

Глава 3

Мир нанотехнологий

- 3.1. Что такое туннельный эффект?
- 3.2. Электронные микроскопы расширяют границы оптики
- 3.3. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ)
- 3.4. Сканирующие электронные микроскопы
- 3.5. Что такое сканирующий зондовый микроскоп?
- 3.6. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа
- 3.7. Работа атомно-силового микроскопа
- 3.8. Принцип работы сканирующего оптического микроскопа ближнего поля (СОМБП)
- 3.9. Развитие техники фотообработки
- 3.10. Что такое углеродные нанотрубки?
- 3.11. Нанотехнология и проблема записи информации
- 3.12. Что такое «квантовая точка»?
- 3.13. Поразительные свойства наноустройств!
- 3.14. Разнообразные возможности применения наностекол
- 3.15. Биодатчики и информационные терминалы
- 3.16. Что такое квантовый компьютер?

Дополнительный материал к главе 3. Это интересно!

3.1. Что такое туннельный эффект?

Чудеса микромира

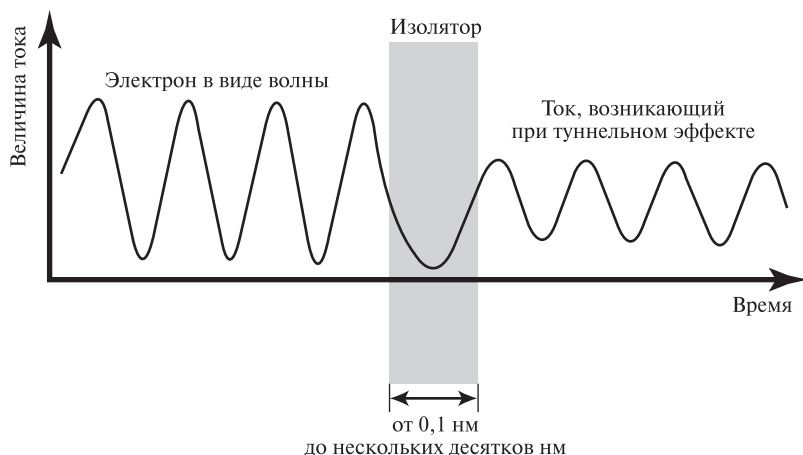
Еще в XVII столетии И. Ньютон сформулировал законы классической механики (позволяющие нам, например, легко рассчитать траекторию мяча при отражении от стены), что стало великим событием в истории физики. Классическая механика до сих пор остается самой наглядной из наук, закономерности которой легко проверяются экспериментально. Однако

нанотехнологии, о которых идет речь в нашей книге, относятся к совершенно иному, микроскопическому миру, законы которого определяются механикой атомов и молекул, из-за чего протекающие там явления теряют наглядность и очевидность в привычном нам смысле. Например, считая электрон мячиком или шариком, мы можем иногда наблюдать странный эффект, при котором этот «мячик» пронзает стенку. Это необычное квантовое явление получило название «туннельного эффекта» и не имеет никаких аналогов в привычном нам мире классической физики, однако оно является совершенно естественным и понятным в рамках квантовой механики атомов, развитой в начале XX века. Теоретически эффект был предсказан еще в 1928 году знаменитым физиком Г. Гамовым (позднее он предложил знаменитую теорию Большого Взрыва в космологии). Гамов ввел представление об этом эффекте для объяснения так называемого альфа-распада в ядерной физике. Это явление наблюдается при сближении атомов и сводится к тому, что электроны атома при сближении атомов могут покидать свои оболочки, не обладая достаточной энергией. Возможность таких переходов объясняется «волновой природой» электронов, а само название возникло из-за того, что с точки зрения внешнего наблюдателя, классической физики (и здравого смысла!) эффект выглядит совершенно непонятным и напоминает ситуацию, при которой электрон как бы находит в стене какой-то «туннель» и проскакивает через него (в качестве стены выступает электростатический потенциал ядра).

Процесс носит случайный характер, но его вероятность может быть вычислена по законам квантовой механики совершенно точно (при этом электрон рассматривается одновременно и в качестве волны, и в качестве частицы). Именно волновые характеристики поведения электрона позволяют ему (как показано на рис. 5) преодолевать энергетический барьер. При большом количестве таких электронов можно естественно говорить о туннельном токе.

Туннельный эффект уже давно весьма эффективно используется в науке и технике. В частности, на нем основан принцип действия известных диодов Эсаки (туннельные диоды), устройств на джозефсоновских переходах и многих других полупроводниковых приборов. В настоящее время эффект широко используется в сверхчувствительных записывающих головках магнитных дисков (TMR), сканирующих туннельных микроскопах (STM), приборах ядерной физики и т. д.

Механизм действия туннельного эффекта
Электрон является одновременно и частицей, и волной



Практические применения туннельного эффекта:

Полупроводники:

- Туннельные диоды
- Эсаки,
- Джозефсоновские переходы,
- Одноэлектронные транзисторы

Магнитные диски:

- Головки TMR

Сканирующие

электронные микроскопы:

- Регистрация туннельного тока от отдельных атомов и молекул

По материалам Института «Хитати Сокэн»

Рис. 5. Туннельный эффект. Одно из чудес квантовой механики!

3.2. Электронные микроскопы расширяют границы оптики

Наступает эпоха сканирующих зондовых микроскопов!

Человеческий глаз, позволяющий нам видеть и изучать окружающий мир, представляет собой довольно простую оптическую систему, главным элементом которой является хрусталик, фактически представляющий собой линзу из жидкокристаллического вещества. Минимальные объекты, которые можно разглядеть при помощи такой оптической системы, имеют размеры около 0,1 мм, а для разглядывания и изучения более мелких предметов сперва стали применять очки или лупы, а затем и сложные конструкции из оптиче-

ских линз, называемые оптическими микроскопами. Независимо от вида используемых линз и способа их соединения, разрешающая способность таких приборов ограничивается основным правилом оптической техники, сформулированным еще в 1873 году (так называемый дифракционный предел разрешения Рэля), в соответствии с которым минимальные размеры различаемых деталей рассматриваемого объекта не могут быть меньше, чем длина света, используемого для освещения. Поскольку самые короткие длины волн диапазона соответствуют примерно 400 нм, разрешающая способность оптических микроскопов принципиально ограничена половиной этой величины, т. е. составляет около 200 нм. Единственным выходом из возникшей ситуации стало создание приборов, в которых используются волновые излучения с меньшей длиной волны, т. е. излучения не световой природы.

Выше уже упоминалось, что в квантовой механике электрон может рассматриваться в качестве волны, на которую, в свою очередь, можно воздействовать электрическими или магнитными линзами (в полной аналогии с законами привычной геометрической оптики). На этом основан принцип действия электронных микроскопов, позволяющих значительно расширить возможности исследования вещества на микроскопическом уровне (за счет увеличения разрешающей способности на порядки). В электронном микроскопе вместо света используются сами электроны, представляющие собой в данной ситуации излучение со значительно более короткой длиной волны. В таких устройствах вместо стеклянных линз, естественно, применяются электронные линзы (т. е. поля соответствующей конфигурации). Электронные пучки не могут распространяться без рассеяния даже в газовых средах, поэтому внутри электронного микроскопа, вдоль всей траектории электронов, должен поддерживаться высокий вакуум. Электронные микроскопы разделяются на два больших класса по методике применения: просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ) и сканирующие (СЭМ). Основное различие между ними заключается в том, что в ПЭМ электронный пучок пропускается через очень тонкие слои исследуемого вещества, с толщиной менее 1 мкм (как бы «просвечивая» эти слои насквозь), а в сканирующих микроскопах электронный пучок последовательно отражается от маленьких участков поверхности (структура поверхности и ее характерные особенности могут быть определены при этом регистрацией отраженных электронов или вторичных электронов, возникающих при взаимодействии пучка с поверхностью).

Работа с электронными микроскопами является достаточно сложной, в первую очередь, из-за необходимости тщательной под-

готовки образцов и обеспечения высокого вакуума внутри всей экспериментальной установки. Этих недостатков лишены так называемые сканирующие электронно-зондовые микроскопы (СЭЗМ), разработанные в 1970 году.

Таблица 5

Основные этапы развития техники микроскопии

	Год	Результаты
Оптическая микроскопия	1873	<ul style="list-style-type: none"> • Изобретение Э. Аббе и др. конструкции современного оптического микроскопа, разрешающая способность которого определяется лишь дифракционными пределами, связанными с длиной волны излучения оптического диапазона (~ 200 нм) • Развитие идей, связанных с не световой оптикой и поиски новых решений
	1924	• Разработка теории волновой природы электронов
Электронная микроскопия	1932	• Создание первого электронного микроскопа (М. Кнолл и Э. Руска)
	1935	• М. Кнолл предложил идею сканирующего электронного микроскопа
	1938	• Создание М. фон Арденне первого сканирующего электронного микроскопа
Сканирующая зондовая микроскопия	1972	• Реализация идеи сканирующего туннельного оптического микроскопа ближнего поля (СОМБП)
	1981	• Изобретение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)
	1986	• Изобретение атомарно-силового микроскопа (АСМ)
	1992	• Усовершенствование конструкции СОМБП, позволяющее довести пространственную разрешающую способность до 1/40 от длины облучающей волны*

* В настоящее время, используя специальную методику травления торцов оптических волокон, пространственную разрешающую способность удалось снизить до 20 нм.

3.3. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ)

Особенности конструкции электронных микроскопов

Электрон, ускоренный в поле высокого напряжения, может рассматриваться в качестве волны (длина которой, как уже отмечалось, намного меньше длины волны видимого света) и ее можно легко фокусировать, используя осесимметричные электрические или маг-

нитные поля. На этом принципе и основано действие просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), конструкция которого похожа на схему обычного оптического микроскопа, где вместо лучей света используются электроны (т. е. соответствующие им волны). Первое устройство такого типа было создано в 1932 году немецкими учеными М. Кноллом и Е. Руска.

В таком микроскопе источник света заменен так называемой электронной пушкой (источником электронов). Испускаемые пушкой электроны проходят через электронную линзу-конденсор (регулирующую интенсивность потока излучения и освещаемую площадь поверхности исследуемого образца), а затем через линзу-объектив проектируются на люминесцентный экран, под которым располагается фотокамера, позволяющая переводить получаемую на экране картину в привычное фотографическое изображение. Еще раз отметим, что по всей траектории прохождения электронов в установке должен поддерживаться высокий вакуум, поскольку поток электронов энергично взаимодействует практически со всеми веществами.

Существует много конструкций источников высокоэнергетических электронов, наиболее простой и надежной из которых является раскаленная вольфрамовая проволока. В сложных электронных микроскопах с высоким разрешением излучение создается потоком электронов, испускаемых поверхностью кремниевого чипа (кристалла) под воздействием сильного электрического поля (так называемая эмиссия под воздействием поля, *field emission*). Исследуемые в ПЭМ образцы должны быть очень тонкими, поскольку именно их толщина определяет размер деталей на изображении. Требуемые сверхтонкие пластины вырезают по довольно сложным методикам, либо изготавливают другими, специальными методиками («ионное фрезерование» и т. п.).

Электронный луч, «просвечивая» тонкий слой вещества, позволяет получать прямое изображение дефектов или неоднородностей кристаллической структуры во внутренней части образца. Анализ дифракционных картин дает возможность установить периодичность атомных структур, а также ориентацию кристаллов. Разрешающая способность новейших ПЭМ уже составляет около 0,2 нм, что подводит нас к получению фотографий отдельных атомов и молекул.

На рис. 6 приведено ПЭМ-изображение структуры вещества сверхтонкой пластинки из наностекла, образованного кристаллическими зернами окиси кобальта. На изображении можно выделить и разглядеть морфологические особенности с размерами менее 50 нм.



(Микрофотография предоставлена лабораторией фирмы «Хитати»)

Рис. 6. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа

3.4. Сканирующие электронные микроскопы

Энергично развивающееся направление науки и техники!

Следующим поколением электронных микроскопов стали так называемые сканирующие электронные микроскопы (СЭМ), похожие по принципу действия на обычный телевизор. Сперва СЭМ сильно отставали в развитии от описанных выше просвечивающих электронных микроскопов (несмотря на то, что идея сканирования электронным микроскопом была предложена М. Кноллом еще в 1935 году, а первая реальная установка описанного типа была создана М. фон Арденне в 1936 году, т. е. практически одновременно с

ПЭМ). Несмотря на это, по разным техническим причинам, именно ПЭМ стали магистральным направлением развития электронных микроскопов вообще.

Интерес к сканирующей электронной микроскопии возродился лишь к началу 60-х годов. Идея метода состоит в том, что поверхность тела сканируется электронным пучком, создаваемым внешним источником под напряжением порядка нескольких десятков киловольт. Облучаемая при таком сканировании поверхность кристалла начинает излучать либо так называемые вторичные электроны, либо кванты света, которые регистрируются, усиливаются, преобразуются по интенсивности и т. п., после чего подаются на экран электронно-лучевой трубки, создавая видимое изображение поверхности.

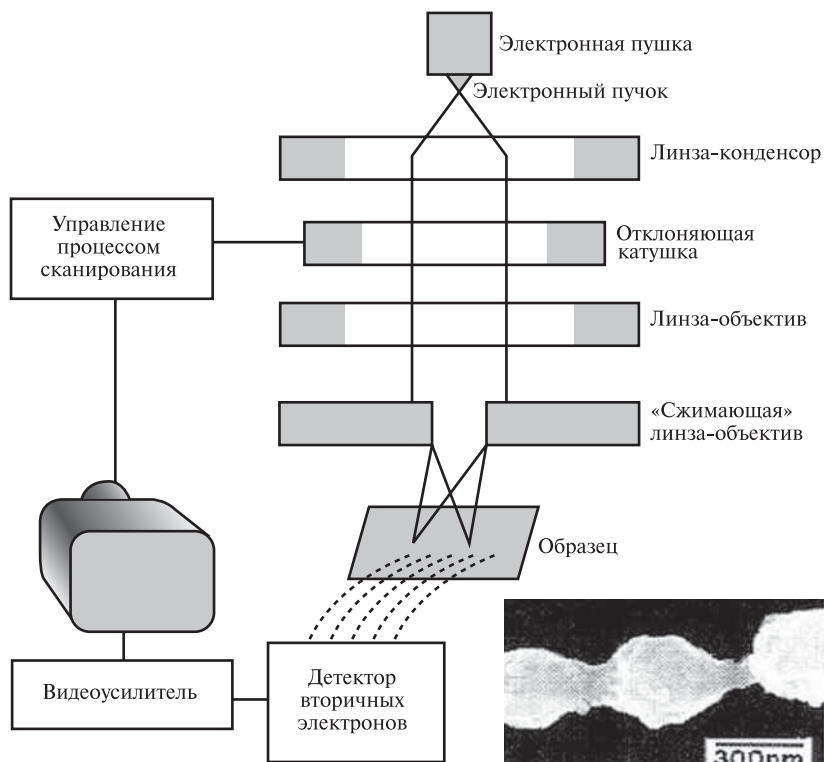
Методы получения увеличенного изображения в сканирующих электронных микроскопах значительно отличаются от методов, используемых в оптической и просвечивающей электронной микроскопии. Как показано на рис. 7, при облучении поверхности узким электронным пучком происходит эмиссия вторичных электронов. Сканируя изучаемую поверхность тонким, но достаточно интенсивным пучком электронов, и подавая сигналы от детектора вторичных электронов на осциллограф, можно получать на экране увеличенное изображение поверхности. При этом, естественно, необходимо согласовывать скорость сканирования поверхности и скорость сканирования экрана осциллографа. Облучающий пучок электронов создается электронной пушкой, после чего проходит последовательно управляющую линзу-конденсор, отклоняющую катушку, линзу-объектив и создает на поверхности образца небольшое освещенное «пятно», размеры которого можно регулировать управляющей системой. При этом возникают вторичные и отраженные электроны, число которых зависит от интересующих нас характеристик поверхности (шероховатость, атомный состав, электрический потенциал освещаемого участка кристалла и т. п.). Замеряя и анализируя интенсивность таких электронов, мы можем получить на мониторе увеличенную картину конкретного участка поверхности и перевести его в фотографическое изображение. Аналогично сказанному выше для просвечивающих электронных микроскопов, внутри СЭМ-установок тоже необходимо поддерживать высокий вакуум.

Выше уже отмечалось, что развитие техники сканирующих электронных микроскопов долгое время отставало от развития просвечивающих. Однако при этом можно отметить, что за последние годы техника СЭМ развивалась исключительно высоки-

ми темпами, в результате чего достаточно быстро появилось много типов специализированных СЭМ (высокого разрешения для исследования полупроводников, с повышенной точностью контроля длины волны и т. д.), а их разрешающая способность уже достигла 0,5 нм.

Примером возможностей современных СЭМ может служить приведенная в правой нижней части рис. 7 микрофотография углеродной нанотрубки.

Поверхность сканируется электронным пучком, а изображение формируется по измерениям отраженного или вторичного электронного излучения



Пример получаемого изображения.
Углеродная нанотрубка

Дополнительные данные по технике СЭМ можно получить на домашней странице по этому адресу http://www.jst.go.jp/erato/project/ypdb_P/sym-09.html (затемнение во внутренней части обусловлено введением туда атомов щелочного металла)

Рис. 7. Принцип работы сканирующего электронного микроскопа

3.5. Что такое сканирующий зондовый микроскоп?

*Устройство, позволяющее видеть
отдельные атомы и молекулы!*

Существует много типов устройств, называемых сканирующими зондовыми микроскопами, среди которых стоит отметить сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), атомарно-силовой микроскоп (АСМ), сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП) и т. д. Характерной особенностью этих микроскопов является то, что они сканируют поверхность исследуемого образца при помощи зонда или щупа в виде крошечной металлической иголки. Такие микроскопы обладают повышенной разрешающей способностью (по сравнению с обычными электронными микроскопами) по отношению к «вертикальной» координате изучаемого объекта. В частности, они могут создавать изображение «профиля» поверхности твердого тела с точностью до размеров отдельного атома или молекулы. Например, уже самый первый сканирующий туннельный микроскоп, созданный в 1981 году сотрудниками лаборатории фирмы ИБМ в Цюрихе (Швейцария) позволял фиксировать положения конкретных атомов. В таких микроскопах атомарная структура изучается за счет регистрации туннельного тока, протекающего между зондом и изучаемым участком поверхности. Величина туннельного тока определяется структурными особенностями этой поверхности, имеющими атомарные размеры, вследствие чего по изменениям туннельного тока при сканировании можно «построить» соответствующее изображение.

Поскольку в этом методе измеряется электрический ток, его можно применять только для исследования электропроводящих материалов и поверхностей, что, конечно, существенно ограничивает возможности исследований. Однако уже в 1986 году была разработана конструкция так называемого атомарно-силового микроскопа (АСМ), который позволяет получать изображения и материалов-изоляторов. В АСМ измеряются силы взаимодействия между атомами зонда и атомами поверхности (радиус действия этих сил также соответствует атомарной точности). Дальнейшим развитием идеи СЗМ стали сканирующие оптические микроскопы ближнего поля (о них и о микроскопах других типов рассказывается в следующих разделах).

Сканирующие зондовые микроскопы могут использоваться не только для изучения поверхностей с атомарной точностью, но и для работы в других режимах (например, для измерения электрического

или магнитного поля, распределения электростатического потенциала поверхности и т. п.). Их применение уже стимулировало значительный прогресс в исследованиях разнообразных полупроводниковых, металлических и биологических материалов. Помимо этого, в последнее время технику СЗМ стали использовать и для гораздо более важных целей, а именно, для сверхточной обработки поверхностей материалов и для целенаправленной манипуляции отдельными атомами и молекулами, что открывает исключительно заманчивые перспективы и в научных, и в технологических исследованиях (совершенно новые возможности обработки вещества, модификация свойств поверхности, повышение точности обработки и многое другое).

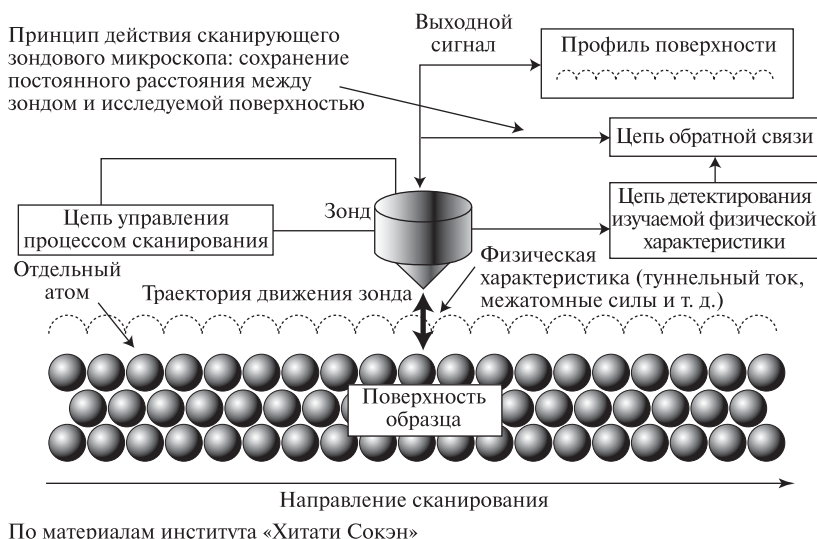


Рис. 8. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа

3.6. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа

Возможность рассматривать самые крошечные объекты!

Самый первый сканирующий туннельный микроскоп был создан в Цюрихе (Швейцария) сотрудниками лаборатории фирмы ИБМ Г. Бинингом и Г. Рорером. Принцип его действия основан на

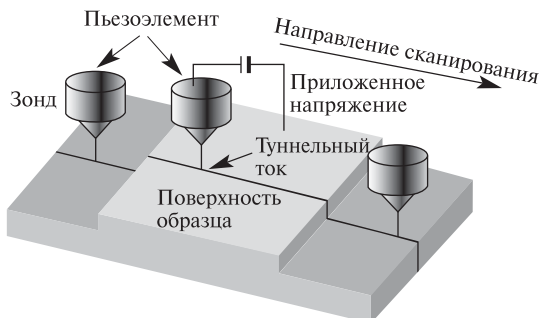
описанном выше туннельном эффекте, позволяющем наблюдать и даже контролировать положение отдельных атомов, т. е. работать с точностью до нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), которая на сегодняшний день является максимальной для всех существующих научных и технических методик.

В связи со сказанным, интересно задуматься о том, объекты каких размеров позволяет изучать современная оптическая техника, и какие принципиальные ограничения, вообще говоря, не позволяют нам «тщательно рассмотреть», например, атомы или другие микрочастицы. Каковы пределы возможностей исследовательской аппаратуры? Главным элементом сканирующих туннельных микроскопов выступает очень тонкий металлический зонд (иногда его называют щупом или просто иглой),двигающийся вдоль поверхности. Между зондом и поверхностью приложено электрическое напряжение, в результате чего возникает туннельный ток, величина которого позволяет фиксировать неоднородности или иные особенности исследуемой поверхности. При этом зонд должен находиться на расстоянии 1 мкм (10^{-6} м) от образца, что является условием возникновения и поддержания туннельного тока (при более малых расстояниях возникает сильный электрический ток обычного типа, а при больших — туннельный ток становится исчезающе малым). Положение зонда, следовательно, определяется некоторым фиксированным значением туннельного тока. Сканируя поверхность подобно лучу в электронной трубке телевизора, экспериментатор получает высокоточную картину состояния поверхности. При идеальной «остроте» зонда (когда на его острие будет находиться один-единственный атом!) точность описания будет соответствовать отдельным атомам. Небольшие изменения величины туннельного тока могут означать, например, изменения ориентации атома на поверхности и т. п.

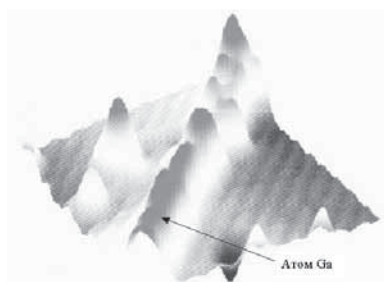
В реальных установках экспериментаторы, конечно, не могут пользоваться столь тонкими, атомарными зондами, а применяют пьезоэлементы из специальной керамики, в которой изменения приложенного электрического напряжения вызывают механическое сжатие. Такие пьезоэлементы уже широко применяются и в бытовой технике, когда необходимо «перевести» электрические сигналы в механические колебания (например, для подачи звуковых сигналов в электронных часах и других устройствах). Технические проблемы работы с СТМ обусловлены тем, что движение зонда вдоль поверхности должно регистрироваться и контролироваться с исключительно высокой, атомарной точностью.

На рис. 9 приведена принципиальная схема работы сканирующего туннельного микроскопа и пример получаемых при этом

СТМ-изображений поверхности. Изображение соответствует поверхности кристаллического кремния, на которую нанесен один «ряд» атомов галлия.



Колебания пьезоэлемента соответствуют величине туннельного тока



Образец получаемых изображений поверхности кремния, на которую нанесен один «ряд» атомов галлия

Рис. 9. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа

3.7. Работа атомно-силового микроскопа

Дальнейшее развитие принципа сканирования поверхности!

Выше уже отмечалось, что сканирующие туннельные микроскопы могут применяться только для изучения поверхности электропроводящих материалов. Этот существенный недостаток методики стимулировал дальнейшие разработки, в результате чего уже в 1986 году одновременно в двух исследовательских центрах (в уже упоминавшейся цюрихской лаборатории фирмы ИБМ и в Стэнфордском Университете США) был создан новый тип электронного микроскопа, позволяющий изучать поверхность материалов-изоляторов.

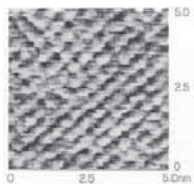
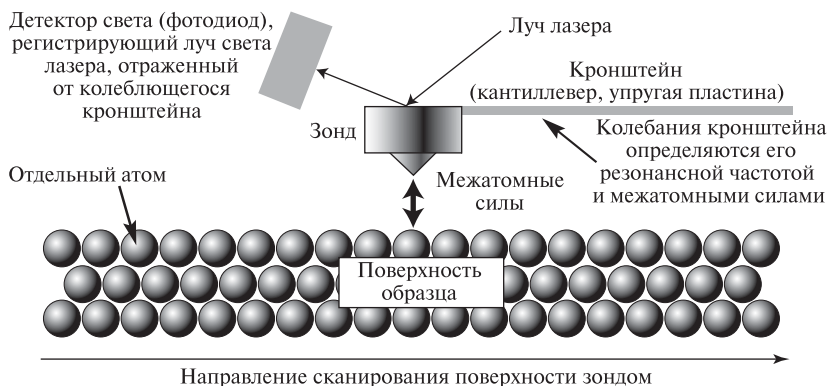
В этом устройстве, получившем название атомарно-силового микроскопа (АСМ), используются измерения межатомарных сил. В АСМ зонд прикреплен к концу плоской пружины (кронштейна) и его положение определяется величиной межатомных сил, возникающих между острием зонда и атомами поверхности. Таким образом, в этом приборе измеряемой физической величиной (т. е. параметром) выступают непосредственно силы взаимодействия между атомами, величина которых определяется «шероховатостью» конкретного участка поверхности в точке измерения. Эти силы являются «отталкивающими» по характеру, а их величина может быть выражена в привычных нам единицах силы, т. е. ньютонах (естественно, в абсолютном значении эти силы соответствуют лишь наноньютонам, нН). В остальном принцип действия атомарно-силового микроскопа остается прежним, т. е. поверхность сканируется зондом (с тщательной регистрацией положения и контролем расстояния между зондом и образцом), после чего полученная информация переводится в изображение.

С какой точностью можно регистрировать расстояние зонд-поверхность в указанном устройстве? Поскольку фактически речь идет просто об экспериментальном измерении положений пластины-кронштейна, мы можем использовать для измерений оптический лазер. Величина межатомных сил, возникающих между острием зонда и атомами конкретного участка «шероховатой» поверхности, соответствует степени изгиба пластины-кронштейна, которую можно измерить с высокой точностью, регистрируя отраженный пластиной лазерный луч при помощи обычного оптического детектора (фотодиод), как показано на рис. 10.

АСМ позволяет получать изображение поверхности с очень высокой точностью (вплоть до ангстремов, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), превышающей точность сканирующих туннельных микроскопов. Это объясняется тем, что в АСМ нет ограничений на близость острия зонда к исследуемой поверхности, так как АСМ применяют для изучения материалов-диэлектриков, в которых токи не возникают. Изобретение АСМ стало очень важной вехой в изучении атомарной структуры непроводящих материалов вообще.

Кроме этого, точность АСМ может быть повышена за счет улучшения характеристик материала кронштейна (плоской пружины). Возникающие в кронштейне слабые упругие напряжения регистрируются с достаточно высокой точностью (около 1 нН), что соответствует атомарному уровню разрешения для структуры. Информация о поверхности проводящих материалов, получаемая с помощью АСМ, может рассматриваться как дополнительная по от-

ношению к результатам измерений сканирующим зондовым микроскопом, что создает дополнительные возможности для анализа и сравнения данных. В последнее время АСМ стали применять в экспериментах по измерению некоторых других характеристик поверхности (например, магнитных или электростатических сил, а также адсорбционных и иных параметров). В нижней части рис. 10 показано АСМ-изображение поверхности электрода, изготовленного из арсенида галлия (GaAs). Расстояние между атомами в решетке составляет около 0,4 нм, что вполне достаточно для их индивидуальной идентификации.



Микрофотография взята из работы М. Koinuma, К. Uosaki, Surf. Sci., 311, L737 (1994), с разрешения лаборатории физического факультета Университета Хоккайдо и издательства. Более подробная информация может быть получена на домашней странице в Интернете по адресу: <http://pchem.sci.hokudai.ac.jp/introduction/AFM/document.html>

Рис. 10. Принцип работы атомно-силового микроскопа

3.8. Принцип работы сканирующего оптического микроскопа ближнего поля (СОМБП)

Неожиданное возрождение старой идеи!

История развития сканирующих оптических микроскопов ближнего поля (и связанных с ними сканирующих зондовых микроскопов, вообще) является достаточно длительной, поскольку теоретически основной принцип их действия был разработан еще в 1928

году. Первые конструкции устройств таких типов были предложены в 1956 году, однако из-за технических сложностей (связанных, главным образом, с использованием микроволновой техники с длинами волн ~ 3 см) первые практические испытания и эксперименты по методике ближнего поля были проведены лишь в 1972 году.

С 1981 года началась, образно говоря, «эпоха» бурного развития зондовых электронных микроскопов (СТМ, АСМ, СЗМ), что еще на какое-то время отвлекло внимание от оптических микроскопов ближнего поля и задержало их развитие, однако позднее, в начале 90-х годов интерес к СОМБП возродился, что можно (по крайней мере, частично) связать с заметным прогрессом в технике изготовления и обработки оптических волокон. В 1992 году на СОМБП была получена пространственная разрешающая способность в $1/40$ от длины волны света, а в настоящее время, применяя для «заострения» концов оптических волокон сложную технику травления, эту величину можно довести до 20 нм.

В разделе 2.5 сканирующие оптические микроскопы ближнего поля упоминались в качестве разновидности или модификации сканирующих зондовых микроскопов, что требует некоторых дополнительных разъяснений. Читатель уже знает, что в СЗМ поверхность образца сканируется зондом (этот процесс можно было бы назвать даже калькированием). Выше уже отмечалось, что такое сканирование нельзя осуществить оптическими микроскопами, поскольку разрешающая способность последних ограничена длиной волны видимого света (дифракционный предел) и не может быть выше нескольких сотен нм.

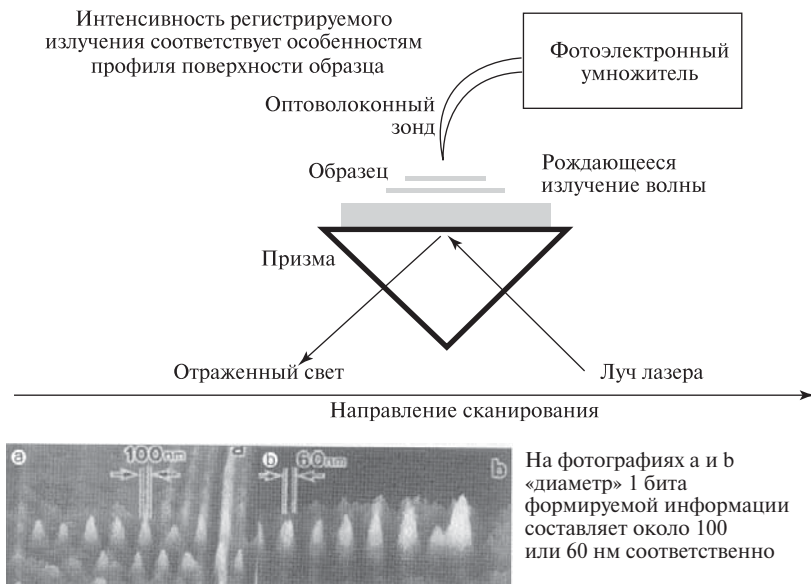
Принцип работы СОМБП связан с тем, что на очень близких расстояниях от поверхности зеркала (т. е. на расстояниях много меньших длины волны падающего света) в области ближнего поля возникают так называемые «постоянно рождающиеся» (ever nascent) волны, обусловленные полным отражением света от облучаемой поверхности.

Интенсивность такого излучения ближнего поля резко падает с увеличением расстояния от поверхности, однако длина его волны при этом не изменяется. Такое излучение можно рассматривать и регистрировать в качестве независимого отраженного луча, пользуясь обычными приемами (например, при помощи собирающей линзы и фотоэлектронного умножителя). Метод позволяет сканировать поверхность образца, аналогично туннельному и атомно-силовому микроскопу, а его разрешающая способность при этом соответствует длинам «порождаемых» волн.

СОМБП позволяет получать оптическую информацию о строении поверхности образца в нанометровом масштабе и поэтому

представляется весьма перспективным для исследований и применений в области оптических запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи, а также для технологий оптической микрообработки поверхностей.

На рис. 11 представлена СОМБП-фотография, иллюстрирующая формирование 1 бита информации за счет фазовых переходов в записывающей среде.



Дополнительная информация по методам оптической записи описываемого типа и т. п. размещена на домашней странице в Интернете по адресу:
<http://www.oitda.or.jp/hw9852-j.html>

Рис. 11. Принцип работы сканирующего оптического микроскопа ближнего поля

3.9. Развитие техники фотообработки

Прорыв в область вакуумного ультрафиолета!

Современная технология позволяет промышленно производить так называемые большие интегральные схемы, БИС с размерами элементов схемы (толщиной соединительных проводов) около 180 нм. Для получения схем с более тонкими проводами и

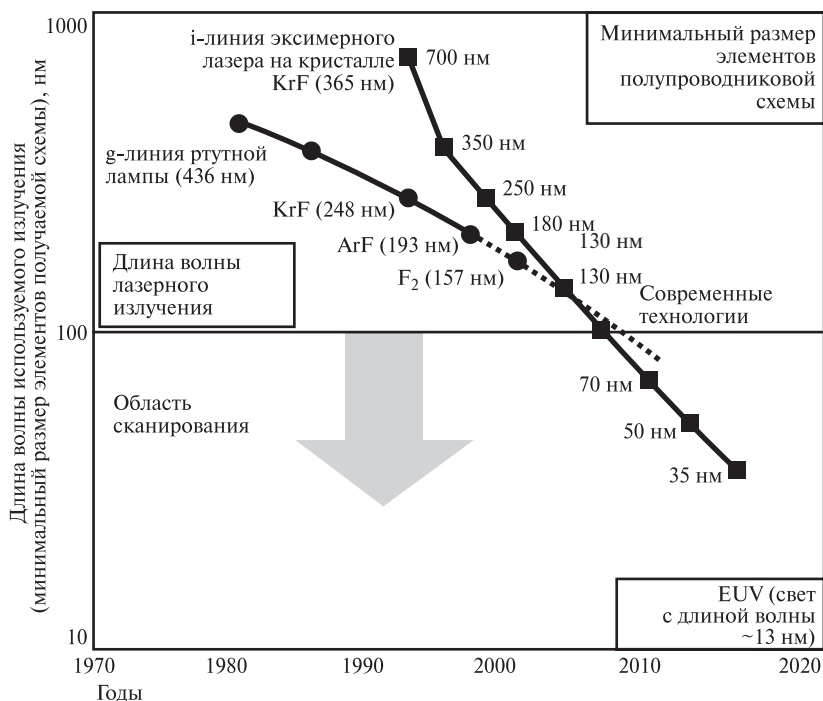
повышения степени интеграции БИС необходимо применять литографическую технику, при которой изображение на кремниевой пластине формируется за счет экспозиции (т. е. облучения интенсивным источником света) с использованием так называемых масок, обеспечивающих освещение требуемых участков.

Размеры создаваемых таким образом элементов схемы определяются при этом длиной волны источника света, вследствие чего для повышения степени интеграции (плотности компоновки) необходимо применять источники света с предельно короткими длинами волн. В настоящее время для этих целей чаще всего пользуются излучением в коротковолновой области от 436 нм (g-линия ртутной лампы) до 385 нм (i-линия эксимерного лазера на кристалле K₂F). Одновременно изучаются возможности перехода к еще более коротким длинам волн за счет использования излучения эксимерного лазера на кристалле ArF, имеющего длину всего 103 нм. К сожалению, пока не созданы лазеры, позволяющие реально генерировать излучение во всей нанометровой области (1–100 нм), что позволило бы совершить решительный прорыв в повышении степени интеграции электронных схем.

В самое последнее время в этой области исследований возник большой интерес к возможностям разработки новой технологии, названной вакуумной литографией или литографией сверхдально-го ультрафиолета (EUV-lithography), позволяющей работать именно в очень коротковолновом, нанометровом диапазоне длин волн (от нескольких нм до нескольких десятков нм) и дающей надежду добиться к 2011 году производства БИС со стандартной шириной соединительных линий около 50 нм. Конечно, практическое внедрение такой методики является очень сложной задачей, поскольку излучение в указанной области легко поглощается различными материалами, вследствие чего ее можно применять лишь с использованием так называемых «многослойных зеркал», т. е. оптических элементов, в которых коэффициент преломления (рефракция) регулируется чередованием тонких слоев двух материалов с разными коэффициентами. Такое чередование позволяет получить очень большой коэффициент преломления в целом и резко снизить уровень поглощения излучения материалами. Этот подход сейчас представляется весьма перспективным, хотя следует отметить, что в описываемой методике остаются нерешенными и некоторые другие проблемы.

Описываемая технология с использованием вакуумного ультрафиолета связана с созданием микропаттернов (микроизображе-

ний) при помощи электронных пучков или рентгеновских лучей. Однако оборудование для получения микросхем электронными пучками обычно является очень сложным, а обработка рентгеновскими лучами — дорогой и недостаточно надежной в эксплуатации. Поиски новых возможностей для создания микроматриц продолжаются, наиболее перспективной и интересной на сегодняшний день выглядит техника «нановпечатывания» (nanoimprint) матриц в кристаллическую пластинку.



До 2000 года — технологии, использующие лазерное излучение

К 2005 году — прорыв к новым технологиям и использованию новых явлений

Новые технологии (EUV-литография, электронная и рентгеновская литография)

По материалам Института «Хитати Сокэн»

Рис. 12. Развитие литографической техники

3.10. Что такое углеродные нанотрубки?

*Новое вещество с необычными свойствами
и возможностями!*

Углеродные нанотрубки представляют собой крошечные цилиндры или цилиндрические образования с диаметром от 0,5 до 10 нм и длиной примерно в 1 мкм. Они являются новой кристаллической формой углерода, открытой в 1991 году сотрудниками научно-исследовательского отдела Национальной Электронной Компании (NEC). Углеродные нанотрубки похожи на свернутые в рулоны «листы» (читатель может представить себе ствол бамбука), образованные из шестигранных структур или колец (типа пчелиных сот) из атомов углерода.

Ранее считалось, что углерод имеет лишь две кристаллические формы (алмаз и графит), однако в 1985 году была обнаружена и третья аллотропная форма углерода (так называемые фуллерены). Фуллерены представляют собой огромные молекулы углерода в виде замкнутых объемных структур, напоминающих по форме футбольный шар. Собственно говоря, углеродные нанотрубки образованы из таких же кристаллических структур, но собранных в другую форму.

Углеродные нанотрубки являются новым веществом или материалом, чрезвычайно перспективным для различных технических применений в некоторых очень важных практических областях, из которых стоит сразу отметить полупроводниковую технику и аккумуляцию (поглощение и хранение) водорода. Особое значение для исследователей имеет возможность введения в углеродные нанотрубки различных веществ, что сразу наводит на мысль о их возможном использовании в электронной технике, за счет преобразования и модификации полупроводниковых структур в нанометровом масштабе, т. е. повышения степени интеграции.

С другой стороны, очень важно, что углеродные нанотрубки способны поглощать и удерживать водород в больших количествах, поскольку аккумуляция водорода (точнее, создание материалов, способных удерживать водород) является одной из ключевых проблем современной техники вообще (и автомобильной промышленности, в частности). Поэтому промышленные круги сразу заинтересовались производством углеродных нанотрубок в коммерческих объемах. С научной точки зрения большой интерес представляют проблемы регулирования процессов поглощения и выделения водорода, а также обеспечение безопасности его хранения в описываемых системах.

Углеродные нанотрубки представляются весьма перспективным и ценным веществом для создания разнообразных других водород-содержащих устройств (от двигателя на водородном топливе до новых типов батарей), поэтому исследования в этой области ведутся весьма интенсивно, а некоторые из них уже близки к стадии промышленного внедрения.

Общераспространенные электронно-лучевые трубки Брауна (с подогреваемым катодом) работают в бытовых телевизорах под очень высоким напряжением (~ 10 кВ) и потребляют большое количество энергии. Использование углеродных нанотрубок, возможно, позволит перейти к так называемым низкотемпературным катодам, т. е. понизить прилагаемое напряжение примерно до 500 В, что имело бы огромное практическое и экономическое значение.

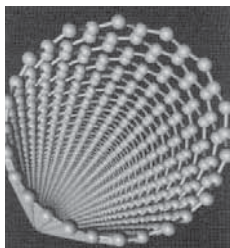
Открытие углеродных нанотрубок профессором Сумио Идзисима — важное событие в истории мировой науки!

Научные задачи

Модификация полупроводников
Получение материалов с высоким магнитным сопротивлением
Возможность адсорбции и удержания водорода
Изменение проводимости металлов
Получение и организация производства полупроводников, водород-удерживающих материалов и т. п. для конкретных изделий (электроника, топливные элементы и т. д.)

Технические проблемы

Изготовление однослойных углеродных нанотрубок
Организация крупномасштабного промышленного производства



Модельная структура углеродной нанотрубки
Фотография предоставлена фирмой
«Нихон дэнки кабусики кайся»

Рис. 13. Углеродные нанотрубки

3.11. Нанотехнология и проблема записи информации

Упорядочение записывающих сред!

Вот уже долгое время плотность записи информации на драйверах жестких дисков (hard disk driver, HDD) возрастает почти с постоянной скоростью 80–100% в год, вследствие чего к 2005 году она

должна была бы достигнуть уровня 100 гигабит/кв. дюйм, однако сейчас уже намечаются некоторые принципиальные ограничения такого непрерывного увеличения.

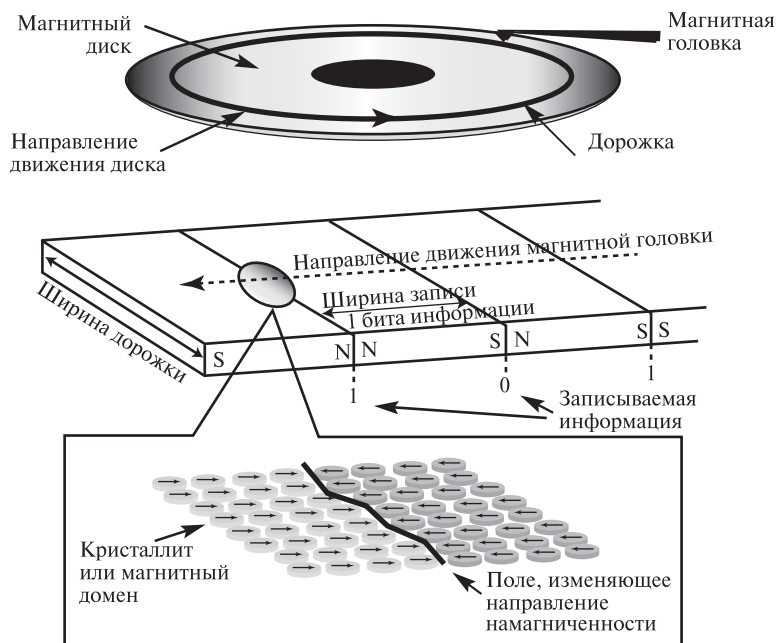
Дело в том, что на магнитной пленке запись одного бита информации связана с использованием, по крайней мере, одного магнитного домена, размеры и форма которых меняются в широких пределах. Поэтому магнитная дорожка записи информации, определяемая границами доменов, представляет собой ломаную (зигзагообразную) линию, что при воспроизведении записи является постоянным источником шумов. Повышение плотности записи требует, с одной стороны, уменьшения размера доменов на поверхности магнитной пленки, а с другой — создания более «гладких» или прямолинейных границ между магнитными доменами (кристаллитами среды). Однако простое уменьшение размеров магнитных доменов приведет лишь к усилению роли тепловых флуктуаций, в результате чего магнитная запись станет еще менее надежной для воспроизведения (можно подсчитать, что обеспечение высокой надежности записи информации требует, чтобы на поверхности магнитных дисков каждому биту соответствовали десять доменов магнитной структуры).

Это ограничение можно преодолеть за счет использования новых сред для записи информации и создания информационных массивов записи из более мелких и более упорядоченных магнитных доменов, т. е. за счет новых методов структурирования записываемой среды. Одним из путей решения этой задачи является создание запоминающих пленок с магнитными доменами одинаковых размеров и формы, что позволило бы, в принципе, создать запись, в которой одному биту информации будет соответствовать один магнитный домен.

В октябре 1999 года в исследовательском центре фирмы «Хитати» и в лаборатории Университета Тохоку сумели создать среду, в которой плотность магнитной записи достигает 300 гигабит/кв. дюйм. В обоих случаях такая плотность записи была достигнута за счет создания массивов (которые можно назвать решетками) из магнитных доменов-кристаллитов одинакового размера. При этом намагничивание (запись информации) каждого кристаллита осуществляется раздельно. Периодичность решетки составляет около 150 нм, диаметр каждого кристаллита равен 80 нм, а высота — 40 нм.

Описанные достижения имеют принципиальный характер и открывают путь к крупномасштабному производству дешевых средств магнитной записи с высокой плотностью, хотя задача в целом еще требует решения ряда технических проблем (разработка

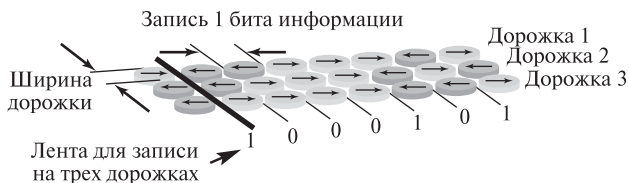
считывающей головки для воспроизведения записи и т. д.). Если размер кристаллитов удастся снизить до 10 нм, то плотность записи может быть доведена до 1 терабит/кв. дюйм.



Изломы (зигзагообразность) линии, соответствующей границе намагниченных областей, снижает надежность записи

Способ повышения плотности записи
Запись 1 бита информации
одним кристаллитом

Искусственное регулирование
формы и упорядоченности
кристаллитов



Рисунки представлены Отделом нанотехнологий промышленно-технического комитета Кэйданрэнь

Рис. 14. Запись и хранение информации

С другой стороны, в оптических записывающих устройствах при высокой плотности записи информации (порядка десятков гигабит/кв. дюйм) считывание информации становится невозможным. Существующая техника записи лазерным лучом позволяет доводить плотность до 40 гигабит/кв. дюйм, однако ее применение связано с дополнительными сложностями и ограничениями.

В последние годы наметилось направление исследований, позволяющее преодолеть указанные трудности. Речь идет о методах записи информации, основанных на оптическом излучении ближнего поля. Исследователи из Объединенной научно-технической лаборатории Министерства экономики и промышленности уже научились осуществлять сверхплотную запись информации на некоторых средах, пользуясь упоминавшимся выше «возникающим» излучением. Плотность записи растет из-за уменьшения длины используемого излучения, однако его интенсивность резко падает с удалением от поверхности.

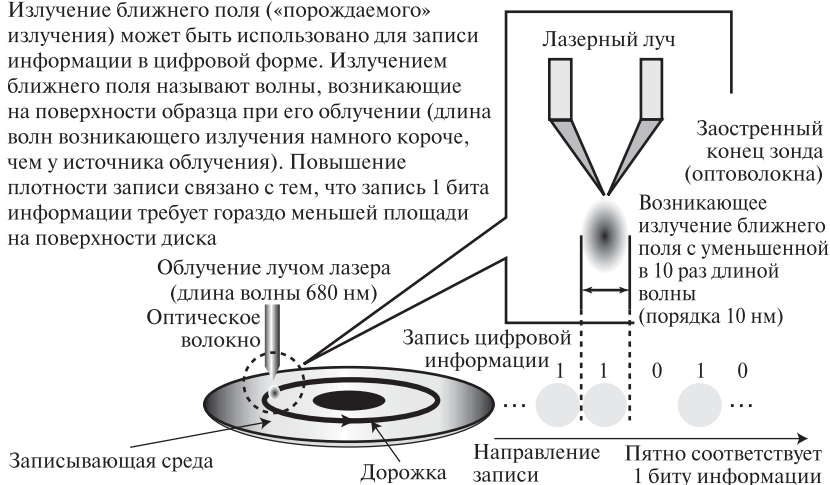
Как показано ниже на рис. 15, излучение ближнего поля с очень малой длиной волны формируется в очень небольшой области. Технология, основанная на использовании таких локальных «световых пятен», позволяет повысить плотность записи примерно в 1000 раз, по сравнению с существующими системами записи. Основным элементом записывающей системы является сужающееся (т. е. заостренное) оптическое волокно, в острие которого проделано крошечное отверстие с диаметром в несколько десятков нм (что значительно меньше длины световой волны, используемой при облучении). «Наконечник» или острие такого оптического волокна движется над плоскостью записывающего диска на расстоянии всего 10–20 нм. При освещении поверхности лазерным лучом, через отверстие в обратном направлении «просачивается» излучение ближнего поля (как отмечалось выше, размеры этого отверстия примерно в 10 раз меньше длины облучающей волны). Действие светового пятна на материал поверхности приводит к записи информации, т. е. к физико-химическим процессам и изменениям в записывающей среде, которые соответствуют, например, 1 биту информации (в качестве процессов записи информации в среде могут использоваться фазовые изменения, локальные изменения направления намагниченности, изменения коэффициента преломления среды и т. п.). При считывании поверхность должна облучаться волнами (длина которых соответствует излучению ближнего поля), которые после обычного процесса дифракции будут регистрироваться собирающими линзами и фотоумножителями. Практически процесс считывания совпадает

с описанным выше сканированием поверхности оптическими микроскопами ближнего поля.

Пространственная разрешающая способность процессов записи и воспроизведения информации описанным методом определяется размерами отверстия на острие оптического волокна, которые должны быть много меньше длины волны облучающего излучения. Лежащая в основе метода идея позволяет обойти обычные дифракционные ограничения и получить запись с плотностью порядка 1 терабит/кв. дюйм.

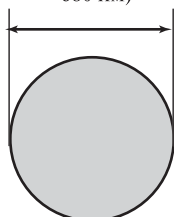
Принцип записи информации

Излучение ближнего поля («порождаемого» излучения) может быть использовано для записи информации в цифровой форме. Излучением ближнего поля называют волны, возникающие на поверхности образца при его облучении (длина волн возникающего излучения намного короче, чем у источника облучения). Повышение плотности записи связано с тем, что запись 1 бита информации требует гораздо меньшей площади на поверхности диска

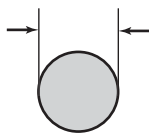


В принципе, плотность записи можно увеличить в 1000 раз! Сравнение площадей, необходимых для записи 1 бита информации

Современный метод записи (длина волны лазерного излучения — 680 нм)



Запись с использованием излучения ближнего поля (длина волны возникающего излучения — 10 нм)



Дополнительный материал может быть получен в системе Интернет на домашней странице Министерства экономики по адресу: <http://www.aist.go.jp/NAIR/optoj-index.htm#opto>

Рис. 15. Запись информации с использованием излучения ближнего поля

Излучение ближнего поля, поступающее через крошечное входное отверстие на заострении волокна, обычно имеет ничтожную интенсивность (из-за малости коэффициента пропускания) и его крайне сложно зарегистрировать, вследствие чего почти все проблемы повышения скорости записи и считывания информации в устройствах такого типа сводятся к технологическим задачам создания сверхтонких оптических волокон со сверхмалыми отверстиями на заостренных торцах.

3.12. Что такое «квантовая точка»?

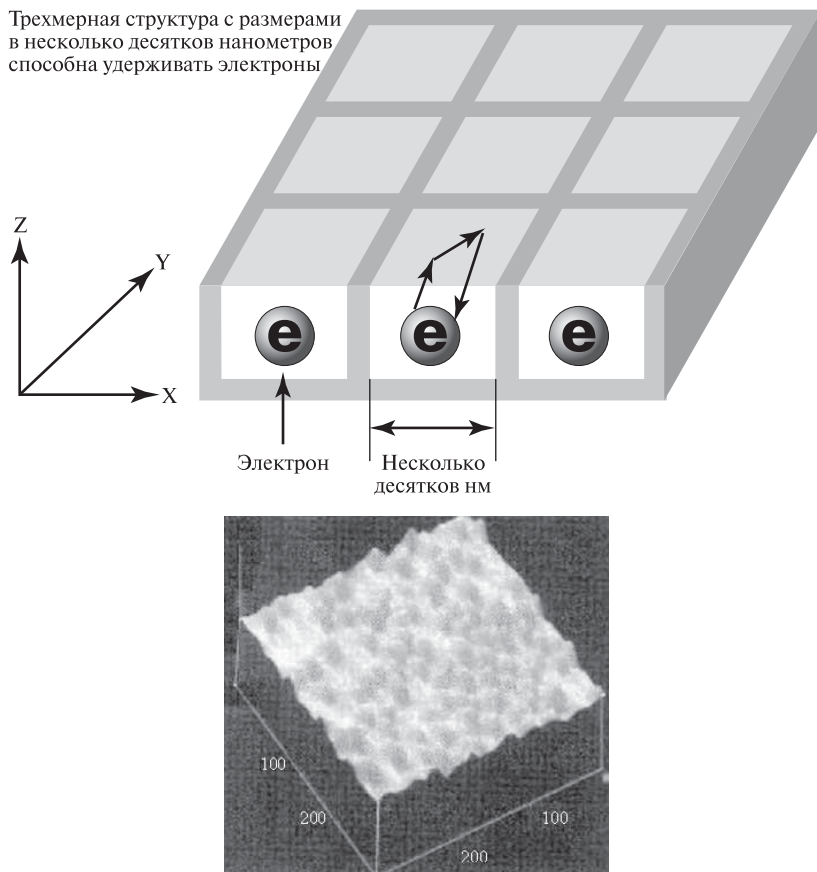
Существует возможность управлять поведением отдельного электрона!

Говоря очень упрощенно, квантовая точка — новое понятие современной физики, означающее некоторую (искусственно созданную) область вещества, в которой можно «хранить» небольшие количества электронов. Впервые структуры такого типа были получены профессором Промышленного факультета Токийского университета Хироюки Сакаи. Ниже приводятся очень краткие сведения, позволяющие получить представление об их природе и возможностях.

Вообще говоря, механизм действия большинства полупроводниковых устройств и приборов (например, широко распространенных транзисторов и т. п.) основан именно на регулировании потока электронов (всем знакомы процессы включено-выключено, on-off). Упомянутые выше транзисторы имеют в настоящее время размеры в несколько мкм и управляют движением «потока», содержащего от сотен тысяч до 1 миллиона электронов. В отличие от них, квантовые точки управляют движением лишь очень небольшого числа электронов (вплоть до управления одиночными электронами!), так что их можно назвать малоэлектронными (или даже одноэлектронными) транзисторами. Эта особенность квантовых точек открывает перед физиками и инженерами огромные возможности для миниатюризации полупроводниковых устройств и снижения их энергопотребления. Более того, использование квантовых точек позволяет создавать приборы и устройства совершенно новых типов (о чем рассказывается в следующем разделе).

Очень важно, что квантовые точки могут образовываться в результате упомянутых выше процессов самосборки. Если на кристаллическую поверхность кремния или арсенида галлия нанести

Трехмерная структура с размерами в несколько десятков нанометров способна удерживать электроны



Самосборка квантовой точки размером около 10 нм из соединения InAs на поверхности кристалла арсенида галлия (микрофотография получена на атомно-силовом микроскопе):

http://www.kuee.kyotou.ac.jp/~lab05/Quantum_Dots.html

Рис. 16. Что такое квантовая точка?

небольшое число атомов другого вещества (например, атомов германия и т. п.), то через некоторое время можно наблюдать, как эти «чужеродные» атомы сами собираются в некоторые структуры (так называемые «островки» или островные кристаллические структуры) размером в несколько десятков нм. Структуры такого типа и являются квантовыми точками, т. е. локальными образованиями (с характерным размером в несколько десятков нм), представляющими собой трехмерные «ловушки» для электронов.

Некоторое представление о потенциальных возможностях применения квантовых точек читатель может получить по заголовкам публикаций в научных журналах и средствах массовой информации: «Сверхминиатюрные компьютеры! Суперкомпьютер в сумке!» (научно-популярный журнал «Кагаку дзасси», 1997), «Квантовые компьютеры будут работать в миллиарды раз быстрее!» (газета «Асахи симбун», 9.04.1999), «Лазер на квантовых точках с минимальным энергопотреблением» (авторитетный научный журнал «Applied Physics Letters», 40, стр. 939).

3.13. Поразительные свойства наноустройств!

Крошечные ловушки для электрона!

Типичным примером электронных устройств нового типа, связанных с нанотехнологией, могут служить упоминавшиеся выше одноэлектронные транзисторы или запоминающие устройства, работа которых определяется поведением отдельных электронов.

1. Одноэлектронные запоминающие устройства. Важнейшим элементом современных вычислительных машин являются динамические запоминающие устройства с произвольной выборкой (Dynamic Random Access Memory, DRAM), предназначенные для быстрого последовательного считывания информации. В простейшем варианте эти полупроводниковые устройства представляют собой комбинацию конденсатора и переключателя (в этом качестве обычно применяется МОП-транзистор), которая позволяет сохранять в конденсаторной части (и, соответственно, при необходимости «выпускать») примерно 100 тысяч электронов, что и соответствует, например, переходу записывающей системы из состояния «0» в состояние «1». Ограниченность возможностей таких устройств, естественно, связана с их физическим объемом и размерами управляющих электрических сетей, что и стимулировало разработку методов, позволяющих осуществлять переключение состояния системы меньшим числом электронов, а в идеальном случае и одним-единственным электроном.

Преимущества такого подхода очевидны. Энергопотребление систем управления одиночными электронами должно, естественно, существенно сократиться. В сущности, в таких наноустройствах конденсаторы окажутся излишними, что позволит снизить размеры схем до минимума. В лабораториях фирмы «Хитати» еще

в 1993 году было создано первое в мире одноэлектронное запоминающее устройство, работающее при комнатных температурах. В 1995 году оно имело объем памяти 64 бита, а к 1998 году уже работало одноэлектронное запоминающее устройство с объемом памяти в 128 мегабит (см. материалы сборника «Хитати хэйрон», 1999). Ранее существовали экспериментальные запоминающие устройства такого типа, однако они могли работать лишь при сверхнизких температурах (близких к абсолютному нулю температуры). Основная заслуга специалистов фирмы «Хитати» состоит именно в том, что созданное ими в 1993 году устройство могло работать при комнатных температурах, т. е. было пригодно для практического использования. В 1998 году была достигнута и достаточно высокая степень интеграции схемы, в результате чего было изготовлено одноэлектронное запоминающее устройство, потребляющее при работе примерно в 100 раз меньше электроэнергии, чем существующие.

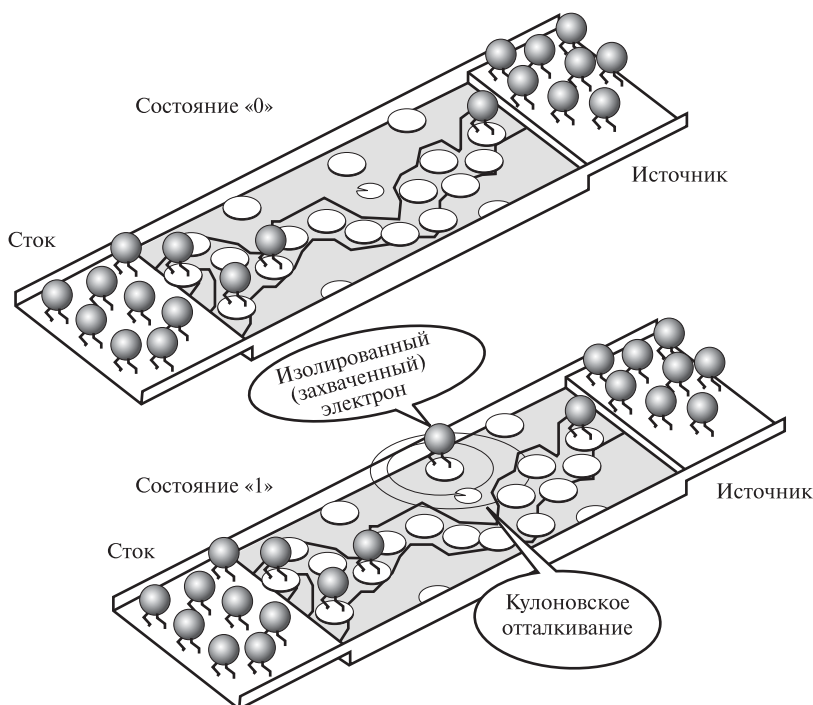


Рис. 17. Принцип работы одноэлектронного запоминающего устройства.
Источник: лаборатория фирмы «Хитати» (г-н Кадзуо Яно)

В настоящее время размеры таких устройств составляют около 100 нм, причем сама «ловушка» (trap) для электронов имеет диаметр около 10 нм. Следует также подчеркнуть, что ловушка (квантовая точка) была сформирована в результате процесса самосборки атомов на поверхности очень тонкой кремниевой пластины, вследствие чего для «подключения» квантовой точки к электрической цепи потребовалось создать специальную методику.

В отделении фирмы «Хитати», занятом разработкой больших интегральных схем (руководитель Кадзуо Яно), удалось не только впервые в мире изготовить сверхтонкую кремниевую пластину (толщиной около 3 нм!), но и создать на ней описанную выше квантовую точку. Такая сверхминиатюрная электрическая схема работает и регулирует движение отдельных электронов при комнатных температурах, что позволяет надеяться на создание в течение ближайших нескольких лет запоминающих устройств с большим объемом памяти.

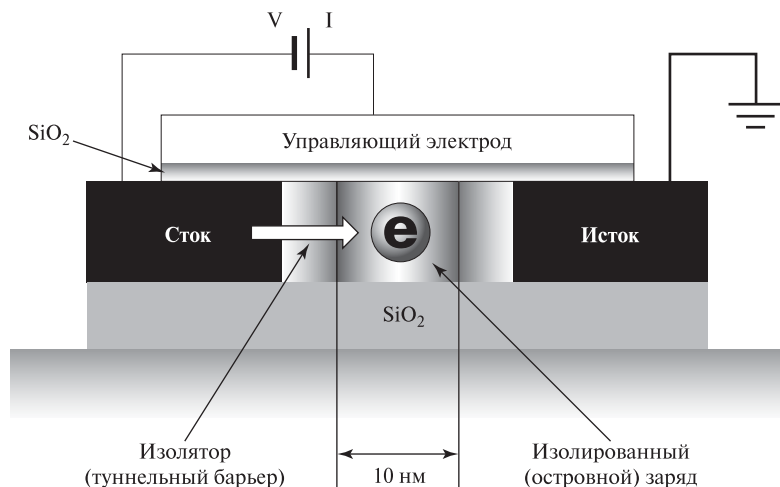
2. Одноэлектронные транзисторы. Одноэлектронный транзистор представляет собой переключающее устройство, способное соединять или разъединять электрические цепи за счет управления движением одного электрона. В существующих транзисторах, как упоминалось выше, такое переключение соответствует управлению совместным движением сотен тысяч электронов, поэтому переход к одноэлектронным переключателям обещает резкое снижение энергопотребления и, соответственно, тепловыделения.

Одноэлектронный транзистор внешне выглядит как два металлических электрода, разделенных очень тонкой (нанометровой) изолирующей перегородкой, через которую могут происходить туннельные переходы электронов (см. раздел 3.1). По этому принципу, называемому «кулоновской блокадой», работают широко распространенные МОП-транзисторы, в которых переключение осуществляется изменением потенциала управляющего электрода (gate).

На рис. 18 показана подробная схема устройства одноэлектронного транзистора. В центральной части расположен тот самый участок вещества (с размерами ~ 10 нм), в котором находятся изолированные электроны (японские физики используют даже термин «островной заряд»). Пока напряжение между управляющим электродом и истоком остается меньше некоторого порогового значения, электрон остается изолированным (как бы живущим на отдельном «острове»), однако при дальнейшем повышении напряжения (т. е. при напряжении выше порогового) «блокада» электрона прорывается, в результате чего устройство в целом срабатывает подобно обычному транзистору.

Принцип работы одноэлектронного транзистора

Управление движением отдельного электрона с использованием «кулоновской блокады»



Кулоновская блокада

Управление отдельным электроном за счет туннельного эффекта требует ничтожных изменений электрического потенциала

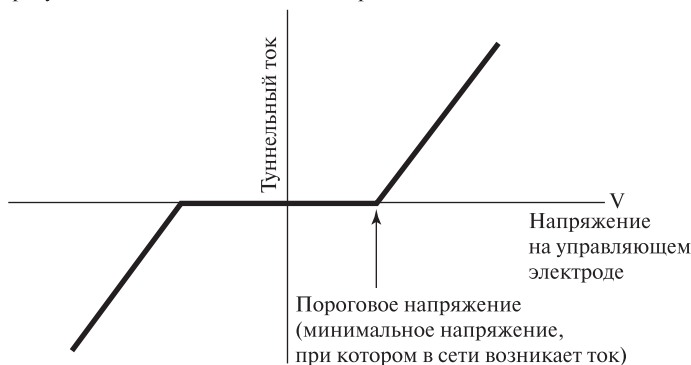


Рис. 18. Одноэлектронный транзистор — типичный пример наноустройства (по материалам Института «Хитати Сокэн»)

В 1999 году сотрудники одной из лабораторий Национальной телекомпании NNT из последовательно соединенных на кремниевой пластине одноэлектронных транзисторов смогли создать первый в мире сверхминиатюрный инвертор, т. е. схему, способную

«перебрасывать» выходное напряжение на вход. Дальнейшее развитие идеи должно привести нас к исключительно малым по размерам вычислительным и коммуникационным устройствам, потребляющим ничтожные количества электроэнергии (примером таких устройств могут служить «Пасокон» и т. п.).

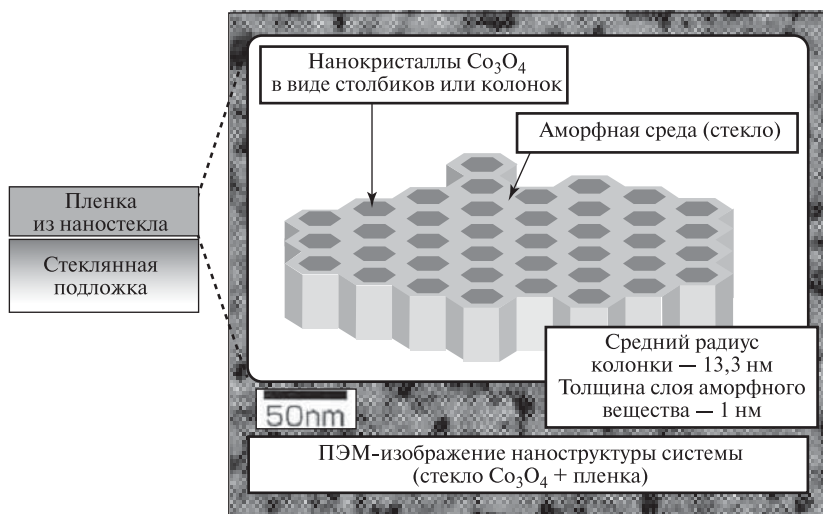
Таким образом, можно констатировать, что нанотехнология уже фактически используется в полупроводниковой технике и позволяет надеяться на значительные успехи в будущем. В настоящее время исследователи тщательно изучают закономерности используемых эффектов (типа туннельных переходов и т. п.) в наноразмерных объектах и устройствах.

3.14. Разнообразные возможности применения наностекол

Новые материалы для создания запоминающих устройств!

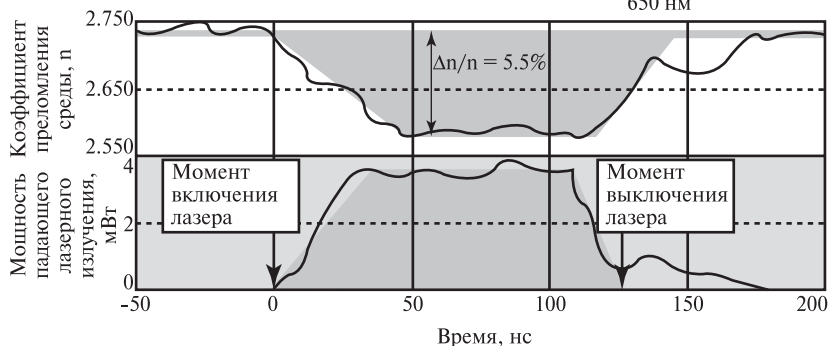
Из общих соображений ясно, что уменьшение размеров кристаллитов (кристаллических зерен) до нанометровых масштабов позволит создать из стеклообразных материалов новые, очень перспективные оптические среды (с очень высокими или регулируемыми коэффициентами преломления и т. п.). Такие среды, уже получившие название наностекол, сейчас интенсивно изучаются во многих лабораториях. В японском журнале «Кагаку когё нитихо» («Вестник химической промышленности») 20 февраля 2000 года уже сообщалось о работах фирмы «Хитати» в области структуры наностекол и возможностей их применения в оптических устройствах. В первую очередь, речь идет о создании на поверхности стекол сотовых структур и заполнении таких сот «столбиками» из различных наноматериалов. Например, этим методом можно создать сверхтонкую пленку (мембрану) из наностекла окиси кобальта. В лабораториях фирмы «Хитати» уже получены пленки в виде плоских сот (с диаметром 13,3 нм), разделенных сверхтонкими стенками или перегородками (с толщиной около 1 нм). Такие пленки и могут рассматриваться в качестве особых стекол, в которых аморфный материал стенок заполняет упорядоченную структуру, показанную на рис. 19. Обнаружено, что коэффициент преломления таких стекол (являющихся, фактически, сочетанием нанокристаллитов и аморфных зерен) может изменяться в очень широких пределах. Точный механизм этого эффекта пока не раскрыт, одна-

В стекле формируются нанокристаллические образования, позволяющие изменять коэффициент преломления среды в широких пределах



Возможность регулирования коэффициента преломления и скорости отклика системы при лазерном облучении

Длина волны лазерного излучения 650 нм



Чередование нанокристаллов и аморфных зерен («стеклянная» фаза) создает новые возможности управления коэффициентом преломления в широких пределах. Эффект возникает из-за преломления в колонках и отсутствия преломления в аморфных средах.

Представлено лабораторией фирмы «Хитати» (руководитель — г-н Утифудзи).

Рис. 19. Пленки из наностекол

ко он, несомненно, обусловлен особенностями поведения электромагнитных полей в чередующихся слоях наноразмерных кристаллических и аморфных областей. В ближайшие годы такие мате-

риалы будут все шире применяться для создания новых, высокоэффективных устройств хранения и передачи цифровой информации (в частности, для работы в системе Интернет). Плотность записи информации в таких средах уже достигает 10 гигабит/кв. дюйм, а к 2003 году она должна дойти до 100 гигабит/кв. дюйм. К 2007 году планируется создать сеть оптической связи с плотностью записи до 1 терабит/кв. дюйм.

Сейчас инженеры фирмы «Хитати» работают над созданием объединенной системы из наностеклол и коротковолновых лазеров, что позволит производить сверхмощные оптические запоминающие устройства и пленочные экраны с повышенной четкостью изображения. Кроме этого, фирма «Хитати» занимается проблемой изготовления на основе наностеклол новых материалов для оптических переключателей, трехмерных оптических волноводов и даже устройств разделения или выделения некоторых биологических веществ (например, гормонов).

3.15. Биодатчики и информационные терминалы

Нужны надежные и долговечные биодатчики!

Экология, медицина и здравоохранение все чаще требуют от ученых и инженеров разработки надежных и удобных устройств, способных осуществлять длительный контроль и мониторинг условий существования живых организмов, а также воздействия на организмы разнообразных физических и химических факторов. Речь идет, в первую очередь, о биодатчиках и получающих все большее распространение устройствах, называемых «лаборатория-на-чипе».

Пленочные или объемные биодатчики микроскопических или нанометровых размеров могут вводиться внутрь живых организмов, а также «присоединяться» к заданным органам и тканям для осуществления непрерывного измерения требуемых параметров, а также для отслеживания реакций организма на различные воздействия. Например, на рис. 20 показан нанодатчик, который может осуществлять в автоматическом режиме химический анализ тканей, преобразовывать получаемую информацию и передавать ее по назначению.

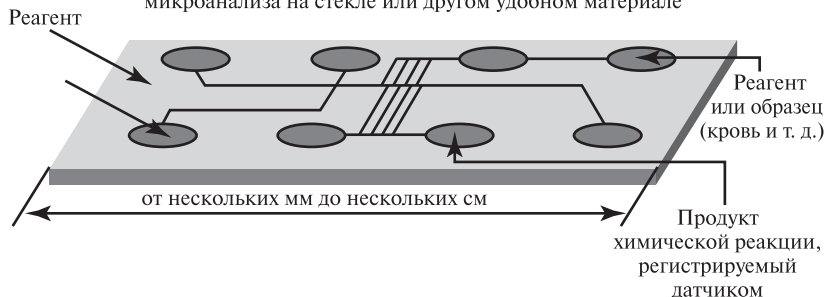
Химикам и медикам давно известны разнообразные вещества, ответственные за так называемое «молекулярное распознавание». В частности, к ним относятся антитела, обладающие высо-

Принцип работы биодатчика



Основная задача: создание высокочувствительных, надежных и долговременных датчиков

Принцип работы «лаборатории-на-чипе» — автоматическая система микроанализа на стекле или другом удобном материале



Основная функция датчика — экспресс-анализ по микроколичествам вещества

Основные проблемы — биосовместимость (объединение) тканей и датчиков; миниатюризация, обеспечение надежного и долговременного контроля за состоянием организма



Создание миниатюрных или удобных для ношения персональных накопителей биоинформации (непрерывный мониторинг состояния организма)

Рис. 20. Биодатчик — устройство, осуществляющее непрерывный мониторинг состояния организма на молекулярном уровне

кой специфичностью (т. е. избирательностью), что и позволяет им осуществлять свои функции в организме. Сложность проблемы создания биодатчиков с молекулярной избирательностью по отношению к определенным белковым соединениям связана, в основном, со сложностью обеспечения длительного и надежного функционирования. Биодатчики и искусственные материалы с высокой избирательностью обычно быстро теряют способность к молекулярному распознаванию, вследствие чего для их создания необходимо, прежде всего, научиться синтезировать молекулы, надолго сохраняющие заданные избирательность и химическое сродство. Для решения этой проблемы уже давно ведутся интенсивные исследования возможностей присоединения молекул и антител к поверхности различных полимерных материалов. На этом направлении химиками уже достигнуты значительные успехи, позволяющие надеяться на создание в близком будущем надежных и долговременных биодатчиков.

С другой стороны, в последние годы огромное внимание уделяется разработке аналитических микроустройств на стеклянных или кремниевых чипах, получивших название «лаборатория-на-чипе». Примерами таких устройств могут служить известный ДНК-био-чип (размером в несколько мм) или микродатчик длительного действия для слежения за состоянием здоровья пациента под названием health-care-sensor, разработанный в Токийской лаборатории специальной керамики группой под руководством проф. Накаяма. Проектирование и изготовление таких биодатчиков, естественно, оказывается связанным с развитием новых методов обработки и пересылки информации из контролируемого организма, а также разработкой новых источников питания. Информация о состоянии организма должна передаваться через специальные «информационные терминалы», которые могут иметь самую различную форму (например, представляется удобным изготавливать такие устройства в виде серьги, вдеваемой в ухо пациента).

Следующим этапом развития биодатчиков является создание микроустройств, которые не только смогут отслеживать состояние организма, но и смогут, в случае острой необходимости (например, при резком ухудшении состояния здоровья), автоматически выполнить некоторые требуемые действия. Такие «умные» устройства могут например, не только осуществлять непрерывное измерение кровяного давления человека или частоты сокращения его сердечной мышцы, но и «обращаться» к врачу в некоторых ситуациях и вводить в организм по полученным рекомендациям требуемые лечебные препараты.

3.16. Что такое квантовый компьютер?

Мечта о сверхмощном и миниатюрном компьютере становится явью!

Идея создания так называемого квантового компьютера возникла еще несколько десятков лет тому назад, когда сотрудники фирмы ИБМ Рольф Ландауэр и Чарльз Х. Бернетт предложили отказаться от применения электрических сетей и т. п. в процессах обработки информации и перейти к использованию законов квантовой механики. Компьютеры такого типа должны были отличаться от обычных исключительно малыми размерами и новыми принципами проведения вычислительных операций.

В 1980 году Поль Бениофф в Аргоннской Национальной лаборатории США сумел создать первый компьютер на основе идеи Ландауэра и Бернетта, который работал в соответствии с квантово-механическими принципами. В дальнейшем значительный вклад в развитие квантовых компьютеров внес профессор Оксфордского Университета Дэвид Дейч, который (совместно с рядом американских и израильских ученых) начал работы по моделированию таких устройств. В частности, особое значение получили исследования квантово-механических эффектов при сверхвысокой скорости вычислительных процессов. В настоящее время многие вопросы теории квантовых компьютеров можно считать решенными, а проблема их реализации упирается лишь в технические сложности (например, повышение надежности и т. д.). Начиная с 1980 года, исследования в этой области постоянно расширяются и углубляются.

В 1993 году в развитии квантовых компьютеров произошло еще одно важное событие, так как Сэту Ллойд из Массачусетского технологического института удалось спроектировать другую физическую систему, позволяющую реализовать квантовые принципы в вычислительных операциях. В 1994 году Петер В. Шор из исследовательской лаборатории фирмы AT&T Bell разработал еще одну модель квантового компьютера, позволившую решить известную задачу о разложении очень больших целых чисел на множители. Предложенная Шором схема дает возможность в разумные промежутки времени получить разложения на множители огромных, 100-разрядных чисел, что стало «ключом» к решению многих важных математических проблем и сыграло большую роль в развитии самих квантово-механических технологий.

Существующие компьютеры (которые можно назвать классическими) обрабатывают информацию только на основе представления об одном бите информации (который соответствует переходу из состояния **0** в состояние **1** или наоборот). В отличие от них, квантовые компьютеры могут перерабатывать информацию, исходя из представления о так называемом квантовом бите (кубите), что позволяет, например, осуществлять одновременно четыре логических операции (типа: $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$, $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 2$). Поэтому 5 кубитов соответствуют числу $2^5 = 32$, а 10 кубитов — числу $2^{10} = 1024$, что позволяет вычислителям работать с очень большими числами (точнее говоря, с числами в виде показательной функции) и значительно увеличить скорость переработки информации.

Существующие компьютеры перерабатывают информацию на основе законов классической физики, используя представление о бите информации (соответствующем переходу между состояниями 0 и 1). Основной принцип работы — простые последовательные вычислительные схемы

Уменьшение размеров устройства до квантовых



Квантовые компьютеры перерабатывают информацию на основе законов квантовой механики, используя представление о кубите (квантовом бите информации, описывающем все комбинации состояний 0 и 1).

История развития квантовых компьютеров	
Годы	Основные достижения
1985	Профессор Оксфордского университета Д. Дойч (David Deutsch) предложил математическую модель квантово-механического варианта машины Тьюринга
1994	Питер В. Шор (из фирмы AT&T Bell) показал, что квантово-механическая машина Тьюринга действительно может быть создана. В частности, она оказалась весьма эффективной в решении задачи о разложения на множители больших чисел. Алгоритм Шора сейчас широко используется при создании различных типов квантовых компьютеров
1995	Для обработки информации в квантовых компьютерах предложено использовать кубит (квантовый бит)
1998	М. Такэути (в настоящее время работает в лаборатории передовых технологий фирмы Мицубиси Дэнки) провел принципиальные эксперименты по квантовым вычислительным системам с использованием фотонов
1999	Н. Накамура (лаборатория фундаментальных исследований фирмы NEC) успешно провел исследования практической работы квантового компьютера
Рисунок взят из сборника «Справочник по информационным технологиям для бизнесменов», изданного Информационным центром фирмы Какэй. Дополнительную информацию можно получить в системе Интернет по адресу: http://it.nikkei.co.jp/it/dic/3.cfm	

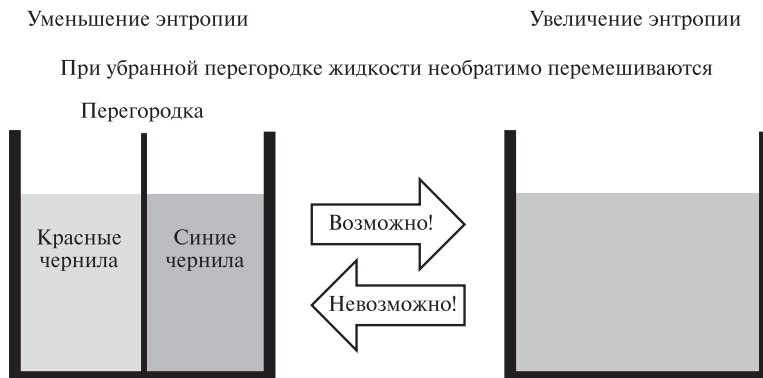
Рис. 21. Квантовый компьютер — поразительное быстрдействие

Дополнительный материал к главе 3. Это интересно!

Наука против демона Максвелла!

Закон возрастания энтропии

Каждый из нас знает, что вино из разбившегося или перевернутого бокала, увы, пропадает навсегда! Мы не можем обратить время вспять, что и выражает японская поговорка о воде, которая «никогда не возвращается в перевернутую чашу». Еще более простая ситуация представлена на рис. 22. Сосуд слева состоит из двух частей (разделенных в исходном состоянии перегородкой), заполненных чернилами разных цветов, например красного и синего. Если убрать перегородку, то чернила перемешаются и в сосуде образуется однородная смесь фиолетового цвета, которая никогда вновь не разделится естественным образом на исходные компоненты. Эти простые примеры привычных нам необратимых процессов отражают один из самых важных законов физики, в соответствии с которым энтропия при естественных процессах всегда возрастает, т. е. все системы в мире развиваются от более упорядоченного состояния к менее упорядоченному.



Демон Максвелла может стать реальностью!
Умение манипулировать отдельными
атомами и молекулами позволяет
«обратить» время и разделить жидкости!

Рис. 22. В нанотехнологии может существовать демон Максвелла!

Нанотехнология может обратить время!

Знаменитый ученый Дж. Максвелл когда-то придумал воображаемое существо (эту роль может играть и устройство!), которое могло бы понижать энтропию системы, манипулируя атомами и молекулами. Физики уже давно доказали, что такое существо или устройство (называемое «демоном Максвелла») нельзя создать реально, однако нанотехнология, дающая возможность работать с атомами и молекулами, неожиданно возродила старую идею, поскольку она позволяет в некотором смысле «обращать» процессы и уменьшать энтропию обрабатываемой системы. Вспомните, что даже смерть человека является лишь одним из проявлений процесса роста энтропии! Возможно, что когда-нибудь нанотехнологические манипуляции с атомами подарят человечеству вечную молодость или даже бессмертие!