

УДК 681.3; 547
ББК 22.36; 24.7
Р 21

Рамбиди Н. Г., Берёзкин А. В. **Физические и химические основы нанотехнологий.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 456 с. — ISBN 978-5-9221-0988-8.

В доступной для широкого круга читателей форме рассматриваются история возникновения, основные направления и физико-химические принципы современных нанотехнологий, включая планарную технологию, супрамолекулярную химию, молекулярную электронику, получение наночастиц и наноструктурированных материалов. Подробно обсуждаются два основных пути создания наноматериалов: «снизу–вверх» и «сверху–вниз», а также методы изучения наноструктур и влияния размерных эффектов на их свойства. В основу книги положен курс лекций, которые в течение нескольких лет читаются одним из авторов на кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета Московского государственного университета.

Книга адресована студентам, аспирантам и специалистам, интересующимся вопросами нанотехнологий.

ISBN 978-5-9221-0988-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2008, 2009

© Н. Г. Рамбиди, А. В. Берёзкин, 2008, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение. Давние корни современного нанотехнологического бума	
Несколько слов авторов о проблеме и книге	6
Глава 1. Нанотехнология: истоки, особенности становления и исходные принципы	
9	
1.1. Миниатюризация в окружающем нас мире — исторические и психологические корни	9
1.2. Первые попытки создать теоретическую основу нового междисциплинарного подхода — нанотехнологии	12
1.3. Нанотехнология выходит на государственный уровень	23
II. «Есть еще много места в самом низу». Возможности и следствия предельной миниатюризации	
Глава 2. Пути в нанотехнологию	
28	
2.1. Вакуумные электронные лампы, транзисторы, планарные чипы в вычислительной технике	28
2.2. Биомолекулярные векторы, переносящие генетическую информацию, для производства трансгенных организмов.	50
Глава 3. Молекулы и молекулярные ансамбли — естественный предел миниатюризации.	
63	
3.1. Конформационные переходы в молекулах — перспективная элементная база вычислительных устройств.	63
3.2. Каркасные аллотропные формы углерода — области применения фуллеренов и нанотрубок	109
3.3. Размерное квантование в полупроводниках	114
3.4. Биологические принципы обработки информации на молекулярном уровне . .	145
3.5. Биочипы, наномоторы — неожиданные возможности нанобиологии	154
III. Перспективные материалы и среды: управление свойствами материала направленным изменением микроструктуры	
Глава 4. Самосборка и самоорганизация: их роль в нанотехнологии и не только	
166	
4.1. Процессы самоорганизации и их особенности	167
4.2. Синергетические принципы процессов самоорганизации	171
Глава 5. Неорганические наноструктурированные материалы	
179	
5.1. Методы получения наночастиц	181
5.2. Металлические композиционные материалы	192
5.3. Наноструктурированная керамика	197
5.4. Углеродные материалы.	199
5.5. Особенности механического поведения наноструктурированных материалов	203
5.6. Только один из многочисленных примеров	205
Глава 6. Полимерные наноструктурированные материалы. Блок-сополимеризация.	
206	
6.1. Синтез полимеров контролируемой структуры	210
6.2. Микрофазное расслоение блок-сополимеров	213
6.3. Мицеллообразование в блок-сополимерах	219
6.4. Агрегатные и фазовые состояния полимеров	220
6.5. Термоэластопласты	221
6.6. Блок-сополимерная литография	223
6.7. Фотонные кристаллы.	225

6.8. Нанопористые полимерные материалы	226
6.9. Сополимеры с жесткими фрагментами	227
6.10. Полимерно-неорганические нанокомпозиты	235
Глава 7. Полимерные макромолекулярные системы сложной топологии	243
7.1. Дендримеры.	243
7.2. Полимерные щетки	252
 IV. Структура и динамика сложных молекулярных систем	
Глава 8. Супермолекулы и супрамолекулярные ансамбли. Моно- и мультимолекулярные пленки, мембраны	262
8.1. Направления супрамолекулярной химии	263
8.2. Самосборка: понятия и определения.	263
8.3. Типы межмолекулярных взаимодействий.	264
8.4. Молекулярные рецепторы: самосборка как функция	271
8.5. Супрамолекулярные ансамбли	280
8.6. Супермолекулы в реакционных системах.	319
8.7. Супермолекулы в трансмембранном транспорте веществ	332
Глава 9. Макроскопическое управление динамикой молекулярной системы: обработка информации химическими средами Белоусова–Жаботинского.	355
9.1. Информационные потребности постиндустриального общества и парадигма фон Неймана	355
9.2. Вычислительная техника и задачи искусственного интеллекта	359
9.3. Биологически инспирированные средства обработки информации: нейронные сети и нейрокompьютеры	361
9.4. Обработка информации в биологических нейронных сетях и полупроводниковыми цифровыми компьютерами	366
9.5. Распределенные реакционно-диффузионные системы.	368
9.6. Химические реакционно-диффузионные среды типа Белоусова–Жаботинского	371
9.7. «Возникающие» информационные механизмы	377
9.8. Принципы обработки информации реакционно-диффузионными устройствами	378
9.9. Реакционно-диффузионный процессор: основные принципы	378
9.10. Обработка изображений средами типа Белоусова–Жаботинского	386
9.11. Реакционно-диффузионный процессор: определение кратчайшего пути в лабиринте.	400
9.12. Системы взаимосвязанных реакционно-диффузионных реакторов: распознающие устройства.	408
9.13. Полупроводниковые реакционно-диффузионные устройства — первые попытки	412
9.14. Биологические принципы обработки информации и их роль в развитии информационных технологий	416
 V. Предвидимое будущее нанотехнологии	
Глава 10. Новая промышленная революция? Новые возможности и новые опасности	425
10.1. Что же, в сущности, представляет собой нанотехнология?	425
10.2. США — роль нанотехнологии в совершенствовании военной и гражданской продукции	428
10.3. Нанотехнологические исследования в европейских странах, Японии, Китае	431
10.4. Нанотехнология в России.	433
Приложение. Развитие в России работ в области нанотехнологий. <i>С.М. Алфимов, В.А. Быков, Е.П. Гребенников, С.И. Желудева, П.П. Мальцев, В.Ф. Петрунин, Ю.А. Чаплыгин.</i>	436
Список литературы	448

Часть I

ВВЕДЕНИЕ. ДАВНИЕ КОРНИ СОВРЕМЕННОГО НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БУМА

Всему свое время, и время всякой вещи под
небом...
Время разбрасывать камни, и время собирать
камни.

Книга Екклесиаста или проповедника

Несколько слов авторов о проблеме и книге

Нанотехнология — одно из наиболее важных и активно обсуждаемых направлений научных и технологических исследований, которое приобрело в последние годы грандиозный размах и с которым связаны надежды широкого круга ученых, технологов, бизнесменов и политиков. Это направление рассматривается как основа новой промышленной революции, которая должна привести к изобилию принципиально новых по своим возможностям изделий, изменению качества жизни человеческого общества и, как следствие, его социальных аспектов. В то же время нанотехнология неоднозначно воспринимается обществом. Она вызывает жесткие дискуссии, неприятие ее отдельных результатов и появление общественных и даже философских течений, которые следовало бы относить скорее к области научной фантастики, чем реального мира.

Исходя из своей логической структуры, термин «нанотехнология» должен относиться к технологии производства материалов и изделий, основанной на использовании наноразмерных объектов. Он был предложен в 1974 г. и определял тогда технологические приемы обработки макроскопических деталей с нанометровыми допусками. И только в 80-е годы прошлого века этому термину было придано совершенно новое содержание. В сущности оно определило в значительно большей степени междисциплинарное научное, а не технологическое, направление, т. е. изучение возможностей использования физических, химических и биологических явлений для создания материалов и устройств, свойства которых определяются их структурой в нанометровом диапазоне. Именно поэтому международный стандарт «Терминология для нанотехнологии», принятый в 2006 г., включает в себя, кроме расплывчато сформулированного термина «нанотехнология», еще и термин «нанонаука».

Конечно, термин «нанонаука» в большей степени отвечает содержанию этой области деятельности. Было бы логично подчинить ему в иерархии определений широко используемые сегодня термины, такие, как «нанохимия», «нанобиология» и, наряду с ними, термин «нанотехнология», который должен включать в себя технологические аспекты. Но несколько двусмысленный характер термина «нанонаука» вызывает неоднозначное отношение к нему научного сообщества.

Эти, казалось бы, лишь терминологические неопределенности сказываются на понимании содержания нанотехнологии с ее ярко выраженным междисциплинарным характером.

Прежде всего, нужно отметить, что нанотехнология как самостоятельная область не возникла спонтанно в конце прошлого века, а явилась продолжением исследований, которые выполнялись на протяжении в основном второй половины прошлого века. И более того, несмотря на то, что первые идеи — «есть еще много места в самом низу», были выдвинуты замечательным

физиком Ричардом Фейнманом еще в 1959 г., нанотехнология не вышла, в сущности, из периода «первоначального накопления».

Изучение явлений окружающего нас мира на атомно-молекулярном уровне началось еще в начале прошлого века. Оно сопровождалось разработкой новых методов определения структуры вещества. А они, в свою очередь, позволили понять фундаментальное значение белков и ДНК и создать на этой основе новые подходы к производству разнообразных, необходимых в повседневной жизни продуктов, разработать планарную технологию изготовления микроэлектронных приборов, получить ценные наноструктурированные металлы, сплавы, керамические и полимерные материалы. По мере накопления опыта в научном сообществе окрепла уверенность в том, что уникальные особенности поведения вещества на атомном уровне можно использовать и в макромасштабах, направленно на наноуровне, изменяя структуру различных материалов, видоизменяя и многократно улучшая за этот счет их полезные свойства.

По мере развития нанотехнологии как самостоятельной области деятельности становились очевидными два ее основных принципа:

- предельная миниатюризация устройств или их элементов, которая придает этому устройству принципиально новые практически важные свойства,
- управление свойствами макроскопического объекта, т. е. формирование в нем принципиально новых практически полезных свойств, за счет направленного изменения его структуры.

В этих определениях мы сознательно не употребляем слово «нано», но оно полностью относится к нанотехнологии. В то же время целый ряд объектов, и прежде всего большие распределенные динамические системы с размерами исходных элементов, далекими от нанодиапазона, функционируют по тем же основным принципам. Поэтому не удивительно, что нанотехнология все более и более формируется как междисциплинарная отрасль. В сущности, это попытка объединить отдельные научные направления физики, химии и биологии и подойти на этой основе и к другим, нередко очень сложным и неоднозначным явлениям окружающего нас мира. Сейчас этот процесс приобрел взрывной характер, когда быстро возрастающая сложность изучаемых систем и явлений зачастую находится на пределе возможностей аналитической техники, требует дорогостоящего оборудования, широко образованных специалистов и, как никогда, систематического и тесного объединения теории и эксперимента.

Немаловажным представляется и то, что задолго до появления самого термина «нанотехнология» в ряде областей производства, и прежде всего в химии и биологии, интенсивно использовались основные нанотехнологические подходы. Ведь использование, например, сложных молекулярных механизмов в синтезе естественного каучука или же операции с плазмидами в трансгенном производстве продуктов питания принципиально не отличается от создания наноструктурированных материалов. Эти и целый ряд других технологических процессов интенсивно используются сегодня на производстве. Но в то же время индустриализация и коммерциализация только что разработанных и многообещающих процессов наталкивается на сложные препятствия.

Внедрение принципиально новых технологий, как можно судить об этом по множеству исторических примеров, представляет собой сложный и нередко болезненный процесс. Более того, появляющиеся в широком обращении новые материалы и продукты вызывают естественные опасения, поскольку, несмотря на системы государственного контроля, не всегда понятны отдаленные последствия их использования. В силу этого становится понятным, почему даже в США и Китае, где в нанотехнологии вкладывают огромные средства, индустриализация и коммерциализация нанотехнологических работ находится на низком уровне.

Сегодня в России чувствуется огромный пробел в области литературы о нанотехнологиях. Публикуется лишь небольшое число сборников статей и монографий, посвященных отдельным узким направлениям нанотехнологии. Еще меньше книг, которые охватывают круг проблем, достаточный для того, чтобы служить учебными пособиями в этой области. В то же время за рубежом регулярно выходят обширные обзоры и издаются сотни монографий. Очевидно, что для успешной интеграции российского научного сообщества в передовые нанотехнологические исследования необходимы усилия, направленные на расширение участия России в международном обмене научной информацией и специалистами. Не менее важна интеграция нанотехнологии в систему подготовки научных кадров. Чтобы Россия смогла участвовать в уже начатой во всем мире нанотехнологической гонке, потребуются огромные совместные усилия систем образования, науки и промышленности.

Число нанотехнологических работ, появляющихся ежегодно, а это несколько тысяч публикаций, становится в последние годы необозримым. И поэтому собрать в одной книге все, что представляется интересным, оказывается несбыточной мечтой.

Предлагаемая книга — это не учебное пособие по нанотехнологии. Мы сделали попытку собрать воедино и описать физические, физико-химические и, отчасти, биохимические явления и механизмы на молекулярном и наноразмерном уровнях, которые лежат в основе всех основных подходов сегодняшней нанотехнологии. Именно эти механизмы определяют их предельные возможности.

Мы надеемся, что эта книга заинтересует и привлечет внимание начинающих исследователей к быстро развивающейся области нанотехнологии, которая несомненно приведет в недалеком будущем к новой промышленной революции.

В основе этой книги лежит курс лекций, которые уже несколько лет читаются на кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета Московского государственного университета. Мы искренне благодарны заведующему кафедрой академику Алексею Ремовичу Хохлову, который инициировал и активно поддерживал нашу работу.

Глава 1

НАНОТЕХНОЛОГИЯ: ИСТОКИ, ОСОБЕННОСТИ СТАНОВЛЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ПРИНЦИПЫ

1.1. Миниатюризация в окружающем нас мире — исторические и психологические корни

Говоря о нанотехнологии — не только как о предвестнике новой технической и технологической революции, но и как об источнике фундаментальных сдвигов в психологии человеческого общества, не следует забывать о ее потенциальных истоках. Начиная со стародавних времен, казалась совершенно естественной сама идея миниатюризации, т. е. существования или же создания объектов с размерами намного меньшими, чем привычные для человека и, тем не менее, выполняющих присущие их макроаналогам функции. Это проявлялось и в народных поверьях о разнообразных миниатюрных существах — эльфах, гномах, соседствующих с человеком, и в литературе.

Более трехсот лет тому назад великий фантаст Джонатан Свифт подробно описал вымышленное государство лилипутов. Размеры его жителей были в десятки раз меньше средних человеческих, но устройство и законы общества мало отличались от господствующих в то время в Англии. Свифт блестяще использовал выдуманную им модель как сатирик. И именно в этом, в сущности, проявилась одна из основных целей использованного им нанотехнологического, как мы его понимаем сегодня, подхода — его практическая значимость.

В середине XIX в. известным русским писателем Николаем Семеновичем Лесковым была написана повесть «Сказ о тульском косом Левше и о стальной блохе». В ней рассказывалось о том, как Государь Император Александр Павлович, путешествуя после Венского Конгресса, получил в Англии в подарок «нинфузорию» — стальную блоху. Она была видна только в «мелкоскоп» и, когда заведут, шевелила усиками и танцевала. По возвращении императора в Россию это чудо для назидания было показано тульским кузнецам. Их мастер Левша не только не удивился, но и пообещал блоху модернизировать. В результате блоха усиками продолжала шевелить, но танцевать перестала. Разгневанному императору Левша объяснил, что блоху они подковали. На каждой подковке было выбито имя делавшего ее кузнеца, а сам Левша изготовил гвоздики, которыми эти подковки прибивались.

Ближе к нашим дням, в 1963–64 гг., польский писатель Станислав Лем опубликовал фантастический роман «Непобедимый». В нем он сконструировал странную механистическую цивилизацию, обитающую на далекой планете — сложную систему, построенную из громадного числа микроско-

пических частиц. В каждой из них помещался простейший сенсор, логическое устройство, устройство связи с другими частицами и микроскопический движитель для свободного перемещения. Логические возможности, минимальные для отдельной частицы, резко возрастали при их объединении. Объединенный конгломерат, туча, как его называет Лем, представлял собой распределенную самоорганизующуюся систему с децентрализованным управлением. Оно осуществляется объединенным интеллектом системы, уровень которого определяется ее размером. В романе частицы системы изначально находятся в россыпи на поверхности планеты. Если появляется посторонний объект, вызывающий тревогу, в воздух поднимаются несколько ближайших частиц. Обнаруженная ими угроза приводит, по мере оценки ее степени, к присоединению к первоначальным частицам все большего их числа. Это увеличивает как возникающий интеллект системы, так и ее оперативные возможности. Сенсоры частиц реагируют на биологические белковые объекты. И основная цель популяции частиц заключается в борьбе за существование с биологическими формами жизни. Эта популяция подавляет биоформы, окружая их тучей частиц и стирая их память направленным электромагнитным воздействием.

Немного подробностей: системы микрочастиц и «возникающие» в них свойства. Удивительно, что в своем романе Станислав Лем предвосхитил нанотехнологический принцип построения системы, который сегодня называется принципом «снизу-вверх». В современной промышленной практике господствует противоположный принцип «сверху-вниз», когда на основании заранее созданной инструкции и выбранной технологии исходная болванка металла, например, последовательно обрабатывается, фрезеруется, рассверливается, чтобы получить конечный продукт — необходимую сложную деталь (рис. 1.1). В отличие от этого принцип построения «снизу-вверх» в его чистом виде подразумевает, что изделие последовательно создается из ее элементарных частей за счет процессов самоорганизации. Исходный материал для изготовления изделия представляет собой систему, состоящую из большого числа элементов (атомов, молекул или же их ансамблей), каждый из которых может выполнять некоторые физические действия. Принципиально важным фактором, определяющим «технологические» возможности системы, является характер взаимодействия этих элементов. При определенных условиях в системе

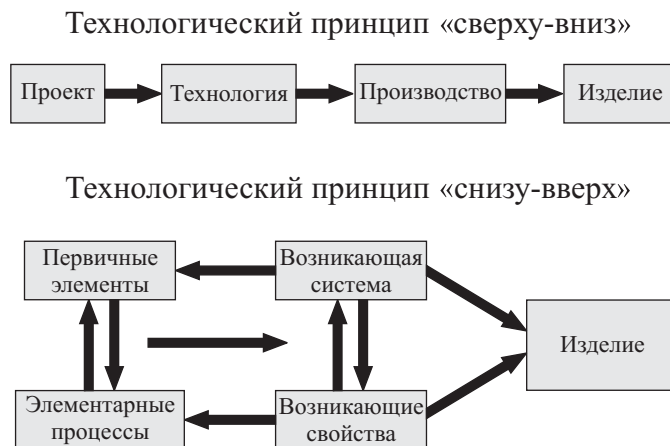


Рис. 1.1. Технологические принципы «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

возникают свойства, отсутствующие у отдельного элемента. Подробно появление таких «возникающих» свойств будет описано ниже.

Можно было бы приводить и другие литературные примеры, в которых в том или ином виде проявлялись бы нанотехнологические идеи. Но и того, что уже прозвучало, достаточно для того, чтобы подчеркнуть содержащийся в них смысл основных нанотехнологических подходов:

— предельная микро(нано)-миниатюризация макро-объектов, которая приводит к их микро-аналогам с измененными в заранее заданном направлении свойствами;

— направленное изменение структуры макро-объекта на микро(нано)-уровне для наперед заданного изменения свойств макро-объекта;

— технологический принцип «снизу-вверх».

Нужно отметить, что и до наступления нанотехнологического бума исследователи, работавшие в различных областях человеческой деятельности, использовали эти принципы, находясь в положении известного героя пьесы Мольера, который и не подозревал, что говорит прозой.

Немного подробностей: всего лишь один химический пример. В технике первой половины прошлого века играл важную роль природный каучук, на основе которого производились разнообразные промышленные изделия. Он поступал в промышленно развитые страны из Юго-Восточной Азии. Было известно, что естественный каучук представляет собой полимер органического соединения — изопрена. Тем не менее, попытки получить синтетический каучук на этой основе оказались в предвоенные годы безуспешными (рис. 1.2). Полимеризация проходила, но получен-

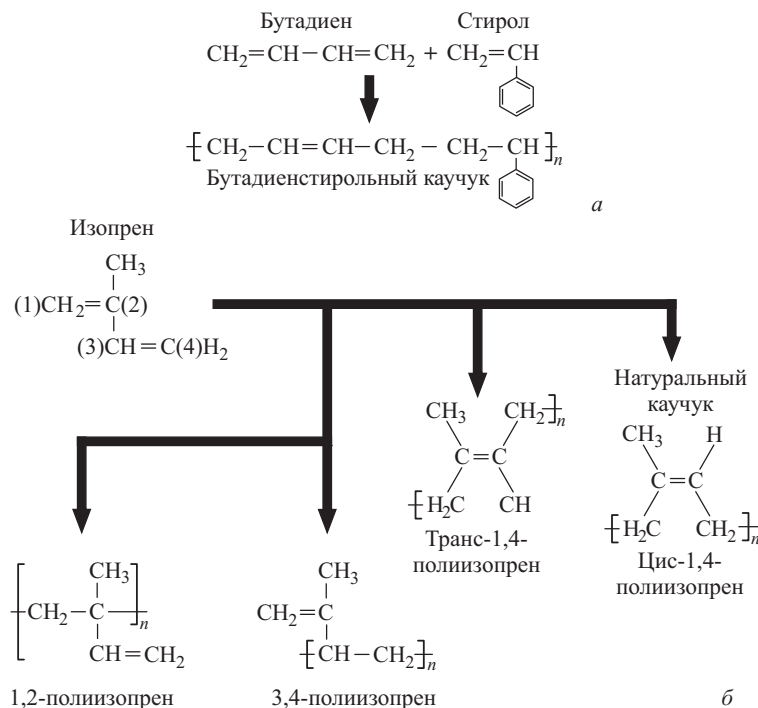


Рис. 1.2. Синтез искусственного (а) и натурального каучука (б)

ный продукт настолько отличался от природного, что использовать его в качестве заменителя было невозможно. С началом Второй мировой войны источники натурального каучука были отрезаны в результате быстрого захвата Японией Юго-Восточной Азии. К этому времени в основных промышленно развитых странах было освоено производство заменителей натурального каучука на другой синтетической основе. В Советском Союзе на основании фундаментальных исследований И. Л. Кондакова и С. В. Лебедева был создан полибутадиен. В Германии было организовано производство бутадиен-стирольного каучука. В США группой исследователей под руководством известного химика Каротерса (S. M. Kroters) был синтезирован неопрен — продукт полимеризации хлорированного бутадиена. Но, несмотря на крупнотоннажное производство этих синтетических каучуков, проблема синтеза натурального каучука оставалась насущной, поскольку его свойства существенно превосходили свойства заменителей. Эта проблема была решена только в послевоенные годы, когда была определена молекулярная структура природного каучука. Оказалось, что только один из четырех возможных изомеров, которые возникают в процессе полимеризации изопрена, представляет собой структуру натурального каучука. И только после этого, в конце 50-х годов, удалось разработать методы стереоспецифического синтеза — сложного процесса на молекулярном уровне, который позволил получить при полимеризации избирательно необходимый изомер полиизопрена. На основе этого было организовано и его крупнотоннажное производство.

1.2. Первые попытки создать теоретическую основу нового междисциплинарного подхода — нанотехнологии

Начиная с середины прошлого столетия возможности использования природных или же создания рукотворных микрообъектов, способных выполнять те или иные макроскопические действия, активно обсуждаются на научном уровне.

По-видимому, одним из первых был знаменитый физик XX в. Эрвин Шредингер, который в феврале 1943 г. прочел в Тринити Колледже (Дублин) лекцию на тему «Что такое жизнь с точки зрения физики». В этой лекции, вышедшей позже в виде книги и переизданной во многих странах, он впервые предложил идею аperiodического кристалла — микросистемы большой информационной емкости. В сущности, он предвосхитил принцип хранения генетической информации в структуре ДНК, говоря:

«Маленькую молекулу можно назвать «зародышем твердого тела». Исходя из такого маленького твердого зародыша, очевидно, возможно представить себе два различных пути построения все больших и больших ассоциаций. Один — это сравнительно однообразный путь повторения снова и снова одной и той же структуры в трех направлениях. Таким путем растет кристалл. Раз периодичность установилась, то уже нет определенной границы для размера такого агрегата. Другой путь — это построение все более и более увеличивающегося агрегата без скучного механизма повторения. Это случай все более и более сложной органической молекулы, в которой каждый атом, каждая группа атомов играет индивидуальную роль, не вполне равнозначную роли других атомов и групп. Мы можем совершенно точно назвать это образование аperiodическим кристаллом или твердым телом и выразить нашу гипотезу словами: Мы полагаем, что ген или, может быть, целое хромосомное волокно представляет собою аperiodическое твердое тело».

Возникновение нанотехнологии как самостоятельной области науки и техники связывают обычно с именем выдающегося физика XX в. Ричарда Фейнмана. 29 декабря 1959 г. он прочитал на заседании Американского физического общества лекцию на тему «Еще много места в самом низу». В ней он обратил внимание физического сообщества на то, что среди разнообразных областей физических исследований существует область, которая не находится в поле зрения физиков, но которая сулит множество разнообразных научных и технических приложений. Это — детальное изучение объектов микро- и нанометрового размера. В качестве первого примера Фейнман рассмотрел проблему компактного хранения информации: «Можно ли разместить 24 тома Британской энциклопедии на булавочной головке?». Отвечая на этот вопрос, Фейнман отметил, что если увеличить булавочную головку (диаметр 1/16 дюйма) в 25 000 раз, ее площадь будет действительно порядка площади всех страниц энциклопедии. При этом мельчайший элемент текста — точка, может быть отображен совокупностью 1000 атомов. Далее Фейнман остановился на целом ряде возможностей, которые возникают при конструировании и использовании сверхминиатюрных устройств. Это и сверхплотная запись и хранение любой информации, и разработка миниатюрных компьютеров, и создание автономных инструментов, которые смогут выполнять хирургические операции непосредственно в организме человека. Фейнман говорил: «...было бы интересно для хирургии, если бы вы могли проглотить хирурга. Вы введете механического хирурга в кровеносные сосуды, и он пройдет к сердцу и «осмотрится» там (рис. 1.3)... Другие маленькие машины могут быть встроены в тело для того, чтобы помочь плохо функционирующим органам». В своей лекции Фейнман упоминал о возможности прямого синтеза химических соединений непосредственно из атомов, добавляя их последовательно к создаваемой структуре. В общем, думая о многом, что фактически осуществлено сегодня из предсказаний Ричарда Фейнмана, как-то по-новому воспринимаешь заключительные слова его лекции: «В 2000 г... люди будут удивляться, почему до 1960 г. никто серьезно не продвинулся в этом направлении».

Термин «нанотехнология» был предложен в 1974 г. сотрудником Токийского университета Норио Танигучи. По своему первоначальному смыслу этот термин определял прецизионное изготовление деталей в процессе промышленного производства с предельно точно выдержанными размерами и с ультрамалыми допусками. В своей статье «Основные концепции нанотехнологии» Танигучи писал: «Нанотехнология — это технология производства, которая позволяет добиться сверхвысокой воспроизводимости и точности... При обработке материалов наименьшее количество материала, которое удаляется или наращивается, составляет атом или молекулу, т. е. 0,1–0,2 нм... Поэтому нанотехнология в целом представляет собой процессы разделения,

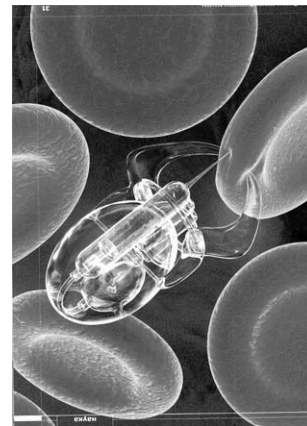


Рис. 1.3. Механический «хирург» в кровеносной системе

объединения и деформирования материалов на уровне одного атома или же молекулы».

Иной смысл, не только расширяющий это понятие, но и, в сущности, изменивший его смысл, был введен американским ученым Эриком Дрекслером (K. E. Drexler). В 1981 г., будучи сотрудником Массачусеттского технологического института и вдохновленный идеями Ричарда Фейнмана, он опубликовал статью под названием «Молекулярная инженерия: подход к разработке общих принципов манипулирования молекулами». Опираясь на разработанную к тому времени технику конструирования сложных белковых макромолекул из простых молекулярных фрагментов, он рассмотрел возможности создания на молекулярном уровне различных устройств. В их число входили актюаторы, моторы, насосы и даже провода и подшипники. Через несколько лет после этого Дрекслер обнародовал свою основную книгу «Машины создания. Грядущая эра нанотехнологии». По-видимому, лучшее компактное описание того, что содержится в этой книге, принадлежит одному из ведущих ученых в области информатики прошлого века Марвину Минскому (M. L. Minsky), написавшему предисловие к этой книге.

«Машины создания» начинаются с мысли о том, что наши возможности зависят от того, что мы можем построить. Это ведет к осторожному анализу возможных способов складывать атомы. Далее Дрекслер задается вопросом: «Что мы могли бы строить с помощью таких складывающих атомы механизмов?» Для примера, мы могли бы производить сборочные машины, по размеру намного меньшие даже живых клеток, и делать материалы более прочными и легкими, чем любые имеющиеся на сегодня. А значит, лучшие космические корабли. А значит, крошечные устройства, которые могут путешествовать по капиллярам, чтобы входить в них и восстанавливать живые клетки.

Следовательно, мы получили бы способность лечить болезнь, обращать вспять разрушительное воздействие возраста или сделать наши тела более быстрыми или более сильными, чем прежде. И мы могли бы делать машины вплоть до размеров вирусов, машины, которые будут работать со скоростями, которые никто из нас не может еще оценить. А затем, как только мы научимся это делать, мы смогли бы собирать мириады таких крошечных частей в интеллектуальные машины, возможно, основанные на использовании квинтильонов наноскопических параллельно работающих устройств, которые делают описания, сравнивают их с ранее записанными моделями и затем используют результаты всех прошлых экспериментов. Таким образом, эти новые технологии могли бы изменить не просто материалы и средства, которые мы используем, чтобы формировать нашу физическую среду, но также и действия, которые мы были бы затем способны совершать внутри любого создаваемого нами вида мира.

Как мне кажется, несмотря на все, что мы слышим о современных технологических революциях, в действительности, они не сделали таких больших перемен в нашей жизни, какие сделали революции первой половины столетия. Действительно ли телевидение изменило наш мир? Несомненно, меньше, чем это сделало радио, и даже меньше, чем это сделал телефон. Как насчет самолетов? Они просто уменьшили время путешествия с дней до часов — в

то время как железная дорога и автомобиль уже сделали большие изменения, сократив это время путешествия с недель до дней! Но «Машины создания» ставят нас на порог поистине значительных перемен; нанотехнология могла бы иметь большее влияние на наше материальное существование, чем такие два последних больших изобретения этого рода — замена палок и камней металлом и цементом и использование электричества. Точно так же мы можем сравнивать возможное воздействие искусственного интеллекта на то, как мы думаем, и на то, как мы могли бы начать думать о самих себе, только с двумя более ранними изобретениями: изобретением языка и письма.

Скоро мы будем вынуждены встать перед некоторыми из этих перспектив и выборов. Как нам следует с ними поступать? Книга «Машины создания» объясняет, как эти новые альтернативы могли бы затронуть многое из того, что в наибольшей степени заботит человечество: богатство и бедность, здоровье и болезни, мир и война. И Дрекслер предлагает не просто нейтральное перечисление возможностей, но множество идей и предложений о том, как можно было начать их оценивать. «Машины создания» — пока что наилучшая попытка подготовить нас к размышлению на тему, куда мы можем прийти и следует ли препятствовать созданию новых технологий».

Эрик Дрекслер широко пропагандировал идеи создания молекулярных машин в большом числе журнальных публикаций и книгах. Одна из наиболее известных среди них — книга под названием «Наносистемы: Молекулярные машины для производства и вычислений». Для того, чтобы дать более наглядное представление о предлагаемых возможностях реализации идей Дрекслера, приведем несколько примеров. На рис. 1.4 показаны простые варианты молекулярной зубчатой передачи и более сложные аналогичные устройства. Молекулярная реализация подшипника изображена на том же рисунке.

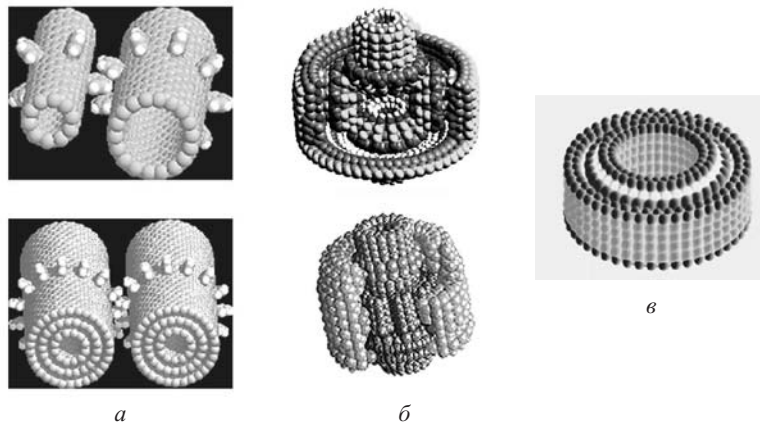


Рис. 1.4. Молекулярные устройства Дрекслера: «зубчатая передача» (а), более сложная «зубчатая система» (б), подшипник (в)

Но, в сущности, несмотря на детальное обсуждение возможностей создания молекулярных устройств, все, что рассматривал Эрик Дрекслер, напоминало скорее научную фантастику типа Жюль Верна, а не обоснованное «техническое задание» на разработку. Об этом писал в предисловии к книге

«Машины создания» и Марвин Минский, проводя аналогию между предложениями Дрекслера и идеями Жюль Верна, Герберта Уэллса, Фредерика Пола, Роберта Хейнлайна, Айзека Азимова и Артура Кларка. Дрекслер мысленно конструировал аналоги макроскопических устройств, используя в качестве «строительного материала» наноэлементы, включая отдельные атомы и молекулы. Но при этом, находясь на уровне представлений 60–70-х годов, он не мог предусмотреть целый ряд возможных принципиальных ограничений и наметить конкретные пути формирования устройств. Не обсуждалась практически и проблема микро- макро- интерфейсов, т. е. проблема взаимодействия человека и микроустройства.

В то же время быстрый прогресс ряда областей человеческой деятельности и, прежде всего, полупроводниковой электроники, естественным образом приводил к необходимости использовать нанотехнологические принципы. В ряде технологических областей начала создаваться нанотехнологическая база. И, по-видимому, наиболее важным событием явилось создание в 80-е годы сканирующей туннельной, а затем атомной силовой микроскопии. Это дало возможность не только увидеть объект с атомным разрешением, но и манипулировать атомами и молекулами.

Еще подробности: прежде чем что-то сформировать на наноуровне, нужно научиться видеть, что делаешь. Для того, чтобы создавать объекты микро- и наноразмеров, необходимо, естественно, иметь возможность определять их характеристики — форму и структуру, брутто-состав и состав их локальных областей. Возможности широко распространенной оптической микроскопии ограничены ее невысокой разрешающей способностью, которая определяется длиной волны видимого света. Поэтому предельное разрешение составляет $\sim 0,0002$ мм, а достигаемое увеличение не превышает 500–1000-кратного.

В отличие от светового излучения электронный пучок оказывается эффективным средством изучения структуры вещества на микро- и наноуровне. В зависимости от энергии электрона отвечающая ему длина волны может составлять 10^{-2} – 10^{-3} нм при не очень высоком ускоряющем электронах напряжении (десятки тысяч вольт). Процессы взаимодействия электронов с веществом отличаются значительным разнообразием. Пусть пучок ускоренных электронов падает на достаточно тонкий слой вещества (рис. 1.5). Часть из них упруго рассеивается. Кроме этого, в результате взаимодействия электронов с атомами вещества возникает люминесценция в видимой области спектра, рентгеновское излучение и отраженные вторичные электроны, выбитые из атомов объекта. Часть вторичных электронов, так называемые

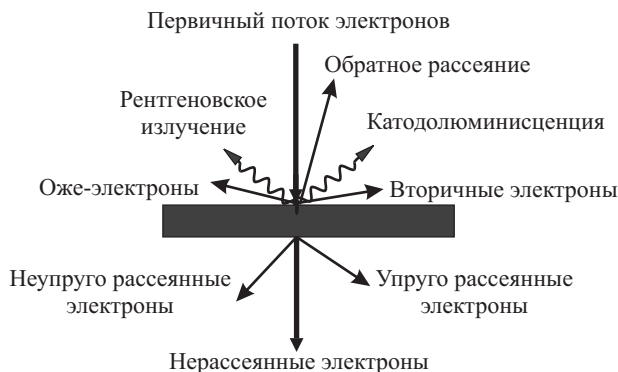


Рис. 1.5. Механизмы взаимодействия пучка электронов с веществом

Оже-электроны, дают возможность определять состав приповерхностных слоев и даже найти распределение того или иного химического элемента на поверхности изучаемого объекта. Существенное количество падающих на объект электронов проходит через него, не рассеиваясь и не теряя своей энергии, а часть из них при этом упруго и не упруго, т. е. с потерей энергии рассеивается.

В просвечивающем электронном микроскопе электроно-оптическая система создает монохроматизированный и сфокусированный электронный пучок, который проходит через исследуемый образец (рис. 1.6). Полученное в результате взаимодействия электронов и образца распределение электронов фокусируется проекционной системой на флуоресцирующий экран или же на фотопластинку. Иногда говорят, что просвечивающий микроскоп действует как слайд-проектор, у которого вместо светового потока и слайда — пучок электронов и исследуемый образец. Разрешающая способность просвечивающего микроскопа может быть доведена до нескольких десятых нанометра. В качестве примера на рис. 1.7 изображение, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа, сравнивается с тем же изображением атомно-силового микроскопа. Но при этом, чем выше разрешающая способность просвечивающего микроскопа, тем меньше должна быть длина волны электронов, а это требует повышать их энергию. В свою очередь, повышение энергии падающих на образец электронов приводит к ослаблению их взаимодействия с веществом и, прежде всего, с легкими атомами. Поэтому полученное изображение теряет контраст. Были разработаны различные приемы улучшить изображение, полученное электронами высокой энергии. Например, можно напылять на исследуемый объект тонкий слой тяжелых атомов, таких как атомы вольфрама. Но это, естественно, в общем случае искажает полученную информацию.

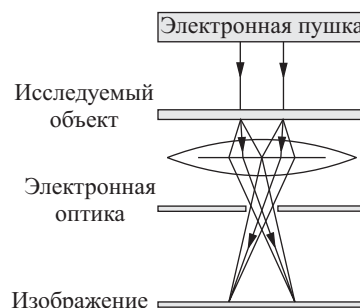
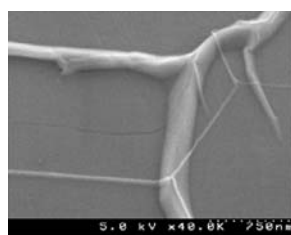
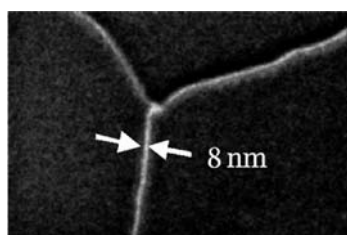


Рис. 1.6. Принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа



Просвечивающий
электронный микроскоп



Атомно-силовой микроскоп

Рис. 1.7. Изображение нанонити меди, полученное просвечивающим электронным и атомно-силовым микроскопом

В существенной степени выходом из этой ситуации было создание растрового электронного микроскопа (рис. 1.8). В нем электронный пучок отражается от поверхности исследуемого образца, и возникающая при этом картина регистрируется электроно-оптической системой. Растровый электронный микроскоп позволяет получать контрастные изображения объектов. Как типичные примеры на рис. 1.9 показаны:

- голова москита с увеличением в 200 (а) и 1000 (б) раз,
- кровь птицы (в),
- кристаллические дендриты серебра (г).

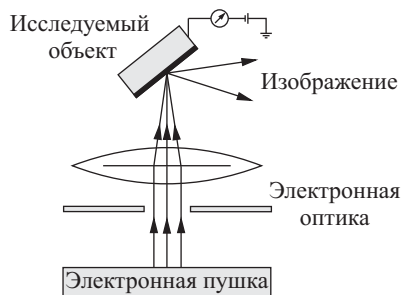


Рис. 1.8. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа

Но разрешающая способность растровых электронных микроскопов по сравнению с просвечивающими оказывается намного ниже. Минимальные размеры регистрируемых структурных особенностей составляют всего лишь несколько нанометров.

Различные варианты электронных микроскопов были доведены к 70–80-м гг. прошлого столетия до удобных в эксплуатации коммерческих установок. Тем не менее они не могли обеспечивать потребности нанотехнологических исследований. Резкий перелом произошел в начале 80-х, когда был создан сканирующий туннельный микроскоп.

В 1981 г. сотрудники исследовательской лаборатории компании IBM в Цюрихе — Герд Бинниг (G. Binnig) и Хейнрих Рорер (H. Rohrer) — создали первый сканирующий туннельный микроскоп. О значении этой работы можно судить хотя бы по тому, что за нее они получили всего лишь через пять лет, в 1986 г., Нобелевскую премию по физике, совместно, что примечательно, с Эрнстом Руска (E. Ruska), который был награжден «за его фундаментальные работы по электронной оптике и за разработку первого электронного микроскопа».

В основу конструкции Биннига и Рорера был заложен квантовомеханический принцип туннелирования электронов через непроводящий барьер.

Квантовомеханический туннельный эффект — это процесс, благодаря которому частицы просачиваются через потенциальный барьер и оказываются в областях, которые в классической механике были бы недоступны для них. Пусть имеется частица, удерживаемая в потенциальной яме барьером конечной высоты и ширины. Предположим, что энергия частицы такова, что если исходить из законов классической механики, ее недостаточно, чтобы частица вышла из ямы, пройдя над потенциальным барьером. Квантовомеханическое рассмотрение этой задачи показывает, что существует некоторая вероятность туннельного прохождения частицы

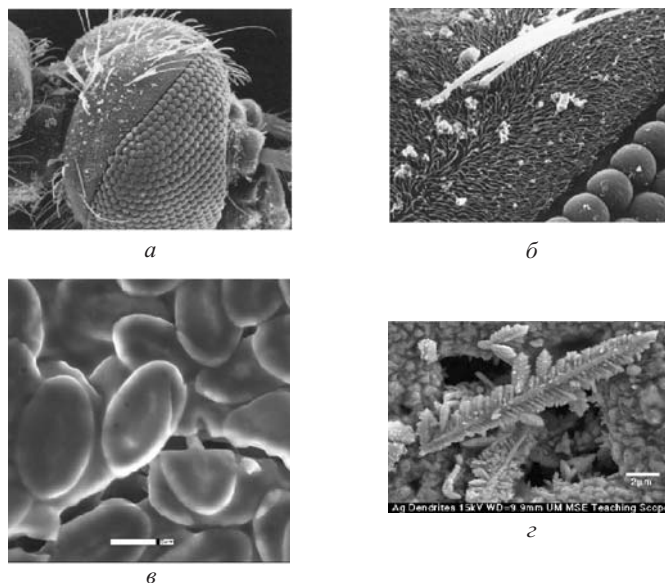


Рис. 1.9. Изображения, полученные растровым электронным микроскопом (объяснения в тексте)

сквозь барьер и ее выхода из ямы. Возможность туннельного прохождения вытекает из требования непрерывности волновой функции на стенках ямы. Если амплитуда волновой функции не равна нулю на внутренней границе барьера (а это допустимо при условии, что потенциал в этой точке не обращается в бесконечность), она не может просто так исчезнуть внутри барьера. Вместо этого она начинает более или менее быстро стремиться к нулю (рис. 1.10). Если спадание амплитуды происходит не слишком быстро, она может и не достигнуть нулевого значения на внешней границе

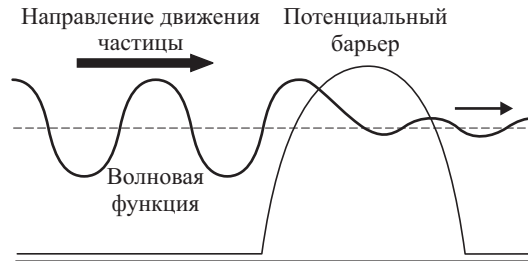


Рис. 1.10. Схема туннелирования электронов через потенциальный барьер

барьера. В этой точке волновая функция должна плавно переходить в функцию, характерную для свободной частицы вне барьера, и, начиная с этой точки, волна перестанет затухать. Но поскольку волновая функция не исчезла в области снаружи барьера, вероятность найти частицу в этой области отлична от нуля, т. е. частица совершает туннельное прохождение наружу из потенциальной ямы.

Сканирующий туннельный микроскоп представляет собой систему — игла с предельно тонким острием и исследуемый образец, к которому приложено постоянное напряжение (рис. 1.11). Расстояние между острием иглы и образцом регулируется

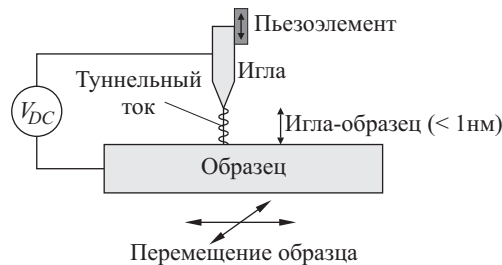


Рис. 1.11. Принципиальная схема сканирующего туннельного микроскопа

пьезоэлементом. Если это расстояние довести до величины $\sim 1 \text{ нм}$, между иглой и образцом возникает туннельный ток, который резко зависит от расстояния игла—образец. Поэтому, перемещая образец относительно острия иглы, можно зарегистрировать величину тока, отвечающего каждой точке поверхности образца. Эта зависимость отвечает рельефу его поверхности.

Недостаток такого варианта микроскопа состоит в том, что туннельный ток резко зависит от расстояния острие иглы—образец, и это затрудняет измерение тока. Поэтому в разработанных туннельных микроскопах применяется и другой метод записи рельефа поверхности. В этом случае туннельный ток поддерживается постоянной системой, которая управляет пьезоэлементом, изменяя расстояние острия до поверхности образца (рис. 1.12).

Создание сканирующего туннельного микроскопа было революционным событием, позволившим изучать структуру поверхности твердых тел и образований на такой поверхности, различая отдельные атомы. О возможностях этого метода можно составить представление по изображениям поверхности платины, на которой наблюдаются

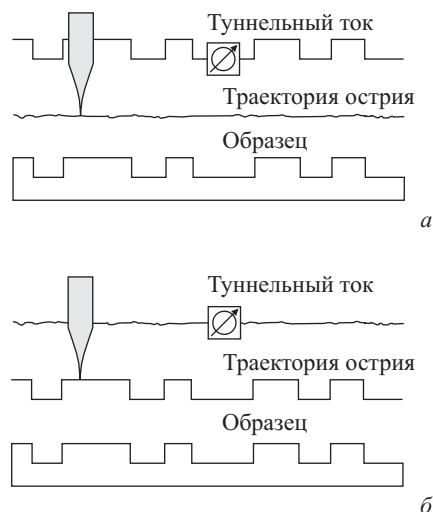


Рис. 1.12. Схема регистрации туннельного тока: постоянное расстояние острие—образец (а), постоянное значение тока (б)

вакансии (рис. 1.13) или же отожженной пленки декантиола на золотой подложке. Техника сканирующей туннельной микроскопии позволяет получать уникальную информацию о процессах, протекающих на твердой поверхности. В частности, была изучена диффузия атомов и молекул на поверхности, обнаружены новые стадии каталитических процессов. В то же время возможности туннельной микроскопии значительно шире, чем только изучение структурных особенностей поверхностных явлений. Эта техника успешно используется для перемещения по поверхности отдельных атомов и молекул и формирования на этой основе сложных атомных и молекулярных структур.

Пусть на поверхности кристалла адсорбирован атом, вблизи которого находится острие иглы туннельного микроскопа. В поле этого острия возникает сила, притягивающая атом к острию. Нормальная по отношению к поверхности и тангенциальная составляющие этой силы будут различными в зависимости от взаимного расположения атома и иглы (рис. 1.14). Поэтому, если острие сдвигается вдоль поверхности, атом начинает передвигаться по поверхности «скачками», из одного энергетического минимума поверхности кристалла в другой. Этот эффект использовали в 1990 г. сотрудники исследовательского отделения компании IBM в Сан-Йозе (Калифорния) Эйглер (D. Eigler) и Швейцер (E. K. Schweizer). Они передвинули по поверхности

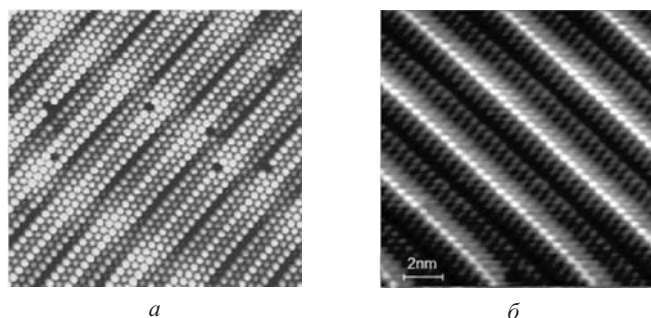


Рис. 1.13. Структура поверхности монокристалла платины (а) и отожженной пленки декантиола (б) на золотой подложке, полученная сканирующим электронным микроскопом

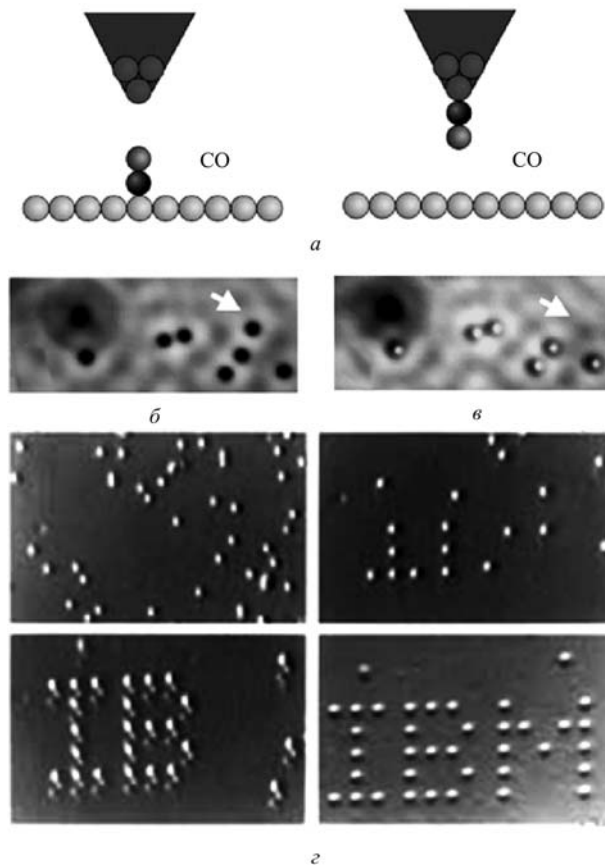


Рис. 1.14. Перенос молекулярных фрагментов сканирующим электронным микроскопом: *а* — принципиальная схема, *б* и *в* — передвижение отдельных атомов, *г* — первая надпись, выполненная в лаборатории IBM атомами вольфрама

монокристалла никеля 35 адсорбированных атомов ксенона так, что они образовали на поверхности три буквы — IBM (рис. 1.14). С тех пор в различных лабораториях было сформировано на твердых поверхностях с помощью туннельного микроскопа множество различных структур (Бранденбургские ворота, загон для скота, треугольники и т. д.). В 1991 г. Эйглер, Лунц и Рудт предложили также поверхностную конструкцию бистабильного элемента, в котором переключение осуществлялось за счет перехода атома ксенона на поверхности монокристалла никеля из одного устойчивого состояния в другое. К сожалению, наноэлементы такого типа, которые могли бы быть использованы на практике, до сих пор разработаны не были.

Возможности реорганизации поверхностных атомных и молекулярных структур не исчерпываются пространственной перестройкой. Воздействие иглы спектрометра может приводить к диссоциации молекулы на атомы или же молекулярные фрагменты.

Сканирующая туннельная микроскопия играет важную роль в исследованиях структуры поверхности твердого тела. Но, в то же время, она обладает существенным недостатком — объектами исследования могут быть только проводящие электрический ток материалы. Поэтому всего лишь через несколько лет после создания туннельного микроскопа, в 1985 г., сотрудники компании IBM Бинниг и Гербер в Цюрихе и Кэит, профессор Станфордского университета в Калифорнии, разрабо-

тали сканирующий микроскоп атомного разрешения, позволяющий изучать непроводящие объекты. В этом микроскопе изображение создается за счет взаимодействия острия иглы с атомами поверхности исследуемого образца. Но при этом используется отличный от туннелирования квантовый эффект взаимодействия атомов на малых расстояниях, так называемые дисперсионные силы. Эта сила является одной из самовозбуждающихся сил и возникает из-за корреляции флуктуаций электронной плотности атомов или молекул. Флуктуация в атоме (молекуле) может вызвать появление у него мгновенного дипольного момента. Этот диполь поляризует электронную оболочку соседнего атома и при малых расстояниях приводит к появлению у соседнего атома локального дипольного момента. Взаимодействие индуцированных моментов вызывает притяжение атомов, которое подавляется при приближении атомов друг к другу из-за отталкивания их электронных оболочек. Механизм появления такой самовозбуждающейся силы был рассмотрен в начале 30-х годов английским физиком Лондоном и получил название дисперсионного взаимодействия. Его называют также ван-дер-ваальсовым взаимодействием.

Атомный силовой микроскоп использует дисперсионное взаимодействие атомов острия иглы и поверхности исследуемого образца (рис. 1.15). Игла закрепляется на

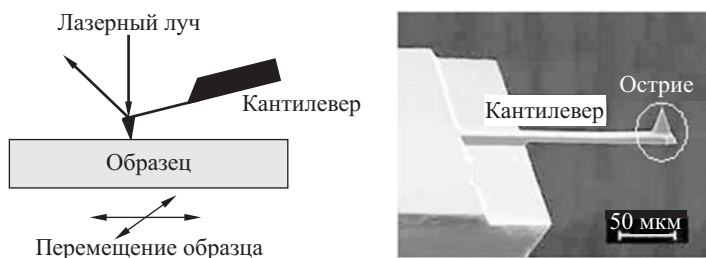


Рис. 1.15. Принципиальная схема атомно-силового микроскопа

упругой поддержке, которую принято называть английским словом «кантилевер», хотя общеизвестны русские аналоги этого термина — «кронштейн, консоль, укосина». Смещение острия за счет дисперсионного взаимодействия описывается законом Гука, т. е. оно определяется силой дисперсионного взаимодействия и упругостью кантилевера. Один из распространенных способов его регистрации основан на отражении лазерного луча от кантилевера и регистрации его матрицей фотодиодов.

Атомная силовая микроскопия представляет собой сегодня мощный метод изучения структуры разнообразных и, в том числе, биологических объектов и широко используется в исследовательской практике. Как типичные примеры, на рис. 1.16 показаны:

- углеродные нанотрубки (2×2 мкм) (а),
- натуральная резина (20×20 мкм) (б),
- кристаллиты MoO_3 на поверхности MoS_2 (8×8 мкм) (в),
- хроматин — комплекс, входящий в состав хромосом и состоящий из белков и ДНК (400×400 нм) (г).

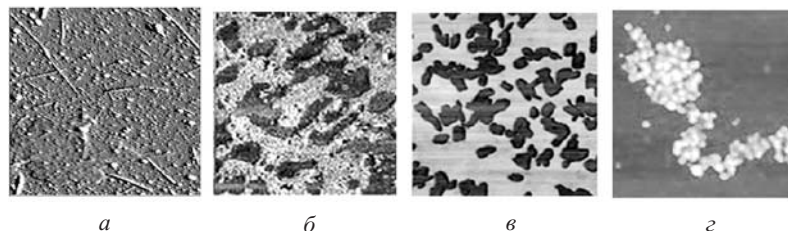


Рис. 1.16. Изображения, полученные атомно-силовым микроскопом (объяснения в тексте)

1.3. Нанотехнология выходит на государственный уровень

Переломным, знаковым событием в становлении нанотехнологии как самостоятельной области была разработка в США документа, который назывался «Национальная нанотехнологическая инициатива. Путь к следующей промышленной революции». Формально этот документ был отчетом Межотраслевой рабочей группы по нанонауке, инженерии и технологии Комитета по технологии при Национальном совете по науке и технологии США и рассматривался как обоснование бюджета на 2001 г., внесенного в Конгресс Президентом США. В состав Рабочей группы входили представители ведущих ведомств США, включая Национальный научный фонд, министерства обороны, торговли, энергетики, транспорта, Национальная администрация по аэронавтике и космосу, Национальный институт здравоохранения и ряд других ведомств. По своему значению этот раздел бюджета рассматривался на уровне высшего приоритета развития науки и технологии. В сопровождающей бюджет записке Президент США Билл Клинтон писал:

«Мой бюджет поддерживает расходы на Национальную нанотехнологическую инициативу в объеме 500 млн долларов США... Это способность манипулировать веществом на атомном и молекулярном уровне. Представьте себе возможности: материалы в десять раз прочнее стали и только лишь малая доля веса стали, сжатие всей информации, хранимой в библиотеке Конгресса, до размера кубика сахара — обнаружение раковых опухолей, когда они содержат всего лишь несколько клеток. Что-то из этих задач потребует для своего решения до 20 или более лет, но именно поэтому так важна роль федерального правительства».

Практически с того момента, когда этот документ увидел свет, он превратился в концепцию индустриального развития США. В основе этого лежит не только значительное увеличение финансирования работ, но и в не меньшей степени глубина охвата проблемы в целом.

Документ определяет практически все основные аспекты деятельности в области нанотехнологии. Среди них можно выделить ряд принципиально важных положений.

Авторы документа предлагают подробное определение сущности и принципиальных задач нанотехнологии:

«Сущностью нанотехнологии является возможность работать с веществом на молекулярном уровне, формируя атом за атомом молекулярную структуру, имеющую принципиально новую молекулярную организацию. Поведение структурных особенностей в области от 10^{-9} до 10^{-7} м (от 1 до 100 нм — типичные размеры порядка 10 нм в 1000 раз меньше диаметра человеческого волоса) существенно отличается от поведения изолированной молекулы с размерами порядка 1 нм или же макроскопического объема материала. Нанотехнология имеет дело с материалами и системами, структура и компоненты которых проявляют новые, и значительно лучшие физические, химические и биологические свойства, явления и процессы, обусловленные наноразмерами. Целью является использование этих свойств, контролируя структуры и устройства на атомном, молекулярном и супрамолекулярном уровне, и изу-

чать возможности производства и применения этих устройств. Другая цель заключается в интеграции этих структур на микро- и макроуровнях».

Документ выдвигает первоочередные задачи (великие вызовы) ближайшего времени:

- резко уменьшить размеры элементов электронных устройств хранения информации и создать память много-тера-битовой емкости;

- разработать методы формирования материалов «снизу-вверх», т. е. начиная с атомов и молекул, что должно уменьшить расход сырья и загрязнение окружающей среды;

- создать материалы, имеющие прочность на порядок выше чем прочность стали, и, в то же время, намного более легкие, что позволит разрабатывать наземные, морские, воздушные и космические объекты более легкими, с меньшим потреблением топлива;

- поднять быстродействие и эффективность компьютеров за счет уменьшения в миллион раз размеров транзисторов и элементов чипов памяти;

- использовать доставку генетических и лекарственных препаратов кровеносной системой в сочетании с наномодифицированными усилителями контраста магниторезонансных детекторов для определения раковых клеток;

- удалять мельчайшие загрязнения воды и воздуха для улучшения состояния окружающей среды и питьевой воды;

- удвоить энергетическую эффективность солнечных батарей.

В состав документа «Национальная нанотехнологическая инициатива» были включены два приложения. Первое из них установило основные принципы финансирования в 2001 г. фундаментальных исследований инфраструктуры, необходимой для успешного их выполнения. Определяя направления фундаментальных исследований, авторы документа исходили из того, что: «нанонаука находится еще в состоянии своего детства, и только некоторые рудиментарные наноструктуры могут быть созданы и проконтролированы. Наука об атомах и простых молекулах, с одной стороны, и представления о веществе от микронных структур до больших размеров объекта, с другой, установлены достаточно хорошо. Остается область наноразмеров, грубо говоря, от 1 до 100 молекулярных размеров, где фундаментальные свойства материалов могут быть изучены и использованы для инженерных разработок. В науке и технологии наступает революция, основанная на появившейся в последние годы возможности измерять, формировать и манипулировать веществом в области от 1 до 100 нм (10^{-9} – 10^{-7} м) и на понимании важности контролировать свойства вещества на уровне наноразмеров почти во всех областях человеческой деятельности. Открытые недавно организованные структуры вещества (такие как нанотрубки, молекулярные моторы, комплексы ДНК, квантовые ямы и молекулярные переключатели) и новые явления (магнитосопротивление и размерные ограничения) являются научными прорывами, которые определяют потенциал дальнейшего развития нанотехнологии. Они производят и используют функциональные материалы, устройства и системы, контролируя вещество на этом уровне».

На основе этих представлений в Приложении 1 детально расшифрованы конкретные направления нанотехнологических исследований высшего приоритета (великие вызовы). Они направлены на: создание новых материалов,

развитие электроники и оптоэлектроники, совершенствование медицины и охраны окружающей среды, разработку средств преобразования и сохранения энергии, индустриализацию космических исследований, развитие биосенсоров для диагностики болезней и биологических угроз, укрепление национальной безопасности и использование нанотехнологических идей в экономике и транспорте.

Предложенная администрацией США нанотехнологическая инициатива практически удвоила финансирование этих работ в 2001 г. по сравнению с 2000 г. Основными ведомствами — исполнителями работ, были определены:

- Национальный научный фонд (NSF),
- Министерство обороны (DOD),
- Министерство энергетики (DOE),
- Национальная администрация по авиации и космосу (NASA),
- Национальный институт стандартов и технологии (NIST) Министерства торговли (DOC),
- Национальный институт здравоохранения (NIH).

Таблица 1.1

Финансирование ведомств США в рамках программы «Национальная нанотехнологическая инициатива»

Ведомство	2001	2002	2003	2006	2007
Национальный научный фонд	150	199	221	344	373
Министерство обороны	123	180	201	436	345
Министерство энергетики	88	91	139	207	258
Министерство юстиции	1,4	1,4	1,4	1	1
Министерство транспорта	0	2	2		
Агентство по охране окружающей среды	5	5	5	5	9
НАСА	22	46	51	50	25
Национальный институт здоровья	40	41	43	175	173
Национальный институт стандартов и технологии	33	38	44	76	86
Министерство сельского хозяйства	1,5	1,5	2,5	2	2
Всего	464	604	710	1301	1277

Распределение финансирования по этим ведомствам показано в табл. 1.1. По сравнению с 2000 г. (\$ 270 млн) в 2001 г. оно увеличилось более чем вдвое, с существенным ростом в последующие годы.

Принципиальным достижением разработанной программы были предложения по созданию инфраструктуры нанотехнологических исследований, детально рассмотренные в Приложении 1. Для этого предусматривается:

- создание сети центров коллективного пользования, оснащенных современной научно-исследовательской аппаратурой, которая должна усилить возможности различных исследовательских групп и существенно облегчить их работу.
- финансирование вспомогательных работ, включающих в себя метрологию, разработку новых приборов, методов и средств моделирования.

— создание этической, законодательной и социологической базы и образовательных учреждений, что необходимо для привлечения квалифицированной рабочей силы в эту новую перспективную область деятельности.

В табл. 1.2 приведено финансирование работ 2001 г. по различным разделам Приложения 1 Национальной нанотехнологической инициативы.

Приложение 2 к документу «Национальная нанотехнологическая инициатива» посвящено нанотехнологическим устройствам, разработанным на протяжении предыдущих лет. Среди них — магниторезистивные материалы для жестких дисков с высокой плотностью записи информации, наноструктурированные катализаторы, средства доставки лекарственных препаратов по кровеносной системе человека, металло-полимерные композиты, биодетекторы сибирской язвы, устройства для опреснения воды, оперативная память ЭВМ на основе молекул ротаксана.

Таблица 1.2

**Финансирование основных разделов программы
«Национальная нанотехнологическая инициатива»**

Раздел	2000	2001
Фундаментальные исследования	87	170
Великие вызовы	71	140
Центры коллективного пользования	47	77
Исследовательская инфраструктура	50	80
Правовые, социальные, этические аспекты	15	28
Итого	270	495

Программа «Национальная нанотехнологическая инициатива» была принята Конгрессом США, и начиная с 2001 г. резко возросли ассигнования на нанотехнологические исследования и инженерные разработки (см. табл. 1.2). В 2006 г. они увеличились более чем вдвое по сравнению с исходным 2000 г. Во многом эта программа оказалась в последующие годы стимулом для признания и бурного развития нанотехнологии не только в США, но и практически во всех промышленно развитых странах.

Часть II

«ЕСТЬ ЕЩЕ МНОГО МЕСТА В САМОМ НИЗУ». ВОЗМОЖНОСТИ И СЛЕДСТВИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня «Роллс-Ройс» мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина.

Гордон Мур

Глава 2

ПУТИ В НАНОТЕХНОЛОГИЮ

2.1. Вакуумные электронные лампы, транзисторы, планарные чипы в вычислительной технике

2.1.1. Немного об истории вычислительных средств

Как только люди начали осознавать себя разумными существами, у них появилась потребность описать окружающий мир — считать все, что попадает на глаза. Естественным был и выбор системы счисления. Десять пальцев на руках, десять — на ногах были решающим доводом в пользу интуитивно выбранной десятичной системы. Так осталось и до сих пор. Менялись время от времени знаки, обозначающие цифры, но сама система осталась до сих пор практически везде именно этой, психологически наиболее приемлемой для нас.

По-видимому, очень скоро пальцев на руках и ногах перестало хватать, и встал вопрос об инструментах, облегчающих вычисления. Развитие вычислительной техники — многовековой процесс, в котором принимали участие гениальные представители человеческого общества (см. прекрасные обзоры Б.Н. Малиновского и Б.А. Гладких). Известно, что великий Леонардо да Винчи предложил конструкцию суммирующей вычислительной машины, которая была воспроизведена в металле только в наши дни и оказалась вполне работоспособной. Эта машина могла оперировать с 13-разрядными десятичными числами. Сложение производилось системой зубчатых колес.

Немного подробностей: механические вычислители. Принципиальная идея такого устройства показана на рис. 2.1. Пусть каждому разряду произвольного десятичного числа отвечает ось, на которую насажены два зубчатых колеса с разным числом зубцов. Пусть на каждой оси выбрано исходное положение относительно ее поворота, отвечающее цифре «0». Остальные цифры отвечают последовательным поворотам оси на 36° . При передаточном числе пары зубчатых колес на разных соседних осях, равном 1:10, нужно 10 раз повернуть на 36° ось, отвечающую единицам, для того, чтобы ось, отвечающая десяткам, повернулась бы на одну позицию. Эта конструкция позволяет набрать любое разрешаемое количеством осей системы число, прибавлять или вычитать из него любое другое. Механические системы, основанные на зубчатых передачах, совершенствовались и использовались практически до середины прошлого века. Еще в 50-х гг. на вооружении Советской Армии была система ПУАЗО (прибор управления артиллерийским зенитным огнем), которая определяла поправки на скорость обстреливаемого самолета, влажность и температуру воздуха и т. д. при управлении зенитным огнем. Она представляла собой передвижной куб со сторонами порядка метра, напичканный шестернями, червячными передачами, электромоторами и т. д.

На протяжении последующих после Леонардо да Винчи веков развитием вычислительной техники занимались выдающиеся ученые разных стран — Блез Паскаль, Готфрид Лейбниц, Чарльз Бэббидж. Тем не менее, к тому времени, когда сложные, громоздкие вычисления стали жизненно необходимыми, уровень вычислительной техники оказался явно недостаточным для решения наиболее насущных задач. Этим временем была Вторая мировая война, когда совершенствование и разработка новых видов оружия привели к неподъемным для того времени потребностям в вычислениях.

В 1941 г. сотрудники лаборатории баллистических исследований Абердинского артиллерийского полигона в США обратились в расположенную неподалеку техническую школу при Пенсильванском университете за помощью в составлении таблиц стрельбы для артиллерийских орудий. Они попросили использовать для этого имевшийся в школе дифференциальный анализатор Буша — громоздкое механическое аналоговое вычислительное устройство. Однако сотрудник школы физик Джон Мочли, (J. W. Mauchly) предложил создать для этого мощный по тем временам компьютер на электронных лампах. В апреле 1943 г. был заключен контракт между полигоном и Пенсильванским университетом на создание вычислительной машины, названной электронным цифровым интегратором и компьютером (ENIAC). На это отпускалось 400 тыс. долларов. К работе было привлечено около 200 человек, в том числе несколько десятков математиков и инженеров. Руководителями работы стали Дж. Мочли и талантливый инженер-электронщик Преспер Экерт (J. P. Eckert). Напряженная работа завершилась в конце 1945 г. ENIAC был представлен на испытания и успешно их выдержал. В начале 1946 г. машина начала считать реальные задачи. По размерам она была более чем впечатляющей: 26 м в длину, 6 м в высоту, вес 35 т. В ней использовалась десятичная система счисления. Длина слов — 10 десятичных разрядов. Емкость электронной памяти — 20 слов. Ввод программ — с коммутационного поля, что вызывало массу неудобств: смена программы занимала многие часы и даже дни (рис. 2.2). Поэтому в 1945 г., когда завершались работы по созданию ENIAC, его создатели уже разрабатывали новый электронный цифровой компьютер EDVAC. Они предлагали размещать программы вычислений непосредственно в оперативной памяти компьютера, чтобы устранить основной недостаток ENIAC — ввод с коммутационного поля. Тогда же к ним в качестве консультанта был направлен выдающийся математик, участник Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы Джон фон Нейман. Он сразу же оценил перспективы развития новой техники и принял самое активное участие в завершении работ по созданию EDVAC. Написанная им часть отчета по машине содержала общее описание EDVAC и основные принципы построения машины. Несмотря на то, что в разработке

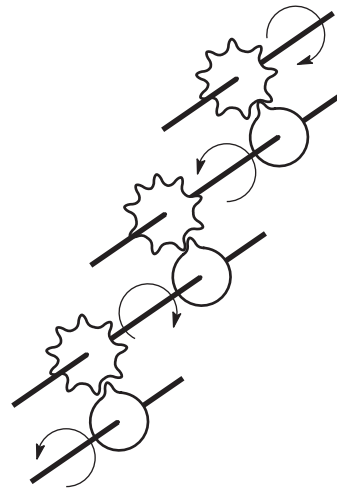


Рис. 2.1. Принципиальная схема механического вычислительного устройства

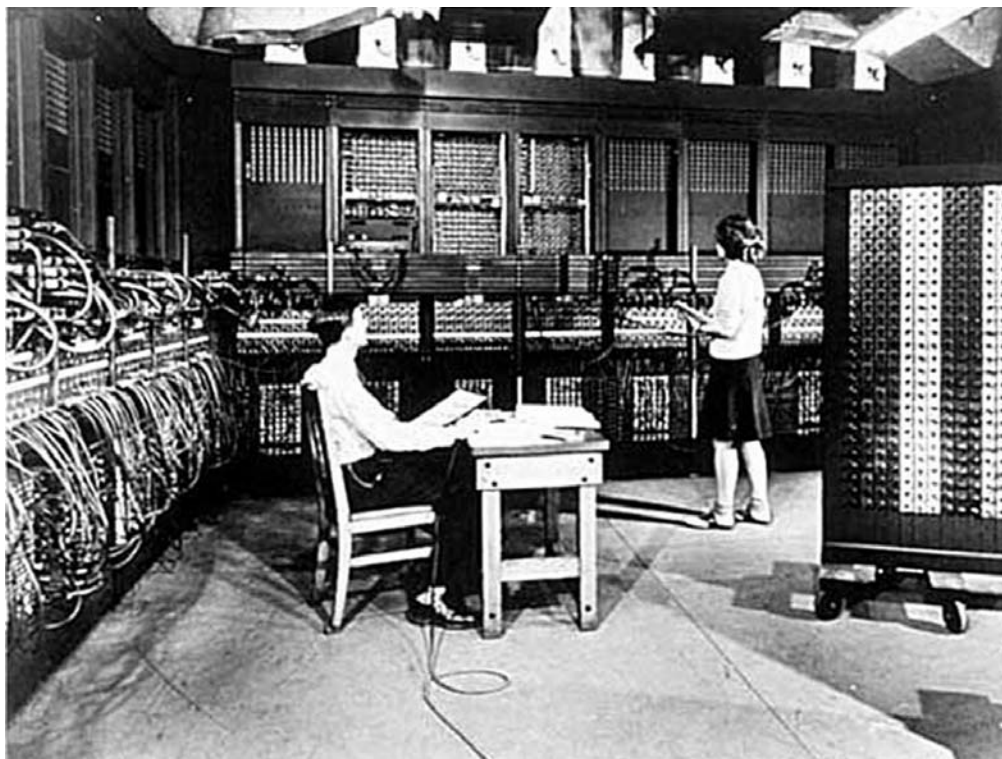


Рис. 2.2. Электронная вычислительная машина ENIAC — ввод исходных данных

этих принципов принимал участие ряд сотрудников, работавших над ENIAC и EDVAC, позже эти принципы получили название «фон-неймановских» (парадигма фон Неймана). Как бы то ни было, создание этих принципов было революционным событием для вычислительной техники, определившим ее дальнейшее развитие.

Не останавливаясь подробно на истории развития цифровых фон-неймановских компьютеров, отметим только несколько значимых вех.

В 1953 г. производство ЭВМ общего назначения начала компания IBM. Серийная IBM-701 имела оперативное запоминающее устройство 2 тыс. 36-разрядных слов. Быстродействие ее составляло $\sim 10\,000$ операций в секунду.

Всего лишь через 6 лет быстродействие ЭВМ IBM-7030, установленной в ядерном центре в Лос-Аламосе, доходило до 1 млн операций в секунду. Операционная память этой машины составляла 256 тыс. 64-битовых слов.

О темпах прогресса вычислительной техники на протяжении второй половины прошлого века можно судить по характеристикам одного из наиболее мощных суперкомпьютеров нашего времени Top-500 Earth Simulator. Он состоит из 640 модулей, каждый из которых содержит 8 процессоров. Теоретический предел производительности — 40 Тфлоп. Система имеет 10 Тбайт оперативной памяти. Здесь флоп (float-point operations per second) — количество операций с плавающей запятой в секунду.

В целом темпы развития вычислительной техники во второй половине прошлого века были фантастическими. Удивительно образно охарактеризовал их Гордон Мур (G. E. Moore) — один из основателей компании Intel и автор известного закона Мура:

«Если бы автомобилестроение развивалось бы со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня «Роллс-Ройс» мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина, и дешевле было бы его выбросить, чем платить за парковку».

В Советском Союзе первая электронная вычислительная машина была создана в 1952 г. под руководством академика С.А. Лебедева. Ею же первая полномасштабная ЭВМ БЭСМ имела быстродействие 8000 операций в секунду и оперативное запоминающее устройство 1 тыс. 39-разрядных слов.

Первая отечественная серийная ЭВМ «Стрела» была построена в 1953 г. под руководством Ю.Я. Базилевского (рис. 2.3). Ее быстродействие составляло 2000 операций в секунду, оперативное запоминающее устройство

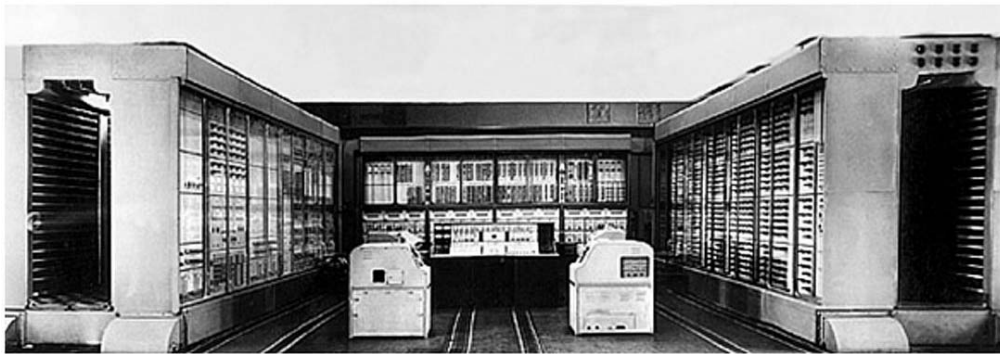


Рис. 2.3. Первая отечественная серийная ЭВМ «Стрела»

было выполнено на потенциоскопах (43-разрядные слова). Занимаемая этой машиной площадь составляла ~ 300 кв. м без холодильного агрегата, который требовал практически такую же площадь.

Большой популярностью среди расчетчиков пользовалась ЭВМ С.А. Лебедева БЭСМ-6, промышленное производство которой было начато в 1968 г. Ее оперативное запоминающее устройство содержало от 32 до 128 тыс. 48-разрядных слов, а быстродействие доходило до 1 млн операций в секунду. До 1987 г. было выпущено 355 экземпляров этой машины.

Знаменательным событием в истории развития вычислительной техники было создание совершенно отличного от общей линии развития 40–70 гг. направления персональных компьютеров. Этому способствовали, по крайней мере, два обстоятельства. Во-первых, в разных областях человеческой деятельности ощущалась настоятельная потребность в вычислительных средствах, достаточно мощных по своим возможностям и в то же время простых в эксплуатации. Во-вторых, электронная промышленность была практически готова к этому. Ряд производственных компаний выпустил на рынок компо-

ненты электронных устройств и, в том числе, сравнительно мощные для того времени микропроцессоры.

Первая попытка объединить компоненты в единый блок была предпринята в 1975 г. фирмой MITS. Она выпустила в продажу комплект под названием «Альтаир», который представлял собой кучу деталей и ящик для корпуса. Покупателю приходилось самостоятельно паять и тестировать собранные узлы и создавать программы вычислений на машинном языке.

Вслед за этим на рынке появился ряд других вариантов простейших электронных вычислительных устройств. Но начало реальной истории нового направления персональных компьютеров связано с именами американских инженеров-электронщиков Стива Джобса (St. Jobs) и Стива Возняка (S. G. Wozniak).

В начале 70-х Джобс работал в фирме «Atari», где он познакомился со старшим разработчиком этой фирмы Роном Вейном (R. Wayne). Они, вместе с Возняком, который работал в это время в компании «Hewlett-Packard», по ночам, в гараже, собирали персональный компьютер, который они назвали «Apple-1». Вскоре, 1 апреля 1976 г., они создали фирму «Apple Computer». Становление этой фирмы проходило с большими трудностями. Постоянная нужда в финансировании, осторожное отношение потребителей к этому новому направлению и ряд других факторов привели к тому, что из фирмы ушел Рон Вейн. Тем не менее после первой модели «Apple-1», которая была встречена прохладно, Джобсом и Возняком был создан компьютер «Apple-2», имевший фантастический успех. И как следствие того, к производству персональных компьютеров подключились крупные компании. В начале 80-х компания IBM выпустила в продажу модель 5150, простенько назвав ее IBM PC, введя тем самым повсеместно употребляемое сегодня название «персональный компьютер».

И теперь трудно найти хотя бы одну область человеческой деятельности, где не применялись бы эти удивительные вычислительные средства, предоставляющие пользователю широкие возможности — от мощных вычислений до расслабляющих развлечений.

На протяжении второй половины прошлого века вычислительная техника шла по пути постоянного наращивания информационной мощности. Особенностью этого процесса было сохранение основных принципов построения вычислительных устройств и неуклонного совершенствования реализующей эти принципы элементной базы. В свою очередь, развитие элементной базы сопровождалось и сменой физических принципов, определявших механизмы функционирования элементов, и их последовательной миниатюризацией, в результате чего приходилось менять технологию производства.

Немного подробностей: парадигма фон Неймана и ее реализация. Содержание парадигмы фон Неймана сводится к шести основным положениям.

1. Вычислительные машины, построенные на электронных элементах, должны работать не в десятичной, а в двоичной системе счисления.
2. Программа должна размещаться в одном из блоков машины — в запоминающем устройстве, обладающем достаточной емкостью и соответствующими скоростями выборки и записи команд программы.

3. Программа так же, как и числа, с которыми оперирует машина, представляется в двоичном коде. Таким образом, по форме представления команды и числа однотипны. Это обстоятельство приводит к следующим важным последствиям:
 - промежуточные результаты вычислений, константы и другие числа могут размещаться в том же запоминающем устройстве, что и программа;
 - числовая форма записи программы позволяет машине производить операции над величинами, которыми закодированы команды программы.
4. Трудности физической реализации запоминающего устройства, быстродействие которого соответствовало бы скорости работы логических схем, требуют иерархической организации памяти.
5. Арифметические устройства машины конструируются на основе схем, выполняющих операцию сложения. Создание специальных устройств для вычисления других операций нецелесообразно.
6. В машине используется параллельный принцип выполнения операции над словами. Они производятся одновременно по всем разрядам. В то же время выполнение команд программы (операций ЭВМ) производится последовательно, одна за другой.

Используемая сегодня вычислительная техника отличается большим разнообразием (рис. 2.4). Это и цифровые компьютеры, в которых команды программы, исходные

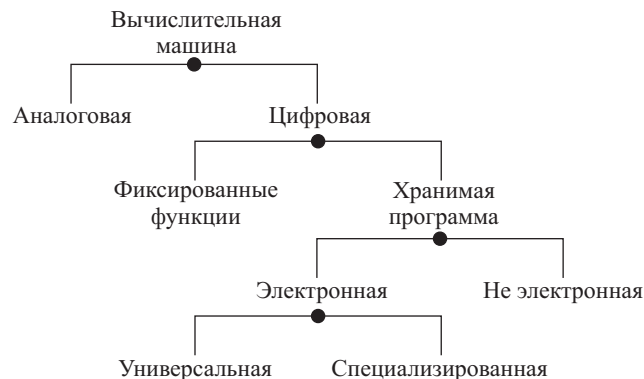


Рис. 2.4. Основные направления вычислительной техники

данные для решения задач и результаты вычислений записываются в памяти в виде наборов двоичных символов, и аналоговые устройства, обрабатывающие непрерывные последовательности значений какой-нибудь физической величины, и специализированные устройства для массовых решений одной единственной задачи или группы сходных задач. Но подавляющее большинство вычислительных средств, которые нас окружают в повседневной жизни — универсальные цифровые ЭВМ. Рассмотрим особенности воплощения фон-неймановских принципов на примере типичного представителя этой категории устройств — персонального компьютера.

Компьютеры этого типа построены по модульному принципу и представляют собой набор отдельных блоков. Для связи их друг с другом используется специальная информационная магистраль — шина. Для создания шин используются обычно плоские многожильные кабели. Совокупность проводов шины разделяется на отдельные группы для передачи адреса кода выполняемой операции, данных, сигналов управления.

Основные блоки компьютера включают в себя (рис. 2.5) запоминающее устройство, арифметико-логическое устройство и устройство управления.

Запоминающее устройство, или память — это совокупность ячеек, предназначенных для хранения информации. Каждой из ячеек присвоен свой номер, называемый адресом. Информацией, записанной в ячейке, могут быть как команды в машин-

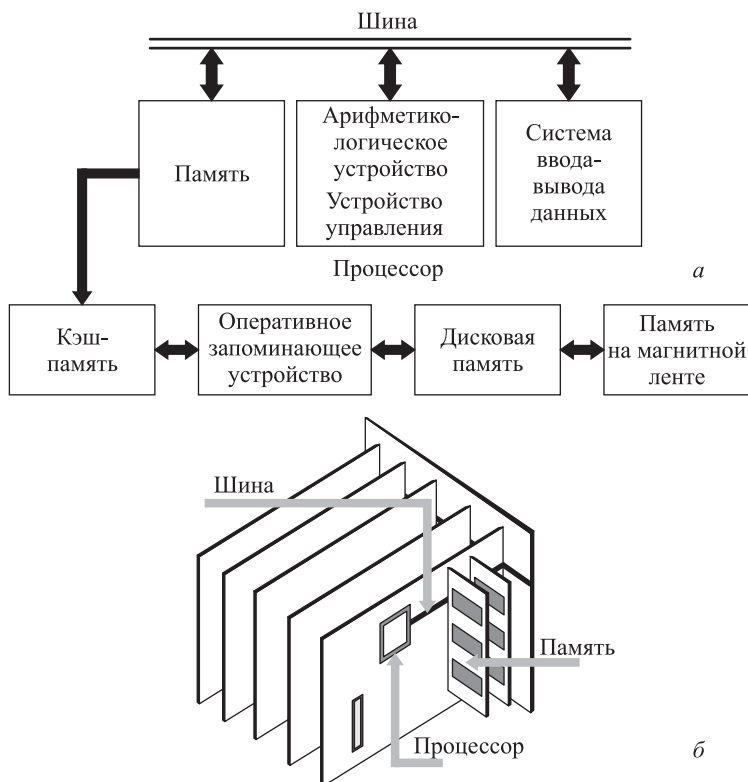


Рис. 2.5. Структура современного персонального компьютера

ном виде, так и данные. Машинная команда — это двоичный код, определяющий выполняемую операцию, адреса используемых операндов (т. е. кодов чисел, над которыми производится операция) и адрес ячейки запоминающего устройства, по которому должен быть записан результат выполненной операции. Устройство памяти современного компьютера имеет иерархическую структуру (рис. 2.5). Основная память — полупроводниковое оперативное запоминающее устройство, у которого скорость считывания—записи данных сопоставимо со скоростью их обработки арифметико-логическим устройством. Для того, чтобы сбалансировать разницу этих скоростей, может быть использована дополнительная, небольшая по объему быстродействующая память. Ее называют кэш-память, в процессорах типа Pentium это 8 тыс. ячеек для кодов и 8 тыс. для данных. В силу технических и экономических факторов емкость оперативного устройства ограничена. Сегодня она достигает нескольких гигабайт. Дальнейшее расширение памяти происходит за счет более медленных запоминающих устройств на магнитных дисках (до сотен гигабайт) и магнитных лентах, емкость которых практически не ограничена.

Все действия в ЭВМ выполняются под управлением сигналов, вырабатываемых устройством управления. Устройство управления формирует адрес команды, которая должна быть выполнена следующей, и выдает управляющий сигнал на чтение содержимого соответствующей ячейки запоминающего устройства. Считанная команда передается в устройство управления. По информации, содержащейся в адресных полях команды, устройство управления формирует адреса операндов и управляющие сигналы для их чтения из запоминающего устройства и передачи в арифметико-логическое устройство. После этого устройство управления выдает в арифметико-логическое устройство сигналы на выполнение операции. Полученный результат записывается

в память машины. Признаки результата (знак, наличие переполнения, признаков нуля и т. д.) поступают в устройство управления, где записываются в специальный регистр признаков. Эта информация может использоваться при выполнении следующих команд программы, например команд условного перехода.

2.1.2. Полупроводниковые приборы — революция в электронике

Гигантский прогресс, который претерпела вычислительная техника на протяжении своего становления, был обусловлен развитием элементной базы вычислительных устройств. Именно она подвергалась на протяжении последнего полувека революционным изменениям, которые привели к современным средствам обработки информации, охватившим сегодня практически все области человеческой жизни и деятельности.

Первым крупным сдвигом в создании цифровых ЭВМ был переход от механических и релейных систем к вакуумным электронным лампам. Теперь уже трудно вспомнить и как выглядели электронные лампы, и что собой представляли изготовленные на их основе радиоприемники, усилители, устройства управления. В стеклянном баллоне лампы, из которого был откачан воздух, впаивались в простейшем случае три электрода — катод, анод и промежуточный между ними электрод, который назывался сеткой. Катод нагревался электрическим током и эмитировал электроны, которые ускорялись к аноду приложенным электрическим полем. При этом они должны были проходить сквозь сетку. Электронная лампа, даже в этом ее наиболее простом трехэлектродном варианте, представляет собой естественное воплощение переключающегося элемента, необходимого для создания логических схем. В зависимости от потенциала на сетке она или пропускает, или не пропускает ток, т. е. представляет собой элемент с двумя устойчивыми состояниями. Поэтому, начиная с ENIAC в разных странах на ламповой основе создавались вычислительные системы. Тем не менее объединение тысяч электронных ламп в едином устройстве требовало больших энергетических затрат и трудоемкого высококвалифицированного обслуживания. Ламповые вычислительные системы были капризными в эксплуатации. Для того, чтобы добиться стабильной работы, на отладку системы уходили дни. Рабочая температура в зале, где размещалась вычислительная машина, составляла иногда 10–15 °С. Поэтому появление полупроводниковой элементной базы резко повысило надежность компьютеров и создало основу для их дальнейшего совершенствования.

Полупроводники не случайно завоевали устойчивые позиции в вычислительной технике. Как известно, в отличие от квантовых объектов типа атомов и молекул, твердые тела обладают зонной электронной структурой.

Для того, чтобы понять основные причины образования зонной структуры, рассмотрим простейшую модель — одномерную цепочку атомов (рис. 2.6). Если бы их было два, то электронные уровни такой системы расщепились бы на две составляющие — связывающую и разрыхляющую орбиталь (см. далее, в гл. 3). При увеличении числа атомов в цепочке степень расщепления уровней увеличивается и в пределе возникают две энергетические зоны, которые называют валентной зоной и зоной проводимости. Они непрерывны, но содержат конечное число электронных состояний. Для целого ряда элементов эти зоны перекрываются (рис. 2.6). Электроны атомов занимают нижние уровни

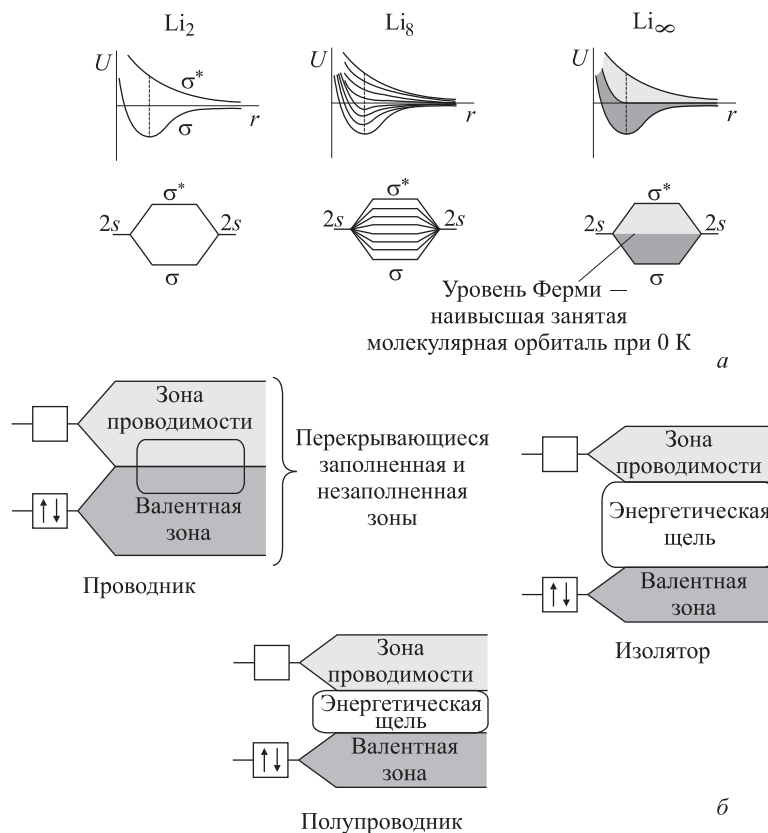
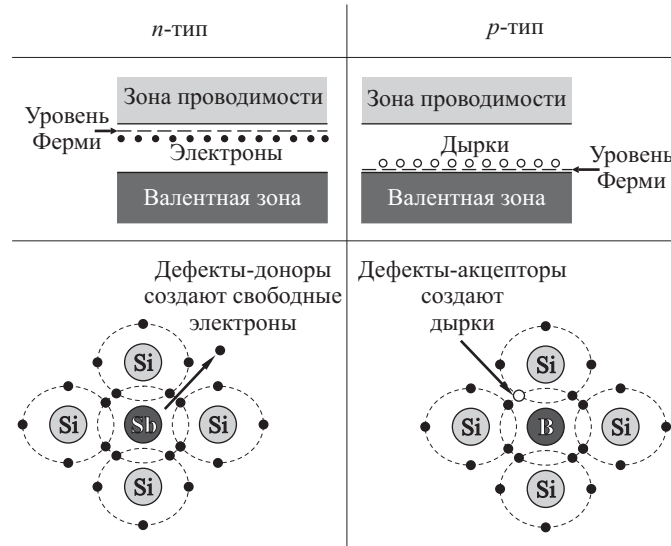


Рис. 2.6. Схема образования зон в цепочке атомов Li (а) и зонная структура проводника, изолятора и полупроводника (б)

валентной зоны. Остальные уровни остаются свободными, и электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости. В системе возникает электронная проводимость. Такой вариант электронной структуры отвечает проводникам электрического тока. В общем случае свойства твердого тела определяются расстоянием между валентной зоной и зоной проводимости, т. е. шириной запрещенной зоны между ними, и заполнением валентной зоны электронами. Если ширина запрещенной зоны велика, а валентная зона заполнена полностью, твердое тело является изолятором. Наиболее интересный вариант — почти полностью заполненная валентная зона и сравнительно малая ширина запрещенной. Он отвечает полупроводниковым свойствам.

Полупроводники, практически не содержащие примесей, называют собственными или беспримесными. В этом случае, если возбудить электрон из валентной зоны в зону проводимости, в валентной зоне появляется положительно заряженная вакансия. Естественно, соседние электроны могут нейтрализовать эту вакансию, но при этом они образуют новую вакансию в другом месте. Таким образом, в полупроводнике появляется положительное, передвигающееся по нему положительное образование — дырка. В собственных полупроводниках носители заряда должны появляться па-

рами (электронно-дырочная пара). Ситуация существенно меняется, если в полупроводник специально введено некоторое количество примесей — легирующих добавок. Будем рассматривать кремний, электронная структура и свойства которого отвечают полупроводнику. Четырехвалентный кремний образует четыре валентных связи с соседними атомами. Если в структуру кристалла кремния ввести трехвалентный бор, одна из связей остается незаполненной (рис. 2.7). Ее может заполнить электрон какого-либо другого соседнего атома кремния, и при этом возникает дырка, находящаяся как

Рис. 2.7. Полупроводники *p* и *n*-типа

раз над валентной зоной. Примеси такого рода называют акцепторами. Эти полупроводники называют полупроводниками *p*-типа. Иная ситуация возникает, когда в кремниевый полупроводник вводится пятивалентный атом легирующей добавки (фосфор или сурьма). Эти атомы имеют пять валентных электронов — на один больше, чем у кремния. Пятый электрон легко отщепляется от содержащего его атома. В результате появляется неподвижный ионный заряд и энергетическое состояние, которое отвечает пятому электрону и лежит несколько ниже зоны проводимости. Такие примеси называются донорными, а полупроводники — полупроводниками *n*-типа.

Замечательные свойства возникают при контакте полупроводников *p*- и *n*-типа. В этом случае в результате больших перепадов концентраций — море дырок с одной стороны и море электронов с другой — возникают большие токи диффузии дырок и электронов. В результате в системе возникают неосновные носители — электроны в полупроводнике *p*-типа и дырки в полупроводнике *n*-типа. Но при этом по направлению к переходу будут подходить и ионы электронно-дырочных пар и возникнет электрическое поле вблизи перехода (рис. 2.8). В свою очередь это поле вызовет токи дрейфа электронов к материалу *n*-типа и дырок к материалу *p*-типа. Если внеш-

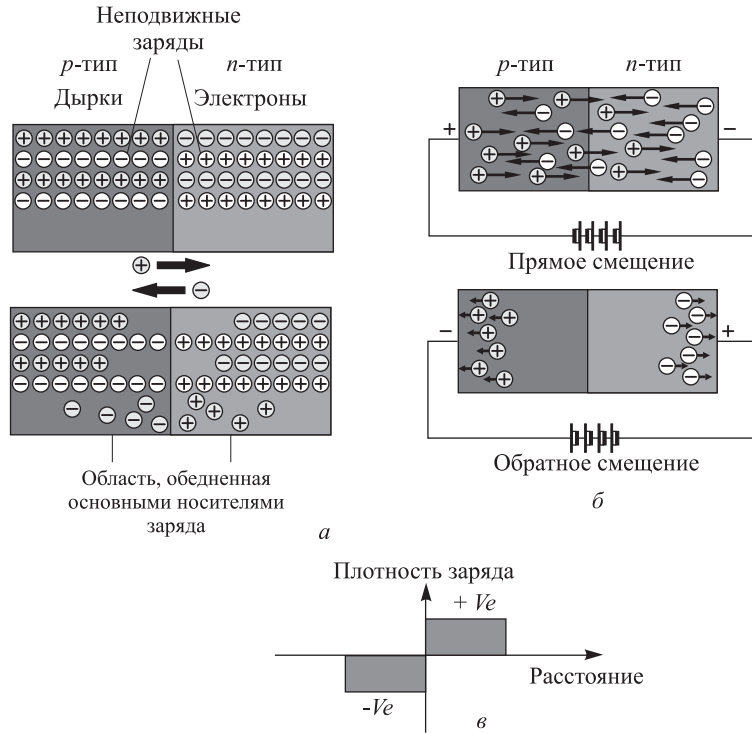


Рис. 2.8. p - n -переход (а), полупроводниковый диод (б) и распределение заряда в области p - n -перехода (в)

нее напряжение отсутствует, токи диффузии и дрейфа будут равными по величине и противоположными по направлению. Поэтому суммарный ток окажется нулевым. Пусть теперь к переходу приложено электрическое поле (прямое смещение — положительный потенциал приложен к полупроводнику n -типа, а отрицательный к полупроводнику p -типа). Этот потенциал будет увеличивать концентрацию неосновных носителей, которые будут проникать глубже в материал и рекомбинировать с основными носителями. Исчезнувшие в результате рекомбинации неосновные носители будут пополняться диффузией через переход и возникнет постоянный прямой ток. Аналогичным образом легко понять, что при обратном направлении приложенного поля (обратное смещение) ток через переход будет исчезающе мал (рис. 2.8). Таким образом, p - n -переход ведет себя как полупроводниковый диод.

Все эти особенности полупроводниковых материалов, и p - n - и n - p -переходов, были использованы при создании уникального полупроводникового устройства — транзистора, изменившего лицо вычислительных устройств. Это название объединяет сегодня целую группу полупроводниковых переключающих приборов с двумя устойчивыми состояниями.

Уильям Шокли (W. Shockly), Уолтер Браттейн (W. Brattein), и Джон Бардин (J. Bardeen) — сотрудники лаборатории компании «Bell» в Нью-Джерси (AT&T Bell Labs) начали в 1946 г. работу над полупроводниковым прибором — транзистором. В 1947 г. Бардин и Браттейн продемонстрировали

первую его модель на основе кристалла германия с p - и n -зонами, к переходу между которыми были подключены металлические проводки (рис. 2.9). Шокли на основании их работы проанализировал физику устройства и несколькими месяцами позже предложил плоскостной полностью полупроводниковый транзистор. В 1956 г. Шокли, Бардин и Браттейн получили за эту работу Нобелевскую премию. Выступая при ее вручении с нобелевской лекцией, Джон Бардин сказал: «Я знал, что транзистор — важная вещь. Но я никогда не мог предвидеть революцию в электронике, которую он принес».



Рис. 2.9. Первый транзистор Бардина и Браттейна

В результате дальнейшего быстрого развития теории и полупроводниковой технологии были созданы разнообразные варианты двух основных типов транзисторов — биполярный и полевой транзисторы (рис. 2.10). Они построены как комбинация полупроводниковых p - n - и n - p -переходов.

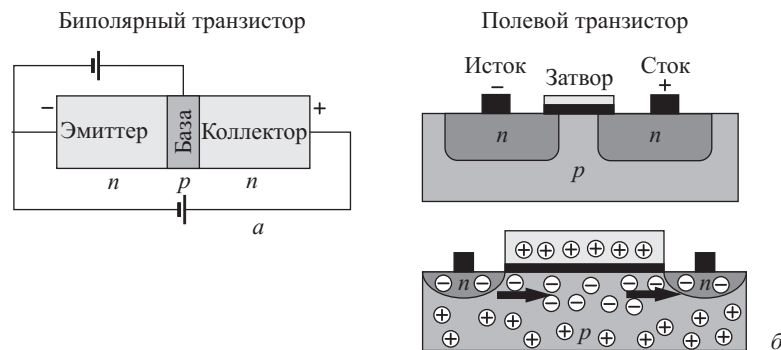


Рис. 2.10. Биполярный (а) и полевой (б) транзисторы

Биполярный транзистор представляет собой две области полупроводника одного типа (эмиттер и коллектор), разделенные тонким слоем полупроводника другого типа (база). Его упрощенно можно представить себе как два p - n перехода, включенные навстречу друг другу. Если приложить напряжение только между эмиттером и коллектором, то при любой полярности напряжения между эмиттером и коллектором тока не будет. Один из двух p - n переходов будет закрыт. Но, когда приложено напряжение между эмиттером и базой, в цепи эмиттер—коллектор течет ток, силу которого можно регулировать значительно меньшим по величине током эмиттер—база.

Полевой транзистор, появившийся по времени несколько позже, основан на идее, высказанной еще в 1925 г. американским исследователем Юлиусом

Лиленфельдом. Он предложил управлять сопротивлением полупроводникового слоя в системе типа конденсатора, одна из обкладок которого металлическая, а вторая — из легированного полупроводника, с помощью напряжения, приложенного между металлом и полупроводником. Если на металлическую обкладку подать отрицательный потенциал, поле будет вытеснять электроны из приповерхностного слоя полупроводника. В нем возникнет недостаток носителей тока и сопротивление увеличится. При обратной полярности носителей в этой области станет больше и сопротивление увеличится. Механизм действия полевого транзистора схематически показан на рис. 2.10.

Очень важным фактором, повлиявшим на создание полевого транзистора, было то, что удалось найти наиболее подходящие для этого материалы. Ими оказались кремний (полупроводник) и двуокись кремния (изолятор), которую легко вырастить на поверхности кремния, окисляя его. Это заложило основы современной МДП (металл—диэлектрик—проводник)-технологии, или, как ее часто называют, МОП (металл—окисел—полупроводник)-технологии.

Революционным шагом в развитии полупроводниковой технологии был переход к интегральным схемам, когда все элементы транзистора формируются на поверхности кристалла кремния или же какого-либо другого полупроводникового носителя. Их появление было обусловлено острой необходимостью повышения надежности аппаратуры и автоматизации процессов изготовления и сборки электронных схем. Сборка аппаратуры в то время была преимущественно ручной — весьма трудоемкой, длительной и к тому же очень плохо поддающейся автоматизации. Многократно увеличилось число переключающих приборов в цифровом оборудовании, особенно в компьютерах. Так же резко снизилась надежность и время наработки на отказ. Например, компьютер типа CD1604, выпущенный в 1960 г. американской фирмой «Control Data Corp.», содержал около 100 тыс. диодов и 25 тыс. транзисторов и мог безотказно работать не более 2–3 ч.

Первые в мире интегральные схемы были разработаны и изготовлены в 1959 г. американцами Джеком Килби (J. S. Kilby) — сотрудником фирмы «Texas Instruments» и Робертом Нойсом (R. Noyce) из компании «Fairchild Semiconductor» независимо друг от друга.

В 1958 г. Килби начал работать над созданием интегральных схем, в которых на одной основе должны были размещаться различные элементы электронной схемы. К этому времени из полупроводниковых материалов умели изготавливать резисторы, конденсаторы и транзисторы. Резисторы изготавливали, используя омические свойства «тела» полупроводника, а для создания конденсаторов использовались смещенные в обратном направлении p - n -переходы.

В 1959 г. Килби продемонстрировал конструкцию триггера на одном кусочке монокристаллического германия. Для его изготовления был применен метод фотогравировки, которым владела фирма «Texas Instruments». Эта «твердая схема» была представлена в 1960 г. на выставке американского Института радиоинженеров.

Многие недостатки «твердых схем» были устранены позднее Робертом Нойсом, работавшим в фирме «Fairchild». Им были разработаны технологические операции, превосходившие современную полупроводниковую планарную технологию. Была подана заявка на патент, и разработчики элементов

начали работать над объединением диффузионных резисторов и транзисторов на кремниевых пластинах.

В 1960 г. группа исследователей компании «Fairchild», возглавлявшаяся Джейм Ластом (J. Last), изготовила первую интегральную схему, содержащую четыре транзистора (рис. 2.11).

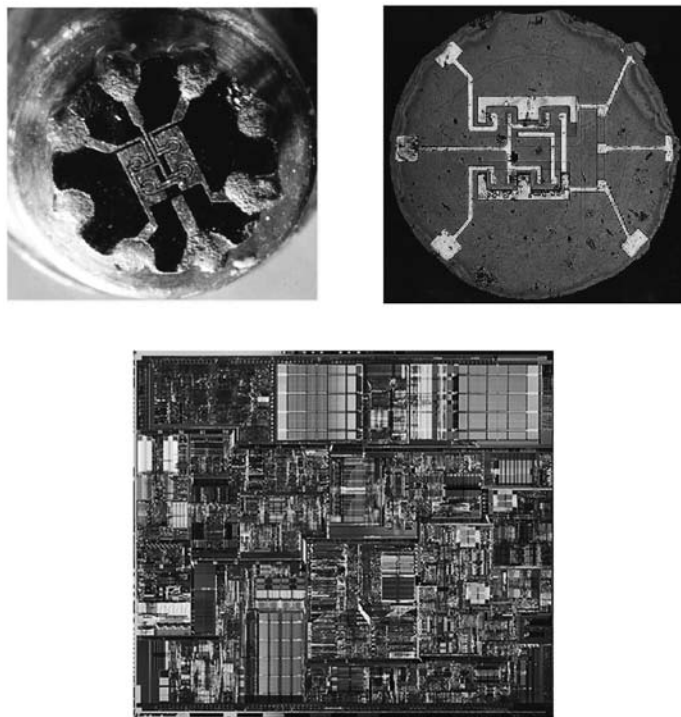


Рис. 2.11. Первая планарная интегральная схема и один из современных вариантов ИС

«И вы, и я согласитесь, что в то время как мир предпочитает героев, прогресс полупроводников зависит от усилий и идей большого числа людей, а продвижение вперед определяется нередко вкладами, которые были внесены десятилетия тому назад. Как и в других случаях со многими изобретениями, целый ряд тех, кто имел доступ к тем же возможностям, работал независимо в то же самое время для того, чтобы свести концы с концами и создать новые пути для существующей технологии. Эти люди понимали, что настало время, когда общество примет новые концепции», — писал позже Джей Ласт в письме одному из своих друзей.

Разработка интегральных схем начала продвигаться лихорадочными темпами. Это было началом новой эры. Для того, чтобы хотя бы приблизительно оценить темпы развития, можно сравнить первую интегральную схему с выпущенным в 2000 г. процессором Pentium 4, в котором на поверхности 224 мм^2 разместились $4,2 \cdot 10^7$ транзисторов.

Последним важным шагом на пути создания современной полупроводниковой планарной технологии было включение в нее группового метода