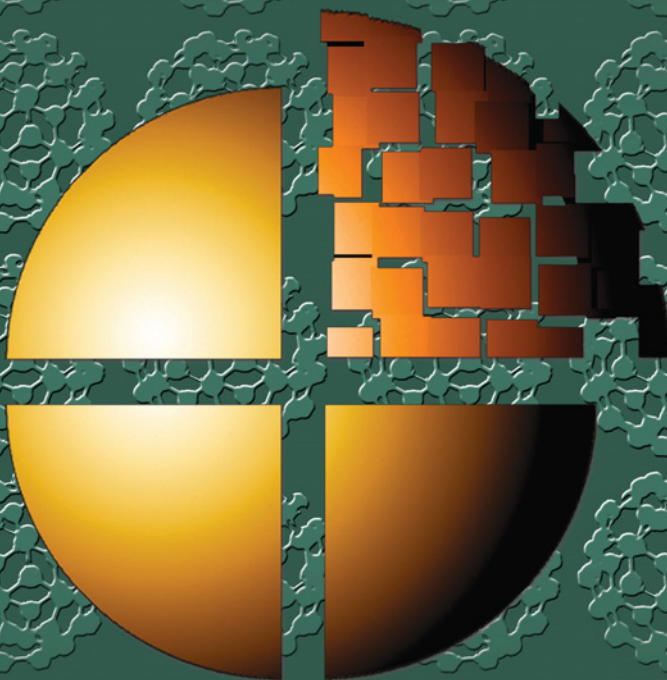


А. А. Щука

НАНОЭЛЕКТРОНИКА



Лаборатория
ЗНАНИИ

УДК 621.38-002.532
ББК 32.85 я73
Щ94

Серия основана в 2006 г.

Рецензенты:

заведующий кафедрой вакуумной электроники МФТИ
доктор ф.-м. наук, академик РАН А. С. Бугаев

генеральный директор компании «Нанотехнологии МДТ»
доктор техн. наук, профессор В. А. Быков

Щука А. А.

Щ94 Нанoeлектроника : учебное пособие / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 345 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-730-1

Рассмотрены основные направления развития современной электроники, использующей физические эффекты, имеющие место в наноструктурах. Проанализированы пути перехода от микро- к нанoeлектронным приборам, приведены описания нанотехнологических процессов, элементов и приборов нанoeлектроники и новых материалов, с которыми тесно связано развитие приоритетной области нанонауки и нанотехнологии.

Для студентов по направлениям подготовки «Прикладные математика и физика», «Электроника и нанoeлектроника», «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также для аспирантов и научных работников, специализирующихся в области нанoeлектроники и нанотехнологий.

УДК 621.38-002.532
ББК 32.85 я73

Деривативное издание на основе печатного аналога: Нанoeлектроника : учебное пособие / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. — 4-е изд. — М. : Лаборатория знаний, 2019. — 342 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-00101-156-9.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-00101-730-1

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. От микро- к нанoeлектронике	13
1.1. Микроэлектроника как мотор прогресса	13
1.2. Нанoeлектроника — путь «обогнать не догоняя»	19
1.3. Нанoeлектронные приборы и устройства	21
Контрольные вопросы к главе 1	28
Литература к главе 1	28
Глава 2. Методы нанотехнологии	29
2.1. Гетерогенные процессы формирования наноструктур	29
2.1.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия	29
2.1.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	36
2.1.3. Формирование структур на основе коллоидных растворов	40
2.1.4. Золь–гель-технология	43
2.1.5. Атомно-слоевое осаждение	45
2.1.6. Технология сверхтонких пленок металлов и диэлектриков	47
Контрольные вопросы к разделу 2.1	48
Литература к разделу 2.1	48
2.2. Нанοформοобразование	49
2.2.1. Гетеропленки	49
2.2.2. Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей	54
2.2.3. Нанοгοфрированные структуры	57
2.2.4. Технология создания квантовых точек	59
2.2.5. Нанопечатная литография	65
2.2.6. Ионный синтез квантовых наноструктур	67
Контрольные вопросы к разделу 2.2	69
Литература к разделу 2.2	69
2.3. Методы зондовой нанотехнологии	69
2.3.1. Физические основы зондовой нанотехнологии	69
2.3.2. Контактное формирование нанорельефа	74
2.3.3. Бесконтактное формирование нанорельефа	75
2.3.4. Локальная глубинная модификация поверхности	76
2.3.5. Межэлектродный массоперенос	77
2.3.6. Электрохимический массоперенос	80

2.3.7. Массоперенос из газовой фазы	80
2.3.8. Локальное анодное окисление	81
2.3.9. Литография с помощью сканирующего туннельного микроскопа	83
2.3.10. Совместное использование лазера и СТМ в нанолитографии	86
Контрольные вопросы к разделу 2.3	87
Литература к разделу 2.3	88
2.4. Технологии самоорганизации структур	88
2.4.1. Процессы самоорганизации в природе	88
2.4.2. Химическая самосборка	91
2.4.3. Самоорганизация наноструктур	94
Контрольные вопросы к разделу 2.4	95
Литература к разделу 2.4	96
2.5. Технология фотонных кристаллов	96
2.5.1. Методы упорядочивания наноструктур	96
2.5.2. Синтез инвертированных фотонных кристаллов	98
2.5.3. Бестемплатный синтез фотонных кристаллов	100
2.5.4. Технология селективного травления	101
2.5.5. Синтез фотонных кристаллов с контролируемой шириной запрещенной зоны	102
2.5.6. Другие технологии создания фотонных кристаллов	104
Контрольные вопросы к разделу 2.5	104
Литература к разделу 2.5	105
2.6. Графеновые технологии	105
Литература к разделу 2.6	108
Глава 3. Материалы наноэлектроники	109
3.1. Полупроводниковые структуры	109
3.1.1. Масштабы и свойства материалов	109
3.1.2. Гетеропереходы	111
3.1.3. Гетероструктуры	114
3.1.4. Сверхрешетки	116
Контрольные вопросы к разделу 3.1	120
Литература к разделу 3.1	120
3.2. Углеродные наноматериалы	120
3.2.1. Аллотропные модификации углерода	120
3.2.2. Алмазные пленки	124
3.2.3. Графен — двумерный монокристалл	125
3.2.4. Нанотрубки	129
3.2.5. Фуллерены	137
Контрольные вопросы к разделу 3.2	144
Литература к разделу 3.2	144
3.3. Мультиферроики	145
3.3.1. Классификация мультиферроиков	145
3.3.2. Магнитные полупроводники	147

3.3.3. Спин-электронные слоистые структуры	148
Контрольные вопросы к разделу 3.3	152
Литература к разделу 3.3	152
3.4. Полимерные материалы. Органические проводники и полупроводники	152
Контрольные вопросы к разделу 3.4	160
Литература к разделу 3.4	160
3.5. Фотонные кристаллы	161
Контрольные вопросы к разделу 3.5	166
Литература к разделу 3.5	166
3.6. Пленки поверхностно-активных веществ	166
3.6.1. Пленки Ленгмюра–Блоджетт	166
3.6.2. Свойства ленгмюровских пленок	170
Контрольные вопросы к разделу 3.6	171
Литература к разделу 3.6	171
3.7. Бионаноструктуры. ДНК как составляющая наноструктур	172
Контрольные вопросы к разделу 3.7	175
Литература к разделу 3.7	176
Глава 4. Элементы и приборы наноэлектроники	177
4.1. Нанотранзисторные структуры на традиционных материалах	177
4.1.1. Кремниевые транзисторы с изолированным затвором	177
4.1.2. КНИ-транзисторы	182
4.1.3. Транзисторы на структурах SiGe	184
4.1.4. Многозатворные транзисторы	186
4.1.5. Гетеротранзисторы	188
4.1.6. Гетероструктурный транзистор на квантовых точках	195
4.1.7. Биполярные транзисторы	197
4.2. Нанотранзисторные структуры на новых материалах	198
4.2.1. Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок	198
4.2.2. Нанотранзисторы на основе графена	203
4.2.3. Спиновой нанотранзистор	205
4.2.4. Наноэлектромеханический транзистор	209
4.2.5. Успехи и перспективы транзисторостроения	211
Контрольные вопросы к разделам 4.1. и 4.2	211
Литература к разделам 4.1. и 4.2.	212
4.3. Основы одноэлектроники	212
4.3.1. Эффект одноэлектронного туннелирования	212
4.3.2. Транзисторные структуры одноэлектроники	219
4.3.3. Устройства на одноэлектронных транзисторах	228
Контрольные вопросы к разделу 4.3	232
Литература к разделу 4.3	233
4.4. Спинтроника	233
4.4.1. Свойства магнитоупорядоченных структур	233
4.4.2. Приборы на магнитостатических волнах	241

4.4.3. Приборы спинтроники	243
Контрольные вопросы к разделу 4.4	249
Литература к разделу 4.4	249
4.5. Квантовые компьютеры.	250
4.5.1. От битов к кубитам	250
4.5.2. Квантовые вычисления	255
4.5.3. Элементная база квантовых компьютеров.	259
Контрольные вопросы к разделу 4.5	268
Литература к разделу 4.5	269
4.6. Молеотроника.	270
4.6.1. Молекулярный подход в нанозлектронике	270
4.6.2. Молекулярные транзисторы и элементы логики.	271
4.6.3. Молекулярная память	281
Контрольные вопросы к разделу 4.6	285
Литература к разделу 4.6	285
4.7. Политроника.	285
4.7.1. Органические транзисторы	286
4.7.2. Органические светоизлучающие диоды.	290
4.7.3. Нанопроводники.	295
4.7.4. Вычислители на основе ДНК	297
4.7.5. Эластичная электроника	302
Контрольные вопросы к разделу 4.7	303
Литература к разделу 4.7	303
4.8. Нанопотоника	303
4.8.1. Структуры с пониженной размерностью	303
4.8.2. Устройства на фотонных кристаллах	307
4.8.3. Фотонные транзисторы	313
4.8.4. Лазерные наноструктуры.	316
4.8.5. Волоконные лазеры	319
Контрольные вопросы к разделу 4.8	321
Литература к разделу 4.8	321
4.9. Наноплазмоника.	321
4.9.1. Кванты плазмы твердых тел	321
4.9.2. Спазер — лазер на плазмонах	324
4.9.3. Однофотонный транзистор	326
4.9.4. Интегральные схемы на плазмонах	327
Контрольные вопросы к разделу 4.9	328
Литература к разделу 4.9	329
4.10. Мемристорная электроника	329
4.10.1. Мемристор и его свойства.	329
4.10.2. Кроссбар-архитектура	332
4.10.3. Нанозлектронные устройства памяти	334
Контрольные вопросы к разделу 4.10	336
Литература к разделу 4.10	337
Предметный указатель.	338

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

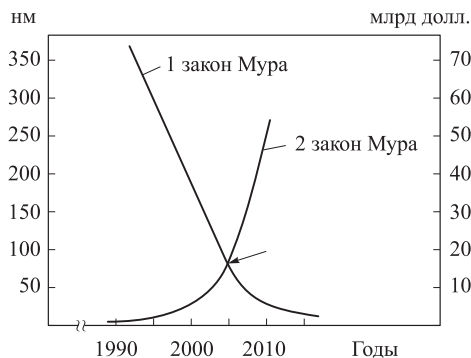


Рис. 1.1. Первый и второй законы Мура. Стрелкой показан переход на нанотехнологический уровень

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 наноэлектронику.

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 наноэлектронику. 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. Наноэлектроника 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 небιологическую среду.

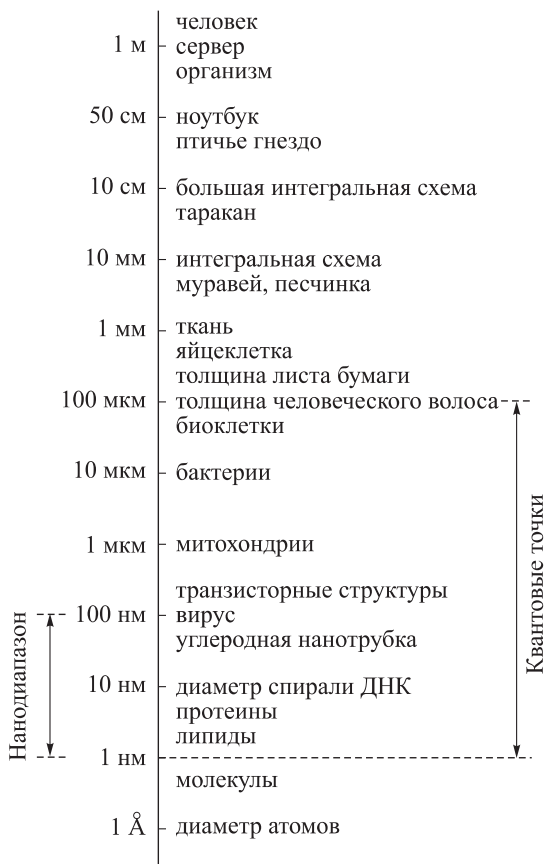
Переход к нанoeлектронным приборам и устройствам подразумевает смену парадигм электроники в целом. Под *парадигмой* будем понимать совокупность фундаментальных научных установок, представлений и терминов, принимаемую и разделяемую научным сообществом в рамках устоявшейся научной традиции в определенный 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 (staced 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, быстрдействию 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-