стратегия «снизу–вверх» позволяет сопряжение в нанодиапазоне биологических объектов с рукотворными элементами нанoeлектроники. Примером могут служить фуллерены и углеродные нанотрубки, используемые при создании композитных материалов. Вместе с тем в изделиях нанoeлектроники, созданных по такой стратегии и соответствующей технологии, неизбежно возникают принципиальные нерешенные вопросы. Прежде всего это — разработка процессов самоорганизации структур.

По мере приближения характерного размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляются квантовые свойства электронов. Если в микроэлектронных приборах поведение электрона определялось поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в нанoeлектронных приборах поведение электрона определяется его волновыми свойствами. Движение электронов как волны описывается уравнением Шредингера для нерелятивистских электронов и уравнением Дирака для реляти-

вистских. В нанoeлектронике обычно используются нерелятивистские электроны. Но вот открытие графена как перспективного материала нанoeлектроники, возможно, расширит набор используемых электронов.

В книге четыре главы, которые обзорно отражают основные пути и тенденции развития нанoeлектроники. В главе 1 описывается современное состояние микроэлектроники. Указываются физические и технологические барьеры на пути дальнейшего развития. Анализируются пути перехода от микро- к нанoeлектронным приборам и устройствам. Во второй главе рассмотрены некоторые развивающиеся нанотехнологии в нанoeлектронике. Залогом успешного развития нанoeлектроники являются разработка и использование новых технологических процессов. Приводится описание ряда таких процессов, часть из которых основана на явлениях самоорганизации и самосборки. Третья глава посвящена новым материалам, используемым в нанoeлектронике. Например, дан анализ перспектив использования нанouглеродных материалов — таких как нанотрубки, графен, графан. Рассмотрены особенности применения фотонных кристаллов, органических полупроводников, ДНК-наноструктур и других интересных материалов. В четвертой главе внимание уделено перспективным приборам различных направлений развития нанoeлектроники. К ним относятся транзисторные структуры в наномасштабном исполнении, приборы одноэлектроники, устройства на спиновых транзисторах, квантовые наноструктуры, приборы политроники, элементная база квантовых транзисторов и т.п. Особый интерес представляют мемристоры и идеология создания устройств на их основе.

Учебник написан в соответствии с ГОС-3 на основе лекций, прочитанных автором в Московском физико-техническом институте (государственный университет) и Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). Автор благодарит академика Ю. В. Гуляева за ценные замечания и советы, полученные в процессе работы над учебником. Глубокая признательность автора академику А.С. Бугаеву, члену-корреспонденту А. С. Сигову, профессорам П. А. Тодуа, В. А. Быкову, Л. Н. Патрикееву, коллективам кафедр университетов, в учебных планах которых значились курсы автора.

Глава 1

ОТ МИКРО- К НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

1.1. Микроэлектроника как мотор прогресса

Микроэлектроника сегодня — одна из главных компонент высоких технологий, мотор научно-технического прогресса. Действительно, мотор, или двигатель (от латинского *Motor* — приводящий в движение) представляет собой устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в движение вперед, на пути прогресса общества. А ведь прогресс (от латинского *Progressus* — движение вперед, успех) — направление развития от низшего к высшему, поступательное движение вперед. Различают некоторые аспекты прогресса как глобального, всемирно-исторического процесса восхождения человеческих обществ от примитивных состояний к вершинам цивилизованного состояния, основанного на высших научно-технических, политико-правовых, нравственно-этических достижениях.

Рассмотрим некоторые аспекты развития микроэлектроники как мотора научно-технического прогресса человечества в целом и нашей России в частности.

Социальный аспект. Кремниевая микроэлектроника сформировалась как отрасль промышленности в начале 70-х годов прошлого века. Гордон Мур — один из основателей всемирно известной компании «Intel», производителя микропроцессоров, — в 1970-х годах вывел два эмпирических закона. Первый (оптимистический) закон Мура гласит, что объем пространства, занимаемый транзисторной структурой в чипе, сокращается вдвое примерно каждый год (рис. 1.1). В 1980–1990-е годы проектные нормы и число элементов на кристалле стали удваиваться каждые два года. Ныне этот период достигает трех лет.

Второй закон Мура (пессимистический) предсказывает резкий рост стоимости постройки заводов по изготовлению чипов. В соответствии с этим законом, стоимость такого завода удваивается с каждым поколением чипов (или каждые три года). Этот закон

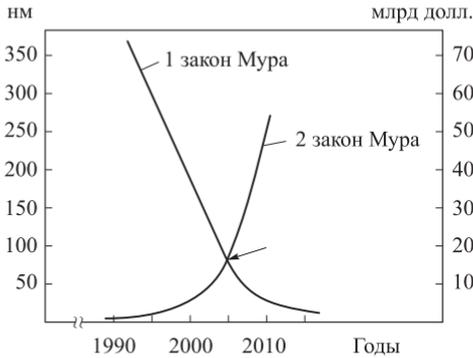


Рис. 1.1. Первый и второй законы Мура. Стрелкой показан переход на наноскопический уровень

задавал и сегодня задает некий фундаментальный вектор развития технологии. При этом производительность технологического оборудования и его стоимость постоянно возрастали.

Когда микроэлектронные фирмы перестали вписываться в «закон Мура», ведущие производители микросхем объединились и разработали единую десятилетнюю программу развития технологии в микроэлектронике под названием «Национальная технологическая программа по полупроводникам» (National Technology Roadmap for Semiconductors, NTRS). В США эта программа получила поддержку правительства, что позволило американской полупроводниковой промышленности достигнуть к 2000 году определенного превосходства над европейскими и японскими производителями. К этому времени стоимость завода по производству интегральных схем существенно превысила 1 млрд долларов.

Дальнейшее поддержание темпов развития технологии оказалось тяжелым бременем для экономики всех стран — даже передовых, в том числе и США. Новая программа развития стала международной, к ней подключились ведущие мировые полупроводниковые компании. Программа получила название «Международная технологическая программа по полупроводникам» (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS). Первая редакция программы разработана на 15 лет (2000–2014 гг.), каждые два года материал программы обновляется.

В итоге каждый год в мире производится более 10^{20} транзисторных структур, которые размещаются в интегральные схемы с плотностью упаковки ~ 10 млн транзисторных структур на од-

ном кристалле. Трудно найти другой пример производительности в технике. В ближайшее десятилетие ожидается выход на уровень порядка 10^9 – 10^{10} элементов на один кристалл при быстродействии 10^{-12} – 10^{-13} с. По производительности вычислений такие микроэлектронные вычислительные устройства уже могут составить реальную конкуренцию человеческим интеллектуальным возможностям. Вместе с тем дальнейшее уменьшение размеров вводит микроэлектронику в область физики — мезоскопику. Решением этой проблемы может быть достигнуто повсеместное торжество микроэлектроники и вычислительной техники. По оценкам специалистов в 2015 г. ежедневно будет выпускаться 10 млн транзисторов на каждого человека и все они будут востребованы. Это означает, что микроэлектроника будет определяющим фактором как экономического развития, так и информационной, и социальной сфер деятельности человека.

Экономический аспект. В передовых индустриальных странах развитие микроэлектроники является эффективной основой подъема промышленного производства. Микроэлектроника — ядро высоких технологий. Такое развитие микроэлектроники возможно только при целенаправленной государственной политике, иногда вопреки законам «рыночной экономики». Например, в 1979–1989 гг. США потратили свыше 5,5 млрд долларов государственных средств на прямое субсидирование развития технологий сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем с технологическими нормами 0,5 мкм. Результат не замедлил сказаться — промышленность обеспечила мощный рывок в разработке нового класса радиоэлектронной аппаратуры и информационных систем, модернизировала и создала новые классы высокоточного оружия.

В других же странах господствовала теория, что рынок все рассудит, урегулирует и обеспечит необходимое развитие. Время показало, что мера этого развития была неадекватной. Микроэлектронная промышленность досталась России от СССР, который до 1990 г. входил наряду с Японией и США в мировую тройку лидеров. В постсоветское время производственная база практически не развивалась ни правительством, ни предпринимателями — ждали когда все определит рынок. Время ушло, производственная база деградировала, подготовленные молодые специалисты не были востребованы... Наконец, уже в России приходит

понимание необходимости восстановления электронной промышленности и микроэлектроники в частности. Создаются производственные и внедренческие зоны — такие как, например, инноград в Сколково. Для этого находятся требуемые объемы инвестиций, определяются основные направления исследований.

В промышленности и экономике России существует потребность в электронной компонентной базе (ЭКБ). Основные потребители ЭКБ на российском рынке — отрасли промышленной и специальной электроники, автомобильной электроники, бытовой электроники, телекоммуникационных систем, компьютерной и офисной техники. Заметим, что ни в одном из этих направлений Россия не является лидером на мировом рынке или хотя бы доминирующим производителем на внутреннем рынке. В результате выявляется картина полной неупорядоченности рынка, наличия широчайшей номенклатуры при крайне низком уровне потребности в определенном виде ЭКБ.

Ведущие предприятия не способны обеспечить устойчивый выпуск наборов больших интегральных схем (БИС) кинескопов, плазменных панелей и других видов ЭКБ по причине отставания в микроэлектронной технологии. Разработанные теоретические и практические системы, например, для сотовых телефонов, не нашли масштабного производства. Отсутствие современных технологических линий вынуждает производителей завозить сложные комплектующие из Европы, Китая, Кореи, Тайваня, Турции. В России сегодня изготавливают резисторы, конденсаторы, дискретные транзисторы и еще что-то по мелочи.

Вместе с тем прогнозы предсказывают убыточность производства наноразмерных интегральных схем. Комплект оборудования только лишь одного производственного модуля стоит более 10 млрд долларов. Разработка и подготовка производства одной микросхемы с миллиардами элементов обходятся от десятков миллионов до миллиарда долларов. В то же время жизненный цикл для изделий электронной техники ограничен пятью годами. Проблема экономики в микроэлектронике субмикронного диапазона волнует менеджеров корпораций, высокопоставленных государственных чиновников. Видимо, на этом этапе развития электроники необходимо искать оптимальные пути развития высоких технологий, включая микро- и нанoeлектронику.

Военный аспект. Модернизация радиоэлектронных систем и систем управления высокоточным оружием, авиационной, космической и атомной техники осуществляется за счет применения современной ЭКБ новых поколений. Основная тенденция развития ЭКБ состоит в жесткой системной ориентации на объект модернизации, повышении функциональной сложности и системной привязке к новым видам техники. Использование зарубежной ЭКБ чревато опасностью несанкционированных «закладок», распознать которые в функционально сложных устройствах невозможно. А если и возможно, то затраты на тестирование зарубежной функционально сложной ЭКБ сопоставимы с затратами на производство отечественной ЭКБ. Такого рода «закладки» могут быть использованы для несанкционированных команд, передачи информации по командам извне, отказа спецсистем в «час X». Прекращение производства системно-ориентированной ЭКБ приведет в конечном итоге к прекращению разработок новых видов военной техники в России, к потере обороноспособности, к вытеснению страны с мирового рынка вооружений, к существенному ухудшению экономического и политического положения страны. Для сохранения статуса развитой державы России не достаточно связывать свое развитие только с сырьевой базой. Страна должна идти по пути технико-экономического развития, в том числе за счет развития высоких технологий и прежде всего микроэлектроники с постепенным переходом к наноструктурам.

Технологический аспект. В настоящее время установилась тенденция развития сложной ЭКБ — переход к системам на кристалле. Под системой на кристалле (System-on-a-Chip, SoC) будем понимать электронную схему, выполняющую функции целого устройства, например, компьютера, размещенного на одной интегральной схеме. Составные части микросистем получили название «IP-блоки» или «блоки интеллектуальной собственности» (Intellectual Property). В отечественной литературе составные части интегральной схемы называют сложно-функциональными блоками, или СФ-блоками. В случае, если разместить все необходимые цепи на одном кристалле не представляется возможным, применяется схема из нескольких кристаллов, размещенных в одном корпусе (System-in-a-Package, SiP). Система на кристалле позволяет увеличить процент годных устройств, упростить конструкцию корпуса.

Обеспечение национальной безопасности в области микроэлектронной ЭКБ связано с созданием пилотного производства на основе современного технологического оборудования. Такое производство должно соответствовать топологическим нормам 130–100 нм. Стоимость такой технологической линейки составит более 200 млн долларов, что на порядок дешевле стоимости серийного заводского оборудования. Несмотря на огромные затраты, наличие пилотного производства позволит решить практически все задачи разработки и обеспечения ЭКБ по спецпрограммам. Разработка в стране систем на кристалле для ЭКБ и их дальнейшая реализация с использованием мировой системы разделения труда, включая размещение заказов в мировых «кремниевых мастерских» с современным технологическим уровнем, позволят России догнать передовые электронные державы.

В 2000 г. промышленная микроэлектроника преодолела рубеж топологических норм 100 нанометров и трансформировалась в нанoeлектронику. В настоящее время ведущие мировые производители достигли пространственного разрешения 32 нм в критических элементах интегральных транзисторных структур (затворных структурах интегральных транзисторов). Таким образом, за последние 30 лет длина затвора МОП-транзистора уменьшилась в 200 раз. Если в начале 1970-х годов она составляла 10 мкм, то ныне эта величина лежит в пределах 50 нм. Нанoeлектроника уверенно приближается к созданию интегральных схем с топологическими нормами 22 нм и ниже. С уменьшением геометрических размеров транзисторов снижается площадь транзисторной структуры, уменьшаются паразитные емкости, улучшается быстродействие и снижается энергопотребление интегральной схемы.

Масштабирование (скейлинг) геометрических параметров интегральных схем можно отнести к развитию микроэлектроники именуемой стратегией «сверху–вниз» (top-down). На пути масштабирования нанотранзисторов в область менее 32 нм помимо технологических, экономических возникают ряд физических проблем. К ним прежде всего относятся уменьшение подвижности носителей за счет рассеяния на примесях, рост утечки зарядов за счет туннелирования через подзатворный диэлектрик, увеличение тока утечки p - n -переходов с уменьшением глубины их зале-

гания, пробой подзатворного диэлектрика, изменение механизма транспорта зарядов, максимально допустимые напряжения и токи в расчете на единицу объема проводящего вещества, теплоотвод и многое другое. Другими словами, различные классические и квантовые размерные эффекты, которые начинают проявляться при размерах 100 нм и меньше, ограничивают возможность миниатюризации p – n -перехода.

Существует и стратегия развития субмикронной электроники «снизу–вверх» (bottom-up). В рамках такого развития нанoeлектронных структур их синтез осуществляется на атомном или молекулярном уровнях. Для этого разрабатываются принципиально новые технологии, не связанные с технологиями создания многочисленных p – n -переходов.

1.2. Нанoeлектроника — путь «обогнать не догоняя»

Развитие микроэлектроники непосредственно связано с развитием нанoeлектроники. *Нанoeлектроника* представляет собой область электроники, в которой изучаются носители информационного сигнала в веществе под действием различных полей, а также разрабатываются физические и технологические основы создания приборов для обработки и хранения информации с характерными топологическими размерами элементов менее 100 нм.

Нанoeлектроника является новой областью науки и техники, формирующейся на основе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии и технологии полупроводниковой электроники. Исследования в области нанoeлектроники важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации.

Особенность нанoeлектронных приборов и устройств — проявление, наряду с классическими явлениями, квантовых эффектов, которые во многом являются паразитными в работе обычного транзистора. Однако же именно на основе этих эффектов в нанoeлектронике создаются новые приборы и устройства. Рассмотрим некоторые аспекты развития микроэлектроники и зарождения нанoeлектроники.

В приборах и устройствах нанoeлектроники используются предельные возможности электрических, магнитных, механических и биологических систем. В настоящее время нанoeлектронные приборы и устройства в основном ассоциируются с информационными технологиями. Однако со временем наноустройства будут играть важную роль в процессах преобразования энергии, организации защиты окружающей среды, в медицинском обслуживании людей.

Технологии преобразования вещества по стратегии «сверху-вниз», а также открытия в области синтеза и самосборки наноразмерных структур привели к ряду ярких открытий. Именно они изменили представления о возможности наноструктур, не связанных с p - n -переходами. Среди таких открытий:

- создание углеродных нанотрубок, а затем графеновых монокристаллов;
- применение зондов сканирующих туннельных микроскопов и атомно-силовых микроскопов для поатомной сборки отдельных нанoeлектронных устройств;
- использование спинов в качестве носителей информационных сигналов;
- создание транзисторов на гетеропереходах, резонансных туннельных диодов и оптоэлектронных устройств с квантовыми ямами;
- обнаружение квантового эффекта кулоновской блокады и создание одноэлектронных элементов, работающих при комнатной температуре;
- разработка химических методов синтеза нанокристаллов и методов их объединения в более крупные и упорядоченные структуры;
- использование в производстве наноустройств биомолекул и надмолекулярных структур;
- сборка отдельных молекулярных элементов в функциональное устройство типа интегральной схемы путем соединения микро- и макроуровней организации молекулярных электронных устройств;
- выделение биохимических «молекулярных двигателей» и их включение в небиологическую среду.

Переход к нанoeлектронным приборам и устройствам подразумевает смену парадигм электроники в целом. Под *парадигмой* будем понимать совокупность фундаментальных научных установок, представлений и терминов, принимаемую и разделяемую научным сообществом в рамках устоявшейся научной традиции в определенный период времени. В качестве первых примеров смены парадигм в архитектуре вычислительных систем можно привести идеи квантовых вычислительных устройств, клеточных автоматов на квантовых точках, молекулярной электроники, вычислений с использованием цепей ДНК и другие примеры использования наноструктур. Эффективное внедрение новых типов архитектуры вычислительных систем потребует разработки новых типов наноустройств. Изменением данной парадигмы развития можно считать появление квантованных магнитных дисков, однофотонных систем, наномеханических систем, широкого класса структур и устройств, объединяющих биологические и небиологические объекты.

1.3. Нанoeлектронные приборы и устройства

Нанoeлектронные приборы и устройства создаются с помощью методов нанотехнологии. *Нанотехнологию* можно определить как совокупность технологий, процессов и методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами с целью получения новых материалов, приборов и устройств. Нанотехнология может использоваться в электронике, материаловедении, химии, механике, биомедицине и других областях науки и техники. Напомним, что в атомной и квантовой физике характерной единицей длины принято считать величину 1 \AA или 10^{-10} м. Такой выбор обусловлен тем, что ангстрем соответствует диаметру самого маленького из атомов — атома водорода. Диаметры других атомов могут лишь немного превышать 2 \AA . Нанометр в 10 раз больше.

Область нанодиапазона — от 1 нм до 100 нм. В живой природе, состоящей так же, как и неживая материя, из атомов, молекулы протеина и липидов имеют размеры до 10 нм. Масштаб рибосом и вирусов лежит в пределах 100 нм. Отметим, что один из продуктов нанотехнологии — нанотрубки, а также элементы

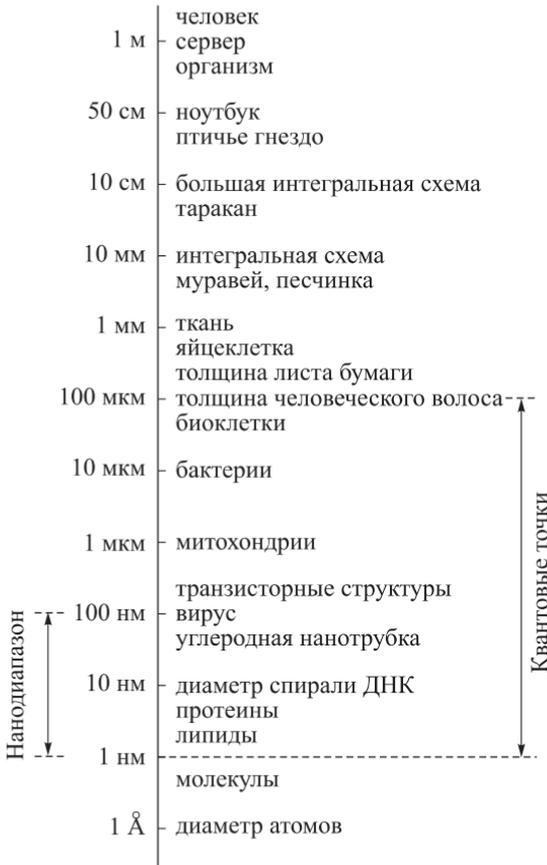


Рис. 1.2. Характерные масштабы живой и неживой природы

сверхбольших интегрированных схем тоже имеют размеры ~ 100 нм. Именно это обстоятельство вселяет надежду на успешное совмещение технологий живых и неживых систем, создание микроминиатюрных устройств, лекарств (рис. 1.2). Следует отметить, что с возрастанием производительности микрочипов они становятся дешевле и потребляют меньше энергии по сравнению с чипами предшествующего поколения. Приведем несколько ярких примеров сегодняшнего уровня достижений микроэлектроники.

Стратегической задачей микроэлектроники является создание микропроцессорной системы на кристалле. На одной кремниевой

подложке должны быть размещены миллионы узлов базисной логики, процессорное ядро с набором разнообразных периферийных модулей. В этом случае типовая системная плата содержит микропроцессор или микроконтроллер и логику. Логика может быть представлена в виде заказных специализированных микросхем массового применения для решения узкого класса задач. На кристалле кроме процессорного ядра и специализированной логики обычно размещают программируемую логику. Одновременно проектируются блоки статической памяти, устройства периферии и интерфейса, модули управления питанием. Заказ такой системы на одном кристалле является весьма затратным поскольку на этапе проектирования необходимо подобрать эффективную библиотеку элементов микропроцессоров, различных типов памяти, решить проблемы интеллектуальной собственности, выбрать надежных производителей фотошаблонов, экспертизу и испытание новой интегральной схемы... Ясно, что система на кристалле пока недоступна для подавляющего большинства заказчиков.

В поиске менее затратных путей производства систем на кристалле разработаны системы на программируемом кристалле (System-on-Programmable-Chip — SoPC). На таких кристаллах размещают компоненты в традиционном понимании: процессорные ядра, память, IP-блоки. Развивается целый спектр методов реализации систем на кристалле, происходит взаимопроникновение, комбинирование подходов с целью поиска вариантов, наиболее эффективных с технической и экономической точки зрения. Объемы производства, при которых их применение может быть экономически целесообразно, оцениваются от одной тысячи до ста тысяч микросхем в год.

Параллельно с появлением концепции системы на кристалле возникли идеи создания систем на основе наборов готовых базовых блоков. При этом интерфейсы компонентов платформы (процессоров, блоков памяти и управления, шинных интерфейсов и др.) в рамках достаточно широкого класса задач должны быть унифицированы. Процесс конструирования происходит на системном уровне, уровне функционального описания, а уже для всей системы осуществляется глобальная оптимизация с использованием готовых аппаратных решений, заложенные в IP-блоках.

Индустрия IP-блоков сегодня развивается: сформировалась солидная библиотека специализированных IP-блоков для различных прикладных областей и технологий изготовления микросхем. Процессоры, как и другие IP-блоки библиотек, верифицированы и могут использоваться в виде готовых макросов.

Другим возможным путем развития микроэлектроники является 3D-интеграция. В структуре чипа интегральных схем помимо большого числа транзисторов имеется массив дискретных пассивных компонентов, также реализованных на транзисторных структурах. На микроэлектронных платах кроме собственно интегральных схем монтируются навесная электронная компонентная база, которая состоит из резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, антенн, фильтров и переключателей других дискретных компонентов. Такова структура печатной платы в одностороннем или двухстороннем исполнении. Современные технологии микрокорпусирования и микросборки позволяют эффективно сократить площадь (объем, массу) электронного узла не за счет повышения степени интеграции ИС, а за счет работы с коммутационной составляющей системы и пассивными компонентами: платой, расположением и свойствами элементов.

Широкий спектр современных изделий, использующих технологии 3D-микрокорпусирования и микросборки, или «систем в корпусе» можно упрощенно классифицировать по трем основным группам:

- многокристальные модули с кристаллами, расположенными один на другом (stacked dies) и организацией межсоединений проволочными выводами;
- многоэтажные корпуса (system on package — SoP) с организацией межсоединений с помощью шариковых выводов или так называемых бампов;
- многокристальные модули, использующие технологии создания для организации межсоединений переходных отверстий в материале самих полупроводниковых кристаллов (through siliconvias — TSV).

Технологии для производства микросборок первой группы («этажерки» кристаллов) уже несколько лет серийно используются в промышленности. Направление развития технологии идет

в сторону увеличения количества слоев и уменьшения толщины кристаллов. Использование многослойных печатных плат в изделиях высокой надежности тоже имеет свои минусы, неприемлемые для многих конкретных приложений из-за проблем, связанных с теплопроводностью, разными коэффициентами термического расширения и низких частотных свойств. С технической точки зрения наиболее простым путем быстрой и эффективной модернизации производства микросборок высокой надежности представляется внедрение технологии многослойной низкотемпературной керамики в сочетании с технологией монтажа «этажерок кристаллов». Такой прием (многослойная керамическая подложка или герметичный корпус со встроенными пассивными компонентами плюс многослойный монтаж кристаллов с разваркой проволокой) позволит улучшить массогабаритные характеристики.

Вторая группа 3D-интегрированных структур типа «корпус на корпусе» требует для своей реализации сочетания технологий первой группы и технологий создания шариковых выводов и «бампов» или, другими словами, контактных микровыступов.

Изделия третьей группы, интегрированные на уровне полупроводниковых пластин и кристаллов с переходными отверстиями (TSV-технология) наиболее перспективны. Принято считать, что 3D-интеграции станет очередной четвертой технологической революцией в электронике.

По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области (а это образования из единиц и десятков атомов) все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой — открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных систем. Это и есть основные объекты исследований и разработок новой области электроники — нанoeлектроники.

Разработанные в последние годы нанoeлектронные элементы по своей миниатюрности, быстродействию и потребляемой мощ-

ности составляют серьезную конкуренцию традиционным полупроводниковым транзисторам и интегральным микросхемам на их основе как главным элементам информационных систем. Уже сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит информации (0 и 1) с помощью одного электрона, локализация которого в пространстве может быть задана одним атомом. Ожидает практического разрешения и идея аналогичных однофотонных элементов.

Широкое применение одноэлектронных и однофотонных элементов для создания информационных систем пока сдерживается недостаточной их изученностью, а главное, отсутствием удобных для массового производства технологий, позволяющих конструировать требуемые структуры из отдельных атомов. Такие возможности существуют только в исследовательских лабораториях. Однако современные темпы развития электроники позволяют уверенно прогнозировать промышленное освоение нанотехнологии, а вместе с ней и нанoeлектроники уже в начале XXI века.

Итак, в основе приборов нанoeлектроники лежат волновые свойства электрона и связанные с этим другие физические явления и эффекты. Движение электрона и связанной с ним волны де Бройля в наноразмерных твердотельных структурах определяется эффектами, сопряженными с квантовым ограничением, интерференцией и возможностью туннелирования через потенциальные барьеры. И эти эффекты будут вносить тем больший вклад в электрические процессы в элементе, чем меньше его размер. Когда же размер элемента сравнится с длиной волны электрона, эти эффекты станут преобладающими.

На рис. 1.3 приведена уникальная фотография, экспериментально подтверждающая наличие дебройлевской волны. С помощью туннельного микроскопа удалось рассадить 48 атомов железа на поверхности меди. Сформирован «квантовый загон» радиусом 7,1 нм. Волны внутри загона представляют собой стоячие волны зарядовой плотности, соответствующие решению уравнения Шредингера. Возникновение или отсутствие изображения зависит от положения вновь имплантированного атома. Если дебройлевские волны складываются в фазе в процессе конструктивной интерференции, то изображение появляется. При деструктивной интерференции оно исчезает. Эта картинка — одно из дока-

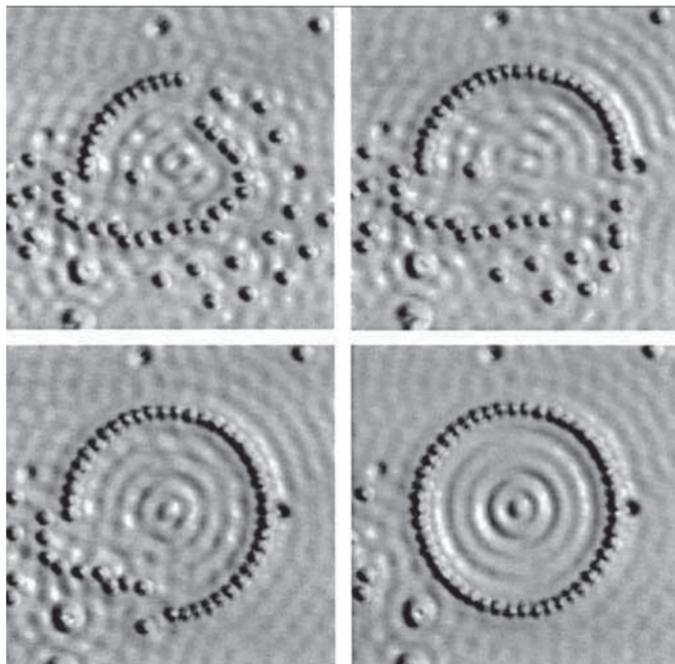


Рис. 1.3. Процесс формирования «квантового загона» из атомов железа, адсорбированных на поверхности меди (*Crommie V. F., Lutz C. P., Eigler D. M. Nature, 1993, vol. 363, p. 524*)

зательств волновой природы отдельного атома или электронов и внешних его орбит.

Решение проблем перехода от микро- к нанoeлектронике вовсе не отрицает дальнейшего пути развития микроэлектроники. Успехи микроэлектроники далеко не исчерпаны. Однако становление нанoeлектроники сулит новые научные достижения и разработки в области технологии во многих отраслях науки и техники. Развитие научных исследований наноструктур и нанотехнологий позволит получить материалы и приборы с новыми уникальными свойствами и, следовательно, решить ряд актуальных задач как в области электроники, так и во всех остальных отраслях науки и промышленности. В наном мире будут работать и «старые» идеи схемотехнической электроники, в основе которых лежит использование усовершенствованного транзистора. Вместе

с тем, наномир способствует рождению свежих идей, связанных с волновыми свойствами электрона, с солитонами, как носителями информационного сигнала, с новыми материалами, с новой технологией. Поэтому и появляются новые приборы и устройства нанoeлектроники, реализованные либо на совершенно новых принципах, либо на хорошо забытых методах обработки информации.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Что такое нанoeлектроника?
2. Какое место нанотехнологии занимают в электронике?
3. В чем заключается стратегия получения наноструктур «сверху-вниз»?
4. Какие перспективы стратегии получения наноструктур «снизу-вверх»?
5. Расскажите о законах Мура.
6. Приведите примеры современных достижений микроэлектроники.

Литература к главе 1

1. *Шука А. А.* Нанoeлектроника. — М.: Физматкнига, 2007.
2. *Орликовский А. А.* Проблемы развития кремниевой транзисторной нанoeлектроники // Интеграл. № 7 (27), 2006.
3. *Авдонин Б. Н., Мартынов В. В.* Электроника. Вчера... Сегодня. Завтра? — М.: ИКП «Дека», 2005.
4. Нанотехнологии в электронике / Под ред. *Ю. А. Чаплыгина.* — М.: Техносфера, 2005.
5. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. редактор *А. Л. Асеев.* — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
6. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Сб. статей под ред. *П. П. Мальцева.* — М.: Техносфера, 2005.
7. *Веттингер П., Бинниг Г.* Проект нанопривод // В мире науки № 5, 2003.
8. <http://perst.isssph.kiae.ru>.

Глава 2

МЕТОДЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ

2.1. Гетерогенные процессы формирования наноструктур

Под *гетерогенными процессами* будем понимать технологические процессы, происходящие на поверхности раздела фаз и формирующие гетерогенные системы. *Гетерогенная система* представляет собой термодинамическую систему, состоящую из различных по физическим и химическим свойствам частей или фаз, которые отделены друг от друга поверхностями раздела. Каждая из фаз при этом гомогенна и ее поведение подчиняется законам термодинамики.

2.1.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) или молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) — технологический процесс эпитаксиального выращивания слоев, кристаллическая решетка которых повторяет решетку подложки. С помощью МЛЭ выращивают гетероструктуры заданной толщины с моноатомногладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. *Эпитаксия* — один из важнейших технологических процессов при создании микро- и наноструктур. Если подложка и выращенный слой состоят из одного вещества, то такой процесс называется *автоэпитаксией* или *гомозэпитаксией*. Особенность гомозэпитаксии проявляется в том, что кристаллические решетки подложки и растущего слоя практически не различаются между собой (имеется лишь небольшое различие периодов решетки, обусловленное различными концентрациями легирующего элемента). Это дает возможность получать эпитаксиальные слои с очень низкой плотностью дислокаций и других структурных дефектов. *Гетерозэпитаксиальный процесс* происходит при выращивании слоев из

различных веществ. В процессе *хемозпитаксии* происходит образование новой фазы при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом формируемого слоя.

Молекулярно-лучевая эпитаксия — один из современных и перспективных технологических методов выращивания тонких монокристаллических слоев и полупроводниковых структур на их основе. Молекулярно-лучевая эпитаксия основана на процессе взаимодействия нескольких молекулярных пучков с нагретой монокристаллической решеткой и последующего осаждения на ней элементарных компонентов.

Формирование эпитаксиальных слоев происходит в процессе управляемого испарения вещества из одного или из нескольких источников, создающих молекулярные пучки, в условиях сверхвысокого вакуума. Рост эпитаксиальных слоев происходит на нагретой монокристаллической подложке при реакции между несколькими молекулярными пучками различной интенсивности и состава. При этом обеспечивается и легко воспроизводится предельно высокое качество слоев с заданным химическим составом, в том числе, исключительное совершенство структуры и однородность толщины эпитаксиального слоя. Метод МЛЭ обладает очень широкими возможностями. Он позволяет использовать при выращивании различные способы маскирования, получать эпитаксиальные слои элементарных полупроводников, полупроводниковых соединений, металлов и диэлектриков, гетероструктуры с высоким качеством границ между слоями. При этом могут выращиваться гетеропереходы с сопряженными решетками и с постепенно изменяющимся периодом кристаллической решетки.

Методом МЛЭ удается осуществлять гетероэпитаксию разнородных материалов с получением, например, соединений A^3B^5 на кремниевых или диэлектрических подложках, что чрезвычайно важно для интеграции в одном кристалле оптоэлектронных и интегрально-оптических систем на арсениде галлия с вычислительными модулями или другими системами обработки информации на кремнии. Кроме того, метод позволяет размещать в оборудовании для МЛЭ приборы, дающие возможность анализировать параметры слоев непосредственно в процессе выращивания. Использование чистых источников напыляемых материалов, сверхвысокий вакуум, различные методы диагностики растущего слоя

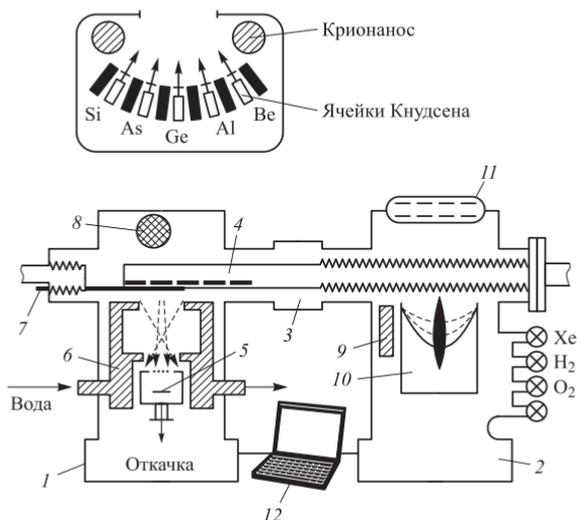


Рис. 2.1. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии: 1 — камера роста, 2 — камера анализа, 3 — вакуумный клапан, 4 — держатель подложки, 5 — испаритель, 6 — охлаждаемые экраны, 7 — заслонка, 8 — квадрупольный масс-спектрометр, 9 — ионная пушка, 10 — дифрактометр медленных электронов и оже-спектрометр, 11 — окно, 12 — компьютер

в сочетании с компьютерной системой управления параметрами процесса — все это привело к созданию качественно новой технологии.

Установка молекулярно-лучевой эпитаксии состоит из камеры роста и камеры анализа (рис. 2.1). В обеих камерах создается безмасляный сверхвысокий вакуум ($>10^{-8}$ Па). В камере роста происходит формирование эпитаксиальных пленок. Испарительные ячейки представляют собой эффузионные ячейки Кнудсена, которые осуществляют медленное истечение испаряемых молекул через малое отверстие 5. Из таких ячеек особенно хорошо испарять материалы, возгоняющиеся из твердой фазы и имеющие плохую теплопроводность, вследствие чего при испарении их из открытых источников могут происходить откалывание мельчайших частиц материала и выбрасывание этих частиц в сторону подложки. Основное достоинство эффузионных ячеек Кнуд-

сена — постоянство скорости истечения из нее пара испаряемого вещества во время процесса напыления.

С целью уменьшения теплового взаимодействия и предотвращения загрязнения источников испарительные ячейки разделяют экранами, охлаждаемыми жидким азотом. В каждой испарительной ячейке содержится один из элементов, из которых выращивается слой. Температура этих ячеек выбирается так, чтобы обеспечить выход из нее молекулярного пучка необходимой интенсивности. Для некоторых материалов с низким давлением паров температуры, необходимые для обеспечения адекватной интенсивности пучка, столь высоки, что приходится использовать не испарение из ячеек с резистивным нагревом, а непосредственное испарение электронным пучком. Выбирая соответствующие температуры испарителей и подложки, можно получить эпитаксиальные слои требуемой стехиометрии состава. Интенсивность молекулярного пучка у подложки может резко возрасти или падать благодаря использованию индивидуальных заслонок, помещенных между каждой из испарительных ячеек и подложкой, которые позволяют очень быстро перекрывать пучки. Это дает возможность изменять состав или уровень легирования выращиваемых структур буквально на межатомном расстоянии.

Решающим для качества будущего слоя является качество приготовления подложки. Прежде всего необходимо иметь неповрежденную атомарно чистую поверхность. Обычная процедура приготовления подложки включает ее химическую обработку раствором Br_2 с метанолом, а также смесями серной кислоты, пероксида водорода и воды в разном соотношении (обычно 7 : 1 : 1). Для удаления оксида и следов углерода подложку разогревают в потоке мышьяка. Для удаления углерода используют также высокотемпературную ионную очистку. Смену подложек производят без разгерметизации камеры роста, используя для этой цели вакуумные шлюзы, так как достижение сверхвысокого вакуума — очень длительный процесс. Наличие вакуумных шлюзов позволяет работать в течение многих недель без разгерметизации сверхвысоковакуумной камеры.

Изготовление эпитаксиальных структур с атомными размерами толщины слоев требует выращивания атомно-гладких поверхностей при температурах подложки настолько низких, чтобы в процессе роста практически не происходило объемной диффу-

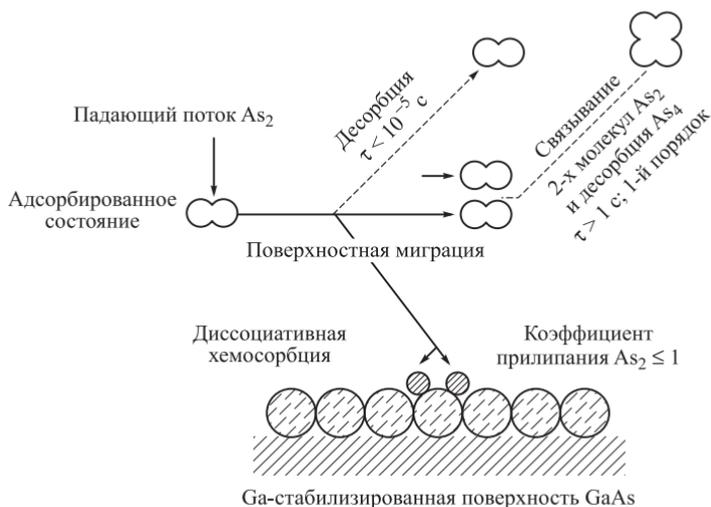


Рис. 2.2. Модель роста структур GaAs из молекулярных пучков Ga и As

зии. Оптимальная температура при осуществлении МЛЭ обычно на 100–200 К ниже температуры, используемой при проведении эпитаксии из жидкой или газовой фазы. Для GaAs она составляет ~500–650 °С. Такой температуре соответствует низкая скорость роста слоя (~0,1 нм/с), что эквивалентно выращиванию одного моноатомного слоя в секунду. Это обстоятельство приводит к необходимости поддержания особо высокого вакуума для обеспечения минимального неконтролируемого введения примесей в растущий слой.

При выращивании слоев GaAs методом МЛЭ атомы галлия и молекулы As_2 и As_4 падают на подложку GaAs. К поверхности подложки «прилипают» практически все атомы галлия. Поток атомов мышьяка делается избыточным, но только один атом As на каждый атом Ga остается на подложке, формируя стехиометрический состав выращиваемого слоя (рис. 2.2). Основной является реакция диссоциативной хемосорбции молекул As_2 на поверхностных атомах галлия. Коэффициент прилипания молекулы As_2 близок к единице, в то время как для молекул As_4 он не достигает 0,5. Атомы As, не образовавшие связи с Ga, испаряются с поверхности. Интенсивность молекулярных пучков и, следова-

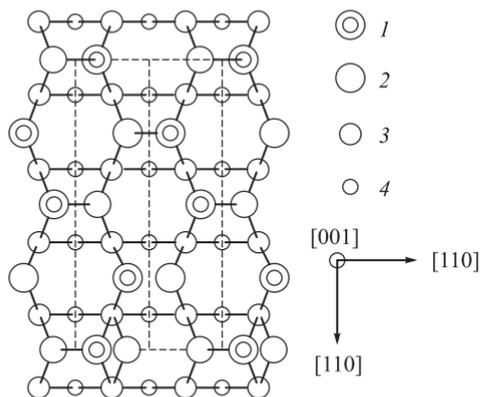


Рис. 2.3. Модель элементарной ячейки GaAs (001): 1 — верхний слой, атом As сдвинут вверх; 2 — верхний слой, атом As сдвинут вниз; 3 — верхний слой, атом Ga; 4 — второй слой, атом As

тельно, скорость осаждения можно варьировать, изменяя температуру галлиевого источника. Обычно плотность потока галлия близка к 10^{15} атом/(см² · с), а для мышьяка она в 5–10 раз выше. Источником молекул мышьяка является, как правило, твердый мышьяк, источником галлия — твердый галлий. Следует помнить, что скорость роста слоев соединений A^3B^5 определяется плотностью потока атомов элемента A^3 , а стехиометрия слоя достигается поддержанием избыточного (по сравнению с A^3) потока молекул B^5 . Это относится к тем соединениям A^3B^5 , компоненты которых обладают существенными различиями упругости паров при температурах эпитаксии (GaAs, GaP, InAs, InP).

На рис. 2.3 приведена модель элементарной ячейки поверхности (001) GaAs (2×4) с учетом образования асимметричных димеров. Для выращивания соединений AlGaAs требуется дополнительный источник Al; при этом соотношение Al и Ga в растущем слое будет пропорционально соотношению плотностей потока в их пучках. Помимо температуры в испарительной ячейке плотность потока зависит от молекулярной массы испускаемых атомов или молекул, от суммарной площади отверстий эффузионной ячейки и расстояния до подложки. Свежеприготовленная для эпитаксии подложка соединений A^3B^5 покрыта пассивирующим слоем, который служит защитой от атмосферных загрязнений перед эпитаксиальным ростом. После того как система МЛЭ откачана, экраны охлаждены жидким азотом и эффузионные ячейки выведены на требуемую температуру, начинается нагрев подложки. В случае нагрева подложки из GaAs пассивирующий слой

десорбируется в интервале температур 580–600 °С, а в случае InP — приблизительно при 520 °С, после чего подложка становится почти атомарно чистой и пригодной для эпитаксиального наращивания. Если подложка должным образом подготовлена и атомарно чиста, то эпитаксиальный слой будет атомарно-гладким при условии, что отношение чисел атомов пятой и третьей групп Периодической таблицы элементов в молекулярном пучке превосходит некоторое значение, обеспечивая As-стабилизированную структуру поверхности. Это значение также является функцией температуры подложки.

В промышленных системах МЛЭ при температуре подложки 620 °С скорость роста слоя GaAs может достигать 10 мкм/ч. Поскольку процесс МЛЭ происходит в сверхвысоком вакууме, его можно контролировать с помощью различных диагностических методов, поместив в систему соответствующую аппаратуру, в частности, масс-спектрометр для анализа как атомных, так и молекулярных пучков и фоновой атмосферы; дифрактометр медленных электронов; электронный оже-спектрометр с целью контроля состава слоя, резкости границ и взаимной диффузии; ионный вакуумметр, контролирующий нейтральные атомные пучки; квадрупольный масс-анализатор для контроля интенсивности пучков и ионную пушку для очистки поверхности подложки. Для исследования слоев, выращенных методом МЛЭ, используются и многие другие методы. Возможность контроля непосредственно в процессе выращивания — одно из значительных преимуществ МЛЭ. Богатые возможности контроля и анализа дают МЛЭ существенные преимущества перед другими технологическими методами. Весь процесс контролируется и управляется встроенным компьютером. С его помощью процесс эпитаксиального выращивания пленок контролируется электронным дифрактометром, лазерным эллипсометром, рентгеновским спектрометром, приборами для контроля толщины пленок, контроля химического состава, структуры. Через функцию обратной связи корректируются параметры технологического процесса.

Молекулярно-лучевая эпитаксия обеспечивает:

- 1) получение монокристаллических слоев высокой чистоты, так как их рост осуществляется в сверхвысоком вакууме при высокой чистоте потоков веществ;

- 2) выращивание многослойных структур с резкими изменениями состава на границах слоев благодаря относительно низкой температуре роста, препятствующей взаимной диффузии;
- 3) получение гладких бездефектных поверхностей при гетероэпитаксии, что обусловлено ступенчатым механизмом роста;
- 4) получение сверхтонких слоев с контролируемой толщиной за счет точности управления потоками и относительно малых скоростей роста;
- 5) создание структур со сложными профилями состава и (или) легирования.

Метод МЛЭ перспективен с точки зрения получения улучшенных характеристик, чрезвычайно высокой точности, однородности и высокого совершенства поверхности, он позволяет существенно повысить по сравнению с другими методами выход годных (прошедших контроль качества) гетероструктур. В настоящее время МЛЭ представляет собой полностью отработанную технологию с большими потенциальными возможностями. Благодаря такому достоинству, как сглаживание поверхности эпитаксиального слоя в процессе роста, метод МЛЭ особенно удобно использовать для выращивания гетеропереходов, сверхрешеток и многослойных структур. Доминирующей областью использования данного метода является получение структур низкой размерности и нанокomпозиций неорганической природы на основе соединений A^3B^5 , A^2B^6 , A^4B^4 .

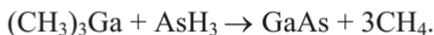
2.1.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

Газофазная эпитаксия — технологический процесс получения эпитаксиальных пленок путем осаждения из паро-газовой фазы. Процесс происходит на поверхности подложек, например, полупроводниковых пластин, нагретых до 750–1200 °С. Для выращивания эпитаксиальных слоев соединений A^3B^5 , в том числе арсенида галлия из газовой фазы, существуют три наиболее широко распространенных метода. Первый — хлоридный метод — связан с применением галогенных соединений, во втором — хлоридно-

гидридном методе — используют арсин (AsH_3) и хлористый водород (HCl), третий основан на использовании металло-органических соединений (МОС). Третий метод по сути — новая разновидность эпитаксии из газовой фазы (ГФЭ МОС).

С помощью хлоридного и хлоридно-гидридного методов нельзя выращивать соединения, содержащие Al, так как AsCl_3 реагирует со стенками кварцевого реактора. Эти соединения выращивают с помощью газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений. Данная технология благодаря простоте, легкости управления и другим преимуществам потеснила хлоридную ГФЭ в системе $\text{Ga-AsCl}_3\text{-H}_2$. Метод успешно используется для выращивания гетероструктур $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В стандартном процессе газофазной эпитаксии МОС в качестве источника Ga используются металлоорганические соединения — триметилгаллий $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ или триэтилгаллий $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, а источником As служит арсин (AsH_3). Если при обычной ГФЭ выращивание проводится в горячем реакторе, то в случае ГФЭ МОС достаточно нагревать только подложку. Степень пересыщения газовой фазы очень велика. Газофазная эпитаксия с использованием металлоорганических соединений идеально подходит для гетероэпитаксии.

Химическая реакция роста арсенида галлия, например, из триметилгаллия и гидрида мышьяка может быть записана в следующем виде:



Эта реакция протекает при 700°C в присутствии водорода. Подобные реакции используются для выращивании других двойных, тройных и четверных соединений. Например, рост соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ описывается уравнением:



В этом случае атомная концентрация (x) алюминия связана с начальными парциальными давлениями триметилгаллия и триметилалюминия в газовой фазе.

Упрощенная схема установки для ГФЭ МОС приведена на рис. 2.4. Процедура выращивания включает приготовление подложки (очистку и травление), продувку системы водородом, разогрев подложки с помощью СВЧ-индуктора, непосредственно

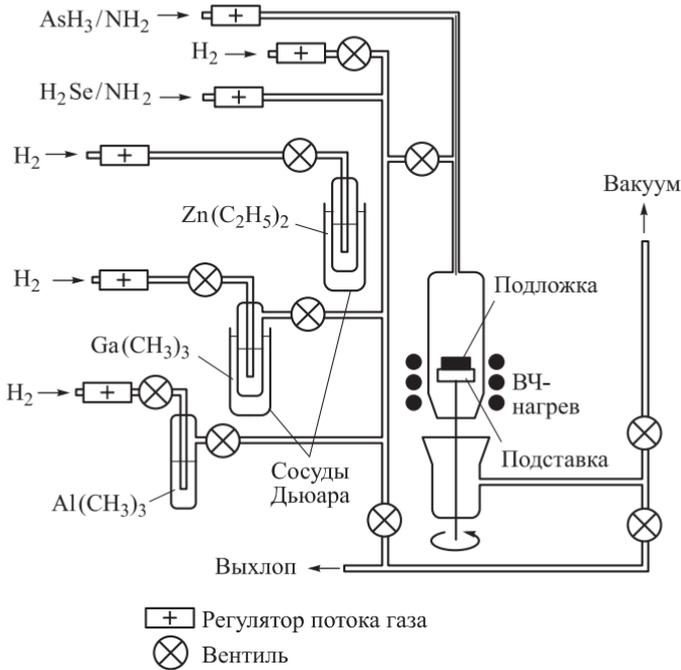


Рис. 2.4. Схема установки для эпитаксии из газовой фазы арсенид-галлиевых структур

процесс осаждения и последующий отжиг. Нелегированный арсенид галлия выращивается с помощью пиролизической реакции между триметилгаллием и арсином. Оба соединения переносятся к зоне реакции посредством несущего газа — водорода. Аналогичным образом транспортируется триметилалюминий $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, если требуется вырастить $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Управление давлениями различных реагентов осуществляется с помощью расходомеров газа. Подложка располагается в графитовой подставке, покрытой карбидом кремния, которая в процессе осаждения вращается для улучшения однородности наращиваемого слоя. Обычно скорость роста составляет $\sim 0,1$ мкм/мин. Одна из трудностей метода ГФЭ МОС — загрязнение растущего слоя углеродом, источником которого является металлоорганическое соединение. Тем не менее качество получаемых слоев сравнимо с достигаемым при использовании других видов эпитаксиальной технологии. Основное пре-

имущество ГФЭ МОС — относительная простота и возможность выращивания твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Существует разновидность рассмотренного метода, расширяющая его возможности, — *ГФЭ МОС с пониженным давлением в реакторе*. Дело в том, что для создания приборов высокочастотной электроники и оптоэлектроники все более широко используются многослойные структуры, содержащие субмикронные и нанометровые слои монокристаллического кремния, а также арсенида галлия и других соединений A^3B^5 . Во многих случаях очень важно, чтобы толщины слоев были строго определенными. Другими словами, необходимо, чтобы границы подложка–слой или слой–слой были резкими, а толщина переходного слоя, в котором происходит изменение состава или концентрации легирующей примеси, не превышала 10 нм. Однако обычная ГФЭ и ГФЭ МОС не могут обеспечить резких гетерограниц. Расплывание профиля легирования на гетерогранице обычно происходит в результате диффузии примеси в твердой фазе или автолегирования, но чаще всего причина в том, что для замены газовой смеси в реакторе требуется конечное время.

Снижение давления газовой смеси при выращивании соединений типа A^3B^5 методом ГФЭ МОС позволяет эффективно управлять как градиентом концентрации примесей, так и градиентом изменения состава основных компонентов. Расплывание профиля изменения состава при низком давлении в реакторе можно ограничить либо путем полной остановки процесса роста на время установления потока новой газовой смеси, необходимой для выращивания следующего слоя, либо за счет увеличения скорости потока, что позволяет быстрее заменять газовую смесь. Последнее обстоятельство — важная характеристика метода ГФЭ МОС с низким давлением. Другая особенность метода ГФЭ МОС с пониженным давлением состоит в том, что по сравнению с обычными вариантами технологии ГФЭ и ГФЭ МОС процесс выращивания ведется при значительно бóльших скоростях газового потока. Увеличение скорости газового потока в принципе позволяет получать более однородные слои, однако при этом лучше понизить давление в реакторе, чем просто увеличивать скорость потока при атмосферном давлении. Действительно, в последнем случае увеличение потока массы холодного газа привело бы

к охлаждению подложки, в то время как при пониженном давлении имеется возможность увеличить скорость движения газа, не меняя потока его массы и температуры подложки. Это приводит к улучшению однородности растущих слоев.

Технология ГФЭ МОС с низким давлением в реакторе первоначально разрабатывалась для выращивания кремния и GaAs. Затем этот метод стал применяться для выращивания InP, (GaAl)As, GaInAsP — материалов, используемых в микро-, нано- и оптоэлектронике. При выращивании GaAs, InP и (GaAl)As этим методом было обнаружено, что протекание паразитных реакций в газовой смеси вследствие пониженного давления сильно ограничено. При этом значительно уменьшается влияние автолегирования, что позволяет получать более резкие профили изменения концентрации легирующих примесей на границах слой–слой и слой–подложка. ГФЭ МОС с пониженным давлением в реакторе — более простая и более производительная методика по сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ), и в последнее время успешно с ней конкурирует. Этим методом созданы:

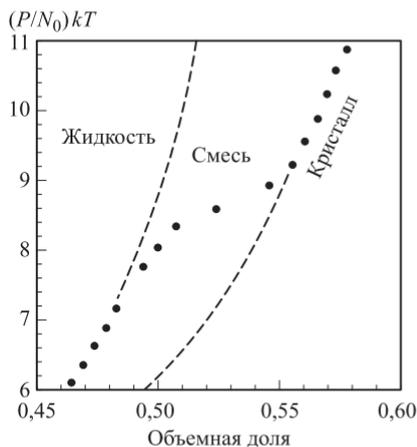
- гетероструктуры GaAs/GaAlAs и полевые транзисторы на их основе с селективным легированием и высокой подвижностью электронов в двумерном электронном газе;
- инжекционные лазеры на основе гетероструктур GaAs/GaAlAs с квантовыми ямами;
- инжекционные лазеры, работающие на длине волны 1,3 мкм с очень низким пороговым током;
- структуры (GaIn)As/InP с набором квантовых ям и др.

Метод ГФЭ МОС с пониженным давлением в реакторе наряду с методом МЛЭ позволяет получать очень резкие гетеропереходы. Однако следует отметить, что в гетероструктурах GaAs/(GaAl)As полученная подвижность носителей ниже, чем в таких же структурах, выращенных методом МЛЭ.

2.1.3. Формирование структур на основе коллоидных растворов

Коллоидные растворы или золи представляют собой жидкие системы с частицами дисперсной фазы или мицеллами, перемещающимися свободно и независимо в процессе броуновского движе-

Рис. 2.5. Функции состояния коллоидного раствора, N_0 — число Авогадро



ния. Золи или коллоидные растворы с водной дисперсионной средой называют *гидрозолями*, с органической — *органозолями*. Коллоидная суспензия состоит из небольших сферических частиц, взвешенных в жидкости. Размер частиц лежит в пределах 10–100 нм. Частицы не могут располагаться друг относительно друга ближе, чем на диаметр частицы. Один из способов избежания агрегации частиц — сообщение им тем или иным способом электрического заряда. Если объем всех частиц превышает половину всего объема коллоидного раствора, то пространственное расположение частиц представляет собой объемно-центрированную (ОЦК) или гранецентрированную (ГЦК) решетки. На рис. 2.5 показано, как изменяется состояние коллоидного раствора соли, содержащего сферы полистирола диаметром 720 нм, в зависимости от давления, нормализованного на тепловую энергию, и объемной доли дисперсной фазы.

Метод формирования упорядоченных наноструктур непосредственно из наночастиц, сформированных в коллоидных растворах, дает возможность в широких пределах варьировать размеры частиц, позволяет менять по желанию адсорбционную оболочку и тем самым электронные свойства частиц. Применение этого метода практически не зависит от природы частиц. Метод получения коллоидных кристаллов был впервые реализован для наночастиц CdS. В процессе испарения происходит гомогенная либо гетерогенная (на подложке) нуклеация коллоидных кристаллов.

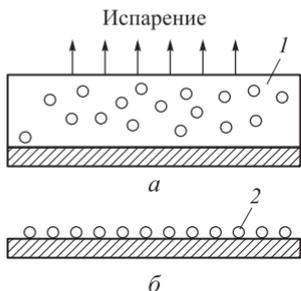


Рис. 2.6. Схема метода испарения коллоидного раствора (а) и получения упорядоченных структур (б):

1 — коллоидный раствор;

2 — структура из наночастиц

Используя этот метод, можно формировать как трехмерные, так и двумерные коллоидные кристаллы. Схема процесса осаждения упорядоченных наноструктур представлена на рис. 2.6. Полученные структуры исследовали методами электронной микроскопии, показавшей наличие упорядоченности нанокристаллов в масштабах ~ 50 нм.

Метод можно использовать для получения упорядоченных структур из наночастиц металлов. Первоначально опыты проводили с наночастицами золота, поскольку в этом случае состав был стабилизирован. Кроме того, наночастицы золота, покрытые адсорбированным слоем алкантиолов, позволяют легко менять растворители, осаждать и снова диспергировать наночастицы, а также проводить обменные реакции с лигандной оболочкой. Под *лигандом* будем понимать молекулы или ионы в химических комплексных соединениях, которые непосредственно связаны с центральным, комплексообразующим атомом.

При получении коллоидных кристаллов методом испарения растворителя важную роль в процессах самоорганизации играют монодисперсность частиц, их форма и природа стабилизирующей оболочки. Была исследована самоорганизация наночастиц золота, серебра и платины. Наночастицы первоначально получали в водной среде и лишь затем переносили в органические растворители, содержащие тиолаты, что позволило в широких пределах варьировать размеры и форму частиц. Как оказалось, способность к самоорганизации проявляют все исследованные системы. Изучено также влияние стабилизатора на получение коллоидных кристаллов. Эксперименты проводили с наночастицами золота, синтезированными в обратных мицеллах с использованием стабилизато-