



Н.Г. РАМЕНДИ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ



РАМБИДИ Николай Георгиевич

НАНОТЕХНОЛОГИИ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

УДК 681.3
ББК 22.36
Р 21



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 07-08-07015д

Рамбиди Н. Г. **Нанотехнологии и молекулярные компьютеры.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 256 с. — ISBN 978-5-9221-0869-0.

Эта книга об одном из наиболее ранних и активно развивающихся направлений нанотехнологии — создании вычислительных устройств, в которых в качестве элементной базы используются отдельные молекулы или же их сравнительно небольшие ансамбли.

Изложены основные принципы обработки информации на молекулярном уровне, сложная и во многом противоречивая история разработки молекулярных вычислительных устройств и последние результаты, которые позволяют надеяться на новый прорыв в современной вычислительной технике. Рассматриваются цифровые молекулярные системы, сходные по своей архитектуре с современными компьютерами, а также устройства, имитирующие биологические принципы обработки информации, которые, по-видимому, смогут эффективно решать задачи искусственного интеллекта.

Для студентов, аспирантов и научных работников, создающих новые перспективные средства обработки информации, а также для широкого круга читателей, интересующихся этой проблемой.

ISBN 978-5-9221-0869-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2007

© Н. Г. Рамбиди, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	5
Глава 1. Нанотехнология — истоки и становление	9
1.1. Несколько слов о корнях нанотехнологии в человеческом сознании.	9
1.2. Нанотехнология, возникшая на страницах научной фантастики, становится основой новой промышленной революции.	13
1.3. Нанотехнология выходит на государственный уровень . . .	27
1.4. Нанотехнология сегодня — основные принципы и их неожиданные воплощения	33
Глава 2. Вычислительная техника и нанотехнология	39
2.1. Немного об истории вычислительных средств	39
2.2. Полупроводниковые приборы — революция в электронике	48
2.3. Планарная полупроводниковая технология — всеобщее признание и ограничения.	58
Глава 3. Молекулярная элементная база вычислительных устройств.	65
3.1. Несколько предварительных замечаний	65
3.2. Первые идеи, инициировавшие становление молекулярной электроники	74
3.3. Молекулярная память на основе белка бактериородопсина	100
3.4. Запоминающие устройства на основе эффекта «выжигания провалов» в спектрах поглощения	105
3.5. Молекулярная память: надежды разработчиков или реальность?	108
3.6. И еще одна попытка — хироптицен	118
Глава 4. Химические реакционно-диффузионные среды и искусственный интеллект	121
4.1. Информационные потребности постиндустриального общества и парадигма фон Неймана	121
4.2. Вычислительная техника и задачи искусственного интеллекта	127
4.3. Биологически инспирированные средства обработки информации: нейронные сети и нейрокомпьютеры	129
4.4. Будущее нейрокомпьютинга — сомнительное наследство цифровых компьютеров	136
4.5. Реакционно-диффузионные средства обработки информации.	138
4.6. Среда типа Белоусова–Жаботинского — нейросетевая архитектура	141
4.7. «Возникающие» информационные механизмы.	149
4.8. Принципы обработки информации реакционно-диффузионными устройствами	150

Глава 5. реакционно-диффузионный процессор: возможности и ограничения.	152
5.1. Реакционно-диффузионный процессор: основные принципы	152
5.2. Обработка изображений средами типа Белоусова–Жаботинского	161
5.3. Реакционно-диффузионный процессор: определение кратчайшего пути в лабиринте.	180
5.4. Системы взаимосвязанных реакционно-диффузионных реакторов: распознающие устройства	191
Глава 6. Самоорганизация — общий принцип обработки информации распределенными динамическими системами	196
6.1. Самоорганизация и особенности ее проявления в различных динамических системах	196
6.2. Процессы самоорганизации и их особенности	197
6.3. Синергетические принципы процессов самоорганизации.	203
6.4. Реакционно-диффузионный процессор — самоорганизующаяся динамическая система.	213
Глава 7. Новые идеи... Новые возможности?	217
7.1. Развитие биологических принципов обработки информации — аморфный компьютинг	217
7.2. Полупроводниковые реакционно-диффузионные устройства — первые попытки.	225
7.3. ДНК-компьютинг — изощренное сочетание принципов и «инструментов» обработки информации	230
Глава 8. Что же дальше?	235
8.1. Нужна ли молекулярная элементная база разработчикам цифровых компьютеров с фон-неймановской архитектурой?	235
8.2. Биологические принципы обработки информации и их роль в развитии информационных технологий	241
Список литературы	252

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнология занимает особое место среди современных направлений человеческой деятельности.

История ее возникновения и становления полна гениальных прозрений и долгого, казалось бы, пренебрежения к их реализации. Полвека тому назад на годичном собрании Американского физического общества разносторонне одаренный физик Ричард Фейнман подробно изложил основы того, что сегодня называется нанотехнологией. Именно тогда были сформулированы основные нанотехнологические принципы:

- миниатюризация устройств, вплоть до предельных размеров атомно-молекулярного уровня, принципиально улучшающая их функциональные возможности,
- управление макросвойствами объекта за счет направленного заданного изменения его структуры на нано- (молекулярном) уровне.

Тем не менее, промышленное производство, т. е. то, на что должны были быть направлены усилия этой области деятельности, не было готово, в сущности, ее сознательно воспринимать. И только в самом конце прошлого века накопившиеся потребности производства привели к нанотехнологическому буму.

Нужно заметить, что сама идея создания устройств с предельно миниатюрными размерами не была чуждой человеку и до этого. Достаточно вспомнить различные миниатюрные модели, например, парусных судов, заключенных в стеклянные сосуды, приветствия и целые картины на рисовых зернах в качестве подарков к знаменательным событиям и т. д. В то же время, в промышленном производстве широко использовался в прошлом столетии нанотехнологический принцип — управление макроскопическими свойствами материала за счет направленного воздействия на его микроструктуру. Это лежало в основе промышленного производства натурального каучука, синтетических волокон с заданными свойствами, и многих других промышленных изделий. Но все же, среди всех направлений человеческой

деятельности именно вычислительная техника сыграла особую роль в становлении нанотехнологии.

На протяжении всей второй половины прошлого века вычислительная техника неуклонно шла по пути миниатюризации электронных схем. Более того, в конце прошлого века она сделалась одним из основных оселков, на которых оттачивались и оттачиваются нанотехнологические представления.

Исторически первый, интенсивный всплеск нанотехнологической активности, правда, еще не называвшейся тогда нанотехнологией, произошел именно в вычислительной технике. Источником этого и мощной движущей силой были сложности промышленного становления планарной полупроводниковой технологии в микроэлектронике и острая заинтересованность оборонных ведомств в быстром совершенствовании электронных вычислительных средств.

Начало было положено в США, когда талантливый физик, сотрудник Военно-морской исследовательской лаборатории США Форрест Картер пробудил в научном сообществе интерес к молекулярной электронике. Деятельность Картера была многогранной. Он разработал несколько подходов к построению молекулярной элементной базы вычислительных устройств на основе не использовавшихся ранее физических эффектов. Так, он предложил создавать переключающиеся схемы на основе управляемого прохождения электрона через систему энергетических барьеров. Эта идея была реализована в те годы на основе твердотельных полупроводниковых сверхрешеток. Картер разработал различные модели переключающихся устройств, с использованием молекулярных солитонов. Это явление — распространение по молекулярной цепочке возбуждения — было предложено ранее и изучено известным советским физиком А. С. Давыдовым. Но не менее важной стороной деятельности Картера была его организационная активность. Три международные конференции по молекулярным электронным устройствам были организованы им на протяжении 80-х гг. Они собрали десятки ученых, работавших в областях, близких к молекулярной электронике, и способствовали их объединению. К сожалению, последняя конференция прошла в 1987 г. уже после безвременной смерти организатора.

В начале 90-х гг. после периода молекулярного бума в микроэлектронике наступило некоторое отрезвление. Укрепилось понимание того, что молекула представляет собой микрообъект, поведение которого определяется квантово-механическими принципами. Переходы между отдельными энергетическими состояниями молекулы носят вероятностный характер. Поэтому в каче-

стве переключающихся элементов, даже при достаточно высокой вероятности молекулярного перехода, приходится использовать не отдельную молекулу, а их совокупность, т.е. малый объем вещества. Использование такого подхода привело к созданию модельных молекулярных выпрямителей тока и простейших переключающихся устройств. Наиболее перспективной разработкой было создание нескольких молекулярных оперативных запоминающих устройств на основе белка бактериородопсина.

Казалось, что молекулярная электроника вошла в стадию спокойного развития, накопления экспериментальных фактов и поиска новых путей создания молекулярных устройств обработки информации. Но на границе прошлого и нашего тысячелетий в этой области снова произошел прорыв. В основе его лежали успехи современной синтетической органической химии. Как следствие, разработка молекулярных вычислительных устройств вплотную приблизилась к стадии их промышленного производства.

В Советском Союзе исследования по созданию молекулярных устройств обработки информации были организованы в конце 70-х гг. на государственном уровне. Головной организацией был НИИ физических проблем Министерства электронной промышленности СССР, который координировал деятельность исследовательских групп АН СССР и некоторых высших учебных заведений. Работы проводились под эгидой Комиссии Президиума СМ СССР, которой был создан Межведомственный совет по проблеме «молекулярная электроника», определявший основные направления работ. Исключительно важную роль в их развитии сыграла неумная энергия Заместителя Председателя НТС Комиссии Президиума СМ СССР Б.А. Киясова, который, на деле, был основным организатором работ в этой области. На протяжении десяти лет в Советском Союзе была создана действенная инфраструктура, позволившая вести сложные теоретические и экспериментальные работы. В качестве примера можно назвать разработку запоминающих устройств сверхвысокой емкости на основе эффекта выжигания провалов в оптических спектрах. По своему уровню эти работы, проводившиеся группами Р.И. Персонова в Москве и К.К. Ребане в Тарту, не только не уступали, но скорее превосходили по своему уровню аналогичные зарубежные работы. В 1989 г. была разработана перспективная программа работ по созданию молекулярных устройств, рассчитанная на последующие пять лет.

К сожалению, начиная с 1990 г. финансирование работ в этой области (как и по другим направлениям научно-исследователь-

ской деятельности) было практически прекращено. И на протяжении последующих лет в России очень медленными темпами из всей разработанной программы проводились только работы по технологии бактериородопсиновых сред и обработке информации распределенными нелинейными средами.

В этой небольшой книге сделана попытка рассказать о становлении и развитии работ по молекулярным устройствам обработки информации, проходивших в атмосфере, полной надежд, энтузиазма, взлетов и разочарований. Мне кажется, что об этом нужно писать именно сейчас, когда появилась реальная возможность создавать принципиально новые вычислительные и информационно-логические устройства на молекулярном уровне. Они вряд ли заменят существующую полупроводниковую электронику. Но эти устройства смогут существенно дополнить ее и резко расширить возможности современной индустрии информации.

Глава 1

НАНОТЕХНОЛОГИЯ — ИСТОКИ И СТАНОВЛЕНИЕ

Государь посмотрел и видит: точно, лежит на серебряном подносе самая крошечная соринка.

Работники говорят:

— Извольте пальчик посплюнуть и ее на ладошку взять.

— На что же мне эта соринка?

— Это, — отвечают, — не соринка, а нимфозория.

— Живая она?

— Никак нет, — отвечают, — не живая, а из чистой из агличкой стали в изображении блохи нами выкована, и в середине в ней завод и пружина. Извольте ключиком повернуть: она сейчас начнет танце танцевать.

Н. С. Лесков. Сказ о тульском косом Левше и о стальной блохе

1.1. Несколько слов о корнях нанотехнологии в человеческом сознании

Говоря о нанотехнологии — основе не только технической и технологической революции последних лет, но и 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 как в народных поверьях о разнообразных миниатюрных существах — эльфах и гномах, соседствующих с человеком, так и в литературе.

Так, более трехсот лет тому назад великий фантаст Джонатан Свифт подробно описал 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 сущ-

ности, 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 г., 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 микроскопических частиц. В каждой из них помещался простейший сенсор, логическое устройство, устройство связи с другими частицами и микроскопический двигатель 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.

Технологический принцип «сверху-вниз»



Технологический принцип «снизу-вверх»



Рис. 1.1. Схема технологических принципов «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

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 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 выявить смысл основных нанотехнологических подходов:

- предельная микро- (нано-) миниатюризация макрообъектов, которая приводит к их микроаналогам с измененными в заранее заданном направлении свойствами;

- направленное изменение структуры макрообъекта на микро- (нано-) уровне для наперед заданного изменения свойств макрообъекта;
- 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.

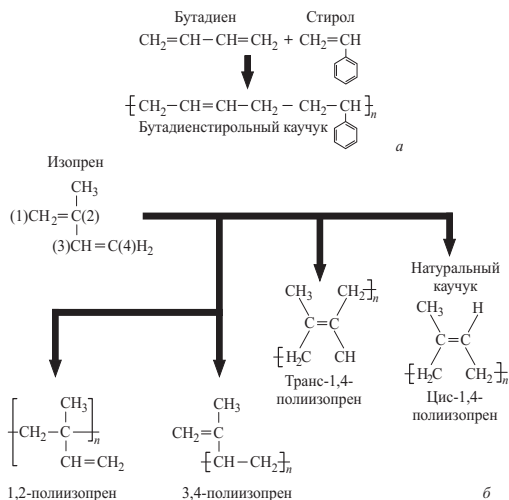


Рис. 1.2. Синтез искусственного (a) и натурального (б) каучука

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 полученный 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 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 гг. 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. Нанотехнология, возникшая на страницах научной фантастики, становится основой новой промышленной революции

Начиная с середины прошлого столетия возможности использования природных микрообъектов или же создания рукотворных, 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 аperiодического 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, очевид-

но, 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 называть это образование аperiодическим кристаллом или твердым телом и выразить нашу гипотезу словами: Мы полагаем, что ген или, может быть, целое хромосомное волокно представляет собою аperiодическое твердое тело».

Возникновение нанотехнологии, как самостоятельной области науки и техники, связывают обычно с выдающимся физиком XX века Ричардом Фейнманом. 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

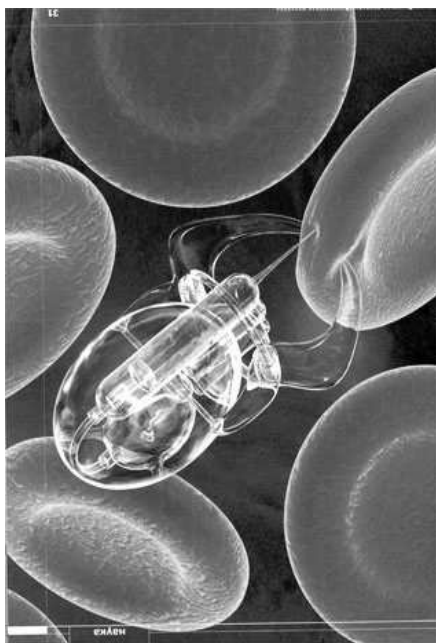


Рис. 1.3. Механический «хирург» в кровеносной системе

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 нанометра... Поэтому нанотехнология в целом представляет собой процессы разделения, 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. 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, написавшему предисловие к этой книге.

«Машины создания» начинаются с мысли о том, что наши возможности что-либо делать 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 вос-

становливать 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».

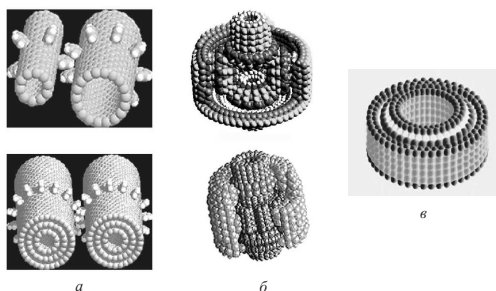


Рис. 1.4. Молекулярные устройства Дрекслера: «зубчатая передача» (а), более сложная «зубчатая система» (б), подшипник (в)

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.

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 Мински, 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» наноземлеустроения, включая отдельные атомы и молекулы. Но при этом,

находясь на уровне представлений 60–70-х гг., он не мог предусмотреть целый ряд возможных принципиальных ограничений и наметить конкретные пути формирования устройств. Не обсуждалась практически и проблема микро- и макроинтерфейсов, т.е. проблема взаимодействия человека и микроустройства.

В то же время, быстрый прогресс в ряде областей человеческой деятельности и, прежде всего, в полупроводниковой электронике, 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 гг. 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, бруто-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 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 роль светового потока и слайда играет пучок электронов и исследуемый образец. Разрешающая способность просвечива-

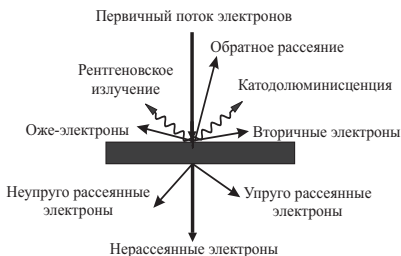


Рис. 1.5. Механизмы взаимодействия пучка электронов с веществом

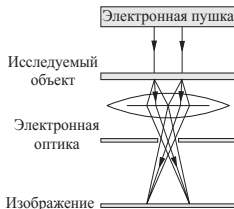
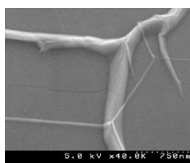
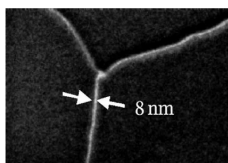


Рис. 1.6. Принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа

Просвечивающий
электронный микроскоп

Атомно-силовой микроскоп

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

ющего 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 способ-

ность 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.

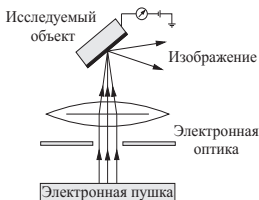


Рис. 1.8. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа

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 электронно-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).

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 и Хейнрих Рорер, создали первый сканирующий туннельный микроскоп. О значении этой работы можно судить хотя бы по тому, что всего лишь через пять лет, в 1986 г., за нее они получили Нобелевскую премию по физике, совместно, что примечательно, с Эрнстом Руска, который был награжден «за его фундаментальные работы по электронной оптике и за разработку первого электронного микроскопа».

В основу конструкции Биннига и Рорера был заложен квантово-механический принцип туннелирования электронов через непроницаемый барьер.

Квантово-механический туннельный эффект — это процесс, благодаря которому частицы просачиваются через потенциальный барьер и оказываются

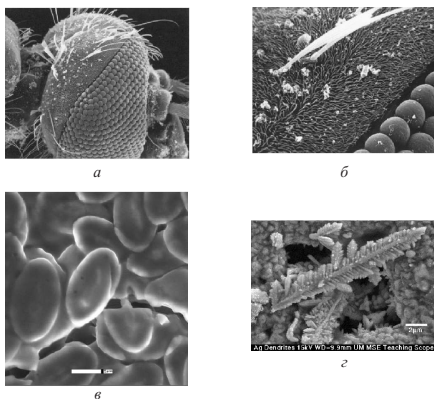


Рис. 1.9. Изображения, полученные растровым электронным микроскопом (объяснения в тексте)

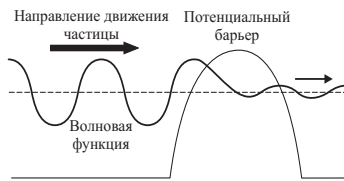


Рис. 1.10. Схема туннелирования электронов через потенциальный барьер

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. Квантово-механическое рассмотрение этой задачи показывает, что существует некоторая вероятность туннельного прохождения частицы 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 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.

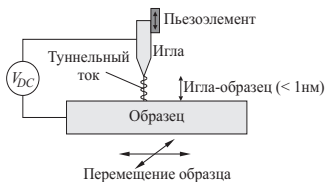


Рис. 1.11. Принципиальная схема сканирующего туннельного микроскопа

Сканирующий туннельный микроскоп представляет собой систему, состоящую из иглы с предельно тонким острием и исследуемого образца, к которому приложено постоянное напряжение (рис. 1.11). Расстояние между острием иглы и образцом регулируется пьезоэлементом. Если это расстояние довести до величины ~ 1 нм, между иглой и образцом возникает туннельный ток, который резко зависит от расстояния от иглы до образца. 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 острия иглы до образца и это затрудняет измерение тока. Поэтому в разработанных туннельных микроскопах применяется и другой метод записи рельефа поверхности. В этом случае туннельный ток поддерживается постоянным 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 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

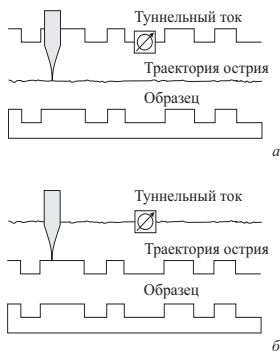


Рис. 1.12. Схема регистрации туннельного тока: постоянное расстояние острье-образец (а), постоянное значение тока (б)

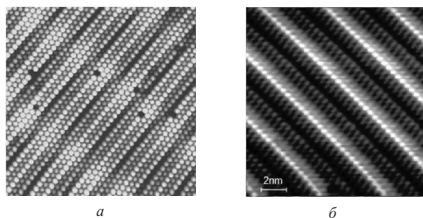


Рис. 1.13. Структура поверхности монокристалла платины (а) и отожженной пленки декантиола (б) на золотой подложке, полученная сканирующим электронным микроскопом

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 и Швейцер. Они передвинули по поверхности 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