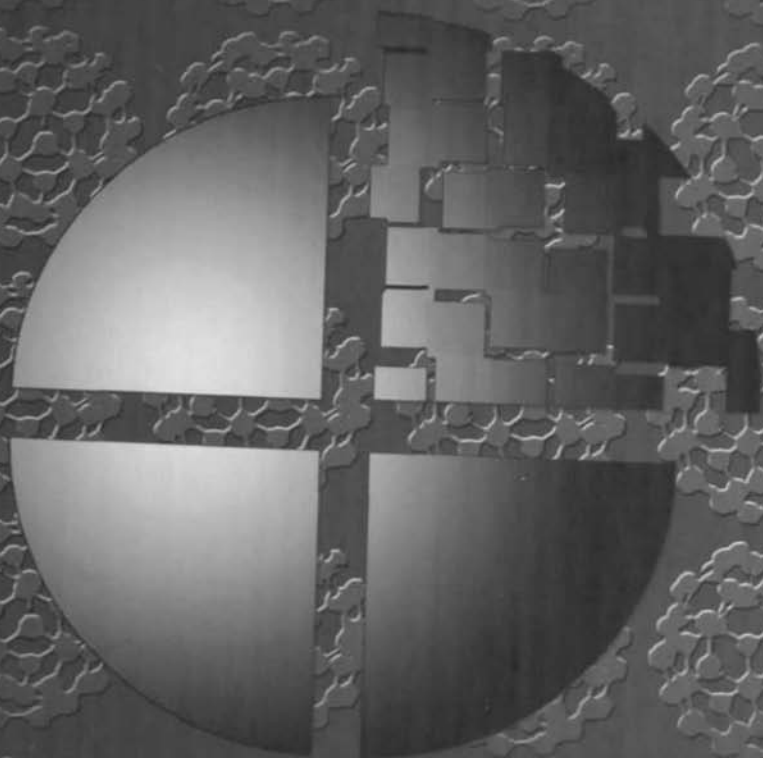


● ● ● Н А Н О Т Е Х Н О Л О Г И Я ● ● ●

У. Хартманн

# ОЧАРОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ



БИНОМ  
BINOM

Uwe Hartmann

# Faszination Nanotechnologie

У. Хартманн

# ОЧАРОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Перевод с немецкого  
Т. Н. Захаровой  
под редакцией  
проф. Л. Н. Патрикеева

Special for InfaNata.org



**Spektrum**  
AKADEMISCHER VERLAG



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2008

УДК 621.3.049.77  
ББК 32.844.1  
Х22

Хартманн У.

Х22 Очарование нанотехнологии / У. Хартманн ; пер. с нем. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 173 с. : ил. — (Нанотехнология).

ISBN 978-5-94774-588-7 (русск.)

ISBN 978-3-8274-1658-2 (нем.)

В книге в доступной форме излагаются вопросы, связанные с историческим развитием и современным применением нанотехнологии в различных областях — электронике, медицине, биотехнологии, точной механике и оптике, автомобильной индустрии, энергетике.

Рассматриваются социальноэкономические последствия и этические аспекты внедрения нанотехнологии в жизнь современного общества.

Для студентов, изучающих дисциплины, связанные с применением нанотехнологии, преподавателей соответствующих специальностей, а также для широкого круга читателей, интересующихся новейшими достижениями в науке и технике.

УДК 621.3.049.77  
ББК 32.844.1

Учебное издание

Серия: «Нанотехнология»

Хартманн Уве

### ОЧАРОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Ведущий редактор Б. Копылов

Художник С. Инфантэ. Художественный редактор О. Лапко

Компьютерная верстка: Е. Голубова

Подписано в печать 05.06.08. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 11. Тираж 2000 экз. Заказ 4022

«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

ISBN 978-5-94774-588-7 (русск.) © Elsevier GmbH, München, 2006  
ISBN 978-3-8274-1658-2 (нем.) Перевод книги «Faszination Nanotechnologie»  
by Uwe Hartmann опубликован по соглашению  
с Elsevier GmbH, Spectrum Akademischer  
Verlag, Heidelberg, Germany  
© Перевод на русский язык БИНОМ.  
Лаборатория знаний, 2008

## Оглавление

Предисловие редактора перевода . . . . .	7
Предисловие . . . . .	9
<b>Часть I. Терминология и классификация . . . . .</b>	<b>12</b>
1. Введение . . . . .	12
2. Основы НТ . . . . .	15
2.1. Что такое нанотехнология? . . . . .	15
2.2. История развития НТ . . . . .	19
2.3. Современное состояние рынка нанотехнологий . . . . .	22
<b>Часть II. Научно-технологические основы НТ . . . . .</b>	<b>25</b>
3. Миниатюризация . . . . .	25
3.1. Мотивация проведения исследований в области НТ . . . . .	25
3.2. Планы и стратегия развития . . . . .	29
3.3. Границы изменения масштабов . . . . .	30
4. Связь размеров структур с их функциональностью . . . . .	33
4.1. Распределение атомов и связанные с этим свойства . . . . .	33
4.2. Отношения величина – свойства . . . . .	39
4.3. Измерение новых свойств . . . . .	41
5. Нанобиотехнология . . . . .	51
5.1. Проблемы определения используемых понятий . . . . .	51
5.2. Технологии типа <i>от нано к био</i> . . . . .	55
5.3. Технологии типа <i>от био к нано</i> . . . . .	60
6. Стандартные методы НТ . . . . .	65
6.1. Аналитические методы . . . . .	66
6.2. Методы изготовления наноструктур . . . . .	91
6.3. Проблемы организации промышленного производства . . . . .	93
<b>Часть III. Перспективы экономического развития НТ . . . . .</b>	<b>99</b>
7. Применение НТ . . . . .	99
7.1. Электроника и информационные технологии . . . . .	100
7.2. Химические методы в разработке наноматериалов . . . . .	104
7.3. Медицина и фармакология . . . . .	114
7.4. Точная механика и оптика . . . . .	118
7.5. Автомобильная промышленность . . . . .	123
7.6. Энергетика и защита окружающей среды . . . . .	126
8. Рынки сбыта и социальные последствия внедрения НТ . . . . .	132
8.1. Потенциал развития рынка НТ . . . . .	132

8.2. Социально-экономические последствия развития НТ . . . . .	134
<b>9. Перспективы, потенциальная опасность и этические аспекты развития НТ . . . . .</b>	<b>137</b>
9.1. Перспективы . . . . .	137
9.2. Потенциальные опасности . . . . .	139
9.3. Этические аспекты . . . . .	141
Наночастицы . . . . .	143
Справедливость распределения получаемых преимуществ . . . . .	144
Право на защищенность частной жизни . . . . .	145
Медицинские сферы применения . . . . .	146
Преодоление границы между техникой и человеком . . . . .	147
Техническое совершенствование человека . . . . .	148
<b>Литература . . . . .</b>	<b>150</b>
Дополнительная специальная литература . . . . .	152
Дополнительная научно-популярная литература . . . . .	152
Дополнительная литература по экономическим перспективам . . . . .	153
Дополнительные интернет-сайты . . . . .	153
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>157</b>
А. Нанотехнологические фирмы в немецкоязычных странах . . . . .	157
В. Информация об исследованиях и дальнейшем образовании . . . . .	162
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>166</b>

## Предисловие редактора перевода

Нанотехнология признана специалистами всех развитых и развивающихся стран наиболее всеобъемлющей основой дальнейшего роста материального производства и благосостояния людей.

Как пишут некоторые авторы, «те, кто владеют методами нанотехнологии, владеют миром».

В подавляющем большинстве экономически развитых стран вслед за Японией и США в настоящее время приняты Национальные программы комплексного развития нанотехнологии. На эти программы выделяются колоссальные бюджетные средства (стимулирующие дополнительные активные частные инвестиции) в развитие фундаментальных исследований, прикладных разработок, подготовку, переподготовку и повышение квалификации сотрудников НИИ и промышленности.

В нашей стране в 2007 году также принята Национальная нанопрограмма. Главным центром развития фундаментальных работ по конкурсу назначен Российский научно-исследовательский центр «Курчатовский институт». Создана корпорация «Роснано», призванная содействовать активному инновационному внедрению достижений ученых. Организован Научный Совет при Президенте РФ, координирующий развитие отечественной нанотехнологии. Объем бюджетного финансирования на ближайшие три года составил 180 млрд руб. Все свидетельствует о высоком уровне осознания высшим руководством страны значимости нанотехнологии.

Одновременно можно констатировать, что на уровне не только гражданского населения, но и специалистов среднего и особенно старшего возраста, на уровне школьников и студентов адекватного, резонансного осознания нанотехнологии все еще нет.

Предлагаемая читателям книга имеет своей конечной целью рассказать не только о реальных, уже реализуемых достижениях нанотехнологии, но и хоть в какой-то степени очаровать их ее перспективами.



Необходимо отметить, наконец, что за последние годы отечественными издательствами наращиваются темпы подготовки и издания популярных и особенно специальных и учебных книг по нанотехнологии.

Тем, кто заинтересуется нанотехнологией, рекомендуем три книги:

Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.

М. Рыбалкина. Нанотехнология для всех. Большое в малом. — М., 2005.

[www.nanonewsnet.ru](http://www.nanonewsnet.ru)

Ю. И. Головин. Введение в нанотехнику. — М.: Машиностроение, 2007.

Л. Н. Патрикеев

## Предисловие

Нанотехнология сегодня представляется чрезвычайно перспективной наукой, обещающей множество блестящих применений, от создания новых и высокоэффективных лекарств против тяжелейших заболеваний (включая раковые) до создания фантастических «молекулярных производств», позволяющих производить любые требуемые вещества буквально по принципу построения требуемых молекул из атомов исходных элементов. В связи с развитием нанотехнологий мы постоянно узнаем об удивительных открытиях и перспективах, например, о возможности создания компьютеров небывалой мощности, введении в человеческий организм удивительных микроскопических имплантантов (восстанавливающих, имитирующих или даже значительно расширяющих возможности человека) и о многих других, столь же удивительных перспективах. Более того, мы узнаем, что эти возможности перестали быть просто предметом дискуссий изобретательных дилетантов или авторов научно-фантастических произведений, а являются реальными разработками, предлагаемыми серьезными учеными и экспертами. Новая наука действительно требует простого и ясного разъяснения основ теории и возможностей применения предлагаемых нанотехнологий (НТ) в рамках привычных научных, технических и медицинских понятий. Описание и разъяснение НТ требуется не только сотрудникам и руководителям предприятий, которые уже имеют дело с НТ или собираются этим заниматься, но и множеству людей, для которых эти научные исследования могут стать увлекательным и многогранным полем активной деятельности в близком будущем. Так или иначе, каждый совершеннолетний гражданин должен представлять себе *возможности* и *риски*, которые возникают в связи с развитием новых технологий, хотя бы для того, чтобы с пониманием принимать участие в многочисленных общественных и политических дискуссиях относительно условий их применения и дальнейшего развития.

В книге очень небольшого объема довольно трудно представить обзор основ и возможностей применения НТ, прежде всего, из-за того, что естественнонаучные корни НТ многообразны и системно охватывают целые научные направления. Кроме того, представляется очевидным, что читатели популярной книги обладают совершенно разным уровнем предварительной подготовки и специальных знаний относительно роли и возможности этого современного направления науки и техники.

За последние годы было издано множество учебных пособий, дающих подробные описания отдельных аспектов исследований в области НТ, но не позволяющих читателю составить общее представление о предмете обсуждения. Автор предлагаемой книги постарался создать компактный обзор научных и технических основ НТ, не требующий при прочтении серьезных и обширных знаний, вследствие чего в книге практически не используются математические и физические формулы, хотя автор прекрасно понимает, какие преимущества имеет строгое описание и в чем заключаются опасности поверхностного изложения. Речь в книге идет не столько о чисто научной стороне НТ, сколько о ближайших и долгосрочных перспективах ее развития, а также о возможных технических и социальных последствиях практического внедрения новых технологий. Предлагаемая книга ставит своей скромной целью общее ознакомление читателя с проблемой НТ, а также возможность выбора наиболее интересных аспектов новой науки для более углубленного изучения (уже с использованием специальной литературы) или даже ее применения для практических целей. С другой стороны, даже специалисты и эксперты, профессионально занимающиеся той или иной областью НТ, могут найти для себя в книге некие новые, не относящиеся к их конкретной деятельности аспекты новой науки, что, возможно, будет способствовать выработке более общей точки зрения на рассматриваемые проблемы.

Книга состоит из трех частей. Во введении рассказывается о значимости и возможностях конкретных применений НТ. Во второй части излагаются общие естественнонаучные основы НТ и связанные с этим возможности развития и использования. В третьей части предлагается обзор технических применений НТ и оцениваются положительные и отрицательные последствия таких возможных применений. Библиография книги содержит ряд интересных ссылок по данной теме, включая некоторые ресурсы Интернета.

Автор стремился представить «мгновенный снимок» состояния нанотехнологий в их динамике и сложном развитии, поэтому в текст книги включены некоторые конкретные цифры и предварительные экономические оценки развития. Задача оказалась достаточно сложной, и автор выражает свою благодарность многим людям, особенно Стефани Нойманн. Большой вклад в оформление книги внесли Хайбин Гао и Габриэле Кройтцер-Юнгманн. Автор также сердечно благодарит сотрудников редакции доктора Андреаса Рюдингера и Барбару Люкер за эффективное сотрудничество.

Саарбрюккен, июль 2005.

*Уве Хартманн*

## 1. Введение

Растущую значимость нанотехнологий каждый человек чувствует по публикациям в научной или популярной литературе, по информации в Интернете и в средствах массовой информации. Подтверждением значения и роли НТ в развитии общества может служить ежегодный рост публикаций по этой проблематике, числа заявок на патенты, распределения финансирования на эти темы и т. п. В качестве еще одного аргумента можно привести интенсивно развивающиеся дискуссии по научным и политическим аспектам НТ, которые свидетельствуют о стремлении общественности приобщиться к исследовательской деятельности в этой области. Дискуссии происходят в региональных, национальных и международных масштабах, так что становится очевидным, что в этой проблеме мы, вероятно, имеем дело с техническими и экономическими процессами глобального масштаба, которые (по оценкам многих экспертов) могут перерасти в еще одну промышленную революцию.

Термин «промышленная революция», впервые сформулированный социальным реформатором Фридрихом Энгельсом, подразумевает в узком смысле этого слова индустриализацию Великобритании в период примерно между 1750 и 1850 гг., в результате чего возникло то, что сейчас называется промышленным капитализмом. Развитие техники (особенно в сфере механизации производства) за этот период привело к полному техническому, экономическому и общественному изменению социальной системы (König, 1992), конечным результатом чего стали огромные перемены в экономике, технике, социальной структуре, стиле жизни, политической системе и даже изменение общего ландшафта стран, вовлеченных в указанный процесс. Другими известными последствиями промышленной

революции стали более гуманные условия труда, устранение массовой бедности, ускорение технологических, экономических и социальных изменений, возрастание «аккумуляции» капитала и рост предложений на рынке труда. Некоторые аспекты этого процесса и сегодня представляются чрезвычайно актуальными, особенно с точки зрения дальнейших последствий технического и экономического развития.

Второй промышленной революцией часто называют внедрение автоматизации в промышленные процессы, которое произошло в начале 20-го века (König, 1992). Даже те, кто считает понятие «промышленная революция» давно утратившим свой первоначальный смысл, не могут отрицать, что автоматизация производства действительно привела к глобальным и до сих пор заметным переменам в существующем обществе. Третьей промышленной революцией некоторые социологи называют внедрение в производство процессоров, начавшееся с середины 20-го века. Такое сравнение НТ с перечисленными выше промышленными преобразованиями, послужившими основой глобальных изменений во всех сферах жизни, еще глубже подчеркивает невероятный потенциал развития новых технологий.

Легко заметить, что любые дискуссии по проблеме НТ в кругах экспертов (особенно при рассмотрении общественно-политических вопросов) отличаются удивительной широтой обсуждаемых тем и понятий. Почти всегда эти многочисленные обсуждения быстро переходят от рассмотрения каких-либо последних достижений в области НТ к практическим возможностям их использования. Эксперты любят обсуждать глобальные применения, которые потенциально обещают охватить *все* сферы жизнедеятельности, а также потенциальные риски, связанные с техническими преобразованиями. Забавно, что связанные с НТ серьезные ученые часто предлагают весьма смелые и фантастические проекты, в свете которых все измышления журналистов, писателей-фантастов и дилетантов представляются упрощенными и приземленными (образно говоря, наука сейчас обгоняет фантастику).

Серьезное знакомство с основами, стратегией развития и областями возможного применения НТ сейчас приобретает особое значение по двум основным причинам. Во-первых, такое знакомство служит предпосылкой для компетентной оценки потенциала НТ в области промышленного применения с технической и макроэкономической перспективой, а, во-вторых, оно необходи-

мо самым разным специалистам для оценки возможных изменений в различных сферах общественной жизни (например, в медицине, использовании природных ресурсов, образовании и т. п.).

Нанотехнология в последние годы стала очень популярна в академических кругах, а также в высших учебных заведениях, что можно объяснить неожиданно возникшей острой потребностью в квалифицированных кадрах. Наряду со специально созданными и дополнительными учебными курсами, спешно создаются новые учебники и программы обучения или совершенствования персонала. В высших учебных заведениях Германии и других развитых стран уже создан целый ряд новых учебных курсов и факультативных курсов лекций по различным направлениям НТ. Большинство новых учебных пособий пытается отобразить разнообразие идей НТ и различные научно-технические особенности отдельных областей НТ, от электроники до молекулярной медицины, однако для фундаментального понимания новой науки гораздо важнее знание междисциплинарных основ, объединяющих область исследований НТ, независимо от конкретного применения. В мировой науке наблюдается новое и очень интересное явление — проведение междисциплинарных исследований на основе срастающихся и взаимно дополняющих друг друга наук и технологий, в результате чего неожиданно появляются *новые* продукты и методы. Этот феномен даже получил специальное название слияния или *сходимости технологий*.

**Выводы:** При любой системе оценок и определений, следует признать, что нанотехнология (НТ) представляет собой чрезвычайно важное направление научно-технического развития вообще. Общественные дискуссии о НТ обычно проводятся людьми, не имеющими специальных знаний, а точный прогноз возможностей развития новой науки представляется проблематичным даже для экспертов. Нанотехнология системно связана с множеством научных дисциплин и уже существующих технологий, и эта специфика отражается как на процессе обучения, так и изучении структур и явлений на нанометрическом уровне

## 2. Основы НТ

Зачастую НТ ошибочно и очень упрощенно связывают только с длиной и определяют ее через характерные или минимальные параметры (размеры) структуры, материала или компонентов системы. Столь же ошибочным представляется и распространенное мнение, что НТ возникла «сама собой» в рамках микроэлектроники вследствие естественного прогресса в технике миниатюризации. В многочисленных дискуссиях истинная значимость НТ обычно переоценивается или недооценивается, но в целом сейчас почти никто не сомневается в том, что новые технологии представляют огромную важность для развития науки, техники и общества.

### 2.1. Что такое нанотехнология?

Для начала следует сразу подчеркнуть, что термин «технология» в рассматриваемом случае следует воспринимать в значении «техника», а не относить его лишь к некоторым техническим *процедурам*. Префикс *нано-* является заимствованием из греческого языка, где *nanos* означает «карлик». Подобно аналогичным префиксам, заимствованным из греческого или латыни, частица «нано» применяется для обозначения определенной доли (фракции) физических величин. В данном случае речь идет об одной миллиардной части ( $10^{-9} = 0,000\,000\,001$ ) какой-либо величины, что позволяет вводить, например, нанолитр ( $= 10^{-9}$  литра), наносекунду (1 нс) или нанометр (1 нм = одной миллиардной метра, одной миллионной миллиметра или одной тысячной микрометра). Введение таких дополнительных мер длины играет особую роль для определения НТ, однако я повторю, что НТ нельзя упрощенно связывать лишь с масштабами объектов.

Читатель может оценить сложность проблемы, если вспомнит (этот вопрос подробно рассматривается в главе 4), что для достаточно малых систем функциональные свойства материалов или их отдельных компонентов начинают зависеть от размеров объектов. Речь идет о том, что основные характеристики вещества как целого, обычно рассматриваемые в качестве постоянных (например, твердость, электрическая проводимость, цвет или химическая активность мелких частиц) для любого заданного материала, начинают зависеть от размера частиц. Этот



эффект нельзя наблюдать в объемных материалах или у более крупных частиц: стальная булавочная головка имеет те же основные физические свойства (серебристый блеск, твердость, электропроводность и точку плавления), как и слиток стали того же сорта весом в 1 тонну. Обычно физико-химические свойства веществ не связаны с их размерами, но ситуация принципиально изменяется при переходе к нанобъектам и нановеществам. Например, миниатюрные полупроводниковые компоненты меньше некоторой критической величины ведут себя совсем не так, как их более крупные аналоги, так как электрические токи в таких объектах могут протекать только в некоторых изолированных областях, а значения тока могут возрастать при росте напряжения ступенчато, а не непрерывно. В таких системах характерное измерение размеров оказывает непосредственное влияние на функциональность компонентов и их свойства. Поэтому представляется целесообразным дать следующее определение:

*Специфические функциональные параметры в НТ достигаются путем связи между соответствующими свойствами и уменьшением характерных структурных размеров в тех случаях, когда размеры объектов (по крайней мере, в двух измерениях) не превышают значения 100 нм.*

Этого кажущегося несколько абстрактным определения (формулы), с одной стороны, вполне достаточно, чтобы упорядочить представления о различных областях применения НТ. С другой стороны, оно исключает некоторые области применения инновационного характера, которые «незаконно» причисляются к НТ. Особое значение имеет установление нанобласти в интервале 1–100 нм, так как именно в этой области размеров проявляется большинство абсолютно новых свойств любых объектов. Ниже этого предела находятся отдельные атомы или молекулы, а выше — микротехнологии. Путем ограничения в приведенном определении на два нанометровых измерения исключается возможность, что продуктом НТ назовут, например, просто очень тонкий слой на поверхности (толщиной несколько нм), хотя структурные компоненты этого слоя при соответствующих параметрах, несомненно, будут являться наноконпонентами системы.

В соответствии с приведенным выше определением, НТ не является чем-то абсолютно новым, поскольку частицы с нанометрическими параметрами известны очень давно (например, именно такими частицами давно занимаются специалисты по

коллоидной химии). Более точные и научно строгие определения, особенно в вопросах нанотехнологического синтеза, требуют возможности обращения и доступа ко всем компонентам нанобъекта. Говоря о так называемых молекулярных НТ, следовало бы рассматривать развитие по принципу «снизу – вверх», при котором наноструктуры целенаправленно создавались бы из отдельных атомов или молекул, как это показано в качестве примера на рис. 2.1.

Отдавая должное существующей ситуации и перспективам дальнейшего развития методов изготовления наноструктур, было бы целесообразно оставить приведенную формулу (определение) без изменений и просто констатировать, что принципом, объединяющим различные нанотехнологии, выступает целенаправленное использование приведенного выше ограничения свойств объектов.

Как показано на рис. 2.2, наноструктуры можно производить как с помощью методик типа *сверху – вниз* (основной принцип которых состоит в постепенном уменьшении размеров от макро- через микро- до нанобласти), так и посредством мето-

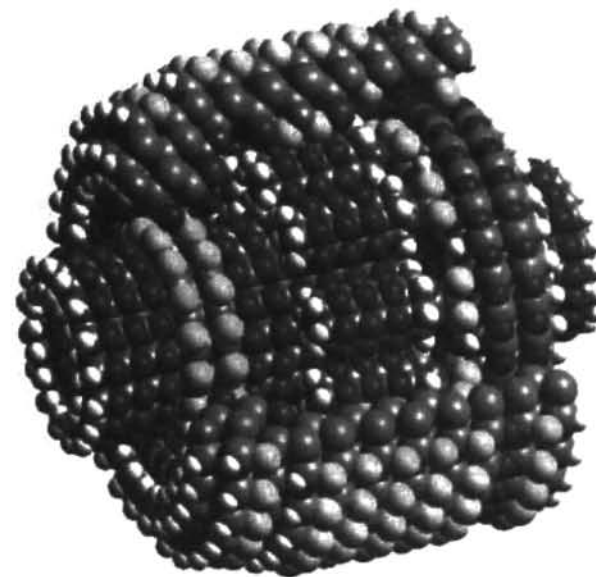


Рис. 2.1. Наноконпоненты и структуры, собранные из отдельных атомов (Институт молекулярного производства, Лос-Альтос)

дик типа *снизу – вверх*, основой которых служит атомарный или молекулярный синтез все более крупных и усложняющихся структур. Используя новейшие методы супрамолекулярной химии или генных технологий, уже сейчас удается синтезировать структуры величиной в нанометры, однако вплоть до настоящего времени представлялось невозможным производить их в массовом количестве, то есть создавать в пробирке большое число одинаковых наноразмерных «объектов» (например, типа показанной на рис. 2.1 структуры), обладающих одинаковой, точно заданной функциональностью. С другой стороны, подобное «производство» не только не противоречит законам природы, но и реально осуществляется в биологических системах, где постоянно синтезируются в больших количествах сложнейшие «наномашин», функциональность которых обусловлена параметрами и размерами, приведенными в определении.

В качестве типичного примера действия биологических механизмов можно рассмотреть размножение вирусов, протекающее в природе подобно отлично отлаженному массовому производству, действующее совершенно безошибочно и, естественно, без вмешательства человека. Как правило, вирусы состоят из тысяч протеиновых соединений, которые многократно реагируют друг с другом под действием межмолекулярных сил в

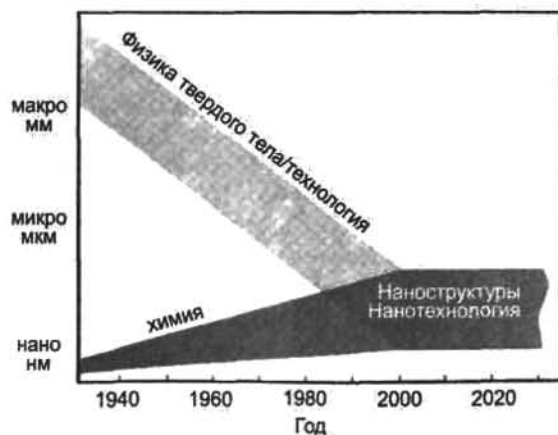


Рис. 2.2. Характерные размеры объектов, создаваемых с помощью методик, обозначаемых «сверху – вниз» (top-down) и «снизу – вверх» (bottom-up). Область перекрывания методик соответствует типичным размерам синтеза и функционирования биологических наноструктур

неравновесных термодинамических условиях. При ошибках в процессе «сборки», как правило, начинают действовать какие-то биологические процессы «самоизлечения» или «исправления». Известно множество примеров биологических машин на межклеточном уровне с удивительными свойствами и поразительной функциональностью, и именно к этой области биологии примыкает большой раздел НТ, называемый нанобиотехнологией и представляющий собой промежуточную дисциплину на границе между собственно НТ и биотехнологией.

**Выводы:** В НТ взаимосвязь между структурными размерами и функциональностью целенаправленно используется для получения материалов и компонентов с новыми характеристиками. Наноструктуры могут создаваться методиками сверху – вниз и снизу – вверх. Принципиальная цель НТ состоит в создании и применении стратегий, напоминающих те, которые существуют и действуют в природе, что придает НТ особое значение.

## 2.2. История развития НТ

Тот факт, что достаточно мелкие частицы различных веществ обладают свойствами, зачастую совершенно не похожими на свойства этих веществ в объемной фазе, был известен (во всяком случае, эмпирически) ученым и технологам очень давно. Известно, что еще древние римляне применяли сверхмалые частицы золота или серебра и золота для того, чтобы придавать бочалам и другим стеклянным изделиям особо характерную окраску (например, таким способом изготавливались знаменитые римские рубиновые кубки, один из которых показан на рис. 2.3). Не вдаваясь в детали производства, отметим, что эффект достигался введением в материал наночастиц благородного металла, что и придавало стеклу необычные оптические свойства. Стоит подчеркнуть (исходя из приведенного выше определения НТ), что в данном случае мы не можем говорить о НТ в строгом смысле этого понятия, поскольку процесс осуществлялся древними стеклодувами неосознанно, без четкого представления о реальных связях между величиной частиц и эффектом рассеивания света. Можно привести много других примеров такого практического использования наносистем, не основанного на строгих определениях и знаниях. Например,



Рис. 2.3. Кубок Ликурга (4 век, Национальный Британский исторический музей). Бокал, на который нанесены частицы размером в 70 нм (содержащие семь частей серебра и три части золота), кажется зеленым в отраженном свете и красным при подсветке сзади

коллоидные суспензии, т. е. системы с частицами меньше микрометра в жидкой среде, известны уже десятки лет, не говоря уже о многих фармацевтических препаратах, в которых наночастицы выступают носителями лекарственных препаратов, и т. д.

Строго говоря, истинным предвестником и основателем НТ сегодня следует считать знаменитого американского физика и лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана, который достаточно подробно рассмотрел последствия безграничной миниатюризации с позиций теоретической физики в своем известном выступлении перед американским физическим обществом в декабре 1959 г. (Feynman, 1959). Фейнман с очень общей точки зрения проанализировал возможности изменения масштабов электромеханических приборов, электрических схем и проблеме записи, сжатия и сохранения информации. Идеи Фейнмана казались слушателям фантастическими, поскольку практическая реализация предлагаемых им устройств и механизмов считалась проблемой далекого будущего или вообще невозможной. Сегодня мы убеждаемся, что идеи великого физика оказались

вполне реалистичными, а многие из них уже воплощены в математических расчетах и практических применениях.

При этом сам Фейнман не пользовался термином «нанотехнология», поскольку это понятие было введено в обиход позднее (1974) японцем Нориео Танигучи. Долгое время термин не получал широкого распространения среди специалистов, работавших в связанных областях, так как Танигучи использовал понятие нано- только для обозначения точности обработки поверхностей, например, в технологиях, позволяющих контролировать шероховатости поверхности материалов на уровне меньше микрометра и т. п.

Очень важным моментом в истории НТ стало изобретение растрового туннельного микроскопа в конце 1981 года, так как этот прибор впервые позволил получить изображения отдельных атомов, а не их упорядоченных скоплений. Нобелевскую премию в области физики за изобретение этого ценного прибора получили Герд Бинниг и Гейнрих Рорер из исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Рюшликоне. Важность их открытия заключается в том, что оно затем привело к созданию целой серии приборов, позволяющих анализировать поведение вещества на молекулярном и атомном уровне, а еще позднее на этой основе реализовались возможности управления поведением атомов и молекул (подробнее об этом рассказывается в главе 5). С другой стороны, простота и удобство этих приборов привели к их очень быстрому распространению, так что сегодня невозможно себе представить исследования, разработки и производство в НТ без атомарных микроскопов, ставших стандартным оборудованием многих лабораторий. Можно было бы привести еще несколько важных дат в истории НТ, однако необходимо подчеркнуть, что эта история сложилась из множества параллельно протекавших и непрерывных разработок в различных областях науки и техники. В частности, НТ возникла из сочетания множества технологий, связанных с микроскопическими исследованиями и анализом состояния поверхностей различных веществ в микроэлектронике. В основу НТ столь же органично вошли аналитические и методические разработки супрамолекулярной химии и биохимии вообще. Развитие НТ подразумевает также невероятный рост возможностей теоретического моделирования вообще (и наносистем, в частности), благодаря невиданному росту вычислительной мощности компьютеров, связанному с возможностями удивительной миниатюризации. С другой стороны,



НТ предполагает целенаправленное и междисциплинарное использование множества новейших математических методов для описания, использования или изготовления нанометрических систем.

**Выводы:** Независимо от оценки исторических корней развития, НТ базируется, в сущности, на ряде весьма важных научно-технических достижений в различных дисциплинах, а физико-математическая основа НТ является принципиально междисциплинарной.

### 2.3. Современное состояние рынка нанотехнологий

Не вызывает сомнений, что развитие НТ со временем приведет к существенным изменениям во многих отраслях промышленности. Для оценки современного состояния этих технологий и связанного с ними рынка можно рассмотреть ряд конкретных технико-экономических показателей (рост числа заявок на патенты, количество создаваемых инновационных фирм и их промышленная активность, число доступных или находящихся в разработке продуктов, объем фактического товарооборота и т. д.). Точная оценка, даже на основании этих показателей, представляется сложной, потому что во многих случаях нанотехнологические компоненты в конкретных разработках или продуктах используются лишь частично, вследствие чего их доля не указывается в статистических данных отдельно. Кроме того, существует много противоречий и разных точек зрения относительно методик правильной оценки существующих экономических показателей рынка и построения прогнозов. В табл. 2.1 приводятся данные одного из самых тщательно составленных статистических обзоров (Luther, 2003).

Следует отметить, что разброс данных относительно объемов производства очень велик, и в других работах читатель может увидеть существенно иные показатели. По тем же причинам очень трудно конкретно подсчитать реальное число рабочих мест в различных отраслях НТ. Достаточно точные и подробные статистические данные относительно роста числа заявок на патенты, а также финансирования исследований по НТ в разных странах (особенно в Северной Америке, Европе и Японии) приводятся в работе (Jopp, 2003). В любом случае, даже с учетом противоречий и неточностей, можно утверждать, что, несмотря на экономический кризис и зна-

Таблица 2.1  
Обзор рыночных цифр и прогнозов по НТ (Luther, 2003)

Объем продаж на мировом рынке (год)	Вид продукта	Источник информации
493 млрд долларов США (2000) 900 млрд долларов США (2005)	Неорганические наночастицы и порошки (SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , металлы и т. д.)	BCC (2002) <sup>1</sup>
40 млрд долларов США (2002)	Синтетические наночастицы как полуфабрикаты	BASF (2002) <sup>2</sup>
23 млрд долларов США (2003) 73 млрд долларов США (2003)	Наноматериалы Инструменты; компоненты нанобиотехнологии	Deutsche Bank (2003) <sup>3</sup>
54 млрд евро (2001) 100 млрд евро (2005)	НТ продукты (по убывающей): наноматериалы, нанослой, наноналитические препараты, сверхточная обработка поверхности, латеральные наноструктуры	VDI, <sup>4</sup> DG Bank (2001) <sup>5</sup>
66 млрд долларов США (2005) 148 млрд долларов США (2003)	НТ продукты	Mitsubishi Research Institute (2002) <sup>6</sup>
до 200 млрд евро (2005)	НТ продукты	Sal. Oppenheim (2001) <sup>7</sup>
225 млрд долларов США (2005) 700 млрд долларов США (2008)	НТ продукты	NanoBusiness Alliance (2001) <sup>8</sup>
1 триллион долларов США (2015)	НТ продукты вообще	NSF (2001) <sup>8</sup>

- 1) Rittner M. (2002) «Анализ рынка наноструктурных материалов», American Ceramic Society Bulletin, том 81, № 3.
- 2) Diestler D. (2002) «Наночастицы в мегатоннах», пресс-релиз АО BASF от 28.10.2002.
- 3) Deutsche Bank (Немецкий банк) «Рынок НТ и отчет компании 2003».
- 4) www.nanonet.de
- 5) DG/WZ Bank (2001) «В фокусе: НТ в химии».
- 6) Kamel S. (2002) «Частное НТ-предпринимательство по японской модели».
- 7) Sal. Oppenheim (2001) «Техника микросистем и НТ — ключевые технологии для Германии».
- 8) RedHerring (2001) «Биотек-бум: взгляд отсюда», статья в Интернете от 02.11.2001 (www.redherring.com/Insider/2001/1102/580020458.html).

чимости крупных отраслей (типа микроэлектроники или сталелитейной промышленности), однако в ряде отраслей она уже играет существенную роль в формировании рынка товаров и рабочей силы. Особое значение эти прогнозы имеют в свете стремительных темпов роста НТ, вследствие чего уже в ближайшее десятилетие НТ может стать важным элементом национальной экономики во многих странах. Циклы развития высоких технологий приблизительно соответствуют этому временному отрезку, поэтому серьезные, стратегические решения на правительственном уровне по многим вопросам необходимо принимать уже сейчас (Beckmann, 2002).

**Выводы:** НТ имеет очень высокую значимость для развития науки и общества вообще, как в силу разнообразия своих применений и междисциплинарного характера, так и просто вследствие бурной динамики количественного и качественного развития. Поэтому уже сейчас представляется необходимым определить стратегии технологического и экономического развития НТ на разных уровнях. В настоящий момент трудно оценить реальное положение и значимость НТ на основании стандартных показателей, так как в литературе отсутствуют надежные статистические данные. Кроме этого, в настоящее время НТ зачастую используются в сочетании с обычными технологиями, внося лишь частичный и трудно учитываемый вклад в создаваемые товары.

## Часть II

# Научно-технологические основы НТ

---

---

### 3. Миниатюризация

Целенаправленное использование связей между функциональностью и размерами структур вещества требует, прежде всего, создания соответствующей аппаратуры. Проведение измерений параметров исследуемых структур с необходимой точностью (до нанометров) подразумевает разработку целого набора измерительных средств и методик, что частично напоминает ситуацию, которая неоднократно возникала в процессе развития микроэлектроники. Результатом такого развития должна стать новая, более точная оценка научных, технических и даже экономических границ применимости математических и физических закономерностей для технологий типа сверху – вниз.

#### 3.1. Мотивация проведения исследований в области НТ

Стремление предельно уменьшать характерные размеры технических устройств и их элементов является, по-видимому, одним из главных мотивов разработки новых технологий и существенным элементом технического прогресса вообще. Это утверждение не объясняет, конечно, постоянного стремления изобретателей и ученых к миниатюризации создаваемых ими изделий, но является общим и постоянным фактором развития практически всех технологий. Изобретатели всегда стремились уменьшить размеры технических деталей, как для повышения функциональности целой системы, так и для большего удобства в использовании и эксплуатации по экономическим причинам.

Является очевидным, например, что преимущества эндоскопического метода в медицине связаны лишь с малыми разме-

рами эндоскопов, а популярные сейчас кардиостимуляторы получили распространение только вследствие своих малых размеров (напомним, что первые приборы этого типа по размерам напоминали банки для обувного крема). Связь между последовательной миниатюризацией и экономией особенно хорошо просматривается на примере полупроводниковых чипов для обработки и хранения информации, когда использование новых технологий позволило весьма существенно повысить плотность записи информации. Микроэлектроника в целом — хороший пример области, где уменьшение размеров элементов выступает основным средством прогресса технологии. Современные компьютеры возникли в результате прогрессирующей миниатюризации, что позволяет им решать задачи, которые еще десять лет назад казались недоступными. Кроме того, миниатюризация даже позволила сделать их намного удобнее для пользователей и более дешевыми.

С течением времени миниатюризация производства позволила создать новые производственные процессы, сделать другие более удобными и начать производство множества новых товаров для широких масс населения. Наиболее эффективно преимущества миниатюризации проявились в микроэлектронике и в микросистемной технике. Развитие в этой области осуществлялось в результате последовательных «рывков» или переходов (от электромеханических компонентов к электронным лампам, от ламп к транзисторам, а затем от транзисторов к постоянно совершенствующимся интегральным схемам и т. д.), каждый из которых означал не только изменение технологии, но и новые возможности в технике и социальных отношениях. Миниатюризация стала означать новые товары, облегчение трудовых процессов и повышение экономичности производства. Обычно этот процесс постоянного уменьшения размеров элементов микросхем описывается известным законом Мура (представленным ниже на рис. 3.1), в соответствии с которым плотность компоновки электронных элементов удваивается приблизительно за каждые 18 месяцев, что и приводит к соответствующему росту мощности вычислительных средств и их производительности (Sze, 2002).

Представляется очевидным, что этот эмпирический закон не может действовать бесконечно (продолжение его закономерностей противоречило бы законам природы!), так что непрерывное уменьшение размеров электронных изделий должно

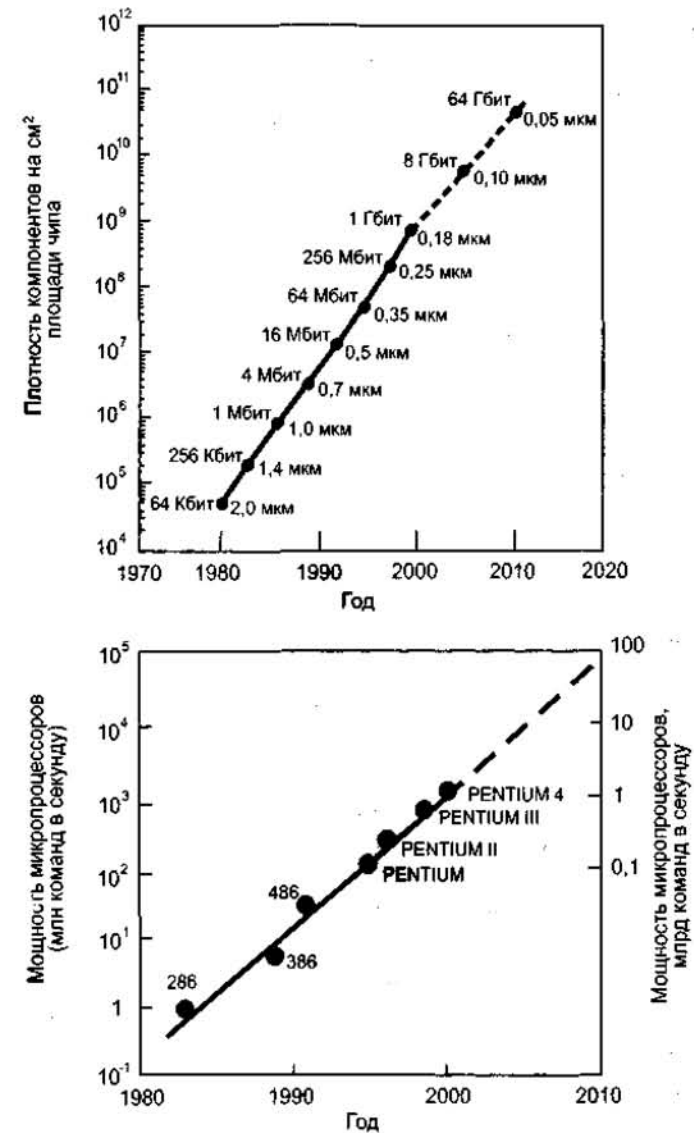


Рис. 3.1. Рост плотности компоновки элементов в запоминающих устройствах типа DRAM (вверху) и вычислительной мощности микропроцессоров (внизу) со временем в соответствии с законом Мура

когда-то и как-то закончиться. С другой стороны, нельзя забывать, что главной движущей силой развития микроэлектроники

(и техники вообще) остается экономика. Создание новых производств в области полупроводников становится исключительно дорогим процессом и противоречит требованиям повышения прибыльности, лежащим в основе экономики современного мира. Результатом удорожания производства становится концентрация, то есть уменьшение числа крупных предприятий и исследовательских организаций. При существующем (и ожидаемом в будущем) росте затрат на разработку и производство новых электронных устройств серьезные научно-технические исследования будут осуществляться лишь очень небольшим числом крупных компаний, так что, возможно, нам придется столкнуться с некоторым общим, глобальным пределом, определяемым экономическими законами и условиями. Нельзя также забывать, что, помимо экономических соображений, существуют и весьма серьезные научные, физико-химические ограничения дальнейшего уменьшения размеров создаваемых нами полупроводниковых структур, возникающие, например, когда структурные измерения интегральной схемы охватывают небольшое количество пластов атомов. Законы квантовой физики в этих системах приводят к тому, что интегральные схемы перестают действовать в соответствии с привычными ожиданиями, что представляется очевидным при любой попытке экстраполировать закон Мура на несколько десятилетий.

Миниатюризация в НТ (в отличие от ситуации в микроэлектронике и микросистемной технике) является не самоцелью, а средством получения новых функциональных качеств, то есть мы сталкиваемся с совершенно иной парадигмой развития технологий вообще, что имеет особое значение для развития новой науки.

**Выводы:** Миниатюризация была и остается движущей силой в разработках новых технологий, хотя внешне мотивацией всегда выступала реализация конкретных целей, связанных с эффективностью и оптимизацией. В этом смысле НТ означает существенную смену парадигм развития, так как миниатюризация в рамках НТ имеет иной смысл (сказанное не отрицает того факта, что достигнутые ранее рубежи стратегии миниатюризации представляют собой важную основу для развития НТ и связанных с ней идей).

### 3.2. Планы и стратегия развития

Вообще говоря, миниатюризация в НТ означает контроль структурных параметров в масштабах до нескольких нанометров. Например, это подразумевает особую точность обработки поверхности оптических материалов, то есть регулирование распределения величины зерен поликристаллических сред в соответствующих узких границах. Измерения в субмикрометровой области могут осуществляться на пластинах монокристалла кремния толщиной около 300 нм, что требует от исследователей решения новых задач измерения, новых методов контроля структурных параметров, не говоря уже о новых концепциях и стратегиях производства. Основными понятиями новой теории построения вещества выступают представления о построениях *сверху – вниз*, суть которых состоит в том, что размеры образца непрерывно изменяются (в одном, двух или даже трех измерениях), постепенно уменьшаясь до микрометров. Структура объемных материалов в таких исследованиях может модифицироваться самыми разными методами, например постепенным изменением условий тепловой и механической обработки, механической или химической полировки поверхности и т. п. К этим методикам примыкает механическое дробление вещества для производства микрочастиц, которые, однако, могут быть изготовлены и путем химического или физического синтеза по методикам типа *снизу – вверх* (например, так можно получать тонкие и ультратонкие слои или покрытия).

Основным для всех описанных выше методов выступает то, что для их использования не требуется точная информация относительно микроскопической структуры (в микрометрах или нанометрах) изготавливаемых веществ. Потребность в точном определении размеров возникает, однако, при изготовлении компонентов микроэлектроники, микромеханики и микросистемных устройств, что требует от инженеров выработки особой стратегии при изготовлении идентичных микроструктур в больших количествах. Основой структурного единства в микроэлектронике сегодня выступают литографические методы, позволяющие получать разнообразные формы в объемных полупроводниковых материалах. Эти технологии базируются, в основном, на оптических методах с использованием масок, что позволяет создавать требуемые элементы в светочувствительном слое резиста (полимерного материала, меняющего свои свойства при освещении). Это позволяет технологам формировать нужные



структуры, комбинируя требуемые режимы освещения и используя хорошо изученные процессы травления, диффузии и имплантации (Ikazuki и Mors, 2003).

Стандартным материалом для микроэлектронных и микро-механических компонентов является кремний, а для создания определенных компонентов схемы могут применяться различные легирующие материалы, а также (при создании особо сложных систем) связующие полупроводники, оптоэлектронные материалы, полимеры, органические материалы и т. п. Методы структурирования и миниатюризации материалов или образцов в целом могут и должны, естественно, варьироваться в каждом конкретном случае.

**Выводы:** Планы и стратегии процессов миниатюризации изделий могут быть описаны математическими моделями, отражающими технологии типа *сверху – вниз* и *снизу – вверх*. В сфере существующих технологий доминируют методы *сверху – вниз*, а в отдельных сферах мы уже умеем пользоваться методиками *снизу – вверх*. При производстве индивидуальных наноструктур в электронике обычно применяется усложняющаяся литографическая технология.

### 3.3. Границы изменения масштабов

Технологии типа *сверху – вниз* в неявной форме предполагают, что уменьшение размеров структур не влияет на их фундаментальные свойства и принципы функционирования. Производственники как бы считали, что свойства вещества при миниатюризации не изменяются, так что проблема для них формально сводилась к уменьшению размеров ранее созданных (возможно, десятилетие назад) электронных устройств. Основная проблема НТ заключается как раз в гораздо более сложном явлении, так как (на некотором этапе развития) изменение масштабов изучаемых и используемых объектов приводит к существенным изменениям не только условий производства, но и к необходимости пересмотра даже самих законов природы! Если используемая стратегия миниатюризации не противоречит понятным и известным нам законам природы, то исследователь, естественно, может придерживаться прежних концепций дизайна. Для производства компонентов микроэлектроники это просто означает, что возможно изготовление новых, более миниатюрных изделий того же типа (но с повышенными характеристиками) на основе, например, совершенствования литографичес-

ких технологий и иных стандартных материалов на основе ранее существовавших принципов функционирования. Но даже для литографии проблема не является столь простой, поскольку ее возможности (размеры получаемых структурных элементов) ограничены длиной волны используемого света, то есть переход от микро- к нанобласти требует перехода от ультрафиолетового (УФ) излучения к так называемой дальней ультрафиолетовой области, для которой пока не существует не только стандартных источников света и соответствующих материалов, но даже и методов оптической проекции. В данном случае, помимо сохраняемых теоретических принципов конструирования, необходимо решить весьма непростые технические задачи, связанные с физикой процессов вообще. Аналогичные примеры можно привести для самых различных областей развития НТ.

Даже в тех случаях, когда изменение масштабов производственных процессов представляется технически выполнимым и экономически целесообразным, исследователь должен серьезно задуматься о том, что любой переход «вниз» связан с возможным изменением известных законов физики, делающих бессмысленным постановку самой технологической задачи, вследствие неадекватного поведения физических явлений при новых масштабах. Например, обычный современный транзистор включает в себя от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  атомов, но нанотранзистор будет состоять только из 1000 ( $10^3$ ) атомов, в результате чего в нем может проявляться «индивидуальность» отдельных атомов (в объемных образцах атомы являются и считаются «идентичными»). Результатом такого изменения масштабов и соотношений станет тот факт, что нанотранзистор не будет работать в соответствии с первоначальными критериями проектировщика, например, вследствие того, что свойства кристаллов кремния изменятся по нарастающей с уменьшением структурных размеров. Примерно к этому сводится множество новых явлений в нанотехнологии.

Представляется целесообразным различать три главных аспекта миниатюризации, которые могут влиять на функциональную способность наноструктур настолько сильно, что исходные критерии их проектирования (дизайна) могут потерять всякий смысл:

- В нанотехнологиях особую ценность приобретают свойства материала на поверхности структуры, поскольку в некоторых случаях весь объект может быть представлен в виде

особой «поверхности». При этом поверхностные области материала по своим свойствам начинают существенно отличаться от физико-химических характеристик внутри материала.

- Определенные параметры какого-то материала или компонента могут быть настолько уменьшены, что их возможности уже не реализуются в рамках предложенного принципа функционирования.
- Квантовые закономерности на новых масштабах могут проявляться в такой степени, что «исчезают» сами явления, необходимые для использования в предлагаемых устройствах или материалах.

Перечисленные пределы уменьшения размеров не являются решающими для математических расчетов, а также для оценки физических или химических характеристик в моделях типа *снизу – вверх*, поскольку во многих случаях не очень существенно, каким образом была получена та или иная наноструктура, однако почти всегда имеет огромное значение само уменьшение масштабов (в нашем контексте, миниатюризация). Изменение масштабов всегда требует смены парадигм в отношении принципов функционирования и использования конкретных структур. В НТ это становится источником новых возможностей (недостатки превращаются в достоинства!), поскольку функциональность систем может быть основана на качественно новых свойствах, возникающих именно вследствие последовательной миниатюризации.

**Выводы:** Уменьшение размеров изделий всегда связано с экономическими и техническими проблемами, но важнейшие ограничения для бесконечной миниатюризации связаны, конечно, с физическими законами природы, так как при некоторых размерах мы неизбежно сталкиваемся с квантово-механическими эффектами, настоятельно требующими смены парадигмы развития, связанной с принципами функционирования и критериями проектирования самих устройств. Направленное использование новых свойств, обусловленных малыми размерами используемых структур, является одним из основных принципов НТ.

## 4. Связь размеров структур с их функциональностью

Свойства материалов или компонентов определяются, несомненно, набором атомов в рассматриваемых или проектируемых материалах. Например, кристалл создается из атомов и молекул определенного вида, имеющих определенное геометрическое положение, определяющее плотность и положение дефектов или примесных атомов. Как уже упоминалось, в наноструктурах функциональность определяется отношениями между величиной и свойствами, вследствие чего целенаправленное конструирование новых материалов (свойства которых зависят от взаимодействия атомов) позволяет создавать принципиально новые функциональные возможности материалов.

### 4.1. Распределение атомов и связанные с этим свойства

Как известно, материя может существовать в газообразном, жидком или твердом состоянии, и эту классификацию можно получить из описания свойств атомов и молекул. *Газы* в этой классификации представляют самые простые системы и рассматриваются в качестве макроскопических объектов с изотропной пространственной структурой, то есть не обладают дальним порядком, так что могут заполнять любое доступное им пространство, принимая любую форму. Ближний порядок в газах очень слаб, так что атомы и молекулы движутся почти свободно или хаотично, в соответствии с известными статистическими закономерностями. В *жидкостях* проявляется сильный ближний порядок для атомов и молекул, но отсутствуют дальние взаимодействия, так что они также могут принимать любую форму, но уже могут сопротивляться изменению объема системы, вследствие чего жидкости также остаются пространственно изотропными, так что их атомы и молекулы легко смещаются и двигаются почти хаотически. *Твердые тела* относятся к самым устойчивым формированиям, так как их атомы и молекулы пространственно объединены в кристаллические решетки и образуют неизотропные системы. Наличие в них ярко выраженного дальнего порядка позволяет твердым телам оказывать сильное сопротивление изменению объема и формы.

Названные характеристики трех агрегатных состояний не являются, конечно, абсолютно необходимыми, а представляют собой лишь общие определения, поскольку, например, существуют твердые тела, не обладающие периодическим расположением атомов или молекул, но характеризующиеся ближним порядком (то есть они не имеют характерной для твердых тел пространственной упорядоченности и являются формально статистически изотропными). С другой стороны, существуют так называемые жидкие кристаллы, представляющие собой промежуточное состояние между неупорядоченной жидкостью и упорядоченным кристаллом. Такие системы создаются, например, сильно вытянутыми молекулами, которые образуют пространственно упорядоченные конфигурации (напоминающие кристаллические структуры по оптическим характеристикам), но одновременно проявляющие свойства жидких сред (например, при смещении молекул относительно друг друга).

Среда может представлять собой даже просто смесь фаз, примером чего являются жидкокристаллические области внутри объемных образцов обычных жидкостей. Особое значение для науки и техники имеют дисперсные системы, в которых вещества распределены в среде, где одновременно могут сосуществовать два или три агрегатных состояния. В таблице 4.1 приводится список некоторых дисперсных систем, в которых частицы различных фаз слабо взаимодействуют друг с другом. Такие системы принято называть некогерентными, чтобы отличить от когерентных (типа гелей), в которых среда и диспергированные частицы связаны достаточно сильно.

Впрочем, даже простые примеры некоторых гомогенных кристаллических твердых тел наглядно демонстрируют, насколько сильно могут варьироваться свойства материала при изменении атомного или молекулярного порядка в системе. Общеизвестно, что углерод может образовывать несколько совершенно разных модификаций твердой фазы (от алмаза до графита). На рис. 4.1 (справа) показана структура алмаза, в которой каждый атом углерода связан с четырьмя ближайшими атомами, в результате чего образуется структура, напоминающая структуру германия и кремния (алмаз действительно формально относится к полупроводникам, но он имеет широкую запрещенную зону, вследствие чего его обычно относят к классу изоляторов). Изображенная структура, очевидно, должна иметь высокую твердость, в отличие от показанной на том

Таблица 4.1

Некоторые типы дисперсных систем

Дисперсная система	Диспергированная фаза	Обозначение	Пример
газообразная	жидкая	жидкий аэрозоль	туман
газообразная	твердая	твердый аэрозоль	пыль
жидкая	газообразная	пена	пена
жидкая	жидкая	эмульсия	молоко
жидкая	твердая	золь	золотой золь
твердая	газообразная	твердая пена	газобетон
твердая	жидкая	—	минералы с жидкими включениями
твердая	твердая	твердый золь	опал

же рисунке слева слоистой системы из атомов углерода в виде графита, где каждый атом углерода в слое связан лишь с тремя соседями, в результате чего вещество в целом приобретает свойственную металлам электрическую проводимость и исключительную механическую мягкость.

В обоих случаях речь идет о системах, образованных только из атомов углерода, так что наблюдаемая огромная разница в физических свойствах двух материалов возникает и объясняется только различным видом упорядочения атомов в кристаллических решетках. Порядок объединения и вид решетки, в принципе, возникают в результате различия сил, действующих между атомами и молекулами и приводящих к образованию конкретных кристаллических систем.

Приведенный пример является общеизвестным, но позднее он получил дальнейшее развитие, так как примерно 20 лет назад было обнаружено, что чистый углерод может иметь еще одну модификацию, названную фуллереном (Dresselhaus, 1995). Моделью фуллерена можно представить в виде шарика из графита, как показано на рис. 4.2, но для нашего изложения важно, что кристаллическая решетка (или, точнее говоря,



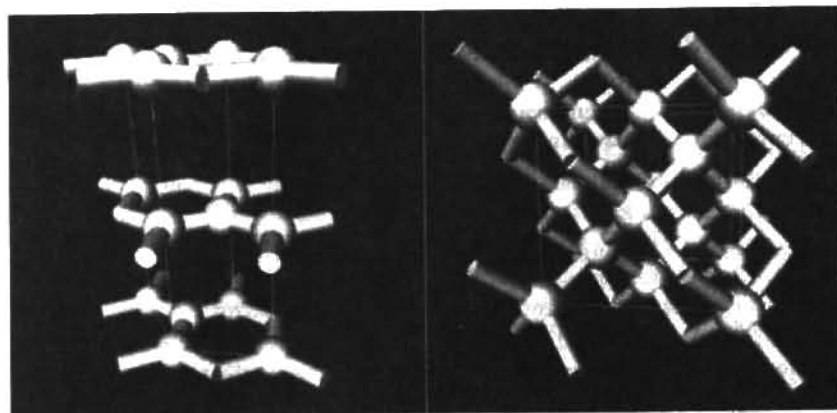


Рис. 4.1. Кристаллическая структура атомов углерода в графите (слева) и в алмазе (справа)

кристаллическая поверхность) фуллерена  $C_{60}$  тоже состоит исключительно из атомов углерода, объединенных в пятиугольники и шестиугольники. При этом стоит отметить, что составленная из шестиугольников поверхность является ровной, а наличие пятиугольников приводит к искажениям сферической формы. Математикам известно, что замкнутую геометрическую структуру сферического типа можно образовать только некоторой комбинацией плоских фигур, и можно показать, что самый маленький и самый «правильный» или простой шар этого типа состоит из 12 пятиугольников и 20 шестиугольников. Такая система в целом содержит 60 атомов углерода и именно ее назвали молекулой фуллерена  $C_{60}$  (название связано с тем, что когда-то знаменитый

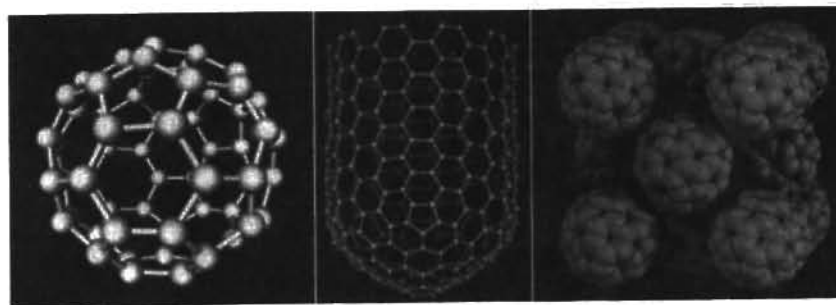


Рис. 4.2. Структура молекулы  $C_{60}$  (слева), нанотрубки (в центре) и кристалла из молекул  $C_{60}$  (справа)

архитектор Ричард Букминстер Фуллер использовал соответствующие полиэдрические конструкции для создания куполов зданий, естественно, не подозревая о возможности существования молекул с такой же формой!).

Понятно, что сложная структура фуллерена  $C_{60}$  имеет очень высокую симметрию, но позднее выяснилось, что существует и множество других, более крупных фуллеренов ( $C_{70}$ ,  $C_{82}$ ,  $C_{84}$ , ...,  $C_{240}$ ...), а фуллерены более сложного типа, показанные на рис. 4.2, получили название нанотрубок. Наряду с представленными на рис. 4.2 простыми формами, сегодня уже синтезировано огромное количество их производных форм, так что в определенном смысле можно даже говорить о новой области химии, поскольку банки данных насчитывают уже более 10 000 разновидностей фуллеренов.

Молекула из 60 или более атомов может рассматриваться, в некотором смысле, в качестве очень небольшого твердого тела. Строго говоря, здесь идет речь о так называемых кластерах, занимающих промежуточное положение между отдельной молекулой и твердым телом. Уже для описания молекулы  $C_{60}$  можно применять некоторые типичные методы физики твердого тела (например, при расчете электронных свойств), соединяя отдельные фуллерены в молекулярный кристалл (как показано в правой части рис. 4.2) и образуя кристаллическую решетку. Такую структуру можно легировать (как это обычно делается с полупроводниками) для целенаправленного изменения электрических характеристик, причем в легированных алкалоидами фуллеренах удавалось наблюдать даже сверхпроводимость, то есть полное исчезновение электрического сопротивления при достаточно низких температурах. В некоторых случаях удается создавать даже еще более сложные структуры (которые можно назвать «клетками»), вводя внутрь фуллеренов атомы или их комбинации. [О некоторых более сложных структурах, связанных с фуллеренами, читатель может узнать из публикации в журнале «Химия и жизнь», № 12, 2001, с. 18. — Прим. ред.]

На примере описанных выше различных модификаций углерода легко видеть, насколько сильно зависят свойства материала из атомов или молекул от атомной структуры, что сразу подразумевает возможность регулирования характеристик наноматериалов за счет целенаправленного упорядочения составляющих структуру атомов. Именно это и является основной идеей при выводе математических моделей типа *снизу – вверх*,

которые будут рассматриваться в главах 5, 6 и 7. В рассмотренных выше примерах предлагались простейшие варианты геометрического упорядочения определенного вида атомов, но при составлении наноструктур из большего числа различных атомов или молекул, естественно, возникает множество новых возможностей комбинирования позиций атомов в трехмерном пространстве. Разумеется, эти возможности вовсе не произвольны, а обусловлены физическими и химическими закономерностями, в основе которых лежат межатомные и межмолекулярные взаимодействия, так что, например, атомы углерода могут образовывать твердые тела с различной конфигурацией только при некоторых типах атомного упорядочения структуры. Возможность реализации таких структур зависит от минимумов энергии, допускаемых условиями образования и существования, поскольку (как показывает пример с алмазом и графитом) может существовать несколько минимумов энергии (не только единственный абсолютный минимум энергии, но относительные минимумы, разделенные конфигурациями с повышенной энергией). Относительные минимумы энергии соответствуют тому, что в статистической физике и термодинамике называется метастабильными состояниями, которые могут оставаться устойчивыми достаточно долго.

Следует учитывать, что используемые в нанотехнологии системы не обязательно должны находиться в состоянии термодинамического равновесия. Очень важные и интересные для практического применения системы могут быть неравновесными, но они могут сохранять стабильность при отсутствии сильных взаимодействий с окружением. В качестве очевидного примера можно указать множество биологических структур, которые в естественных условиях абсолютно далеки от термодинамического равновесия. К сожалению, теория неравновесных термодинамических процессов недостаточно развита, и мы лишь сейчас начинаем понимать основные закономерности их протекания.

**Выводы:** Свойства материалов и функциональных структур определяются межатомными и межмолекулярными взаимодействиями. Структура вещества может регулироваться с использованием этих особенностей, но при этом следует учитывать разницу между равновесными и неравновесными термодинамическими процессами.

## 4.2. Отношения величина – свойства

В главе 3 уже подробно говорилось о том, что в наноструктурах обнаруживается прямая связь между размерами структурных элементов и соответствующими физическими свойствами, в связи с чем особое значение приобретают возможности и границы миниатюризации и изменения масштаба вообще. Существующий опыт миниатюризации в микроэлектронике при сохранении принципов функционирования компонентов доказывает, что возможности существенного уменьшения масштабов очень велики, так как проектировщикам и производственникам удавалось уже в течение десятилетий уменьшать размеры элементов, сохраняя известные базовые принципы функционирования.

Для пояснения общей идеи рассмотрим, например, механизм действия распространенного струнного инструмента (гитары), в которой звук создается колебанием струн, причем высота звука (при заданном материале и заданном натяжении струны) при этом обратно пропорциональна длине струны и соответствует частоте поперечных колебаний струны (так что «среднее Си» соответствует частоте в 256 Гц). Современная техника уже позволяет уменьшить размеры гитары до микрометров или субмикрометров, используя, например, методы выращивания кремниевых микроструктур, и на рис. 4.3 приведена фотография микроскопического музыкального инструмента, изготовленного по такой методике. Это устройство действует на основе законов классической механики, так что основная частота звука гитары будет следовать простому закону масштабирования (техническая сторона вопроса не должна нас волновать, так как колебания струн миниатюрной гитары можно вызывать не механическим, а например электрическим воздействием), в результате чего должны возникать механические вибрации с частотой порядка гигагерц ( $10^9$  Гц). Такие вибраторы, соответствующие тактовой частоте современных компьютеров (сантиметровые электромагнитные волны), уже существуют и используются, но, разумеется, их действие не имеет отношения к звуковым волнам или музыке. Нижняя граница частот для этих устройств задается частотами собственных колебаний некоторых двухатомных молекул (например, CO), соответствующих области от 10 до 100 терагерц ( $10^{13}$  —  $10^{14}$  Гц).

Сегодня технически существует возможность создавать или производить так называемые «квантовые точки» (например, из смешанного полупроводника CdSe) с невероятно узким распре-

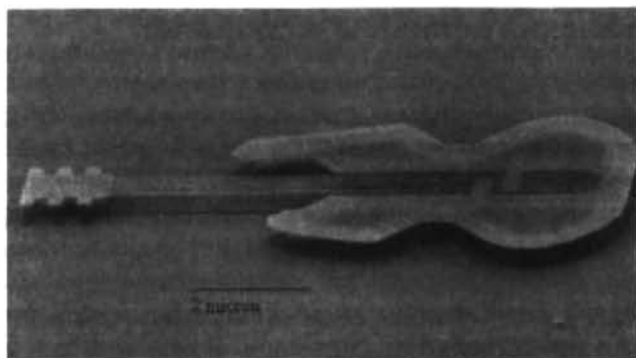


Рис. 4.3. Миниатюрная гитара, выращенная из кремния (Карр и Крайхэд, университет графства Корнуэлл, Великобритания)

делением размеров от 4 до 5 нм, которые при облучении ультрафиолетовым светом начинают высвечивать, причем частота флуоресценции очень сильно зависит от размера частиц. Квантовые точки зачастую называют «искусственными атомами» по причине их минимальной протяженности, однако они реально могут включать в себя до 50 000 атомов, так что для их описания могут быть привлечены концепции классической физики твердого тела. Многие свойства наночастиц (например, симметрия атомного упорядочения или нарушения в энергетической зоне), естественно, вообще не могут быть четко определены или даже соотнесены с характеристиками объемных образцов материала, однако освобождающиеся при ультрафиолетовом облучении носители заряда, образно говоря, как-то «чувствуют», что свобода их перемещения внутри наночастиц ограничена. В соответствии с законами квантовой физики, их энергия должна возрастать обратно пропорционально квадрату размера частицы, а поскольку энергия носителей заряда определяется частотой испускаемого света, она может точно регулироваться диаметром квантовой точки, что приводит нас к идее регулирования излучения простым изменением размера частиц. Этот эффект наглядно демонстрирует, что хотя в некоторых случаях поведение наноструктур формально можно описывать простым изменением масштабов, но при этом нельзя забывать об огромной роли квантовых явлений, которыми мы обычно полностью пренебрегаем при описании макроскопических структур.

Довольно значительная область применимости масштабных отношений (скейлинга) объясняется постоянством макроскопи-

ческих свойств конденсированного вещества, проявляющихся зачастую вплоть до размеров около 10 нм, что соответствует системам, содержащим примерно миллион атомов. Граница классических отношений достигается лишь при меньших размерах, когда для описания свойств конденсированного вещества следует применять концепции квантовой физики и нанотехнологии. Вообще говоря, представляется очевидным, что атомы и молекулы являются квантовыми (нанометрическими) объектами, но проблема заключается в том, чтобы внести ясность в различия между физическим и химическим поведением, возникающем на предельных границах изменения масштабов.

**Выводы:** Классические законы физики остаются справедливыми для систем с размерами до 10 нм, а при меньших размерах возникают новые закономерности. Дальнейшее уменьшение масштабов структур и явлений требует учета квантово-механических эффектов и связанных с ними особенностей.

### 4.3. Измерение новых свойств

Комбинируя состав и строение атомных соединений, а также размерности создаваемых на этой основе структур, можно изменять свойства вещества в нанометровом масштабе и получать физические характеристики, которые вообще не имеют аналогов в рамках классических методик и подходов. Примерами успешного применения таких комбинированных и неожиданных комбинаций могут служить упомянутые выше специфические материалы и компоненты (создаваемые на основе фуллеренов), механические вибраторы с очень высокой частотой колебаний или зависящая от размера флуоресценция полупроводниковых квантовых точек.

Наноструктурные объемные материалы обладают, как правило, целым рядом новых свойств, возникающих из-за высокого отношения площади к объему образца, что показано схематически на рис. 4.4. Площадь нанокристаллического вещества значительно отличается от соответствующего параметра в гомогенных объемных материалах, в результате чего возникает и существенная разница свойств атомных соединений на границе зерна и в объеме кристалла. Разумеется, в виде наноструктурных материалов могут быть реализованы и представленные в таблице 4.1 комбинации различных агрегатных состояний, известным примером чего служит так называемый нанопорис-



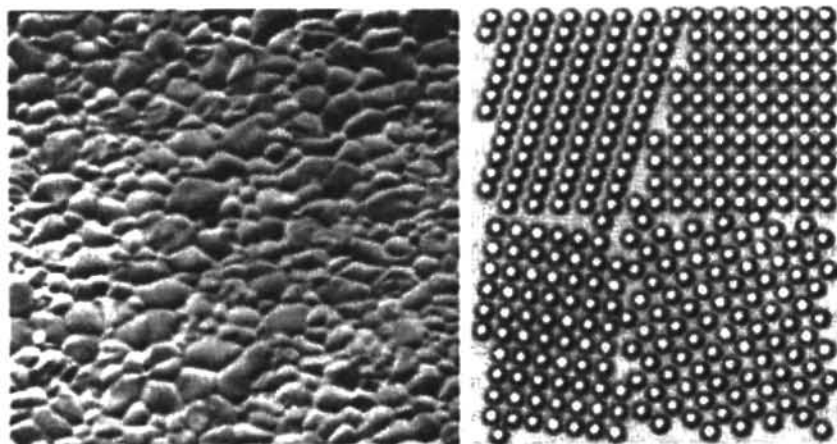


Рис. 4.4. Различие в структуре вещества на нанометровом уровне при высоких значениях отношения площадь/объем. Слева представлена аморфная керамика  $\text{TiO}_2$  (полученная обычным спеканием), справа — схематическая структура упорядоченных молекул и кристаллов

тый кремний, получаемый травлением. В отличие от монолитного кристалла, нанопористый кремний обладает флуоресценцией и электролюминесценцией, что делает этот материал очень перспективным для самых разнообразных технических применений. При этом следует четко различать неупорядоченные наноструктурные материалы и регулярные наноструктурные кристаллы (читатель может сравнить рис. 4.2 и 4.4). Еще более сложным строением (в некотором смысле, противоположным пенистым структурам) обладают образования типа цеолитов (см. табл. 4.1), то есть пористые материалы с некоторым пространственно-симметричным упорядочением пор. Проблема классификации и описания наноматериалов является очень сложной, особенно если вспомнить о возможности введения в поры вещества наночастиц или кластеров, что схематически показано на рис. 4.5.

Легко представить, что существует целый набор переходных форм между неупорядоченными наноструктурными материалами и нанокристаллами. В этой связи следует, прежде всего, упомянуть наноструктурные многослойные материалы, в которых на уровне всего одного слоя происходит переход от крайне неупорядоченной поликристаллической структуры к не-

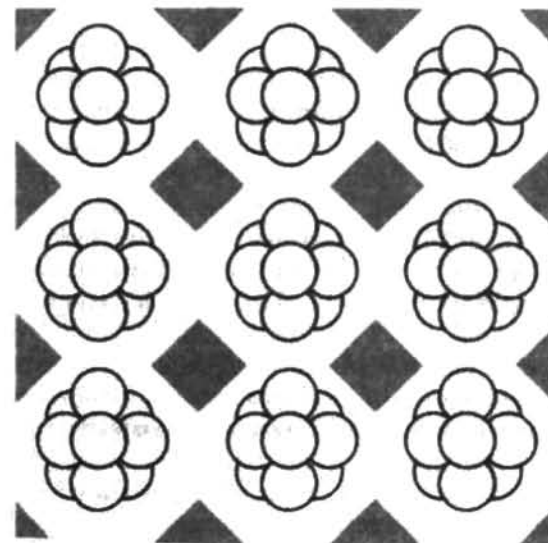


Рис. 4.5. Упорядочение кластеров в симметричных порах цеолита

которой наноструктуре, причем изменения в толщине слоя (и даже в последовательности атомов) очень трудно количественно определить и описать. Строение сложного наноструктурного материала определяется множеством структурных единиц с различной размерностью и с варьирующейся, но упорядоченной последовательностью. Еще более сложными системами являются так называемые сшитые полимеры, в которых нанокристаллы представляют собой лишь составные элементы. В сущности, нанотехнологии предоставляют материаловедам почти неограниченное поле для фантазии и возможностей синтеза новых веществ с неожиданными свойствами.

Нанотехнологии открывают огромные возможности для придания функциональности поверхностям традиционно изготавливаемых материалов на основе комбинации апробированных характеристик этих материалов с новыми свойствами, обусловленными нанопроцессами и наноструктурами, как будет показано ниже в главе 7.

Уже сейчас существуют возможности производства (даже в промышленно необходимых количествах) наночастиц некоторых типов, размеры которых регулируются точными физико-химическими методами. Приведенный на рис. 2.3 пример

наглядно демонстрирует, что металлические и полупроводниковые наночастицы могут обладать очень любопытными и необычными оптическими свойствами, так как электронные свойства микрочастиц принципиально отличаются от свойств соответствующих объемных материалов. Электронные характеристики, естественно, представляют основной интерес для технологов, и именно они очень сильно зависят от диаметра изучаемых или используемых частиц. В качестве очевидного примера можно привести зависимость химической активности многих частиц от их размеров. Активность сравнительно незначительна для стабильных кластеров (типа  $C_{60}$  или  $Au_{55}$ ), но при некоторых размерах кластеров (в частности, для тех, которые не обладают «магическим числом» атомов и соответствующими размерами) она неожиданно настолько возрастает, что некоторые металлические кластеры начинают воспламеняться в обычных условиях. В каждой такой ситуации наночастица обладает очень высоким отношением поверхность/объем, что создает дополнительные возможности для физического или химического поглощения новых компонентов активной поверхностью. Многие такие реакции, естественно, могут служить средством стабилизации нанокластеров или придания им новых функциональных характеристик, ярким примером чего может служить обсуждаемая в главе 7 возможность использования наночастиц в качестве носителей фармацевтических препаратов или гормонов. Более того, следует учитывать, что коллективные свойства ансамбля частиц часто зависят от их взаимодействия друг с другом, и это предоставляет дополнительные возможности регулирования или изменения их свойств.

Вообще говоря, свойства наноконструкций системы можно формально подразделить на электронные, магнитные, оптические, механические, термические, химические и биологические. Особый интерес в техническом отношении представляют не столько новые функциональные возможности, сколько возникающее в результате изменения масштабов увеличение возможностей исходных принципов функционирования. Такие изменения почти всегда обусловлены резким увеличением чувствительности наноконструкций системы по отношению к окружающей среде (по сравнению с взаимодействием в обычных, крупномасштабных соотношениях). В качестве ярких примеров использования новых возможностей можно привести два следующих:

- нанотехнология позволяет создавать механические вибраторы с ультравысокими частотами резонанса, что в макро-

скопическом масштабе требует использования сложных систем с огромным числом молекул;

- сохранение заряда в электрическом конденсаторе при типичных на сегодня условиях эксплуатации (1,6 В, 1 нФ) для записи единицы информации в полупроводниковом запоминающем устройстве требует использования около  $10^{10}$  электронов, однако в наноразмерных туннельных транзисторах уже сегодня электрические потоки порождаются отдельными единичными электронами, что позволяет обеспечить исключительно высокую чувствительность по отношению к внешним воздействиям.

Эти простые примеры демонстрируют, что даже обычная миниатюризация компонентов на базе известных принципов функционирования может приводить к абсолютно новым возможностям применения, и именно на такой основе уже создаются новые изделия. В более далекой перспективе математические модели нанотехнологических процессов могут позволить нам выявить и использовать абсолютно новые принципы функционирования, и эта идея лежит в основе известной концепции Эрика Дрекслера, которая давно стала предметом острых дискуссий (Drexler, 1990). Предложенные им молекулярные НТ в перспективе позволяют мечтать о создании элементов или устройств, в которых отсутствуют силы трения и вязкости. Например, мы можем совместить на одной оси две нанотрубки типа показанных на рис. 4.2, разница в радиусах которых соответствует постоянной решетки графита. В этой системе пространство между трубками можно сделать настолько «узким», что их относительному вращению практически не могут препятствовать не только никакие твердые или жидкие примеси, но даже и отдельные атомы. Другими словами, мы можем создавать молекулярные структуры, в которых уравновешены силы притяжения и отталкивания между нанотрубками. Кстати, примеры движения «без трения» реально существуют в природе, образцом чего может служить показанный схематически на рис. 4.6 молекулярный «роторный двигатель» из отдельных молекул, действующий под воздействием поступающих в него атомов водорода (протонов). Этот двигатель (при диаметре в 8 нм, длине 14 нм и рабочей частоте в несколько Гц) создает вращающий момент в несколько пН·нм, что позволяет перемещать объекты через клеточные мембраны и т. п. Такие нанодвигатели можно легко обнаружить в митохондриях, мембранах бактерий и простейших жизненных форм.

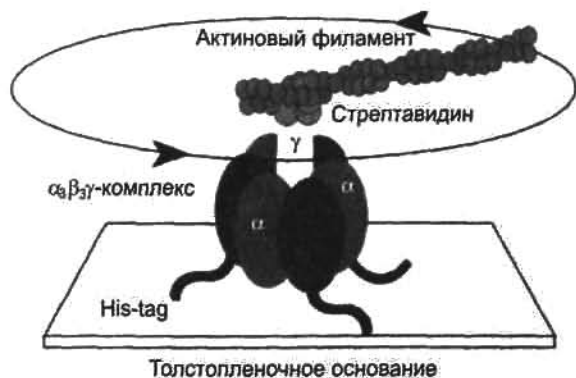


Рис. 4.6. Схематичное изображение внутриклеточного «роторного двигателя» из биологических молекул и элементов с размерами несколько нанометров

Природа создала их в рамках эволюции еще миллиард лет назад, и они непрерывно и безотказно действуют в течение миллионов лет жизни любой клетки, и это доказывает, что речь идет о формах движения, не сопровождающегося трением.

Многие другие наблюдаемые в природе механизмы, по-видимому, тоже как-то связаны с концепцией новых свойств технических компонентов с минимальными размерами. Например, хорошо известные биологам ионные каналы в клетках фактически представляют собой сложные нанометровые клапаны, управляемые биопотенциалами организма. В каком-то смысле их можно уподобить крошечным транзисторам, регулирующим электрические потоки изменением напряжения, так как характерные параметры каналов составляют лишь несколько нанометров.

Приведенные примеры биологических механизмов наглядно иллюстрируют особые возможности и значение наноструктур, не говоря уже о том, что принципы их функционирования могут просто стать основой для подражания или создания новых технических устройств. В этом смысле очень показательным является пример бионики, основанной на использовании нанометровых элементов и явлений в живой природе (Nachtigall и Bluchel, 2002; Hartmann, 2003), где иногда обнаруживается даже возможность интеграции в технические схемы и устройства целых биологических структур или их компонентов.

Сам факт эффективного функционирования отдельных биологических наноструктур является очень важным и интересным, но возможность реального использования таких элементов (или, хотя бы, их аналогов) в науке и технике требует решения нескольких принципиальных вопросов, без которых развитие НТ вообще теряет смысл. Каковы конечные границы возможностей технической миниатюризации? Какими методами мы можем производить одинаковые наноразмерные «детали» в достаточном количестве? Каким образом мы можем соединять их с внешними, макроскопическими устройствами? Как вообще мы представляем себе практическое применение таких структур?

Кристаллические зерна вещества представляют сейчас, по всей видимости, предел миниатюризации структур в производственных процессах. Невозможно представить себе транзистор с размерами меньше отдельного атома, то есть меньше – 0,1 нм. Электрические заряды и токи, используемые в приборах современной микроэлектроники, представляют собой непрерывные величины, что лежит в основе теоретических и технических обоснований их проектирования и принципов функционирования. С другой стороны, еще сто лет назад стало известно, что существует элементарный электрический заряд, представляющий собой как бы естественный предел миниатюризации потоков заряда.

Примеры нижних границ миниатюризации вообще вызывают странное ощущение, что природа когда-то с абсолютной уверенностью создала и уже применила некую атомно-молекулярную НТ с функциональными элементами, определив порядок размеров отдельных атомов или молекул. Сегодня мы не имеем универсальных технологий для массового производства любых компонентов или механизмов очень малых размеров, и это не позволяет даже наметить четкие перспективы развития молекулярных наномеханизмов. Значительные успехи миниатюризации достигнуты лишь в микроэлектронике (где речь идет, в сущности, о двумерном упорядочении) и в создании микросистемных устройств (где, впрочем, разработки ограничиваются весьма небольшим набором концепций и используемых материалов). Все сказанное делает сомнительной реализацию концепций молекулярной НТ даже в далеком будущем. Основную проблему, связанную с развитием молекулярных НТ, легко пояснить на следующем примере: любой химик может очень просто синтезировать невероятное количество (например,  $10^{23}$ )



молекул воды  $H_2O$ , используя водород и кислород, причем размеры этих молекул, несомненно, лежат близко к нижней границе «миниатюризации», существующей в природе. С другой стороны, на сегодняшний день представляется совершенно неразрешимой проблема упорядочения гораздо меньшего числа молекул (например, всего 1000 штук) по простому образцу, типа представленного на рис. 4.7. Реальная сложность НТ состоит не в синтезе множества идентичных маленьких объектов, а в создании из них атомно-молекулярных компонентов более сложных структур. Многие данные свидетельствуют о том, что фактические границы миниатюризации в природе уже заданы биологической программой (в форме описанных двигателей, ионных каналов и других функциональных элементов), поскольку такие программы создавались и работают без существенных изменений в течение миллиардов лет. Возможно, более точные исследования биологических структур позволят нам в



Рис. 4.7. Сочетание двух японских иероглифов (ганси, то есть «атом»), построенное на кристаллической поверхности манипуляцией отдельными атомами

будущем определить фундаментальные границы миниатюризации, лежащие в основе природных процессов.

Производство наноструктур в пределах технически достижимой миниатюризации невозможно без использования математических моделей и технических приемов типа *сверху – вниз*, так как не существует приборов, которые позволили бы последовательно уменьшать размеры изделий без потери точности. Кроме того, следует помнить, что в сложных устройствах всегда существуют или возникают области, недоступные для инструментальной обработки (как было показано выше для нанотрубок на рис. 2.1). Кстати, именно это обстоятельство может сделать невозможным конструирование и реальное использование знаменитых «молекулярных ассемблеров» Дрексlera (Drexler, 1990), создающих материалы и устройства буквально атом за атомом. Интересно отметить, что в биологии нет примеров таких универсальных ассемблеров.

Математические модели и производства типа *снизу – вверх* могут приводить к самоорганизации отдельных частей и даже целых наноструктур. При самоорганизации в условиях термодинамической неравновесности могут возникать целые биологические единства, однако следует учесть, что для формирования описанных выше фуллеренов и графитоподобных структур требуется огромная тепловая энергия. Образование определенных структур требует обеспечения условий сложнейших каталитических процессов, что на современном уровне науки представляется невозможным. Вероятность организации таких процессов технически равна нулю и не позволяет даже мечтать о массовом производстве. С другой стороны, приведенные примеры показывают, что законы природы как-то допускают существование абсолютно иных закономерностей функционирования наноструктур, так что проблема сводится лишь к нашей неспособности реализовать определенные возможности из-за технических сложностей их изготовления и использования.

**Выводы:** Новые функциональные возможности могут быть созданы целенаправленным отбором структурной связи элементов и их размеров. Наноматериалы по структуре можно упрощенно подразделить на аморфные и кристаллические, но во всех случаях мы сталкиваемся с переходными формами, свойства которых очень трудно связать с используемыми при производстве технологиями. Особую роль в новых материалах получают наноструктурные поверхности, обладающие повышенной чувстви-



тельностью элементов по отношению к воздействиям окружающей среды, что создает много новых возможностей для функционального и чисто технического применения. Пока мы недостаточно понимаем смысл существующих в природе границ миниатюризации, но должны, по-видимому, исходить из принципов построения структур *снизу – вверх*, поскольку современная наука вообще не разработала производств и математических моделей, позволяющих осуществлять процессы производства *трехмерных* наноструктур по типу *сверху – вниз*.

## 5. Нанобиотехнология

Во многих отношениях организм человека демонстрирует эффективность действия наноструктур и связанных с ними технических решений, созданных самой природой. Использование уже существующих в природе биологических стратегий для решения технических проблем называют бионикой или биомеханикой (Nachtigall и Bluchel, 2002), а по отношению к НТ это означает биотехнологический подход, позволяющий создавать, например, молекулярные механизмы, подобные тем, которые успешно работают в биологических клетках. Фундаментальная стратегия в этой области состоит не только в стремлении создавать нужные материалы и наноконпоненты, но и изучать принципы их действия и самоорганизации, а также использования биологических или биохимических конпонентов в конкретных технических системах.

Отношение НТ к биологии нельзя рассматривать однозначно и просто, так как оно не сводится к техническому использованию биологических методов или систем. Проблема применения наносистем с биологическими принципами действия представляет огромный технический интерес, что очень ярко проявляется в разработке новейших препаратов, протезов, органов чувств и т. п. Нанобиотехнология разнообразными связями объединяет в себе многие направления (нанотехнологию вообще, уже привычную биотехнологию, биологию и смежные науки) с медициной и фармацевтикой. Кроме того, нанобиотехнологические разработки могут уже в ближайшее время найти практические применения и стать основой промышленных производств. С другой стороны, именно в этой области можно ожидать открытий, которые в будущем приведут к резкой смене научных и технических парадигм, что и привлекает к ней особое внимание исследователей, технологов и финансистов.

### 5.1. Проблемы определения используемых понятий

Необходимо сразу оговорить, что в литературе нет единого и четкого определения термина «нанобиотехнология» (НБТ), так что он отчасти лишен строгого смысла. В любом случае, НБТ определяют не как раздел самой нанотехнологии, а скорее (как уже отмечалось во введении) как некую промежуточную

область между биотехнологией, медициной, чистой биологией и фармацевтикой. С нанотехнологиями (в строгом смысле этого термина) НБТ объединяют следующие основополагающие принципы:

- методы создания структур и природные принципы синергизма;
- применение биологических элементов и материалов;
- создание комбинаций, поддерживающих или создающих биотехнологические процессы;
- реализация биосовместимых и биофункциональных материалов и процессов;
- синтез биологических элементов путем молекулярного структурирования.

Предметом изучения и исследования в НБТ выступают, с одной стороны, технические наносистемы, а с другой — биологические системы с функциональными компонентами нанометровых масштабов (Hartmann, 2003). Технические или изготавливаемые человеком системы имеют большое значение в разных промышленных сферах (материаловедение, энергетика, автоматика, охрана окружающей среды и т. п.), а биотехнологические системы связаны с биологией, медициной, производством продуктов питания, агротехникой и т. п. Создание, изучение или использование биологических, и технических наносистем требует понимания фундаментальных основ физико-химических явлений и выработки соответствующих технологических стратегий. Для общего обозначения применений биологических компонентов в наносистемах используют выражение «от био к нано», в то время как применение технических наносистем в сочетании с биологией естественных систем называют подходом «от нано к био» (VDI-TZ, 2004). Соотношения между этими подходами носят, естественно, достаточно сложный характер, что и отражено на рис. 5.1.

Принцип функционирования *от био к нано* можно объяснить на примере производства жидких кристаллов (используемых в дисплеях и т. п.), синтез которых осуществляется на основе белков, обладающих заданными макроскопическими свойствами (например, оптической анизотропией). Эти свойства, естественно, как-то связаны со структурой и строением исходных белков и образуемых ими глобул. Как показано на рис. 5.2, исходные белки требуемого вида вполне могут быть по-

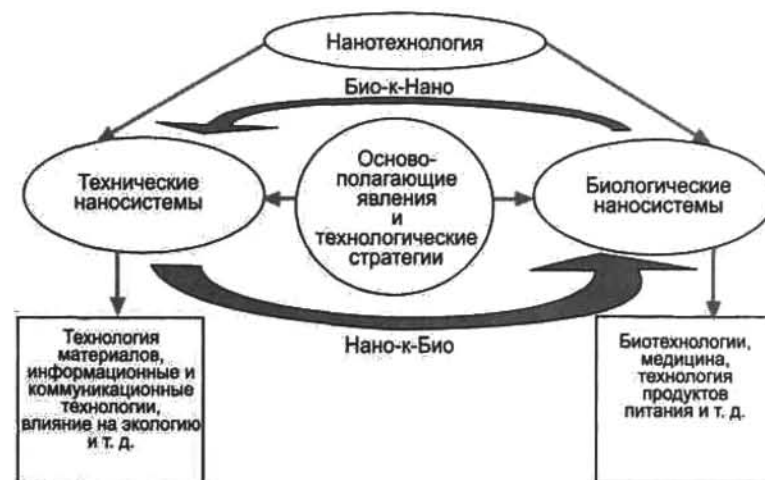


Рис. 5.1. Общая структура нанобиотехнологии в соответствии со сферами применения. Использование биологических стратегий, методик или компонентов в технических наносистемах называют направлением «от био к нано», а применение технических методов или компонентов для оптимизации биологических наносистем – направлением «от нано к био»

лучены известными биотехнологическими методами, а для дальнейшего производства жидких кристаллов можно воспользоваться молекулярной самоорганизацией. Такое сочетание разных подходов (нанотехнологическая задача, биотехнологическая методика и использование молекулярной самоорганизации) является типичным для НТ, основанной на переходе от *от био к нано*, что обсуждалось выше.

Обратный подход (то, что выше было обозначено *от нано к био*) можно проиллюстрировать на следующем примере. Предположим, что мы ставим перед собой проблему дифференциации, то есть различия биологических клеток (например, столь популярных сейчас стволовых) по их реакции с биологическим окружением, но без контакта с другими клетками (Alberts и др., 2004). Процесс дифференциации клеток во внеклеточном окружении может стимулироваться с помощью некоторых сигнальных факторов, имеющих особое строение и заданную концентрацию, поэтому стволовые клетки в пробирке действительно могут быть отделены с использованием методик, отличных от естественного окружения, причем результат тако-

го разделения может абсолютно совпадать с естественным биологическим процессом дифференциации. Понятно, что это позволяет в принципе вырастить клетки заданного вида из выделенных таким образом стволовых клеток, но находящихся не в своем естественном биологическом окружении, а в некоторой технически смоделированной, наноструктурной системе. Такая система может, например, быть создана на обработанной физико-химическими методами поверхности, которая стимулирует процесс дифференциации, вызывая соответствующие сигнальные факторы. Нужный тип клеток может быть выделен и модифицирован на основе взаимодействия между клеткой и поверхностью, если созданная функциональная поверхность может как-то симулировать воздействие биологического окружения (см. рис. 5.3). В этом случае техническая наносистема, то есть физически и химически функционирующая поверх-

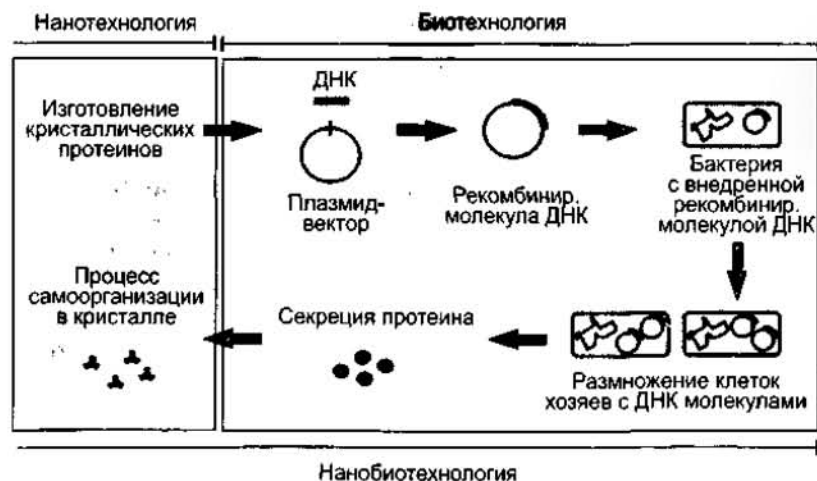


Рис. 5.2. Пример нанобиотехнологического процесса с использованием обширного цикла преобразований. Процесс начинается с синтеза жидких кристаллов на основе белков, имеющих определенные характеристики. Так как речь идет о дальнейшей работе с использованием технических систем, следует говорить о математическом моделировании и общем подходе типа *от био к нано*. В данном случае нанотехнология позволяет получать белки заданного типа с использованием известных методов биотехнологии, а в результате биологической самоорганизации затем образуются белки, функционирующие в качестве наноконструктивных элементов технической системы

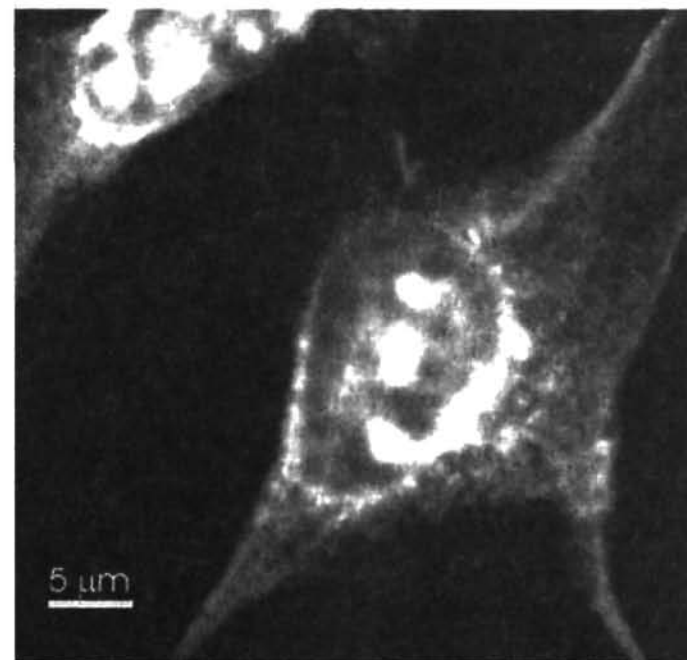


Рис. 5.3. Клетка фибробласта на поверхности стекла. Взаимодействие между клеткой и поверхностью удерживает клетку на поверхности, но позволяет ей, тем не менее, смещаться в боковых направлениях

хность, выступает средой, организующей или даже оптимизирующей требуемые биотехнологические процессы.

**Выводы:** Предметом НБТ является использование технических наносистем для воздействия на биологические системы или их применение (например, за счет использования биологических процессов или компонентов для оптимизации действия технических наносистем). Направленность применяемых методов позволяет различать методы или подходы, обозначаемые для удобства терминами *от нано к био* и *от био к нано*.

## 5.2. Технологии типа *от нано к био*

Использование технических наноконструктивных элементов или систем для оптимизации биологических и биотехнологических процессов связано, в основном, со следующими областями практического применения:

- медицина и фармацевтика,
- агротехника и производство продуктов питания,
- экология и технологии, связанные с охраной окружающей среды,
- военные технологии.

Хотя во всех названных сферах уже получены весьма впечатляющие результаты исследования наноструктур, их будущая экономическая значимость может видаться по-разному. Наиболее важными и даже глобальными на ближайшее и близкое будущее представляются перспективы развития в сфере медицины и фармакологии. Очень большим и важным потенциалом применения обладают сейчас биоактивные материалы и поверхности. Так называемые биофильные материалы и поверхности способствуют росту клеток, что может, безусловно, использоваться в области биологических имплантантов, например для замены биологических тканей на внутреннем покрытии протезов кровеносных сосудов и т. п. С другой стороны, так называемые биоцидные поверхности могут стать основой для абсолютно нового подхода в области гигиены. Во всех случаях речь идет о том, что в нанобиотехнологических процессах могут использоваться не только химические свойства поверхности, а скорее, целый химико-физико-биохимический комплекс или ландшафт характеристик в нанометровом масштабе, создающий определенные функциональные свойства. Более того, следует подчеркнуть, что эти свойства и возможности никак не могут быть достигнуты только на основе привычных методов физической, химической или биохимической обработки поверхности, используемых раздельно.

Сложные наночастицы из органических и неорганических компонентов (или их разных комбинаций) могут иметь массу интересных применений в диагностике и лечении болезней. Например, некоторые частицы, биохимически активизированные на определенных поверхностях, могут выступать в качестве высокоспецифических контрастных веществ, причем использование таких частиц позволяет иногда даже преодолевать биологические барьеры организма, непроницаемые при обычных способах воздействия. Эта возможность уже используется в ряде новых терапевтических приложений, когда определенные лечебные препараты (химически связанные с поверхностью частиц или даже их внутренней структурой) транспортируются че-

рез биологические барьеры и локализуются в тех тканях и органах, куда их невозможно доставить без несущей частицы. Этот метод, именуемый направленной доставкой препаратов в организме, становится все более популярным в медицине. Применение наночастиц все чаще позволяет реализовать новые возможности влияния на организм, например создавать локальные изменения температуры (гипертермия), осуществлять высвобождение связанных лекарственных препаратов внешним воздействием и т. п.

Другое широкое поле применения нанобиотехнологий при подходе *от нано к био* заключается в изготовлении и применении биочипов. Уже возникла общая тенденция к проведению все более сложных аналитических исследований в автоматическом режиме с использованием достаточно сложных биочипов (в некоторых случаях, даже с применением микроструйных устройств и т. п.). Схематичное изображение так называемой «лаборатории на чипе» представлено на рис. 5.4. Такой микрочип способен осуществлять целый ряд сложных подготовительных операций (транспортировка исследуемого материала, его сепарация, смешивание, обработка, а также итоговый комплексный анализ), то есть фактически выполнять работу целой лаборатории. Наличие таких чипов позволяет очень быстро и эффективно осуществлять множество процедур анализа инди-

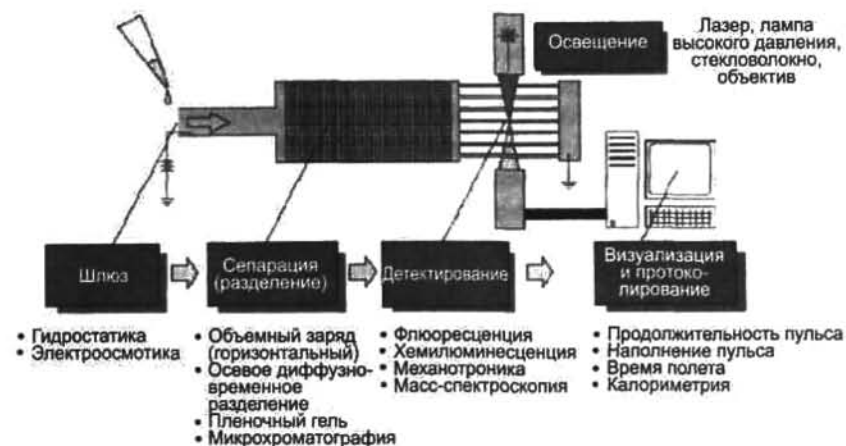


Рис. 5.4. Пример устройства лаборатории на чипе. Все схематично представленные компоненты в идеальном случае интегрированы в виде единого биочипа



видуальных организмов, что очень важно для разных практических мероприятий и задач (эта методика уже получила такое широкое распространение, что во многих работах вводят дополнительные определения, различая ДНК-чипы, белковые и клеточные чипы и т. п.). Вклад нанотехнологии в развитие биочипов заключается, прежде всего, в использовании наноструктурных материалов и поверхностей, а потенциал развития НБТ в этой области представляется исключительно высоким в самом близком будущем.

Еще одной областью, где подход *от нано к био* является весьма перспективным и многообещающим, является разработка очень сложных протезов для восстановления поврежденных органов чувств человека, прежде всего в *сетчатке* глаза и в так называемой микроскопической *улитке* (структуре во внутреннем ухе человека). Создание таких имплантантов всегда представляло собой очень трудную задачу, поэтому дальнейшая миниатюризация в этой области представляется медикам исключительно важной и открывает перед ними совершенно неожиданные перспективы. С другой стороны, в изготовлении активных имплантантов все более существенную роль начинают играть новые, так называемые биофункциональные материалы, позволяющие создавать совершенно неожиданные варианты интерфейсов (переходных или связывающих устройств) между биологическими системами и окружающей средой.

Как уже упоминалось во введении, программирование клеток посредством технических систем имеет огромные перспективы. В будущем мы можем представить себе даже сложные биологические реакторы в форме биочипов, которые сделают возможным целенаправленное программирование стволовых клеток. Основой таких чипов будет наноструктурная высокофункциональная поверхность, которая за счет взаимодействий с клеткой будет осуществлять желаемую дифференциацию стволовой клетки.

Большое значение также имеет вовлечение НТ для реализации абсолютно новых аналитических методов, особенно тех, которые обеспечивают конкретное исследование отдельных нанобиологических объектов. В этой связи стоит отметить растрово-зондовую методику (см. разд. 6.1). В области биодетекторов очень перспективными оказались микроструктурные биофункциональные элементы на основе кремния, которые могут захватываться функциональными молекулярными поверхностями так называемых

мых кантилеверов (кронштейнами атомных размеров, типа используемых в атомно-силовых микроскопах). Присоединение чипа (с анализируемым соединением) к такому кронштейну изменяет частоту колебаний последнего, что позволяет сделать вывод о наличии соответствующих веществ. Используя массивы из множества таких микроструктурных кантилеверов параллельно, можно проанализировать исследуемые образцы на содержание огромного числа разнообразных веществ и получить очень полный перечень всех содержащихся в среде, организме или системе веществ.

В агрохимии и биотехнологии подходы типа *от нано к био* сводятся к разработке новых методов использования пестицидов и удобрений, а также к программированию клеток и выработке методов биологической борьбы с вредными веществами. В сфере технологии продуктов питания особый интерес представляет разработка совместимых методов очистки, методов оценки и оптимизации в производстве различных веществ. Инновационные экологические технологии включают в себя уничтожение, переработку или нейтрализацию вредных веществ, а также организацию экологически безопасных методов переработки отходов.

Об использовании подходов типа *от нано к био* в военных технологиях известно, конечно, не очень много, однако представляется очевидным, что по всему миру (и особенно в США) в такие разработки вкладываются значительные средства и уже достигнуты некоторые результаты, позволяющие говорить о возможности практического применения.

**Выводы:** На основе подхода *от нано к био* уже сегодня можно создавать новые технологии, имеющие важное экономическое значение. В первую очередь, следует упомянуть применение биофункциональных материалов и поверхностей для медицинских и биотехнологических целей, а также использование наночастиц в новейших фармацевтических методиках, основанных на биочипах и активных имплантантах. Кроме того, приобретают все большую значимость идеи и конкретные разработки новых аналитических методик, основанных на использовании нанотехнологических структур.

### 5.3. Технологии типа *от био к нано*

Самой фундаментальной, честолюбивой и долгосрочной целью в этом направлении остается использование биологических принципов и стратегий для производства технических наносистем. Биологические объекты в процессе эволюции добились замечательной эффективности и оптимальности функций, использование которых могло бы стать основой новой научной революции в технике. В качестве примера можно привести схематически представленный на рис. 5.5 процесс самосборки (самоорганизации) известного вируса табачной мозаики. В этом конкретном случае речь идет о биологическом синтезе наночастиц в форме сложного завитка (с характерными размерами 300 нм на 18 нм), составленных из 2130 одинаковых белковых элементов, каждый из которых содержит 158 аминокислотных остатков, а нить РНК состоит из 6400 нуклеотидов. Вирус возникает в сложном биохимическом окружении и в очень неравновесных термодинамических условиях, однако частота ошибок синтеза при этом очень мала, возможно, и по той причине, что процесс порождения включает в себя некоторые механизмы корректировки и «самолечения» структур. Затраты вещества в та-

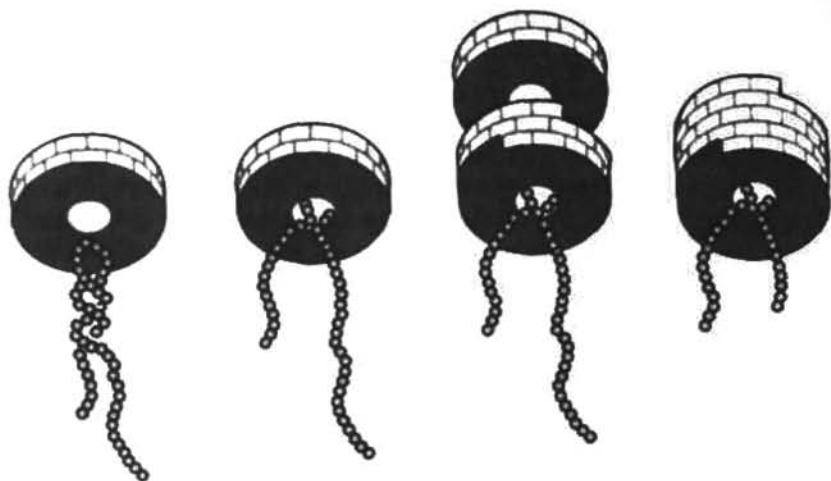


Рис. 5.5. Процесс возникновения (самоорганизации) вируса табачной мозаики, состоящего из 2130 идентичных протеиновых единиц, содержащих по 158 аминокислотных остатков, нить РНК состоит из 6400 нуклеотидов. Общие размеры структуры — примерно 300 нм на 18 нм

ком процессе оптимизировано малы, а процесс производства в целом максимально эффективен. Вообще говоря, процесс сборки основан на использовании иерархически дифференцированных и высокоспецифических межмолекулярных взаимодействий. Представляется очевидным, что аналогичный технологический процесс изготовления каких-то функциональных компонентов или целых наносистем на действующих по этому принципу «молекулярных фабриках» мог бы стать абсолютно новым, универсальным и исключительно важным принципом производства. Проблема заключается именно в том, что мы очень плохо представляем себе принципы действия описываемых фундаментальных процессов, то есть еще невероятно далеки от возможности использования процессов самоорганизации для изготовления наноструктур, сравнимых по своей сложности с самым простым вирусом.

Еще одним важным направлением в подходе *от био к нано* является использование биологических компонентов для оптимизации технических процессов и систем. Такие компоненты реально существуют, например, в функциональных молекулах типа белков, или даже в более крупных элементах, называемых биологическими моторами (Hartmann, 2003). Проблема заключается в том, что любое применение таких биокомпонентов предполагает их выделение из естественной биологической среды и перевод в техническую систему. На рис. 5.6 показаны молекулы ДНК на поверхности твердого тела в хаотическом, неупорядоченном состоянии (слева) и при высокой степени упорядоченности (справа). Легко заметить, что структурированное состояние предоставляет множество возможностей для решения технических задач (например, для создания электрических цепей и т. п.), особенно с учетом того, что молекулы обладают очень интересными геометрическими и физико-химическими особенностями. Они достаточно химически инертны, могут сохранять информацию в невероятно плотной форме и имеют целый ряд других важных характеристик и свойств (Ну и др., 2002).

Биологические компоненты могут с успехом использоваться не только в технологиях, но и при производстве совершенно новых по составу материалов. Например, комбинации биополимеров с органическими или неорганическими наночастицами позволяют производить композиционные материалы нового типа, как показано на рис. 5.7. Многие биологические молеку-

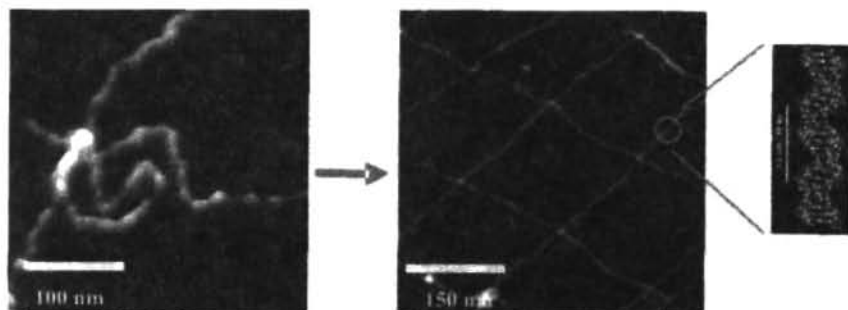


Рис. 5.6. Микрофотографии нитей ДНК в их естественной форме (слева) на поверхности слюды, полученные на электронном сканирующем микроскопе, и нитей ДНК, упорядоченных в процессе так называемого «молекулярного причёсывания» (справа). Из работы (Hu и др., 2002)

лы или функциональные соединения могут найти и другие потенциальные применения в разных наносистемах (Nimeyer и Mirkin, 2004; Goodsell, 2004; Kumar, 2005). В целом, подход или стратегия *от био к нано* имеет высокую ценность в следующих направлениях:

- информационные и коммуникационные технологии;
- изучение и использование микротекучести;
- производство энергии;
- наноматериаловедение;
- общая теория нанобиологических методов.

В сфере будущих информационных и коммуникационных технологий вполне мыслимо создание и использование архитектуры систем на принципах самоорганизации биологических молекул. Фотоэлектрические комплексы вполне могут быть включены в системы молекулярной электроники, а сохранение информации (на основе ДНК или бактериородопсина) представляется вполне разумным и возможным. С другой стороны, математическое моделирование поведения ДНК позволяет говорить и о других применениях. Например, представляется возможным использование биологических систем для создания новых методов обеспечения безопасности, методик кодирования и защиты информации и т. п., а исследование нейронных сетей и их моделирование уже стало важной областью развития теории информационных и коммуникационных процессов.

Исследователи заняты сейчас разработкой микроскопических линейных и роторных двигателей, приводов и переключателей, работающих на биологических принципах. Такие устройства очень важны для возможных массовых производств описанных выше биочипов, в которых важную роль играет текучесть жидких сред на микроскопическом уровне (ее называют микротекучестью или микрофлюидикой). Регулирование микроскопических потоков жидких материалов имеет особое значение для следующих целей практического применения:

- направленный транспорт гормонов;
- создание наноразмерных насосов и клапанов;
- сортировка и распределение микропотоков;
- контроль за протекающими в микросистемах реакциями;
- идентификация и учет веществ;
- сенсорные устройства (микродатчики).

Для энергетики (в особенности, при создании систем децентрализованного производства энергии) могли бы представлять интерес молекулы в виде «собирающих свет антенн» для фотохимических процессов в микрокапсулах, а также молекулярные структуры на основе известного фоточувствительного соединения АТФ (аденозин-5-трифосфат). Очень перспектив-

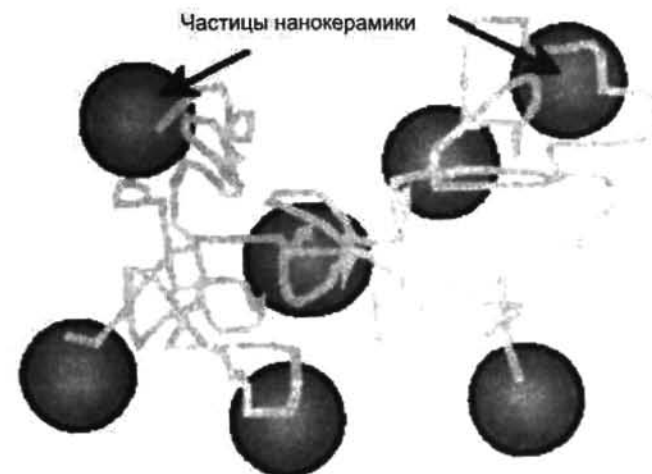


Рис. 5.7. Биоконпозиты (например, из керамических наночастиц, соединенных биополимерной сетью) могут стать основой новых функциональных устройств



ным направлением является и создание различных биомиметических устройств для фотоэлектроники и преобразования света, например, создание так называемых ячеек Гретцеля, уже нашедших конкретные области применения.

В материаловедении особый интерес представляют функциональные гибридные структуры, биологические мембраны (в качестве молекулярных фильтров) и многие другие структуры. Бионаноматериалы разного типа уже сейчас начинают производиться текстильной промышленностью, например, для медицинских (биосовместимые изделия) или экологических целей (новейшие методики очистки) и т. п. Очень важную роль биологические материалы играют в развитии и широком внедрении новых типов биодатчиков для медицинской диагностики. Ведутся интенсивные исследования новых биомиметических материалов, например, на основе разнообразных блок-сополимеров.

Для общей стратегии развития в этой области представляет большой интерес тщательное изучение биологических принципов, систем и механизмов развития, особенно самоорганизации, саморепликации и «саморемонта» развивающихся структур. Потенциально очень важными являются распространенные в природе процессы биоминерализации, которые до сих пор изучены очень слабо.

**Выводы:** Общий подход (обозначенный выше термином *от био к нано*) охватывает целый ряд биологических методов и стратегий, которые потенциально представляют огромный интерес для производства технических наносистем. В будущем многочисленные и разнообразные биологические молекулы или компоненты смогут найти прямое применение в технических системах.

## 6. Стандартные методы НТ

Любое производство материалов или их компонентов предполагает предварительную разработку соответствующих подготовительных и аналитических методов (последние нужны для оценки намечаемых и получаемых характеристик и их сравнения с заданными величинами). Разумеется, при массовом производстве подготовительные и аналитические методы должны, конечно, отвечать особым условиям, которые вовсе не требуются при изготовлении изделий в штучном или специальном производстве. Аналитические методы имеют особое значение для обеспечения эффективности производства и гарантии качества изделий.

В главе 4 уже упоминалось, что некоторые вспомогательные методы производства наноструктурных материалов и наночастиц уже позволяют, хотя бы частично, организовать и промышленное производство. Для более сложных структур и компонентов мы чаще всего имеем дело лишь с результатами, полученными только в лабораторных масштабах, а в отношении биологических структур стратегии развития пока базируются, главным образом, на поиске подходящих нанобъектов с целью анализа их принципов функционирования и возможностей применения.

Главная роль в исследованиях такого типа отводится аналитическим методам, которые необходимы для обнаружения и описания создаваемых или массово производимых наноструктур (прежде всего, нас должны интересовать принципы, по которым действуют биологические системы, контролирующие синтез и протекание множества вспомогательных операций). В техническом производстве при этом могут потребоваться измерения и контроль дополнительных свойств (например, измерения неоднородности поверхности с нанометровой точностью и т. п.). Проблема является достаточно сложной, так как целенаправленная разработка вспомогательных методов НТ может быть основана только на точно заданных аналитических методиках контроля. Деление методов на аналитические и подготовительные имеет очень условный смысл, поскольку они тесно переплетены друг с другом, поэтому, даже если считать, что мы в принципе не можем создать стандартные стратегии производства (наноматериалов, наночастиц или других нанобъектов), нам необходимо определиться с выработкой методов контроля.

Не стоит обсуждать процессы лабораторного или индивидуального производства, которые практически всегда осуществляются в условиях, весьма далеких от требуемых для промышленных технологий.

### 6.1. Аналитические методы

Строго говоря, комплексное измерение параметров структуры любого объекта состоит, прежде всего, в точном количественном описании его трехмерной геометрии с достаточной точностью, а следующий этап аналитического изучения сводится к определению требуемых функциональных свойств данной структуры (например, ее химического состава, электропроводности, механических и оптических свойств и т. п.). Описание геометрических или функциональных свойств исследуемой структуры осуществляется, формально говоря, соответствующими приборами или зондами. Как показано на рис. 6.1, общий процесс исследований и анализа заключается в том, чтобы вызвать «реакцию» образца на «спровоцированные» зондом воздействия, что позволяет получить информацию относительно его физико-химических свойств. В оптическом микроскопе «реакция» образца определяется с помощью комбинаций падающего на него или проходящего видимого света, то есть регистрируется в форме интенсивности распределения отраженного света (с помощью глаза или камеры). Оптические измерения дают возможность не только получать информацию о геометрических размерах достаточно крупных объектов, но и позволяют, кроме того, оценить некоторые другие характеристики, связанные, например, с цветом объекта или его способностью к флуоресценции.

На рис. 6.1 схематически представлено разнообразие методик исследования образцов при помощи современной аппаратуры. Физическими реакциями или ответами анализируемого образца выступают поля или волны, а получаемые в результате измерений сигналы позволяют оценивать разнообразные функциональные свойства вещества. При этом, однако, следует принимать во внимание, что воздействие на образец прибора или зонда означает, в принципе, некоторое изменение его свойств, так как реакция в этом случае определяется не только собственными свойствами объекта исследования, но и физическим взаимодействием исследуемого образца с прибором. В предельных

случаях это взаимодействие может иметь даже разрушительный характер, например, при анализе биологического объекта не с помощью низкоэнергетических фотонов видимого света, а высокоэнергетических фотонов жесткого рентгеновского излучения, уничтожающих любые биологические структуры.

Наряду с выбором подходящей комбинации зондов или детекторов свойств, принципиальное значение для исследования любых локальных структур или индивидуальных объектов имеет разница между информацией о строении на локальном и глобальном (макроскопическом) уровне. Макроскопические данные относятся к геометрическим областям, структурный размер которых намного превышает размеры, доступные только микроскопическим методам исследования данного вещества. Локальным уровнем будем называть сведения, полученные при анализе структур, которые порождают пространственное рассеяние, достаточное для описания исследуемой индивидуальной структуры. Современная высокоразрешающая техника (в первую очередь, рентгеноскопия разных типов) предоставляет информацию не только о сверхмалых

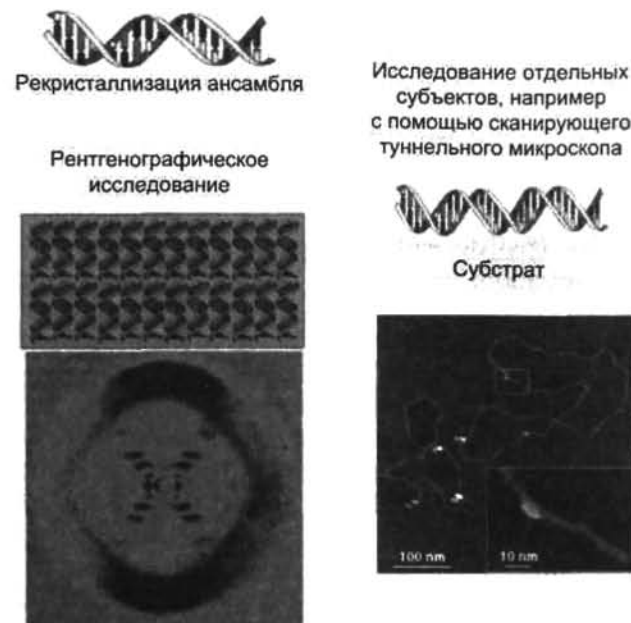


Рис. 6.1. Основа любого анализа — реакция образца на внешние воздействия в виде освещения, магнитных полей, механических нагрузок и т. п. Реакция выражается в изменении свойств, излучении фотонов (электромагнитных волн), изменении температуры и т. п. Выбранная комбинация регистрируемых реакций образца на внешние воздействия определяет выбор соответствующего аналитического метода

геометрических структурах, но и относительно их физико-химических характеристик, что и показано на рис. 6.1.

В начале 50-х годов прошлого века американский биолог Джеймс Уотсон занимался объяснением структуры ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота). К этому времени уже было известно, что в ее строении важную роль играет так называемая  $\alpha$ -спираль, открытая знаменитым Лайнусом Полингом методами рентгеноструктурного анализа. Уотсон работал в Кембридже вместе с английским физиком Фрэнсисом Криком у лауреата Нобелевской премии Лоренса Брэгга (создателя метода рентгеновского анализа структуры вещества вообще). Кроме этого изучением структуры ДНК занимались также в Лондоне Морис Вилкинс и Розалина Франклин. В 1953 году Уотсон и Крик определили структуру двойной спирали ДНК, которую они вывели путем сравнения данных рентгеновского анализа с предложенной ими картонной моделью. В 1962 году Уотсону, Крику и Вилкинсу была присуждена Нобелевская премия по медицине за объяснение структуры ДНК.

Методика рентгеновского анализа структурного строения ДНК схематично показана на рис. 6.2. Анализируя кристаллы из нитей ДНК, удастся обнаружить упорядоченные ансамбли, на которых рассеивается луч рентгеновского излучения с диаметром, значительно превышающим ширину спирали (~ 2 нанометра), а изменения в интенсивности получаемой рентгенограммы позволяют воссоздать атомно-молекулярную структуру образца (нижняя часть рисунка слева). Это знаменитое научное достижение было достигнуто, по существу, за счет того, что исследователям удалось создать кристаллы из ДНК и интерпретировать полученную картину в форме двойной спиральной структуры. Фактически исследования ДНК были реализованы без использования техники высокого разрешения, так как аналогичная методика уже давно успешно применялась для получения структуры кристаллов и определения параметров атомных решеток, многие из которых имели гораздо меньшие размеры (от одной десятой до нескольких десятых нанометра). На том же рис. 6.2 представлен снимок ДНК (полученный сканирующим туннельным микроскопом), где можно четко различить элементы с размерами чуть больше одного нанометра. Такие микроскопы (о них будет подробнее рассказано ниже) имеют очень высокое разрешение, и молекула ДНК может быть отображена непосредственно, в то время как при применении



**Рис. 6.2.** Изображения молекулы ДНК, полученные с использованием рентгеновского рассеяния (слева) и мощного сканирующего туннельного микроскопа (справа). Для сравнительной оценки возможностей разных методик очень важно учитывать, что разрешающая способность микроскопа не является единственным и главным достоинством. Например, для рентгеноструктурного анализа необходимо кристаллизовать достаточно большой образец из большого числа идентичных молекул ДНК, чтобы получаемая рентгенограмма содержала характерные отражения, позволяющие судить о тонких особенностях строения (в данном случае речь идет о специфическом спиральном строении). С другой стороны, снимок локального участка ДНК на более мощном микроскопе позволяет увидеть очень мелкие элементы структуры, но не содержит данных, позволяющих предположить или угадать спиральный характере структуры в целом

рентгеновского метода структура должна быть построена на основе распределения интенсивности. С другой стороны, стоит учесть, что разрешение является недостаточным для выявления спиральной структуры, хотя эту особенность можно угадать на снимках, сделанных с помощью более мощных микроскопов (типа сканирующего туннельного или атомно-силового).



Рентгеноструктурный анализ является одним из важнейших методов получения информации о строении вещества на атомарном, то есть нанометровом уровне. Метод является незаменимым при точном определении характерных размеров важнейших упорядоченных структур (он позволяет измерять, например, расстояния между атомами в кристаллах, длины соединительных мостиков в белках и т. д.), однако является бесполезным при решении многих практических проблем, связанных с НТ (например, рентгеновский анализ не может выявить отсутствие отдельных атомов на поверхности кристалла кремния или определить точное положение дефектов). Более точная информация (на уровне атомарного строения) в необходимых случаях может быть получена с помощью сканирующих микроскопов высокого разрешения, примером чего служит микрофотография на рис. 6.3.

Для измерения и анализа индивидуальных нано- и субнано-структур необходимо развивать новые микроскопические методики, имеющие достаточно высокое пространственное разрешение и позволяющие исследовать локальные особенности объектов (рис. 6.3), масштаб которых определяется размерами интересующих нас элементов анализируемой структуры. Проблему локализации и точности измерений можно пояснить на примере рис. 6.4, где схематически показан участок поверхности твердого тела, рассматриваемый в гипотетический микроскоп или изучаемый некоторым детектором. Как показано на рисунке, в исследованиях, где необходимо определить положение определенного атома на изучаемой поверхности, воспринимающая часть детектора должна быть введена в область валентных электронов на поверхности кристалла, поскольку на более дальних расстояниях просто нельзя получить и измерить сигналы, идентифицируемые с отдельными атомами. Естественно, что и габариты самого детектора в этой ситуации не должны превышать диаметр атома. Аналогично, при анализе изменений магнитного или электрического поля рассеивания на поверхности (диапазон длин около 100 нанометров) детектор должен иметь соответствующие размеры и вводиться на требуемое расстояние от поверхности образца.

Методы резонанса, рассеивания и отражения (а также другие микроскопические методы анализа) за последние десятилетия настолько развились, что сегодня стало возможным анализировать множество физических, химических и биологических свойств, относящихся буквально к отдельным атомам.

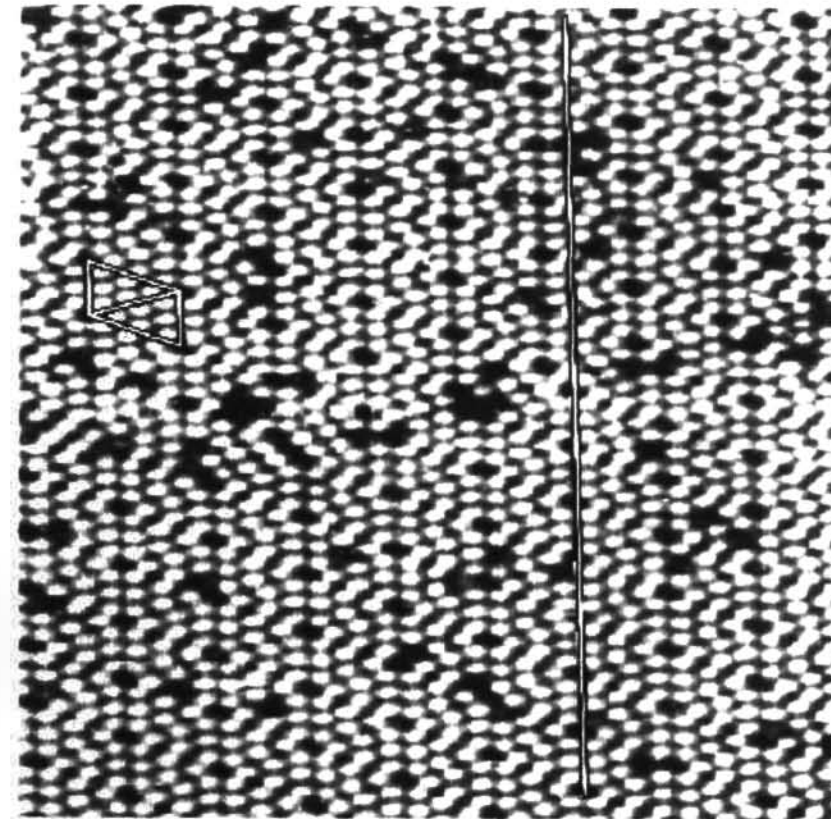
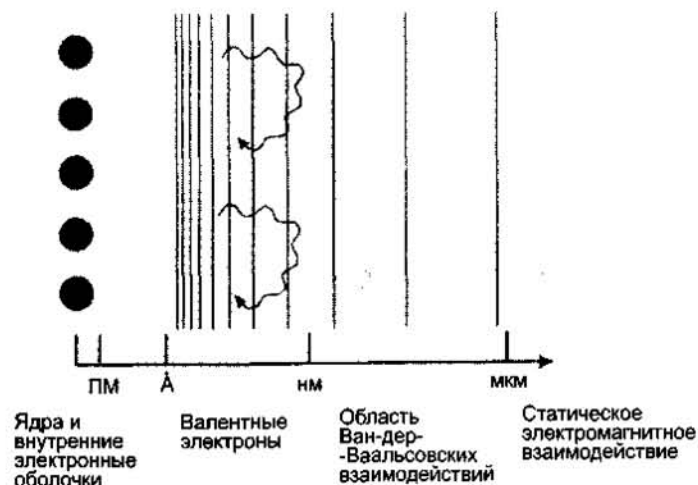


Рис. 6.3. Реконструкция строения участка (20 нм × 20 нм) поверхности кремния (111) (7×7) на основе снимка, полученного сканирующим туннельным микроскопом. Отчетливо видно характерное, высокосимметричное упорядочение атомов кремния на поверхности кристалла, а также расположение дефектов структуры, что наглядно подтверждает высокое разрешение прибора, позволяющее регистрировать положение отдельных атомов. В левой части рисунка выделена кристаллическая ячейка, состоящая из 12 атомов (поверхностных атомов) в виде двух треугольников. Вертикальная линия в правой части рисунка иллюстрирует положение границ доменов. По данным работы (Memmert, 1999)

Стремительное развитие НТ привело к еще более строгим требованиям в отношении методов измерения и анализа наноструктур.

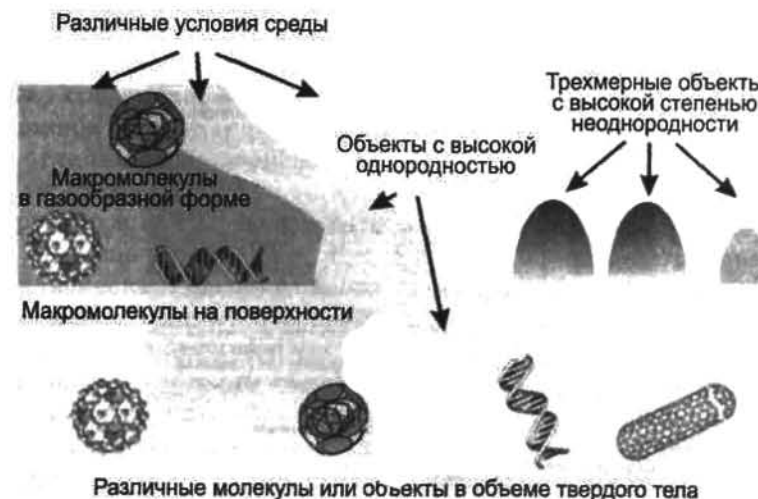




**Рис. 6.4.** Схематичное изображение поверхности твердого тела, иллюстрирующее отсутствие четкого контура изучаемого объекта. Считая исходным уровень положения ядер атомов и их внутренних электронных оболочек (кружки в левой части рисунка), уровень валентных электронов будет соответствовать примерно 1 ангстрему. С другой стороны, радиус действия электромагнитных межатомных взаимодействий (известные силы Ван-дер-Ваальса) обычно составляет несколько нанометров. Радиус действия многих других сил (статических, электрических и магнитных) зависит от размеров источника и может достигать микрометров или даже сантиметров (например, при использовании постоянных магнитов). Во всех этих случаях поверхность теряет «точность» определения и как бы «растягивается» до граничащего с ней вакуума

Развитие НТ настоятельно требует разработки новых видов аппаратуры, позволяющей не только определять геометрические параметры наноструктур, но и как-то оценивать их функциональные свойства. Некоторые проблемы можно прояснить на примере рисунков 6.4 и 6.5, где схематически представлены рамочные условия, специфически связанные с исследованием наноструктур. Анализ связан с отнесением индивидуальных нанообъектов к газообразной, жидкой или твердой фазе, что позволяет характеризовать их внутренние, возможно неоднородные характеристики. Вообще говоря, полное изучение функциональных свойств наноструктуры требует, как правило, проведения разных исследований на различных пространственно-временных «уровнях свойств».

Для объектов, представленных на рис. 6.5, физические, химические и биологические свойства играют не меньшую роль, чем чисто геометрические параметры. Более того, эти свойства локализованы на различных временных и пространственных уровнях или масштабах. Особо следует учитывать, что структуры и процессы, которые представляются в макромире статичными и медленными, могут проявлять высокую динамичность в нанометровом масштабе (например, рост кристаллического зерна металла при напылении происходит со скоростью более 1 нанометра в секунду). Поэтому любой анализ свойств вещества должен осуществляться только во временно-пространственном единстве, с тем, чтобы пространственное и временное разрешение используемых аналитических методик соответствовали исследуемым явлениям. Вспомним, что процесс старения любого материала при определенных обстоятельствах начинается где-то внутри образца и связан с атомарными масштабами, и лишь спустя длительное время (возможно, через несколько лет) приобретает макроскопический характер. Некоторые микроскопические методы исследования с высоким пространственным



**Рис. 6.5.** В нанонауке и нанотехнологии возникают дополнительные требования к разрешающей способности и чувствительности применяемых методик, особенно в тех случаях, когда необходимо анализировать не только отдельные сложные нанообъекты, но и их внутреннее «устройство»

разрешением могут оказаться бесполезными, если они не обеспечивают одновременно достаточно высокого временного разрешения. Например, при изучении динамической структуры оболочки гидрата растворенных в воде ионов, следует учитывать, что переориентация молекул  $H_2O$  при определенных обстоятельствах может происходить с частотой около  $10^{14}$  раз в секунду. Это обстоятельство диктует и выбор аппаратуры, вследствие чего для характеристики этого динамического процесса используется аналитический метод, который не обеспечивает высокого пространственного разрешения, однако в состоянии зарегистрировать молекулярную переориентацию с временным разрешением в  $10^{-14}$  секунды.

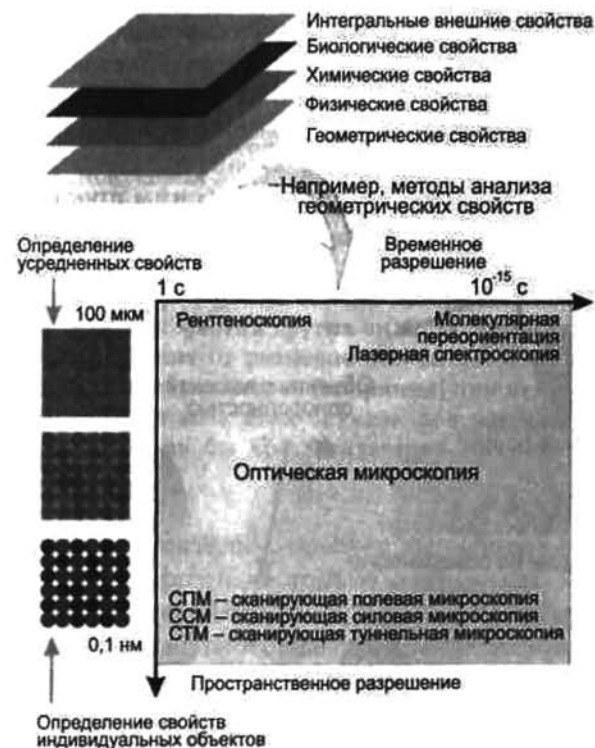


Рис. 6.6. Описание и понимание функциональных свойств наноструктуры требует определения параметров системы на нескольких различных пространственно-временных уровнях. Геометрические характеристики могут быть определены методами современной микроскопии с очень высоким разрешением, однако при этом возникают проблемы с определением временных масштабов процессов

Представленные на рис. 6.6 примеры показывают разнообразие современных методов оценки различных функциональных свойств, позволяющих получать, с одной стороны, очень высокое пространственное разрешение, с другой — описывать динамические процессы с временным разрешением порядка фемтосекунд ( $10^{-15}$  с). Кроме этого, существует ряд методов, в которых пространственное и временное разрешение комбинируются с тем, чтобы получить оптимальные условия для исследования отдельных процессов. Из общих физических соображений очевидно, что не существует методов, в которых сверхвысокое оптическое разрешение просто объединялось бы с возможностью регистрации очень быстрых процессов. Область НТ исследований относится к квантовой механике, в которой существуют собственные запреты и ограничения, включая знаменитое соотношение неопределенностей Вернера Гейзенберга, не позволяющее (даже теоретически) разработать микроскопические методы одновременного и точного определения положения и импульса изучаемого микрообъекта.

Помимо экспериментов, связанных с измерением параметров и анализом свойств наноструктур в определенных пространственно-временных масштабах, все большее значение приобретает численное моделирование различных нанопроцессов. Мощные современные методы позволяют моделировать очень сложное функциональное поведение разных структур, причем (в отличие от экспериментальных работ) математическому моделированию формально доступна область мельчайших наноструктур и самых быстрых протеканий процессов.

Вообще говоря, речь идет о возможности регистрировать и анализировать физические, химические и биологические свойства нанобъектов с использованием представленных на рис. 6.1 методик, точность которых, в соответствии с определенной для НТ областью, должна составлять не менее 100 нм. При этом оказываются непригодными многие классические методы оптического анализа, поскольку диаметр световых лучей обычно намного превышает это значение. Нанобъекты следует изучать зондами или пробниками размером около 100 нм (см. рис. 6.4), причем с учетом взаимодействия между зондом и образцом в каждой точке сканирования. Интегральное представление об образце возникает лишь в результате обработки данных, получаемых для каждой отдельной точки последовательно или параллельно проводимыми экспериментами. При использовании

просвечивающего электронного микроскопа информация относится к образцу в целом, а ее обработка и интерпретация осуществляется как бы интегрально. С другой стороны, в сканирующей зондовой микроскопии локальный зонд или электрод движется «построчно» вдоль поверхности образца и посредством соответствующего смещения отдельных «строк» создает двухмерное изображение исследуемой области.

Взаимодействие между зондом и исследуемым объектом всегда включает влияние зонда на образец, и это взаимодействие является достаточно сложным, что должно постоянно учитываться при исследованиях. В некоторых вариантах зондовой микроскопии можно надеяться, что взаимодействия между зондом и образцом не являются деструктивными, то есть мы можем получать достаточно близкое к реальности изображение объекта в его исходном состоянии. Во всех манипуляциях с образцом следует различать обратимые и необратимые взаимодействия. Разумеется, в целом изменения образца при микроскопических исследованиях остаются нежелательными, что явно проявляется на снимках рис. 6.7, где, изменяя условия сканирования, исследователям удалось несколько варьировать получаемые изображения, извлекая из них дополнительную информацию относительно изучаемой структуры.

Выше обсуждались лишь общие аспекты микроскопии и аналитических методик в нанометровом диапазоне, однако представляется очевидным, что особое значение в развитии НТ будут иметь методы, позволяющие реально достигать пространственной точности (разрешения) порядка нанометров или даже меньше. Именно такие возможности обеспечивает сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), созданный еще в конце 1981 года сотрудниками исследовательской лаборатории ИВМ в Цюрихе Гердом Биннигом и Гейнрихом Рорером, что стало отправным моментом для целого ряда сканирующих и зондовых методов в микроскопии. Новейшими приборами этого типа являются сканирующие атомно-силовые микроскопы (САСМ) и так называемые оптические сканирующие микроскопы ближнего поля (СМБП). Все эти методы основаны на едином физическом подходе, который заключается в том, что локальный зонд движется «построчно» над поверхностью образца, позволяя получать информацию о структуре с нанометровой точностью. Эксперименты такого рода позволяют не только анализировать состав и строение образца, но даже целенаправленно модифицировать

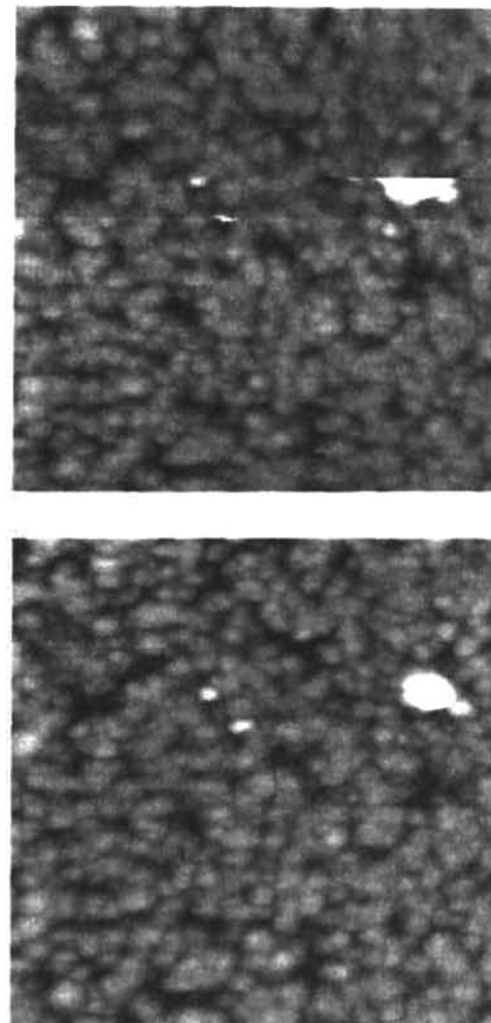


Рис. 6.7. Изображение поверхности серебряной пленки, полученное сканирующим туннельным микроскопом. На верхнем снимке выделена небольшая область с повышенным белым контрастом. Повторное сканирование при других параметрах (нижний снимок) демонстрирует, что при первом эксперименте часть вещества (материала) с зонда туннельного микроскопа была перенесена на образец. Кроме этого, можно отметить, что за время между двумя исследованиями произошло некоторое изменение структуры (геометрический дрейф), в результате чего изменилось положение дефектов кристаллической структуры

изучаемую поверхность, что стирает разницу между исследованием и обработкой поверхности. Применение разнообразных зондов и изменение окружающих условий позволяет в настоящее время проводить чрезвычайно интересные и разносторонние эксперименты в нанометровом диапазоне практически с любыми образцами.

Общая схема строения сканирующего зондового микроскопа приведена на рис. 6.8. Центральной частью устройства является пьезоэлектрический элемент, позволяющий создавать нужное положение зонда относительно поверхности образца. Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что электрическое поле в некоторых материалах (так называемых пьезоэлектриках) вызывает изменения кристаллической структуры, означающие ее расширение и сжатие в некоторых направлени-

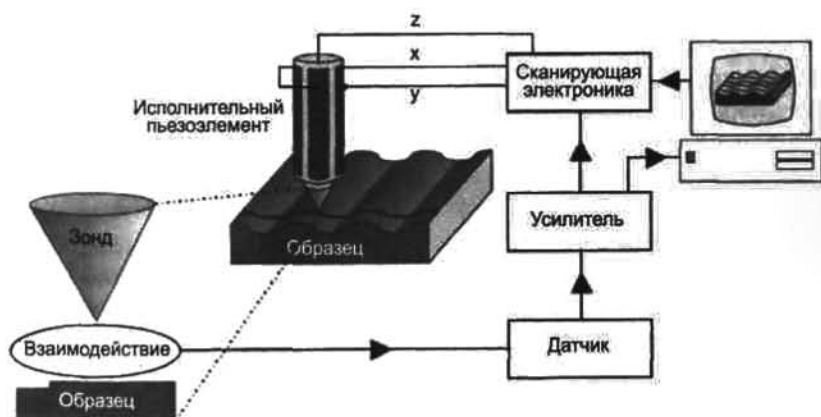


Рис. 6.8. Блок-схема сканирующего зондового микроскопа. Зонд закреплен на пьезоэлектрическом элементе, позволяющем достаточно точно устанавливать зонд в трехмерном пространстве, то есть подавать требуемые электрические сигналы для его позиционирования в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Координаты  $x$  и  $y$  используются для построения сканирования поверхности образца, а координата вдоль оси  $z$  используется для регулирования расстояния зондом и образцом. Эту величину подбирают так, чтобы взаимодействие между зондом и образцом (непрерывно регистрируемое либо величиной туннельного тока, либо силой межмолекулярного взаимодействия) оставалось постоянным. Зависимость выходного сигнала усилителя, измеряющего положение зонда по оси  $z$ , от координат  $x$ - $y$  позволяет построить (после надлежащей обработки данных) изображение рельефа поверхности исследуемого образца

ях, и этот эффект проявляется в очень разных формах. В зондовом микроскопе используется так называемый поперечный пьезоэффект (при котором приложенное электрическое поле  $E$  направлено вертикально к оси расширения/сжатия). Схема эксперимента показана на рис. 6.9, а изменение размеров описывается формулой:

$$\Delta L = L \frac{V}{t} d_{31},$$

где через  $d_{31}$  обозначена так называемая вертикальная пьезоэлектрическая константа вещества.

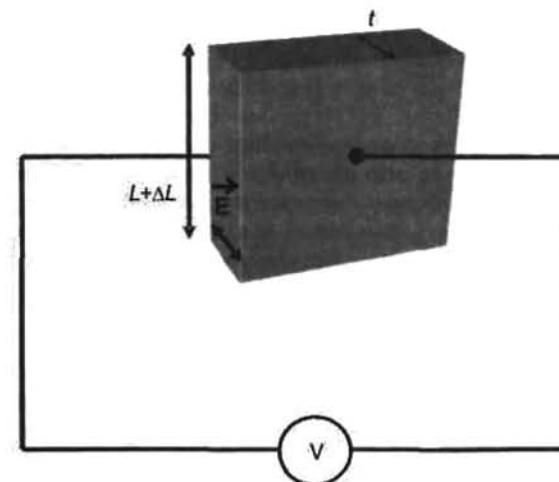


Рис. 6.9. Схема измерений с использованием поперечного пьезоэлектрического эффекта. При наличии разности потенциалов между двумя электродами внутри пьезоэлектрического материала возникает электрическое поле  $E$ , перпендикулярно к которому происходит изменение размеров образца, что и используется для прецизионных измерений положения зонда в пространстве

В настоящее время в качестве пьезоэлемента в таких устройствах широкое применение находят пьезотрубки, трехмерное перемещение которых (с помощью перпендикулярно направленных электродов на внешней стороне) может регулироваться довольно сложным образом, что схематически представлено на рис. 6.10. При надлежащей настройке (подборе размеров пьезотрубок, температуры и т. д.) такие устройства позволяют



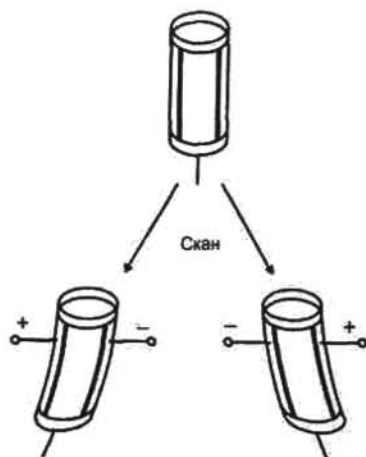


Рис. 6.10. Трубка из пьезоэлектрического материала, используемая в сканирующих зондовых микроскопах в качестве *сканера*. Создавая разность потенциалов между парами электродов на поверхности трубки, можно осуществлять движение в направлениях  $x$  и  $y$ . Подбирая разность потенциалов между четырьмя параллельно включенными внешними электродами и концентрическим внутренним электродом трубки, можно изменять длину трубки вдоль ее оси

осуществлять точные манипуляции во всех направлениях пространства.

Достаточно сложная техническая проблема при таких измерениях заключается в том, что в исходном состоянии (начало эксперимента) зонд и образец должны быть удалены друг от друга на макроскопическое расстояние (миллиметры), чтобы считывание сигнала с поверхности образца путем сканирования было невозможно. При достаточно малом рабочем расстоянии между зондом и образцом сигнал на выходе детектора отражает свойства исследуемого образца за счет использования пьезотрубки. Продольная область раstra составляет при этом обычно от 1 мкм до 100 мкм, а типичное расстояние между зондом и образцом — от долей нанометра до нескольких десятков нм. При достаточно низких температурах (например, при температуре кипения жидкого гелия 4,2 К) неоднородности движения пьезотрубки значительно уменьшаются, поскольку пьезоэлектрическая константа  $d_{31}$  очень сильно зависит от температуры. Для «грубой» установки зонда (в пределах миллиметра с точностью порядка 1



Рис. 6.11. Пьезоэлектрический двигатель, допускающий «грубую» установку зонда на миллиметровых расстояниях от поверхности образца, но с точностью до нанометров. При подаче необходимых импульсов напряжения на пьезоэлектрические элементы системы, сапфировая призма двигается независимо от начальных нагрузок (без воздействия гистерезиса) и констант пьезоэффекта в сапфире и игле

мкм) можно использовать своеобразные «пьезодвигатели», типа представленного на рис. 6.11 (Pan и др., 1999)

Вне области малых сигналов пьезоэлектрический эффект имеет четко выраженные свойства гистерезиса (Fatikow, 2000), для преодоления воздействия которых многие сканирующие зондовые микроскопы обеспечиваются пассивной или активной линеаризацией регистрируемого сигнала. При пассивной линеаризации нелинейность эффекта учитывается посредством настройки управляющего напряжения  $V$ , соответствующей заранее измеренной характеристической кривой гистерезиса. При активной линеаризации фактически измеряется развертка сигнала пьезоэлемента в зависимости от приложенного управляющего напряжения, а измерение может производиться либо оптически (интерферометр, отклонение лучей), либо по изменению емкости дифференциальных датчиков, либо с помощью тензодатчиков на поверхности пьезоэлемента. Измеренное значение гистерезиса компенсируется в дальнейшем регулировкой регистрирующих устройств и схем.

В принципе, сканирующие зондовые методы могут применяться в самых различных условиях окружения (во многих случаях их эксплуатация должна происходить в обычных условиях и при комнатной температуре), но сканирующая туннельная микроскопия весьма чувствительна к загрязнениям и неоднородностям поверхности, которые в нормальных условиях практически неизбежны. Для более точных измерений с мини-

малым уровнем примесей следует проводить эксперименты в очень высоком вакууме (давление порядка  $10^{-12}$  мбар), поэтому часто сканирующую микроскопию объединяют с высоковакуумными установками, внутри которых смонтированы приспособления для препарирования и анализа образцов, как показано на рис. 6.12. Естественно, что эксплуатация таких комплексов осуществляется при низких температурах (в диапазоне до милликельвина).

Уменьшение тепловой энергии  $kT$  соответственно улучшает энергетическое разрешение, но понижает динамику многих процессов, связанных с температурой, особенно в тех случаях, когда анализируемые явления зависят от соответствующих фазовых переходов. Например, возникновение сверхпроводимости относится к низкотемпературным эффектам, хотя в некоторых случаях, естественно, необходимо работать и при высоких температурах образца (например, при изучении процессов плавления и т. п.). В таких ситуациях необходимо тщательно следить за расстоянием между зондом и поверхностью образца и учитывать тепловые эффекты. На рис. 6.13 показан термически индуцированный процесс очистки поверхности кремния, который может быть использован в производственных целях. Сканирующие зондовые микроскопы уже стали играть огромную роль в разнообразных исследованиях (биология, электрохимия, процессы увлажнения и т. п.), где часто возникают очень интересные и нестандартные наноструктуры, типа показанной на рис. 6.14 системы из металлических точек в электролите.

Из представленной на рис. 6.8 схемы строения сканирующего зондового микроскопа легко заметить, что взаимодействие между зондом и образцом во многом зависит от вида используемого зонда, выбранных условий среды и режимов эксплуатации. На рис. 6.15 показаны важнейшие типы зондов, работающих или разрабатываемых на этой основе (сканирующий зондовый, сканирующий атомно-силовой и т. п.). Зонды для туннельных микроскопов изготавливают путем электрохимического вытравливания металлических проводников, по которым должен протекать электрический туннельный ток (как показано на рис. 6.16), имеющий сложную физическую природу (наложение или иное взаимодействие электронных орбиталей между атомами образца и зонда). Такие процессы, естественно, очень сильно зависят от расстояния между зондом

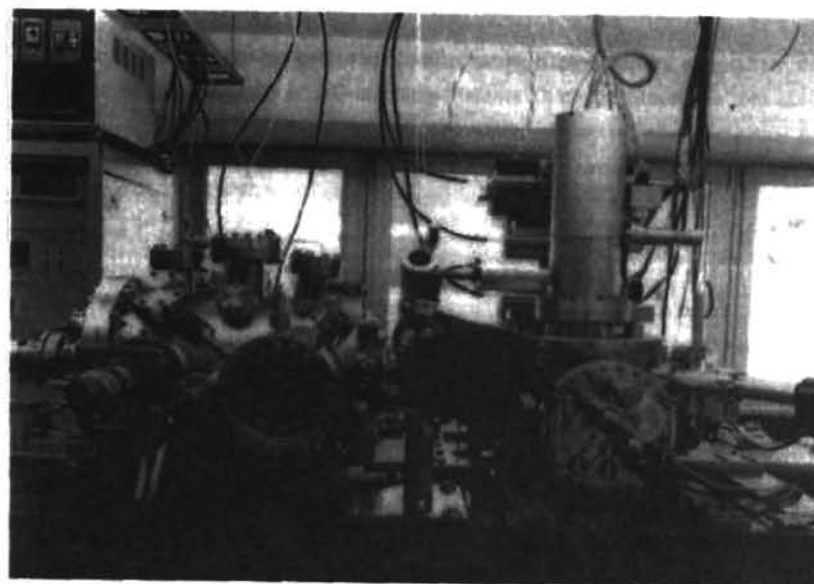
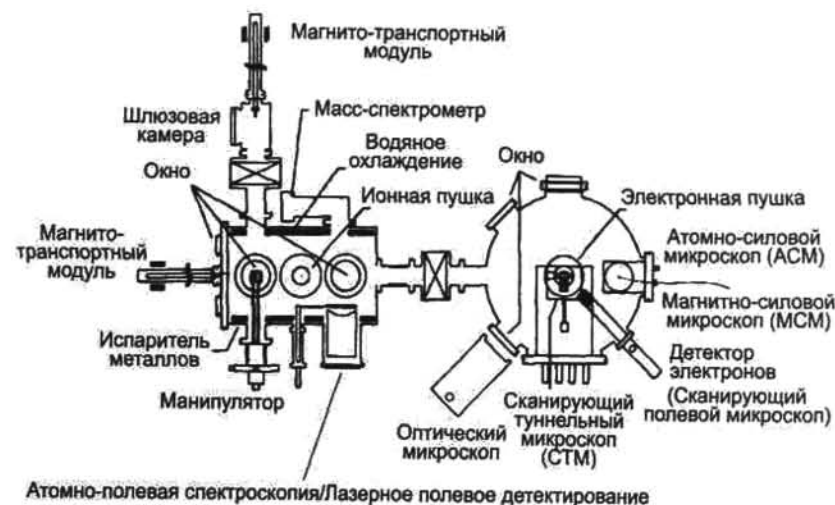


Рис. 6.12. Вверху показана общая схема многокамерной высоковакуумной установки с рядом требуемых приспособлений для анализа. Внизу приведена фотография реально действующей установки этого типа (для работы с чистыми материалами применяется вакуум с давлением порядка  $10^{-12}$  мбар)

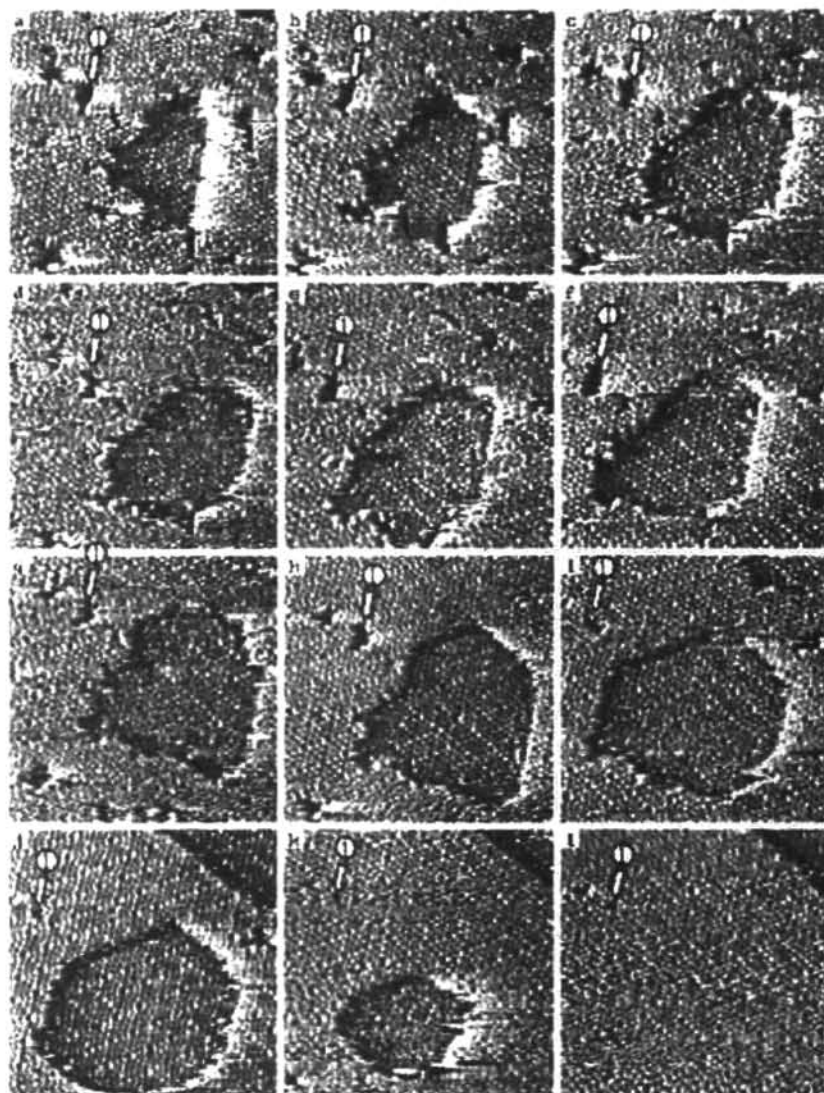


Рис. 6.13. Изображения участка поверхности кремния ( $30 \text{ нм} \times 30 \text{ нм}$ ), частично покрытого оксидами, полученные на туннельном микроскопе при измерениях в диапазоне температур от 980 до 1000 К. Можно отметить исчезновение дефектов с поверхности кремния при увеличении температуры

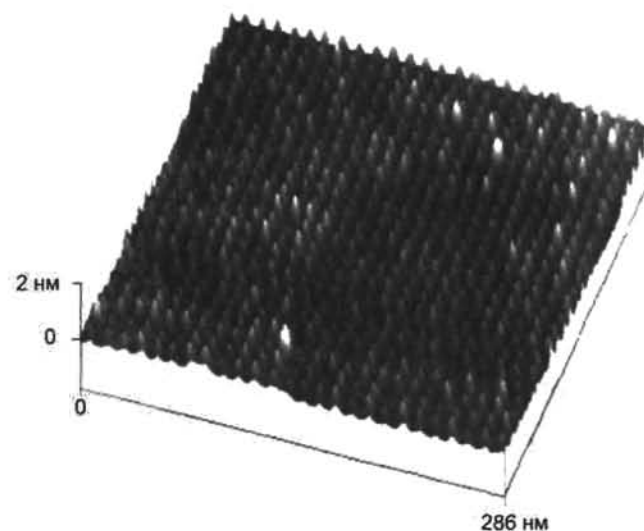
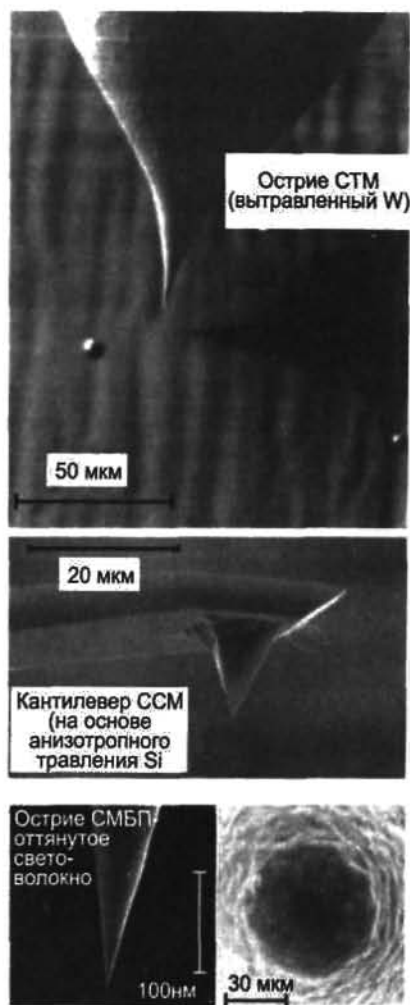


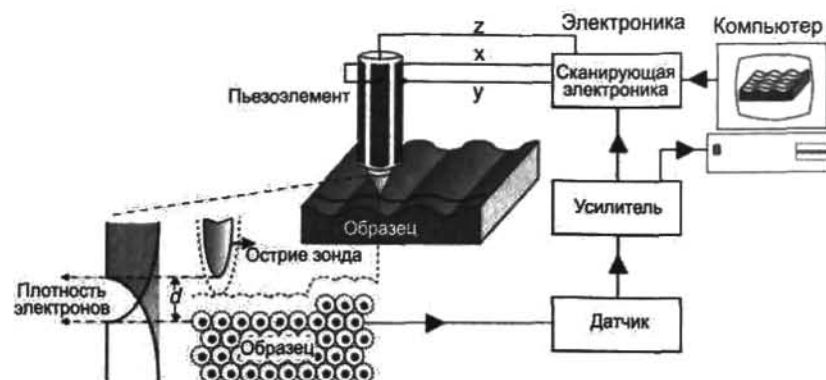
Рис. 6.14. Выделяемые в электролите электрохимическим способом нанодоты (микрочастицы) меди на поверхности (111) монокристалла золота. Рисунок показывает, что сканирующие зондовые микроскопы можно применять для изучения не просто жидких, но и электролитических систем. В основе метода лежат процессы массообмена с высокой воспроизводимостью, позволяющие выделять почти одинаковые частицы металла в больших количествах

и образцом, что, собственно говоря, и используется для регистрации очень небольших отличий в межатомных расстояниях. На этом принципе и основаны описываемые микроскопы, позволяющие при очень высокой точности регистрации значения тока получать близкие к реальности атомарные структуры на поверхности образца и даже угадывать закономерности их строения с атомарной точностью.

Более того, используя в качестве зонда специально изготовленный гибкий элемент (рис. 6.15), можно даже определить строение топографических структур на поверхности образца, измеряя локальные отклонения такого элемента. Поведение такого гибкого элемента при построчном «ощупывании» поверхности образца можно сравнить с колебаниями иглы проигрывателя или даже еще первого, классического граммофона, изобретенного Эдисоном. Регистрация отклонений с использованием оптических датчиков дает исследователям информацию об атомном строении



**Рис. 6.15.** Важнейшие виды сканирующей зондовой микроскопии. В верхней части показан зонд туннельного микроскопа, создаваемый путем электрохимического вытравливания металлических материалов. В середине показан изготовленный из кремния гибкий зонд (кантилевер) атомного силового микроскопа. В нижней части представлено изображение сильно вытравленного одномодального стекловолокна, покрытого слоем алюминия, где только в области острия имеется небольшое отверстие для поступления света. Длина волны излучаемого через это отверстие света существенно меньше длины волны подводимого к стекловолокну лазерного излучения (примерно 600 нм)



**Рис. 6.16.** Схема строения сканирующего туннельного микроскопа. В отличие от общей схемы (см. рис. 6.8) зонд выполнен в форме отточенного металлического острия. При расстоянии между острием и поверхностью образца около 1 нм (или даже менее) происходит наложение электронной плотности состояний между зондом и образцом, в результате чего при подаче разности потенциалов (около 1 В или меньше) между ними возникает регистрируемый установкой ток. Провода «построчно» таким зондом над поверхностью, можно получить изображение исследуемой поверхности

поверхности изучаемого объекта, что в некоторых системах позволяет добиться атомного разрешения даже в случаях, когда сама поверхность не является проводящей. Это поразительное достижение объясняется тем, что гибкий зонд (в определенных условиях) может испытывать локальные колебания над поверхностью образца почти любой природы и строения, что позволяет описывать атомы поверхности не только за счет их электрических взаимодействий (EFM — электро-силовой микроскоп), но и магнитных свойств (MFM — магнитно-силовой микроскоп), а также комбинацией этих характеристик. На рис. 6.17 представлена общая схема такого сложного сканирующего микроскопа, основанного на регистрации физических сил различного типа, а на рис. 6.18 представлено полученное таким образом изображение поверхности жесткого магнитного диска для записи информации. Использование MFM (магнитно-силового микроскопа) в этом случае позволяет получить изображение структур, соответствующих записи магнитных информационных единиц (битов). Взаимодействие между магнитным зондом и жестким диском при измерениях было достаточно сильным, так что магнитный зонд силового





Рис. 6.17. Схема строения сканирующего атомно-силового микроскопа. В отличие от общей схемы (рис. 6.8), зонд представляет некий гибкий элемент (консоль, рычаг, кантилевер), способный при достаточно маленьком расстоянии над поверхностью образца в статическом состоянии или при возбуждении резонансной частотой регистрировать силы межатомного взаимодействия. В особых режимах эксплуатации микроскопа, между зондом и образцом специально допускается временный или длительный контакт

микроскопа в экспериментах сканировал поверхность образца на высоте нескольких нанометров. В настоящее время сканирующая силовая микроскопия (уже имеющая много вариантов эксплуатации), по-видимому, является самым универсальным и важным аналитическим методом в исследовании наноструктур вообще.

Используя в качестве локального зонда остро отточенное стекловолокно, в котором лазерное излучение может выходить лишь сквозь небольшое отверстие на кончике зонда, можно создать устройство более сложного типа, называемое сканирующим микроскопом ближнего поля (СМБП), схема которого представлена на рис. 6.19. Благодаря тому, что свет испускается из отверстия, размеры которого меньше длины волны исходного излучения, а сам нанометровый источник находится очень близко к поверхности исследуемого образца (от нескольких нм до нескольких десятков нм), возникающее оптическое изображение не имеет ограничений при отражении. Иными словами, прибор позволяет получать оптические изображения структур, параметры которых значительно меньше, чем длина волны

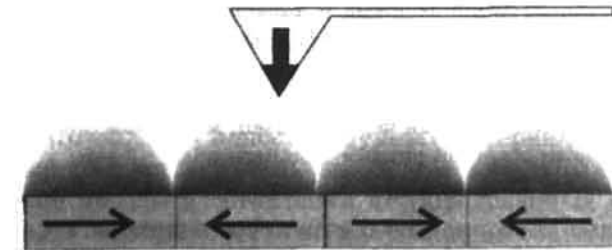
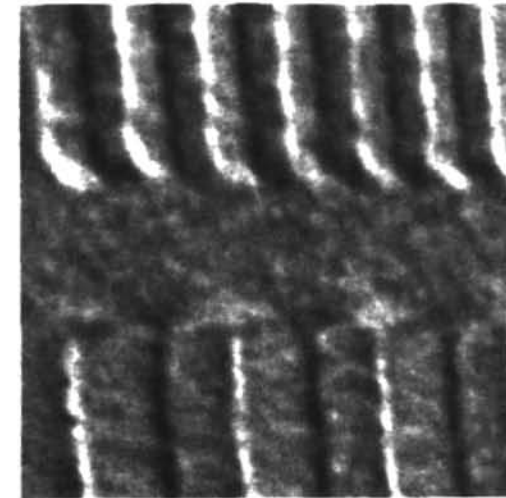


Рис. 6.18. Изображение структур, соответствующих единицам информации (битам) на поверхности намагниченного жесткого диска, полученное посредством сканирующего магнитно-силового микроскопа, регистрирующего магнитные взаимодействия между зондом и участками диска с различной намагниченностью, схематически показанными в нижней части рисунка

используемого света! Не стоит даже говорить об огромных возможностях такой методики в самых разных областях.

Разнообразные методические разработки в области сканирующих зондовых методов уже позволили получить множество важных и интересных результатов. Представление о современном состоянии исследований в этой области могут дать некоторые публикации, список которых приведен в конце книги (Güntherodt и Wiesendanger, 1992–1994; Wiesendanger, 1994; Chen, 1993; Wiesendanger, 1998).

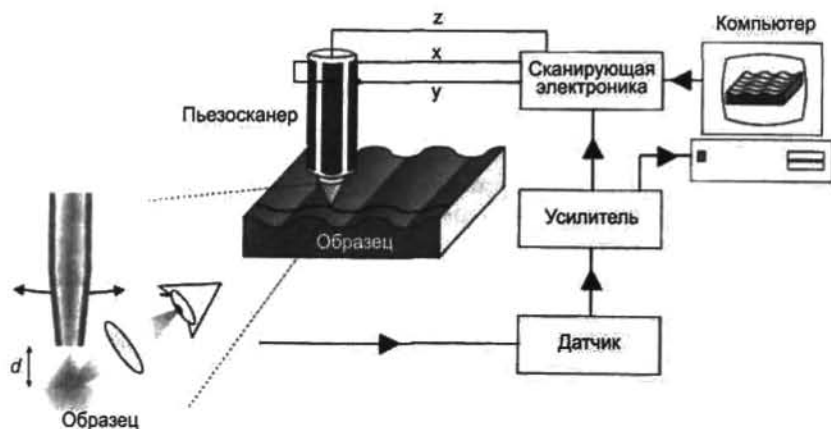


Рис. 6.19. Конструкции сканирующего оптического микроскопа ближнего поля. По общей схеме он напоминает обычный сканирующий микроскоп (рис. 6.8), однако существенное отличие связано с тем, что зонд выполнен из стекловолокна и имеет резко зауженный наконечник. Боковые поверхности волокна покрыты слоем алюминия, препятствующего испусканию света наружу, в результате чего свет, отраженный от образца при незначительном расстоянии между зондом и образцом или проходящий через образец, может позднее регистрироваться методами обычной оптики дальнего поля

**Выводы:** Информацию о структуре вещества в нанометровом масштабе, в принципе, можно получить, используя рентгеновские и микроскопические методы. Индивидуальное строение наноструктур можно исследовать только с помощью сканирующих методов (STM, SFM, MFM, SNOM, SEM и т. д.). Микроскопический анализ можно проводить на различных пространственно-временных уровнях свойств, причем стоит отметить, что практически не существуют методы, обладающие одновременно очень высоким и пространственным, и временным разрешением. Сканирующие методы базируются на единой аппаратной концепции, в которой центральную роль играет использование пьезоэлектрического элемента для определения положения зонда относительно поверхности образца, что, вследствие очень небольших расстояний, требует использования сложных, замкнутых контуров управления. Методы сканирующей микроскопии обладают огромными перспективами как для исследования наноструктур, так и для контроля промышленного производства.

## 6.2. Методы изготовления наноструктур

Говоря о возможных стратегиях производства наноструктур, следует четко различать исходные материалы и индивидуальные компоненты. Некоторые из стандартных компонентов (например, фуллерены) могут использоваться как самостоятельно, так и для создания более сложных объектов (нанослоев и т. п.). Отдельные наночастицы, в определенном смысле, также можно рассматривать как в качестве «рабочих» компонентов или материалов, так и в качестве специальных устройств и элементов (например, для направленной доставки лекарственных препаратов, маркеров для анализа биомолекул и т. п.). При этом следует проводить принципиальное различие между физическими и химическими методами изготовления структур. Очень развитые химические методы охватывают классические приемы коллоидной химии, а также новейшие подходы, например использование мицеллярных микроэмульсий. Обычно цель заключается в синтезе частиц данного соединения, включая и органические частицы с заданным диаметром и возможно более узким распределением размеров самих частиц.

При изготовлении наноструктурных материалов используется целый ряд вспомогательных подготовительных методик. Физические методы изготовления неупорядоченных наноматериалов часто сводятся просто к уплотнению (и соответствующему упрочнению), для чего порошки исходных материалов (обычно различных металлов) измельчаются в шаровых мельницах, а затем полученный материал уплотняется под высоким давлением и отчасти при нагреве. Этот способ позволяет уже сейчас получать наноструктурные материалы с почти максимальной достижимой плотностью, то есть с очень высокой степенью уплотнения. Еще один физический метод изготовления неупорядоченных наноструктурных материалов заключается в «закаливании» расплава, когда расплав требуемого состава охлаждается настолько быстро, что получаемое вещество не «успевает» образовать кристаллическую структуру.

Наноструктурные слои можно, в принципе, получать также путем известных методов микроэлектроники и техники микросистем, базирующихся на выделении фаз газа и жидкости. Интерес также представляют электрохимические методы выделения. Скорее к химическим методам получения наноструктур-

ных материалов следует отнести разнообразные и весьма перспективные методы золь-гель, а также методы с использованием различных полимерных систем. Из самых современных методов получения наноструктур стоит особо отметить известные в химии супрамолекулярные или сверхмолекулярные системы, в которых вещество формируется за счет привязывания огромных полимерных образований друг к другу с помощью более маленьких молекул. Этот подход является очень общим и его использование может привести в будущем к революционным изменениям в разработке и производстве новых материалов.

Смешанные методы изготовления индивидуальных компонентов в нанометровом диапазоне, прежде всего, охватывают известнейшие методы изготовления микроэлектронных и микромеханических устройств, тем более, что в лабораторных условиях уже достигнуты очень высокие границы разрешения (в данном случае, точности изготовления деталей) многих процессов. Например, использование электронно-лучевой литографии вместо оптической (которая сейчас широко применяется в микроэлектронике) позволяет изготавливать компоненты с характерными параметрами значительно ниже 100 нм, что приближается к требованиям систематического исследования свойств наноструктур. Даже если эти исследовательские методики не могут быть прямо перенесены в производство и приспособлены для технологических процессов, комбинирование необычных методик, нестандартных и молекулярных структур представляется специфически нанотехнологической задачей. Например, производимые обычным способом микромеханические вибраторы из кремния можно покрыть слоем соответствующих органических или биологических молекул, и создать на этой основе высокочувствительные биохимические датчики. Подчеркнем, что ни методы изготовления, ни молекулярные продукты в этой ситуации не являются специфическими новыми или оригинальными, а вся инновация заключается в комбинировании средств и методик.

В принципе, ситуация в области изготовления отдельных наноструктур (или основанных на них целых систем) характеризуется тем, что почти все используемые технологии базируются на достижениях микроэлектроники или микромеханики и по своей сути являются (на жаргоне технологов) планарными, то есть подразумевают сложные и хорошо изученные процессы

создания «плоских» структур. В настоящее время не существует стандартных стратегий для производства любых трехмерных молекулярных структур на основе описанных выше подходов *сверху – вниз* или *снизу – вверх*. Инновационные подходы в этой области исследований могут возникнуть, прежде всего, на пути совершенствования уже известных структурных методов или их комбинации с новыми, необычными материалами, в особенности, с новыми типами покрытия поверхностей. В настоящее время, соответственно, подход *снизу – вверх* при изготовлении целостных наноструктур или важных компонентов не имеет практических применений.

**Выводы:** Существует большой набор хорошо изученных физических и химических методов изготовления наноматериалов, нанослоев, наночастиц и т. д. Инновационные подходы в этой области могут быть связаны, в первую очередь, с изучением роли структурных параметров и их целенаправленным регулированием и контролем. Исключительно новым можно считать, по-видимому, лишь развитие и техническое использование новейших методов полимерной и супрамолекулярной химии для синтеза материалов с необычными свойствами. В настоящее время многие исследования связаны с повышением эффективности уже известных методик, а также поиском нестандартных комбинаций новых материалов с известными методиками, особенно в области материаловедения и создания поверхностей с новыми функциональными характеристиками.

### 6.3. Проблемы организации промышленного производства

В сущности, наноструктурные материалы и наночастицы уже давно производятся и используются в различных промышленных производствах (нанопористые фильтры, материалы для фотографии, полистирольные шарики для электронной микроскопии и многое другое). Нанометровые размеры многих промышленно выпускаемых материалов и частиц играют важнейшую роль в их использовании, но само применение наноматериалов в практических целях (как уже отмечалось выше) не является чем-то принципиально новым или необычным. Строго говоря, истинную значимость НТ (для промышленности и общества вообще) скорее можно усмотреть в новых перспективах,



функциональных возможностях и методиках, описанных выше в главах 4 и 5.

Говоря о возможностях промышленного производства, разумеется, следует проводить четкую грань между современным состоянием развития НТ и прогнозами, относящимися к ближайшей, более далекой и долгосрочной перспективе. Решающим для организации любого промышленного производства является наличие препаративных и аналитических методов, позволяющих создавать те или иные компоненты или материалы в достаточном количестве, а также, конечно, обеспечивать необходимую точность воспроизведения в заданном интервале параметров. Поэтому неудивительно, что современная нанотехнология во многом базируется на методах, материалах и стратегиях, которые уже давно известны, хотя, конечно, некоторые методики (особенно, относящиеся к связям между размерами объектов и их свойствами) были существенно развиты и усовершенствованы. Примером бурного развития нанотехнологии может служить наблюдающийся в последние годы постоянный рост объема производства порошков окиси титана (используемых в косметической промышленности, например в средствах защиты кожи от солнца) новых фармацевтических препаратов в виде гормонов на основе специальных носителей и т. п. Даже если методы изготовления и используемые в производстве материалы не могут считаться специфически новыми, инновационный характер технологических решений в новых производствах часто возникает просто благодаря целенаправленному использованию новых явлений, непосредственно связанных с наноструктурами. Еще одним нестандартным примером применения новых технологий могут служить исследования в области так называемого гипертермического воздействия на раковые опухоли, при котором используются наночастицы окиси железа, подвергаемые воздействию магнитного поля. Гипертермия, собственно говоря, вовсе не относится к новым медицинским методикам (как, впрочем, и используемые для нее наночастицы оксидов и методы их синтеза, давно известные в физике и химии). Речь идет о том, что возникший на основе комбинации всех этих методик подход можно смело отнести к инновационным, поскольку он позволяет совершенно по-новому использовать давно известные вещества и процессы. Новое знание (и возможности

его применения) возникает в данном случае лишь на основе новых представлений о процессах перематничивания малых частиц окиси железа, а также выработки новых биологических стратегий, стимулирующих накопление требуемых частиц внутри опухоли.

Промышленный аспект НТ представлен сегодня в значительной мере в функциональных возможностях поверхностей материалов. Уже давно возник термин «эффект лотоса» для обозначения свойств поверхностей с очень высокими специфическими характеристиками наноконпозиционных материалов с минимальными включениями углеродных наночастиц (например, нанобетонов с углеродными нанотрубками). Такие поверхности (существующие в природе) практически не смачиваются и одновременно обладают целым рядом других интересных свойств (бактерицидность, отсутствие реакции на отпечатки пальцев, повышенная твердость и т. д.), что позволяет исследователям придавать им дополнительные свойства и функциональные характеристики за счет новых методов обработки. Еще одним примером такого подхода может служить осаждение частиц серебра в различных вариантах. Бактерицидное действие серебра известно с давних пор, но инновационный характер применения НТ заключается в том, что наночастицы серебра могут быть использованы в форме новых комбинированных материалов, в которых соединение отдельных составляющих (каждая из которых является известной) вдруг приводит к формированию поверхностей с неожиданными функциональными свойствами. К этой же категории материалов следует отнести краски и лаки с новыми оптическими и физическими свойствами (гидрофобные, грязеотталкивающие покрытия и т. п.), а также некоторые новые типы нанопокровов для текстильных изделий.

По отношению к более ранним методам изготовления всех этих разнообразных материалов (от рубиновых стекол до фотоматериалов, в которых наноразмерные вещества или структуры использовались очень давно) существенным фактором выступает именно целенаправленное использование взаимосвязи между величинами и свойствами для достижения большой эффективности при заданных технических условиях. Возможно, именно осознанное развитие стандартных технологий в сторону умень-



шения масштабов и отличает то, что мы хотим называть нанотехнологией, от стандартного и интуитивного использования веществ, имеющих нанометровые размеры. Стандартные технологии изготовления наноматериалов (без использования соответствующей терминологии, научной базы и даже представления о НТ) существовали с давних времен, но сейчас они получают новый импульс для развития на основе новейших научных достижений.

Разумеется, гораздо сложнее выглядит ситуация с производством не материалов, а отдельных наноразмерных объектов и структур, поскольку современные подходы базируются, в основном, на создании планарных элементов микроэлектроники и ограничиваются комбинацией известных методов с необычными материалами или на создании поверхностей с новыми функциональными особенностями. Революционный прорыв может быть связан, например, лишь с созданием необычных электронных компонентов из отдельных молекул, причем по технологии, которая, возможно, уже давно как-то применяется в промышленном производстве. Читатель должен четко представлять себе, что многие квантово-физические явления уже очень давно и очень эффективно используются в электронике и радиофизике. Сказанное относится, например, к лазерам, множеству полупроводниковых устройств (действие которых основано на квантовой теории, описывающей электронную зонную структуру веществ) и даже к кабелям или генераторам из сверхпроводящих компонентов. Во всех этих случаях нанотехнология (в узком смысле) подразумевает намеренное использование свойств, вытекающих из наноразмеров используемых элементов. Другими словами, мы должны отличать действительно «новые» технологии от просто инновационных, исходя из принципов действия и используемых методов.

В электронике наиболее перспективным нанотехнологическим продуктом общего назначения (практически готовым к внедрению в массовое производство) являются, по-видимому, так называемые туннельно-магнитные резисторы, представляющие, по существу, простую комбинацию из двух ферромагнитных слоев, разделенных слоем изолятора (барьером) толщиной около нанометра. При подаче напряжения на внешние слои часть электронов из этих слоев начинает «проскакивать» через

изолирующий слой благодаря квантовому туннельному эффекту. Характерной особенностью новых устройств является то, что величина возникающего туннельного электрического тока может достаточно эффективно регулироваться напряженностью прилагаемого внешнего магнитного поля. В связи со сказанным следует отметить, что изолирующие слои новых устройств получают стандартными техническими приемами микроэлектроники, а туннельный эффект экспериментально и теоретически изучается физиками уже десятки лет, задолго до первого упоминания о НТ. Инновация в данном случае связана с тем, что технологи научились анализировать, контролировать и изготавливать слоистые системы из ферромагнетиков нанометрового размера, и одновременно измерять с очень высокой точностью характеристики электронных транспортных потоков (магнитное туннельное сопротивление) в зависимости от приложенного магнитного поля и условий среды. Комбинация этих достижений и позволяет создать устройства нового типа, имеющие огромные перспективы коммерческого использования в различных областях информационных технологий, в датчиках новых типов и т. п. Этот пример наглядно показывает, что развитие и внедрение НТ может и должно сегодня базироваться, скорее, не на фантастических открытиях, а на существенном усовершенствовании и комбинировании методик и технологий, некоторые из которых известны уже десятилетия.

В будущем можно ожидать развития абсолютно новых методических и технических подходов в области так называемой наносистемной техники (наноэлектромеханические устройства, НЭМС), которые могут иметь важное промышленное значение. По-видимому, решающую роль при этом будут играть методики типа *снизу – вверх*, поскольку они допускают массовое производство многих ключевых компонентов (например, фуллеренов, полимеров, супрамолекулярных структур и т. п.), которые можно будет комбинировать с другими компонентами, создавая единые и сложные структуры. Интересно отметить, что «объединение» этих наноустройств с макроскопическим окружением, возможно, будет осуществляться с использованием противоположного подхода (то есть типа *сверху – вниз*). Решающим моментом в организации промышленного производства наноструктур и наноматериалов может оказаться именно обнаружение

оптимальной стратегии синтеза за счет удачного комбинирования технологических процессов типа *сверху – вниз* и *снизу – вверх*.

**Выводы:** Нанотехнологические производства сегодня, по существу, основаны на свойствах наноматериалов и технологических подходах, известных уже десятилетиями. Инновационный аспект сейчас заключается в целенаправленной разработке стандартных методов с целью получения новых эксплуатационных характеристик, причем решающую роль в этом играют новые комбинации методов и материалов (например, сочетание микроэлектронных и биохимических технологий). В будущем могут возникнуть и новые методы промышленного производства, особенно связанные с синтезом супрамолекулярных материалов и объектов. В области производства наноконструкций стоит отметить важную роль комбинирования стратегий, то есть поиска соответствий между технологиями и их разумным «перемешиванием» или сочетанием.

## Перспективы экономического развития НТ

---

### 7. Применение НТ

Постоянно возрастающий интерес к возможностям НТ объясняется, прежде всего, их двумя следующими особенностями. Во-первых, новые технологии чрезвычайно привлекательны в силу своей объединяющей, «собирающей» природы, так как НТ возникли на основе и в результате развития новейших технических областей, типа биотехнологии и микроэлектроники. С другой стороны, если предположить, что основы НТ действительно не противоречат законам природы, то потенциал и технические возможности НТ, вообще говоря, представляются фантастическими. Разумеется, для развития и реального применения НТ необходимо существенно повысить уровень наших знаний о законах природы, что, возможно, потребует длительного развития науки, не говоря уже о том, что результаты развития новых технологий и идей почти наверняка будут существенно отличаться от планов и желаний футурологов и экспертов. История науки и техники постоянно демонстрирует нам примеры значительной разницы между потенциальными целями и реальными достижениями.

Огромная роль НТ в наши дни связана не столько с уже достигнутыми результатами и конкретными применениями, а с множеством потенциально предлагаемых возможностей, которые могут означать переоценку многих приоритетов в науке и технике. Реальные перспективы НТ очень сложно оценить, ввиду междисциплинарного характера исследований и их возможных научно-технических применений. В сущности, сейчас идеи и возможности НТ широко «разбросаны» по различным наукам и у нас нет четких критериев их объединения.

## 7.1. Электроника и информационные технологии

Прежде всего, следует привести несколько цифр, свидетельствующих о масштабах рассматриваемых и обсуждаемых производств. По данным на 2005 год объем рынка только электронных компонентов составлял более 250 миллиардов долларов, а всех коммерческих продуктов на основе микроэлектроники — более 1,5 триллиона долларов. Примерно 95% всех интегральных схем сейчас производятся на основе кремниевых технологий, так что в 2002 году было обработано 27 миллиардов квадратных сантиметров кремния (это соответствует площади примерно 500 футбольных полей), и только стоимость исходных материалов равна около 6 миллиардов долларов. Эти невероятные по стоимости и масштабам результаты были достигнуты за счет продолжавшегося десятилетия процесса неуклонной миниатюризации электронных устройств и компонентов. Важнейшими вехами на этом пути явились, как известно, разработка первого компьютера на основе электронных ламп (ENIAC, 1945), изготовление первого транзистора (Bell Laboratories, 1947), выпуск первого компьютера на транзисторах (TRADIC, 1955), разработка первой интегральной схемы (Texas Instruments and Fairchild Semiconductor, 1959), появление первого миникомпьютера (DEC, 1965) и, наконец, сборка микропроцессора (Intel, 1971).

Грубо говоря, один мегабит памяти в запоминающем устройстве (чипе) 1973 года обходился потребителю в 75 000 долларов, а за следующее десятилетие его стоимость снизилась до 90 долларов. В 1995 году она составляла уже 3 доллара, а сегодня равна всего 5 центам. Эта тенденция легко объясняется действием упомянутого в главе 3 закона Мура, в соответствии с которым количество транзисторов на одном чипе примерно удваивается за каждые 18 месяцев. Действительно, в 1970 году число транзисторов на чипе составляло примерно 4000, через двадцать лет — около миллиона, а к 2007 году на один процессор приходился почти миллиард транзисторов. Этому невероятному росту плотности компоновки полупроводниковых схем сопутствовало постоянное уменьшение характерных размеров самих схем, в результате чего достигаемая сегодня структурная топологическая сложность интегральных схем в чипах составляет миллиарды элементов. Специалисты считают, что вследствие этого в ближайшие десятилетия будут созданы чипы, содержащие до 100 миллиардов транзисторов. Это означает, что в течение десятилетия количество транзисторов на чипе увеличится в 10 раз. Таким образом, в течение десятилетия количество транзисторов на чипе увеличится в 10 раз. Таким образом, в течение десятилетия количество транзисторов на чипе увеличится в 10 раз.

зится примерно

ка схема будет содержать всего

Основой современных процессов изготовления микросхем (как и почти 50 лет назад) остается фотолитография, которая сегодня имеет дело с длинами волн в глубоком ультрафиолете (193 нм, дальний ультрафиолет). Переход к следующей ступени в 157 нм уже начался и найдет применение примерно к 2008 году, и очевидно, что в следующие годы начнет применяться литография с невероятно высоким по частоте ультрафиолетовым излучением (11–13 нм). Разумеется, следует учитывать, что в новых методиках нельзя будет использовать многие классические оптические элементы (например, линзы), и вместо них появятся специальные зеркала.

В 60-е годы размеры используемых пластинок кремния составляли, как правило, 30 мм и лишь иногда достигали 38 мм. В настоящее время высококачественные кремниевые пластины производят лишь три фирмы в мире (причем только одна из них, Wacker Siltronic, не является японской), и они умеют создавать пластины размером до 300 мм. Легко понять, что простое увеличение размеров от 200 до 300 мм позволяет значительно (в 2,25 раза) повысить экономический эффект их использования, так как такое увеличение площади позволяет произвести более чем вдвое большее число чипов при практически идентичных темпах и методах обработки. Будучи одной из ведущих организаций в данной области, немецкая фирма Infineon (финансируемая Дрезденским банком) в конце 2001 года занялась производством кремниевых пластин размером 300 мм, что потребовало инвестиций в размере 1,1 миллиарда евро. Результатом этой инициативы стало производство запоминающих чипов (SDRAM) емкостью 256 мегабит, в которых на площади в 64 мм<sup>2</sup> размещается 540 миллионов элементов. В 2004 году фирма Wacker Siltronic ввела в эксплуатацию производственную линию во Фрайберге, производящую до 60 000 пластин размером 300 мм, а запланированный объем производства должен достигать 150 000 пластин в месяц. Крупнейшим в мире рынком сбыта и использования таких кремниевых пластин является Тайвань.

Исключительно быстрое техническое и экономическое развитие микроэлектроники, в сущности, было обусловлено положительной обратной связью: электроника помогает развивать саму электронику, а компьютеры помогают создавать новые



типы компьютеров. В такую цепочку отношений (с положительной обратной связью) должны быть интегрированы и любые новые подходы, особенно связанные с НТ. Представляется очевидным, что любые конкретно запланированные разработки должны основываться на тех, уже существующих стратегиях производства и принципах функционирования, и на той базе, которые позволяют осуществлять дальнейшее уменьшение топологических размеров. Уже сегодня некоторые отдельные параметры элементов электронных устройств (например, ширина каналов в полевых транзисторах), несомненно, могут быть отнесены к области нанотехнологий. В этих ситуациях дальнейшее повышение точности элементов не требует смены парадигм в отношении принципов действия этих элементов, а сводится лишь к очень или исключительно сложным техническим проблемам (например, при разработке подходящих литографических методов и т. п.). В этом смысле и общем направлении развития микроэлектроника, непрерывно совершенствуясь, постепенно перерастает (точнее, превращается) в наноэлектронику.

Именно поэтому микроэлектроника, представляющая собой огромный сектор мировой экономики и промышленности, не может за исторически короткий срок делать ставку на новые принципы работы или использование абсолютно новых материалов. Огромные инвестиции в полупроводниковую промышленность предполагают некоторые гарантии планирования и экономической стабильности финансируемых производств (то есть в отношении конфигурации и принципов действия выпускаемых изделий), что практически исключает очень быструю реализацию новаторских идей и технических проектов гигантских масштабов. С практической точки зрения, нанотехнологии могут приобрести реальную значимость лишь после их совмещения с уже существующими производственными процессами, что требует длительного, эволюционного пути развития.

С другой стороны, необходимость смены парадигм в конкретных направлениях становится неизбежной, так как НТ действительно иногда имеют огромные преимущества перед классическими подходами микроэлектроники, и в некоторых частных областях эти преимущества являются сегодня абсолютно очевидными. Например, исследователям и технологам совершенно очевидными представляются огромные возможности промышленного применения фуллеренов (и вообще, углеродных нанотрубок), а разработки эмиттеров электронов в плос-

ких мониторах на этой основе уже находятся в стадии практического проектирования. Еще один пример конкретной смены парадигмы в выделенном направлении связан с созданием запоминающих устройств (чипов) с ферромагнитными запоминающими ячейками. Такие устройства являются энергетически независимыми (то есть сохраняют информацию при отключении питания и способны к «мгновенному» запуску). Более того, они остаются энергонезависимыми и при дальнейшем уменьшении размеров (расчеты показывают, что нижняя граница их величины может быть доведена примерно до 25 нм), что позволяет продолжать их миниатюризацию. Коммерческий выпуск таких устройств был начат в 2004 году, и они могут стать важным компонентом при разработке так называемых реконфигурируемых логических элементов. В современных микропроцессорах транзисторы как бы жестко «прошиты», что не позволяет изменять схемы их включения для решения новых задач, поэтому существенным прогрессом в этой области является создание схем переключения транзисторов для быстрого реконфигурирования разных систем (например, образования видеопроцессоров из аудиопроцессоров), что стало бы настоящей революцией в производстве множества устройств.

Важнейшую роль в дальнейшем развитии оптоэлектронных компонентов электроники играет невероятный рост объема потоков данных в Интернете. При создании сети Интернет пропускная способность его линий составляла около 1 терабита в секунду ( $10^{18}$  бит/с, что соответствует примерно содержанию 300 000 книг обычного формата), но увеличение объема информационных потоков происходило настолько стремительно, что уже в 2005 году в США началось использование частотных полос с пропускной способностью около 280 терабит/с. С другой стороны, управление такими большими массивами данных может осуществляться только на основе оптоэлектронных устройств, что, конечно, придает огромную значимость разработкам и проектам промышленного производства лазерных диодов, а также подразумевает развитие целого ряда новых НТ.

В целом, эксперты предсказывают в ближайшее время развитие целого ряда инновационных проектов, связанных с практическим использованием НТ, среди которых следует отметить следующие:

- — непрерывный и незаметный контроль за важными для здоровья функциями организма;



- информационные, коммуникативные и развлекательные приборы личного пользования с расширенными мультимедийными функциями (вплоть до создания индивидуальной виртуальной среды);
- безопасное и точное распознавание различных биометрических признаков;
- обеспечение повышенной безопасности автотранспорта за счет внедрения полного контроля состояния на дорогах;
- обеспечение безопасности и электронного оснащения среды обитания;
- создание простых и надежных связей между человеком и техническими устройствами.

**Выводы:** В ближайшем и скором будущем в электронных и информационных технологиях следует ожидать широкого внедрения новых материалов в устройствах, методы и принципы действия которых не будут существенно отличаться от современных. Речь идет, прежде всего, о широко используемой сегодня так называемой кремниевой технологии, в которой практически уже применяются методики и достигаются параметры, которые мы относим к НТ, причем смена парадигм развития при этом часто вовсе не является обязательной. Нанотехнологии уже позволяют получать новые коммерческие продукты, хотя очень трудно предсказать, когда будут реализованы самые новаторские подходы, относящиеся, например, к синтезу органических и биологических материалов или созданию так называемых квантовых компьютеров. Можно быть уверенным, что подобные технологии станут экономически рентабельными и быстро найдут широкие и разнообразные практические применения.

## 7.2. Химические методы в разработке наноматериалов

Вообще говоря, химия естественно связана со строением космоса, хотя бы потому, что любые вещества и их взаимодействия связаны с атомами и молекулами, которые являются типичными нанообъектами по своим размерам. Отметим, что обычно именно химия позволяет производить не только наноструктурные материалы, но и различные элементы и системы, придающие веществам новые свойства и возможности новых применений, что позволяет рассматривать ее в качестве ключе-

вой отрасли для развития нанотехнологий вообще. Как уже упоминалось, коллоидная химия является прямым предвестником НТ, так как в ней рассматриваются системы частиц с размерами в диапазоне от нескольких нанометров до примерно одного микрона. Более того, изготовление наночастиц в виде пигментов или дисперсий уже имеет многовековую историю развития.

Производство синтетических наночастиц уже сейчас оценивается тоннами, а объем продаж в этой области к 2002 году составил 40 миллиардов долларов, даже без учета прибавочной стоимости. Огромную роль в современной промышленности имеет также производство полимерных дисперсий (объем рынка составляет примерно 15 миллиардов долларов), катализаторов, органических и неорганических пигментов, так называемых микрокомпонентов (например, растворимые витамины) и т. д.

Наиболее важным продуктом коммерчески производимых наночастиц являются, по-видимому, водные полимерные дисперсии (например, дисперсии мелких частиц синтетических веществ), которые отличаются разнообразием свойств и применений. В стоимостном отношении их производство составляет около 38% всего объема выпуска синтетических наночастиц. Не менее внушительно выглядят абсолютные цифры объема производства, так как в 2002 году было выпущено примерно 11 миллионов тонн водных полимерных дисперсий, которые широко используются в производстве бумаги, красок, клея, лаков, полимерных изделий и т. п.

Еще одно обширное поле применений химии в НТ связано с созданием функциональных характеристик на уровне частиц и с сочетанием неорганических, полимерных и других составляющих в отдельных элементах и структурах. В сущности, можно говорить даже о наноморфологии материалов, например при нанесении неорганических частиц на поверхность полимеров или внутрь их структуры. В рамках существующих технологий уже сейчас можно изготавливать достаточно сложные и интересные в практическом отношении наноконструкты, например, создавать упоминавшиеся выше наноструктурные слоистые материалы с биоцидным эффектом и такой структурой, при которой биологически активные компоненты не могут исчезнуть или раствориться. Например, биоцидный эффект может быть связан с использованием наночастиц серебра. [В самое последнее время

появилась информация об очень интересных перспективах использования наночастиц серебра в медицине. См. заметку «Серебро атакует ВИЧ» в «Российской газете» от 16.01.08. — *Прим. ред.*]

Безусловно, одной из важнейших областей нанохимии сегодня становится теория и практика катализа, так как нанопористые материалы-катализаторы уже нашли широкое применение и зачастую по эффективности превосходят обычные катализаторы. Кроме того, сейчас в химическую промышленность все шире внедряются методики, связанные с использованием микрореакторов, в которых с участием крошечных смесителей (величиной с почтовую марку), реакционных колб и теплообменников (действующих на основе микрогидродинамики) и т. п. уже удается целенаправленно и надежно осуществлять сложные химические реакции и процессы. Микрореакторы позволяют также с высокой производительностью реализовывать новые методики комбинаторной химии. Во многих странах разрабатываются наноструктурные катализаторы, обладающие очень большими значениями активных поверхностей и высокой эффективностью. Очень большой интерес вызывает использование нанотехнологий для придания новых свойств органическим материалам, например для создания полимеров, обладающих некоторыми свойствами, типичными для металлов. В далекой перспективе эти применения относятся даже к микроэлектронике, но уже сейчас такие подходы могут применяться для создания новых типов печатных плат, легких батареек питания и т. п.

Некоторые специалисты при оценке «химического» уровня состояния экономики используют несколько неожиданный показатель, а именно — коэффициент потребления окиси титана. Дело в том, что степень использования этого вещества достаточно хорошо характеризует общее развитие промышленности данной страны. Порошок окиси титана производится в большом количестве по всему миру уже десятки лет, причем типичная величина частиц лежит в диапазоне 300–500 нм. Оценка связана с тем, что частицы окиси титана представляют собой классические «отбеливатели» в производствах лаков, красок, синтетических волокон, искусственных веществ и бумаги, то есть характеризуют уровень развития достаточно важных областей промышленности. С другой стороны, на примере окиси титана можно отлично продемонстрировать зависимость физи-

ческих свойств частиц, а затем и эффективности их технического использования в современном промышленном производстве.

Дело в том, что наночастицы титана не отражают видимый свет и являются оптически прозрачными, то есть наноразмерные частицы окиси титана выступают в качестве своеобразного, невидимого физического барьера для ультрафиолетовых лучей, что открывает множество возможностей их практического применения за счет снижения вредного для человека воздействия ультрафиолетового излучения. Материалы на этой основе уже стали основой последнего поколения эффективных косметических препаратов для защиты от солнца. В противоположность органическим адсорбентам ультрафиолета, минеральные частицы не впитываются кожей и поэтому отличаются особой стабильностью (характерный размер частиц 10–15 нм). Проблема не сводится лишь к созданию новых косметических препаратов, поскольку множество технических и производственных материалов также деградируют под воздействием ультрафиолетового излучения, особенно в диапазоне длин волн около 315 и 350 нм. Старение материалов проявляется и внутри жилых помещений, так как привычное всем оконное стекло поглощает излучение лишь с длиной волн ниже 350 нм. Использование материалов, содержащих наночастицы окиси титана, позволяет защитить от выцветания не только деревянные, но и текстильные изделия. Новейшие разработки предусматривают защиту от ультрафиолета в материале фольги для пищевых продуктов, упаковки и т. п.

Наночастицы окиси титана имеют большое значение и в области катализа, прежде всего из-за того, что они оптимизируют процессы разложения угарного газа (электростанции, выхлопные газы автомобилей и т. п.). В промышленной химии обнаружилось, что они катализируют построение целых органических систем и являются эффективными катализаторами многих важнейших фотохимических реакций (в частности, индуцированного ультрафиолетовым излучением расщепления в процессах обработки сточных вод и т. д.).

Введение минеральных наночастиц в стекло позволяет получать множество оптических эффектов, что использовали еще древние римляне при изготовлении знаменитых рубиновых стекол. В настоящее время частицы окиси титана уже используются при производстве лаков для автомобильной промышленности, обеспечивая особый цветовой эффект за счет селективного рас-

сеивания синего цвета. Наночастицы из слюды, покрытые тончайшими слоями из оксидов титана и железа (толщиной от 60 до 240 нм), используются в качестве «пигментов жемчужного блеска» не только в автомобильных лаках, но и в косметических целях, причем оттенки цвета определяются толщиной создаваемой пленки. Сочетание нескольких слоев порождает особые оптические эффекты, зависящие от угла зрения. Новейшими типами пигментов для косметической промышленности стали наночастицы оксихлорида висмута, а также кристаллические наносферы из диоксида кремния, покрытые окисью титана или железа. Эти частицы, откладываясь в складках кожи, диффузно рассеивают свет (скрывая морщины и иные недостатки кожи), вследствие чего ведущие косметические концерны в настоящее время все шире используют наночастицы такого рода в своих разработках и продуктах. В более далекой перспективе очень интересным представляется использование наночастиц диоксида кремния, который мог бы найти множество новых применений, поскольку введение таких частиц на поверхность многих синтетических материалов (пластиков) позволяет обеспечить следующие преимущества:

- существенный рост твердости поверхности и так называемой стойкости к царапанию (scratch resistance, твердость по Моосу);
- улучшение многих механических свойств (жесткость, ударная прочность, термостойкость и т. п.);
- повышение стойкости к возгоранию;
- повышение электрического сопротивления и термостойкости.

При этом улучшение свойств пластиков происходит без снижения основных характеристик исходных пластических материалов, то есть при сохранении заданных уровней термо- и погодостойкости, а также сопротивляемости к воздействию химических веществ. Областью практического применения новых покрытий являются производства, связанные с изготовлением прочной мебели, покрытия для автомобилей, оптическая техника и т. п. Частицы диоксида кремния в этих составах имеют размер меньше 50 нм, а содержание окиси кремния в них может даже превышать 50%, но при этом покрытие в целом не становится слишком жестким или вязким, то есть в таких веществах прекрасно комбинируются лучшие свойства органических

ких и неорганических материалов. Эти составы уже нашли и другие применения (например, в создании волоконных связующих материалов), а их первые образцы уже выпускаются коммерчески.

В странах Азии лотос почитается священным растением и даже символом чистоты, прежде всего потому, что поверхность листьев этого растения отталкивает воду, грязь и пыль (см. рис. 7.1), что привлекло к нему особый интерес специалистов,

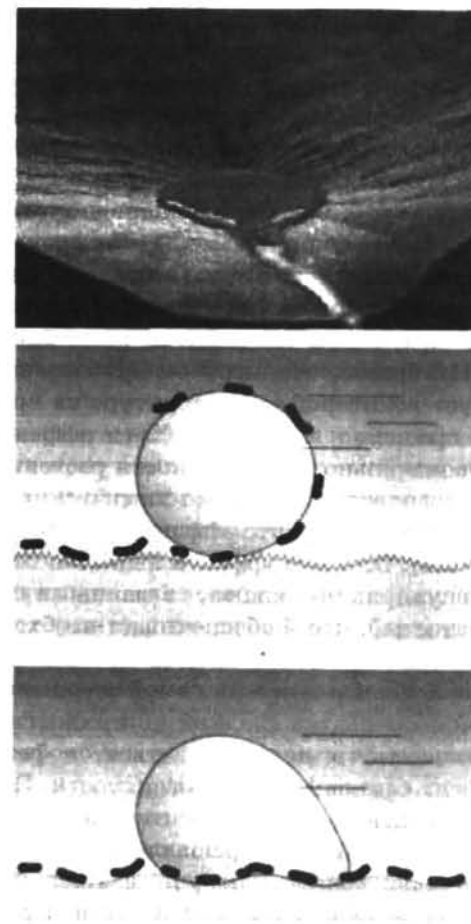


Рис. 7.1. Эффект лотоса заключается в комбинации гидрофобности и самоочистения



связанных с созданием разнообразных поверхностных материалов. Эффект лотоса стал символом целой серии наноструктурных поверхностей, поскольку в нем удачно сочетаются две существенные и очень важные характеристики — повышенная гидрофобность и способность к самоочищению. Гидрофобность проявляется в том, что поверхность лотоса отталкивает воду, в результате чего даже микроскопические капельки воды на таких поверхностях превращаются в круглые «бисеринки», которые при малейшем наклоне скатываются с поверхности, оставляя ее сухой. Так называемый краевой угол (контактный угол, угол смачивания) на таких поверхностях значительно превышает  $140^\circ$ , а в некоторых случаях даже достигает  $170^\circ$ , то есть поверхность практически перестает смачиваться. Вопреки распространенному мнению, самоочищающиеся поверхности типа листьев лотоса являются не гладкими, а имеют сложную, шероховатую структуру, причем неоднородности имеют характерные микро- или даже наноразмеры. На уровне нанометров реальная поверхность листьев лотоса состоит из кристаллов воска (естественно, являющихся гидрофобными) в виде «узелков» высотой в 5–10 мкм, расположенных на расстоянии 10–15 мкм друг от друга. Интересно, что в грубом приближении это строение соответствует некоторой наноструктуре из кристаллов воска диаметром примерно в 100 нм. Хотя эффект лотоса был обнаружен первоначально на поверхности растений, в его основе лежат не биологические, а физико-химические явления (что, кстати, проявляется и в том, что эффект сохраняется даже у высушенных листьев). Основой эффекта является тонкое равновесие между молекулярными силами, связанными с гидрофобностью и шероховатостью, что и обеспечивает необходимое сочетание разнородных свойств. Дело в том, что без гидрофобности вода не удерживалась бы даже на самой шершавой поверхности, но, с другой стороны, на гладкой поверхности капли могли бы только скользить, а не скатываться, в результате чего пропал бы эффект самоочищения поверхности. Этот непростой пример еще раз доказывает, что сочетание химических и физических взаимосвязей играет решающую роль в нанометровом диапазоне, и должно обязательно учитываться при разработке материалов с действительно новыми и нестандартными свойствами.

Многообещающие перспективы в технической реализации и использовании эффекта лотоса заключаются именно в том,

чтобы путем комбинации наночастиц и гидрофобных полимеров (типа полипропилена или полиэтилена) получать сверхгидрофобные материалы и покрытия. Для практического применения очень удобно нанесение на поверхность аэрозолей, при высыхании которых происходит самоорганизация вещества, приводящая к образованию наноструктурного покрытия или слоя. Аэрозоли этого типа уже получили название «лотос-спрей» и их очень удобно использовать, разбрызгивая на любые шероховатые поверхности (включая бумагу, кожу, текстильные изделия и каменную кладку), причем обработка при необходимости может повторяться. Технические проблемы заключаются в том, что контакт аэрозолей со многими водными растворами поверхностно-активных веществ приводит к снижению гидрофобности, а также недостаточному удалению загрязнений, содержащих жиры или масла. Поэтому производимые сейчас покрытия на основе описываемого эффекта пока не являются абсолютно прозрачными и не обладают высокой прочностью (то есть легко стираются), однако стоит отметить, что сейчас разрабатываются материалы, получившие условное название «камень-лотос», в которых эффект не пропадает даже после обработки поверхности шлифовальной бумагой.

Интересно, что аэрозоли описываемого типа уже можно применять в строительстве, так как в результате четырех лет разработок был получен состав «Лотусан» для обработки фасадов зданий, который уже при первых длительных испытаниях продемонстрировал эффективность использования эффекта лотоса. Кроме этого уже началось промышленное производство кровельной черепицы со способностью к самоочищению поверхности, а некоторые другие разработки близки к завершению. Однако наиболее многообещающим направлением развития является создание полимеров с самоочищающейся поверхностью, которые могут найти широчайшее применение (самоклеющиеся и прозрачные оболочки для дорожных знаков, ванных комнат, садовой мебели и т. д.). Некоторым материалам (включая кафель и ткани) водоотталкивающие свойства могут быть приданы без использования сложных химических соединений, причем степень гидрофобности обработанных описанным выше методом тканей уже превышает соответствующие показатели для использовавшихся раньше тканей специального назначения. Некоторые исследователи уже пытаются применять нанопокрывания с эффектом лотоса для изготовления специальной



Интерес вызывают сейчас материалы из наночастиц ферритов (оксидная керамика, содержащая атомы железа), обладающие особыми функциональными свойствами. Наноферриты характеризуются так называемым суперпарамагнетизмом, имеют очень большую удельную поверхность и их можно сделать прозрачными практически в любой жидкой среде. Три вида этого продукта имеют особое значение: порошок, пасты и феррофлюиды. Основное применение наноферритов связано с созданием переключаемых клеящих составов, так как эти наночастицы могут легко поглощать энергию переменных магнитных полей и передавать ее (в виде тепла) в окружающую среду. Материалы такого типа позволяют организовать системы планируемого и быстрого перераспределения энергии между устройствами или элементами и окружающей их матрицей (например, полимерной). Эти «клеи» почти мгновенно отвердевают под воздействием микроволнового облучения, а затем позволяют столь же быстро разделить склеенные материалы наложением или выключением внешнего магнитного поля. Они могут найти огромные возможности применения, например, в автомобильной промышленности для регулирования потоков газов, горючих смесей и т. п.

Очевидно, что придание дополнительных свойств уже известным материалам (или целым установкам и механизмам на их основе) создает огромный потенциал для развития наноматериалов. Это особенно заметно на примере покрытий для бытовых нужд (уже получивших название *легкоочищаемых*), которые могут применяться, например, в производстве кафельных плиток, сантехники, в автомобильной промышленности и т. п. Экономисты предсказывают, что выпуск таких продуктов со временем станет важным сегментом рынка НТ-изделий. Широкое применение могут найти также новые типы покрытий, характеризующиеся высокой стойкостью к коррозии, сопротивляемостью к истиранию и снижением коэффициента трения (на этой основе уже даже предлагается выпускать новые виды спортивных снарядов).

Неожиданное и новое применение взвеси наночастиц могут найти в классической области маркировки товаров. Как уже отмечалось выше, многие наночастицы оптически абсолютно прозрачны, а их взвеси представляют собой совершенно беспр...

жидкости, что позволяет наносить такие составы на различные поверхности (например, с помощью струйного печатающего устройства) для маркировки и обозначения изделий. При освещении такой «метки» ультрафиолетовым светом легко регистрируется характерное флуоресцентное излучение наночастиц, спектр которого определяется размером и составом частиц взвеси. Излучение является «индивидуальным» (его можно сравнить с отпечатками пальцев) и его очень трудно подделать, так как эффект определяется конкретным набором наночастиц, что позволяет создать новую систему маркировки и проверки. В других случаях наночастицы можно использовать и в качестве биомаркеров, действующих в качестве контрастного вещества при рентгеновском обследовании, так как адсорбция на поверхности частиц соответствующих молекул позволяет обнаруживать конкретные типы антигенов, гормонов, белков и даже раковых клеток. Технически задача сводится к химическому связыванию молекул с частицами-акцепторами и дальнейшей регистрации их наличия за счет флуоресценции или рентгеновского контраста. Уже сейчас объем коммерческого производства таких частиц и основанных на них продуктов выглядит весьма внушительно, поскольку рынок частиц двуокиси титана в качестве абсорбентов ультрафиолета в косметике оценивается примерно в 140 миллионов долларов, объем производства биомаркеров непрерывно увеличивается и т. д.

В настоящее время коммерчески производятся преимущественно четыре типа металлосодержащих наночастиц (оксиды кремния, титана, алюминия и железа), а основными потребителями этой продукции выступают электроника и информационные технологии, причем в электронике отдельной областью применения становится химико-механическая полировка пластин кремния с помощью порошковых взвесей из кремния и окиси алюминия. В информационных технологиях основной сферой использования наночастиц остается создание на их основе магнитных носителей информации. Все более широкое применение наночастицы находят в биомедицине и фармакологии, катализе, создании конструкционных материалов (включая машиностроение) и т. д.

Множество новых возможностей связано с...

ными от свойств других известных форм углерода (графита и алмаза). Огромное значение сейчас приобретает способность фуллеренов растворяться в некоторых органических веществах, что позволяет широко использовать их в таких отраслях, как катализ, смазочные материалы, солнечные батареи, сенсорная техника и фармакология. Углеродные нанотрубки позволяют получать исключительно прочные композиционные материалы, о возможностях которых читатель наверняка читал в популярных изданиях. В настоящее время ведутся интенсивные исследования возможностей использования нанотрубок (или материалов на их основе) для производства поглощающих водород батарей, ионных приводных устройств и квантовых электронных компонентов. Многие специалисты считают, что широкое промышленное внедрение квантовой электроники на основе нанотрубок начнется примерно к 2010 году, что позволяет практически оценивать перспективы развития.

**Выводы:** Уже сегодня НТ играет важную роль в развитии химической промышленности и разработке новых материалов. Для практического внедрения особую важность имеет развитие коммерческих производств различных наночастиц, из которых и создаются новые материалы, тонкослойные покрытия и т. п. При этом непосредственная стоимость самих наночастиц довольно незначительна по сравнению с добавочной стоимостью, возникающей при их использовании для создания новых материалов. Уже существует четко выделенный ряд товаров, специальные свойства которых базируются именно на размерных особенностях наноматериалов. Огромные перспективы имеет химия фуллеренов, открывающая возможности производства абсолютно новых материалов.

### 7.3. Медицина и фармакология

Нанобиотехнология возникает на границе НТ и биотехнологии (Hartmann, 2003), поэтому следует разграничивать направления *био-к-нано* и *нано-к-био*, для наиболее эффективного использования принципов биологии (молекулярная самоорганизация, биологическое исправление дефектов и т. п.) и биологических компонентов (молекулярные двигатели, биофункциональные молекулы и т. п.) в технических системах. Проблема заключается в рациональном внедрении нанотехнологических методов и материалов при манипуляциях с биологическими

системами, а также в разработке биосовместимых поверхностей раздела, особенно для уже получившей известность системы направленной доставки лекарственных препаратов внутри организма.

Направление от *био-к-нано* связано, в основном, с научными исследованиями, в то время как в области разработок от *нано-к-био* существует уже целый ряд промышленно значимых проектов. Собственно говоря, в медицине уже давно используются препараты, которые по сегодняшним понятиям следует относить к НТ, поэтому, образно говоря, следует задуматься о том, чтобы снабдить биокатализаторы «разумом», то есть придумать методику, при которой требуемые лекарственные препараты получили бы способность самостоятельно, направленно и специфически «добираться» до предназначенного места или органа. Преимущества такого подхода очевидны, так как медикаменты действуют при этом лишь на ограниченную заболеванием область, а не на весь организм в целом. Уже давно в медицине с этой целью используются липосомы (для химиотерапии), а также нуклеиновые кислоты при генной терапии. Напомним, что липосомы могут представлять собой искусственно изготавливаемые «транспортные средства», которые могут быть «нагружены» различными биокатализаторами или другими лекарственными препаратами, которые при этом почти не восприимчивы к внешним воздействиям (для описания целенаправленного связывания препарата внутри молекулы или структуры возник даже специальный термин «капсулирование»). Этот подход позволяет во многом решить очень старую и важную проблему медицины и фармакологии, связанную с введением в организм водонерастворимых препаратов. Более того, применение наносистем для направленной доставки препаратов в организме позволяет решить и более сложную задачу, а именно — регулирование поступления препарата в кровь для продления его действия или снижения токсичности (например, за счет изменения поверхности и т. п.). Строение и свойства липосом можно варьировать, изменяя внешние условия (например, при некоторых значениях рН они начинают пропускать воду, что позволяет как-то управлять процессами выделения биоактивных препаратов). В настоящее время с этой целью разрабатывается целый ряд наночастиц (включая неорганические), на основе которых скоро будут выпускаться коммерческие продукты. Возможность преодоления биологических барьеров организ-



ма за счет использования «носителей» и целевая доставка препаратов в требуемые органы и ткани делают наночастицы очень перспективным материалом для диагностики. Например, с помощью специальных «молекул-акцепторов», которые специфически связываются с раковыми клетками, можно точно локализовать опухолевые образования, используя для регистрации этих молекул методы рентгеновского, магнитно-резонансного или радиоактивного контраста. [Читатель, заинтересовавшийся строением клеточных мембран и липосом, а также проблемами их фармакологического использования, может обратиться к книге М. Накагаки, *Физическая химия мембран*, М., Мир, 1991. — *Прим. ред.*]

Еще одно широкое направление в подходе от *нано-к-био* связано с разработками биофункциональных и биосовместимых конструкционных материалов, в частности для столь популярных сейчас имплантантов. Новые материалы позволяют обеспечивать лучшее механическое закрепление имплантантов, препятствуют накоплению биологического материала в протезах кровеносных сосудов и т. п.

Все большую ценность приобретают так называемые биоцидные материалы. Например, еще 3000 лет назад было известно, что серебро обладает биоцидным и бактерицидным действием, а сегодня уже точно известно, что положительно заряженные ионы серебра разрушают ферменты, доставляют питательные вещества в клетки, дестабилизируют элементы клеток (мембрану, плазму и оболочки), а также нарушают процессы деления клетки. Биоцидный эффект наночастиц серебра зачастую превосходит воздействие антибиотиков, и уже сейчас создаются наноструктурные серебряные покрытия для медицинских инструментов, а также других связанных с медициной и гигиеной изделий (производство продуктов питания, домашнее хозяйство, косметическая промышленность, текстильные волокна, фильтры и т. п.).

Стоматология — еще одна сфера применения инновационных нанотехнологических продуктов. Чистка зубов сводится к сложному процессу шлифовки, в котором важно, чтобы средство шлифовки было мягче зубной эмали, но тверже загрязняющих частиц. Медики возлагают большие надежды на создание новых паст, позволяющих не только очищать поверхность зубной эмали, но и способствовать ее эффективной регенерации. Особое внимание привлекают пасты на основе наноразмерных

частиц гидроксил-апатита ( $\text{Ca}_5\text{HO}_{13}\text{P}_3$ ), использование которых дает следующие преимущества:

- лечение поврежденных мест эмали осуществляется материалами, которые идентичны природным;
- выравнивание поверхности эмали зубов после чистки;
- высокий эффект очистки.

Наряду с названными конкретными применениями, существуют и другие, весьма перспективные возможности создания имплантируемых систем из наноструктур для различных медицинских целей, включая управляемое выделение препаратов и непрерывный контроль за медико-биологическими показателями человеческого организма. По мнению экспертов, в ближайшие пять-десять лет в подходе от *нано-к-био* будут реально осуществлены следующие существенные разработки:

- наноразмерные биодатчики будут использоваться для измерения физических параметров внутри организма с целью диагностики и управления терапевтическими мерами извне;
- имплантируемые, вживляемые или вводимые в кровеносную систему биочипы, управляемые извне, позволят контролировать продолжительность и механизм действия биологически активных веществ и катализаторов;
- микроскопические устройства и датчики сложного типа (включающие в себя наноразмерные клапаны, насосы, манипуляторы и т. п.) можно будет не только вводить внутрь организма, но и управлять ими извне, используя электронику;
- наночастицы с введенными в них препаратами сделают возможной точную доставку и выделение требуемых лекарственных соединений, а также позволят получать подробную информацию о состоянии пораженных органов и тканей. В качестве связующих, носителей и маркеров станут применяться изотопы или магнитные частицы, обнаруживаемые при помощи магнитно-резонансной томографии;
- наноструктурные биокатализаторы станут основой новых покрытий, а также материалов, обеспечивающих биосовместимость тканей организма с протезами или имплантантами. Снижение остроты реакций отторжения будет иметь огромное значение для развития восстанавливающей хирургии, замены органов и тканевой инженерии.

Выше уже упоминалось, что многие проекты в подходе от *био-к-нано* еще остаются далекими от реализации. Идея подхода состоит в подражании принципам строения биологических систем и создания на этой основе новых материалов или устройств. Иными словами, в этом подходе исследователи пытаются воспроизвести технически те достижения и материалы, которые были выработаны природой за огромные времена биологической эволюции. Например, давно известно, что нити паутины (синтезируемой пауками из протеинов и воды) обладают невероятной прочностью (примерно в 100 раз превосходящей прочность стали!) и столь же невероятной способностью к растяжению (примерно в 40 раз превосходящей растяжимость нейлона!). [С новейшими нанотехнологическими проблемами, связанными с исследованиями паутины, читатель может ознакомиться по статье Ю. Евдокимова «Наноискусство пауков» в научном приложении «НГ-наука» к «Независимой газете» от 26.12.2007, с. 15. — *Прим. ред.*] Выше уже упоминались и другие примеры научной оптимизации существующих биологических систем (например, структура листа лотоса или строение молекулярных двигателей), лежащие на грани доступной нам миниатюризации биологических структур.

**Выводы:** В медицине и фармакологии уже возникло много вариантов практического использования наноструктур, так что потенциал роста НТ выглядит весьма внушительно. В настоящее время для промышленности основной интерес представляют разработки на основе подхода от *нано-к-био*, в то время как применения типа от *био-к-нано* будут реализованы, по всей вероятности, лишь в будущем. НТ может извлечь много примеров для подражания в так называемой бионике. Основные перспективы развития НТ сегодня связаны с созданием новых биологических (точнее, биофункциональных) материалов, а также частиц и устройств на их основе.

#### 7.4. Точная механика и оптика

Производство приборов точной механики и оптики относится к важнейшим отраслям промышленности Германии. Ее годовой товарооборот составляет около 31 миллиарда евро, причем в структуре отрасли преобладают предприятия мелкого и среднего бизнеса (около 2500 фирм с числом сотрудников около 216 000). К этой отрасли относятся многие высокотехнологи-

ческие производства, включая выпуск лазерной, лабораторной, фототехнической и медицинской аппаратуры. Производство обладает очень высоким потенциалом развития и внедрения инновационных технологий, особенно в области новейших оптических технологий, традиционно успешно занимается экспортом (более 50% товарооборота), а занятые в нем фирмы проявляют активную инновационную динамику (в 2003 году на исследования и разработки было потрачено примерно 9% товарооборота).

Можно ожидать, что ключевую роль в 21 веке будут иметь оптические технологии, поскольку они будут связаны не только с коммуникациями и информационными технологиями, но и с медициной, генными технологиями, транспортом, производственными процессами и т. д. Стоит особо отметить, что оптические устройства, несмотря на свою небольшую стоимость, часто играют ключевую роль во многих технологиях, приборах и устройствах (примером чего могут служить известные CD и DVD устройства). Соответствующие технологии были созданы лишь после того, как удалось организовать производство недорогих полупроводниковых лазеров. В 2002 году было продано более 250 миллионов дисков CD и DVD, причем эксперты предсказывают дальнейший рост продаж, особенно после организации коммерческого выпуска так называемых синих лазеров, существенно повышающих возможности носителей.

Использование оптических устройств играет огромную роль в фармацевтической и химической промышленности. Дело в том, что в наше время разработка нового лечебного препарата занимает в среднем 10–15 лет и требует расходов в миллионы долларов. Эти расходы объясняются необходимостью проведения длительных и сложных исследований, но создаваемые НТ возможности сканирования и изучения веществ с использованием оптически регистрируемых биомаркеров позволяют уже сегодня осуществлять тестирование миллионов веществ за несколько дней при минимальном расходе реагентов. Такими методами уже широко пользуются специалисты в так называемой комбинаторной химии, а широкое внедрение высокопроизводительных методик исследования должно привести к существенному снижению расходов на разработку и тестирование новых химических и фармакологических продуктов.

Завершая обсуждение проблем оптики, следует отметить, что свет стал очень важным «инструментом» в обрабатывающих технологиях, так как лазеры уже стали применяться не



только для сверления, резания и сварки, но и для гораздо более сложных операций, например в оптической литографии для изготовления микроэлектронных компонентов. Каковы возможности нанотехнологических инноваций в сфере оптической промышленности? Любая оптическая система состоит, вообще говоря, из источников света, некоторой комбинации элементов, воспринимающих и преобразующих оптические сигналы. В области НТ наибольшего внимания в самом ближайшем будущем заслуживают следующие подходы. Прежде всего, следует выделить усиленно разрабатываемые в последние годы органические светодиоды (OLED), действие которых основано на электролюминесценции полимерных полупроводников. Эти устройства обладают целым рядом существенных преимуществ по сравнению с привычными светодиодами из неорганических полупроводников:

- OLED позволяют получать излучение практически всех цветов за счет варьирования химического состава полимеров;
- эти тонкослойные оптические системы являются гибкими и их можно наносить на большие по площади участки поверхности сложной формы;
- новые светодиоды в коммерческом производстве должны быть очень недорогими.

В продаже уже имеются дисплеи на OLED, товарооборот которых в 2002 году составил 80 миллионов долларов, причем ожидается, что к 2008 году он достигнет 2,3 миллиардов долларов. Уже имеются опытные образцы более крупных мониторов, а примерно к 2010 году в продажу поступят и телевизоры на основе OLED. Эксперты полагают, что инновационные осветительные технологии на основе OLED в будущем полностью вытеснят привычные всем бытовые электролампы и люминесцентные источники света, так как в некоторых диапазонах цветов новые устройства уже сегодня значительно эффективнее всех других источников света. В далекой перспективе можно представить себе выпуск электронных газет с использованием плоских и гибких листов из новых материалов.

Диоды OLED следует рассматривать в качестве образца нового направления технологии (полимерной электроники), в основе которой лежит внедрение проводящих и полупроводниковых полимеров. Такие материалы сочетают в себе ценные характеристики различных металлов и полупроводников (электро-

проводность, необычные электрооптические свойства, фотоэлектрическая эмиссия и т. п.) с важными дополнительными преимуществами, характерными для полимеров (низкий удельный вес, возможность легкой модификации свойств, удобства в обработке, низкая стоимость). В области полимерной электроники могут широко применяться методы печати (трафаретная печать, струйная печать) для нанесения на поверхность составов, отдельных структур или даже целых схем. Нанотехнологические аспекты новой отрасли охватывают как регулирование структуры полимеров на нанометровом уровне, так и контроль состояния поверхности.

Фотоэлектронные и фоточувствительные соединения и компоненты играют исключительную роль в развитии литографических методов микроэлектроники. Воздействие света в рамках проекционной фотолитографии осуществляется за счет использования разнообразных масок, линз и зеркал. Ожидается, что уже в ближайшее время поколение электронных чипов будет производиться с использованием лазеров на основе монокристаллического фторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ) с длиной волны излучения 157 нм, что значительно ниже предельной длины, используемой в настоящее время (около 193 нм). Дальнейший прогресс в этом направлении связан с применением излучения в области EUV (11–13 нм), где уже нельзя использовать гибкие линзы, а проекция излучения должна осуществляться на основе зеркал и масок (так называемых рефлекторов Брэгга), состоящих из множества слоев с наноразмерной толщиной. Такая технология, промышленное внедрение которой должно произойти к 2010 году, позволит формировать элементы размером около 35 нм. Ее можно привести в качестве примера положительной обратной связи для развития НТ вообще, так как в этой методике НТ помогает осуществлять контроль шероховатости поверхности и толщины слоев образуемого материала. Метод EUV-литографии считается весьма перспективным и важным.

Изменение свойств материала под воздействием света характерно и для некоторых других материалов. Например, сейчас разрабатываются функциональные покрытия стеклянных поверхностей, позволяющие регулировать (или даже обеспечить саморегулирование) процессы передачи и переключения света. В качестве другого известного примера таких материалов можно указать фотопроводящие полимеры и многие другие перспективные вещества, некоторые из которых сейчас изучаются с целью практического применения.

Способность регистрировать световое излучение играет огромную роль при создании биочипов, в которых биологические молекулы или структуры маркируются флуоресцирующими красителями или частицами. Естественно, что такие разработки относятся к НТ, поскольку в любых применениях необходимо создавать наноразмерные слои и частицы, а затем и комбинировать из них новые типы датчиков. В области точной механики НТ приобретает все большее значение в связи с разработкой микроскопических приводных устройств (актуаторов) и датчиков самых разных типов. Приводные устройства на основе пьезоэлементов становятся очень важными и широко используемыми элементами наноустройств, позволяющими последним осуществлять движения с нанометровой точностью за счет использования обратного пьезоэффекта. Уже сейчас такие методики позволяют управлять, например, системами сверхточного дозирования жидких компонентов (с чувствительностью порядка  $10^{-12}$  пиколитров), что имеет важное значение для создания новых систем струйной печати, дозирования медицинских препаратов, нагнетательных элементов в нанодвигателях и т. п. Точные дозировки смесей очень важны для технологий склеивания элементов НТ, а также в новейших областях биотехнологии, исследовании гормонов и комбинаторной химии.

Как уже упоминалось выше, многие нанотехнологические исследования и разработки начались с применения сканирующих зондовых методик, позволяющих анализировать структуры и даже манипулировать веществом на уровне отдельных атомов. Напомню, что все эти методы, сохраняющие огромную значимость для развития НТ вообще и находящие все более широкие применения (вплоть до прямого контроля качества в нанотехнологических промышленных производствах), не могли бы развиваться без использования сверхточных пьезоэлектрических приводных устройств.

Сканирующие зондовые методы продолжают оставаться важным инструментом исследований, разработок и контроля во многих НТ, но в последние годы возникают совершенно новые варианты их применения, в частности, очень часто разработчики стали применять одновременно большое число зондов, например, для обработки сложных поверхностей с атомарной точностью. Одновременное или параллельное использование зондов (рассматриваемых именно в качестве устройств, относящихся к точной механике) открывает множество абсолютно

новых сфер их внедрения, особенно в информационных технологиях (Vettinger и др., 2003) и сенсорной технике (Kohl, 2003).

**Выводы:** Нанотехнологические методы уже сейчас представляют большую важность для оптической промышленности, особенно в производстве светочувствительных или излучающих элементов. В настоящее время наиболее перспективной сферой применения таких устройств выступают полупроводниковые светоизлучающие диоды OLED, обладающие оптической функциональностью материалы и новейшие методы литографии (DUV и EUV). В области точной механики большую роль играют пьезоэлектрические приводные элементы и механические датчики.

## 7.5. Автомобильная промышленность

Автомобильная промышленность Германии, являющаяся одной из наиболее важных отраслей производства, уже сейчас серьезно заинтересована в НТ и активно изучает возможности внедрения новых материалов и технологий, особенно в связи с экологией, безопасностью движения и обеспечением комфорта. НТ в автомобилестроении может быть связана с решением множества проблем и технических задач, относящихся к ходовой части, весу конструкции и динамике движения, кондиционированию и снижению выхлопа вредных веществ, уменьшению износа, возможностям вторичной переработки и т. п. Кроме этого, НТ имеют непосредственное отношение к развитию связанных с автомобилестроением информационных систем (например, контроль обстановки на дорогах, коммуникации и т. п.).

Очень большие перспективы коммерческого производства имеет внедрение прозрачных многослойных наноматериалов. В частности, наносимые на стекло металлические покрытия толщиной в несколько нанометров могут одновременно отражать инфракрасное излучение и придавать стеклу дополнительную термостойкость. Для затемненных внутренних стекол в автомобилях можно даже использовать так называемые электрохромные составы, которые автоматически настраиваются на соответствующую интенсивность света, а также способствуют уменьшению отражения в циферблатах приборов, что очень трудно осуществить обычными методами. Водоотталкивающие и противоударные покрытия могут наноситься на множество деталей, включая «дворники» и т. п.

Еще один очень интересный пример связан с применением микроскопических частиц углерода. В начале 20 века было случайно обнаружено, что введение микрочастиц сажи в каучук приводит к очевидному улучшению качества автомобильных шин. Эффект связан с тем, что частицы сажи «склеивают» каучук и делают шины прочнее, обеспечивая их повышенную износостойкость. Сегодня уже предпринимаются целенаправленные попытки увеличения поверхности частиц сажи и уменьшения их возможного слипания, что позволяет снизить процессы рассеивания (диссипации) энергии в шинах и приводит в целом к повышению их характеристик и снижению расхода горючего в среднем на 4%.

Соответствующая оптимизация сопротивления воздуха, веса автомобиля и приводного устройства привела бы к снижению потребления горючего на 6%, 15% и 28%, в результате чего можно было бы уменьшить выбросы двуокиси углерода. Намеченное Евросоюзом снижение норм выброса угарного газа и частиц (программа Евро-5) к 2008 году может быть достигнуто только путем значительного понижения потребления горючего, для чего настоятельно требуется поиск альтернативных источников питания. Например, в качестве автомобильного топлива очень перспективен экологически почти безопасный метанол, и НТ может сыграть важную роль в производстве новых методик впрыскивания горючего, реформинге топлива, аккумуляции водорода, объединении клеточных электродов и мембран для обмена протонов при сгорании топлива и т. п.

Более конкретно, можно отметить, что эффективное использование метанола (и многих других видов топлива) требует обеспечения измельчения жидкого горючего и его микродисперсной пульверизации по заданным поверхностям, для чего весьма перспективными представляются матрицы из нанопористых нанопористых материалов типа кремния или его соединений. Аналогичные наноканалы могут применяться в перспективных технологиях получения водорода из твердых видов топлива, для чего внутренняя поверхность каналов может дополнительно покрываться слоем каталитического материала типа платины.

Нанопористые материалы могут применяться и для разложения многих соединений (например, воды на водород и кисло-

род) при использовании мембран с очень развитой поверхностью. Кроме того, микропористые вещества с большой и активной поверхностью, очевидно, представляют собой прекрасную основу для создания новых типов фильтров, механически задерживающих требуемые типы частиц.

В будущем развитие энергетики, возможно, будет связано с массовой заменой твердых видов топлива и горючих веществ на водород, который необходимо будет аккумулировать в специально создаваемых устройствах, и именно в этом наноматериалы (например, сложные фуллерены) могут оказаться исключительно полезными. Уже сейчас эксперты планируют создание емкостей-хранилищ водорода на основе фуллеренов с 10% эффективностью.

Наноструктурные материалы позволяют изготавливать легкие и одновременно достаточно прочные конструкции для некоторых деталей массового производства. Например, конструкторы автомобилей много лет создают покрытия из стекла, которые были бы прочными, но которые можно было бы быстро разбить при необходимости (аварии, кражи и т. п.). Инновационный заменитель стекла можно создать на основе поликарбоната (ПК), то есть искусственного материала, из которого делают известные всем диски CD и DVD. Это «умное» устройство (изогнутое сложным образом в некоторых частях кузова, сзади и сбоку) можно изготовить из ПК таким образом, чтобы его нельзя было никак заменить стеклянным аналогом. Для этого к поликарбонату следует просто примешать различные отбеливающие пигменты (в виде наночастиц), которые, с одной стороны, остаются прозрачными, а с другой, — защищают стекло от разрушающего воздействия ультрафиолетового излучения. Повышенная прочность к механическим повреждениям в этом случае достигается использованием нанолаков на основе полиоксидов.

Перспективы нанотехнологии в автомобильной промышленности сейчас во многом связываются с использованием наноструктурных (нанофазных) металлических материалов, обладающих огромной прочностью и другими высокими механическими характеристиками, а также с производством новейших типов металлокерамики. Разрабатывается большое число лаков на основе наносистем, обладающих не только высокой прочностью, но и даже способностью к «самозалечиванию» поверхности. Кроме того, изучаются возможности армирования керами-



ческих материалов наночастицами, а также развития новых методик создания стеклокерамики. При этом во многих случаях исследователи уже планируют осуществлять автономную или местную «регенерацию» вещества на основе наполненного наночастицами искусственного материала, а также придавать описанный выше эффект самоочистки «лотоса» всем используемым лакам и стеклам.

В лабораторных условиях уже изучаются сложные пигментные структуры, цвет которых может целенаправленно изменяться под воздействием прилагаемого электрического напряжения, что имеет огромные перспективы для оформления интерьера автомобилей. Упомянутые выше ферромагнитные жидкости (взвеси магнитных частиц, феррофлюиды) также могут найти широкое применение в автомобильной промышленности. Такие вещества, меняющие вязкость в зависимости от прилагаемого извне магнитного поля, являются исключительно важными для создания «умных» амортизаторов в автомашинах следующих поколений, и уже созданы опытные образцы устройств такого типа.

**Выводы:** Наноструктурные материалы могут найти самые разнообразные применения в автомобильной промышленности, прежде всего, в производстве лаков, легких конструкций, новых приводных устройств, амортизаторов и т. п.

## 7.6. Энергетика и защита окружающей среды

Представляется очевидным, что связанная с НТ миниатюризация сама по себе уже означает значительную экономию ресурсов при производстве товаров за счет существенного сокращения расходуемого материала, затрат энергии и общего количества отходов. Например, НТ сейчас имеют конкретную значимость в некоторых областях энергетики, например, связанных с получением и использованием солнечной энергии. Напомним, что Солнце в среднем ежедневно производит количество энергии, превышающее годовой расход Германии в 80 раз. В принципе, техническая утилизация солнечной энергии осуществляется двумя основными методами: так называемой фотогальваникой (то есть прямой выработкой электрического тока под воздействием солнечного излучения) и соляротермикой (так иногда называют использование солнечного излучения для получения горячей воды, для отопления помещений и т. п.). НТ

могут сыграть важную роль в разработке многих устройств такого типа, прежде всего, за счет нанесения на поверхность стекол солнечных батарей или коллекторов нанослоев некоторых веществ, позволяющих резко повысить степень поглощения падающего на поверхность излучения.

В области защиты окружающей среды сейчас привлекают нанопористые материалы и мембраны, позволяющие значительно увеличить эффективность фильтрации воды, очистки стоков, опреснения морской воды и т. д. Уже сегодня некоторые специальные материалы позволяют отфильтровывать бактерии, вирусы и даже отдельные молекулы, что имеет огромное значение для переработки бытовых и промышленных отходов, вплоть до регенерации катализаторов, очистки газовых отходов от серы, создания специфических микрофильтров и т. п. Наблюдается значительный рост разработок и применений для этих целей целого ряда новых типов технической керамики, а также совершенно новых нанопористых материалов (например, соединения никеля в матрице из жаропрочных сплавов).

Коммерчески производимые нанофильтры позволяют выделять из воды одновалентные и многовалентные ионы, понижать степень ее жесткости, очищать от солей, микробов, пестицидов, гербицидов и углеводородов. Нанофильтрация представляет собой чисто физический метод разделения сред и является реальной альтернативой многих существующих методов фильтрации (например, с использованием обратного давления).

Нанопористые материалы могут использоваться также в каталитических и теплообменных процессах, включая повышение эффективности охлаждения деталей за счет «выпаривания» холодной среды через микроскопические поры. Наноматериалы также представляют интерес в связи с созданием новых антикоррозионных покрытий, где они могут использоваться в самых разных целях (возможность замены хромированных покрытий, повышение адгезионной способности лаков, альтернатива токсичным покрытиям, повышение стойкости покрытий к воспламенению, использование в качестве смазок и т. п.).

Из перечисленных задач особое значение имеет защита от коррозии, представляющая собой общетехническую и даже глобальную проблему, так как только в США наносимый коррозией экономический ущерб оценивается суммой около 300 миллиардов долларов в год (для Германии эта цифра составляет около 50 миллиардов долларов в год). Вообще говоря, ржавчина



представляет собой естественно образующуюся смесь различных окисей и гидроокисей железа, содержащую соли и ионы железа, которые автокаталитически увеличивают скорость коррозии. В этом смысле весьма перспективными представляются так называемые органические металлы (органические или металлоорганические соединения с высокой электропроводностью), которые, к сожалению, легко пассивируются в обычных условиях, то есть на воздухе. Нанопокртия (особенно, если им удастся придать способность к «самозалечиванию») могут оказаться исключительно важными и востребованными.

Нанотехнологические подходы выглядят достаточно перспективными и в создании новых строительных материалов. Например, существуют инновационные разработки бетона, армированного различными волокнами. Наноразмерные примеси в таких системах могут значительно повышать закрепление волокон в бетонной матрице и тем самым существенно улучшать механические свойства бетона. Далее, покрывая глиняные изделия водорастворимыми полимерными дисперсиями, можно придать их поверхности водостойкость, что означает отказ от традиционного использования обжига для обработки строительных материалов. Такие материалы могли бы найти широкое применение при строительстве защитных дамб и т. п.

Одной из основных экономических проблем современности (не только для развитых, но и для развивающихся стран) является поиск альтернативных и возобновляемых источников энергии. Основные надежды в этой области сейчас связаны с использованием силы ветра, а также упомянутым выше прямым преобразованием солнечной энергии в электрический ток. Эксперты считают, что создание фотогальванических элементов на основе полупроводниковых наночастиц (вместо традиционно используемых кремниевых пластин) позволит сократить расходы на 80%. Многообещающими являются также проекты, базирующиеся на использовании слоев синтетических красителей, способных с высокой эффективностью поглощать слабые и рассеянные (диффузные) потоки света. Эта способность достигается именно за счет особенностей структуры содержащего частицы красителя нанопокртия. Применение таких наноструктурных материалов уже сейчас позволяет повысить эффективность поглощения света на 8% и к.п.д. преобразования энергии на 12%. Дешевизна исходных материалов и простота производства наноструктур с красителями делает производство таких преобра-

зователей экономически выгодным даже при существующем уровне разработок.

Прогресс в полимерной электронике уже позволяет создать гибкие, механически подвижные и экономически выгодные солнечные батареи, которыми в будущем можно будет покрывать стеклянные перекрытия и сводчатые поверхности зданий большой площади. В далеком будущем можно представить себе даже функциональную интеграцию элементов из органических солнечных элементов в обычную одежду. Технически проблема сводится лишь к повышению эффективности преобразования энергии такими устройствами, которая пока достигает только 3%.

Большинство экспертов уверено, что будущее энергетики связано с использованием водорода, который станет основным горючим для производства всех остальных видов электрической и тепловой энергии. Водородная энергетика, в свою очередь, предполагает эффективное получение, накопление и расход водорода, включая крошечные наноячейки хранения водорода (для мобильных устройств), и очень мощные аккумулирующие батареи для децентрализованного снабжения электричеством и теплом домов, стационарных промышленных и транспортных устройств и т. д. Ожидается, что нанотехнологии должны сыграть очень важную роль в решении некоторых из задач, связанных с предполагаемым «круговоротом» водорода в промышленности и бытовой технике.

Ключевой проблемой является накопление и хранение газообразного водорода, особенно в мобильных и миниатюрных устройствах, где не может быть и речи о сжижении водорода под давлением или его охлаждении до сверхнизких температур. Высокоперспективными материалами для этих целей представляются нанопористые вещества со специфически большой активной поверхностью. Помимо показанных на рис. 4.2 углеродных нанотрубок, исследователи возлагают большие надежды на металлоорганические сотовые структуры, типа нанокластеров из частиц окиси цинка, химически связанных терефталевыми лигандами. Из этих веществ легко создаются крупные по размеру и легкие пористые решетки с открытыми порами и каналами нанометрового размера. Такие пористые твердые тела при малом весе (плотность 0,59 г/м<sup>3</sup>) обладают высоким значением внутренней поверхности пор (около 3000 м<sup>2</sup>/г), значительно превосходящим соответствующие параметры для углеродных

нанотрубок ( $200 \text{ м}^2/\text{г}$ ), цеолитов ( $700 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и активированных углей ( $800\text{--}2000 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

По-видимому, такие вещества разумнее применять для создания не крупных аккумуляторов энергии, а небольших транспортативных батарей и топливных элементов, а также, например, миниатюрных источников питания для компьютеров, портативных видеокамер, мобильных телефонов и беспроводных приборов. Для промышленности и экономики имело бы большое значение достижение 10% накопительной емкости (в пересчете на вес водорода относительно общего веса конструкции), когда топливные элементы станут примерно в 10 раз превосходить по энергоемкости существующие литиевые аккумуляторы. В целом, стоит отметить, что наноструктурные материалы приобретают все большее значение в разработках и производстве электродов, катализаторов и мембран топливных элементов.

Реальный рывок к экологически чистой, водородной энергетике произойдет лишь тогда, когда будут разработаны экономически выгодные методы получения водорода из воды, что позволит окончательно отказаться от использования ископаемых углеводородов. Прогнозировать время этого принципиального изменения основ энергетике почти невозможно, тем более, что эта проблема связана не только с технологическими разработками, но и глобальными экономическими вопросами, включая ситуацию с запасами ископаемых видов топлива. Согласно оценкам, сегодняшняя годовая потребность в нефти составляет 3,4 миллиарда тонн, а достаточно точно разведанные ее запасы (с учетом стандартных технологий добычи) соответствуют примерно 140 миллиардам тонн. По некоторым предположениям, еще 100 миллиардов тонн нефти, предположительно, могут содержать месторождения в арктической зоне и на морских глубинах. В настоящее время добыча нефти в этих регионах затруднена по различным техническим причинам. Например, в северных районах, из-за низкой температуры, нефть обладает высокой вязкостью, в результате чего многие современные технологии ее добычи оказываются малоэффективными.

Еще одно направление использования НТ в энергетике и экологии связано с созданием новых, высокоэффективных изоляционных материалов. Например, создаваемый на основе нанопористой кремниевой кислоты материал по своим

теплоизоляционным характеристикам (коэффициент теплопроводности около  $18 \text{ мВт/мК}$ ) значительно превосходит используемые в настоящее время изоляторы. Кроме того, нанопористые материалы можно комбинировать с вакуумной изоляцией, что позволяет дополнительно уменьшить теплопроводность (лежащий в основе этого механизм заключается в том, что средняя свободная длина пути молекул воздуха превышает размер пор, в результате почти полностью подавляется конвекция). На сегодня объем мирового рынка микропористых изоляционных материалов уже составляет примерно 150 миллионов долларов, и в будущем ожидается его рост и развитие, поскольку такие материалы имеют очень большой диапазон применений (криогенная техника, хранилища горючего, строительство и автомобилестроение и многое другое).

**Выводы:** Наноструктурные материалы уже сейчас используются в экологических и энергетических технологиях, а в будущем сфера их применения будет расширяться. Большим потенциалом обладает рынок производства материалов для промышленных и бытовых фильтров, защитных средств (например, замена хрома в антикоррозионных покрытиях), связующих в строительной технике и т. п. В энергетике создаваемые на основе НТ материалы могут быть с успехом применены при разработке альтернативных источников энергии (например, новых типов солнечных батарей), а также при создании новых, сверхминиатюрных видов топливных элементов, батареек и т. п. Особую значимость пористые наноструктурные материалы могут иметь для создания аккумуляторов водорода и в решении других проблем, связанных с развитием так называемой водородной энергетике. Интересные перспективы открывает НТ в области создания новых теплоизоляционных материалов.

## 8. Рынки сбыта и социальные последствия внедрения НТ

Рассматривая технологические возможности и существующие научно-технические разработки в области, которую объединяет некое ключевое понятие «нано» (даже с учетом всей неопределенности и злоупотреблений в использовании этого термина), легко заметить явную неопределенность в понятиях, терминологии и оценках развития. Наиболее важным на сегодня, возможно, является именно огромная потребность в реалистичных оценках возможностей нанотехнологий вообще, а также создание хотя бы некоторых ориентиров для общественных и частных инвесторов. Количественные оценки потенциала рынка НТ пока остаются очень скудными, не говоря уже о том, что существующие в литературе цифры и прогнозы, относящиеся к НТ, расходятся на многие порядки величин, в результате чего даже специалистам очень сложно определить реальные доли НТ в производстве различных новых продуктов, не говоря уже о перспективах производства и о возможностях точного учета доли наноконпонентов в стоимости конечных изделий. С учетом сказанного, остается бесспорным, что НТ уже сейчас не только имеет большую значимость для экономики и промышленности, но и вызывает достаточно ясные социальные и экономические последствия. С одной стороны, они возникают вследствие конкуренции в международном научном и экономическом соревновании, а с другой – обусловлены тем, что НТ уже оказывает значительное воздействие на рынок сбыта, использование рабочей силы, развитие информационных и коммуникационных технологий, здравоохранение, экологию и т. д.

### 8.1. Потенциал развития рынка НТ

НТ является относительно молодой технологией, и поэтому в Германии, Европе, США и в странах Азии ее пока рассматривают в качестве возможной основы следующей научно-технической революции. Перспективам развития НТ посвящено множество работ, основной вывод которых состоит в том, что следует ожидать существенных преобразований в следующих важнейших сферах науки и техники:

- информационные и коммуникационные технологии;
- химия, материаловедение, новые технологические методы;
- медицина, здравоохранение.

Уже сегодня такие прогнозы опираются на научно-технические достижения и внедрения, влияющие на коммерческие рынки объемом примерно в 100 миллиардов долларов, что соответствует существованию примерно 500 000 рабочих мест. Предполагается, что связанные с НТ производства будут бурно развиваться, в результате чего в период между 2010 и 2025 годами объем рынка возрастет примерно до 1 триллиона долларов (Rieke и Buchmann, 2004). Более того, считается, что наиболее эффективно в близком будущем будут развиваться именно те отрасли производства, которые сумеют найти реальные приложения научным достижениям. В наши дни международная конкуренция во многих важнейших областях (информационные и коммуникационные технологии, автомобилестроение, химия и т. п.) тесно связана с ориентацией на новейшие достижения науки, так что фирмы предпочитают использовать неожиданные научные разработки, а не приспосабливаться к существующим ситуациям на рынке спроса. Сказанное в огромной степени относится к оптике, биотехнологии, медицинской технике, измерительной аппаратуре и многим другим отраслям, где нанотехнологические подходы уже показали свою эффективность и могут играть решающую роль в конкуренции на рынках сбыта новой продукции.

При изучении рынка, связанного с развитием НТ, эксперты часто допускают стандартную ошибку, принимая во внимание только потенциал новых технологий для оптимизации производства известных товаров и концепции создания абсолютно новых изделий. Проблема является более сложной, так как разработка и производство нанотехнологической продукции создает множество возможностей для субпоставщиков, от поставок модернизированных строительных материалов до изготовления нового технологического оборудования и обработки сырья. В сфере развития и применения НТ ключевую роль играют методы нанопрофилирования и проверки качества создаваемых изделий, то есть контроль качества материалов и структур становится решающим фактором производства. Это имеет особое значение для рынка вспомогательных товаров или поставок таких продуктов, которые по своей природе формально вообще не относятся



к НТ, а связаны с ней лишь какими-то элементами производства или структур. Возникновение таких проблем представляется неизбежным в связи с расширением выпуска и использования наноматериалов разного типа.

При любом развитии новых технологий возникает весьма важная проблема изменений структуры рынка рабочей силы и обеспечения структуры подготовки соответствующих кадров. Развитие нанотехнологических производств требует наличия квалифицированной рабочей силы, потребность в которой явно не может быть удовлетворена в ближайшее время. Речь идет не только о научных специалистах и инженерах с высшим образованием, но и о специально обученных техниках и лаборантах, а также работников, связанных со смежными областями науки и техники.

**Выводы:** Достаточно точно предсказать развитие рынка НТ на ближайшее время почти невозможно, прежде всего, из-за того, что НТ не является следствием естественного развития (образно говоря, «почкования») классических отраслей промышленности. НТ формально не имеет единой технологической платформы, что затрудняет даже простую оценку доли таких технологий в создании цепочки добавочной стоимости производства. Поэтому результаты отдельных исследований состояния рынка НТ расходятся, хотя общий вывод состоит в признании высокой значимости НТ для государственной экономики и народного хозяйства. Не стоит также недооценивать роль НТ в смешанных производствах (вторичный рынок поставок) материалов и устройств. Развитие НТ безусловно должно быть связано с изменениями в рынке рабочей силы и системе образования.

## 8.2. Социально-экономические последствия развития НТ

Многие эксперты ожидают, что развитие НТ приведет к новой научно-технической и промышленной революции, последствия которой коснутся в будущем многих сфер общественной жизни, включая технику, методы коммуникации, экологию, здравоохранение, глобальную связь и т. д. Пока можно лишь в общих чертах предсказывать влияние НТ на развитие различных областей техники и экономики, но уже сегодня эта проблема стала предметом обширной (и, возможно, преждевременной)

дискуссии о будущем воздействии атомарных технологий на жизнь и глобальные условия существования человечества. Результаты широко развернувшейся дискуссии имеют ценность в качестве основы принятия решений для инвесторов, но влияют и на выработку общественного отношения по отношению к принятию некоторых глобальных и решительных мер. Речь идет не только о политически обусловленной поддержке ведущих разработок на национальном и международном уровне, но и о выработке необходимых правовых норм для сохранения человечества и защиты окружающей среды. Это означает, например, что следует разработать и тщательно проверить юридические права, касающиеся защиты труда, выбросов в окружающую среду и охраны природы при использовании НТ. Такие исследования должны относиться, несомненно, не только к синтезу и применению используемых в промышленности наночастиц, но и к множеству биомедицинских приложений НТ. Необходима дальнейшая разработка существующих законодательств, относящихся к очень сложным проблемам биотехнологии, особенно в сфере этических и правовых норм.

Особым предметом для размышлений и исследований являются общие, рамочные условия практического использования нанотехнологий. Необходимо ли вводить в законы изменения, непосредственно относящиеся к их внедрению? Требуется ли при этом выработка каких-либо международных правил, законов и стандартов? Роль последних особенно возрастает при реализации конкретных результатов инновационных разработок в промышленных производствах. Стандартизация приобретает особое значение в сфере международной промышленной конкуренции, где постоянно приходится сравнивать качества товаров на основе разных показателей. Разработка международных норм должна, безусловно, способствовать развитию мировой торговли материалами и изделиями НТ, а также увеличению инвестиций в такие коммерческие производства.

Новые технологии типа НТ требуют новых знаний и новых навыков от работников во всех звеньях производства и создания добавочной стоимости. Это означает, что развитие НТ связано не только с созданием соответствующей научной и экономической обстановки, но и с наличием квалифицированных технических сотрудников на всех этапах производства. Внедрение новых технологий требует изменения рынка рабочей силы, из чего вытекают и новые требования к профессионально-техни-

ческому образованию вообще. Очень важно, что принципиальные изменения в технике требуют преобразования системы образования на всех этапах обучения, то есть адаптация к новым представлениям должна начинаться еще в школе, а затем далее распространяться на университеты, высшие специальные учебные заведения и т. д., вплоть до различных программ дальнейшего и дополнительного образования. В сфере управления производством особое внимание следует уделить новым принципам менеджмента и инвестиционных рисков. В университетах и исследовательских центрах должна усилиться конкуренция за привлечение к работе молодых талантливых исследователей. Решающую роль в использовании огромных шансов, которые потенциально создает НТ, должно сыграть осознание ответственностью и политиками важности проблемы в целом, а также безотлагательное принятие верных и весомых решений, касающихся разработок в этой области. Отметим, что решения должны быть увязаны со многими нерешенными проблемами прошлого (отношение к окружающей среде, глобальные политические и военные противоречия и т. п.), хотя, возможно, именно внедрение НТ создаст новые возможности для эффективного разрешения старых конфликтов и кажущихся неразрешимыми научно-технических задач. Таким образом, проблема развития НТ становится одной из центральных в социально-экономической политике развитых стран.

**Выводы:** В будущем НТ окажет огромное влияние на все сферы общественной жизни и производства. Ее развитие позволяет надеяться на глобальное выравнивание жизненных стандартов и условий, но сопряжено со значительным риском, неизбежным при любых крупномасштабных изменениях, поэтому очень важно уже сегодня принять верные решения в сфере исследований, образования, экономики и экологии.

## 9. Перспективы, потенциальная опасность и этические аспекты развития НТ

Вообще говоря, в науке считается возможным все, что не противоречит фундаментальным законам природы, поэтому многие фантастические перспективы НТ имеют шанс быть реализованными, если нам удастся устранить явный дефицит знаний относительно обнаруживаемых явлений и объектов. Другими словами, мы многого не понимаем в изучаемых процессах и поэтому не можем понять, к чему, в сущности, может привести нас развитие НТ. Ситуация является обычной для истории техники, в которой можно найти множество нереализованных и просто ошибочных прогнозов. С другой стороны, мы можем строить прогнозы на основе уже известных фундаментальных законов природы и некоторого опыта их применения, хотя стоит отметить, что опыт научно-технических инноваций сводится, скорее, к тому, что технический прогресс не следует предписанным правилам и всегда содержит потенциальную опасность побочных эффектов. Вопросы этической оценки позитивных и негативных последствий внедрения научных разработок требуют серьезнейшего анализа и оценки.

### 9.1. Перспективы

В истории человечества очень часто наиболее смелые и невероятно творческие идеи выдвигались не самими учеными, а дилетантами, наделенными даром активно и красочно пропагандировать новые теории, однако в последние десятилетия с неожиданными проектами к общественности все чаще обращаются серьезные исследователи. В случае с НТ следует отметить, прежде всего, книги и статьи Рея Курцвейля (Kurzweil, 2002), Эрика Дрекслера (Drexler), Билла Джоя (Joy, 2000) и других, которые взбудоражили общественный интерес и вызвали широкую дискуссию о шансах и рисках развития НТ. Основой для новых идей и фантазий стало то, что они явно не противоречат законам природы. Например, трудно спорить с тем, что любой молекулярный объект (а затем и предмет) может быть выстроен атом за атомом в рамках процесса *снизу – вверх*. Таким образом, мыслима стратегия развития, заключающаяся в том, что некие молекулярные механизмы собирают атомы и «монтируют» из них требуемые элементы или структуры. Для большей

убедительности таких идей, их авторы часто подчеркивают, что биология демонстрирует нам эффективность таких механизмов и позволяет массово производить многие сложные вещества. Биологические механизмы обычно работают на основе белков и ферментов, многие из которых обладают высокой специфичностью. Пропагандируя возможности НТ, некоторые авторы даже предлагают комбинировать молекулярные и биохимические механизмы производства веществ с разрабатываемыми в вычислительных центрах системами искусственного интеллекта. В результате такой комбинации развитие может значительно ускориться, так как возникнет то, что в кибернетике называется положительной обратной связью (НТ будут производить и создавать новые виды НТ!). Поскольку никто не умеет точно прогнозировать будущее, было бы полезным извлечь какие-то уроки из ошибок прогнозирования научно-технического развития в прошлом. Наиболее общие выводы в этой области выглядят следующим образом:

- существует очень мало удачных прогнозов технологического развития;
- почти всегда авторы прогнозов недооценивали динамику развития;
- очень часто оказывались ошибочными прогнозы даже на ближайшее будущее;
- удивительно, но иногда справедливыми оказываются самые фантастические и даже авантюристические прогнозы.

В НТ многие прогнозы связаны с созданием в будущем так называемых «молекулярных фабрик», красочно описанных Дрекслером (Drexler, 1992), способных соединять атомы и молекулы на основе фундаментальных подходов «сборки» типа *снизу – вверх*. В этом смысле НТ представляется исключительно важной ресурсосберегающей и эффективной технологией, поскольку в ней нет «отходов», и каждый использованный атом может быть применен для сборки снова после *переработки*. Таким образом, можно представить себе молекулярные агрегаты, не создающие никаких проблем с загрязнением окружающей среды, особенно при использовании биологических стратегий экономности конструкции, уплотнения изделий и т. п.

Даже если предлагаемый Дрекслером метод априорно не противоречит законам природы, пока неясно, удастся ли нам

когда-нибудь реально создать подобные целенаправленные молекулярные механизмы и принципы их конструирования. Кроме того, следует принять во внимание, что во многих случаях вероятность синтеза сложных наноразмерных компонентов будет очень мала, так что соответствующие химические реакции будут приводить к возникновению целого набора продуктов реакции, лишь один из которых будет являться целевым. Не исключено также, что время синтеза некоторых элементов и структур окажется слишком большим (например, сравнимым с возрастом Вселенной!), что сделает бессмысленной саму идею с точки зрения массового производства. Напомню, что наши знания о механизмах протекания большинства молекулярных и сверхмолекулярных процессов (особенно приводящих к самоорганизованному синтезу компонентов с точно заданными свойствами) остаются пока весьма ограниченными.

Проблема прогнозирования заключается и в том, чтобы оценить техническую возможность теоретического «проектирования» наносистем. Свойства таких систем и известные на сегодня явления микрокосма изучены пока явно недостаточно, так что первичная задача состоит в выборе и расчете «реализуемых» наноструктур, а лишь затем можно переходить к планированию и прогнозированию их гипотетических применений в технике, социальных последствиях и т. п. Таким образом, «просчитываемые прогнозы» невероятно значимы для развития в будущем исследований наноструктур и НТ. В противоположность авторам научно-фантастических произведений, которых обычно не заботит дальнейшая судьба предлагаемых ими идей, от прогнозов инженеров и практиков требуется «реализм» и планирование конкретных действий.

**Выводы:** Большинство прогнозов развития НТ на ближайшие 50 лет выглядит весьма неубедительно. Столь же сомнительны, впрочем, прогнозы даже на ближайшие 10 лет в конкретных направлениях, что очень легко заметить, сравнивая оценки, предлагаемые самыми компетентными специалистами.

## 9.2. Потенциальные опасности

Очевидно, что глобальный технологический переворот, связываемый с развитием НТ, несет в себе и большие потенциаль-



ные опасности, оценки размеров которых столь же неясны и противоречивы, как и перспективы. Многие авторы считают возможным возникновение новой глобальной угрозы существованию человечеству, а другие полагают, что НТ значительно усугубит те серьезные научно-технические проблемы, которые уже существуют. Например, многие опасаются, что наночастицы будут попадать в так называемую «цепочку питания» человека, в результате чего они начнут скапливаться в организме неконтролируемым образом, что может вызвать сбой в работе иммунной системы и т. п. Первые токсикологические исследования выявили наличие некоторых эффектов, связанных с нанометровыми размерами частиц, однако полученные данные являются, очевидно, недостаточными и получены лишь для очень короткого времени воздействия.

Реальная опасность может заключаться в том, что мы просто «не успеем» вовремя провести оценки и выработать меры предосторожности. Многие эксперты исходят из того, что политическая дискуссия относительно оценки возможных последствий НТ «отстает» примерно на пять лет от реального технологического развития. Помимо медицины, очень важное значение могут иметь социальные последствия внедрения НТ, причем даже в международной торговле. Например, развитие НТ может привести к значительному изменению структуры существующего рынка сырья и товаров. Может исчезнуть потребность в некоторых видах товаров, что будет иметь, например, драматические последствия для развивающихся стран, зависящих от экспорта своего сырья. Различие подходов к существующей опасности может привести к существенному изменению в распределении промышленных структур в разных странах. Если в некоторых странах законодательство будет требовать строжайшего контроля над технологией производства наночастиц (например, как с опасными вирусами), а в других – меры предосторожности сведутся к надеванию марлевых повязок, то можно ожидать перераспределения промышленных мощностей в значительных масштабах.

В любом случае нам следует вспомнить опыт развития ядерной техники, генной инженерии и т. п., то есть воспринимать предостережения и предупреждения об опасности вполне серьезно. Легкомысленность в оценке будущего является крайне опасной, так как наше социальное поведение практически никогда не «успевает» за технологическим развитием.

Серьезные опасности для человечества вообще могут быть связаны с использованием НТ в военных технологиях, что может иметь непредсказуемые последствия. Исследования возможностей применения НТ в военных целях в последние годы расширились. Пока речь идет конкретно о повышении функциональности военного обмундирования, методов контроля, повышении прочности деталей, а также повышении уровня медико-биологического обслуживания личного персонала. [К сожалению, буквально за несколько последних лет возможности применения НТ в военных целях значительно расширились. См. книгу Ю. Альтмана «Военные нанотехнологии», М., Техносфера, 2006. — Прим. ред.]

**Выводы:** Наночастицы проявляют сложные биологические характеристики, и на сегодня невозможно предсказать, как они будут вести себя в окружающей среде или после попадания в живые организмы. Необходимо проведение серьезных экологических и токсикологических исследований. Возрастает роль НТ в военной сфере. Несвоевременная оценка значимости и опасности развития НТ может снизить положительный эффект от внедрения новых технологий или даже нанести вред экономике отдельных стран.

### 9.3. Этические аспекты

НТ может рассматриваться как одна из самых важнейших и ключевых технологий 21-го века. Новые фундаментальные знания в этой области и возможности практического развития НТ в исследовании наноструктуры и технологический поворот в методах производства продукции буквально зачаровывают, обещая фантастические преобразования в экономике и общественной жизни. С другой стороны, представляется крайне важным, чтобы (наряду с дальнейшим развитием междисциплинарной научно-естественной и технической основы НТ) процесс внедрения новой технологии сопровождался критической дискуссией по вопросам этики, которая позволит выработать правильные решения и предотвратить возможные опасности. Как всякая другая область науки и техники, НТ потенциально чревата риском неправильного применения, созданием новых социально-экономических или этических конфликтов и т. п. В настоящее время наблюдается острый интерес общественности к проблемам, связанным с возможностями развития НТ и ее широкого применения в технике, быту, социальной жизни и т. п.

В профессиональной среде уже выработан термин *наноэтика*, но пока речь идет лишь о формальном признании наличия этических проблем, связанных с НТ (Mnyusiwalla и др., 2003). Систематические исследования по этой теме отсутствуют, так что пока можно лишь констатировать интуитивное и бессистемное осознание этической значимости НТ. Некоторые общественные группы интересов связывают этически релевантные аспекты с областью возможных рисков развития новой технологии. С точки зрения профессиональной этики и социологии нам необходимо проанализировать в целом реальное и предполагаемое развитие НТ и ответить на следующие вопросы. В чем, собственно, заключаются этические проблемы НТ? Какие ответы уже получены в процессе проводимых дискуссий? Какие вопросы (например, отличные от проблем биоэтики) возникают в связи с развитием НТ? Можно ли сформулировать новые вопросы?

Вопросы этики очень часто возникают в технике, биологии, медицине, антропологии и даже в философии науки вообще, поскольку они связаны с проблемами воздействия научно-технического прогресса на человечество. Они возникают при оценке роли и длительности научных достижений, рисков развития и многих других проблем, возникающих в «точках», где деятельность оказывается связанной с «пересечением» или взаимодействием между человеком и техникой (или, другими словами, даже между живой и технологической природой). Поэтому многие этически значимые аспекты НТ не являются новыми и не связаны конкретно с нанотехнологиями. Новым является столкновение различных традиционных линий этического поведения ученых (McDonald, 2004), что может быть связано непосредственно с многосторонностью и междисциплинарным характером самой НТ, которая объединяет в себе многие направления и тенденции науки, включая инженерно-научные, медицинские и фармацевтические, не говоря уже о широком спектре возможных применений.

Оценки технических последствий и этических проблем, связанных со стремительным и широким развитием НТ, могут быть получены при эффективно организованном общественном обсуждении, необходимом при внедрении новых технологий. Этические суждения и оценки могут дать ориентиры развития техники, например, в отношении вопросов справедливости распределения возникающих возможностей и рисков. В дальнейшем процессе конкретного внедрения НТ абстрактные идеи

приобретут конкретную форму и позволят нам осмыслить и этически новую ситуацию.

В истории техники и науки развитие новых идей и технологий очень часто вызывало «соревнование» новых социальных и этических теорий или учений. В связи с этим, можно лишь подчеркнуть, что выделяемые на изучение общественного мнения и восприятия средства являются очень незначительными. Изучение этических проблем НТ могло быть увязано с исследованием отношения общественности к известному проекту «Геном человека» (Mnyusiwalla и др., 2003). Эксперты-философы уверены, что существующий «разрыв» между научными достижениями и общественной моралью можно значительно сократить, используя дискуссии и широкий обмен информацией. Возобновление организованной ранее в Германии этической дискуссии (получившей название «этической паутины») по вопросам НТ позволило бы уточнить существующие проблемы. Дискуссия затрагивала следующие ключевые вопросы, связанные с развитием науки и техники вообще. В чем заключаются этические аспекты науки в настоящее время? В чем заключаются конкретно этические аспекты НТ? Являются ли они специфичными только для данной технологии? Лишь получив ответ на эти вопросы, мы сможем судить о том, насколько оправдана потребность в существовании наноэтики (как самостоятельной науки или раздела философии науки). Для конкретизации рассматриваемых проблем ниже предлагается список некоторых основных понятий НТ, каждое из которых, как будет видно из текста, действительно требует хотя бы какой-то оценки и обсуждения на основе этических соображений и доводов.

## Наночастицы

Напомним, что получаемые искусственным путем наночастицы будут проникать в человеческий организм или окружающую среду (при производстве, использовании изделий или их утилизации), а также преодолевать большие расстояния и распространяться диффузно. Способы распространения наночастиц в природе и их воздействие на здоровье человека и состояние среды почти не изучены, особенно в отношении потенциальных и долгосрочных последствий (Krug и др., 2004). Стоит подчеркнуть такие особенности наночастиц, как мобильность, химическая активность, способность проникать в легкие человека и

растворимость. На это можно возразить, что вопросы экологии и токсичности относятся, конечно, не столько к этике, сколько к точным научным дисциплинам (типа медицинской токсикологии и химии), вследствие чего существующие законы, директивы и предписания относительно обращения с опасными веществами нуждаются скорее в юридическом обосновании, а не в философско-этическом анализе.

Однако этически значимые вопросы возникают, например, в тех случаях, когда мы начинаем обсуждать возможные риски для людей, которым в будущем придется работать с наночастицами, а также меры возможной профилактики. Неясно, должны ли мы рассматривать возникающую опасность в качестве совершенно нового фактора или будем рассматривать ее в качестве варианта известной проблемы «асбестовой пыли». Иными словами, создает ли НТ действительно новую проблему? Некоторые общественные деятели уже требовали ввести мораторий на использование наночастиц вообще, но при этом остается неясным, можно ли вообще искать решение проблемы, пытаясь оценивать риски и преимущества производства.

С одной стороны, существенно, что прогнозы рисков являются очень неясными, но с другой — мы не можем оценить ущерб, связанный с введением предлагаемого полного запрета (моратория) на использование наночастиц. Оценка приводит к сравнению рисков и шансов, носящих совершенно разный характер: так, неясно, в какой мере мы можем реально оценить вред и риск использования наночастиц, исходя из опыта работы с новыми химическими веществами и медикаментами. Этическая проблема, связанная с использованием наночастиц, заключается в оценке потенциалов использования и рисков на основе недостаточного набора данных и точных знаний, что очень часто наблюдается при оценке ситуации и в других науках.

### Справедливость распределения получаемых преимуществ

Теоретические размышления по поводу справедливости связаны с тем, каким образом полученные при использовании НТ преимущества будут затем распределяться между членами общества. Справедливое распределение связано, конечно, с рисками внедрения НТ, как в кратковременном, так и в долгосрочном плане. Любая система распределения и использования

возможностей и рисков должна быть основана на идеале длительного и разумного использования новых технологий. Знание о потенциале временного развития НТ может быть конструктивно использовано для технической организации развития с учетом этики и долговременного использования природных ресурсов. Этические вопросы касаются при этом меры ответственности за длительный период развития общества (Krug и др., 2004; Kopfmüller и др., 2001).

Проблемы справедливости распределения связаны также с тем, что очень часто технический прогресс усиливает неравномерность социального развития. Например, высокотехнологические НТ могут оказаться доступными лишь небольшому числу стран с развитой научной базой, в результате чего научно-техническая революция приведет лишь к дальнейшему углублению раскола мира между богатыми и бедными государствами.

Особым примером неравномерного распределения благ может стать основанная на нанотехнологиях медицина. Уже сейчас в очень многих странах наблюдается огромный разрыв в медицинском обслуживании различных слоев населения. Развитие высокотехнологичной медицины на основе НТ может значительно усугубить социальное неравенство, так как создаваемые эффективные лекарства, с весьма большой вероятностью, будут дорогими. В распределении благ возникнет новое неравенство, для описания которого можно даже ввести термин *нано-распределение* (напоминающий *цифровое распределение*, используемое для описания неравенства в потреблении цифровой бытовой техники). Впрочем, проблемы справедливого распределения достижений науки, вообще говоря, относятся к важнейшим этическим аспектам современной жизни и, таким образом, не являются наноспецифическими. Можно лишь отметить, что ускоренная динамика развития НТ делает уже существующие проблемы еще более насущными и острыми.

### Право на защищенность частной жизни

В связи с этическими аспектами НТ очень часто упоминается сфера защищенности частной жизни человека от новейших технологий контроля и наблюдения. НТ невероятно увеличивает возможность незаметного сбора информации, что открывает невиданные возможности для сбора данных о жизни граждан,



не говоря уже о промышленном и военном шпионаже. Некоторые специалисты уже обсуждают возможности конструирования прямых методов технического доступа к человеческому мозгу (и, соответственно, к нервной системе), что сделает возможным замену пассивного наблюдения активным, но незаметным контролем.

Особенно уязвимым в отношении нарушений прав личности является состояние здоровья человека. Технологии типа *лаборатория на чипе* позволяют осуществлять анализ, а также строить прогнозы и диагнозы для огромного числа пациентов, непрерывно создавая массовые базы данных о здоровье населения. Это делает технически возможным массовое *экранирование* (то есть проверку) личной генетической предрасположенности, что может быть использовано, например, работодателями или страховыми компаниями. Без достаточной защиты сведений о частной жизни можно будет очень легко манипулировать отдельными гражданами и целыми группами населения, что делает уязвимыми их гражданские права и свободу действий. Общество должно выяснить, как следует обращаться с результатами медицинских исследований, особенно при тяжелых заболеваниях или (еще сложнее!) при возможности прогноза таких заболеваний. Создание достаточно точного диагноза всегда было серьезной этической проблемой для врачей, но сейчас этические вопросы затрагивают даже права на знание генетической предрасположенности и т. п., что уже стало предметом ожесточенной дискуссии в среде медиков, занятых биотехнологиями. Проблемы сохранения прав личности, врачебной тайны, защиты банков медицинских данных и сложных социальных последствий нарушения этих норм известны уже давно, а развитие НТ лишь возвращает нас к этим темам, заставляя рассматривать их более серьезно и внимательно.

### Медицинские сферы применения

По-видимому, медицина и фармакология являются теми областями науки, где специалисты наиболее четко пытались и продолжают пытаться регламентировать отношение к рискам и экспериментам. Развитые в последние годы технологии типа *лаборатория на чипе* способствуют укреплению традиций и подходов так называемой индивидуальной медицины, так что развитие новых технологий задает новый стимул классическим

вопросам медицинской этики, даже тогда, когда речь не идет о принципиально новых этических вопросах.

С другой стороны, внедрение нанотехнологий обещает привести к весьма значительному увеличению продолжительности человеческой жизни, что сразу создает множество этических проблем. Например, с этических позиций совершенно неясно, что следует понимать под качеством жизни, учитывая утопические возможности бесконечного существования. Сценарии будущего, заключающиеся в том, что при несчастных случаях или заболеваниях можно будет просто вводить организм в «стационарное» состояние, то есть прекращать в нем все процессы до молекулярного уровня, вновь поднимают вопросы об этических границах применения новых технологий.

В области медицинского применения, несомненно, главенствующей этической проблемой является определение целесообразных границ возможного вмешательства в работу организма, предполагающего, с одной стороны, гарантии, что этические принципы не будут выработаны слишком поздно, а с другой, — они сохраняют свою практическую значимость.

### Преодоление границы между техникой и человеком

Прогресс в области НТ позволяет по-новому контролировать многие биотехнологические процессы, например, за счет сочетания естественных биологических процессов с техническими операциями. Любое такое применение НТ стирает классическую границу между техническими и живыми (биологическими) системами, что подразумевает создание интерфейсов (поверхностей раздела, стыков) между живыми и техническими системами и возможность объединения различных по существу элементов. Именно в этой области развития НТ, возможно, следует ожидать возникновения особо сложных этических аспектов нового типа, а также (что имеет особую важность) необходимость анализа ошибок во многих разработках прошлых лет.

Очень важной областью нанобиотехнологии в настоящее время является создание наноэлектронных нейронных имплантантов. Прогресс в экспериментальной технике работы с нейронами (и процессами передачи информации в них) уже позволяет создать имплантанты, размеры и возможности которых близки к параметрам естественных систем и к их мощности. Этические

проблемы в этом отношении, главным образом, состоят в распознавании и предотвращении возможного злоупотребления, так как технический доступ к нервной системе позволяет создать множество систем вероятных манипуляций и контроля над поведением человека.

Продолжением дискуссий в области этики стали размышления о мыслимых рамках создания и поведения *киборгов*, то есть искусственно создаваемых сочетаний человека с развитыми техническими системами, что связано с вопросами высокой этической значимости представлений о естестве человека. В футуристических построениях предсказывается, прежде всего, информационно-техническое сохранение человеческого сознания, что сразу заставляет задуматься о том, может ли претендовать на статус человека техническое (соответственно, отчасти техническое или частично биологически сконструированное) существо типа «машина-человек». Формальное определение такого существа требует решения целого ряда сложнейших вопросов, касающихся основ антропологии и этики. Специфическим проявлением НТ в этой проблеме выступает то, что именно нанотехнологии позволяют осуществить особым образом *конвергенцию наук и технологий* на основе принципов синергизма (Rocco и Bainbridge, 2002).

### Техническое совершенствование человека

Стремление совершенствовать свой организм возникло у человека еще на заре истории, однако сейчас НТ в комбинации с биотехнологией и медициной делают это желание вполне реализуемым. Многие применения НТ действительно заставляют задуматься о коренном преобразовании человеческого организма на основе новых технических достижений. В настоящее время серьезно обсуждаются вопросы замены тканей и целых органов, а также восстановление и расширение возможностей восприятия с использованием так называемых нейроимплантантов. В отличие от классической медицины, НТ обещает не только совершенствовать организм, но и принципиально перестраивать человеческое тело, подобно тому, как мы «ремантируем» автомобили, добавляя в них новые детали. Методы достижения идеального состояния здорового организма постепенно совершенствуются и превращаются в методы расширения физических или психических способностей человека. Например, сейчас рассматривается возможность прямого присоединения человеческого мозга к

компьютеру, что позволило бы человеку перерабатывать информацию с использованием ресурсов ЭВМ. С другой стороны, существует и возможность совершенствования организма с использованием разнообразных биологических систем.

НТ открывает новые перспективы «денатуризации» человеческого организма, значительно более широкие, чем те, которые уже достигнуты современными био- и генными технологиями. Грань между лечением и совершенствованием организма, вообще говоря, является очень условной, хотя бы потому, что мы до сих пор не имеем точных определений терминов «здоровье» и «болезнь» (Habermas, 2001). В соответствии со стандартным определением понятия «здоровье» по версии ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения), оно означает состояние полной удовлетворенности физическим, психическим и социальным самочувствием, а не отсутствие заболевания или увечья. Строго говоря, старость можно считать специфической болезнью, с которой следует бороться медицинскими средствами, подобно тому, как мы боремся с гриппом. Это позволяет даже определить первой целью новой (назовем ее нанотехнологически ориентированной) медицины постепенную «отмену» процессов старения и смерти вообще. Не стоит даже говорить о том, с какими сложными этическими проблемами столкнутся исследователи и общество при реализации этой задачи. Возможно, нам следовало бы задуматься об этом уже сейчас, создавая этические и юридические нормы «про запас».

**Выводы:** В развитии НТ следует придавать особое значение проблемам безопасности. Исследователи и технологи должны проникнуться духом ответственности, соблюдать этические нормы и тщательно изучать любые потенциальные опасности, связанные с новыми технологиями, особенно относящиеся к здоровью людей, безопасности и охране окружающей среды. Необходимо упорядочить относящиеся к НТ законодательные акты с учетом мнения общественности и прогнозов развития. Особое внимание должно быть уделено информированию общественности и социальных групп, а также проведению серьезных дискуссий, чтобы обсуждение реальных проблем НТ не превращалось в рассмотрение интересных и занимательных научно-фантастических сценариев.

проблемы в этом отношении, главным образом, состоят в распознавании и предотвращении возможного злоупотребления, так как технический доступ к нервной системе позволяет создать множество систем вероятных манипуляций и контроля над поведением человека.

Продолжением дискуссий в области этики стали размышления о мыслимых рамках создания и поведения *киборгов*, то есть искусственно создаваемых сочетаний человека с развитыми техническими системами, что связано с вопросами высокой этической значимости представлений о естестве человека. В футуристических построениях предсказывается, прежде всего, информационно-техническое сохранение человеческого сознания, что сразу заставляет задуматься о том, может ли претендовать на статус человека техническое (соответственно, отчасти техническое или частично биологически сконструированное) существо типа «машина-человек». Формальное определение такого существа требует решения целого ряда сложнейших вопросов, касающихся основ антропологии и этики. Специфическим проявлением НТ в этой проблеме выступает то, что именно нанотехнологии позволяют осуществить особым образом *конвергенцию наук и технологий* на основе принципов синергизма (Россо и Bainbridge, 2002).

### Техническое совершенствование человека

Стремление совершенствовать свой организм возникло у человека еще на заре истории, однако сейчас НТ в комбинации с биотехнологией и медициной делают это желание вполне реализуемым. Многие применения НТ действительно заставляют задуматься о коренном преобразовании человеческого организма на основе новых технических достижений. В настоящее время серьезно обсуждаются вопросы замены тканей и целых органов, а также восстановление и расширение возможностей восприятия с использованием так называемых нейроимплантантов. В отличие от классической медицины, НТ обещает не только совершенствовать организм, но и принципиально перестраивать человеческое тело, подобно тому, как мы «ремантируем» автомобили, добавляя в них новые детали. Методы достижения идеального состояния здорового организма постепенно совершенствуются и превращаются в методы расширения физических или психических способностей человека. Например, сейчас рассматривается возможность прямого присоединения человеческого мозга к

компьютеру, что позволило бы человеку перерабатывать информацию с использованием ресурсов ЭВМ. С другой стороны, существует и возможность совершенствования организма с использованием разнообразных биологических систем.

НТ открывает новые перспективы «денатуризации» человеческого организма, значительно более широкие, чем те, которые уже достигнуты современными био- и генными технологиями. Грань между лечением и совершенствованием организма, вообще говоря, является очень условной, хотя бы потому, что мы до сих пор не имеем точных определений терминов «здоровье» и «болезнь» (Habermas, 2001). В соответствии со стандартным определением понятия «здоровье» по версии ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения), оно означает состояние полной удовлетворенности физическим, психическим и социальным самочувствием, а не отсутствие заболевания или увечья. Строго говоря, старость можно считать специфической болезнью, с которой следует бороться медицинскими средствами, подобно тому, как мы боремся с гриппом. Это позволяет даже определить первой целью новой (назовем ее нанотехнологически ориентированной) медицины постепенную «отмену» процессов старения и смерти вообще. Не стоит даже говорить о том, с какими сложными этическими проблемами столкнутся исследователи и общество при реализации этой задачи. Возможно, нам следовало бы задуматься об этом уже сейчас, создавая этические и юридические нормы «про запас».

**Выводы:** В развитии НТ следует придавать особое значение проблемам безопасности. Исследователи и технологи должны проникнуться духом ответственности, соблюдать этические нормы и тщательно изучать любые потенциальные опасности, связанные с новыми технологиями, особенно относящиеся к здоровью людей, безопасности и охране окружающей среды. Необходимо упорядочить относящиеся к НТ законодательные акты с учетом мнения общественности и прогнозов развития. Особое внимание должно быть уделено информированию общественности и социальных групп, а также проведению серьезных дискуссий, чтобы обсуждение реальных проблем НТ не превращалось в рассмотрение интересных и занимательных научно-фантастических сценариев.



- Alberts B. et al. (2004) *Molekularbiologie der Zelle*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Amelinckx S. et al. (Hrsg.) (1997) *Handbook of Microscopy*. VCH, Weinheim.
- Bartlott W., Universität Bonn, Botanik, [www.botanik-uni-bonn.de/system/bionik\\_flash.html](http://www.botanik-uni-bonn.de/system/bionik_flash.html)
- Beckman M., Lenz Ph. (2002) *Profitieren von Nanotechnologie*, FinanzBuch Verlag, München.
- Carr D., Craighead H., Cornell University, [www.news.cornell.edu/science](http://www.news.cornell.edu/science).
- Chen C.J. (1993) *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. Oxford University Press, New York.
- Crichton M. (2004) *Die Beute*. Goldmann, München.
- Dresselhaus M.S. et al. (1995) *Science of Fullerenes*. Academic Press, New York.
- Drexler E. (1990) *Engines of Creation*. Anchor Books, New York. (Работа Дрексlera «Машины созидания» в русском переводе опубликована на сайте [www.inventors.ru/index.asp?mode=4457](http://www.inventors.ru/index.asp?mode=4457)).
- Drexler E. (1992) *Nanosystems*. Wiley Interscience, New York.
- Drexler E., [www.e-drexler.com](http://www.e-drexler.com)
- Ethicsweb, [www.ethicsweb.ca/nanotechnology](http://www.ethicsweb.ca/nanotechnology)
- Farkas R., Monfeld C. (2004) Ergebnisse der Technologievorschau Nanotechnologie pro Gesundheit 2003. *Technikfolgeabschätzung — Theorie und Praxis* 13, 42–51.
- Fatikow S. (2000) *Mikroroboter und Mikromontage*. Teubner, Stuttgart.
- Feynman R. (1959) *There's plenty of room at the bottom*. [www.zyvex.com/nanotech/fevnmman.html](http://www.zyvex.com/nanotech/fevnmman.html); deutsch: [www.greet-the-future.de/sites/feynman.html](http://www.greet-the-future.de/sites/feynman.html) (Перевод на русский язык опубликован в «Российском химическом журнале», №5, 2002 г.).
- Fleischer T. (2003) *Technikgestaltung für mehr Nachhaltigkeit: Nanotechnologie*. In: Coenen R., Grunwald A. (Hrsg.) *Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland, Analyse und Lösungsstrategien*. Edition Sigma, Berlin.
- Forschungszentrum Jülich (1996), *Streumethoden zur Untersuchung kondensierter Materie*. Vorlesungsmanuskript 27. Ferienkurs.
- Goodsell D.S. (2004) *Bionanotechnology*. Wiley-Liss, Hoboken.
- Güntherodt H.-J., Wiesendanger R. (Hrsg.) (1992-94) *Scanning Tunneling Microscopy I-III*. Springer, Berlin.
- Habermas J. (2001) *Die Zukunft der menschlichen Natur*. Suhrkamp, Frankfurt.
- Hartmann U. (2003) *Nanobiotechnologie — eine Basistechnologie des 21. Jahrhunderts*. [www.nanobionet.com](http://www.nanobionet.com).
- Herget W. et al. (2004) *Computational Materials Science*. Springer, Berlin.
- Hu J. et al. (2002) Artificial DNA nanopatterns by mechanical nanomanipulation. *Nanolett.* 2, 55-57.
- Ikazuki S., Mors J. (2003) *Lithography*. In: Waser R. (Hrsg.) *Nanoelectronics and Information Technology*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Institute for Molecular Manufacturing, Los Altos, [www.imm.org](http://www.imm.org).
- Jopp U. (2003) *Nanotechnologie — Aufbruch ins Reich der Zwerge*. Gabler, Wiesbaden.
- Joy B. (2000) *Why the future doesn't need us*. Wired 8.04. [www.wired.com/wired\\_archive/8.04/joy/html](http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy/html).
- Kohl C. D. (2003) *Electronic Noses*. In: Waser R. (Hrsg.) *Nanoelectronics and Information Technology*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Kolb, D.M., Universität Ulm, Abteilung Elektrochemie: [www.uni-ulm.de/echem](http://www.uni-ulm.de/echem).
- König W., (Hrsg.) (1992) *Propyläen Technikgeschichte*. Propyläen Verlag, Berlin.
- Kopfmüller J. et al. (2001) *Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet*. Sigma, Berlin.
- Krug H. et al. (2004) Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuch einer Abwägung. *Technikfolgenabschätzung—Theorie und Praxis* 13, 58–64.
- Kumar S.C.S.R. et al. (2005) *Nanofabrication towards biomedical applications*. Wiley VCH, Weinheim.
- Kurzweil R. (2002) *Homo sapiens*. Kiepenheuer & Witsch, Köln.
- Luther W. (2003) Marktpotentiale in der Nanotechnologie. *Venture Capital Magazin*.
- Lutz C. P., Eigler D., IBM Almaden Research Center, [www.almaden.ibm.com](http://www.almaden.ibm.com)
- McDonald C. (2004) Nanotech is novel; the ethical issues are not. *The Scientist*, 18, 3.
- Memmert U. (1999) *Rastersondenmikroskopie in der Charakterisierung, Optimierung und Realisierung technischer Prozesse der*

- Informationstechnologie auf atomarer und mesoskopischer Skala. Habilitationsschrift, Universität des Saarlandes.*
- Mnyusiwalla A. et al. (2003) Mind the gap. Science and ethics in Nanotechnology. *Nanotechnology* 14, R9-R13.
- Nachtigall W., Bluchel K. (2002) *Das große Buch der Bionik*. DVA, München.
- Nimeyer C.M., Mirkin C.A. (Hrsg.) (2004) *Nanobiotechnology*. Wiley VCH, Weinheim.
- Pan S.H. et al. (1999) He refrigerator based very low temperature scanning tunneling microscope. *Rev. Sci. Instrum.* 70, 1459-1463.
- Rieke V., Buchmann G. (2004) *Nanotechnologie erobert Märkte*. BMBF, Bonn/Berlin.
- Rocco M.C., Bainbridge W.S. (Hrsg.) (2002) *Converging technologies for improving human performance*. National Science Foundation, Arlington, Virginia.
- Sze S.M. (2002) *Microelectronics Technology: Challenges in the 21st Century*. In: Lurji S. et al. (Hrsg.) *Future Trends in Microelectronics*. Wiley, Hoboken.
- VDI-TZ (2004) *Technologiefrüherkennung: Nanobiotechnologie I und II*. VDI, Düsseldorf.
- Vettinger P. et al. (2003) *AFM-Based Mass Storage — The Millipede Concept*. In: Waser R. (Hrsg.) *Nanoelectronics and Information Technology*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Watson J.D., Crick F.H.C. (1953) *Molecular Structure of Nucleic Acids*. *Nature* 171, 737-738.
- Wiesendanger (Hrsg.) (1998) *Scanning Probe Microscopy*. Springer, Berlin.
- Wiesendanger R. (1994) *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*. Cambridge University Press, Cambridge.

### Дополнительная специальная литература

- Fahrner W. (2003) *Nanotechnologie und Nanoprozesse*. Springer, Berlin.
- Köhler M. (2001) *Nanotechnologie*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Paschen H., Coenen Ch. (2004) *Nanotechnologie*. Springer, Berlin.
- Rubahn H.-G. (2002) *Nanophysik und Nanotechnologie*. Teubner, Stuttgart.

### Дополнительная научно-популярная литература

- Boening N. (2004) *Nano?!*. Rowohlt, Berlin.
- Broderick D. (2004) *Die molekulare Manufaktur*. Rowohlt, Reinbek.

- Calvert, C. (2001) *Geheimtechnologien*. Bohmeier, Lübeck.
- Groß M. (1995) *Expedition in den Nanokosmos*. Birkhäuser, Basel.
- Ilfrich Th. (2003) *Nano + Mikrotech*. Ivcon. net Corp., Berlin.
- Ilfrich Th. (2005) *Nano A-Z Glossar der Nanotechnologie*. BoD GmbH, Norderstedt.
- Jopp K. (2003) *Nanotechnologie — Aufbruch ins Reich der Zwerge*. Gabler, Wiesbaden.
- Schirmmacher F. (Hrsg.) (2001) *Die Darwin AG*. Kiepenheuer & Witsch, Köln.

### Дополнительная литература по экономическим перспективам

- Beckmann M., Lenz Ph. (2001) *Nanostocks*. Lanceback, Frankfurt.
- Beckmann M., Lenz Ph. (2002) *Profitieren von Nanotechnologie*. Finanz-Buch Verlag, München.
- Dent H.S. (2005) *Der Jahrhundert Boom*. Börsenmedien, Kulmbach.
- Georgescu V., Vollborn M. (2002) *Nanobiotechnologie als Wirtschaftskraft*. Campus, Frankfurt.
- Herrmannsdorfer E., Doran U. (2005) *Nanotechnologie*. FinanzBuch Verlag, München.
- Reinhold M. et al. (2001) *Nanomarketing — Marketing für Nanotechnologien*. Universität St. Gallen.
- Uldrich J., Newberry D. (2005) *Wie die Nanotechnologie Wirtschaft und Börse revolutioniert*. Börsenmedien, Kulmbach.
- Venture Capital (2002) *Sonderausgabe Nanotechnologie*. Going Public Media, München.

### Дополнительные интернет-сайты

#### Немецкие порталы и сети

- [www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php](http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php) (BMBF-Nanotechnologie-Portal)
- [www.vdi.de/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/fue/physik/08561](http://www.vdi.de/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/fue/physik/08561) (Nationale Kontaktstelle Nanotechnologie)
- [www.kompetenznetze.de/nav/de/innovationsfelder/nanotechnologie.html](http://www.kompetenznetze.de/nav/de/innovationsfelder/nanotechnologie.html) (BMBF/VDI-Portal)
- [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de) (BMBF/VDI-Portal Nanotechnologie)
- [www.nanobiotech.de](http://www.nanobiotech.de) (Kompetenzzentrum Nanobiotechnologie)
- [www.cc-nanochem.de](http://www.cc-nanochem.de) (Kompetenzzentrum chemische Nanotechnologie)

[www.nanotechnology.de](http://www.nanotechnology.de) (Kompetenzzentrum ultradünne funktionale Schichten)  
[www.nanomat.de](http://www.nanomat.de) (Kompetenzzentrum Materialien der Nanotechnologie)  
[www.nanop.de](http://www.nanop.de) (Kompetenzzentrum Nanostrukturen der Optoelektronik)  
[www.nanoanalytik.de](http://www.nanoanalytik.de) (Kompetenzzentrum Nanoanalytik)  
[www.nanotechnologie-ev.de](http://www.nanotechnologie-ev.de) (Deutscher Verein für Nanotechnologie)

### Региональные порталы и сети в Германии

[www.cens.de](http://www.cens.de) (Zentrum für Nanowissenschaften München)  
[www.centech.de](http://www.centech.de) (Zentrum für Nanotechnologie Münster)  
[www.cfn.uni-karlsruhe.de](http://www.cfn.uni-karlsruhe.de) (Zentrum für funktionale Nanostrukturen Karlsruhe)  
[www.cinsat.de](http://www.cinsat.de) (Zentrum für interdisziplinäre Nanostrukturforschung und Technologie Kassel)  
[www.cni-juelich.de](http://www.cni-juelich.de) (Zentrum für nanoelektronische Systeme und Informationstechnologie Jülich)  
[www.enab.de](http://www.enab.de) (Exzellenznetzwerk Nanobiotechnologie München/Bayern)  
[www.nanoclub.rwth-aachen.de](http://www.nanoclub.rwth-aachen.de) (Kompetenznetz Nanotechnologie Aachen)  
[www.hansenanotec.de](http://www.hansenanotec.de) (Kompetenznetz Nanotechnologie Hamburg)  
[www.nanobionet.de](http://www.nanobionet.de) (Nanobiotechnologie-Kompetenznetzwerk Saarland/Rheinland-Pfalz)

### Информация относящаяся к промышленности

[www.nanoinvests.de](http://www.nanoinvests.de) (deutsch)  
[nano.ivcon.net](http://nano.ivcon.net) (deutsch)  
[www.nanotech-now.com](http://www.nanotech-now.com)  
[www.nanoindustries.com](http://www.nanoindustries.com)  
[www.azonano.com](http://www.azonano.com)  
[logistics.about.com/nanotechnology](http://logistics.about.com/nanotechnology)

### Образование и школа

[www.manometer-nanometer.de](http://www.manometer-nanometer.de) (Deutsches Museum)  
[www.nanoreisen.de](http://www.nanoreisen.de) (VDI-TZ)  
[www.wissenschule.de](http://www.wissenschule.de) (Allgemeines Portal für Schule, Ausbildung, Studium und Wissen)  
[www.nanoforschools.ch](http://www.nanoforschools.ch) (Schweizer Nanotechnologie-Portal für Schulen)  
[mrsec.wisc.edu/edetc](http://mrsec.wisc.edu/edetc) (Interdisziplinäre Bildungsgruppe der Universität Wisconsin)

### Банки данных

[www.nanoingermany.com](http://www.nanoingermany.com) (Branchenverzeichnis Deutschland)  
[www.nanoword.net](http://www.nanoword.net) (Enzyklopädie)  
[www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org) (Verzeichnis aller Nobelpreisträger)  
[www.wtec.org/lovola/nano/links.htm](http://www.wtec.org/lovola/nano/links.htm) (Weltweite Studien)  
[www.fda.gov/nanotechnology](http://www.fda.gov/nanotechnology) (Grenzwerte, Nahrungsmittel, Pharmazeutika etc.)

### Журналы

[www.iop.org/ej/s/unreg/journal/0957-4484](http://www.iop.org/ej/s/unreg/journal/0957-4484) (Nanotechnologie)  
[aspbs.com](http://aspbs.com) (Journal of Nanoscience and Technology)  
[pubs.acs.org/journals/nahfd/index.html](http://pubs.acs.org/journals/nahfd/index.html) (Nanoletters)  
[www.yinano.org/nano](http://www.yinano.org/nano) (Virtual Journal of Nanoscience and Technology)  
[www.nanojournal.org](http://www.nanojournal.org) (Nanojournal)  
[www.openmindjournals.com/nano.html](http://www.openmindjournals.com/nano.html) (Applied Nanoscience)  
[www.phantomsnet.com/phantom/net/nanonews.html](http://www.phantomsnet.com/phantom/net/nanonews.html) (Phantoms)  
[www.smalltimes.com](http://www.smalltimes.com) (Small Times)  
[www.forbesinc.com/newsletters/nanotech](http://www.forbesinc.com/newsletters/nanotech) (Forbes/Wolfe Nanotech Report)  
[www.technologyreview.com](http://www.technologyreview.com) (MIT Technology Review)  
[www.nanoindustries.com/newsletter.html](http://www.nanoindustries.com/newsletter.html) (Nanotechnology Industries Newsletter)  
[www.nanozine.com](http://www.nanozine.com) (Nanotechnology Magazine)

### Европейские порталы

[www.cordis.eu/nanotechnology](http://www.cordis.eu/nanotechnology) (Европейский Союз)  
[www.nanotechnologie.pagina.nl](http://www.nanotechnologie.pagina.nl) (Нидерланды)  
[www.swissnanotech.de](http://www.swissnanotech.de) (Швейцария)  
[www.nanotechweb.org](http://www.nanotechweb.org) (Англия)

### Международные порталы

[www.nano.gov](http://www.nano.gov) (США)  
[www.nanoworld.jp](http://www.nanoworld.jp) (Япония)  
[www.apnf.org](http://www.apnf.org) (азиатско-тихоокеанские страны)



### Научные сайты

[www.fosight.org](http://www.fosight.org)  
[www.zyvex.com/nano](http://www.zyvex.com/nano)  
[www.nanomedicine.com](http://www.nanomedicine.com)  
[www.nanocomputer.org](http://www.nanocomputer.org)  
[www.iase.cc](http://www.iase.cc)

### Сайты с различными ссылками и порталы

[www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org)  
[www.nanoapex.com](http://www.nanoapex.com)  
[www.crnano.org](http://www.crnano.org)  
[www.pacificnanotech.com](http://www.pacificnanotech.com)  
[nano.asme.org](http://nano.asme.org)  
[www.ianano.org](http://www.ianano.org)  
[www.nnin.org](http://www.nnin.org)  
[www.nanotechnology.net](http://www.nanotechnology.net)  
[www.nanotechnology.com](http://www.nanotechnology.com)  
[www.fourmilab.ch](http://www.fourmilab.ch)  
[www.workinginnanotechnology.com](http://www.workinginnanotechnology.com)

### Картинные галереи

[www.nanopictureoftheday.org](http://www.nanopictureoftheday.org)  
[www.ipt.arc.nasa.gov/gallery.html](http://www.ipt.arc.nasa.gov/gallery.html)

## Приложения

### А. Нанотехнологические фирмы в немецкоязычных странах

В так называемом немецкоязычном мире за последние годы возникло множество начинающих фирм (стартапов), занимающихся разработками в сфере НТ и частично уже успешно производящих различные товары, называемые нанопродукцией. Большинство таких фирм, естественно, развились на основе университетов и исследовательских центров. Ради справедливости следует отметить, что иногда трудно определить, действительно ли мы имеем дело с нанотехнологическими инновациями в узком смысле этого слова. Дело в том, что префикс «нано» стал очень широко использоваться в чисто рекламных целях, а в таких случаях, как известно, понятия часто используются без всякого смысла. С другой стороны, наряду с инновационными фирмами, продукцию на основе НТ уже давно производят и многие крупные, межнациональные фирмы и концерны. При этом во многих отраслях сейчас наблюдается потребность в поставках нанотехнологических товаров, а также в специализированных фирмах, занятых поставками разнообразной НТ-продукции окончательному клиенту.

В принципе, стоит исходить из того, что настоящие нанотехнологические инновации реализуются сравнительно небольшим числом предприятий. Это обусловлено, прежде всего, тем, что инвестиционные затраты на разработку и производство нанотехнологических товаров обычно очень высоки. Кроме того, внедрение и использование НТ (даже при низких затратах на организацию производства) требуют специальных знаний и квалификации персонала, что очень трудно обеспечить на малых и средних предприятиях. В некоторых областях (химия, производство материалов и покрытий) переход к использованию НТ происходит не по желаниям инвесторов или соображениям моды, а

в силу закономерностей развития самого производства. Частично эти проблемы затрагивались в главе 5.

В настоящее время наиболее динамично развивающейся отраслью, связанной с НТ, является коммерческое производство различных материалов (см. главу 7). Уже возникли довольно большие по объему рынки наночастиц, нанофункциональных поверхностей и различных наноструктурных материалов (особенно полимерных), а соответственно и ряд крупных предприятий. Один из источников BASF ([corporate.basf.com/de/innovationen/felder](http://corporate.basf.com/de/innovationen/felder)) следующим образом характеризует ситуацию в отрасли: «Нанотехнологии возбуждают интерес в течение нескольких лет, что само по себе является редким событием. Мы постоянно узнаем об интереснейших результатах исследования, что и позволяет финансистам и технологам возлагать большие надежды на возможности инноваций. НТ становится ключевой технологией 21 века.»

Объединение Degussa/Creavis ([www.creavis.com](http://www.creavis.com)) возлагает большие надежды на создаваемый Центр Nanotronics «Наука — бизнесу», который должен стать местом интеграции систем и разработок Degussa и партнеров по исследованию. Базируясь на материалах из наночастиц, сотрудники Центра будут создавать новые типы электронных изделий. Во многих других отраслях (например, в текстильной промышленности) нанотехнологические покрытия и наноструктурные материалы начинают играть важную роль, что привлекает к НТ внимание новых фирм и организаций.

В области химической индустрии и производства наноматериалов можно найти замечательные примеры реализации инновационных проектов малыми и очень малыми предприятиями. Зачастую подобные начинающие фирмы возникают на основе старых исследовательских центров, как например Институт новых материалов в Саарбрюккене, в рамках которого за несколько последних лет возникло много предприятий, успешно занимающихся разработкой и сбытом функциональных покрытий. В этой связи следует упомянуть и фирмы Nanogate ([www.nanogate.de](http://www.nanogate.de)), NanoX ([www.nano-x.de](http://www.nano-x.de)), ItN Nanovation ([itn-nanovation.com](http://itn-nanovation.com)) или Sarastro ([www.sarastro-nanotec.com](http://www.sarastro-nanotec.com)), последняя из которых специализируется на применении наноматериалов в медицинской технике, косметике и производстве продуктов питания. В разработке наноматериалов можно особо выделить и фирму SusTech ([www.sustech.de](http://www.sustech.de)), созданную в ка-

честве *совместного предприятия* группой из представителей бизнеса и университетских исследователей.

К высоко инновационной и экономически окупающейся отрасли промышленности уже можно отнести производство наночастиц для медицинской диагностики и терапии. В качестве примера можно назвать небольшое предприятие Magforce nanotechnologies ([www.magforce.de](http://www.magforce.de)), связанное с новаторскими методами так называемой гипертермии с использованием магнитных наночастиц. Множество инноваций в сфере НТ связано с фирмой Across barriers ([www.across-barriers.de](http://www.across-barriers.de)), создающей технологии и товары для фармакологии, косметики, химических исследований и т. п. Препараты этой фирмы создаются на основе моделирования поведения тех клеточных и тканевых систем, которые в живых организмах стимулируют прохождение лекарственных препаратов через биологические барьеры, стенки клеток и т. п. и допускают преждевременное выведение в отношении абсолютной проницаемости. Крупным инновационным предприятием в сфере нанобиотехнологии является Bayersdorf ([www.bayersdorf.de](http://www.bayersdorf.de)), которое последовательно занимается изучением и практическим внедрением методов НТ для косметической промышленности.

Очень крупные инновационные проекты планируются и осуществляются в электронной промышленности (см. главу 7). Только в Германии производством компонентов электроники занимается более 70 000 человек, а объем рынка компонентов составляет сегодня около 20 миллиардов евро (стоимость производимых из этих компонентов систем оценивается примерно в 100 миллиардов евро). Мировой товарооборот современной электронной промышленности равен примерно 800 миллиардов евро, что, кстати, превышает товарооборот автомобильной промышленности. Это имеет особое значение для Германии, традиционно являющейся одним из центров развития микро- и нанoeлектроники в Европе. Ведущими направлениями развития в области электронных компонентов можно назвать следующие:

- производство сложных структур для схем и систем кремниевой нанoeлектроники;
- производство компонентов и систем силовой полупроводниковой техники на основе кремния;
- создание базовых схем для новых поколений запоминающих устройств в диапазоне до 64 гигабит;

- разработка и производство кремниевых высокоскоростных интегральных схем с рабочей частотой выше 100 ГГц;
- создание базовых интегральных схем для логических устройств со сверхвысокой плотностью интеграции и низким энергопотреблением;
- создание запоминающих и логических компонентов с высокой степенью интеграции;
- создание конфигураций нового типа для интегрированных подсистем сенсорных устройств.

Очень высокий уровень инвестиционных затрат в области полупроводниковой техники привел к тому, что в мире лишь немного крупных действующих фирм могут выступать в качестве инициаторов крупных инновационных проектов, способных подготовить переход от микро- к наноэлектронике. К таким предприятиям относятся Advanced Micro Devices Inc. (AMD, [www.amd.com/de-de](http://www.amd.com/de-de)) и Infineon ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)). Исследовательские отчеты этих фирм наглядно демонстрируют огромную роль НТ в разработке новейших типов продукции. К числу основных продуктов полупроводниковой промышленности (процессоров и запоминающих устройств), имеющих огромный рынок сбыта, в последние годы добавились нанотехнологические датчики разных типов. В качестве типичного примера можно привести производство высокоэффективных датчиков магнитного сопротивления (см. главу 7), которые используются не только в бытовой технике (устройства считывания информации с жестких дисков), но и для решения глобальных задач позиционирования и измерения. Из крупных инвесторов в этой области можно назвать фирмы Siemens ([www.siemens.de](http://www.siemens.de)), Bosch ([www.bosch.de](http://www.bosch.de)) и Philips ([www.philips.de](http://www.philips.de)), где на основе НТ были разработаны новые виды высокоэффективных датчиков магнитного сопротивления, которые сегодня выпускаются по доступным ценам и находят новые области применения ([www.ismael-project.net](http://www.ismael-project.net)). Развитие производства датчиков вообще (и датчиков магнитного сопротивления, в частности) демонстрирует удачные варианты развития инновационных проектов в малых и средних предприятиях, характерными примерами чего могут служить успешные фирмы HL Planar ([cms.hlplanar.de](http://cms.hlplanar.de)) или Sensitec ([www.sensitec.com](http://www.sensitec.com)). Аналогичная ситуация сейчас складывается в сфере производства биодатчиков, биочипов и других регистрирующих устройств массового применения. К их производству привлекаются и очень известные, мощные фирмы и организа-

ции, однако важные и успешные инновации могут осуществлять и более мелкие предприятия.

Нанотехнологии открывают множество новых возможностей и в автомобильной промышленности (см. главу 7), особенно для снижения потребления горючего, уровня загрязняющих выбросов, повышения безопасности и увеличения сроков эксплуатации деталей и оборудования. Машина будущего станет «умной» и, возможно, научится реагировать на сигналы или самостоятельно двигаться по заданному маршруту. Стекла и зеркала будут максимально приспособлены к световым соотношениям, шины будут лучше держаться на различных дорожных покрытиях, а многочисленные датчики будут своевременно регулировать состояние автомобиля при перемене погодных условий или при опасности столкновения. Очень важные изменения произойдут в эстетическом оформлении и функциональных свойствах автомобиля, так как, например, электронное устройство, возможно, будет способно непрерывно изменять цвет и внешний вид машины, придавая дизайну индивидуальность. Нанотехнологические разработки должны привести к оптимизации процесса сгорания, высокой очистке выхлопных газов, уменьшению веса кузова, созданию самовосстанавливающихся лаков и покрытий, повышению ударной стойкости, качества шин, функционального остекления и многим другим, крупным и мелким улучшениям конструкции. В будущем ожидается значительное усложнение автомобильной электроники и автоматизации, а также существенное изменение механической части автомобилей. Нанотехнологические компоненты и методы будут внедряться в автомобильную промышленность, с одной стороны, через поставщиков, с другой стороны — в результате усилий самих проектировщиков. В этой связи очень интересны, например, проекты «перспективных автомобилей», предлагаемые крупнейшими фирмами.

Похожая ситуация складывается в оптической промышленности, точном приборостроении, производстве измерительной техники и т. п. Кроме этого, НТ уже существенно воздействуют и на развитие больших секторов промышленности и экономики, например на производство строительных материалов, продуктов питания и некоторые отрасли сельского хозяйства. В этих областях нанотехнологии ранее направлены вообще не применялись, но сейчас в них все чаще используются новые НТ материалы и методы обработки. В настоящее время НТ высту-



пает в роли «субпоставщика» материалов и идей, однако ситуация постепенно меняется. Обзор состояния разнообразных вкладов НТ в различные отрасли промышленности и сельского хозяйства можно найти на странице [www.chemlin.de/chemie/nanotechnologie](http://www.chemlin.de/chemie/nanotechnologie).

## Б. Информация об исследованиях и дальнейшем образовании

Нанотехнология выступает в роли ведущей технологии 21-го века и приобретает все большую экономическую значимость, вследствие чего она становится глобальным фактором формирования рынка рабочей силы. Новые технологии предлагают по всему миру и на всех уровнях повышение занятости, но уже проблема состоит в том, что квалифицированная рабочая сила необходима лишь в определенных областях, являющихся сферой конкуренции и требующих высокого уровня знаний или дальнейшего обучения. В сфере НТ главная проблема сводится к тому, что работающие в этой области специалисты должны иметь представление о научно-технических основах производства, что практически всегда означает необходимость дальнейшего образования и подготовки.

Нанотехнология в ее сегодняшнем виде получила развитие в результате научного изучения атомно-молекулярных структур и их особенностей, что стало возможным лишь в результате научных исследований с участием профессионально подготовленных специалистов на всех уровнях. В принципе, нет никаких специально обученных «нанотехнологов», вследствие чего некоторые специалисты вообще утверждают, что не следует вообще создавать специальные возможности образования в области НТ. В исследованиях наноструктур, что составляет основу нанотехнологических разработок, особую роль играет взаимодействие специалистов в разных классических областях науки, примеры чего уже приводились в главе 5. Несколько лет считалось, что техническое образование (в сочетании со степенью кандидата наук) является достаточной основой для самостоятельной научной работы в теоретическом или экспериментальном аспекте НТ. Однако в последнее время преподавателям стало ясно, что ограничение интересов только проблемами НТ (например, при изучении отдельных научных дисциплин)

таит в себе опасность пренебрежения классическим естественно-научным образованием.

Сложная ситуация сложилась в отношении внедрения НТ в промышленность, где зачастую специалист должен иметь широкий спектр знаний о возможностях сочетания технологий разного типа. Комплексные технологические подходы особенно важны при решении конкретных задач, для чего, возможно, следует создавать специальные учебные пособия и курсы повышения квалификации. Так как большинство рабочих мест, возникающих (непосредственно или косвенно) в связи с развитием НТ, относится к промышленности или промышленной конверсии, а не к научным исследованиям, возникло большое число учебных курсов и программ повышения квалификации в сфере НТ ([www.studieren.de](http://www.studieren.de)). В данный момент специальные учебные курсы по НТ в Германии предлагают 4 университета и два высших технических учебных заведения.

Например, учебный курс «Микро- и наноструктуры» в университете Саарланда, который существует уже несколько лет, тематически распределен между дисциплинами механики и физики. В рамках основного учебного курса студентам даются базовые инженерно-научные знания, что позволяет им самим позднее выбрать область дальнейшей деятельности (инженерные применения, физические основы и т. п.). Соответственно, после окончания курса (десять семестров регулярного обучения) можно получить диплом инженера или физика, а затем продолжить образование до получения степени бакалавра или магистра. Дополнительную информацию читатель найдет на сайте [www.uni-saarland.de/fak7/physik/](http://www.uni-saarland.de/fak7/physik/).

Учебный курс «Наномолекулярная наука» предлагается в международном университете Бремена, где трехсеместровый дополнительный курс обучения нацелен на широкое образование в стандартных областях НТ и может служить основой для получения степени магистра наук. Дальнейшую информацию можно получить на сайте [www.iu-bremen.de/nanomol/](http://www.iu-bremen.de/nanomol/).

В университете Вюрцбурга слушателям предлагается учебный курс «Наноструктурная техника», целью которого является подготовка дипломированных инженеров со специальными знаниями о наноматериалах и нанотехнологиях, а также о производстве и анализе компонентов и систем из сверхмалых частиц. Обучение базируется на основном курсе (4 семестра), в котором даются инженерные и естественно-научные базовые

знания. Упор в основном курсе обучения делается на организацию учебного процесса с обязательными инженерными дисциплинами и выбором циклов лекций по наноструктурным материалам и нанотехнологиям (компоненты, системы, энергетика, нано- и оптоэлектроника, биомедицинская техника и т. п.). Параллельно студенты могут изучать экономику, право и углублять свои познания в естественных науках вообще. Более полную информацию об этом учебном курсе можно получить на сайте [www.physik.uni-wuerzburg.de/nano](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/nano).

Учебный курс (с названием «Наука наноструктур»), недавно введенный в университете Касселя, подразумевает обучение в течение 10 семестров. Студентам даются солидные теоретические и практические знания в естественно-научных дисциплинах, а также основы знаний в области нанотехнологий с упором на дальнейшие применения. Предполагается получение и расширение навыков, необходимых для междисциплинарных исследований. По окончании курса выдается диплом. Более подробную информацию можно получить на странице [www.uni-kassel.de/zsb/nanowiss.pdf](http://www.uni-kassel.de/zsb/nanowiss.pdf).

Техническая высшая школа Южной Вестфалии предлагает комбинированный учебный курс под названием «Био- и нанотехнология», охватывающий биотехнологии, защиту окружающей среды, а также нанотехнологию вообще. Курс основан на междисциплинарном естественно-научном подходе и нацелен на студентов, интересующихся химической и биологической постановкой вопросов. На первых трех семестрах программа включает базовые предметы, а затем предусматриваются специализированные курсы по углублению и расширению знаний в различных прикладных областях. При этом имеется возможность специализации путем выбора альтернативных дисциплин (биотехнология, техническая защита окружающей среды, нанотехнология поверхностей). По окончании курса выдается диплом. Более подробную информацию можно получить на странице [www3.fh-swf.de/studieninteressierte/bionano.htm](http://www3.fh-swf.de/studieninteressierte/bionano.htm).

Еще один учебный курс с названием «Микро- и нанотехника» предлагается в высшей технической школе Мюнхена. Обучение осуществляется в соответствии с международным стандартом, имеет междисциплинарный характер и объединяет электронную и информационную технику, машиностроение, точное приборостроение, свойства материалов, а также физику, химию и биологию. Курс рассчитан на всех специалистов, инте-

ресующихся НТ и имеющих диплом или степень бакалавра в естественно-научной или инженерно-научной области. Более подробную информацию можно получить на сайте [www.fb06.fhmuenchen.de/fb/studinfo/studiengaenge/flyer/mikro\\_nanotechnik.pdf](http://www.fb06.fhmuenchen.de/fb/studinfo/studiengaenge/flyer/mikro_nanotechnik.pdf).

Еще одну возможность дальнейшего образования в области НТ предоставляет институт Штайнбайса ([www.stw.de/k077/77908/77908.htm](http://www.stw.de/k077/77908/77908.htm)), где на различных семинарах по технологиям рассматриваются темы, касающиеся использования и внедрения НТ. Ведется подготовка учебного курса, полезного для профессиональной деятельности в сфере НТ.

В других странах Европы и мира предложения по дополнительному образованию в области НТ выглядят примерно так же, особенно в США, где есть широкий выбор специализированных учебных курсов по НТ. С учетом все более развивающейся унификации предложений учебных курсов и академического обучения в области НТ, следует ожидать некоторых изменений в структуре обучения учебных заведений.

Во многих случаях сегодня речь идет только об определенных профессиях в сфере НТ (например, лаборантах и т. п.), однако в целом пока неясно, будет ли сформулирована программа классического образования в сфере НТ. Мнения специалистов на этот счет расходятся, а общий обзор возможностей образования и дальнейшего обучения заинтересованные в НТ лица могут получить на сайте [www.infobub.arbeitsagentur.de/kurs/index.jsp](http://www.infobub.arbeitsagentur.de/kurs/index.jsp).

## А

Агрегатные состояния 34  
Алмаз 34  
Аналитические методы 65, 66–90  
Атомно-молекулярные компоненты 48  
Атомно-силовые микроскопы 59

## Б

Бинниг, Герд 21, 76  
Биоактивные материалы 56  
Биодатчики 64  
Биодетекторы 58  
Биологические имплантаты 56  
Биологические мембраны 64  
Биологические моторы 61  
Биологические реакторы 58  
Биологические наноструктуры 47  
Биологические структуры 38, 48  
Биологический синтез наночастиц 60  
Биомаркеры 113  
Биомеханика 51  
Биомиметические устройства 64  
Бионаноматериалы 64  
Бионика 46, 51  
Биотехнологические процессы 55  
Биотехнологические системы 52  
Биофильные материалы и поверхности 56  
Биофункциональные материалы 58  
Биохимические датчики 92  
Биоцидные поверхности 56  
Биоцидный эффект 105  
Биоцидный эффект наночастиц 116  
Биочипы 57–58, 63, 122  
Ближний порядок 33  
Брэгг, Лоренс 68

## В

Вилкинс, Морис 68  
Водородная энергетика 129  
Временное разрешение 73  
Высоковакуумные установки 82

## Г

Гейзенберг, Вернер 75  
Гибкий зонд 87  
Гипертермия 57, 94  
Графит 35, 45  
Графитоподобные структуры 49

## Д

Дальние взаимодействия 33  
Дальний порядок 33  
Движения «без трения» 45  
Двойная спираль ДНК 68  
Джой, Билл 137  
Диагностика и лечение болезней 56  
Диоксид кремния 108  
Дисперсные системы 34  
Дрекслер, Эрик 45, 137

## Ж

Жидкие кристаллы 34, 52

## З

«Закаливание» расплава 91  
Закон Мура 26, 100  
Закон масштабирования 39  
Защита от коррозии 127  
Защищенность частной жизни 145

## И

Изменение масштабов 30, 32, 40  
Изоляционные материалы 130  
Имплантаты 58  
Интегральные схемы 28  
Интерфейсы 58  
Ионные каналы 46, 48  
Искусственные атомы 40



**К**

- Кантилеверы 59
- Кардиостимуляторы 26
- Квантово-механические эффекты 41
- Квантовые закономерности 32
- Квантовые точки 39, 40, 41
- Квантовый туннельный эффект 97
- Кластеры 37, 42, 44
- Композиционные материалы 61
- Контрастные вещества 56
- Контроль структурных параметров 29
- Кремниевые микроструктуры 39
- Кремний 30, 31
- Крик, Фрэнсис 68
- Кристаллическая решетка 33, 35
- Кубок Ликурга 20
- Курцвейль, Рей 137

**Л**

- «Лаборатория на чипе» 57
- Легирующие материалы 30
- Литография 31
- Литографические методы 29

**М**

- Магнитно-силовой микроскоп 87
- Матрицы из нанофорсунок 124
- Медицина 56
- Медицинская этика 147
- Межмолекулярные взаимодействия 38, 61
- Металлосодержащие наночастицы 113
- Метастабильные состояния 38
- Методики типа сверху – вниз 17
- Методики типа снизу – вверх 17–18
- Методы изготовления наноструктур 91–93
- Механические вибраторы 41, 44
- Механическое дробление вещества 29
- Микромеханические вибраторы 92
- Микросистемные устройства 47
- Микроскопические методы 67
- Микроскопические методы анализа 70
- Микротечучесть 63

- Микроэмульсия 91
- Миниатюризация 25–26, 29–32, 39, 45, 47, 49, 58, 100
- Многослойные наноматериалы 123
- Модели типа снизу – вверх 32, 37
- Молекулярная самоорганизация 53
- «Молекулярные ассемблеры» 49
- Молекулярные наномеханизмы 47
- «Молекулярные фабрики» 61
- Молекулярный кристалл 37
- Молекулярный «роторный двигатель» 45

**Н**

- Нанобетон 95
- Нанобиологические объекты 58
- Нанобиотехнологические разработки 51
- Нанобиотехнология 19, 51, 57, 114
- Нанодвигатели 45
- Нанокластеры 44, 129
- Нанокристаллы 42, 43
- Нанолаки 125
- Нанометровые клапаны 46
- Нанопокрyтия 95
- Нанопористые вещества 129
- Нанопористые материалы 124, 127
- Нанопористые фильтры 93
- Нанопористый кремний 41
- Нано-распределение 145
- Наносистемная техника 97
- Наноструктурные катализаторы 106
- Наноструктурные многослойные материалы 42
- Наноструктурные материалы 41
- Наноструктурные материалы и поверхности 58
- Нанотранзистор 31
- Нанотрубки 37, 45
- Наноферриты 112
- Нанофильтры 127
- Нанохимия 106
- Наноэлектроника 102
- Наноэлектронные нейронные имплантанты 147
- Направленная доставка препаратов 57
- Неизотропные системы 33

Нейронные сети 62  
 Неупорядоченные наноструктурные материалы 42

**О**

Обработка и хранение информации 26  
 Окись железа 94  
 Окись титана 94, 106  
 Оптическая анизотропия 52  
 Оптические измерения 66  
 Оптические свойства 19, 44  
 Оптические эффекты 108  
 Оптический анализ 75  
 Оптическое разрешение 75  
 Оптоэлектронные материалы 30  
 Органические металлы 128  
 Органические светодиоды 120  
 Отношение поверхность/объем 44  
 Отражение 70

**П**

Плотность записи информации 26  
 Поверхность структуры 31  
 Поверхностные области материала 32  
 Показатели рынка 22  
 Полимерная электроника 120, 129  
 Полимерные дисперсии 105  
 Полимеры 30, 97  
 Полинг, Лайнус 68  
 Полупроводниковое запоминающее устройство 45  
 Пористые материалы 42  
 Потенциальные опасности 139–141  
 Программирование клеток 58  
 Просвечивающий электронный микроскоп 75–76  
 Пространственное разрешение 73  
 Процессы биоминерализации 64  
 «Пьезодвигатели» 81  
 Пьезотрубки 79  
 Пьезоэлектрический эффект 78

**Р**

Рассеивание 70  
 Растрово-зондовая методика 58  
 Растровый туннельный микроскоп 21

Регулярные наноструктурные кристаллы 42  
 Резонанс 70  
 Рентгеновское излучение 67  
 Рентгеноскопия 67  
 Рентгеноструктурный анализ 70  
 Риски для людей 144  
 Рорер, Гейнрих 21, 76

**С**

Самоорганизация 49, 51, 61–62, 64  
 Саморепликация 64  
 Самосборка 60  
 Сверхпроводимость 37, 82  
 Свяжующие полупроводники 30  
 Синтетические наночастицы 105  
 Сканирующие атомно-силовые микроскопы 76  
 Сканирующий микроскоп ближнего поля 76, 88  
 Сканирующий зондовый микроскоп 78  
 Сканирующая зондовая микроскопия 76  
 Сканирующий туннельный микроскоп 68, 76  
 Скейлинг 40  
 Соляротермика 126  
 Социально-экономические последствия развития НТ 134–136  
 Социальные последствия 140  
 Стволовые клетки 54, 58  
 Стекловолокно 88  
 Суперпарамагнетизм 112  
 Супрамолекулярные структуры 97  
 Сшитые полимеры 43

**Т**

Танигучи, Норио 21  
 Твердость 15  
 Термодинамическое равновесие 38  
 Техническая наносистема 52, 54  
 Технологии типа от био к нано 60–64  
 Технологии типа от нано к био 55–59  
 Транзистор 31, 47  
 Туннельно-магнитные резисторы 96  
 Туннельный ток 82  
 Туннельный транзистор 45

**У**

- Углеродные нанотрубки 114
- Уменьшение размеров 32
- Уотсон, Джеймс 68
- Упорядочение атомов 35
- Упорядочение структуры 38

**Ф**

- Фармакология 56
- Фейнман, Ричард 20
- Ферромагнитные жидкости 126
- Ферромагнитные запоминающие ячейки 103
- Физико-химические ограничения 28
- Физико-химические свойства 16
- Физические свойства 16
- Финансирование исследований 22
- Флуоресценция 40, 42
- Фотогальваника 126
- Фотопроводящие полимеры 121
- Фотохимические реакции 107
- Франклин, Розалина 68
- Фуллер, Ричард Букминстер 37
- Фуллерен 35, 41, 49, 91, 97, 125
- Функциональность 18
- Функциональность компонентов 16
- Функциональность систем 32
- Функциональные возможности 44
- Функциональные гибридные структуры 64
- Функциональные свойства 56

**Х**

- Химическая активность 15, 44

**Ц**

- Цеолиты 42

**Ч**

- Численное моделирование 75

**Ш**

- Шаровые мельницы 91

**Э**

- Электрическая проводимость 15, 35
- Электролюминесценция 42
- Электронно-лучевая литография 92
- Электронные свойства 44
- Электро-силовой микроскоп 87
- Электрохромные составы 123
- Эндоскопический метод 25
- Этические аспекты 141–149
- Эффект лотоса 95, 110

**Я**

- Ячейки Гретцеля 64