

НАНОТЕХНОЛОГИЯ

Н.Кобаяси

ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИЮ



БИНОМ

テクノ図解

新時代のキーワードが
面白いほどよくわかる!!

NanoTechnology

ナノテクノロジー

10億分の1!! 原子、ウイルスも自由に
操作できる夢のテクノロジー

日立総合計画研究所
主任研究員

小林 直哉 著

Н. Кобаяси

ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИЮ

2-е издание

Перевод с японского

А. В. Хачояна

под редакцией

проф. Л. Н. Патрикеева



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2008

Кобаяси Н.

К55 Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; пер. с японск. — 2-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 134 с. : ил. — (Нанотехнология).

ISBN 978-5-94774-841-3 (русск.)

ISBN 4-492-09151-3 (яп.)

Книга в популярной форме знакомит читателя с достижениями в области нанотехнологии в Японии и других странах в конце XX—начале XXI века. Продемонстрированы поистине фантастические возможности нанотехнологии в таких областях, как электроника, энергетика, биология, медицина и др. Большое внимание уделено экономическим и социальным последствиям внедрения нанотехнологии в жизнь общества.

Для студентов, изучающих дисциплины, связанные с применением нанотехнологии, а также для преподавателей соответствующих специальностей.

УДК 621.3.049.77
ББК 32.844.1

Настоящее издание предназначено исключительно для учебных целей

По вопросам приобретения обращаться
БИНОМ. Лаборатория знаний
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: Lbz@aha.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-94774-841-3 (русск.)

ISBN 4-492-09151-3 (яп.)

© 2001 〔検印省略〕 落丁・乱丁本はお取替いたします。
© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005

Оглавление

Предисловие переводчика и редактора	7
Введение	9
Глава 1. Что такое нанотехнология?	11
1.1. Чему соответствует единица НАНО?	11
1.2. Что такое нанотехнология?	13
1.3. Как возникла нанотехнология?	15
1.4. Как ускорить развитие нанотехнологий?	17
Дополнительный материал к главе 1. Это интересно!	18
Глава 2. Фронт нанотехнологических исследований	21
2.1. История нанотехнологии	21
2.2. Естественные границы развития существующей микроэлектроники	25
2.3. Создание объектов по принципам «сверху—вниз» и «снизу—вверх»	27
Дополнительный материал к главе 2. Это интересно!	29
Глава 3. Мир нанотехнологий	31
3.1. Что такое туннельный эффект?	31
3.2. Электронные микроскопы расширяют границы оптики	33
3.3. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ)	35
3.4. Сканирующие электронные микроскопы	37
3.5. Что такое сканирующий зондовый микроскоп?	40
3.6. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа	41
3.7. Работа атомно-силового микроскопа	43
3.8. Принцип работы сканирующего оптического микроскопа ближнего поля (СОМБП)	45
3.9. Развитие техники фотообработки	47
3.10. Что такое углеродные нанотрубки?	50
3.11. Нанотехнология и проблема записи информации	51
3.12. Что такое «квантовая точка»?	56
3.13. Поразительные свойства наноустройств!	58
3.14. Разнообразные возможности применения наностекло	62
3.15. Биодатчики и информационные терминалы	64
3.16. Что такое квантовый компьютер?	67
Дополнительный материал к главе 3. Это интересно!	69

Глава 4. Экономические и социальные последствия внедрения нанотехнологий. Чего нам следует ожидать?	71
4.1. Электроника и информационные технологии	71
4.2. Наноматериалы и методы их обработки	75
4.3. Методы измерения, обработки и моделирования для получения и использования наноматериалов	77
4.4. Связь нанотехнологий с проблемами окружающей среды и энергетики	79
4.5. Нанотехнология и развитие наук о жизни	86
4.6. Нанотехнология и сельское хозяйство	89
4.7. Возможности применения нанотехнологий в авиации и космонавтике	91
4.8. Социальные последствия внедрения нанотехнологий	93
4.9. Изменения в системе образования и подготовки научных кадров	95
4.10. Проблемы коммерциализации нанотехнологических исследований	97
Дополнительный материал к главе 4. Это интересно!	102
Глава 5. Развитие нанотехнологий в мировом масштабе	104
5.1. Американская стратегия в области нанотехнологий	104
5.2. Развитие нанотехнологий в странах Европы	108
5.3. Какова ситуация в Японии?	110
Дополнительный материал к главе 5. Это интересно!	114
Глава 6. Какова должна быть стратегия Японии в развитии нанотехнологий?	116
6.1. Выбор стратегии для Японии	116
6.2. Приоритеты финансирования нанотехнологических исследований	118
6.3. Как должны быть организованы научно-исследовательские работы?	125
Дополнительный материал к главе 6. Это интересно!	126
Глава 7. Как должны быть организованы нанотехнологические производства?	129
7.1. Возможности ускорения внедрения нанотехнологий	129
7.2. Нанотехнология означает промышленную и социальную революцию!	130
Дополнительный материал к главе 7. Это интересно!	133

Предисловие переводчика и редактора

Предлагаемая книга является не научной монографией или учебником по нанотехнологии, а скорее популярным и экономическим очерком развития нанотехнологии в Японии и других странах за последние несколько лет.

В качестве очень кратких вводных замечаний к тексту хотелось бы отметить следующие обстоятельства. Нанонаука (в качестве единого целого) развивается буквально на наших глазах на «стыке» ряда считавшихся ранее независимыми наук и технологий (информационные технологии, электронная техника, биохимия, атомная микроскопия, физика и т. д.), что придает ей существенно междисциплинарный характер. Результатом своеобразного «скрещивания» наук стала серьезная проблема несогласованности парадигм, терминологии, определений, методов и научного жаргона. Создание справочников и словарей по нанотехнологии становится насущной проблемой (в частности, когда речь идет о нарастающем потоке информации на японском и китайском языках).

Нанотехнология развивается настолько стремительно, что информация очень быстро обновляется. Из самых последних публикаций на русском языке следует отметить, прежде всего, книгу «Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований» (пер. с англ. под ред. Р. А. Андриевского. — М.: Мир. 2002), представляющую собой перевод обширного доклада Межотраслевой группы по нанонауке, нанотехнике и нанотехнологии (IWGN) Национального совета по науке и технике при президенте США. Именно на основе этого доклада президент Б. Клинтон подписал в январе 2001 года известную программу ННИ (Национальная Нанотехнологическая Инициатива), которая неоднократно упоминается в предлагаемой читателю книге и которая фактически дала старт нанотехнологическому «буму» во многих странах. Книга содержит большой объем фактического, справочного и библиографического материала и является своеобразной мини-энциклопедией по состоянию исследований на момент составления доклада. Нанотехнологии посвящен также тематический номер «Российского химического журнала» («Перспективы нанотехнологии», том XLVI, № 5, 2002), дающий представление о состоянии исследований в нашей стране.*

* Отметим, что в России теоретические и прикладные работы по нанотехнологии в течение последних лет проводятся прежде всего в университетах. Промышленность только начинает требовать от вузов подготовки специалистов-системщиков, что нашло свое отражение во введении Министерством образования России нового направления подготовки специалистов по нанотехнологии. Научный Совет по этому направлению возглавил Нобелевский лауреат, академик Ж. И. Алферов.

И наконец, хотелось бы отметить следующее. Читателя не должна удивлять высокая степень «планируемости» и «государственного контроля» исследований в Японии (что особенно заметно в главах 6 и 7). Дело в том, что обычно, говоря о причинах успехов японской промышленности, все исследователи отмечают старательное копирование японцами новейших западных научных и промышленных методик. Однако нельзя забывать, что в 50–60 годы японцы изучали и копировали также многие методы управления наукой и промышленностью в СССР (в частности, программы Госплана), в результате чего в Японии до сих пор очень велика роль государства в выработке стратегии и проведении научно-технической политики. Японские НИОКР отличаются очень высокой планируемостью, организованностью и целеустремленностью, причем планирование осуществляется на нескольких уровнях (правительство, организации, фирмы). Важную роль при этом играет весьма влиятельная организация Кэйданрэн (Ассоциация японского бизнеса), объединяющая несколько сотен ведущих фирм и корпораций страны. Многие крупные фирмы организуют собственные институты, занимающиеся выработкой стратегии, планированием исследований и прогнозированием научно-технического развития отдельных отраслей, научных направлений и целых стран и регионов. В одном из таких институтов («Хитати Сокэн»), организованном фирмой Хитати, работает и автор предлагаемой книги Наоя Кобаяси, профессор Токийского Университета. Написанная им книга была издана в Японии в 2001 г., поэтому в русском переводе может показаться неуместным упоминание о 2002–2005 гг. в будущем времени. Однако мы сочли целесообразным сохранить соответствующие ссылки, чтобы дать читателю представление о возрастающих темпах нанотехнологических исследований в развитых странах и масштабах их финансирования со стороны правительственных кругов и частного бизнеса.

... Возможно, именно такого общего руководства на государственном уровне не хватает нанотехнологическим исследованиям в нашей стране...

Что касается нашей страны, где национальная программа по нанотехнологии все еще составляется, то русские, как известно, «долго запрягают», зато мчатся — не догнать! В последние годы значительно активизировались нанотехнологические исследования в ведущих научных центрах России. Итогом этих работ является серия книг, написанных отечественными авторами, которая намечена к выпуску издательством «БИНОМ. Лаборатория знаний» вслед за предлагаемой читателю в переводе с японского языка книгой Наоя Кобаяси.

*А. В. Хачоян,
Л. Н. Патрикеев
декабрь 2004 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Наступил XXI век и всех, естественно, волнуют вопросы о будущем, о развитии науки и техники в наступающем столетии. Удается ли человечеству победить страшные болезни (рак, СПИД и некоторые другие), станут ли путешествия на Луну простыми туристическими поездками, как будут выглядеть космические станции? Станут ли реальностью фантастические проекты в информационных технологиях, т. е. войдут ли в нашу жизнь крошечные компьютеры (возможно похожие на современные устройства Пасокон) с поразительным быстродействием и огромным объемом памяти, способные мгновенно записать, обработать и переслать в цифровой форме информацию любого вида? Будут ли созданы «личные» микрочипы, на которых будут записаны не только все данные о владельце (полная идентификационная карта), но и даже весь его генетический код? Станут ли такие личные миниатюрные компьютеры настолько умными, что при необходимости (например, при несчастном случае) смогут связаться с ближайшей больницей и провести «консультацию» с врачом? Можно ли надеяться, что промышленность начнет выпускать экологически безопасные автомобили, в выхлопных газах которых не будут содержаться вредные вещества? Осуществится ли, наконец, мечта человечества о жизни «в гармонии» с природой?

На пороге нового века такие вопросы задают даже школьники. Ответы на них раньше можно было искать только в научно-фантастических романах, однако в последние годы наука и техника подошли к некоторому важному рубежу, преодоление которого может значительно изменить все условия человеческого существования. Я говорю о развитии нанонауки и нанотехнологии. Эти названия звучат пока непривычно, но именно нанотехнология в перспективе обещает сделать реальностью мечты человечества.

Нанотехнологию довольно трудно определить точно, поскольку она возникла постепенно, в течение десятков лет, в результате развития и слияния целого ряда научных направлений в физике и химии 20-го века. Несмотря на проблемы с определением, нанотехнология уже реально существует, и в этой области ученые многих стран сейчас упорно соревнуются друг с другом, постоянно получая новые важные и интересные результаты. Можно сказать, что нанотехнология возникла в результате «освоения» и практического применения многих фундаментальных достижений науки, полученных за долгое время и только сейчас ставших основой новых технологий. Благодаря достижениям нанотехнологии, многие упоминавшиеся выше фантазии и мечты человечества (победа над болезнями, космические путешествия, продление жизни) могут стать реальностью в близком будущем.

Первой страной, оценившей возможности новой науки и выработавшей долгосрочную стратегию развития в этом направлении, стали Соединенные Штаты Америки, где в феврале 2000 года было объявлено о Национальной Нанотехнологической Инициативе, представляющей собой обширную научно-техническую программу. Уже в следующем, 2000 году правительство США запланировало выделить на нанотехнологические исследования около 500 миллионов долларов (что означает прирост ассигнований в 1,8 раза) и начало осуществлять целый ряд важных практических мероприятий, направленных на всемерное развитие нанотехнологии. О масштабах и значении новых технологий говорит следующий экономический прогноз — по расчетам экспертов объем рынка товаров и услуг, связанных с нанотехнологией, только внутри Японии составит 270 миллиардов долларов.

Можно не сомневаться, что в XXI веке нанотехнология будет оказывать все более возрастающее воздействие на экономическую и социальную жизнь всего человечества, что требует от Японии принятия энергичных мер для развития исследований в этой области. Развитие нанотехнологии не сводится лишь к получению конкретных научных результатов или внедрению новых технологий. На самом деле, оно включает в себя решение многих побочных экономических и социальных задач, т. е. требует целостного, системного подхода. В последнее время в Японии появляется все больше ценных книг и публикаций, посвященных нанотехнологиям, однако можно с огорчением констатировать, что почти все они относятся к чисто научной и технической стороне развития нанотехнологии. Экономические и социальные проблемы использования новых технологий почти не рассматриваются, и Япония все еще не имеет стратегии развития в этой области на государственном уровне.

В предлагаемой небольшой книге автор пытается анализировать развитие нанотехнологии с разных точек зрения. Помимо общих сведений и технических данных, в книге рассматриваются и общественно-социальные проблемы (организация научных исследований, внедрение нанотехнологий в промышленное производство, социальные последствия и т. д.), которые тоже должны быть учтены при выработке правильной и эффективной государственной стратегии Японии.

Автор постарался сделать изложение простым и понятным, поскольку книга предназначена не инженерам, а тем бизнесменам, экономистам и социологам, которые хотели бы получить хотя бы общее представление о новом и весьма перспективном направлении науки и техники.

Наоя Кобаяси
июнь 2001 г.

Что такое нанотехнология?

1.1. Чему соответствует единица НАНО?

1.2. Что такое нанотехнология?

1.3. Как возникла нанотехнология?

1.4. Как ускорить развитие нанотехнологий?

Дополнительный материал к главе 1. Это интересно!

1.1. Чему соответствует единица НАНО?

Технология, использующая наиболее скрытые и ценные свойства вещества!

В последнее время термин «нанотехнология» (сокращенно нанотэк) стал очень популярным. Он объединяет разнородные представления и подходы, а также разные методы воздействия на вещество. Поэтому, прежде чем перейти к описанию собственно нанотехнологии, автор хотел бы очень кратко пояснить, о каких объектах и размерах пойдет речь в предлагаемой книге. Легко заметить, что название новой науки возникло просто в результате добавления к весьма общему понятию «технология» приставки «нано», означающей изменение масштаба в 10^9 (миллиард) раз, т. е. 1 нанометр = $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, что составляет одну миллионную привычного нам миллиметра (для наглядности можно указать, что 1 нм примерно в 100 тысяч раз меньше толщины человеческого волоса). Разумеется, человеческое воображение и используемые нами слова, образы или термины почти неспособны сколь угодно адекватно описывать «мир» со столь крошечными объектами.

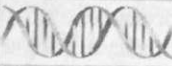
В табл. 1 приведены размеры некоторых известных естественных и искусственных созданий природы в диапазоне размеров от 10 метров до 1 ангстрема. Напомним, что 1 ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) в 10 раз меньше нанометра и соответствует диаметру самого маленького из атомов (атома водорода). К нанотехнологии принято относить процессы и объекты с характерной длиной от 1 до 100 нм. Верхняя граница нанобласти соответствует минимальным элементам в так называемых БИС (больших интегральных схемах), широко применяемым в полупроводниковой и компьютерной технике. С другой стороны, интересно, что многие вирусы имеют размер 10 нм, а 1 нм почти точно соответствует характерному размеру белковых молекул (в частности, радиус знаменитой двойной спирали молекулы ДНК равен именно 1 нм).

Из сказанного ясно, что нанотехнология как бы объединяет все технические процессы, связанные непосредственно с атомами и молекулами. Именно поэтому она представляется весьма перспективной для получения новых конструкционных материалов, полупроводниковых приборов, устройств для записи информации, ценных фармацевтических препаратов и т. д.

Хотелось бы особо подчеркнуть, что мы пока не можем, конечно, оценить и представить себе масштабы развития и возможности применения нанотехнологий в целом.

Таблица 1

Место наноразмерных объектов в окружающем нас мире

Увеличение размеров	10 м	Кит	
	1 м	Человек	
	10 см	Птичье гнездо	
	1 см	Таракан	
	1 мм	Муравей; песчинка	
	100 мкм	Толщина листа бумаги; яйцеклетка; крупная амеба	
	10 мкм	Биоклетка; толщина человеческого волоса	
	1 мкм	Эритроцит крови; кишечная палочка	
	100 нм	Минимальный размер элементов БИС	
	10 нм	Вирус; углеродная нанотрубка	
Уменьшение размеров	1 нм	Белковая молекула; диаметр спирали ДНК	
	1 Å	Диаметр атома водорода	

Источники: Ежемесячное информационное издание Кэйданрэнь (февраль, 2000 г.)

1.2. Что такое нанотехнология?

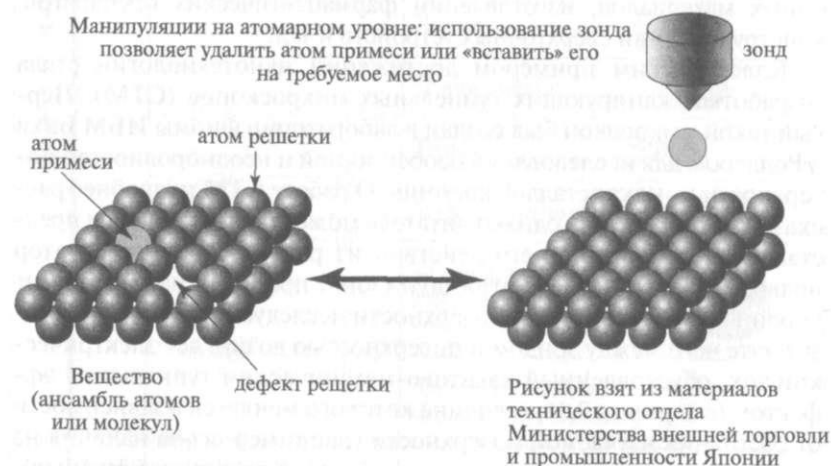
Свободная манипуляция атомами и молекулами!

Нанотехнологию можно определить как набор технологий или методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами (т. е. методик регулирования структуры и состава вещества) в масштабах 1–100 нм. Использование характерных особенностей веществ на расстояниях порядка нанометров создает дополнительные, совершенно новые возможности для создания технологических приемов, связанных с электроникой, материаловедением, химией, механикой и многими другими областями науки. Получение новых материалов и развитие новых методик обещает, без преувеличения, произвести настоящую научно-техническую революцию в информационных технологиях, производстве конструкционных материалов, изготовлении фармацевтических препаратов, конструировании сверхточных устройств и т. д.

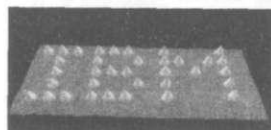
Классическим примером достижений нанотехнологии стала разработка сканирующих туннельных микроскопов (СТМ). Первый такой микроскоп был создан в лаборатории фирмы ИБМ Бихи и Роллером для исследования особенностей и неоднородностей поверхности монокристаллов кремния. О работе СТМ подробнее рассказано в разделе 3.5, однако читатель может получить общее представление о принципе его действия из рис. 1. Экспериментатор подводит тончайший золотой шуп (зонд, пробник) на расстояние около 1 микрона (10^{-6} м) к поверхности исследуемого образца, в результате чего между зондом и поверхностью возникает электрический ток, обусловленный квантово-механическим туннельным эффектом (см. раздел 3.1), величина которого меняется в зависимости от состояния изучаемой поверхности (например, из-за наличия на поверхности впадин или выступов). Замеряя величину туннельного тока или, наоборот, сохраняя ее постоянной (за счет регулирования потенциала зонда), экспериментатор может «сканировать» поверхность и получать ее прямое «изображение», подобно тому, как электронный луч создает изображение, сканируя поверхность экрана обычного телевизора. Этот метод позволяет не только изучать атомарную структуру поверхности, но и проводить разнообразные и весьма ценные физические эксперименты (например, можно проверять теоретические расчеты, относящиеся к изменению поверхности в определенных условиях и т. п.).

Работая со сканирующим микроскопом описываемого типа, экспериментаторы неожиданно вышли на следующий этап развития, а именно — стали проводить прямые технологические операции на

атомарном уровне. Прикладывая к зонду СТМ соответствующее напряжение, его можно использовать в качестве своеобразного атомного «резца» или гравировального инструмента. Впервые это удалось сделать сотрудникам Армаденской лаборатории ИБМ под руководством Д. Эйглера, которые сумели выложить на поверхности монокристалла никеля название своей фирмы (IBM) из 35 атомов ксенона, как показано на фотографии внизу рис. 1. Это стало своеобразным рекордом в методах миниатюризации записи «текста». Позднее, в 1991 году из этого выросла методика перемещения атомов ксенона вверх-вниз (относительно поверхности монокристалла), названная атомным переключением (atomic switch). В целом, описанная техника создает много возможностей как для манипуляций на уровне отдельных атомов, так и для изучения их структур и поведения.



Пример обработки вещества при помощи сканирующего туннельного микроскопа. На фотографии изображены самые маленькие буквы на свете (надпись из 35 атомов ксенона образует название фирмы IBM)



Микрофотография взята из публикации:
D. M. Eigler, E. K. Schweizer. Nature, 344, 524, 1990.

Рис. 1. Манипуляции на уровне атомов

1.3. Как возникла нанотехнология?

Нанотехнология возникла из-за революционных изменений в информатике!

В 1947 году был изобретен транзистор, после чего началась эпоха расцвета полупроводниковой техники, при которой размеры создаваемых кремниевых устройств постоянно уменьшались (интегральные схемы, большие интегральные схемы, сверхбольшие интегральные схемы, ... и т. д.). С другой стороны, одновременно непрерывно возрастали быстродействие и объем магнитных и оптических запоминающих устройств. В частности, плотность записи на жестких магнитных и оптических дисках в настоящее время уже достигает 1 гигабит/кв. дюйм. Без преувеличения можно сказать, что в полупроводниковых технологиях (иногда их называют просто кремниевыми) вот уже более полувека происходит непрерывная революция.

Однако, как отмечалось выше, по мере приближения размеров полупроводниковых устройств к 1 микрону ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), в них начинают проявляться квантово-механические свойства вещества, т. е. необычные физические явления (типа описанного в разделе 3.1 туннельного эффекта). Можно с уверенностью предположить, что при сохранении нынешних темпов развития вся кремниевая технология (и связанная с ней промышленность полупроводников) примерно через 5–10 лет столкнется с проблемами принципиального характера, так как быстродействие и степень интеграции в ЭВМ достигнут некоторых «принципиальных» границ, определяемых известными нам законами физики. Таким образом, дальнейший прогресс науки и техники требует от исследователей существенного «прорыва» к новым принципам работы и новым технологическим приемам.

Такой революционный прорыв может быть осуществлен только за счет использования нанотехнологии, которая позволяет создавать целый ряд принципиально новых производственных процессов, материалов и устройств на их основе. Расчеты показывают, что использование нанотехнологий может повысить основные характеристики полупроводниковых вычислительных и запоминающих устройств на три порядка, т. е. в тысячу раз! Это станет, безусловно, настоящей революцией в области информационных технологий и окажет огромное воздействие на экономическое и социальное развитие общества в XXI веке.

Однако нанотехнологию не стоит сводить только к локальному революционному прорыву в указанных областях (электроника, информационные технологии). Уже сейчас в нанотехнологии получен ряд исключительно важных результатов, позволяющих надеяться на существенный прогресс в развитии многих других направлений на-

уки и техники (медицина и биология, химия, экология, энергетика, механика и т. п.). Например, при переходе к нанометровому диапазону (т. е. к объектам с характерными длинами около 10 нм) многие важнейшие свойства веществ и материалов изменяются существенным образом. Речь идет о таких важных характеристиках, как электропроводность, коэффициент оптического преломления, магнитные свойства, прочность, термостойкость и т. п. На основе материалов с новыми свойствами уже сейчас создаются новые типы солнечных батарей, преобразователей энергии, экологически безопасных продуктов и т. п. Возможно, что именно производство дешевых, энергосберегающих и экологически безопасных материалов станет наиболее важным последствием внедрения нанотехнологий.

Уже созданы высокочувствительные биологические датчики (сенсоры) и другие устройства, позволяющие говорить о возникновении новой науки — нанобиотехнологии и имеющие огромные перспективы практического применения. Нанотехнология предлагает новые возможности микрообработки материалов и создания на этой основе новых производственных процессов и новых изделий, что должно оказать революционное воздействие на экономическую и социальную жизнь грядущих поколений.

Примеры практического применения нанотехнологий



Рис. 2. Прогноз экономических и социальных последствий внедрения нанотехнологий

1.4. Как ускорить развитие нанотехнологий?

Промышленность должна активнее внедрять новые методы!

Основной причиной ускорения развития нанотехнологий в Японии стала активизация действий США в этом направлении. Ранее всегда считалось, что США являются мировым лидером в информационных технологиях и биологии, а Япония имеет очень высокие показатели во многих других областях, связанных с микро- или нанотехнологиями. Однако в период 1996–1998 годов Соединенные Штаты поставили своей целью стать мировым лидером практически во всех нанотехнологических исследованиях, для чего была разработана обширная программа, позднее оформленная в виде официально принятой Национальной Нанотехнологической Инициативы (ННИ) в январе 2000 года. Уже в 2001 году США планируют выделить на развитие нанотехнологий около 500 миллионов долларов, что означает рост расходов на 84% по сравнению с предыдущим годом. ННИ представляет собой стратегию и детальный план развития новых технологий на ближайшие 20 лет, причем в него включено большое число долгосрочных и среднесрочных фундаментальных исследований. Программа опирается на огромную экономическую и техническую базу США и является весьма внушительной как в количественном, так и в качественном отношении.

С другой стороны, японские достижения в нанотехнологии тоже соответствуют мировому уровню, однако Япония (в отличие от США) до сих пор не имеет общегосударственной стратегии развития в этой области, что не позволяет объединить должным образом усилия различных фирм и исследовательских организаций для получения реально значимых результатов. Изучая создавшуюся ситуацию, эксперты Кэйданрэн пришли к выводу, что японская промышленность должна, прежде всего, повысить свою конкурентоспособность в информационных технологиях и произвести серьезный пересмотр приоритетов своей научно-технической стратегии. Кэйданрэн считает тревожным тот факт, что США удалось «незаметно» обогнать другие страны в организации нанотехнологического прорыва. Исходя из этого, Кэйданрэн (в рамках своего Промышленно-технического совета) создала специальный отдел, который уже в августе 2000 года опубликовал доклад (как говорят японцы, «задание на завтра»), озаглавленный «Нанотехнология на пороге XXI века» и нацеленный на решительную интенсификацию нанотехнологических исследований. Еще через несколько месяцев, в марте 2001 года Кэйданрэн опубли-

ковала более детальную и деловую программу стратегии развития нанотехнологии в Японии, озаглавленную «Нанотехнология и будущее общество. n-Plan21» (о котором подробнее рассказывается в главе 6). Основными положениями этой программы являются следующие:

1. Япония должна сконцентрировать усилия, прежде всего, в нескольких ключевых отраслях (информационные технологии, биология, охрана окружающей среды, энергетика, материаловедение), имеющих приоритетное значение для намеченной правительством цели — создания общества «гармонии с природой».

2. Исследования в этих направлениях должны быстро получить серьезную финансовую поддержку.

3. В течение 5–10 лет должны быть реализованы первые краткосрочные, так называемые «флагманские» проекты, на основе которых будут дальше осуществляться по-настоящему «революционные», фундаментальные исследования, для которых тоже необходимо выделить соответствующие финансовые средства.

4. На государственном уровне должна быть разработана общенациональная стратегия развития нанотехнологий. Необходимо создать систему взаимодействия между правительственными, промышленными и научными ведомствами и организациями и учреждениями, которая могла бы обеспечить быстрое и эффективное проведение исследований, а также внедрение их результатов в промышленное производство.

Примечание. В основном, из-за проблем нанотехнологии в конце декабря 2000 года и начале января 2001 года премьер-министр Японии создал Совет по согласованию и междисциплинарному сотрудничеству в научных исследованиях (см. дополнительный материал в конце главы 5).

Дополнительный материал к главе 1. Это интересно!

США стремятся угадать будущее нанотехнологии!

В заявлении президента США Б. Клинтона 21 января 2000 года были указаны некоторые конкретные цели и ожидания, связанные с развитием нанотехнологий. В частности, президент особо выделил три направления исследований: создание новых материалов (очень легких и в десятки раз более прочных, чем привычная сталь), разработка запоминающих устройств повышенной мощности (способных сохранить всю информацию Библиотеки Конгресса США на крошечном чипе) и развитие новых методов борьбы с раковыми заболеваниями (позволяющих обнаруживать опухоль

Таблица 2

Этапы выработки государственной стратегии в развитии нанотехнологий

США		Основная идея — осознание стратегической ценности нанотехнологий в информатике и биологии
1996–1998 гг.		Сбор данных о нанотехнологиях в разных странах
2000 г.	февраль	Принятие Национальной Нанотехнологической Инициативы
	август	Принятие плана реализации ННИ
Япония		Основная идея — осознание важности выработки общенациональной стратегии в отношении нанотехнологий
2000 г.	июнь	Организация специального комитета по нанотехнологии
	июль	Публикация доклада «Нанотехнология на пороге XXI века»
	сентябрь	Организация семинаров и встреч, посвященных стратегии ускоренного развития нанотехнологии в Японии
2001 г.	январь	Создание Совета по согласованию и междисциплинарному сотрудничеству в научных исследованиях
	март	Публикация программы «Нанотехнология и будущее общество. n-Plan21»

буквально при появлении первых пораженных клеток). Решение этих весьма важных проблем, действительно, включено в 20-летний план развития нанотехнологии США, но читателя, естественно, заинтересует вопрос о том, насколько реальны и оправданы надежды американцев?

Можно ли создать сверхлегкие и сверхпрочные материалы?

На самом деле основа для таких материалов уже создана. Ученые обнаружили, что в определенных условиях (например, длительный нагрев и т. д.) атомы углерода переходят в новое фазовое состояние — углеродные нанотрубки. Тонкие нити участков таких образований легко наблюдаются в электронном микроскопе. Углеродные нанотрубки не только намного легче и прочнее металлов, но и обладают полупроводниковыми характеристиками, которые сейчас интересуют исследователей всех стран.

Можно ли сконструировать крошечные запоминающие устройства с огромным объемом памяти?

Читатели знают, что повышение быстродействия компьютеров обусловлено уменьшением размеров элементов электрических цепей, обеспечивающих прохождение и переработку поступающих сигналов. Однако размеры электронных сетей и линий нельзя

уменьшать до бесконечности, поскольку уже при существующем уровне миниатюризации начинаются новые физические явления (квантово-механические эффекты). Ученые давно думают над тем, как использовать эти эффекты для создания новых устройств и приборов. Нанотехнологии дают нам возможность сконструировать, например, электрические переключатели, которые будут «срабатывать» от поступления в них одного-единственного электрона. Устройства такого типа дают возможность реально создавать сверхмощные и сверхбыстрые вычислительные и запоминающие системы крошечных размеров.

Ранняя диагностика раковых заболеваний

Ученые всерьез заняты разработкой медицинских микророботов (величиной с отдельную биологическую клетку), которые можно «запускать» в организм человека для диагностики и уничтожения требуемых вирусов или клеток пораженных тканей.

Фронт нанотехнологических исследований

2.1. История нанотехнологии

2.2. Естественные границы развития существующей микроэлектроники

2.3. Создание объектов по принципам «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

Дополнительный материал к главе 2. Это интересно!

2.1. История нанотехнологии

Реализация фантазий?

В 1959 году знаменитый американский физик, лауреат Нобелевской премии Ричард Ф. Фейнман прочитал лекцию под названием «Внизу полным-полно места», в которой впервые была рассмотрена возможность создания веществ (а затем, естественно, отдельных элементов, деталей и целых устройств) совершенно новым способом, а именно, «атомной укладкой», при которой человек манипулирует нужными атомами поштучно, располагая их в требуемом ему порядке. Примерно через сорок лет после этого Эрик К. Дрекслер в своей известной книге «Машины творения» (1986) предложил создавать устройства, названные им «молекулярными машинами», и раскрыл удивительные возможности, связанные с развитием нанотехнологий. Воображаемые устройства Дрекслера по своим размерам были значительно меньше, чем хорошо известные всем биологические клетки.

С другой стороны, начиная с 1980 года, в технологии производства транзисторов и лазеров все чаще стали использоваться искусственно создаваемые пленки толщиной около 10 нм, что позволяло изготавливать устройства с новыми, повышенными техническими характеристиками. В 1980 году в Японии был изготовлен первый полевой транзистор с высокой подвижностью носителей (High Electron Mobility Transistor, HEMT). В 1981 году сотрудники фирмы IBM создали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), позволяющий получать изображение с разрешением на уровне размеров отдельных атомов, что явилось исключительно важным научным достижением, поскольку исследователи впервые получили возможность непосредственно наблюдать и изучать мир в нанометровом, атомарном масштабе. Японские фирмы и научные организации, в свою очередь, на-

чали энергично развивать методики в области микроскопии, в результате чего за короткое время были созданы новые типы сканирующих туннельных микроскопов, а также электронных микроскопов с очень высоким разрешением (напомним, что разрешением оптического прибора физики называют размер наименьшей детали, которую можно выделить на получаемом изображении), позволяющих исследовать движение отдельных атомов и молекул. Это привело к энергичному развитию экспериментальной техники в нанометровом диапазоне и значительно расширило наши представления о микромире и нанообъектах. В 1991 году Япония начала осуществлять государственную программу по развитию техники манипулирования атомами и молекулами (проект «Атомная Технология»), которая привлекла внимание исследователей во многих странах.

Таблица 3

Краткая хронология основных достижений
в рассматриваемой области
(по данным Института «Хитати Сокэн»)

Год	Существенные достижения в области нанотехнологий
1928	Предложена принципиальная схема устройства сканирующего оптического микроскопа ближнего поля
1932	Создание первого просвечивающего электронного микроскопа
1938	Создание первого сканирующего электронного микроскопа
1959	Ричард Ф. Фейнман (США) выдвинул идею создания веществ и объектов методом поштучной «атомарной» сборки
1972	Создано реальное устройство, работающее по принципу микроскопа ближнего поля
1975	Теоретически рассмотрена возможность существования так называемых квантовых линий и квантовых точек
1981	Создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)
1985	Создание первого полевого транзистора с высокой подвижностью носителей (НЕМТ) Химики синтезировали первые фуллерены
1986	Эрик К. Дрекслер (США) выдвинул концепцию создания «молекулярных машин» Создание атомно-силового микроскопа (АСМ)
1991	В Японии началась реализация государственной программы по развитию техники манипулирования атомами и молекулами (проект «Атомная Технология»). Получение первых углеродных нанотрубок
1998	Изготовлен элемент памяти электронного запоминающего устройства (с объемом памяти 128 мегабит), работающий при комнатной температуре
2000	США приступили к реализации программы исследований, названной Национальной Нанотехнологической Инициативой (ННИ)

В настоящее время уровень японских исследований в нанотехнологии является одним из самых высоких в мире, однако следует помнить, что в XXI веке борьба за техническое лидерство в этой области будет продолжаться, причем ведущими направлениями исследований станут информационные технологии и биологические науки. В 1980 году основой электроники являлась полупроводниковая техника, но сейчас все отчетливее начинают выявляться новые направления (наноэлектроника и биоэлектроника), непосредственно связанные с прогрессом нанотехнологий. В 1990 году началась реализация огромного международного проекта по определению последовательности укладки около 3 миллиардов нуклеотидных остатков в записи генетической информации (проект «Геном Человека»), ставшего ярким прорывом в биологии и медицине. Этот проект одновременно является исключительно важным для развития нанотехнологий, поскольку открывает новые огромные возможности в информационных технологиях, позволяя понять, а затем и использовать принципы обработки информации в живой природе (биоинформатика). Можно даже сказать, что до 1990 года информационная технология (ИТ) была всего лишь составной частью или «ветвью» электроники, а после 1990 года от нее отросла (как от ветви настоящего дерева) независимая отдельная веточка, которую можно назвать биоинформационной технологией. В связи с осуществлением проекта «Геном Человека» произошло также быстрое и энергичное развитие разнообразных исследовательских методик в области собственно биотехнологий.

Проект «Геном Человека» был завершен в 2000 году и позволил ученым прочитать генетическую информацию, связанную с человеческим организмом, что уже привело к созданию новых лекарств по новым принципам и на новой основе (геномика). Следующим естественным этапом стало развитие новых отраслей фармацевтической промышленности и создание новых производственных процессов и мощностей, а также расширение сферы всего бизнеса и деловой активности в этой обширной отрасли.

Можно ожидать, что лекарственные препараты в XXI веке будут выпускаться буквально в индивидуальном порядке (т. е. для каждого конкретного пациента на основе его генной информации будут разрабатываться препараты, обеспечивающие максимальный лечебный эффект при данном заболевании и т. п.). Такая ориентированная на заданного человека система лечения уже даже получила название «индивидуальной» терапии или «лечения по заказу» (tailor-made therapy) и она, безусловно, открывает перед практикующими врачами огромные перспективы. Дальнейшие исследования

позволят перейти от генома человека к изучению молекулярной структуры белков, особенностей их функционирования в живых организмах, механизмов их взаимодействия и т. п., что вновь неожиданно приводит нас ко многим задачам и проблемам, связанным с информационной технологией. Понимание и использование механизмов взаимодействия на молекулярном уровне важны не только для биологии, но и составляют основу нанонауки в целом.

Поэтому фундаментальные исследования XXI века в области нанотехнологий должны обязательно нацеливаться именно на изучение механизмов процессов на молекулярном уровне. В прикладных задачах, по-видимому, основное внимание будет уделяться проблемам биотехнологии, а также дальнейшему развитию и прогрессу полупроводниковой техники и информационных приложений (созданию новых типов интегральных схем, запоминающих устройств и т. д.).

В области медицины мы уже можем всерьез задуматься о реализации самых немыслимых фантазий (борьба со старостью... лечение всех заболеваний... полная победа над раком...). Возможно в XXI веке мы будем заниматься даже проблемой бессмертия человека. Нанотехнология должна стать основой для практической реализации многих вечных стремлений человека. В 2000 году нанотехнология делает первые шаги и начинает бурно развиваться, но к середине столетия уже можно ожидать существенного прорыва во многих областях, включая информационные технологии, биологию, создание «информационного общества», медицину и т. п.



Рис. 3. Некоторые закономерности развития нанотехнологии (по данным Института «Хитати Сокэн»)

НАНОНАУКА может быть определена как междисциплинарная наука, относящаяся к фундаментальным физико-химическим ис-

следованиям объектов и процессов с масштабами в несколько нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$).

НАНОТЕХНОЛОГИЯ может быть определена как совокупность прикладных исследований нанонауки и их практических применений, включая промышленное производство и социальные приложения.

2.2. Естественные границы развития существующей микроэлектроники

Нанотехнологический прорыв!

Существующая полупроводниковая техника основана на методах и технологиях микроэлектроники. Электроника, как целостное направление, возникла около 1900 года и продолжала бурно развиваться в течение всего прошлого столетия. Исключительно важным событием в ее истории стало изобретение транзистора в 1947 году, позволившее быстро снизить размеры используемых элементов примерно до 75 мкм. В настоящее время техника миниатюризации развилась настолько, что позволяет легко изготавливать детали схем размером около 0,2 мкм. При этом тенденция к уменьшению размеров сохраняется, поэтому можно ожидать, что к 2005 году линейные размеры интегральных схем снизятся до 100 нм, а к 2011 году — даже до 50 нм! Однако представляется очевидным, что существующие технологические приемы уже не в состоянии обеспечить эффективное производство элементов электронных схем с точностью до 100 нм (не говоря уже о точности в 50 нм!).

В драйвере жесткого диска (который называют иногда просто драйвером магнитного диска) устройства ПАНОКОН была получена исключительно высокая плотность записи, что стало сенсацией в компьютерной технике и позволило проектировщикам начать практические работы по созданию сверхмощных вычислительных устройств нового типа. Плотность записи на один квадратный дюйм площади магнитного диска уже составляет 15 гигабит ($1 \text{ гигабит} = 10^9 \text{ бит}$), поэтому можно ожидать, что к 2003 году она достигнет 40 гигабит, а к 2007 году — 1 терабит ($= 10^{12} \text{ бит}$). Эти параметры снова выводят нас на некоторые физические пределы существующих технологий. Действительно, при плотности в 1 терабит запись 1 бита информации соответствует промежуткам длиной около 20 нм, что невозможно реализовать ни в одной из существующих систем магнитной записи. Дело в том, что при предельной плотности записи 1

бит информации может быть связан с состоянием отдельного магнитного домена. На меньших промежутках запись станет неустойчивой из-за термических флуктуаций.

С другой стороны, на драйверах цифровых дисков многократно использования (DVD, digital videodisk) и оптических дисков (ODD, optical digital disk) плотность записи может достигать нескольких десятков гигабит и выше. Плотность записи при этом лимитируется длиной волны используемого света, так как при меньших длинах волн считывание становится невозможным (этот фактор в оптике называют дифракционным пределом разрешения).

Нанотехнология позволяет преодолеть эти сложности (за счет перехода к атомарному уровню обработки и регулирования состава материалов) и записать, например, 1 бит информации на длине порядка нескольких нм. Для этого нам необходимо перейти к производству новых материалов с повышенными функциональными характеристиками. Поэтому можно считать, что перспективы развития электроники определяются именно возможностями нанотехнологий.

Ниже приводится таблица прогнозов развития основных характеристик электронных устройств массового производства на ближайшие годы с указанием возможных физико-химических ограничений существующих технологий. В качестве ремарки напомним, что в 2000 году на Международном конгрессе по полупроводниковым технологиям (IFST) для ограничений, носящих принципиальный характер, был даже введен термин «глухая кирпичная стена» (Red Brick Wall).

Таблица 4

Ожидаемые прорывы в нанотехнологии

Полупроводниковые интегральные схемы

Годы	2000	2002	2005	2008	2011
Минимальный размер элементов	200	130	100	70	50

■ Глухая стена

Магнитные диски

Годы	2000	2003	2007
Плотность записи (бит/кв. дюйм)	15 гига	40 гига	1 тера

■ Предел возможностей существующих технологий

Нанотехнологический прорыв

2.3. Создание объектов по принципам «сверху—вниз» и «снизу—вверх»

В технологии вообще существуют лишь два подхода!

В этом разделе излагается одна из основных концепций, играющая важнейшую роль для развития нанотехнологий вообще. Речь идет о двух принципиально разных подходах к обработке вещества и созданию планируемых изделий. Эти подходы принято условно называть технологиями «сверху—вниз» и «снизу—вверх».

Подход «сверху—вниз» основан на уменьшении размеров физических тел механической или иной обработкой, вплоть до получения объектов с ультрамикроскопическими, нанометровыми параметрами. В качестве простого примера можно указать некоторые полупроводниковые устройства, структура которых создается фотолитографической обработкой. При фотолитографии полупроводниковая заготовка подвергается обработке лазерным лучом, что позволяет получить в ней заранее спланированную конфигурацию схемы. Разрешающая способность (т. е. минимальный размер элементов изготавливаемой схемы) определяется при этом длиной волны лазерного излучения. В настоящее время самые короткие длины такого излучения позволяют осуществлять микрообработку с точностью до 100 нм, однако необходимо отметить, что эта технология является сложной и требует дорогого оборудования, вследствие чего она малоприменима для организации эффективного крупномасштабного производства.

Идея технологии «снизу—вверх» заключается в том, что сборка создаваемой «конструкции» осуществляется непосредственно из элементов «низшего порядка» (атомов, молекул, структурных фрагментов биологических клеток и т. п.), располагаемых в требуемом порядке. Этот подход можно считать «обратным» по отношению к привычному методу миниатюризации «сверху—вниз», когда мы просто уменьшаем размеры деталей.

Типичным примером подхода «снизу—вверх» может служить поштучная укладка атомов на кристаллической поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа или других устройств этого типа. Метод позволяет наносить друг на друга не только отдельные атомы, но и слои атомов. Конечно, в настоящее время описываемый подход характеризуется очень низкой эффективностью и производительностью, однако ему принадлежит будущее.

В живых организмах биологические клетки образуются в результате деления (митоза). С точки зрения предлагаемого подхода очень интересно, в какой степени и как атомы способны «самостоятельно» объединяться в более сложные вещества и материалы. Вообще говоря, сборка «снизу—вверх» (самоорганизация вещества) является довольно распространенным явлением. Все мы знаем, что разнообразные взаимодействия атомов и молекул способны приводить к образованию высокоупорядоченных состояний из исходных гомогенных смесей. Ярким примером являются живые организмы, способные усваивать «мертвые» клетки других организмов и перерабатывать их в новые «живые» клетки. Сейчас уже известно, что в живых организмах могут существовать также клеточные структуры в виде нанотрубок, кристаллов и т. п. Процессы самоорганизации, представляющие особый интерес для молекулярной химии, безусловно не могут протекать «сверху—вниз». Структурирование и сборка биологических тканей происходят на атомарно-молекулярном уровне, причем живые организмы осуществляют их с высокой эффективностью. Это означает, что низкая эффективность существующих процессов «снизу—вверх» (о которой говорилось выше) свидетельствует лишь о нашем недостаточном техническом мастерстве и может быть преодолена.

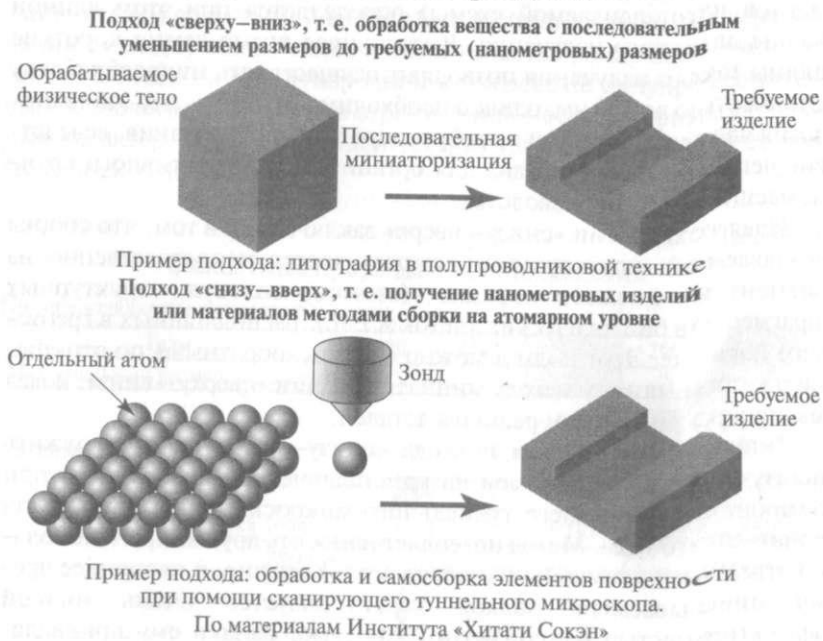


Рис. 4. Два главных нанотехнологических принципа обработки материалов

В следующей главе приводятся конкретные примеры устройств, используемых для описания объектов и различных процессов в нанометровом масштабе, а ниже лишь кратко характеризуются основные принципы подходов «сверху—вниз» и «снизу—вверх».

Дополнительный материал к главе 2.

Это интересно!

Фантастические возможности нанотехнологии

Что сулит нам развитие нанотехнологий?

Сверхмощные и сверхминиатюрные компьютеры

В близком будущем можно ожидать значительного уменьшения размеров ЭВМ (одновременно с ростом их рабочих характеристик), что позволит создать сверхмалые или даже микроскопические вычислительные системы. Нанотехнологии позволяют производить транзисторы, электрический ток в которых соответствует движению очень небольшого числа электронов (от десятков до нескольких тысяч), в результате чего переключения типа включено-выключено (on-off) станут возможными за счет поведения отдельных электронов. Практически это будет означать возможность уменьшения размеров электрических цепей (и больших вычислительных систем) до предельно малых размеров, а также использование в их работе новых принципов (физических закономерностей микромира, т. е. квантовой механики).

Сверхчувствительные и высокостабильные биодатчики

Действие используемых в настоящее время биологических датчиков основано, главным образом, на разнообразных специфических реакциях с участием кислорода, в результате чего происходят химические реакции, регистрируемые соответствующими электрическими сигналами. Однако следует вспомнить, что биологические молекулы вовсе не «тратят» кислород на регистрацию воспринимаемых изменений или явлений. Нанотехнологии позволят нам создать «искусственные» молекулы, реакции которых не будут связаны с окислительными процессами.

Высокоэффективные топливные элементы

Известно, что выхлопные газы автомобилей (углекислый газ и т. д.) относятся к важнейшим факторам возникновения парникового эффекта и загрязнения окружающей среды, вследствие чего во всем мире ведутся активные поиски новых источников энергии, способных заменить бензин в двигателях внутреннего сгорания.

тгерсп^^тивнеэхми в этом смысле представляются так на-
и топли^^ме элементы, особенно водородные (поскольку
**оРанИИ водорода образуется лишь экологически безвредная
""о^рие таких «^экологически безопасных» процессов все-
йживалось их низкой эффективностью. Однако в последние
фт&- нзЯЧлисС^ создавать новые кристаллические формы
называем*> 1е наноуглеродные трубки), способные ад-
\ф (так значительные количества водорода, что позволяет на-
;)набыстрый прогресс в этом направлении,
щведенны^ "Риме ры собраны случайным образом. В следую-
йВс показано разнообразие методов и применений нанотех-
ИИ, позволт*""^Цее считать их основой промышленного произ-
^будущег"

Мир нанотехнологии

- 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 наноприборов!
 - 3.14. Разнообразные возможности применения наностекла
 - 3.15. Биодатчики и информационные терминалы
 - 3.16. Что такое квантовый компьютер? гг
- 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.



По материалам Института «Хигати 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 Рэлея), 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 навстречу), 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	• 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 сфокусировать, 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.

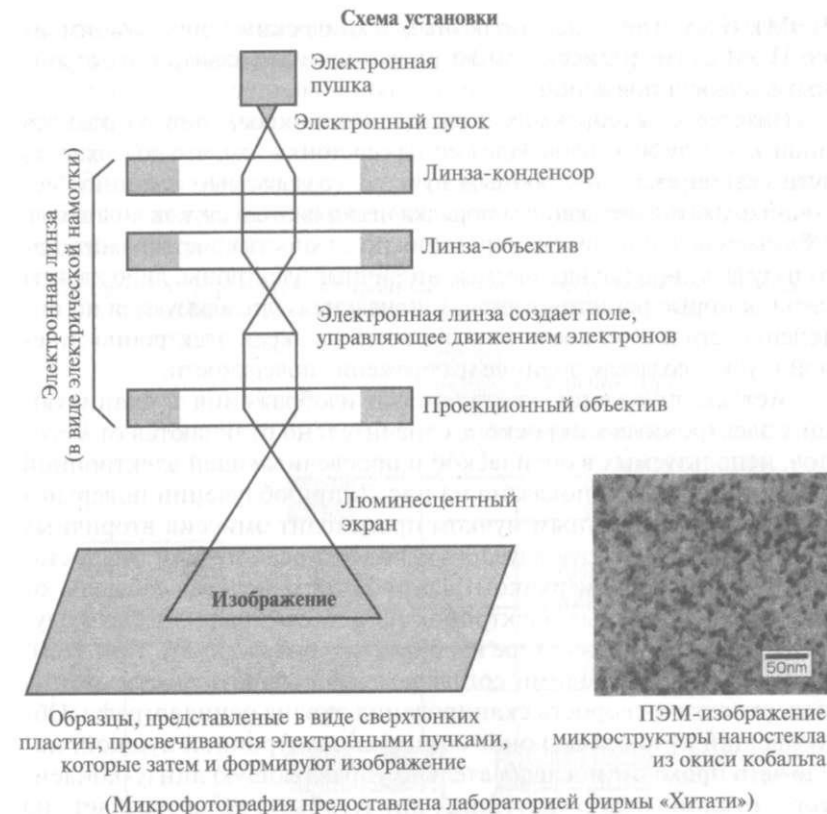


Рис. 6. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа

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.

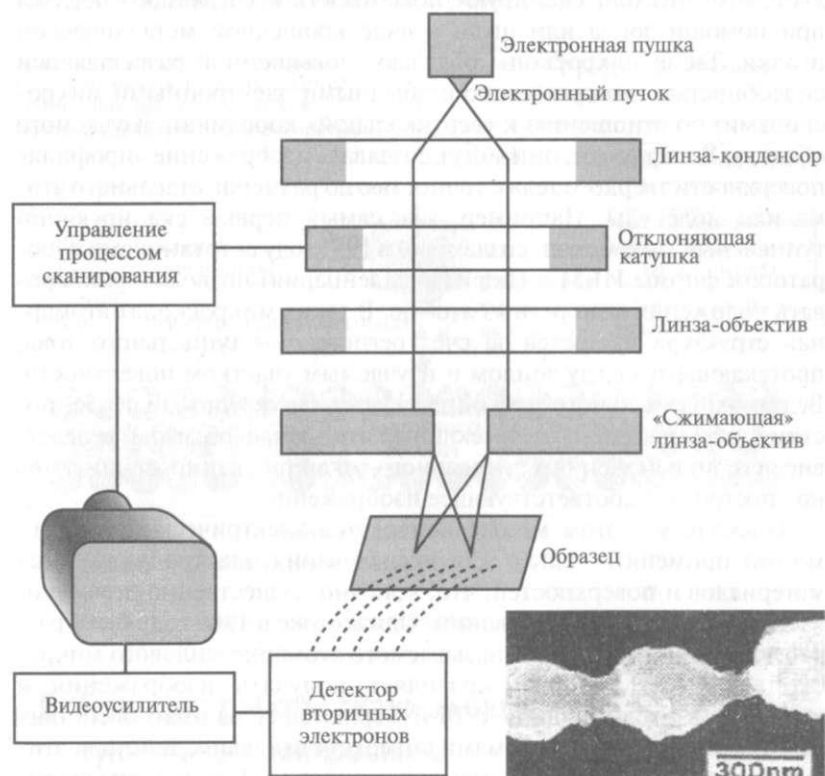
Методы получения увеличенного изображения в сканирующих электронных микроскопах значительно отличаются от методов, используемых в оптической и просвечивающей электронной микроскопии. Как показано на рис. 7, при облучении поверхности узким электронным пучком происходит эмиссия вторичных электронов. Сканируя 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 высокими

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?

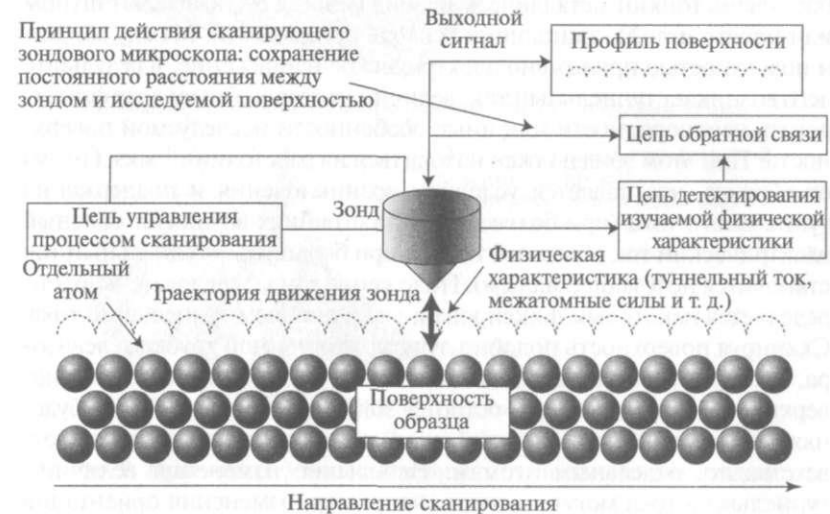
Устройство, позволяющее видеть отдельные атомы и молекулы!

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 полей, 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).



По материалам института «Хитати Сокэн»

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

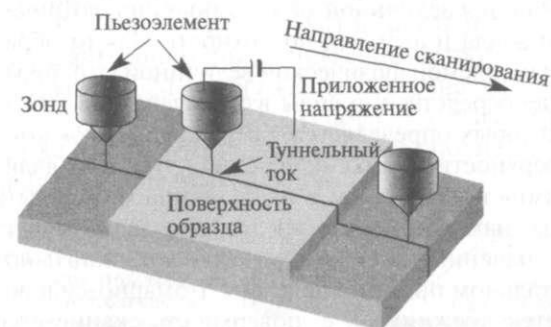
описанном выше туннельном эффекте, позволяющем наблюдать и даже контролировать положение отдельных атомов, т. е. работать с точностью до нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), которая на сегодняшний день является максимальной для всех существующих научных и технических методик.

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.

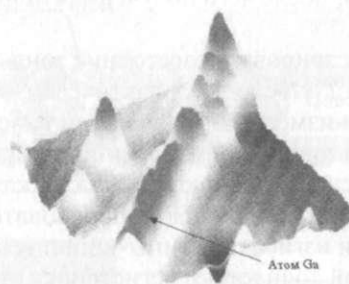
В реальных установках экспериментаторы, конечно, не могут пользоваться столь тонкими, атомарными зондами, а применяют пьезоэлементы из специальной керамики, в которой изменения приложенного электрического напряжения вызывают механическое сжатие. Такие пьезоэлементы уже широко применяются и в бытовой 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 межатомных 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 положения 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 самое 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.

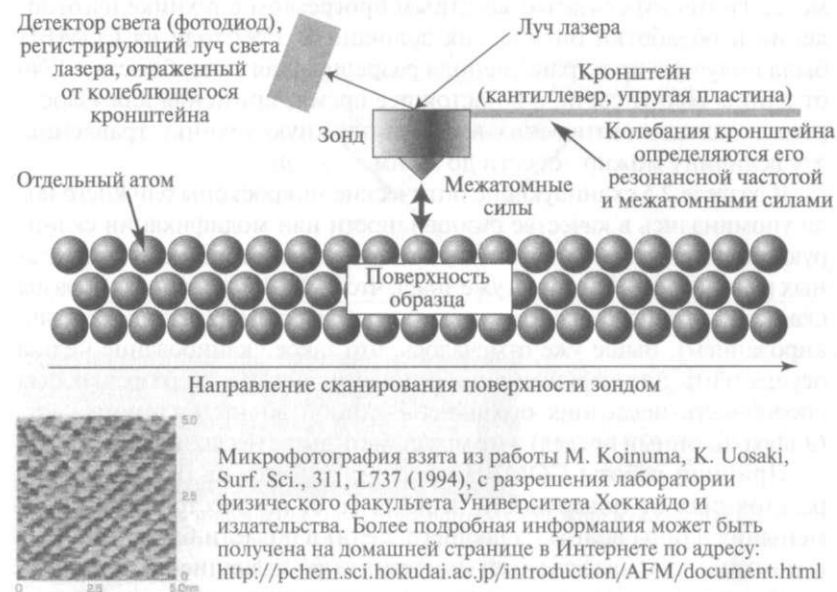


Рис. 10. Принцип работы атомно-силового микроскопа

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 present) 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 атомарно-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

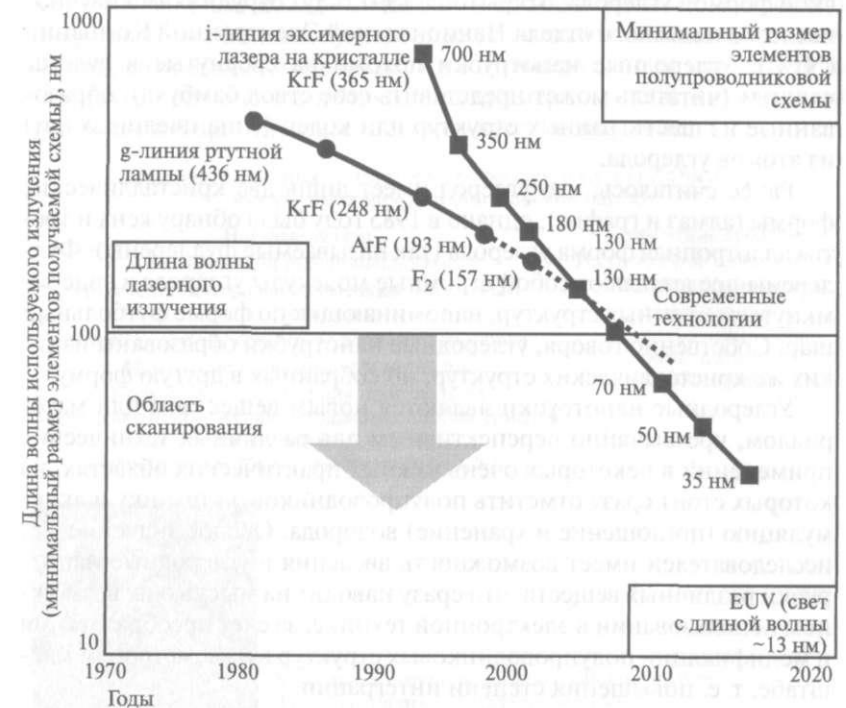
повышения степени интеграции БИС необходимо применять литографическую технику, при которой изображение на кремниевой пластине формируется за счет экспозиции (т. е. облучения интенсивным источником света) с использованием так называемых масок, обеспечивающих освещение требуемых участков.

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 KrF). Одновременно изучаются возможности перехода к еще более коротким длинам волн за счет использования излучения эксимерного лазера на кристалле ArF, имеющего длину всего 193 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 сверхдальнего 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 продолжают, наиболее перспективной и интересной на сегодняшний день выглядит техника «нанопечатавания» (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.

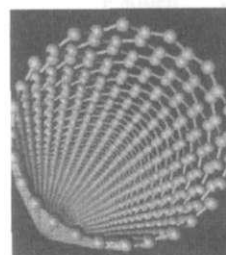
Открытие углеродных нанотрубок профессором Сумио Идзисима — важное событие в истории мировой науки!

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.

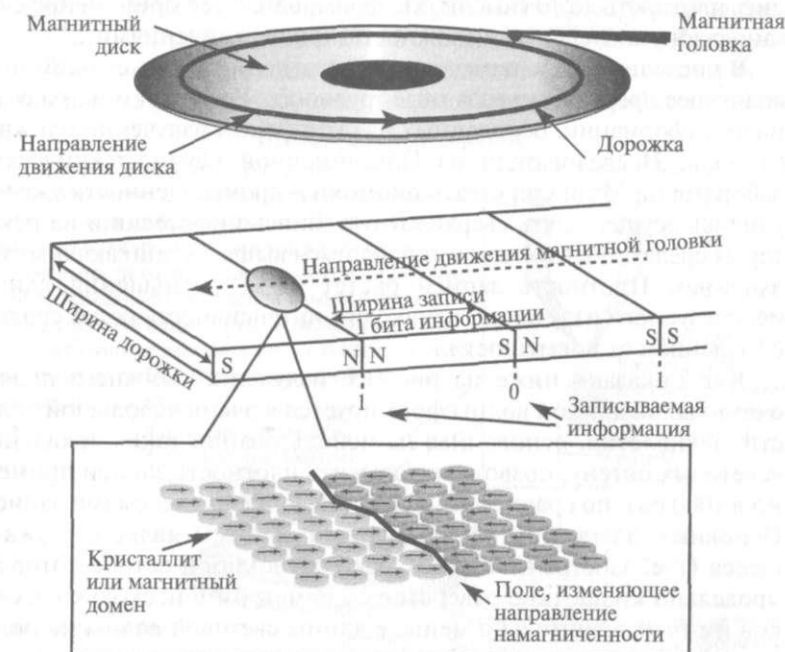
Дело в том, что на магнитной пленке запись одного бита информации связана с использованием, по крайней мере, одного магнитного домена, размеры и форма которых меняются в широких пределах. Поэтому магнитная дорожка записи информации, определяемая границами доменов, представляет собой ломаную (зигзагообразную) 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.

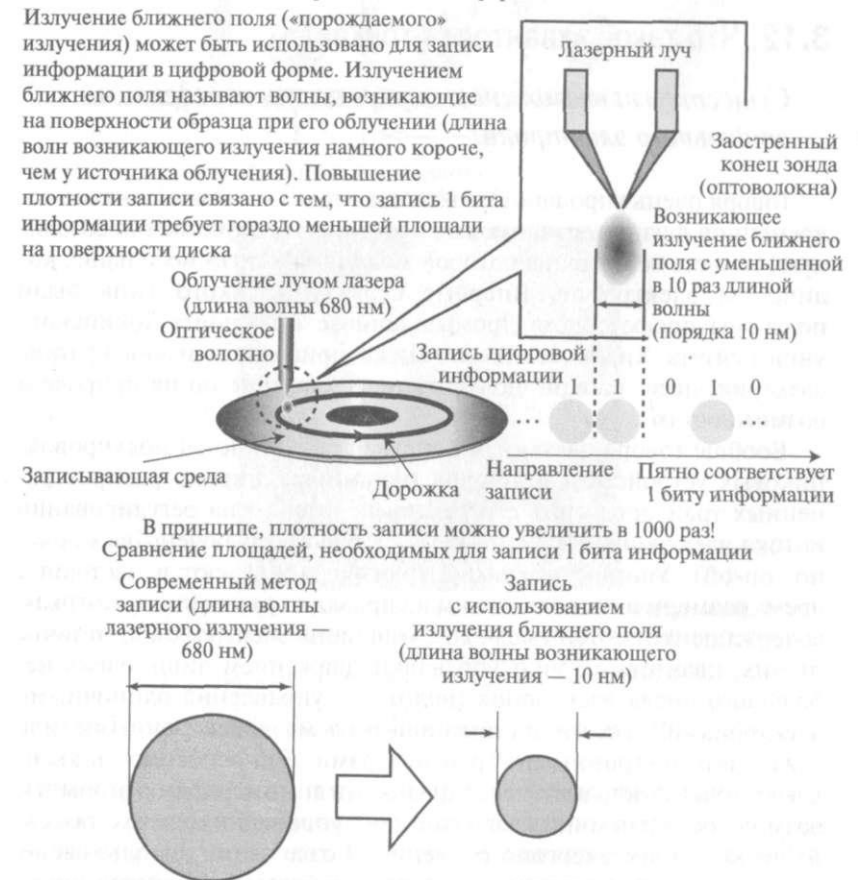
В последние годы наметилось направление исследований, позволяющее преодолеть указанные трудности. Речь идет о методах записи информации, основанных на оптическом излучении ближнего поля. Исследователи из Объединенной научно-технической лаборатории Министерства экономики и промышленности уже научились 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



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»?

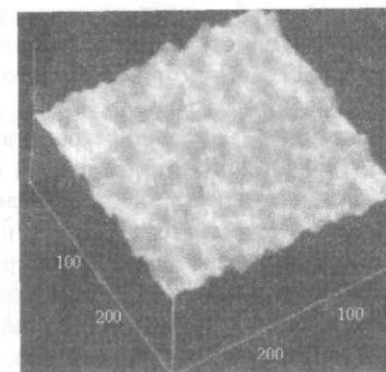
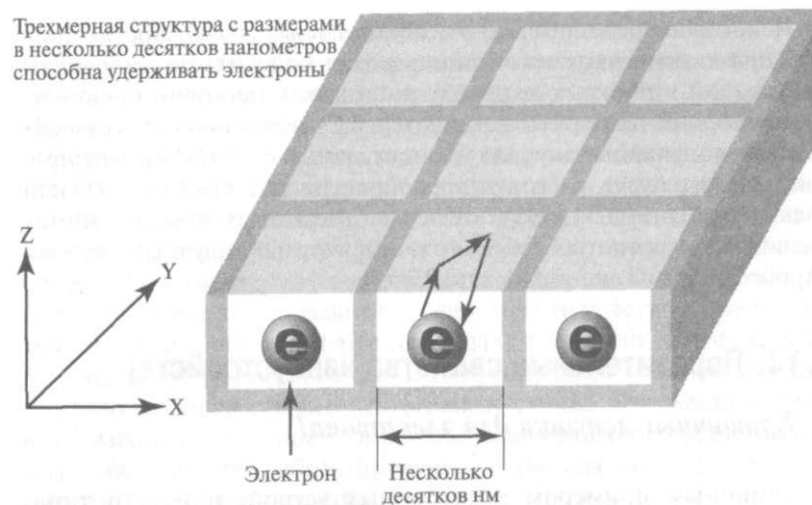
Существует возможность управлять поведением отдельного электрона!

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.

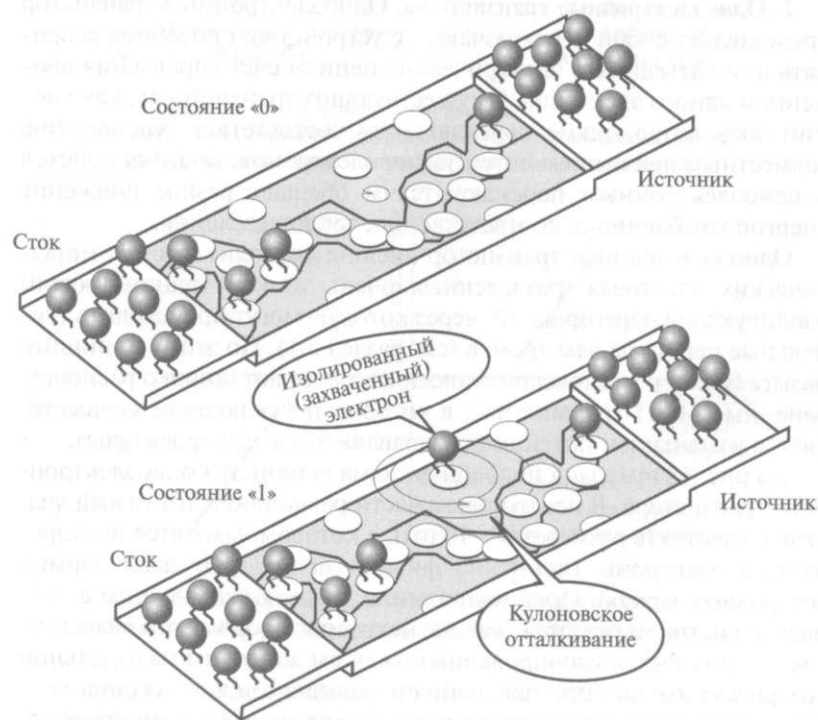


Рис. 17. Принцип работы одноэлектронного запоминающего устройства.
Источник: лаборатория фирмы «Хитати» (г-н Кадзуо Яно)

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.

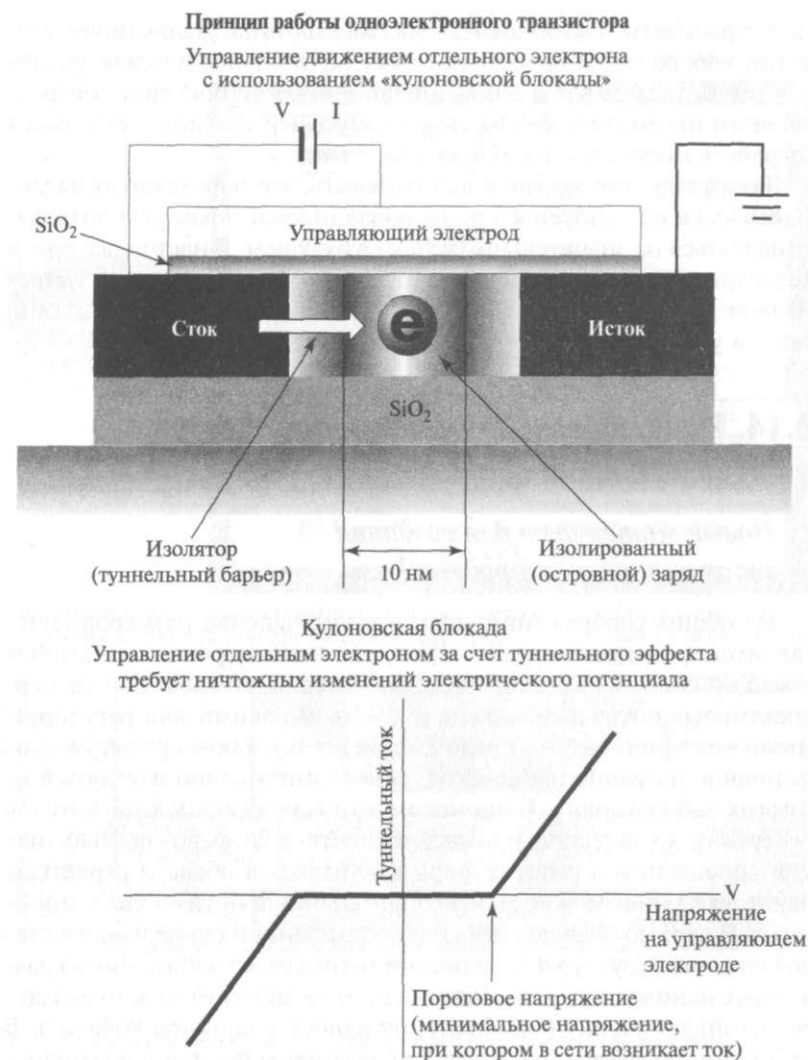


Рис. 18. Одноэлектронный транзистор — типичный пример наноустройства (по материалам Института «Хитати Сокэн»)

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.).

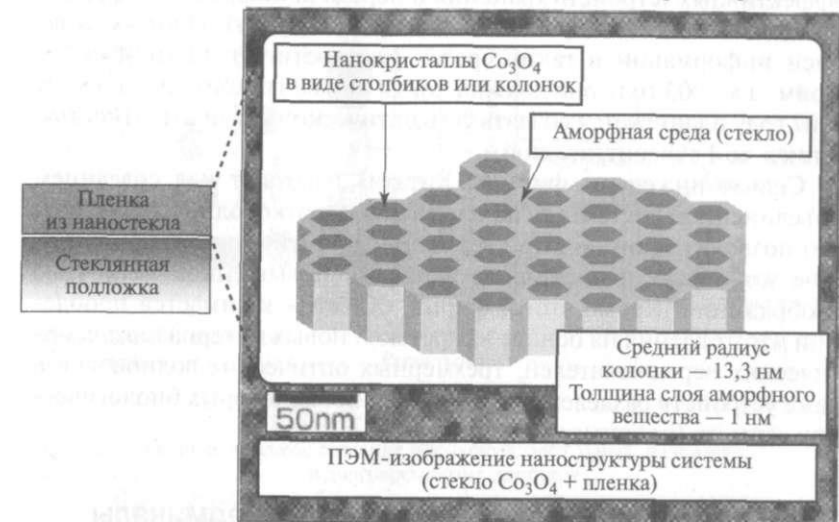
Таким образом, можно констатировать, что нанотехнология уже фактически используется в полупроводниковой технике и позволяет надеяться на значительные успехи в будущем. В настоящее время исследователи тщательно изучают закономерности используемых эффектов (типа туннельных переходов и т. п.) в наноразмерных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

3.14. Разнообразные возможности применения наностекол

Новые материалы для создания запоминающих устройств!

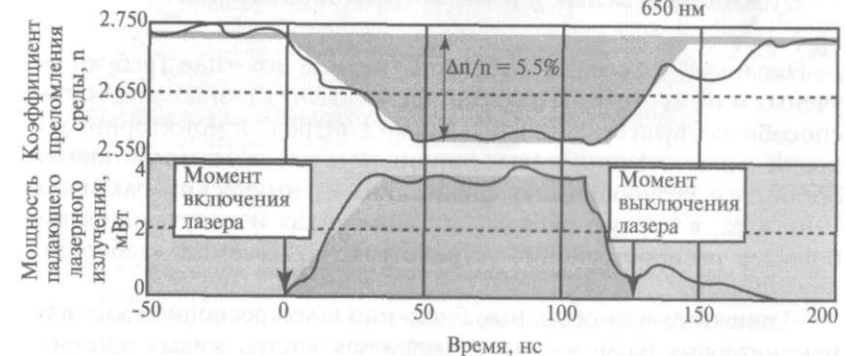
Из общих соображений ясно, что уменьшение размеров кристаллитов (кристаллических зерен) до нанометровых масштабов позволит создать из стеклообразных материалов новые, очень перспективные оптические среды (с очень высокими или регулируемыми коэффициентами преломления и т. п.). Такие среды, уже получившие 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 наностекло 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 наностекло 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-

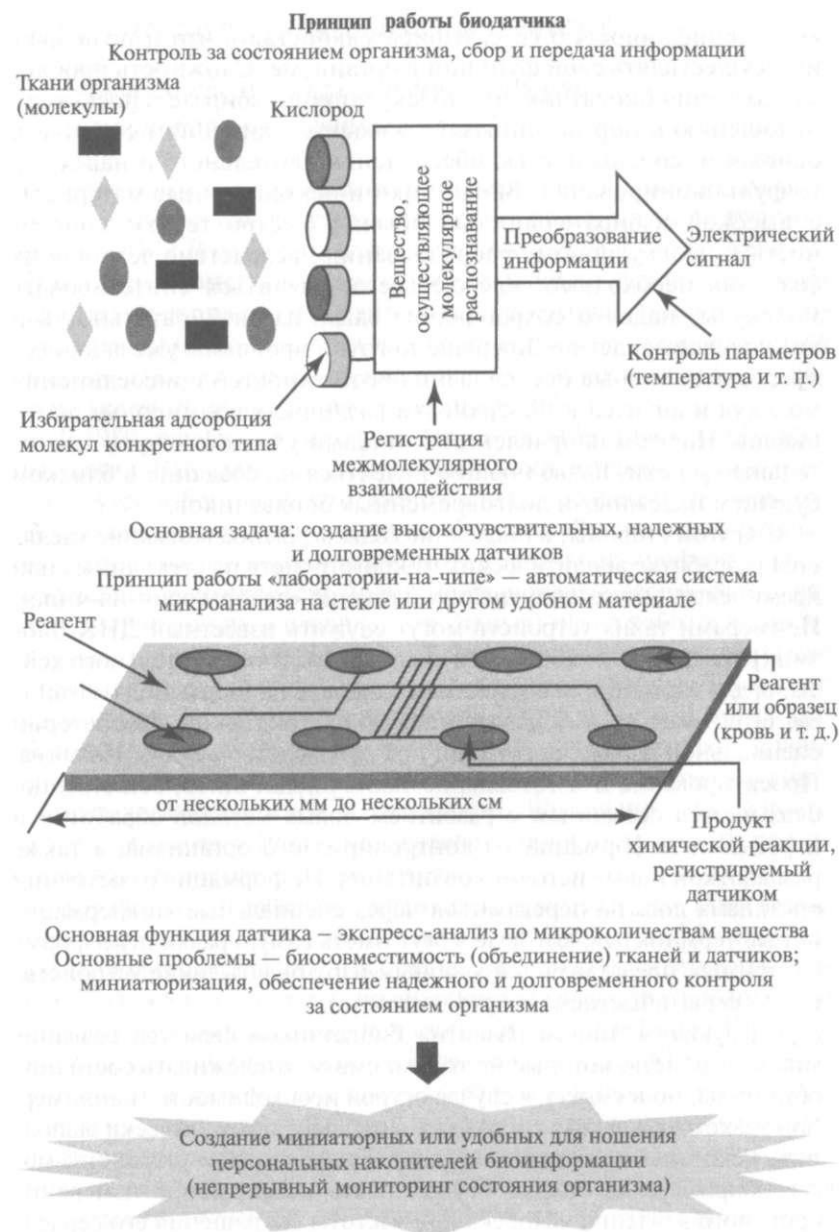


Рис. 20. Биодатчик — устройство, осуществляющее непрерывный мониторинг состояния организма на молекулярном уровне

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 разложении 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>

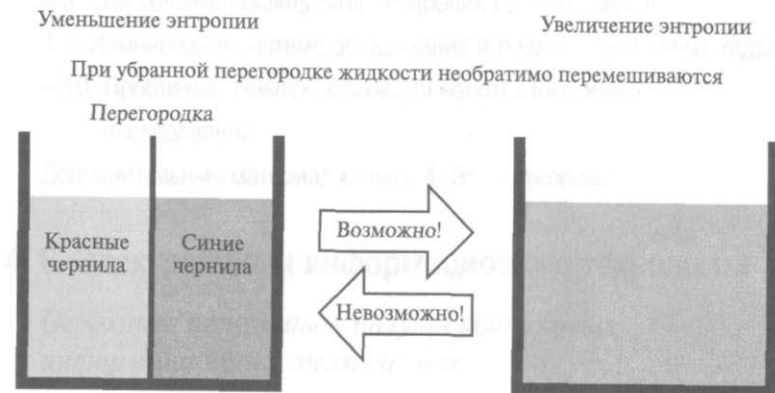
Рис. 21. Квантовый компьютер — поразительное быстроедействие

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!

Экономические и социальные последствия внедрения нанотехнологии. Чего нам следует ожидать?

- 4.1. Электроника и информационные технологии
- 4.2. Наноматериалы и методы их обработки
- 4.3. Методы измерения, обработки и моделирования
для получения и использования наноматериалов
- 4.4. Связь нанотехнологий с проблемами окружающей среды
и энергетики
- 4.5. Нанотехнология и развитие наук о жизни
- 4.6. Нанотехнология и сельское хозяйство
- 4.7. Возможности применения нанотехнологий
в авиации и космонавтике
- 4.8. Социальные последствия внедрения нанотехнологий
- 4.9. Изменения в системе образования и подготовки научных кадров
- 4.10. Проблемы коммерциализации нанотехнологических
исследований

Дополнительный материал к главе 4. Это интересно!

4.1. Электроника и информационные технологии

Огромные перемены в полупроводниковых информационных технологиях

Выше уже говорилось о том, что уже сейчас нанотехнологии позволяют изготавливать полупроводниковые элементы с точностью размеров до 35–100 нм. Верхняя граница этого диапазона (100 нм) соответствует условиям разработанного в Японии проекта «на завтра» (см. главу 6), однако диапазон 35–50 нм пока практически исполь-

зуется очень мало. Именно этот диапазон размеров представляет существенный интерес для применения новых принципов и методов производства, поскольку включает в себя различные технологии, связанные с углеродными нанотрубками и возможной «самоорганизацией атомов». В этой области величин можно ожидать создания совершенно новых устройств (типа упоминавшихся выше одноэлектронных переключателей) с новыми характеристиками, огромными объемами памяти и очень низким энергопотреблением.

Развитие сети Интернет требует от нас не только включения в нее иероглифической системы записи информации (как, впрочем, и всех других видов письменности), но и приобщения к звуковой или графической информации в очень больших объемах, что связано с передачей зрелищ, масс-медиа и т. п. Обычно последним словом современной техники в этой области выступает плотность записи на магнитных дисках. В новейших типах дисков уже достигнута достаточно высокая степень плотности записи и «однородности» записываемой среды, однако переход к нанотехнологиям обещает повышение плотности записи примерно в 1000 раз.

Говоря об информационных технологиях, мы должны вернуться к теме предыдущей главы. Нанотехнология позволит создать материалы с «молекулярным распознаванием» и организовать массовое производство биодатчиков, способных длительное время осуществлять мониторинг среды или организма. В настоящее время ученые заняты проблемой имплантации или «вживления» биодатчиков в организм человека для непрерывного контроля над составом и состоянием тканей организма (например, для измерения уровня содержания инсулина в крови и т. п.). Изучается возможность создания биодатчиков для ранней диагностики некоторых заболеваний, осуществления простых профилактических операций и т. д. Все эти задачи имеют прямое отношение к передаче или переработке информации.

1. Оптическая передача информации. В связи с рассмотренными выше задачами, сейчас ведутся интенсивные исследования возможностей оптической техники на нанометровом уровне для создания устройств и линий связи быстрой передачи оптической информации. Сейчас скорость такой передачи соответствует примерно 40 гигабит/с, однако ее можно легко довести до 160 гигабит/с.

2. Возможности радиопередачи информации. Создаваемые на основе нанотехнологий электронные устройства связи будут иметь характерные размеры 30–50 нм, что позволит повысить скорость передачи примерно в 300 раз и довести ее до 10 гигабит/с.

Таблица 6

Возможности применения наноустройств
в полупроводниковых информационных технологиях

Электроника для информационных технологий	Намечаемые цели и возможности нанотехнологии	Экономические и социальные последствия внедрения нанотехнологий
Полупроводниковая техника	Трехмерные МОП-структуры БИС Углеродные нанотрубки Запоминающие устройства нового типа (одноэлектронная память и т. п.)	Значительное снижение энергопотребления микропроцессоров (примерно в 1000 раз) Резкое увеличение объема памяти запоминающих устройств (в тысячи или даже сотни тысяч раз!)
Техника хранения информации	Создание терабитовых запоминающих устройств	Возрастание объема работы информационных сетей к 2010 году примерно в 1000 раз!
Биодатчики	Материалы, способные к «молекулярному распознаванию» Объединение датчиков с ДНК-чипами Создание чипов с набором генов, белков, клеток и различных тканей Введение датчиков в организм Контроль за состоянием организма (состав крови, состояние клеток и т. п.) Лаборатории-на-чипе (анализ микроколичеств вещества и микрообразцов) Персональные информационные терминалы	Дальнейшая демократизация общества; рост благосостояния; защита окружающей среды; развитие систем медицинского обслуживания и т. д. Развитие систем ранней диагностики и предупреждения заболеваний Снижение расходов на медицинское обследование Революционные изменения в организации здравоохранения и охраны окружающей среды Развитие систем «лечения в домашних условиях» Развитие систем социальной защиты инвалидов
Устройства нового типа	Прогресс в информационных технологиях	Социальные проблемы создания больших информационных сетей

Продолжение табл. 6

Устройства сетевой связи	Оптическая передача информации Разработка устройств оптической связи и создание так называемых модулей (к 2005 году) Развитие фотоники (к 2010 году)	Значительный прогресс в информационных технологиях и системах оптической связи (фотоника, волноводы и т. д.) Развитие централизованных и локальных сетей; разработка систем доступа к базам данных, обмена информацией и т. п. Повышение скорости передачи данных электронными и оптическими средствами от 40 гигабит/с до 160 гигабит/с
	Радиопередача информации Создание модулей радиопередачи информации типа «передатчик—приемник» (до 2005 года) Развитие техники «адаптивных» антенн	Прогресс в информационных технологиях, связанный с радиопередачей информации (электронные устройства со сверхширокой полосой пропускания) Повышение скорости передачи информации от 30 мегабит/с до 10 гигабит/с

По данным института «Хитати Сокэн»

4.2. Наноматериалы и методы их обработки

Основная проблема внедрения нанотехнологий в промышленность!

Основной проблемой при внедрении нанотехнологий в промышленность является сейчас не столько получение новых материалов, сколько развитие методов их обработки. Например, уменьшение размеров кристаллического зерна материала в 10 раз приводит к увеличению прочности материала примерно в три раза, а при дальнейшем уменьшении зерен мы столкнемся с так называемым эффектом сверхпластичности и т. п. Исследование материалов с наноразмерными зернами потребует от нас, кстати, также изменения освещенности обрабатываемой поверхности при работе. Многие нанокристаллические вещества обладают особыми характеристиками (повышенной прочностью, легкостью, странной окраской и т. д.).

Особую роль нанозернистость играет в материалах для магнитной записи (где размер зерен часто определяет плотность записи), в специальных пленках, покрытиях, так называемых «биосовместимых» веществах и т. п. Обработка поверхности объектов с нанометровой точностью является очень непростой задачей, но именно такая обработка зачастую и обеспечивает требуемые функциональные характеристики (например, оптические). В частности, обработка играет важнейшую роль при создании многих описанных выше устройств и биодатчиков.

В настоящее время тщательно изучаются двумерные процессы образования и осаждения (или, наоборот, отделения) кристаллов из наночастиц и нанокластеров разного типа (металлы, керамика, стекла и т. п.) и изучаются характеристики поведения образующихся поверхностей при низких температурах, в каталитических реакциях и т. п. Уже найдены целые классы материалов с перспективными оптическими и механическими свойствами (например, наностекла и т. д.). Уже обнаружено, что многослойные нанопокрывтия (толщиной в несколько нм) обладают очень высокой коррозионной стойкостью и твердостью, а многослойные нанопленки сложного вида имеют неожиданные магнитные свойства.

Образование структур из нанокристаллических зерен позволяет придавать материалам новые свойства, однако предварительно необходимо изучить механизмы структурирования самих наночастиц и нанокластеров. Сейчас можно твердо надеяться, что нанотехнологии позволят нам в будущем получать высокопрочные и коррозионностойкие материалы для магнитной записи с очень высокой плотностью.

Таблица 7

Возможности нанотехнологии в обработке материалов

Материалы и методы обработки	Ожидаемые эффекты от внедрения нанотехнологий	Экономические, технические и социальные последствия
Нанокристаллы, нанозерна	Повышение прочности стали Обработка поверхности с молекулярной точностью Производство новых материалов	Повышение прочности, снижение веса, особая отделка и внешний вид Медицинские применения (новые противораковые препараты)
Технология получения (измельчение зерен, соединение и придание ориентации) нанозернистых материалов	Создание нанoeлектронных устройств (с использованием фотодиодов и т. п.) Создание сред для магнитной записи со сверхвысокой плотностью	Создание на основе нанозернистых материалов светоизлучающих устройств с низким энергопотреблением Создание на основе нанозернистых материалов сред для магнитной записи со сверхвысокой плотностью
Техника обработки поверхности с нанометровой точностью	Создание высокоэффективных оптоэлектронных переключателей Создание устройств для сверхточной механической обработки	Новый этап развития полупроводниковой промышленности
Технология получения и отделения двумерных кристаллов	Использование металлических нанокластеров в катализе и энергетике Создание сверхпроводящей керамики Создание функциональных оптических материалов Создание сверхлегких и сверхпрочных конструкционных материалов	Развитие промышленного производства новых типов материалов
Многослойные, композиционные и структурированные материалы	Создание высокопрочных и коррозионностойких металлических материалов Создание магнитных сред для записи со сверхвысокой плотностью	Прогресс в энергетике и информационных технологиях
По данным Института «Хитати Сокэн»		

4.3. Методы измерения, обработки и моделирования для получения и использования наноматериалов

Понимание сложных физических явлений на атомарном уровне!

Описанные выше сканирующие туннельные, зондовые и атомарно-силовые микроскопы позволяют проводить прямые измерения параметров некоторых объектов в нанометровом масштабе, а просвечивающие и сканирующие электронные микроскопы позволяют изучать особенности их строения. Работа с электронными микроскопами достаточно сложна (поскольку образцы требуют специальной предварительной обработки, а измерения должны производиться в вакууме), однако эти методы удобны, например, для прослеживания изменений размеров каких-либо нанокристаллических включений в исследуемых образцах. В этом разделе мы более подробно рассмотрим важную проблему измерений и обработки при рассматриваемых масштабах. Особую важность эти задачи имеют в полупроводниковой технике, где еще предстоит разработать методики объединения (консолидации) в единое целое наноструктур, электронных цепей и датчиков разных типов. При этом для создания единой системы, конечно, можно комбинировать разные методы механической и электронной обработки, например, электрические цепи можно «спаивать», пользуясь щупом зондового микроскопа или оптическими переходными устройствами. Точность обработки и тщательность объединения микродеталей чрезвычайно важны для получения новых, сверхминиатюрных устройств и приборов.

1. Нанообработка при подходе «сверху-вниз»

Нанообработка при подходе «сверху-вниз» относится, в первую очередь, к микрообработке полупроводниковых материалов, фотолитографии и т. п., где уже достигнута точность порядка 100 нм. При переходе к меньшим масштабам необходимо применять гораздо более сложные технологии (например, электронную или рентгеновскую литографию), что и является препятствием для организации эффективных крупномасштабных промышленных производственных процессов.

2. Нанообработка при подходе «снизу-вверх»

О принципиальных ограничениях технологий типа «сверху-вниз» уже говорилось выше. Нанотехнологии основаны на прин-

ципиально ином подходе «снизу-вверх», связанном с самосборкой требуемых структур и материалов. Например, в электронике можно самосборкой образовать квантовые точки, обладающие неожиданными физическими свойствами, что позволяет «удерживать» отдельные электроны, работать со сверхмалыми по величине токами, создавать на этой основе лазеры нового типа и т. п.

В биологии и биотехнологии использование нанотехнологий уже привело к созданию ДНК-чипов и разнообразных биологических датчиков и анализаторов, имеющих блестящие перспективы для использования в медицине и фармакологии.

Поскольку на атомарном уровне ученые и инженеры сталкиваются с неожиданными и сложными физическими явлениями (квантово-механические эффекты), для развития нанотехнологии особое значение приобретает разработка специальных методов моделирования наносистем. Эта задача является очень сложной, поскольку существующие методы моделирования атомных и молекулярных структур несовершенны и требуют для расчета слишком много времени. Прогресс в этой области может быть достигнут как за счет улучшения численных методов расчета и повышения их достоверности, так и за счет разработки совершенно новых методик, основанных на принципиально иных принципах расчета.

Таблица 8

Проблемы измерения и нанобработки

Измерения, обработка, моделирование	Ожидаемые результаты внедрения нанотехнологий	Экономические, социальные и технические последствия
Развитие техники измерений	Высокоточные и высокоскоростные измерительные устройства Использование оптической техники вакуумного ультрафиолета Получение «сверхплоских» поверхностей и подложек Терабитовые оптические и магнитные запоминающие устройства	Революционные изменения в социальной жизни и экономике Значительный прогресс в развитии методов механической микрообработки (уменьшение размеров, повышение точности)
Техника микрообработки	Создание новых типов ЭВМ (нанокomпьютеры, квантовые компьютеры, молекулярные и биологические компьютеры)	Революционные изменения в социальной жизни и экономике Медицина и биология

Продолжение табл. 8

	Полупроводниковая техника; квантовые точки; новые типы лазеров Медицина; наносистемы в биологии Информационные терминалы нового типа Системы мониторинга окружающей среды и энергетических установок	(микрокатетеры, биологические мониторы, ДНК-чипы, биодатчики, искусственные органы) Окружающая среда и энергетика (мониторинг среды, микродвигатели, микробатареи и т. п.) Электроника; терабитовые запоминающие устройства (рост объема памяти в 1000 раз!); одноэлектронные устройства; квантовые компьютеры Передача и обработка информации (персональные информационные терминалы, квантовые компьютеры, оптоэлектронные большие интегральные схемы)
Развитие методов точного моделирования	Машинное проектирование полупроводниковой техники (TCAD)	Существенные изменения структуры электронной промышленности
По данным Института «Хитати Сокэн»		

4.4. Связь нанотехнологий с проблемами окружающей среды и энергетики

Новые пути решения глобальных проблем!

Нанотехнологии не только самым тесным образом связаны с проблемами окружающей среды и энергетики, но и, возможно, приведут к новым решениям этих весьма сложных проблем (более подробную информацию о сохранении естественных условий среды обитания и экологии читатель может получить на домашней странице: www.tabisland.ne.jp/future/ («Сеть финансово-экономической информации»).

Одной из важнейших экологических проблем выступает длительный рост средней температуры атмосферы нашей планеты. За период 1960–2000 гг. эта величина возросла примерно

на 0,5 °С, причем этот рост приобрел особо устойчивый характер в 80-е годы прошлого столетия. Ученые уверены, что основной причиной такого повышения является все возрастающее количество сжигаемого топлива (каменного угля, нефти и т. п.) промышленными установками, автомобилями и т. д. Именно продукты горения (двуокись углерода, метан и т. п.) и их взаимодействие с солнечным излучением являются основными факторами роста температуры атмосферы (парниковый эффект).

Поэтому уже давно основной проблемой экологии стало снижения уровня потребления так называемого ископаемого топлива (нефти и угля), что должно уменьшить и объем выбрасываемой в атмосферу окиси углерода и других продуктов горения. Поэтому поиск альтернативных источников энергии и разработка эффективных методов сохранения и передачи энергии (например, создание солнечных батарей и топливных элементов нового типа) стали важной научно-технической задачей. В самое последнее время выяснилось, что применение углеродных нанотрубок может привести к значительному повышению коэффициента полезного действия существующих преобразователей солнечной энергии. Кроме этого, было обнаружено, что углеродные нанотрубки могут весьма эффективно адсорбировать большие количества водорода, что сразу активизировало разнообразные исследования, относящиеся к разработке топливных элементов, батарей и т. п. Крупнейшие японские автомобильные концерны («Тойота», «Хонда» и другие) уже обратили пристальное внимание на развитие нанотехнологий, связанных с производством новых источников энергоснабжения и возможностью массового выпуска экологически безопасных средств транспорта.

Другой важной экологической проблемой является сохранение озонового слоя атмосферы, который расположен примерно на высоте 20 километров и играет исключительно важную роль в защите поверхности планеты от ультрафиолетового излучения Солнца. Известно, что в последние годы озоновый слой разрушается под воздействием многих химических реагентов, используемых в быту и промышленности. Основную роль в процессах разрушения озонового слоя играют фреоны, которые являются не «природными», а искусственными продуктами и производятся химической промышленностью для различных целей (аэрозоли, хладагенты, установки кондиционирования воздуха и т. д.).

Таблица 9

Нанотехнологии и проблемы защиты окружающей среды

Проблемы окружающей среды	Основные факторы, приводящие к возникновению проблемы	Существующая ситуация, прогноз на будущее и т. д.
Повышение температуры атмосферы Земли	Поступление в атмосферу больших количеств двуокиси углерода и метана, что связано с постоянным увеличением объема сжигаемого ископаемого топлива (нефти и т. п.), выхлопными газами автомобилей и т. д.	Средняя температура атмосферы Земли за период 1960–2000 гг. возросла на 0,5 °С Ожидается, что за XXI век средняя температура атмосферы возрастет еще на 3 °С, в результате чего уровень мирового океана возрастет примерно на 65 см В центральных и северных областях Японии (Тохоку, Хоккайдо) подъем уровня моря вызовет серьезные проблемы, а в западной Японии возникнут проблемы с выращиванием традиционных сортов риса Повышение температуры значительно сместит распределение лесных массивов на планете и приведет к замене одних пород деревьев другими Изменение климата приведет к усилению так называемых суточных пиков электропотребления, а также к повышению температуры в крупных городах и их окрестностях
Разрушение озонового слоя	Озоновый слой разрушается, в основном, под воздействием фреонов, широко используемых в промышленности и бытовой технике (хладагенты, аэрозоли и т. п.)	Измерения в сентябре 1996 г. показали, что площадь озоновой дыры над Антарктидой увеличилась в 1,8 раза Измерения в июле 1996 г. показали, что объем озонового слоя над островом Хоккайдо уменьшился на 30%

Продолжение табл. 9

		Медики считают, что уменьшение озонового слоя на 1 % приводит к росту числа больных с раком кожи на 3–6 %, а с лейкемией (белокровием) — на 1 % В соответствии с прогнозами врачей, уменьшение озонового слоя на 10 % приведет к росту заболеваний раком кожи на 20 %. Каждый год 1,6–1,7 миллиона человек будут заболеть лейкемией Продолжающийся рост объема выброса фреонов в атмосферу может привести к существенному разрушению озонового слоя в течение ближайших 10 лет
Загрязнение среды диоксином	Широкое применение диоксида в промышленных целях	В настоящее время в организме каждого японца на 1 кг веса содержится около 3,72 пикограмм диоксида (предельная норма содержания диоксида составляет 12,4 пикограмм) Хлорсодержащие соединения постоянно поступают в атмосферу из-за сжигания различных пластиков (в особенности поливинилхлоридов, уретана и т. п.) Зола и остатки сжигаемых полимерных отходов являются активными загрязнителями атмосферы, почвы и водных ресурсов Диоксин обнаруживается даже в материнском молоке
Кислотные дожди	Возникновение так называемых кислотных дождей связано с тем,	Сульфиды и нитриды в больших количествах содержатся в продуктах

Продолжение табл. 9

что в атмосферу поступают большие количества сульфидов и нитридов, выступающих побочными продуктами производства	сгорания ископаемого топлива (нефти и т. п.) Очень большие количества соединений азота и двуокиси углерода содержат выхлопные газы автомобилей и других транспортных средств Начиная с 1990 года в центральных районах Японии наблюдается постоянный рост легочных и других заболеваний, связанных с загрязнением атмосферы По расчетам в 1974 году из-за кислотных дождей в центральных районах Японии пострадало более 30 тысяч человек (глазные и кожные заболевания)
По данным Института «Хитати Сокэн»	

Уменьшение озонового слоя на 1 % сразу приводит к повышению частоты заболевания раком кожи на 3–6 % и лейкемией — на 1 %. Уменьшение озонового слоя на 10 % имело бы катастрофические последствия, так как, в соответствии с некоторыми прогнозами, число страдающих раком кожи при этом возросло бы сразу на 20 %, и число больных лейкемией — на 1,6–1,7 миллиона человек. Вот уже около 10 лет наблюдается довольно заметное разрушение озонового слоя, что ученые связывают с нарастающим выбросом в атмосферу различных фреоновых соединений. Наилучшим решением проблемы стало бы, конечно, полное запрещение использования фреонов, однако это представляется нереальным, и в настоящее время ведется интенсивный поиск веществ, которые могли бы заменить фреоны в различных применениях. Нанотехнологии могут дать достаточно эффективные методы решения этой задачи.

Еще одной очень важной экологической проблемой является использование диоксида, который (как и фреоны) практически не существовал в природе, а появился в результате промышленного производства. Диоксин возникает при сжигании хлорсодержащих отходов и пластиков (типа поливинилхлорида, уретана и т. д.) в мусоросжигающих установках и т. п. Образовавшийся диоксин легко поступает в ат-

мосферу, почву или водные бассейны, становясь активным источником химического загрязнения среды. Дело в том, что диоксин обладает способностью накапливаться в жировых тканях живых организмов, вследствие чего он легко концентрируется во многих пищевых продуктах. Кроме этого, диоксин является очень устойчивым соединением, вследствие чего он плохо перерабатывается и организмом (сейчас диоксин можно обнаружить даже в материнском молоке).

Все упомянутое делает диоксин одним из самых опасных в экологическом отношении веществ. Пока единственным средством борьбы с диоксином является разработка более высокотемпературных печей для сжигания отходов, однако даже этот метод (помимо его дороговизны) не позволяет решить проблему. Нанотехнология позволяет реально надеяться не только на создание веществ, которые могли бы заменить опасные хлорсодержащие пластики или соединения, но и создать высокочувствительные биодатчики, позволяющие измерять и контролировать уровень содержания загрязняющих веществ в окружающей среде.

Кроме этого, следует задуматься и о возможностях изменения самой техники переработки отходов и мусора, т. е. замены высокотемпературного сжигания другими технологиями. Возможно, нанотехнологии позволят нам решить эту задачу и в XXI веке человечество сможет создать общество с обеспеченной «экологической безопасностью».

Очень серьезной экологической проблемой для многих стран (и особенно, для Японии) являются так называемые кислотные дожди (т. е. дожди, при которых вместе с водой выпадают серная и соляная кислота). Причиной возникновения таких дождей стало то, что в атмосферу попадает большое количество отходов промышленного производства и выхлопных газов автомобилей. Такие отходы могут образовывать в дождевых облаках разнообразные окиси серы и азота (SOx, NOx), вступающие в реакцию с водными парами, в результате чего вместо дождя выпадает слабый раствор кислот.

Для Японии такие кислотные дожди стали проблемой, начиная с конца 90-х годов. По статистике, относящейся к центральным областям Японии, в этот период резко возросло число заболеваний органов дыхания, хотя необходимо отметить, что еще в 1974 году в области Тохоку при кислотных дождях было зафиксировано дополнительно около 30 тысяч пациентов, жаловавшихся на расстройства зрения и заболевания кожи.

Наиболее радикальным средством борьбы с кислотными дождями стал бы переход к новым источникам энергии, не связанным со сжиганием нефти, угля и т. п. Нанотехнологии открывают широкие перспективы для повышения коэффициента полезного действия

существующих установок, использующих природную энергию (например, солнечную), а также для создания и усовершенствования многих устройств преобразования энергии (например, для развития топливных элементов, батарей и т. д.).

Таблица 10

Возможные применения нанотехнологий в экологии и энергетике

Проблемы экологии и энергетики	Возможности использования нанотехнологий	Экономические, социальные и технические задачи
Повышение температуры атмосферы Земли	Поиски альтернативных источников энергии (отказ от сжигания ископаемого топлива, использование природных источников); повышение КПД устройств, работающих на солнечной энергии Новые топливные элементы Использование энергии ветра и т. д. Значительное уменьшение количества CO ₂ в выхлопных газах и т. п.	Развитие экологически безопасных транспортных средств Развитие и производство новых источников энергии (топливные элементы и т. п.) Широкое внедрение новых типов материалов (на основе углеродных нанотрубок и т. п.)
Разрушение озонового слоя	Поиск веществ и материалов, заменяющих фреоны	Предотвращение дальнейшего разрушения озонового слоя; снижение риска онкологических заболеваний (уменьшение озонового слоя на 10 % повышает число онкологических заболеваний на 20 %)
Загрязнение среды диоксином	Поиск новых материалов, способных заменить хлорсодержащие пластики Создание биодатчиков, способных к длительному и точному мониторингу окружающей среды Создание нанопорошков для борьбы с загрязнением окружающей среды Создание нанофильтров	Создание общества и экономики «безотходного» типа; прекращение выпуска экологически опасных веществ; полная переработка отходов; полное предотвращение образования диоксида
Кислотные дожди	Поиски альтернативных источников энергии (отказ	Уменьшение или прекращение выброса окислов серы

Продолжение табл. 10

от сжигания ископаемого топлива, использование природных источников); повышение КПД устройств, работающих на солнечной энергии	и азота транспортными и промышленными установками
Новые топливные элементы	
По данным Института «Хитати Сокэн»	

4.5. Нанотехнология и развитие наук о жизни

Возможность создания «индивидуальных» лекарств!

Одной из основных задач современной медицины является борьба с раковыми заболеваниями. Исследования в этой области, естественно, требуют в первую очередь изучения и понимания механизмов биохимических процессов на уровне генов и белковых молекул, вследствие чего упоминавшиеся выше биодатчики должны оказаться чрезвычайно эффективным инструментом исследования и лечения. Применение вводимых в организм даже простейших биодатчиков (в сочетании с веществами, способными к молекулярному распознаванию) могло бы, например, способствовать диагностике раковых заболеваний на самой ранней стадии развития, что играет огромную роль в лечебном процессе.

С другой стороны, известно, что многие опасные болезни (в том числе рак, сахарный диабет и т. д.) обусловлены генетическими факторами. Сейчас уже очевидно, что в достаточно короткое время будут созданы и усовершенствованы так называемые ДНК-чипы, позволяющие легко осуществлять анализ генетической информации, присущей отдельному человеку, и проводить лечебный курс, соответствующий генетическому типу конкретного пациента. Завершение проекта «Геном человека» сделало принципиально возможным «считывание» генетической информации отдельного человека, что сразу позволяет поставить задачу создания «индивидуальных» лекарственных препаратов (в соответствии с этой информацией). Анализ генетической информации позволяет говорить и о возможности создания препаратов с «узконаправленным», точечным эффектом. Тем самым возникает медицина, основанная на индивидуальном (в буквальном смысле этого слова) подходе к пациенту.

Далее, уже давно осуществляются попытки организации так называемой «адресной» доставки лекарств в организме, при которой препа-

раты переносятся в нужные органы или ткани при помощи молекул-носителей (система DDS, Drag Delivery System). Более того, в настоящее время две крупные японские медицинские организации (Центр изучения женских и детских болезней при Токийском Университете и Токийский Университет Рикадай) проводят испытания «носителя», получившего название «высокомолекулярная мицелла», который имеет размеры около 40 нм и по структуре напоминает модель вируса. В экспериментах мышам вкалывают указанную высокомолекулярную мицеллу, которая является «носителем» нового антиракового препарата (адриамицин). Попадая в раковые клетки, препарат способствует их гибели. Уже полученные результаты можно назвать блестящими.

В настоящее время большой интерес вызывают медицинские исследования в области омолаживания организма и его «регенерации». В частности, особое внимание уделяется так называемым эмбриональным стволовым клеткам (ESC, embryonic stem cells), которые способны в развитии превратиться в клетки различных органов организма (в клетки нервной системы, сердечной мышцы и т. п.). Процессы превращения связаны с механизмами самосборки клеточных структур. Использование стволовых клеток не только позволяет восстанавливать поврежденные органы, но и создает совершенно новые возможности для медицины в целом. Многие американские фирмы («Джерон» и другие) уже ведут интенсивные исследования в этой области. Работы по практическому использованию стволовых клеток и изучению их потенциальных возможностей проводятся и в Японии (Токийский Университет и некоторые другие организации).

Замена органов и «ремонт» организма человека (именно это подразумевает термин «восстановительная медицина») с использованием генетической информации являются сейчас важнейшими направлениями развития медицины и системы медицинского обслуживания. Прогнозы показывают, что к 2020 году объем рынка услуг в этих областях здравоохранения достигнет 50 миллиардов иен.

Таблица 11

Связь нанотехнологий с биологией и медициной

Область исследований	Возможные практические применения нанотехнологий	Социальные, экономические и технические последствия
Здравоохранение и медицина	Создание нанороботов (автономных и вводимых в организм) Биодатчики (создание органических)	Новые парадигмы в медицине Создание долгосрочных и эффективных систем контроля здоровья Измерения уровня

Продолжение табл. 11

	и неорганических материалов, превосходящих ткани организма по функциональным возможностям) Создание биомеханизмов, способных осуществлять измерения и требуемые медицинские действия	загрязнения окружающей среды Революционные изменения в медицинском обслуживании (возникновение медицины «малого» вмешательства и даже медицины «без вмешательства») Измерение содержания различных веществ в организме, лечебные операции при необходимости (детектирование и уничтожение раковых клеток и т. п.)
Лекарственные препараты	Практическое использование результатов проекта «Геном человека» «Адресная доставка» лекарств Получение новых биоматериалов Искусственные ферменты и антитела Искусственные функциональные полимеры (заменители тканей организма и т. п.)	Реализация идей «индивидуальной» медицины Организация полного курса лечения на основе личной генетической информации о пациенте Значительный прогресс в здравоохранении и фармацевтике Непрерывный контроль за состоянием организма Полная победа над раковыми заболеваниями, СПИДом и т. п. Разработка лекарственных препаратов с новым механизмом действия (например, препаратов, активизирующихся при повышении температуры у пациента)
Восстанавливающая медицина	Производство биологически активных нановеществ методами самосборки	Реализация идей восстанавливающей медицины Производство искусственных тканей и органов, не вызывающих реакцию отторжения Развитие рынка медицинских услуг (до 50 миллиардов иен) к 2020 году

По данным Института «Хитати Сокэн»

4.6. Нанотехнология и сельское хозяйство

Нанотехнология позволит решить проблемы нехватки питания!

За последнее столетие население Земли увеличилось примерно в 4 раза и к 1999 году составляло уже 6 миллиардов человек. Если существующие темпы роста населения сохранятся, то (по прогнозам экспертов Организации Объединенных Наций) численность населения нашей планеты может возрасти к 2050 году до 100 миллиардов человек! Естественно, что столь резкий рост вызвал острейшую проблему обеспечения населения продовольствием. Уже сейчас в слаборазвитых странах каждый год от нехватки питания умирают от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов человек. Кроме того, рост населения вызывает и другие негативные последствия (урбанизацию, уничтожение лесных массивов, увеличение площади пустынь, постоянное уменьшение площади пахотных земель в мире и т. д.). В будущем эти серьезнейшие экологические и социальные проблемы, связанные с ростом народонаселения, будут только обостряться и усложняться.

Обеспечение стабильного и достаточного уровня производства продуктов питания требует, в первую очередь, увеличения площади посевов и повышения урожайности сельскохозяйственных культур, т. е. развития новых методов ведения сельского хозяйства. Речь идет, с одной стороны, о методах культивации засушливых или непригодных для сельского хозяйства земель, а с другой — о повышении производительности уже существующих угодий в глобальных масштабах.

Развитие нанотехнологий обещает создать новые и весьма перспективные возможности для решения указанных проблем. Прежде всего, следует отметить потенциал так называемой генной технологии, позволяющей генетически модифицировать многие сельскохозяйственные культуры и не только повысить их урожайность, но и сделать их более устойчивыми к сорнякам и вредителям. Получение максимальной урожайности с каждого участка сельскохозяйственных угодий позволило бы реально решить проблему нехватки продовольствия во многих странах. Кроме этого, можно надеяться и на то, что генная модификация позволит нам значительно повысить питательную ценность выращиваемых продуктов (т. е. получать продукты с большей калорийностью). Известно, например, что генетическая модификация соевых бобов позволяет значительно поднять их питательную ценность.

Уже в настоящее время многие страны осуществляют крупномасштабные проекты, связанные с генной инженерией и генетической модификацией продуктов питания. Например, в Кении были внедрены генетически модифицированные сорта батата (сладкого картофеля), устойчивые к вирусам, а в Индии — сорта батата с повышенной стойкостью к насекомым-вредителям, что сразу привело к резкому увеличению урожайности. Более подробную информацию об этих и других проектах можно получить на домашней странице Центра по изучению проблем продуктов питания в Интернете на сайте: www.fsic.co.jp/bio/main/body/answer02/answer204.html.

Широкое практическое применение нанотехнологии в генной инженерии начнется позднее, когда будет достигнут значительный прогресс в понимании генетической информации *растений* и созданы наноустройства с записью генной информации на чипе, ДНК-чипы для анализа и другая лабораторная техника.

Рост населения планеты и проблема недостатка продуктов питания!
Население Земли в 1999 году составляло 6 миллиардов человек!
К 2050 году население Земли может составить 100 миллиардов человек!
Как обеспечить жителей планеты продуктами питания?

Проблемы сельского хозяйства	Возможные практические применения нанотехнологий	Социальные, экономические и технические последствия
Недостаток продуктов питания	Методы генетической модификации: - создание более устойчивых к сорнякам и вредителям сортов растений - увеличение урожайности - повышение питательной ценности (калорийности) получаемых продуктов - анализ генетической информации растений, генная модификация - применение ДНК-чипов и т. п.	Решение проблемы нехватки питания Создание стабильного и достаточного сельскохозяйственного производства Широкое применение техники ДНК-чипов и ДНК-анализа

По данным Института «Хитати Сокэн»

Рис. 23. Возможности применения нанотехнологий в сельском хозяйстве

4.7. Возможности применения нанотехнологий в авиации и космонавтике

Перспективы создания сверхлегких и сверхпрочных материалов!

Человечество постоянно стремится создать все более быстрые, более надежные и более комфортабельные средства передвижения. Можно с уверенностью сказать, что в XXI веке люди будут путешествовать за пределами атмосферы и осуществят многие фантастические замыслы (полеты на Луну, большие космические станции и т. д.). Нанотехнологии станут одним из практических средств достижения этих замыслов.

В XXI веке международное авиационное сообщение будет непрерывно расширяться и развиваться. Преимущества авиации заключаются в том, что она обеспечивает наиболее быструю, удобную и комфортабельную транспортировку людей и товаров на большие расстояния. Развитие авиационного транспорта зависит, главным образом, от следующих трех факторов: развития моторостроения, прогресса аэродинамики и создания новых конструкционных материалов. Нанотехнология имеет особое значение именно в методах разработки и изготовления совершенно новых конструкционных материалов. Например, для двигателей сверхзвуковых пассажирских самолетов будущего потребуется создать композиционные керамические материалы с высокой термостойкостью (способные работать при температурах 1000–1600 °C), а для других деталей — новые термостойкие полимеры или полимерные композиты, выдерживающие температуры в 200–400 °C, и так называемые умные (т. е. функциональные) конструкционные материалы. Еще более жесткие условия к применяемым материалам выдвигают разработчики космических аппаратов. Используемые в космических устройствах вещества должны обладать повышенной термостойкостью (выдерживать температуры около 3000 °C), прочностью и другими особыми характеристиками. Нанотехнология позволяет надеяться на возможность создания сверхлегких и сверхпрочных материалов, пригодных для использования в сверхзвуковой и космической технике будущего.

Особые требования к материалам (термостойкость, сопротивление так называемому тепловому удару, высокая теплоизоляционная способность и т. д.) возникают при разработке аппаратов типа американских космических челноков «Шаттл». Наиболее подходящими для использования в этих условиях представляются композиционные материалы (из комбинации двух или большего числа

веществ), что во многих случаях позволяет объединить полезные характеристики комбинируемых материалов. Однако сейчас проблема создания композиционных материалов во многом сдерживается сложностью расчета их характеристик.

Образно говоря, проблема сводится к тому, что в обычных композиционных материалах различные характеристики просто «складываются», а развитие науки и техники требует «умножения» характеристик, т. е. их значительного улучшения за счет создания композиции. Именно эта задача и требует существенного прогресса в развитии методов расчета и получения композитов. Одним из направлений стало получение нанокомпозитов, т. е. веществ, в которых каждый компонент образует отдельную структуру, однако атомы этих структур дополнительно взаимодействуют друг с другом, создавая новые структуры и придавая веществу новые свойства. В настоящее время это направление является особо перспективным в создании конструкционных материалов с ценными и неожиданными свойствами.

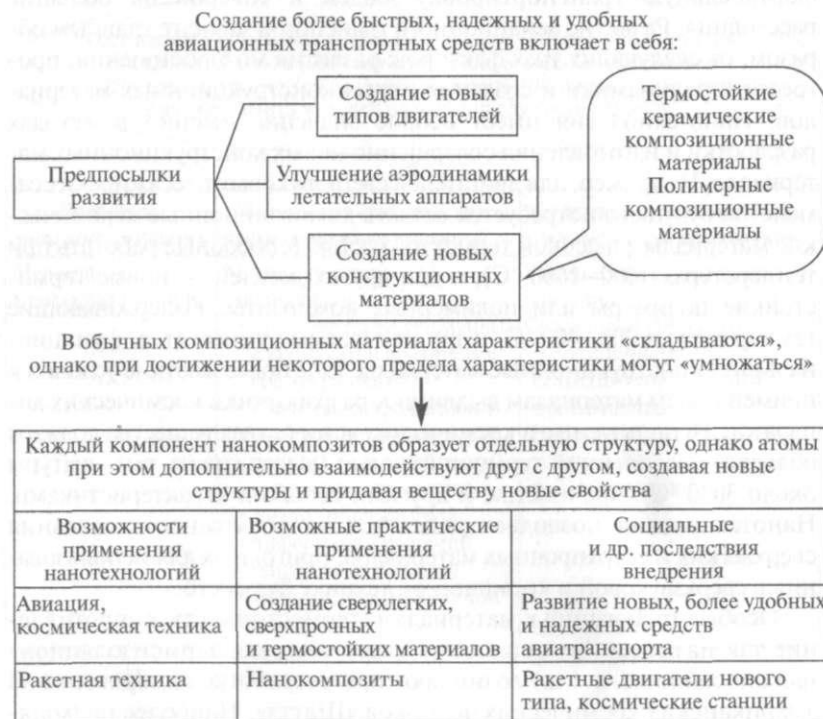


Рис. 24. Перспективы применения наноматериалов в авиации и космической технике

4.8. Социальные последствия внедрения нанотехнологий

Активизация всей промышленной деятельности!

Из предыдущего описания ясно, что нанотехнология может оказать сильнейшее воздействие на развитие всей промышленности, а следовательно, и на социальную структуру общества. Понимание этого настоятельно требует выработки национальной стратегии развития в этом направлении, учитывая его огромную роль и масштабы ожидаемых изменений. В США уже давно осознали серьезность возникших проблем и приступили к выработке государственной политики по отношению к нанотехнологии в целом, результатом чего и стала разработка 20-летнего плана фундаментальных исследований (в особенности, относящихся к информатике и биологии). В январе 2000 года была утверждена уже упоминавшаяся выше Национальная Нанотехнологическая Инициатива (ННИ), в которой изложена долгосрочная стратегия американского правительства. В 2001 бюджетном году на эти задачи было выделено около 500 миллионов долларов, подробно расписанных по тематике и статьям расходов.

В отличие от США, где уже приступили к теоретическому и практическому решению проблем развития нанотехнологии, в Японии до сих пор отсутствует реальная программа государственной стратегии. При сохранении этого положения, Япония рискует проиграть соревнование с США в этой важной области. Лишь в июле 2000 года Японская Экономическая Ассоциация (Кэйданрэн) организовала специальный отдел по нанотехнологии при промышленно-техническом комитете. В марте 2001 года был разработан общий план развития исследований по нанотехнологиям в Японии. Ниже приводятся некоторые основные положения плана Кэйданрэн, направленные на интенсификацию исследований в этой области.

1. В качестве основных направлений «прорыва» в нанонауке план Кэйданрэн наметил информационные технологии, биологические науки, энергетику, экологию и материаловедение. Прогресс в этих областях должен позволить Японии реально создать более богатое общество, живущее в более благоприятной экологической обстановке.

2. Учитывая важность нанотехнологий для японской промышленности, необходимо организовать приток достаточно крупных капиталовложений в соответствующие отрасли производства.

3. В течение 5–10 лет необходимо энергично развивать исследования в указанных направлениях и внедрять в производство их результаты таким образом, чтобы эти направления стали «флагманами» грядущей научно-технической революции. Следует тщательно продумать механизм распределения финансовых и иных средств, вкладываемых в отобранные области науки и техники.

4. Развитие нанотехнологий в Японии требует выработки продуманной государственной стратегии и, прежде всего, организации эффективного сотрудничества промышленных, государственных и научных ведомств и организаций в проведении исследований.

Соединенные Штаты Америки осуществляют крупномасштабные мероприятия по развитию нанотехнологий

В январе 2000 года была утверждена Национальная Нанотехнологическая Инициатива (ННИ)

В августе 2001 года — принята программа реализации ННИ

Основные элементы и положения ННИ в США:

- В 2001 году планируется вложить в развитие нанотехнологий около 500 миллионов долларов
- Предполагается организовать долгосрочные (10–20 лет) исследования по наиболее важным проблемам; организуется активное сотрудничество промышленных, государственных и научных ведомств и организаций в решении поставленных задач; намечаются конкретные цели и задачи (например, разработка сверхминиатюрных запоминающих устройств и т. п.)

↓

Япония следует за США!

Июль 2001 года — выработка основ стратегии развития нанотехнологии; разработка плана «Нанотэк для нового общества!» (n-Plan21)

Основные элементы и положения японского плана развития нанотехнологии:

- Выделение некоторых «флагманских» направлений (информационные технологии, биологические науки, энергетика, экология и материаловедение); осуществление достаточных капиталовложений в развитие избранных направлений исследований; организация эффективного сотрудничества промышленных, государственных и научных ведомств и организаций в решении поставленных задач; создание «сетей» взаимодействия и т. п.

По данным Института «Хитати Сокэн»

Рис. 25. Основные черты государственной стратегии Японии в области нанотехнологических исследований

4.9. Изменения в системе образования и подготовки научных кадров

Организация сотрудничества и «обмена» кадрами!

Развитие нанотехнологий приведет к существенным изменениям как в организации исследований, так и в системе образования и подготовки научных кадров. Ниже автор книги излагает некоторые собственные соображения по этой проблеме. Нанотехнология возникла на основе слияния фундаментальных исследований, относящихся к разным наукам (физика, химия, биология, математика, технология обработки материалов и т. д.). Именно поэтому внедрение нанотехнологий нельзя сводить просто к «локальной революции» в информационных технологиях и электронике, а следует рассматривать как гораздо более широкое и важное событие в истории науки, затрагивающее очень широкий круг задач и проблем в биологии, медицине, системе здравоохранения, охране окружающей среды, энергетике и т. п. Нанотехнологии окажут существенное и революционное влияние на всю историю развития человечества в XXI веке.

Огромную роль в развитии и внедрении нанотехнологий будет иметь система подготовки кадров исследователей, чему сейчас в Японии стало уделяться много внимания. Развитие и внедрение нанотехнологий требует весьма интенсивного обмена научной информацией между разными группами и отдельными исследователями, поскольку именно неспособность объединить достижения высокого класса в различных отраслях науки и техники чаще всего препятствует развитию и организации новых промышленных производств.

Для обеспечения лидерства в нанотехнологических исследованиях Япония должна найти методы решения этих проблем и обеспечить эффективный обмен информацией между учеными разных специальностей, т. е. всемерно развивать междисциплинарные исследования. При этом большое значение имеют личные контакты, наличие «человеческой сети» в структуре научных работ и связей.

В настоящее время проблемы выработки стратегии по отношению к нанотехнологии и организации требуемого междисциплинарного сотрудничества рассматриваются на уровне кабинета министров Японии, с целью выработки конкретных рекомендаций. Ниже, в главе 6 излагаются точка зрения и предложения Кэйданрэн по этому вопросу.

В XXI столетии нанотехнологии, безусловно, станут реально влиять на жизнь общества, что приведет к новым научным задачам, к значительным преобразованиям в структуре промышленности и к усилению конкуренции между различными фирмами и организациями. Внедрение на-

нотехнологий не может быть основано просто на использовании достижений фундаментальной науки, оно должно быть связано с активным и плодотворным сотрудничеством между промышленными, государственными и научными кругами. В этой связи для развития нанотехнологии особую роль приобретают проблемы подготовки соответствующих кадров, обмена информацией о новейших достижениях в отдаленных областях науки и обсуждения возникающих проблем и задач.

Безусловно, положительную роль должны сыграть контакты японских студентов и молодых исследователей с учеными других стран, а также их стажировка в зарубежных университетах, образовательных и промышленных центрах.

Важнейшая проблема — создание единой «сети» исследований, т. е. обеспечение реального взаимодействия между промышленными, государственными и научными кругами, быстрого и эффективного обмена информацией и т. д.



Материалы Института «Хитати Сокэн»

Рис. 26. Проблемы координации и сотрудничества в развитии нанотехнологий

4.10. Проблемы коммерциализации нанотехнологических исследований

Открывается огромный рынок товаров и услуг!

Выше уже говорилось о широких перспективах, связанных с развитием нанотехнологий, что позволяет сделать попытку оценки общих масштабов коммерческих перспектив в этой области. Предлагаемые оценки получены Институтом комплексного прогнозирования фирмы «Хитати» (сокращенно «Хитати Сокэн»). Подробный доклад о прогнозах развития был выпущен в марте 2001 года научно-техническим комитетом Кэйданрэн.

Прогнозы по отдельным направлениям, естественно, не могут быть совершенно точными, однако составители доклада полагают, что отношения между показателями являются достаточно надежными. В прогнозе мы делим будущий рынок товаров и услуг, связанных с нанотехнологиями, на семь крупных секторов:

1. Информационные технологии, электроника
2. Материалы и методы их обработки
3. Измерения, отделка, моделирование
4. Охрана окружающей среды, энергетика
5. Науки о жизни (биология, медицина)
6. Сельское хозяйство
7. Авиация, космическая техника

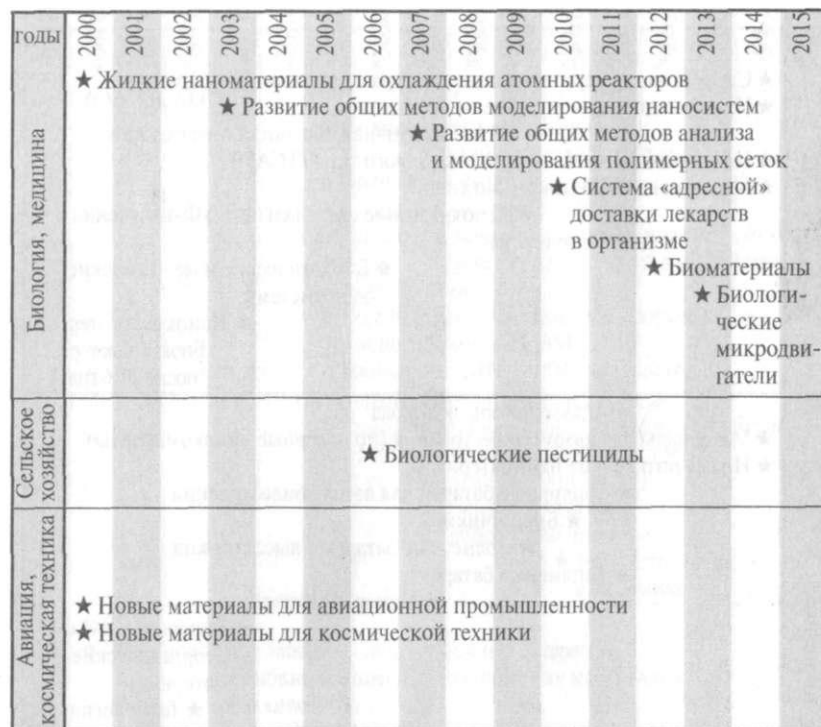
В каждом из этих секторов делался дополнительный прогноз по подразделам (всего 67 пунктов). Для большей полноты картины в каждом из секторов были также выделены некоторые цели и проблемы, что позволило нам назвать свой прогноз «Дорожной Картой» или «Путеводителем развития рынка услуг и товаров, связанных с нанотехнологиями» («Nanotechnology Road Map»). Его основная схема, где указаны предполагаемые сроки внедрения нанотехнологий и коммерческого производства соответствующих товаров или материалов, представлена на рис. 27.

годы	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Информационные технологии, электроника	★ Метод ALCVD															
	★ Новые методы литографии ★ Терабитовые магнитные диски ★ Оптическая связь (фотоника, волноводные устройства) ★ Радиосвязь (сверхширокополосные устройства) ★ Использование нанотехнологий в устройствах типа Пасокон ★ Контрольно-измерительное оборудование с использованием СЭМ ★ Трехмерные БИС (МОП-транзисторы с трехмерной структурой) ★ Одноэлектронные запоминающие устройства ★ Принципиально новые устройства (с углеродными нанотрубками) ★ «Умные» биодатчик ★ Лаборатории-на-чипе ★ Нанороботы в фотонике															
Материалы и методы их обработки	★ PDP															
	★ Производство углеродных нанотрубок и фуллеренов ★ Гибкие дисплеи из органических материалов ★ Наностекла ★ Устройства со сверхплотной компоновкой ★ Высокоэффективные фотоэлектронные преобразователи ★ Нанопроволоки ★ Волокна с углеродными нанотрубками ★ Нанокристаллические оптические устройства ★ Сверхпроводники ★ «Синергические» керамические материалы ★ «Регулируемые» оптические волокна (с меняющейся структурой) ★ Новые сорта стали (с повышенной прочностью, термостойкостью, коррозионной стойкостью и т.д.) ★ Магнитные среды для записи со сверхвысокой плотностью ★ «Высокоэнергетические» материалы (биомиметики)															

Рис. 27. Путеводитель развития рынка услуг и товаров, связанных с нанотехнологиями («Дорожная Карта» — Nanotechnology Road Map)

годы	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Измерения, отладка, моделирование	★ Скоростная измерительная аппаратура с высоким разрешением															
	★ Информационные терминалы нового типа															
	★ Сверхточная обработка поверхности															
	★ Полупроводниковые устройства нового типа (TCAD)															
	★ Микромашины и микродвигатели															
	★ Использование сверхдального УФ-излучения															
	★ Нанолазеры															
	★ Биологические и медицинские наносистемы															
	★ Наноконвертеры															
	Биоконвертеры (после 2016 года)															
Охрана окружающей среды, энергетика	★ Аккумуляторы водорода															
	★ Материалы для автомобилестроения (полимерные наноконвертеры)															
	★ Новые оптические наноматериалы															
	★ Топливные батареи для автомобилестроения															
	★ Биодатчики															
	★ Солнечные батареи с высоким КПД															
	★ Топливные батареи															
	★ Наноробототехника															
	★ Биосовместимые неорганические материалы															
	★ Технология связывания CO ₂															
	★ Технология разложения фреонов															
	★ Высокоэффективные раздельные мембраны															
	★ Термоэлектрические преобразователи с высоким КПД															
	Искусственный фотосинтез (2017 год)															
	Наночистоты для разделения изотопов (2025 год)															

Рис. 27. Продолжение



Прогноз составлен Институтом «Хитати Сокэн»

Указаны прогнозируемые сроки завершения исследований (на этапе НИОКР)

Рис. 27. Продолжение

Помимо «Хитати Сокэн», прогноз развития рынка нанотехнологий осуществлялся рядом других организаций. Например, существует прогноз Министерства просвещения и науки, относящийся, в основном, к товарам и услугам сектора 1 (см. 6-й обзор Министерства за прошлый год). Газета «Нихон кэйдай симбун» (Японская Экономическая Газета) и отдел прогнозирования фирмы «Мицубиси» опубликовали результаты своих исследований по маркетингу в области нанотехнологий в общем докладе, озаглавленном «Прогноз развития технологий и промышленности в XXI веке» (1999 г.). Объединяя прогнозы, составленные специалистами по промышленному развитию и специалистами по тенденциям изменения рынка, можно получить оценки на будущее по различным видам товаров, услуг и состоянию рынка (например, уровню конкуренции и т. п.).

Для прогноза рынка товаров и услуг, связанных с нанотехнологическими изделиями сектора 2, мы использовали так называемые «паттерны распространенности» и логистические кривые, позволяющие учитывать взаимные связи и конкуренцию производств. Результаты оценок объема рынков (японского и мирового) нанотехнологических материалов, изделий и услуг приводятся в табл. 12. По расчетам объем рынка Японии составит в 2005 году почти 2,4 миллиарда иен, а в 2010 году — 27,3 миллиарда иен. Весьма внушительно выглядят и прогнозы для общемирового рынка (9,8 миллиарда иен в 2005 году и 132,9 миллиарда иен в 2010 году). Из данных таблицы следует, что (как в Японии, так и во всем остальном мире) максимальный рост объема рынка будет наблюдаться в информационных технологиях и электронике (почти 50 % прироста). Достаточно сильно (более, чем на 30 %) возрастет продажа наноматериалов и средств их обработки. Приведенный прогноз еще раз демонстрирует, что в близкой перспективе наибольшая эффективность будет соответствовать капиталовложениям на внедрение нанотехнологий в производство полупроводниковых устройств и материалов для запоминающих устройств и магнитных дисков со сверхвысокой плотностью записи информации.

Таблица 12

Прогноз коммерциализации нанотехнологических исследований
(в единицах 1 оку иен = 10^8 иен = 0,82 миллиона долларов)

№	Область нанотехнологии	Мировой рынок				Рынок Японии			
		2005 год		2010 год		2005 год		2010 год	
		всего	Структ. доля, %	всего	Структ. доля, %	всего	Структ. доля, %	всего	Структ. доля, %
1	Информационные технологии, электроника	26,483	27,1	671,884	50,6	9,144	38,8	138,649	50,7
2	Полупроводниковая техника	2,615	2,7	267,097	20,1	934	4,0	58,956	21,6
3	Устройства хранения информации	0	-	51,593	3,9	0	-	30,323	11,1
4	Биологические нанодатчики	0	-	1,986	0,1	0	-	392	0,1
5	Сетевые устройства	23,868	24,4	107,188	8,1	8,210	34,8	23,233	8,5
6	Прочие	0	-	244,020	18,4	0	-	25,745	9,4
7	Обработка материалов (новые элементы и устройства)	15,896	16,3	415,924	31,3	4,717	20,0	89,079	32,6

Продолжение табл. 12

8	Измерения, расчеты и моделирование	12,827	13,1	52,202	3,9	6,282	26,7	21,311	7,8
9	Зондовая измерительная техника	0	0	11,982	0,9	0	0	3,365	1,3
10	Механическая обработка на наноуровне	10,991	11,3	25,250	1,9	5,872	24,9	12,946	4,7
11	Моделирование высокой точности	1,836	1,8	14,970	1,1	410	1,8	5,000	1,8
12	Охрана окружающей среды, энергетика	5,619	5,7	61,309	4,6	1,131	4,8	15,932	5,8
13	Техника связывания CO ₂	2,476	2,5	55,066	4,1	688	2,9	14,825	5,4
14	Контроль окружающей среды	3,143	3,2	6,204	0,5	443	1,9	1,074	0,4
15	Технологии для атомной промышленности	0	-	39	-	0	-	33	-
16	Науки о жизни (биология, медицина)	6,968	7,1	37,951	2,9	883	3,7	4,150	1,5
17	Производство удобрений	600	0,6	1,725	0,1	88	0,4	210	0,1
18	Авиационная и космическая техника (самолеты, ракеты)	29,281	30,1	88,220	6,6	1,316	5,6	3,965	1,5
19	Всего	97,674	100,0	1329,215	100,0	23,561	100,0	273,296	100,0

Дополнительный материал к главе 4. Это интересно!

«Летающий поезд» становится реальностью!

Практически все транспортные средства, использующие для движения силы природы (от парусных кораблей до автомобилей с солнечными батареями), имеют небольшую скорость. Однако новые материалы позволяют инженерам думать о создании в близком будущем высокоскоростных и экологически безопасных видов транспорта. Примером такого подхода может служить реализуемый в настоящее время проект «Аэропоезда», разработанный в лаборатории аэродинамики Университета Тахоку под руководством профессора Кохама Тайсё.

Аэропоезд будет скользить над поверхностью трассы, используя аэродинамический эффект «близости земли».

По расчетам специалистов, трехосный вагон аэропоезда (с 350 пассажирами), снабженный 4 пропеллерами и 4 небольшими крыльями, сможет почти буквально скользить над поверхностью трассы, используя аэродинамический эффект «близости земли» и развивая скорость до 500 км/ч. Энергию для движения будут вырабатывать солнечные батареи и ветровые электродвигатели, расположенные вдоль трассы. На первый взгляд кажется, что солнце и ветер не могут стать стабильным источником электроэнергии, однако проектировщики заложили в систему высокий уровень стабильности. Дело в том, что часть вырабатываемой солнечными батареями и ветровыми двигателями электрической энергии будет аккумулироваться. Например, избыточная энергия, вырабатываемая при ярком освещении и сильном ветре, может быть использована для разложения воды на водород и кислород. В темное время суток, при дожде, безветрии и т. п. из этих аккумулированных газов можно будет вновь вырабатывать необходимую электроэнергию.

Сейчас аэропоезд проходит испытания на специально построенном участке трассы в префектуре Миядзак, где находится центральная испытательная лаборатория Управления железных дорог Японии. По мнению проф. К. Тайсё, новая транспортная система будет введена в строй к 2020 году. Создание аэропоезда требует решения целого ряда серьезных технических задач (разработка солнечных батарей и ветряных двигателей с достаточно высоким коэффициентом полезного действия, получение прочных и легких конструкционных материалов и т. п.), многие из которых непосредственно связаны с нанотехнологическими исследованиями.



Дополнительную информацию можно получить в публикациях Лаборатории аэродинамики Университета Тахоку и на домашней странице по адресу: <http://www.bureau.tohoku.ac.jp/manabi/manabi11/mm11-2.html>

Рис. 28. Так будет выглядеть будущий аэропоезд

Развитие нанотехнологий в мировом масштабе

- 5.1. Американская стратегия в области нанотехнологий
 - 5.2. Развитие нанотехнологий в странах Европы
 - 5.3. Какова ситуация в Японии?
- Дополнительный материал к главе 5. Это интересно!

5.1. Американская стратегия в области нанотехнологий

США «тайно» обогнали другие страны!

За последние *десятилетия* Япония осуществляла фундаментальные нанотехнологические исследования, главным образом, в микроэлектронике и материаловедении, где позиции Японии традиционно остаются достаточно сильными. В отличие от Японии, Соединенные Штаты не только вели интенсивные исследования практически во всех отраслях нанотехнологии, но и *первыми* выработали государственную стратегию по отношению к этой новой области науки и техники, результатом чего стало принятие в январе 2000 года известной Национальной Нанотехнологической Инициативы (ННИ). Основная идея этого документа сформулирована следующим образом: «Национальная Нанотехнологическая Инициатива определяет стратегию взаимодействия различных федеральных ведомств США с целью обеспечения приоритетного развития нанотехнологии, которая должна стать основой экономики и национальной безопасности США в первой половине XXI века». ННИ определила цели и направления развития нанотехнологических исследований США на будущее. Кроме этого, еще в период 1996–1998 гг. специальный комитет американского Центра оценки мирового состояния технологий (World Technology Evaluation Center, WTEC) отслеживал и анализировал развитие нанотехнологий по всем странам и выпускал для научных, технических и административных специалистов США обзорные информационные бюллетени об основных тенденциях развития и достижениях.

В январе 1999 года состоялось заседание Межотраслевой группы по нанонауке, нанотехнике и нанотехнологии (Interagency

Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, IWGN), результатом которого стала выработка прогноза исследований в области нанотехнологий на ближайшее десятилетие. На основе прогнозов IWGN и анализа WTEC в сентябре 1999 года был выпущен сборник докладов. В том же году выводы и рекомендации IWGN были энергично поддержаны Национальным советом по науке и технике при президенте США (PCAST), после чего в феврале 2000 года было официально объявлено о принятии Национальной Нанотехнологической Инициативы. В августе того же года был опубликован обновленный вариант ННИ, включающий в себя «план реализации». Все эти материалы представлены на сайтах в Интернете.*

В преамбуле к ННИ президент США Клинтон заявил следующее: «Я выделяю 500 миллионов долларов в текущем финансовом году на государственную нанотехнологическую инициативу, которая позволит нам в будущем создавать новые материалы (превосходящие по характеристикам существующие в тысячи раз), записать всю информацию Библиотеки Конгресса на крошечном устройстве, диагностировать раковые заболевания при появлении нескольких пораженных клеток и добиться других поразительных результатов. Предлагаемая инициатива рассчитана, по крайней мере, на двадцать лет и обещает привести к важным практическим результатам».

Таблица 13
Основные этапы развития нанотехнологии в США

Год	Этап развития
1996	Американский Центр оценки мирового состояния технологий (World Technology Evaluation Center, WTEC) начинает отслеживать и анализировать развитие нанотехнологий по всем странам
1998	Завершение анализа WTEC
1999	Январь: Публикация отчетов и бюллетеней WTEC Сентябрь: Публикация материалов Межотраслевой группы по нанонауке, нанотехнике и нанотехнологии (Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, IWGN)
2000	Принятие основных документов, определяющих государственную стратегию США в области нанотехнологии Февраль: подписание ННИ, ведущей к будущей научно-технической революции Август: обновленный вариант ННИ + «план реализации»

* Перевод на русский язык ННИ выпущен в 2002 г. издательством «Мир» под названием «Нанотехнология в ближайшем десятилетии» — *Прим. перев.*

Уже в 2001 финансовом году (октябрь 2000 — сентябрь 2001) указанная сумма расходов на исследования по нанотехнологии значительно возросла (примерно на 48 %) и достигла почти 500 миллионов долларов, что свидетельствует о реальной активности государственных организаций. Для сравнения укажем, что Япония, начиная с 80-х годов, в соответствии с общим планом развития тоже вкладывала большие средства в научно-технические разработки, связанные с нанотематикой (за последние пять лет на эти цели было выделено около 2 миллиардов долларов). Кроме этого, в Японии сейчас реализуется обширная исследовательская программа под названием «Атомные технологии» (начата в 1992, на 10 лет выделено 2,5 миллиарда иен) и ряд других проектов, позволяющих нашей стране сохранять передовые позиции в мировой науке и технике.

В результате энергичных усилий правительства США в ближайшие годы ассигнования на исследования по нанотехнологии возрастут вдвое, что приведет к их значительному расширению. В табл. 14 представлены объемы планируемых расходов на 2001 год в соответствии с рекомендациями ННИ по следующим ведущим министерствам и организациям США: Министерство торговли и Национальный институт стандартов и технологий (*МТ/НИСТ*), Министерство обороны (*МО*), Министерство энергетики (*МЭ*), Национальное агентство по авиационной и космонавтике (*НАСА*), Национальный институт здоровья (*НИЗ*) и Национальный научный фонд (*ННФ*). Данные сгруппированы по пяти основным направлениям, в которых ведутся наиболее интенсивные исследования. В каждой из рубрик основная цифра относится к средствам, выделенным в феврале 2000 года, а цифра в скобках — к увеличению ассигнований в 2001 году. В последней строке таблицы приведены итоговые цифры, демонстрирующие динамику финансирования по отдельным направлениям и ведомствам, а также по США в целом. Из таблицы видно, что основное внимание сейчас уделяется фундаментальным исследованиям (примерно 1/3 всех ассигнований), причем почти на 70% эти работы финансирует Национальный научный фонд. Эта ситуация отражает основную стратегию ННФ, заключающуюся во всемерной поддержке фундаментальных и междисциплинарных исследований. Одним из важнейших и характерных мероприятий ННФ в организации сотрудничества между специалистами разных отраслей знаний стала организация нового Центра по исследованиям в нанобиотехнологии (при Корнеллском Университете). Основная цель Центра заключается в объединении или даже слиянии высо-

коразвитой «кремниевой технологии» с новейшими методами биотехнологии.

В соответствии с поставленными крупномасштабными задачами, Соединенные Штаты наметили ряд долгосрочных (т. е. рассчитанных на 10–20 лет) программ по фундаментальным исследованиям. В наступающем 2002 году ассигнования на нанотехнологию должны возрасти и составят приблизительно 520 миллионов долларов. По последним данным в текущем, 2001 году уже выделено на эти цели примерно 420 миллионов долларов.

Таблица 14
Распределение ассигнований на нанотехнологические исследования по различным направлениям и федеральным ведомствам США

	Выделяемые средства (в млн долларов)						
	МТ/НИСТ	МО	МЭ	НАСА	НИЗ	ННФ	Всего
Фундаментальные исследования	—	10(+4)	34(+17)	4(+3)	7(+1)	122(+65)	177(+90)
Исследования в области обороны	10(+5)	54(+23)	29(+16)	11(+8)	17(+1)	12(+9)	133(+62)
Создание научно-исследовательских центров и сетей	—	24(+8)	15(+0)	—	1(+1)	37(+21)	77(+30)
Создание научно-технической базы	6(+4)	19(+5)	16(+3)	5(+4)	9(+1)	25(+13)	80(+30)
Социальные и учебные программы; подготовка персонала	2(+1)	3(+0)	—	—	2(+0)	21(+12)	28(+13)
Всего	18(+10)	110(+40)	94(+36)	20(+15)	36(+4)	217(+120)	495(+225)

Примечание: первые цифры в таблице относятся к планам на февраль 2000 года, а цифры в скобках — к увеличению ассигнований в 2001 году.

Некоторые конкретные цели, намеченные Национальной Нанотехнологической Инициативой США:

- Создание крошечных по размеру запоминающих устройств с мультитерабитовым объемом памяти.
- Развитие технологии обработки веществ и материалов на атомарном и молекулярном уровне.
- Создание сверхпрочных материалов и разработка на их основе новых транспортных средств.

- Создание сверхминиатюрных транзисторов и повышение быстродействия компьютеров в миллион раз.
- Разработка генетических и медицинских препаратов против раковых заболеваний.
- Разработка новых материалов и процессов для защиты окружающей среды; новые методы очистки воды и воздуха.
- Увеличение КПД солнечных батарей в два раза.

Дополнительную информацию по этим вопросам можно найти на домашней странице Национальной Нанотехнологической Инициативы США в Интернете.

5.2. Развитие нанотехнологий в странах Европы

У каждой страны — своя собственная программа!

В отличие от США, выработавших обширную и подробную программу нанотехнологических исследований, европейские страны избрали стратегию независимого развития. Ниже приводится очень краткая и общая оценка состояния нанотехнологии в отдельных государствах.

Германия. В ФРГ нанотехнологические исследования поддерживаются, главным образом, Министерством образования, науки, исследований и технологий (МОНИТ), которое выделяет на эти цели по 50 миллионов долларов в год (начиная с 1997 года). В 1998 году в ФРГ были созданы пять исследовательских центров, связанных с нанотехнологиями.

Англия. В Англии развитием нанотехнологии руководит Совет по физико-техническим исследованиям (EPSRC), который выделял на эти исследования по 7 миллионов долларов в год (примерно 1 миллион долларов из этой суммы предназначался специальной программе по получению нанопорошков). Кроме этого, Национальной физической лабораторией была разработана Национальная Инициатива по Нанотехнологии (National Initiative On Nanotechnology, NION), наметившая основную структуру исследований на ближайшие годы.

Франция. Стратегию развития нанотехнологии во Франции определяет Национальный Центр научных исследований (Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS), который выработал программу исследований нанопорошковых и нанокмпозиционных материалов, в соответствии с которой около 40 физических и 20 химических лабораторий получают в общей сложности около 40 миллионов долларов в год.

Швеция. Ассигнования на исследования в области нанотехнологий составляют около 10 миллионов долларов в год. Кроме этого, корпорация Angstrom Consortium начала выделять около 800 тысяч долларов в год на специальную программу создания нанопокровов. Известно также, что по крайней мере пять крупных промышленных организаций ведут исследования в разных направлениях нанотехнологий.

Швейцария. В стране реализуется программа под названием «TOP NANO 21 Projects», которая и определяет основную стратегию исследований по нанотехнологиям и внедрению их результатов в промышленное производство. Кроме этого, в Швейцарии создана сеть обмена информацией и сотрудничества между правительственными, промышленными и исследовательскими организациями, связанными с этими исследованиями. В Швейцарии существует и сеть междисциплинарного обмена научной информацией.

Таблица 15

Развитие нанотехнологических исследований
в странах Европы

Страна	Состояние нанотехнологических исследований
 Германия	Исследования по нанотехнологии поддерживаются Министерством образования, науки, исследований и технологий (МОНИТ). Исследовательские центры по нанотехнологии созданы в Институте Фраунгофера, Институте Макса Планка и во многих университетах. В 1998 году МОНИТ создало 5 новых крупных центров. Начиная с 1997 года, МОНИТ выделяет на развитие нанотехнологий примерно 50 миллионов долларов в год.
 Англия	Исследования по нанотехнологии поддерживает Совет по физико-техническим исследованиям (EPSRC). В 1998 году утверждена «сетевая» программа с объемом финансирования около 2 миллионов долларов в год. Национальная физическая лаборатория разработала Национальную Инициативу по Нанотехнологии (National Initiative On Nanotechnology, NION). Развивается сотрудничество между правительственными, промышленными и исследовательскими организациями, связанными с этими исследованиями. В период 1994—1999 гг. EPSRC выделял на нанотехнологические исследования по 7 миллионов долларов в год (включая 1 миллион долларов на специальную программу получения нанопорошков).

Продолжение табл. 15

	Исследования по нанотехнологии определяет Национальный Центр научных исследований (CNRS). Национальный Центр утвердил программу по изучению нанопорошков и нанокмпозиционных материалов, в соответствии с которой финансируются около 40 физических и 20 химических лабораторий. Для установления и поддержания связей между научными и промышленными кругами создан «Французский Клуб Нанотехнологий» (French Club Nanotechnologie). CNRS выделяет 40 миллионов долларов в год на исследования по нанотехнологии в 60 лабораториях (общая численность персонала — 500 человек).
	На исследования по нанотехнологии выделяется около 1 миллиона долларов в год. Создано 4 крупных исследовательских центра: 1. Angstrom Consortium (с 1998 года выделяется по 800 тысяч долларов в год на разработку и исследование нанопокровов). 2. Nanometer Structures Consortium (на исследования тратится 3,5 миллионов долларов в год, 1 миллион из которых выделяет Программа информационных технологий Европейского Союза, ESPRIT). 3. Claster-based and Ultrafine Particle Materials (выделяется по 400 тысяч долларов в год, начиная с 1998 года). 4. Brinnel Center.
	Утверждена государственная программа исследований по нанотехнологиям и внедрению их результатов в промышленное производство. Работает ряд крупных исследовательских центров: 1. IBM Research Laboratory (Zurich). Основные направления исследований: нанозонды, молекулярные манипуляции, изучение поверхностей. 2. Paul Scherrer Institute (наноустройства, нанодатчики). 3. ETH Zurich (нанoeлектроника). 4. L'Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (процессы самосборки). С 2000 года в стране реализуется программа под названием TOP NANO 21 Projects.

Источник: Бюллетень World Technology Evaluation Center (WTEC) за 1999 год.

5.3. Какова ситуация в Японии?

Выработка государственной стратегии

В табл. 16 приводятся сводные данные по финансированию нанотехнологических исследований в разных странах, из которых видно, что к 2001 году государственные расходы в США и Японии

на указанные цели почти сравнялись. Судя по вкладываемым средствам, основное соперничество в данной области будет разворачиваться именно между этими странами. В некоторых направлениях нанотехнологии (полупроводниковая техника, миниатюризация, углеродные нанотрубки) Япония пока остается лидером, однако для успешного развития наша страна должна быстро разработать эффективную и подробную программу поддержки развития нанотехнологий, подобную Национальной Инициативе в США. При выработке программы нам следует учитывать следующие обстоятельства.

Начиная с 1991 года, в Японии уже осуществляются близкие по тематике программы (например, «Атомные технологии» и т. п.). Опыт показывает, что при реализации таких программ каждое из японских ведомств и министерств старается создать свою собственную, «вертикальную» систему управления и связи. Однако развитие нанотехнологий во многих областях зачастую требует создания совершенно иных, корпоративных, т. е. «горизонтальных» систем управления и связи (например, для объединения исследований в информационных технологиях, медицине и биологии). Поэтому государственная стратегия ускоренного развития нанотехнологий должна включать в себя и усилия по «объединению» разнообразных изолированных научных разработок.

Таблица 16

Рост расходов на исследования по нанотехнологии в разных странах

Страна или регион	Официальные бюджетные ассигнования (в миллионах долларов США)			
	1998	1999	2000	2001
Япония	120	157	250	420*
США	116	255	270	422**
Европа (ЕС + Швейцария)	128	165	200	225
Остальные страны (Австралия, Канада, Китай, страны СНГ, Корея, Сингапур, Тайвань)	70	—	110	200
Общие расходы	434	577	830	1267

* Из расчета 1 доллар = 122 иены. Данные на 29.08.2000 г.
 ** Данные на конец мая 2001 г.
 Источник: Публикации Министерства финансов и материалы Института «Хитати Сокэн».

Из табл. 16 видно, что общие государственные расходы Японии на развитие нанотехнологии в 2001 году составили около 420 миллионов долларов (что практически равно объему расходов США в этой области), причем прирост ассигнований (по сравнению с предыдущим годом) равен 66 %. Основными получателями этих средств стали Министерство образования и науки (18,7 миллиардов иен, в предыдущем году — 16,5) и Министерство экономики и промышленности (19,5 миллиардов иен, в предыдущем году — 14,0). Главными статьями расходов для этих министерств станут следующие мероприятия.

1. Создание Центра по изучению наноматериалов. В апреле 2001 года Министерство науки и культуры создало в городе Цукуба Центр по изучению наноматериалов, где должны изготавливаться и изучаться так называемые «революционные» материалы, необходимые для реального производства упоминавшихся выше интересных технических новинок (сверхмощные компьютеры, высокоэффективные солнечные батареи, магнитные запоминающие среды и т. п.).

2. Программа нанотехнологического материаловедения. Министерство экономики и промышленности планирует израсходовать в 2001 году 50 оку иен (около 40 миллионов долларов) на обширную программу исследования шести разных классов веществ, перспективных для развития нанотехнологий: полимеры, аморфные (некристаллические) вещества, неорганические материалы, металлы, композиты, «умные» материалы. Для повышения эффективности исследований выработана новая стратегия организации и проведения научно-исследовательских работ. В программе предварительно намечаются некоторые конкретные цели и показатели (достижение которых требует осуществления долгосрочных исследований), после чего отбирается конкретная комбинация возможных или перспективных технологических приемов, которая и изучается с предельной тщательностью. Кроме этого, к 2007 году должна быть выработана система стандартов и созданы базы данных, специально подготовленные для удобства промышленного внедрения полученных результатов.

Таблица 17

Объемы финансирования
некоторых нанотехнологических программ Японии
(единица измерения 1 оку иен = 10^8 иен = 0,82 миллиона долларов)

Исследования, проводимые Министерством науки и культуры	
1. Исследование структуры новых веществ и материалов	23
2. Физико-химические лаборатории	20
3. Работы национальной лаборатории атомных исследований	1
4. Исследования департамента научно-технического развития	143
Всего	187

Исследования, проводимые Министерством экономики и промышленности

№	Название проекта или программы и сроки осуществления (годы)	Финансирование (в расчете на срок 13 лет)	Число людей, связанных с осуществлением проекта
1	Программа нанотехнологического материаловедения (13–19 лет)	(43,0)	360
2	Программа развития полупроводниковой технологии, включая расширенную программу создания средств передачи информации (13–19 лет)	(51,7)	150
3	Научно-технические исследования, нацеленные на внедрение в промышленное производство	99,9	
4	«Синергическая» керамика (6–15 лет)	(15,6)	131
5	Новейшие «углеродные» технологии (10–14 лет)	(12,8)	133
6	Технология высокофункциональных материалов (8–13 лет)	(2,8)	149
7	Сверхметаллы (9–13 лет)	(7,8)	135
8	Техника манипуляций на атомарном и молекулярном уровне (4–13 лет)	(19,2)	92
9	Нанометровая техника для систем с оптическими дисками (10–14 лет)	(10,4)	79
10	Фемтосекундные технологии ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) (7–16 лет)	(16,6)	160
11	Кластеры и молекулярные пучки (12–16 лет)	(2,7)	24
12	Развитие фотонной техники измерений и обработки (9–13 лет)	(12,0)	90
13	Всего	194,6	1503

Источник: Публикации отделов министерств и данные Института «Хитати Со-кэн»

Дополнительный материал к главе 5. Это интересно!

Чем занимается Объединенный научно-технический Совет?

Объединенный научно-технический Совет по согласованию и междисциплинарному сотрудничеству был создан 6 января 2001 года по предложению премьер-министра Японии, который сам и осуществляет общее руководство. Первоначально Совету было поручено выработать 5-летнюю программу по научно-технической политике правительства (так называемый «Основной план второго этапа развития науки и техники»), что и было осуществлено за 3 месяца.

В начальный период роль Совета сводилась к улаживанию противоречий и споров между различными министерствами и ведомствами, однако затем его функции значительно расширились, и Совет стал решать проблемы организации взаимодействия в междисциплинарных научных исследованиях. В настоящее время Совет занимается выработкой общегосударственной стратегии в развитии науки и техники.

Руководство Советом осуществляет группа ведущих японских ученых в различных областях науки, техники и гуманитарных наук, в которую входят, например: Хиро Иномура (ректор Токийского Университета), знаменитый химик-полимерщик Хидэки Сирикава (лауреат Нобелевской премии), госпожа Рэйко Курода (профессор Токийского Университета, известный специалист по биохимии), профессор Сиро Иваи из Международного центра по изучению японской культуры (специалист в области истории права), Хисако Симура (специалист по международным отношениям) и многие другие. От промышленных кругов в состав Совета входят председатель правления фирмы «Хитати» Ёмаэ Кувахара и ряд других крупных и влиятельных предпринимателей или руководителей промышленных организаций.

За пять лет правительство планирует вложить в развитие науки 200 миллиардов долларов!

В соответствии с упомянутым выше Основным планом развития японской науки, правительство планирует тратить на научно-технические исследования вообще 1 % валового национального продукта (ВНП), что составит за пять лет сумму в 24 тьё иен (1 тьё = 10^{12} иен), что эквивалентно примерно 200 миллиардам долларов! При этом в долгосрочной перспективе правительство ставит перед собой и страной следующие основные задачи:

1. Добиться серьёзных успехов в 4 наиболее важных для Японии научных направлениях (медицина и здравоохранение, информационные технологии, экология, нанотехнология).

2. Добиться того, чтобы в ближайшие 50 лет число Нобелевских лауреатов от Японии составило 30–50 человек.

3. Организация и всемерное развитие венчурных предприятий и фирм по всем важным научным достижениям.

4. Финансирование и практическая организация новой системы медицинского обслуживания населения Японии («лечение по индивидуальному заказу») на основе данных о генетической информации пациента.

Кроме этого, намечен целый ряд конкретных мероприятий и программ, включающих в себя значительный рост финансирования так называемых «соревновательных» научных исследований (на это будет выделено 6000 огу иен, около 5 миллиардов долларов), внедрение «косвенного финансирования» (30 %), развитие конкурсных исследований, поощрение и помощь исследованиям в высших учебных заведениях, развитие новых систем подготовки научных кадров и т. п.

Какова должна быть стратегия Японии в развитии нанотехнологий?

6.1. Выбор стратегии для Японии

6.2. Приоритеты финансирования нанотехнологических исследований

6.3. Как должны быть организованы научно-исследовательские работы?

Дополнительный материал к главе 6. Это интересно!

6.1. Выбор стратегии для Японии

Какую стратегию должна избрать Япония в развитии нанотехнологий?

Через 10–20 лет нанотехнологии станут основой промышленности и кардинально изменят экономику и социальную жизнь, что диктует необходимость выработки государственной стратегии в этой области. Для этого Японская Экономическая Ассоциация (Кэйданрэн) создала специальный промышленно-технический комитет по нанотехнологии, который должен изучать наиболее важные для Японии направления исследований в этой области, намечать научные программы и способствовать внедрению их результатов в промышленное производство.

На основе такого предварительного изучения комитет Кэйданрэн в марте 2001 года опубликовал доклад, озаглавленный «Нанотехнология и будущее общество. n-Plan21», в котором намечены основные направления развития и цели использования нанотехнологий в нашей стране. Некоторые положения этого плана приводятся ниже.

1. В качестве основных направлений научного «прорыва» в нанотехнологии для Японии в плане названы следующие: информационные технологии, биология, энергетика, охрана окружающей среды и материаловедение. Основной целью развития нанотехнологий в Японии названо «создание общества гармонии с природой».

2. Для поддержания и усиления технической мощи Японии предлагается вложить в развитие перечисленных направлений науки и техники достаточно крупные финансовые средства и решить ряд связанных с этим технологических и социальных проблем.

3. Среди разнообразия научно-технических достижений и перспективных идей необходимо тщательно отобрать несколько конкретных разработок и тем, которые можно достаточно быстро (5–10 лет) внедрить в промышленное производство, т. е. сделать их лидирующими, «флагманскими» направлениями будущих революционных преобразований промышленности. Эти разработки должны быть поддержаны масштабными фундаментальными исследованиями.

4. Для развития нанотехнологий необходимо в короткое время выработать общегосударственную стратегию Японии по этому вопросу (с учетом конкретных для нашей страны социальных, научных и экономических задач), что позволит сконцентрировать усилия на определенных исследованиях и на внедрении их результатов в производство.

Первыми в списке приоритетных направлений названы информатика и биология, что отражает общую политику правительства Японии, направленную на создание общества «гармонии с окружающей средой». Развитие нанотехнологий должно также повысить конкурентоспособность японских фирм на мировых рынках и сохранить лидерство в ключевых отраслях науки и техники. Именно этим объясняется интерес Кэйданрэн к разработке государственной стратегии. В следующем разделе обсуждаются конкретные аспекты стратегии Японии в развитии нанотехнологий и ее отличия от упоминавшейся ранее Национальной Нанотехнологической Инициативы США.

Таблица 18

Стратегия Японии в развитии нанотехнологий

Основные особенности стратегии Японии в развитии нанотехнологий
(1) Отбор научно-технических направлений, имеющих особое значение для создания общества «гармонии с окружающей средой»
(2) Достаточное финансирование наиболее важных социальных и промышленных программ по нанотехнологиям
(3) Выбор важнейших нанотехнологических разработок, которые могут быть достаточно быстро (5–10 лет) внедрены в промышленное производство, т. е. могут стать «флагманскими» направлениями будущих революционных преобразований промышленности
(4) Выработка общегосударственной стратегии Японии по нанотехнологии, организация эффективного сотрудничества научных, промышленных и государственных ведомств в процессе проведения исследований и внедрения их результатов в производство

6.2. Приоритеты финансирования нанотехнологических исследований

Принцип разделения на «три категории»

В предложенной Кэйданрэн программе «Нанотехнология и будущее общество. n-Plan21» все исследования разбиты на три категории, условно названные «флагманскими» (flagship), перспективными (challenge) и фундаментальными. Ниже вкратце рассказывается о разнице в системах финансирования трех указанных категорий исследований.

Категория 1. Флагманские разработки

К этой категории Кэйданрэн относит исследования, которые могут быть завершены и даже внедрены в промышленное производство за относительно короткий период времени (5–10 лет). Например, к этой категории можно отнести разработки так называемой Программы Ubitax Network (системы, позволяющей осуществлять соединение по типу «все-со-всеми»), которая важна для реализации государственной стратегии Японии в области информационных технологий. Эта Программа обещает привести к резкому снижению электропотребления и значительному расширению возможностей наших систем связи.

Полупроводниковые технологии XXI века. В настоящее время ведутся энергичные разработки, позволяющие резко повысить быстродействие существующих ЭВМ и снизить их энергопотребление. Современная технология уже достигла требуемой точности обработки в диапазоне 100–70 нм, а ее дальнейшее увеличение (т. е. переход к размерам < 70 нм) требует дальнейших фундаментальных разработок, на которые нацелен проект MIRAI, поддерживаемый правительством Японии. Он включает в себя создание и запуск в производство дешевых нанометровых полупроводниковых устройств и систем, а также развитие на этой основе новых технологий, связанных с материалами, структурами, архитектурой систем и т. п. Ожидается, что реализация задуманных проектов приведет не только к техническому прогрессу, но и значительно повысит конкурентоспособность японских полупроводниковых изделий на мировом рынке.

Технология изготовления терабитовых запоминающих устройств. Общество будущего должно обладать информационными сетями, способными сохранять огромные массивы информации и передавать их с очень высокой скоростью. В частности, плотность записи

информации должна быть повышена от существующего уровня 20 гигабит/кв. дюйм до 0,4–1 терабит/кв. дюйм, для чего необходимо перейти к использованию для записи новых физических сред, разработать новые типы считывающих головок, новые прецизионные приводы (actuator) и т. д. Это, в свою очередь, требует проведения обширных исследований и технических разработок целых систем, что можно осуществить лишь при правильной организации исследований.

Например, повышение плотности записи в оптических устройствах требует проведения фундаментальных исследований в области так называемой оптики ближнего поля и преодоления сложностей, связанных с дифракционными ограничениями.

Развитие технологии сетевых устройств (network device). Для практического создания информационных сетей, передающих огромные объемы данных, необходимо разработать достаточно дешевые оптические высокоскоростные устройства (например, волноводы из органических материалов и т. д.).

Таблица 19

Важнейшие направления и финансирования нанотехнологических исследований в Японии (флагманские разработки)

Проекты категории 1. Характеристики проектов этой категории	Область финансируемых исследований	Ожидаемые результаты
«Флагманские проекты» • Краткосрочные, перспективные для внедрения • Проекты, согласованные с COE (Center of Excellence), т. е. с центрами, обеспечивающими взаимодействие и связь различных организаций	1. Полупроводниковые технологии XXI века • Дешевые и высокоэффективные наноразмерные полупроводниковые приборы • Новые материалы и новые устройства • Новая техника монтажа и сборки структур	Создание сверхминиатюрных полупроводниковых устройств и приборов
	2. Терабитовые запоминающие устройства • Новые материалы для запоминающих сред и считывающих головок • Новые конструкции считывающих головок • Прецизионные приводы (позиционеры) • Запись информации с использованием излучения ближнего поля	Повышение плотности записи до 1 терабит/кв. дюйм (2010 год)

Продолжение табл. 19

	3. Развитие технологии сетевых устройств • Фотоника, новые типы волноводов • Электронные устройства со сверхширокой запрещенной зоной	Доведение пропускной способности оптических линий связи до 1 петабит/кв. дюйм, а радиолиний — до 10 гигабит/кв. дюйм
Таблица составлена на основе предложенной Кэйданрэн программы <n-Plan21>.		

Помимо сказанного, планируется продолжить разработки и внедрение радиоустройств (особенно мобильных, с внутренней структурой типа LAN), пропускная способность которых должна быть повышена от современного уровня 30 мегабит/с до 10 гигабит/с. Планируется также создание полупроводниковых устройств со сверхширокой запрещенной зоной, на основе новых химических соединений (что требует дополнительных фундаментальных исследований).

Категория 2. Перспективные проекты

К этой категории Кэйданрэн относит среднесрочные и долгосрочные нанотехнологические разработки, внедрение и практическое использование которых может занять от 10 до 20 лет. Финансирование таких проектов связано с определенным риском. Наиболее важные из них перечисляются ниже.

Наноматериалы для массового производства. В XXI веке следует ожидать значительных структурных изменений в области энергетики. В частности, все большее значение будут приобретать «экологически чистые» источники энергии (солнечные батареи, топливные элементы нового типа и т. п.), что потребует поиска и внедрения в массовое производство совершенно новых материалов. В более далекой перспективе материалы будущего должны будут удовлетворять ряду важных требований. Конструкционные материалы XXI века должны быть исключительно легкими, очень прочными и износостойкими. Более того, некоторые из них должны быть «биосовместимыми», т. е. не вызывать реакций у тканей живых организмов. Таким образом, речь идет о создании целых классов материалов с новыми свойствами, которые можно назвать нанотехнологическими, поскольку наиболее перспективными в этом отношении веществами и материалами на сегодняшний день являются те из них, в которых структура регулируется на атомарном уровне (нанокристаллы, нанопленки, нанозернистые вещества, нанотрубки и т. п.).

Биологические наносистемы. В настоящее время нанотехнологии все шире используются для модификации биологических молекул и создания на этой основе новых материалов и устройств. В качестве примера можно привести описанные в разделе 3.15 «лаборатории-на-чипе», представляющие собой микроскопические по размерам химико-аналитические системы, способные быстро и точно осуществлять химический экспресс-анализ образцов. Широкое применение таких устройств может оказать существенное воздействие на развитие медицины и системы здравоохранения, так как оно может позволить организовать мониторинг состояния здоровья населения при помощи биодатчиков. Еще одним важным направлением развития нанотехнологий в этой области становится изучение пространственной структуры белков и создание на основе получаемой информации искусственных ферментов и антител. Возможно, что результаты таких исследований позднее будут внедрены в химическую промышленность, в методы анализа микроколичеств белков и т. п.

Таблица 20

Важнейшие направления и финансирования нанотехнологических исследований в Японии (категория перспективных проектов)

Проекты категории 2. Характеристики проектов этой категории	Область финансируемых исследований	Ожидаемые результаты
Перспективные проекты • Изучение целей и возможностей проекта • Согласование проекта с COE • Разработка планов и установка сроков реализации (включая подготовку венчурных производств)	1. Нанотехнологические материалы • Сверхлегкие и сверхпрочные конструкционные материалы • Износостойкие материалы • Биосовместимые материалы 2. Бионаносистемы • Лаборатории-на-чипе	Создание совершенно новых, «революционных» устройств и структур из наноматериалов (нанокристаллы, нанопленки, нанотрубки) Создание новых

Продолжение табл. 20

		аналитических систем на основе объединения методов биологии и нанотехники
3. Нанороботы	• Одноэлектронные устройства • Оптоэлектронные устройства • Спинная электроника • Сверхпроводящие устройства • Гибкие электронные устройства из органических материалов	Создание следующего поколения полупроводниковых приборов
4. Наноизмерительная техника	• Повышение точности измерений электронным пучком • Повышение возможностей зондовой техники • Оптические измерения • Нанометры и линейные измерения	Разработка высокоточной измерительной и обрабатывающей аппаратуры для нанотехнологических производственных процессов
5. Нанообработка материалов	• Развитие технологий «сверху-вниз» • Развитие технологий «снизу-вверх» и методов самосборки • Изучение возможностей объединения технологий «сверху-вниз» и «снизу-вверх»	Организация крупных промышленных производств с использованием нанотехнологий
6. Методы моделирования наносистем	• Автоматизированное проектирование устройств • Моделирование производственных процессов	Развитие методов моделирования промышленных нанотехнологических процессов

Таблица составлена на основе предложенной Кэйданрэн программы <n-Plan21>.

Нанороботы. Характерными примерами использования нанотехнологий для создания электронных и полупроводниковых приборов могут служить описанные выше одноэлектронные устройства (переключающие электрические цепи движением отдельных электронов), транзисторы с углеродными нанотрубками, квантовые запоминающие устройства и т. д. Такие устройства представляют собой основу следующего поколения электроники. Кроме этого, уже ведутся интересные исследования в области фотоники, сверхпроводящих устройств, гибких электронных схем из органических материалов и т. д., что во многом определит перспективы развития науки и техники.

Наноизмерительная техника. Для создания нанометровых конструкций и устройств необходимо разработать сверхточные системы обработки материалов и соответствующую этому уровню точности измерительную технику. С этой целью необходимо провести исследования, которые позволят использовать новейшие приборы (типа электронных микроскопов, сканирующих зондовых микроскопов, измерителей на основе эффектов оптики ближнего поля, рентгеновского отражения и т. д.) в будущих производственных процессах (например, при массовом выпуске новых полупроводниковых устройств).

Нанообработка. В процессах типа «сверху-вниз» сейчас широко используется литография (однако она не может применяться в процессах типа «снизу-вверх», где регулируется поведение отдельных атомов и молекул). В настоящее время техника литографии достигла высокого совершенства и позволяет осуществлять сверхточную обработку поверхности, создание трехмерных структур и т. п.

С другой стороны, нанотехнологические процессы «снизу-вверх» основаны, главным образом, на применении устройств типа сканирующих зондовых микроскопов, которые позволяют «складывать» атомы и молекулы друг с другом и создавать из них требуемые пространственные объекты. Однако для массового производства различных изделий зондовые устройства малоприменимы, вследствие чего внимание исследователей должно быть обращено на развитие технологий иного рода, а именно, — на спонтанное образование наноструктур (самосборку). Особую важность при этом приобретают процессы самосборки с участием углеродных нанотрубок, электропроводящих полимеров, биологических клеток и белковых структур. Кроме этого, ученым и инженерам следует задуматься о возможности «слияния» технологий, т. е. какого-то объединения процессов типа «сверху-вниз» и «снизу-вверх».

Моделирование наносистем. Измерения и эксперименты в нанометровом диапазоне размеров очень сложны, вследствие чего воз-

никает острая необходимость в разработке надежных методов моделирования поведения наносистем и нанообъектов. В качестве примера для подражания можно привести автоматизированную систему управления производством полупроводниковых устройств (CAD), позволяющую регулировать процессы микрообработки поверхности и т. д. Развитие методов моделирования является одним из важнейших на сегодня направлений развития нанонауки в целом.

3. Фундаментальные исследования

К этой категории отнесены исследования, связанные с прямым измерением физических свойств, механизмов действия, закономерностей поведения и т. п. разнообразных наноструктур. Например, объектами фундаментальных исследований являются структура и свойства квантовых точек, кристаллических решеток, отдельных атомов и молекул, геномов, белков и т. д. Более сложными объектами фундаментальных исследований могут являться вычислительные системы нового типа (квантовые, молекулярные и биологические компьютеры), а также процессы, связанные с энергетикой и сборкой наносистем. И наконец, к фундаментальным исследованиям следует отнести точные измерения электрических и магнитных состояний разнообразных наносистем, тканей и веществ, а также создание принципиально новых методов их теоретического или экспериментального исследования (к последнему разряду можно отнести, например, работы по созданию новых типов зондов).

Таблица 21

Важнейшие направления и финансирования нанотехнологических исследований в Японии (фундаментальные исследования)

Проекты категории 3. Характеристики проектов этой категории	Область финансируемых исследований	Ожидаемые результаты
Особая ценность оригинальных индивидуальных разработок Необходимость «кластеризации» исследований	1. Исследования свойств и функций наноструктур • Изучение свойств и функций нанокристаллов, решеток, квантовых точек, атомов, молекул, геномов и белков • Фундаментальные исследования новых типов вычислительных систем • Изучение ресурсосберегающих и энергосберегающих наносистем • Фундаментальные исследования процессов самосборки	Возникновение новых направлений развития нанонауки; разработка и реализация новых проектов

Продолжение табл. 21

2. Исследования процессов измерения • Разработка методик измерения электрических и магнитных состояний, а также структуры и свойств разнообразных нанообъектов • Разработка методик измерения с высоким временным разрешением и достаточной точностью • Создание новых типов микроскопов и зондов	
3. Развитие теоретических, аналитических и вычислительных методов	

Таблица составлена на основе предложенной Кэйданрэн программы <n-Plan21>.

6.3. Как должны быть организованы научно-исследовательские работы?

Основная проблема — обеспечить эффективное взаимодействие между учеными, промышленниками и чиновниками!

В упоминавшемся выше прогнозе Кэйданрэн «Нанотехнология и будущее общество. <n-Plan21>» особое внимание уделяется организации научно-исследовательских работ. Учитывая особую важность нанотехнологических исследований для нашей страны, крайне необходимо нацелить общественные, научные и промышленные круги на модернизацию нашей страны, для чего необходимо, в первую очередь, выработать единую общегосударственную стратегию в отношении организации исследований и подготовки «человеческих ресурсов». Должны быть быстро выделены основные направления развития нанотехнологии в Японии и сформулированы основные научно-технические цели и показатели, т. е. создан своеобразный «Путеводитель», который позволит ориентироваться в ситуации и рационально распределять ресурсы и усилия.

Характерной особенностью нанотехнологических исследований является необходимость организации тесного взаимодействия и сотрудничества между большим числом разнообразных организаций и учреждений. Это требует формирования новой, «кластерной» системы исследований и руководства проектами, при которой можно обеспечивать быстрый и эффективный обмен информацией между организациями или учеными разных специальностей. Что касается исследований, отнесенных выше к первой категории (кратковре-

менные или флагманские проекты), то для сотрудничества в их практической реализации уже создана крупная «объединяющая» организация, названная Центром совершенствования (COE, Center of Excellence), обеспечивающая взаимодействие и связь. Для исследований второй категории сейчас тоже создается сеть функциональных организационных связей, которая должна не только обеспечить анализ целей и результатов проектов, но и способствовать организации венчурных или инновационных фирм и доведению проектов до стадии промышленного производства. Процесс согласования интересов требует дополнительных мероприятий и исследований (например, для укрупнения масштабов установок или ускорения процесса внедрения в уже существующие производства).

Очень важной проблемой для развития нанотехнологий является подготовка научных кадров в университетах и других учебных заведениях. Существующая система подготовки специалистов отличается узкой направленностью, в то время как развитие нанотехнологий требует именно подготовки кадров для междисциплинарных исследований. Это обстоятельство диктует необходимость быстрой и энергичной реформы системы образования. Кстати, аналогичная проблема существует и в программах защиты окружающей среды, где часто требуется организовать «обмен» специалистами из разных областей (научная работа, промышленное производство, административная деятельность). Осуществление нанотехнологических исследовательских проектов и внедрение их результатов в жизнь требует не просто получения чисто научных результатов и овладения технологическими приемами, но и создания некоторой «единой системы», общих баз данных и т. п. В некоторых случаях эта сторона проблемы может иметь решающее значение.

Дополнительный материал к главе 6. Это интересно!

Дендримеры — полимерные образования, похожие на произведения искусства!

В последние годы внимание исследователей все больше привлекают высокомолекулярные соединения, названные дендримерами (от греческого слова *dendr* — дерево), представляющие собой действительно «древовидные» структуры, в которых из центральной молекулы растут и разветвляются полимерные «ветви». Обычно растущий узор имеет похожие или повторяющиеся элементы, что делает дендримеры похожими на произведения искусства.

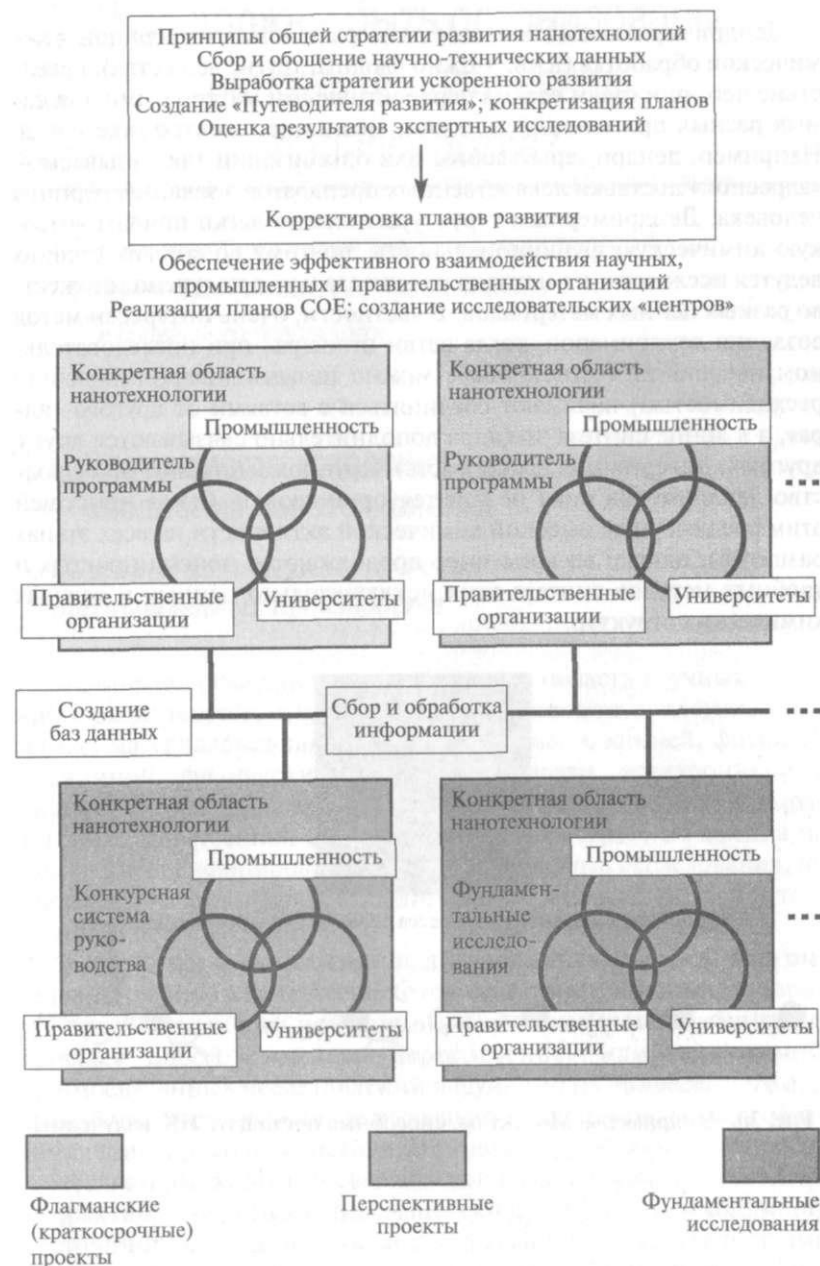
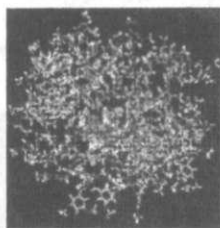


Рис. 29. Система организации научно-исследовательских работ

Дендримеры имеют большие размеры и легко подвергаются химической обработке (в них можно вводить другие вещества), вследствие чего они стали весьма перспективными материалами для самых разных применений в химии, медицине, электронике и т. д. Например, дендримеры удобны для организации так называемой «адресной» доставки лекарственных препаратов в заданные органы человека. Дендримерным структурам можно легко придать высокую химическую функциональность, поэтому во многих странах ведутся исследования методов их синтеза и уже получено множество разных ценных материалов. В частности, очень интересен метод создания дендримеров, когда ветви от «ядра» при последовательном нарастании (этот процесс можно назвать дивергенцией или расходимостью) начинают соединяться с ветвями от другого «ядра», а в конце синтеза эти ядра дополнительно связываются друг с другом (конвергенция, сходимость). Крупномасштабное производство дендримеров пока не удастся организовать (из-за присущей этим соединениям высокой химической активности на всех этапах развития), однако во всем мире продолжают поиски простых и удобных методов синтеза этих исключительно ценных и важных химических структур.



Схематическое изображение процесса образования и роста дендримера

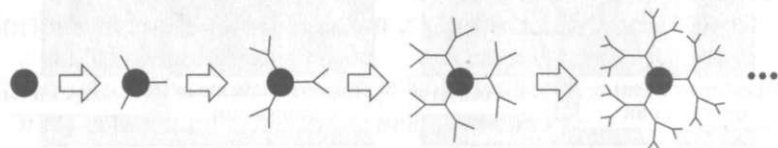


Рис. 30. Дендримеры! Молекулы, способные поглощать ИК-излучение!

Как должны быть организованы нанотехнологические производства?

7.1. Возможности ускорения внедрения нанотехнологий

7.2. Нанотехнология означает промышленную и социальную революцию!

Дополнительный материал к главе 7. Это интересно!

7.1. Возможности ускорения внедрения нанотехнологий

Создание нанотехнологических промышленных производств

Нанотехнология охватывает обширную область научных и технических интересов, относящихся к информатике, экологии, энергетике, материаловедению и т. д. Она связана с химией, физикой, медициной, физическим материаловедением, электроникой и многими другими дисциплинами. Это осложняет проблему выработки государственной стратегии, поскольку стратегия должна не только интенсифицировать междисциплинарные исследования, но учитывать необходимость координации различных министерств и ведомств.

Термин «нанотехнология» очень расплывчат и его трудно определить точно (в качестве некоторого единого понятия), оперируя привычными нам понятиями. «Ядро» нанотехнологии представляет собой сложное «переплетение» или пересечение взаимосвязанных представлений и функций из приведенного выше набора. Нанотехнология выступает связующим звеном, объединяющим подходы и методики разных дисциплин. С этим обстоятельством, кстати, и связана основная трудность в развитии и практическом внедрении нанотехнологий — необходимость постоянного сотрудничества и согласования как между учеными разных специальностей, так и между организациями из разных ведомств.

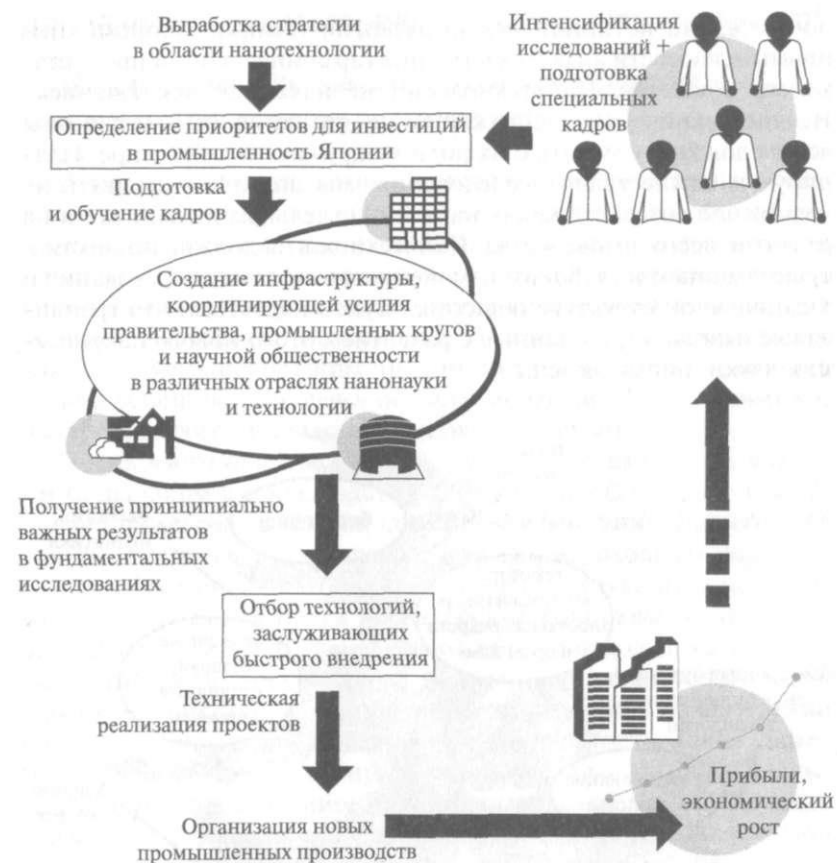
В настоящее время формируется некая «сеть» из конкретных людей, работающих в университетах, промышленных фирмах и правительственных организациях, каким-то образом связанных с нанотехнологиями. Эта сеть должна способствовать созданию и «выращиванию» персонала, способного осуществить многие серьезные задачи в области нанотехнологий, так как в ней происходит обмен идеями и специалистами. Одна из задач государственной стратегии Японии в этой области состоит именно в ломке границ между дисциплинами и ведомствами и обеспечении широкого обмена методами и идеями, что позднее должно привести к так называемому «синергизму», т. е. эффекту совместного воздействия. Сейчас мы должны сеять «семена» будущих научных и экономических достижений, искать пути решения проблем, которые ставит перед нами появление новых технологий.

7.2. Нанотехнология означает промышленную и социальную революцию!

Мечты становятся реальностью в XXI веке!

Как уже отмечалось выше, нанотехнология возникла на стыке нескольких наук (связанных с полупроводниками, информационными технологиями и т. п.), в которых традиционные направления развития вышли на некие естественные границы (обусловленные законами физики), что потребовало выработки нового общего подхода. Особенно сильно эти пределы роста проявляются в информационных технологиях.

Развитие науки и техники раньше практически всегда означало реализацию каких-то очень старых фантазий, то есть воплощение той или иной конкретной мечты человечества (к этому легко свести космические полеты, радиосвязь, развитие системы Интернет и многое другое). Иными словами, до сих пор технические достижения становились «наградой» за долгие мечтания и поиски в определенном направлении. Однако в случае нанотехнологий мы сталкиваемся с ситуацией, порождающей совершенно неожиданные возможности. Люди раньше никогда не задумывались серьезно, например, о возможности полного «ремонта» раковых клеток, о «нацеленной» доставке лекарственных препаратов в организме, о создании сверхмалых вычислительных устройств с практически бесконечным объемом памяти на молекулярном уровне и т. п. Такие задачи и проблемы относились, скорее, к области чистой мечты или к научной фантастике.



По данным Института «Хитати Сокэн»

Рис. 31. Общая схема организации нанотехнологических исследований и их коммерциализации

Нанотехнология наверняка окажет огромное воздействие на экономику, общественную жизнь и промышленность XXI века. Предлагаемая читателю маленькая книга, конечно, не претендует на описание такого воздействия в полной мере. С другой стороны, мы не должны забывать, что развитие нанотехнологии может иметь также отрицательные и даже очень опасные последствия. Как и в случае ядерных исследований, результатом которых стало создание атомной бомбы, нам следует относиться к научным достижениям с большой осторожностью. Мы должны

помнить, что истинной целью развития техники, экономики и промышленности является создание гармонического и процветающего общества. Нанотехнологии не являются исключением. Научно-технические достижения не являются самоцелью, мы всегда должны помнить о их роли в окружающем нас мире. Планируя и осуществляя исследования, мы должны учитывать их возможное воздействие как на жизнь отдельных людей, так и на развитие всего человечества. Нанотехнология должна привести к существенным и глубоким изменениям в системах образования и в социальной структуре общества. Будем надеяться, что грандиозные ожидания, связанные с развитием этого нового направления науки, оправдаются.

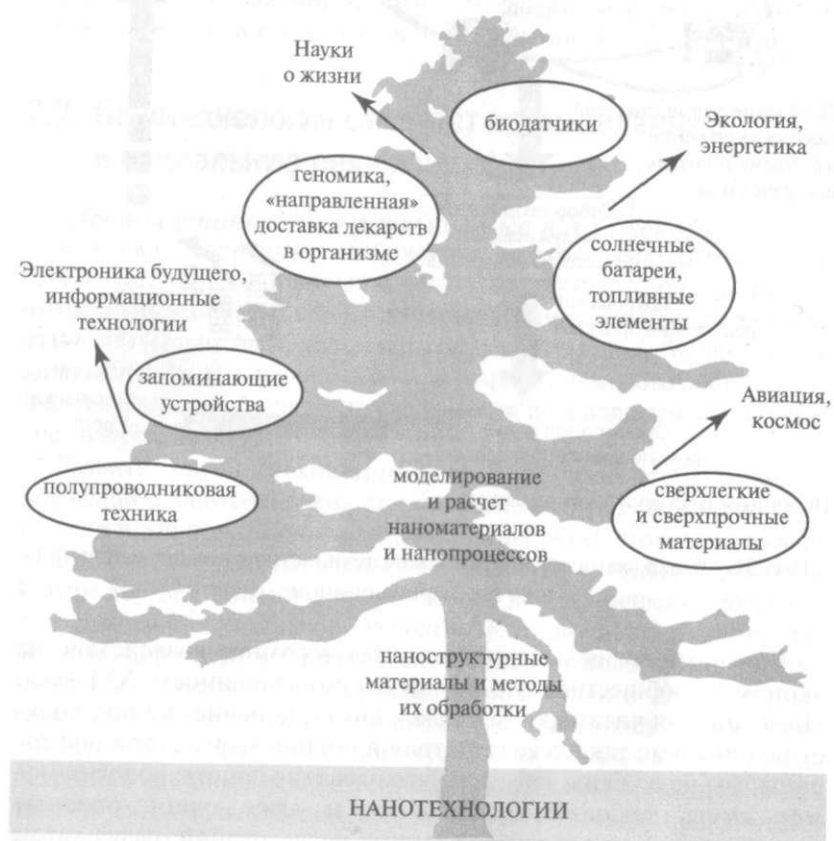


Рис. 32. Технические и социальные перспективы нанотехнологической революции XXI века!

Дополнительный материал к главе 7. Это интересно!

Нанотехнологические венчурные предприятия — шанс для энергичных бизнесменов!

Развитие нанотехнологий (в частности, относящихся к биологии и медицине) уже привело к созданию в США целого ряда венчурных фирм и малых предприятий, основанных небольшими группами исследователей из различных университетов. Причина в том, что в нанотехнологиях очень многое зависит от личного мастерства персонала, вследствие чего, например, фирма с очень небольшим числом сотрудников может развить весьма успешный бизнес в области биохимии или геномики и быстро получить достаточно высокие прибыли.

Очень часто организаторами, руководителями и владельцами таких фирм и производств становятся профессора и заведующие исследовательскими лабораториями университетов по данной тематике. Для начала работ им необходимо получить разрешение (лицензию) на использование результатов исследований и оформить права на авторские гонорары (royalty). Во всех странах (а в США особенно) такой подход показал свою эффективность, поскольку он позволяет заинтересовать научных руководителей, молодых ученых и студентов во внедрении плодов научной деятельности в промышленность. Такая система позволяет также отбирать наиболее талантливые кадры, способные к организационной и практической работе. Помимо сказанного, организация фирм и производств на основе полученных в исследованиях результатов дает молодым ученым чувство морального удовлетворения и повышает их уверенность в своих силах.

Для нанотехнологических исследований именно организация венчурных предприятий и фирм выглядит естественным и перспективным продолжением работы. Процесс внедрения новых технологий идет достаточно успешно, примером чего могут служить два приводимых примера организации и успешного развития венчурных фирм.

Фирма «Зайвекс» (Zyvex). Венчурное предприятие «Зайвекс» было основано в городе Ричардсон (штат Техас, США) в 1997 году. Первоначально численность персонала составляла около 50 человек. Совместно с Университетом Вашингтона фирма приступила к разработке так называемых молекулярных ассемблеров (сборщиков), которые позволяют осуществ-

лять очень тонкие манипуляции на уровне атомарных и молекулярных структур.

Исследовательский центр нанотехнологии, организованный на основе лаборатории фирмы «Фудзицу» в японском городе Кавасаки. В декабре 2000 года фирма объявила (см. пресс-релиз), что она организует Исследовательский центр нанотехнологии под руководством Наоки Ёкояма (члена правления фирмы «Фудзицу»). Штат Центра насчитывает всего 10 человек, однако в его исследованиях могут принимать участие и ученые, не связанные с фирмой «Фудзицу». Центр включает в себя три группы, работающие в разных направлениях (наноматериалы, наноустройства и системы, нанобиология) и финансируется независимым образом в объеме нескольких миллионов долларов в год. В настоящее время там ведутся работы по технике шифрования информации и передаче данных, наносборке полупроводниковых устройств, квантовым компьютерам и нанобиологическим датчикам. Таким образом, венчурные предприятия могут быть организованы даже внутри отдельной крупной фирмы.

Серия: Нанотехнология

Учебное издание

Кобаяси Наоя

ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИЮ

Ведущий редактор *Б. Копылов*

Художник *С. Инфантэ*

Художественный редактор *О. Лапко*

Компьютерная верстка: *Т. Внукова*

Подписано в печать 29.01.08. Формат 60×90/16.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,5. Тираж 1000 экз. Заказ № 681

БИНОМ. Лаборатория знаний
125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: Lbz@aha.ru, <http://www.Lbz.ru>

При участии ООО «ЭМПРЕЗА»

Отпечатано с готовых файлов заказчика в ОАО «ИПК
«Ульяновский Дом печати», 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ

П. Н. Дьячков

Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения

И. В. Мелихов

Физико-химическая эволюция твердого вещества

ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ

Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э. Л. Дзидзигури

Наноматериалы : учебное пособие

В. В. Старостин

Материалы и методы нанотехнологии : учебное пособие

А. А. Раскин, В. К. Прокофьева

Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники : учебное пособие. Часть 1

В. М. Рошин, М. В. Силибин

Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники : учебное пособие. Часть 2

У. Хартмани

Очарование нанотехнологии (пер. с нем.)

Наномагнетизм (сб. статей) (пер. с англ.)



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«БИНОМ

Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3
Телефон: (499) 157-5272

e-mail: Lbz@aha.ru, <http://www.Lbz.ru>

Оптовые поставки:

(495) 174-7616, 171-1954, 170-6674