

“НАНОТЕХНОЛОГИИ: от нанофантастики к нанореализму”

(обзорно-аналитическое исследование)

Алматы, 2010

66-022

184160

Гласенев. М. С.

экологич

пантостик

а. м. р. у.

109.

АО “Национальный центр научно-технической информации”
Республика Казахстан

М.С. Тасекеев

“НАНОТЕХНОЛОГИИ: от нанофантастики к нанореализму”

(обзорно-аналитическое исследование)

Алматы, 2010



УДК 66-022.532

Тасекеев М. С. Нанотехнологии: от нанофантастики к нанореализму: Аналит. исслед. – Алматы: НЦ НТИ, 2010. – 276 с.

В настоящем обзоре в научно-популярной форме приводятся исторические факты и современные возможности, обуславливающие нанотехнологическую революцию в мировой научно-технической сфере.

На примерах и фактах показаны бесспорные преимущества нанотехнологических методов в таких стратегических областях, как информационные и коммуникационные технологии, в которых особая роль принадлежит нанозлектронике. В полупроводниковой промышленности, где, по мнению многих аналитиков, уже к 2020 г. актуальными станут приборы размером в 10 нм (вероятнее, это будут приборы молекулярной электроники). По сути это первое исследование без претензий на научность и академичность изложения, которое, однако, изобилует интересной и серьезной фактической информацией. Надеемся, что изложенный материал сделает книгу запоминающейся. В ней рассматриваются наиболее актуальные области развития мировой промышленности, в которых применяются достижения нанотехнологии. Описывается наноинструментарий и прослеживается развитие мирового рынка наноиндустрии. Без всяких купюр приводятся мнения как сторонников, так и противников внедрения нанотехнологических методов в различные отрасли промышленности. Предлагается также и мнение автора относительно возможностей развития нанотехнологий в Казахстане.

Настоящая публикация может быть одинаково полезна и преподавателям, и студентам вузов, и просто любопытствующим читателям, которые занимаются поиском сфер приложения своих знаний в будущем.

Ил. 13. Табл. 13. Библиогр. 38.

ГЛОССАРИЙ

Ассемблер – молекулярная машина, способная к саморепликации, которая может быть запрограммирована строить любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков.

Графен – двумерный кристаллический углеродный наноматериал, который можно представить как пластину, состоящую из атомов углерода. Материал обладает уникальными токопроводящими свойствами, которые позволяют ему служить очень хорошим проводником и полупроводником. Графен чрезвычайно прочен и выдерживает огромные нагрузки как на разрыв, так и на прогиб.

Дендримеры – деревообразные полимеры, молекулы которых имеют большое число разветвлений. У таких разветвленных молекул в процессе синтеза образуются полости, в которые можно поместить другие молекулы, в частности, лекарственные препараты. Это позволяет как можно дольше сохранять лечебное воздействие этих молекул, поэтому дендримеры используются в медицине, например, при лечении злокачественных опухолей дендримеры всасывают «ветками» раковые клетки в большом количестве, убивая их размещенным внутри лекарством.

Инновации – целенаправленный и управляемый процесс предпринимательской деятельности, связанной с переносом последних достижений науки, техники и технологий в бизнес-среду. Инновации, внедряются в производство, в расчете на повышение потребительских свойств продукции и, как следствие, на коммерческий успех*.

Микроэлектромеханическая система (МЭМС) – миниатюрная система, содержащая электронные и механические компоненты с характерным размером 1-100 мкм. Благодаря малым размерам МЭМС демонстрируют уникальные свойства, не выраженные для макроскопических (или классических) тел в силу более высокого отношения площади поверхности к объему: повышенную чувствительность к статическому (поверхностному) электричеству и смачиваемость (действие сил поверхностного натяжения).

Нанoeлектромеханическая система (НЭМС) – микроэлектромеханическая система, имеющая размер менее 100 нм. Например, с использованием НЭМС созданы нанорезонаторы с собственной частотой колебаний 10 ГГц, что нашло применение в сканирующей зондовой микроскопии при создании нановесов (систем определения массы нанобъектов) и наносенсоров для биологически активных молекул и ДНК.

Нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, которые имеют принципиально новые качества и позволяют осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

Нанотехнологии – совокупность методов и приемов, применяемых при изучении, производстве и использовании структур и систем, состоящих из наномасштабных элементов (1-100 нм) для получения объектов с новыми химическими, физическими, биологическими свойствами*.

Наноматериалы – разновидность продукции наноиндустрии в виде материалов, содержащих структурные элементы с нанометровыми размерами, наличие которых обеспечивает существенное улучшение или появление качественно новых механических, химических, физических, биологических и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов*.

Наносистема – содержит структурные элементы размером порядка 1-100 нм, которые определяют её основные свойства и характеристики в целом. К разряду наносистем относятся наноустройства и наноматериалы.

Наносистемная техника – полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Нановолокно – волокно, имеющее диаметр менее 100 нм. Обычно такие волокна получают методом интерфейсной полимеризации.

Наножидкости – наноэмульсии (равномерно распределенные нанокapельки одной несмешивающейся жидкости в другой) наиболее известные примеры наножидкостей. Равномерно распределенные твердые наночастицы в жидкости называют нанозолем или коллоидным раствором. Дисперсная фаза магнитных наножидкостей представляет собой однодоменные магниты, равномерно распределенные в объеме дисперсной фазы. Подобные системы могут управляться магнитным полем для обеспечения герметизации механических вводов вакуумных систем при производстве полупроводников, в вакуумных печах, электронных микроскопах и других вакуумных установках.

Нанокерамика – можно определить как керамический материал, получаемый спеканием глины или порошков неорганических веществ, размеры кристаллитов которых составляют менее 100 нм. Отдельные образцы нанокерамики – прочной, хорошо проводящей тепло и стойкой к резкому перепаду температур, можно уже сейчас увидеть на нагреваемой поверхности домашней электроплиты.

Нанонити – нанонити или вискеры (англ. whisker – «ус», «волос») – нитевидные кристаллы диаметром от нескольких нанометров до долей микрометра с отношением длины к диаметру более 1000. Такие системы обладают малым содержанием микроструктурных дефектов, рекордно высокой плотностью и часто используются в качестве упрочняющих волокон, например в композитах.

Нанообъект – объект, линейный размер которого хотя бы в одном направлении составляет порядка 1-100 нм.

Нанопорошок – агломерат некристаллических наноструктурных единиц, хотя бы один характерный размер которых менее 100 нм.

Нанопроволока – наноструктура, в которой два характерных размера находятся в диапазоне 1-100 нм, при этом один (линейный) размер может быть неограниченным.

Наносенсор – физический, химический или биологический сенсор, транслирующий информацию о наночастицах в виде, доступном для восприятия макроскопическими объектами, в частности, органами чувств человека.

Наноструктурные проводники – основная особенность сверхпроводников (материалов с нулевым электрическим сопротивлением при определенной температуре) заключается в том, что в них возникает взаимное притяжение электронов с образованием электронных пар (так называемые куперовские пары). Причиной этого притяжения является дополнительное к кулоновскому отталкиванию взаимодействие между электронами, осуществляемое под воздействием кристаллической решетки и приводящее к притяжению электронов. Эти эффекты проявляются на наноразмерном уровне, и в наноструктурных сверхпроводниках формируются подобные структуры.

Наноиндустрия – интегрированный комплекс производственных, научных, образовательных и финансовых организаций различных форм собственности, осуществляющих целенаправленную деятельность по созданию интеллектуальной и промышленной конкурентоспособной продукции, относящейся к сфере нанотехнологий.

Нанороботы – микроскопические роботы, созданные с использованием наноматериалов. По размеру нанороботы сопоставимы с молекулами, при этом могут двигаться, а также обрабатывать и передавать информацию. Также нанороботы поддерживают функции выполнения программ. В перспективе планируется использовать нанороботов в медицине, например, для доставки лекарств в теле человека.

Нанотрубки – протяжённые структуры цилиндрической формы, состоящие из свёрнутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах. Диаметр нанотрубок составляет от одного до нескольких десятков нанометров, длина – до нескольких сантиметров.

Наноэлектроника – формирующаяся область техники, обеспечивающая физические и технологические основы создания интегральных электронных схем с характеристическими размерами менее 100 нм. Использование квантово-размерных эффектов позволит в будущем перейти в сферу квантовых чипов и квантовых компьютеров в наноэлектронике.

Нанокompозиты – композитами в материаловедении именуют материалы, состоящие из смеси или комбинации двух или более со-

ставляющих, различных по форме, химическому составу и свойствам. Наноструктурные композиты имеют повышенные механические и иные свойства из-за уменьшения среднего размера кристаллитов и уплотнения материалов.

Нанокристаллы – под нанокристаллом понимают любую наночастицу, характеризующуюся упорядоченным строением и четко выраженной, как и у обычных кристаллов, границей.

Инструментарий нанотехнологий – набор технологических приемов и устройств для изучения наносистем (электронный микроскоп, сканирующий зондовый микроскоп и др.) с системами нанопозиционирования, создания наноструктур, например методами нанолитографии.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) – сканирующий зондовый микроскоп, использующий туннельный эффект в системе «образец + игла» для определения пространственной структуры поверхности образца с точностью до атома. СТМ обладает некоторыми ограничениями, накладываемыми на образец (должен быть проводящим), на методику изготовления иглы (на кончике иглы должен быть только один атом), и не всегда способен различать близлежащие атомы друг от друга.

Туннельный эффект – эффект преодоления микрочастицей потенциального барьера в случае, когда полная энергия (после преодоления барьера) меньше высоты потенциального барьера. Туннельный эффект не может быть объяснен в рамках классической теории и требует привлечения рассуждений квантовой теории. Туннельный эффект нашел применение во многих областях техники, в частности, на основе этого эффекта построена широко распространенная флэш-память.

Углеродная нанотрубка (УНТ) – представляет собой графитовую плоскость, свернутую вокруг продольной оси. Бывают одно- и многостенные (несколько плоскостей) нанотрубки. Диаметр таких объектов варьируется от 0,4 до 100 нм, а длина – от 1 до 100 мкм. Разнообразие применения таких нанобъектов уникально: используются механические, электрические и иные свойства подобных систем для проектирования различных устройств на их основе.

* В мире нет однозначно признанного определения этих понятий. В энциклопедии приводятся рабочие версии определений, используемых в «Российской корпорации нанотехнологий».

*«Лучший путь предсказания будущего –
это участие в его создании».*

Alan Kay

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Российскому энциклопедическому словарю – технология, это совокупность приёмов и способов получения, обработки или переработки сырья, материалов, полуфабрикатов или изделий, осуществляемых в различных отраслях промышленности, в строительстве и т. п.; научная дисциплина, разрабатывающая и совершенствующая такие приёмы и способы. Технологией (или технологическими процессами) называют также сами операции добычи, обработки, переработки, транспортирования, складирования, хранения, которые являются основной составной частью производственного процесса. В состав современной технологии включается и технический контроль производства. Технологией принято также называть описание производственных процессов, инструкции по их выполнению, технологические правила, требования, карты, графики и др. [1].

Особенность нанотехнологий заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров. «Сырьем» являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие по крайней мере миллиарды атомов и молекул. В отличие от традиционной технологии для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологическими свойствами, так и новые классы уст-

роЙств с характерными нанометровыми размерами. Это уже операции не с веществом, а с отдельными атомами.

Понятие «нанотехника» было введено в 1974 г. японцем Норио Танигучи, однако определение нанотехнологии еще не устоялось. По-видимому, можно придерживаться следующего рабочего определения.

Нанотехнологией называется междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами.

Из-за междисциплинарного характера нанотехнологий перечень возможных областей их применения может быть очень велик. Вот только несколько примеров:

- промышленное производство,
- медицина,
- охранные и оборонные устройства,
- устройства генерации и хранения электроэнергии,
- транспорт,
- связь,
- вычислительная техника.

Нанотехнология радикально изменит многие производственные процессы, допуская значительную экономию стратегических материалов и энергетических ресурсов, а также улучшит экологическую обстановку (снижение вредных излучений и выбросов загрязнений).

В таких стратегических областях, как информационные и коммуникационные технологии, сыграл большую роль наноэлектроника. В полупроводниковой промышленности, по мнению многих аналитиков, уже к 2020 г. актуальными станут приборы с размерами 10 нм (вероятнее, это будут приборы молекулярной электроники).

Новые наноматериалы будут обладать такими привлекательными свойствами, как малый вес, высокая теплоизоляция, электропроводность и поверхностная функциональность. Ожидается создание материалов с антибактерицидными свойствами, самоупорядочивающиеся

пористые материалы для магнитной памяти или поглощения радиолокационных сигналов, для генерации и хранения электроэнергии – эффективных солнечных батарей и топливных водородных ячеек.

Уже в скором времени биомедицинская нанотехнология позволит разработать и массово производить дешевые наносенсоры, которые будут внедрены в повседневную жизнь – контроль качества воды, пищи и атмосферы в режиме реального времени в домах, офисах и на предприятиях.

В медицине наносенсоры позволят повысить качество диагностики благодаря получению одновременно десятков различных данных о состоянии организма и обработки их в реальном времени с помощью электронных чипов. Наносенсоры станут незаменимыми и эффективными в охранных системах для предотвращения взрывов и биоугрозы. Отсюда и пошла охватившая весь мир нанопандемия – для любой цели можно сформулировать актуальное решение с применением нанотехнологий [2].

1. НАНОНАЧАЛО

1.1. Наносегодня

Около 15 лет назад ученые и инженеры начали обсуждение технологической революции, которая будет иметь такие же последствия для общества, как промышленная революция. Новую революцию называли нанотехнологической. На сегодняшний день идеи и взгляды ученых-пионеров в нанотехнологии нашли применение в интеллектуальных, научных и инженерных мировых сообществах. Недавно правительства и крупнейшие корпорации по всему миру инвестировали за год несколько миллиардов долларов для развития и применения в производстве нанотехнологий.

По каноническому определению, нанотехнология – «ожидаемая технология производства, ориентированная на дешевое получение устройств и веществ с заранее заданной атомарной структурой». По прогнозам Национального научного общества США, в 2015 г. мировой рынок нанотехнологий будет оцениваться в 1 трлн дол. В настоящее время существует 700 нанотехнологических компаний; с 1999 г. объем венчурных капиталовложений в них составил 900 млн дол.

В 2000 г. в США организовали Национальную нанотехнологическую инициативу (ННИ). На 2003 г. объем суммарного государственного финансирования ННИ достиг 2 миллиарда дол. В программе развития нанотехнологии только в США занято около 40 тыс. ученых.

На сегодня основными инвестируемыми отраслями нанотехнологии являются: наноматериалы, нанонструменты, компьютерные технологии, микроэлектромеханическая система (МЭМС) и нанобиотехнологии. Со времен космической гонки программа Нанотехнологической

инициативы в США – самая финансируемая область науки. К тому же Нанотехнологическая инициатива – научная программа № 1 в Администрации президента США.

В настоящее время на рынке уже существует большое количество продуктов, произведенных с помощью нанотехнологий и пользующихся большим спросом. Вот краткий перечень наиболее известных: солнцезащитный крем «Nucelle» на основе наночастиц двуокиси титана от Inmat, солдатская форма «Eddie Bauer» на основе молекулярных покрытий текстиля от «Nano-Tex», нанокапсулы «L'Oreal» для косметики, средства медицинской визуализации «Evidots от Evident Technologies». Компания «Wilson Sporting Goods» представила теннисные мячи, изготовленные по новой технологии. Внутреннее покрытие мяча состоит из материала, полученного с помощью нанотехнологий, который препятствует утечке воздуха из мяча даже после месяца систематических игр. Продукт оказался настолько популярен, что его признали официальным мячом кубка Дэвиса, и на сегодняшнее время «Wilson Sporting Goods» занимает ведущую позицию на рынке теннисных мячей. Компания «Intel» объявила еще в августе 2002 г. о начале производства процессоров и комплектующих по новой 90-нм технологии (раньше использовалась 130-нм технология). При этом скорость переключения транзисторов увеличится и, таким образом, возрастет быстродействие продукции на их базе.

Тем не менее не стоит пренебрегать оценкой недалекого будущего. Основанная в середине 1997 г. корпорация «Zyvex» объявила, что уже через 10 лет ею будет сконструирован первый ассемблер – наномашина, способная к репликации и конструированию нанообъектов с заранее заданной структурой. По предварительным расчетам, рынок респираторов (наноустройств, способствующих излечению серповидноклеточной анемии) составит только в США около 5 миллиардов дол. в год. Однако изготовление таких устройств станет возможным только после создания ассемблеров. При инвестировании 200 млн дол. использование разработанных в наше время методов ДНК-конструкций для системы доставки лекарств может принести около 1,3 миллиарда (по материалам USC). В России на данный момент в области нанотехнологий (особенно атомно-силовой, сканирующей зондовой микроскопии) успешно работают многие компании. Это концерн «Наноиндустрия», компаний

«NT-MTD», «SkyPiese» и др. Причем наблюдается высокий экономический рост российских нанотехнологических компаний. Так, например, рост объемов продаж фирмы «NT-MTD» вырос по сравнению с прошедшим годом на 100 %.

Консорциум «Альфа-групп» объявил о начале долгосрочной программы инвестирования в российскую науку и в нанотехнологии в частности. Учрежденное консорциумом ОАО «Русские технологии» собирается вложить по крайней мере 20 млн дол. в 10-15 компаний, имеющих наработки в сфере биотехнологий, нанотехнологий и материаловедения. В настоящее время «Русские технологии» изучают 20 проектов, всего же планируется вложить по 1-3 млн дол. в 10-15 фирм. Если работы фонда окажутся результативными, финансирование может быть увеличено. «Альфа-групп» – не единственный из крупных многоотраслевых холдингов, рискнувший вложить средства в российскую науку. Так, в конце 2001 г. группа «Интеррос» сообщила о намерении вложить в новые технологии 100 млн дол. Специально для этого проекта был создан венчурный холдинг «New Economy Fund» (NEF).

Эксперты прогнозируют, опираясь на тесную взаимосвязь микроэлектроники, современных информационных технологий и нанотехнологий, а также на их очевидное быстрое развитие и массовое применение, стремительный рост научных достижений и на их основе – производство продуктов массового потребления в последующие несколько лет. Главным образом это касается информационных и компьютерных технологий. На основе нанолитографии и молекулярного подхода в микроэлектронике ведущими компьютерными производителями (IBM, HP, AMD, Intel) уже получены продукты, изготовленные с учетом нанотехнологий. В ближайшие 10 лет вся полупроводниковая промышленность и половина фармацевтической будут базироваться на достижениях нанотехнологии. Вот несколько примеров: молекулярная память, изготовленная HP, транзистор, в котором несущим элементом является один электрон, изготовленный фирмой «Intel», жидкокристаллические матрицы для визуализации Samsung, Sun Microsystems, зеркальные матрицы для оптоволоконной связи Lucent Technologies и т.д.

К 2015 г. прогнозируют очередную революцию в области хранения и обработки данных с помощью (нанозлектромеханической системы) НЭМС-устройств. Вследствие нее расширится существующий

рынок микроэлектроники и будут выпущены такие продукты (сверхпортативные компьютеры, новые средства визуализации, сверхъемкие устройства хранения данных, микроанализаторы и лаборатории и производственные комплексы на микросхемах), которые нельзя получить иными методами.

Применение нанотехнологий в медицине и биотехнологии обещает создание новых инструментов и устройств, способных анализировать и взаимодействовать с ДНК и другими аминокислотами напрямую. В настоящее время на основе нанокапсул создаются высокоточные средства диагностики заболеваний экспресс-методом. Покрытия, полученные с помощью нанотехнологии, используются сейчас в протезировании и конструировании имплантатов. Ведутся разработки системы точной доставки лекарств на основе нанокапсул, наночастиц и белков-маркеров. В ближайшие несколько лет достижения наномедицины позволят найти эффективные средства борьбы с многими вирусными заболеваниями, раком, лучевой болезнью, а с появлением развитой медицинской наноробототехники – существенно продлить человеческую жизнь. В настоящее время над разработкой новых лекарств и методов работают несколько сотен исследователей во всем мире. Ожидаются изменения в автомобилестроительной, кораблестроительной, машиностроительной и авиакосмической промышленности в связи с достижениями нанотехнологий и наноматериаловедения. Компания BMW разрабатывает новую модель автомобиля с учетом наносенсоров, самоочищающихся поверхностей и сверхпрочных материалов. Большие надежды возлагаются на доработку существующих водородных топливных элементов. Применение новых гибридов и удобрений в агротехнике позволит в первые несколько лет увеличить урожай до 100 %. Нанустройства обеспечат также контроль за содержанием вредных веществ в продуктах питания.

1.2. Наноистория

Первые теоретические предпосылки к нанотехнологии появились к середине прошлого века. Нобелевский лауреат Ричард Фейнман в своей речи на съезде Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте (29 декабря 1959 г.) предсказывает воз-

можность манипулирования отдельными атомами. Наномиры в фантазиях писателей — и того раньше. Тогда как действительно реальное оборудование и инструменты для манипуляции атомами были созданы только в 1982 г. учёными швейцарского отделения IBM Г. Бикингом и Г. Рорером, которые занимались в то время проблемой измерения микрорельефа поверхности. Впоследствии были созданы многие типы и модификации первого сканирующего туннельного микроскопа, обладающие более совершенными параметрами и характеристиками. Новые потенциальные возможности созданных приборов открыли путь к реализации принципиально иных типов электронных элементов, устройств и вещественных образований, с заданной структурой и свойствами. История развития нанотехнологии в мире насчитывает не более полувека. Ниже представлены основные события — предвестники данного научного направления:

- 1905 г. — швейцарский физик Альберт Эйнштейн опубликовал работу, в которой доказывается, что размер молекулы сахара составляет примерно 1 нм.

- 1931 г. — немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать нано-объекты.

- 29 декабря 1959 г. — выступление Ричарда Фейнмана на съезде Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте о возможности манипуляции отдельными атомами и молекулами.

- 1968 г. — Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании «Bell», разработали теоретические основы нанотехнологии при обработке поверхностей.

- 1971 г. — Рассел Юнг публикует описание прибора Topografiner — предвестника будущих зондовых микроскопов.

- 1982 г. — германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали специальный микроскоп для изучения объектов наномира — сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ). Это открытие имело огромное значение для развития нанотехнологий, так как это был первый микроскоп, способный показывать отдельные атомы.

- 1985 г. — американские физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смайли создали технологию, позволяющую точно измерять предметы, диаметром в 1 нм.

- 1986 г. – создание атомно-силового микроскопа, позволившего изучать поверхность любых веществ, а не только проводящих.
- 1988 г. – первые успешные опыты по переносу отдельных атомов при помощи зондовых микроскопов.
- 1992 г. – публикации Эрика Дрекслера по молекулярной нанотехнологии.
- 1994 г. – первое промышленное использование нанотехнологии в основном при контроле изготавливаемых поверхностей в нанодиапазоне.
- 1997 г. – синтез молекулярного резонансно-туннельного диода.
- 2000 г. – Роберт Магерле предлагает нанотомографию – разрушающий способ получения трехмерной картины вещества на атомном уровне.
- 2001 г. – Марк Ратнер считает, что нанотехнологии стали частью жизни человечества именно в 2001 г. Тогда произошли два знаковых события: влиятельный научный журнал «Science» назвал нанотехнологии «прорывом года», а влиятельный бизнес-журнал «Forbes» – «новой многообещающей идеей». Ныне по отношению к нанотехнологиям периодически употребляют выражение «новая промышленная революция»

1.3. Базовая системная концепция

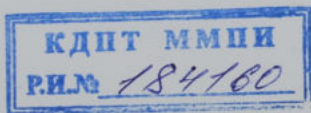
Базовая системная концепция впервые прозвучала в книге Эрика Дрекслера «Машины созидания» [3]. Под таким термином автор ввёл в рассмотрение молекулярные самовоспроизводящиеся роботы, способные производить сборку (ассемблирование) молекул, их декомпозицию, запись в память нанокomпьютера программ воспроизведения (репликации) и, наконец, реализацию этих программ (т.е. самовоспроизведение, размножение).

Молекулярная нанотехнология занимается дизайном, моделированием и производством молекулярных машин и молекулярных устройств. По своим потенциальным возможностям молекулярная нанотехнология находится на значительно более высоком технологическом уровне по сравнению с тем, что было до сих пор достигнуто челове-

ством, поскольку только в ней декларируется возможность специфицировать производимое изделие с точностью до одного атома. В этом смысле она резко отличается от других нанотехнологических подходов, например, от техники напыления атомов на подложку при помощи туннельного сканирующего микроскопа, где изделие специфицируется лишь с точностью до некоторого статистического ансамбля атомов, имеющего определенные геометрические размеры. Тем не менее, если нанотехнологические установки последнего типа уже реально работают, то разработка молекулярных машин находится пока еще на стадии компьютерного моделирования, хотя на практике уже получены некоторые из их простейших деталей.

Любая новая технология должна быть прежде всего экономически выгодной, а производство деталей молекулярных машин традиционными методами органического синтеза требует гигантских капиталовложений и далеко не всегда вообще возможно. Именно поэтому одним из основных требований к молекулярным машинам является их способность воспроизводить самих себя: как только будут получены первые такие машины, они сразу же начнут производить как свои копии, так и другие молекулярные машины. В результате микромир машин заживет своей автономной жизнью, требуя от нашего макромира лишь исходное сырье, энергию и общее управление (впрочем, последнее не обязательно). Фактически, развивая молекулярную нанотехнологию, человечество, не успев разобраться со своей собственной биологией с ее многочисленными болезнями, дерзнуло на создание новой небелковой (хотя и углеродной) формы жизни, которая должна быть полностью понятна и подконтрольна человеческому разуму. Но будет ли? Как тут не вспомнить Франкенштейна и терминатора из будущего!

Основным стратегическим направлением современных работ в области молекулярной нанотехнологии является создание так называемого молекулярного ассемблера – молекулярной машины, способной собирать другие молекулярные машины. Из опубликованных в открытой печати проектов таких машин наиболее детально проработанным и обоснованным является проект ассемблера, разработанного в Хехох Corporation, вокруг которого, судя по всему, и сконцентрировано большинство работ в этом направлении. С основными положениями этого



проекта можно ознакомиться через Интернет [4], либо по статье в журнале «Nanotechnology» за 1996 г. Проект предусматривает два подхода к молекулярной нанотехнологии: диамондоидный и фуллереновый (значение терминов мы объясним ниже). Работа предлагаемого ассемблера основана на использовании двойной треноги (double tripod) – молекулярного позиционирующего устройства с шестью степенями свободы, своеобразного молекулярного аналога руки робота. Здесь стоит сразу упомянуть, что уже существуют и альтернативные проекты позиционирующего устройства, например, «рука» Дрекслера и платформа Стюарта. Предполагается, что сам ассемблер плавает в жидкости, в которой растворены молекулярные заготовки для изготовления деталей машин (предположительно линейные либо плоские молекулы, способные под действием механического напряжения образовывать реакционно-способные частицы, такие, как свободные радикалы либо карбены, которые в дальнейшем способны вступать в механосинтетическую реакцию полимеризации с образованием материала деталей молекулярных машин). В качестве же основного материала, из которого будут сделаны молекулярные машины, предполагается использовать так называемые диамондоиды – полимерные органические молекулы, в которых углеродные атомы скелета связаны между собой точно так же, как и во фрагментах кристаллической решетки алмаза (отсюда и происходит диамондоидный подход к молекулярной нанотехнологии). Использование «алмазной» конструкции в качестве материала молекулярных машин придает им необходимый комплекс уникальных свойств: высокую прочность, легкость, относительную химическую инертность и термостабильность, а также ряд других свойств, ценных с точки зрения электроники.

Таким образом, молекулярные машины первого поколения будут представлять собой микрокапсулы с диамондоидной стенкой, плавающие в жидкости. Предполагается, что в стенки капсулы будут встроены молекулярные сортирующие роторы, которые будут вылавливать из внешней среды необходимые для работы машины молекулы и поставлять их внутрь капсулы, которая, как предполагается, будет заполнена изнутри сжатым инертным газом (неоном либо гелием). Там внутри эти молекулы будут захватываться «рукой» двойной треноги, позиционироваться с точностью до атома к нужному месту «сборочной

линии» и прикрепляться точно к нужному атому, наращивая тем самым очередную деталь производимой на «конвейере» очередной молекулярной машины. Каждая из шести степеней свободы позиционирующего устройства управляется при помощи своего храповика, приводимого в действие давлением инертного газа при помощи пистонов. Каждый пистон представляет собой углеродную трубку (называемую также из-за своего размера нанотрубкой), в стенках которой атомы связаны между собой так же, как и в графите. Кроме того, пистон может запираться, например, сферической молекулой химического вещества фуллерена C_{60} (отсюда название другого, альтернативного фуллеренового подхода к молекулярной нанотехнологии). Предполагается, что молекулярные ассемблеры первого поколения еще не будут содержать встроенного молекулярного компьютера, вместо этого команды будут поступать извне из макроскопического компьютера при помощи акустических волн, которые внутри ассемблера будут преобразовываться в давление инертного газа, управляемое храповиками позиционирующего устройства. Тем не менее разработки молекулярного компьютера для молекулярной нанотехнологии уже ведутся по нескольким направлениям. Причем, как оказалось, в молекулярных машинах механические вычислительные устройства могут быть использованы даже более эффективно, чем основанные на электронике.

Этот, первоначально рассчитанный на многие десятилетия прогноз пути развития нанотехники, к всеобщему удивлению, оправдывается шаг за шагом с существенным опережением по времени. Проводимые с 1989 г. по инициативе Дрекслера ежегодные Форсайтовские конференции год за годом фиксировали это опережение.

На одной из первых таких конференций было принято обращение к учёным и правительствам — не проводить наноразработки в военных целях. К сожалению, погоня за ассигнованиями стимулировала нано-программы развития средств вооружения, а также изделий двойного назначения, главным образом в США. Несколько таких разработок уже находятся на вооружении армии этой страны.

2. НАНОИНСТРУМЕНТАРИЙ

2.1. Туннельная микроскопия

Значительную роль в неухватимом исследовании наномира сыграли по крайней мере два события:

- Создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) (G. Binnig, G. Rohrer, 1982 г.) и сканирующего атомно-силового микроскопа (G. Binnig, K. Kuatt, K. Gerber, 1986 г.) (Нобелевская премия 1992 г.) [5].

- Открытие новой формы существования углерода в природе – фуллеренов (H. Kroto, J. Heath, S. O'Brien, R. Curl, R. Smalley, 1985 г.) (Нобелевская премия 1996 г.) [6].

В 1982 г. был создан растровый туннельный микроскоп, за что его создатели четырьмя годами позже получили Нобелевскую премию, а в 1986 г. – атомный силовой микроскоп. В то время как в электронный микроскоп атомарные размеры можно рассмотреть лишь при определённых условиях, новые зонды дают более точную картину. Принцип атомного силового микроскопа напоминает обычный проигрыватель пластинок.

Однако слово «микроскоп» вводит в заблуждение. Нанозонды дают возможность не только увидеть мир атомов, но и изменять его. Растровые зонды-микроскопы служат посредником между нами и наномиром. Одной из самых важных особенностей квантовой физики наших дней является то, что любое наблюдение — это манипуляция с наблюдаемым объектом. Тот, кто измеряет, к примеру, импульс атома гелия, вступает во взаимодействие с ним и изменяет его первоначальное состояние. В растровых зондах-микроскопах наблюдение и манипуляция стали нераздельны, как две стороны одной медали: контакт ультракрошечного кончика микроскопа с атомом действует и на объект, и на инструмент.

Новые микроскопы позволили наблюдать атомно-молекулярную структуру поверхности монокристаллов в нанометровом диапазоне размеров. Наилучшее пространственное разрешение приборов состав-

ляет сотую долю нанометра по нормали к поверхности. Действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер. Высокая разрешающая способность обусловлена тем, что туннельный ток изменяется на три порядка при изменении ширины барьера на размеры атома.

С помощью различных сканирующих микроскопов в настоящее время наблюдают за атомной структурой поверхностей монокристаллов металлов, полупроводников, высокотемпературных сверхпроводников, органических молекул, биологических объектов. Новые микроскопы полезны не только при изучении атомно-молекулярной структуры вещества. Они оказались пригодными для конструирования наноструктур. С помощью определенных движений острием микроскопа удается создавать атомные структуры [7].

Действие СТМ основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер. Барьер в СТМ — это зазор между зондом (острозаточенной иглой) и подложкой. Величина зазора соизмерима с длиной волны электрона. Например, величина зазора $L = 5 \text{ \AA}$ составляет около двух диаметров атома углерода. Величина зазора весьма резко влияет на величину туннельного тока (изменение зазора на 1 ангстрем изменяет ток в 10 раз). Это даёт возможность реализовать следящую систему, работающую на удержание постоянной величины туннельного тока, т.е. туннельного зазора.

Техника современных пьезоманипуляторов обеспечивает минимальный шаг (точность позиционирования) не хуже, чем 0,1 ангстрем. Эта точность определяется использованием 20-разрядных СБИС аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и может быть повышена применением более совершенных АЦП.

Величина усиленного туннельного тока («сигнала ошибки») прямо связана с рельефом поверхности под зондом. В зависимости от выбранного масштаба сканирования на экране компьютера получается изображение (скан) рельефа участка поверхности.

Местоположение этого участка выбирается с точностью 0,1 ангстрем относительно опорной (реперной) точки. Таково же возможное разрешение деталей рельефа, позволяющее разглядеть наноразмерные объекты и даже отдельные атомы и молекулы поверхности подложки.

В отличие от СТМ атомно-силовой микроскоп основан на контакте поверхности с подвижным зондом или балкой (кантилевером) и измерении отклонения зонда. Развитие техники СТМ и АФМ привело к появлению большого ассортимента зондовых микроскопов-инструментов, ставших в наше время арсеналом нанотехники.

Электронные микроскопы позволяют увидеть нанометровые объекты, но тоже оказывают разрушающее воздействие и могут работать только в вакууме, а атомно-силовые работают медленно и только при непосредственном контакте с объектом.

В небольшой хайтечной компании «Лаборатория «Амфора» разработали модуляционный интерференционный микроскоп (МИМ), который лишен этих недостатков, и с его помощью можно получить трехмерное изображение объектов размером 5-200 нм, а разрешение по вертикали – 0,1 нм. Если удастся удачно «раскрутить» МИМ, то он мог бы претендовать чуть не на 40 % мирового рынка приборов для микроисследований, который оценивается сейчас в 5,8 млрд. дол.

Зондовая микроскопия вызвала широкий интерес учёных многих научных областей, которая позволяет решить проблемы материаловедения, химии, микроэлектроники, медицины и биологии. Она открыла ранее неведомый мир кластеров и нанотрубок, мир возможностей по манипуляции веществом. Зондовая микроскопия послужила началом стремительного повышения интереса к предмету нанотехнология. Существует множество типов и видов микроскопов, использующихся в зондовой микроскопии. Одним из самых известных является сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), который предназначен для исследования поверхности и обладает огромными возможностями. СТМ пригоден для визуализации биологических структур и молекулярных структур и образований. Туннельный микроскоп позволяет наблюдать образцы в различных условиях: на воздухе, в вакууме, в растворах и электролитах. Фирма NT-MDT является крупнейшим производителем микроскопов подобного типа в России. Большие надежды возлагаются на сканирующую зондовую микроскопию (СЗМ) в области проектирования наноприборов. В Институте кристаллографии им. А.В. Шубниковой ведутся разработки по использованию СЗМ в проектировании элементов для микроэлектроники. Там же проводятся исследования и разработка методов создания стабильных (алмазных, карбид-кремниевых)

нанозондов для сканирующих приборов, для изучения полупроводниковых наноструктур и для нанолитографии. В Институте общей физики проводятся работы по созданию сверхвысоковакуумного сканирующего туннельного микроскопа с изменяемой температурой образца. Сканирующая микроскопия нашла своё применение и в области биохимических исследований. В Институте биохимической физики уже давно проводятся исследования по моделированию нанотехнологических процессов.

2.2. Наноассемблеры

Термин «наноассемблер» имеет много значений. С одной стороны, это – воплощение концепции Дрекслера о молекулярных самовоспроизводящихся роботах, которые способны выполнять ассемблирование и репликацию молекул (то, что запланировано, но пока не реализовано). Такие роботы могут быть построены как на привычной для восприятия электронной или микросистемной базе, так и на биологической основе (например, бактериях – саморазмножающихся носителях с внедрёнными в них программами в виде специально запрограммированных белковых молекул, в частности, типа вирусов). С другой стороны, это рукотворные (пока сравнительно простые) нанотехнологические установки, способные целенаправленно производить атомно-молекулярную сборку (это то, что существует реально и развивается как новая отрасль, называемая наномашиностроением).

Реальный наноассемблер отличается от туннельного микроскопа ориентацией на технологии сборки атомов и молекул. Эти технологии воплощаются в виде камер, в которых происходят управляемые химико-физические процессы. Такие камеры устойчивы к едким реагентам и иным воздействиям, способным вывести из строя СТМ, и имеют приспособления для реализации программируемых процессов напуска и откачки газов, лазерных, ультразвуковых и СВЧ воздействий, а также средства наблюдения, контроля и измерения параметров технологических процессов.

Таким образом, наноассемблер – это настольная фабрика, основой которой является камера, к которой подводятся реагенты (в газо-

вой, жидкой или твёрдой фазах), а также транспортные (инертные) газы. Реактором этой камеры служит туннельный промежуток между зондом (иглой) и подложкой, поддерживаемый прецизионной системой управления, исполнительным механизмом которой является трёхкоординатный пьезоманипулятор, устойчивый к химическим воздействиям. Разность потенциалов между зондом и подложкой программируется, а измеряемый пикоамперметром ток преобразуется в информационный сигнал и в сигнал для пьезоманипулятора.

Работа наноассемблера находится под контролем компьютерных средств, которые осуществляют управление нанооборудованием в реальном масштабе времени (контроллеры, спецпроцессоры), обработку и визуализацию полученной технологической информации, а также операции, необходимые для создания нанообъектов (нанотранзисторов, квантовых точек, элементов памяти, наноизлучателей и т. д.).

Многозондовое нанооборудование должно иметь наращиваемые микросистемы для измерения туннельных токов зондов (множество СБИС туннельных датчиков и пикоамперметров, см. ниже) и индивидуализированного для каждого зонда поддержания туннельного промежутка. Эти средства образуют своеобразный «спинной мозг» наноассемблера.

В зарубежной литературе для таких установок существует термин «atomic assemblers», т.е. сборщики атомов, поскольку они действительно позволяют осуществлять атомную или молекулярную сборку вещества.

В Институте нанотехнологий Международного фонда конверсии (ИНАТ МФК) были разработаны нанотехнологические установки для проведения нанотехнологических процессов в газовых и жидких средах. Важнейшим отличием подобных установок является использование специального технологического модуля и соответствующей системы позиционирования, обеспечивающих возможность работы даже с агрессивными средами и стабилизацию параметров технологической среды. Установки могут использоваться в научных институтах и университетах для проведения НИОКР по нанотехнологиям, наноприборам и для подготовки специалистов.

К классу наноассемблеров относится и нанотехнологическая установка «Луч-2», разработанная специалистами Института нанотехноло-

гий, которая предназначена для исследования и разработки различных нанотехнологических процессов, изучения физико-химических свойств

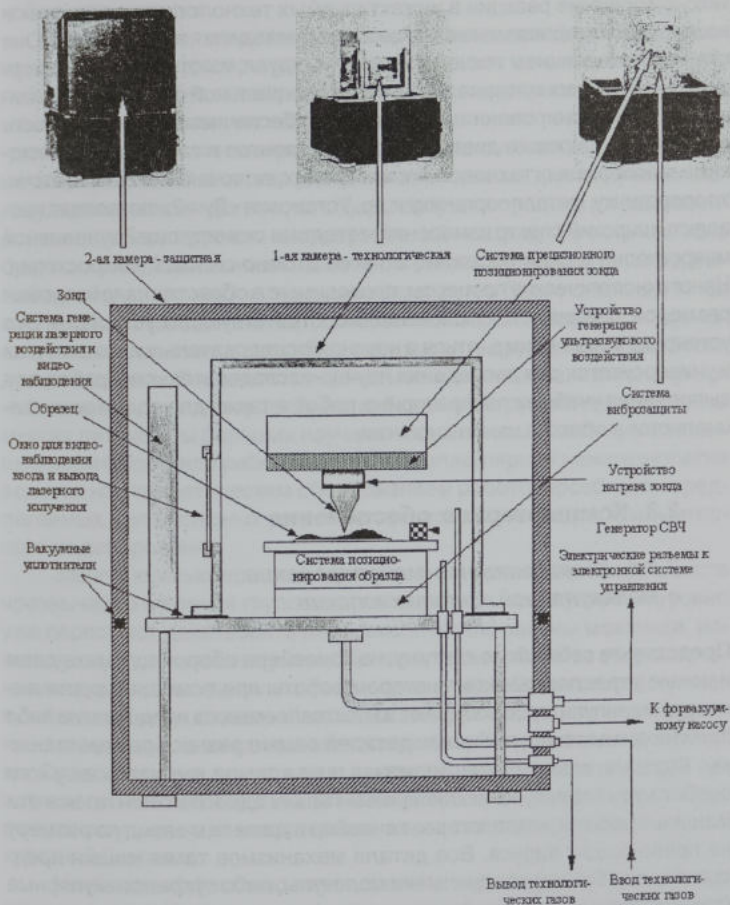


Рис. 2.1. Установка «Луч-2»

нанообъектов и различных поверхностей (рис. 2.1). Фактически это миниатюрная лаборатория, в которой можно осуществлять локальные физико-химические реакции в инжектируемых технологических средах и исследовать создаваемые в процессе их проведения нанообъекты. Она отличается наличием технологического модуля, изготовленного из коррозионно-стойких материалов, а также специальной системы прецизионного позиционирования. В результате обеспечивается возможность проведения широкого диапазона экспериментов в самых разных жидких и газообразных технологических средах, включая кислоты, щёлочи, хлорорганику, металлоорганику и др. Установка «Луч-2» позволяет проводить широкий спектр измерений методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, а также атомно-силовой микроскопии. Нанотехнологические процессы, проводимые в областях нанометровых размеров, реализуются включением соответствующих устройств. Эта установка может применяться в научно-исследовательских институтах и университетах для проведения научно-исследовательских работ, для выполнения учебных лабораторных работ, а также для подготовки специалистов в области нанотехнологии.

2.3. Компьютерное обеспечение

2.3.1. Компьютерное моделирование в молекулярной нанотехнологии

Представьте себе такую картину: на конвейере сборочного цеха днем и ночью управляемые компьютером роботы при помощи механических рук-манипуляторов собирают из поставляемых на предприятие либо производимых в других цехах деталей самые разнообразные машины. Картина, казалось бы, знакомая и не должна вызывать ни у кого особого удивления, за исключением только одного момента: все эти машины, роботы, компьютеры, конвейер и даже сам завод по размеру не превосходят вируса. Все детали механизмов таких машин представляют собой индивидуальные молекулы, либо супрамолекулярные (т. е. состоящие из нескольких молекул) комплексы. Хотя все это выглядит как фантастическая картина из очень далекого будущего. На

самом деле это вполне конкретные научно-технические разработки последних нескольких лет, которые и составляют предмет молекулярной нанотехнологии.

Молекулярная нанотехнология занимается дизайном, моделированием и производством молекулярных машин и молекулярных устройств. Достаточно сказать, что полная молекулярная модель такой машины насчитывает много миллионов атомов, что полностью исключает возможность синтезировать его традиционными методами органической химии. В качестве реального механизма для получения молекулярных машин до того, как будет запущен процесс их самовоспроизводства, предложен «конвергентный» подход. То есть сначала будут синтезированы лишь самые простейшие детали, которые в дальнейшем будут использованы для производства более сложных. И так последовательно до тех пор, пока на некоторой стадии молекулярные машины не станут способны производить другие машины. Отсюда очевидна необходимость тщательного планирования молекулярной машины, поскольку любая ошибка в конструкции может стоить многих лет работы больших научных коллективов. Поэтому в настоящее время основная работа в области молекулярной нанотехнологии ведется над теоретическим обоснованием работоспособности предлагаемых молекулярных устройств при помощи методов компьютерного моделирования.

Задача компьютерного моделирования молекулярных устройств чрезвычайно сложна и трудоемка, поскольку на молекулярном уровне уже перестают действовать макроскопические законы механики, используемые для расчета узлов обычных машин. Законы сопротивления материалов и гидравлики уже неприменимы. Вместо них вступают в действие законы квантовой механики, которые приводят к совершенно неожиданным с точки зрения классической механики последствиям. Следовательно, единственно приемлемыми для молекулярной нанотехнологии являются методы молекулярного моделирования, которые ранее успешно использовались в вычислительной химии и молекулярной биологии.

Наиболее эффективно использование в молекулярной нанотехнологии молекулярной механики, молекулярной динамики, а также метода Монте-Карло из статистической физики. Одной из главных проблем

является то, что нанотехнология оперирует такими величинами, на которые законы классической физики уже не распространяются. Например, движение легких электронов может быть описано только квантово-механически, а движения тяжелых ядер уже со значительно меньшими погрешностями — в рамках ньютоновской механики. Для того чтобы отделить одно от другого, используется известное из квантовой механики приближение Борна-Оппенгеймера. Достигается это путем введения так называемого силового поля, которое представляет собой функцию потенциальной энергии молекулы от координат ядер атомов. В методе молекулярной механики производится поиск энергетически выгодного пространственного строения молекулы путем нахождения локального минимума этой функции потенциальной энергии. В методе молекулярной динамики вычисляется классическая траектория движения атомов путем интегрирования уравнения движения Ньютона в силовом поле молекулы. В методе Монте-Карло рассматривается вся статистическая совокупность энергетически выгодных положений атомов в молекуле, что дает возможность определить самое выгодное в энергетическом плане пространственное строение молекул, а также оценить их термодинамические характеристики.

Большинство опубликованных примеров применения метода молекулярной динамики в молекулярной нанотехнологии касается моделирования работы и оптимизации размеров и параметров молекулярных шестеренок и молекулярных подшипников, а также движения нейтрального газа внутри углеродных нанотрубок, пистонов и молекулярных насосов. Основное применение метода молекулярной механики касается определения оптимальных значений параметров, описывающих молекулярное строение отдельных деталей, например размер углеродных трубок, а также дизайн мест связывания для вылавливания нужных молекул из раствора. Пока еще немногочисленные работы по применению метода Монте-Карло касаются моделирования процесса самосборки составных частей молекулярных устройств.

Вторым типом подходов из арсенала средств молекулярного моделирования, который уже нашел свое место в вычислительной молекулярной нанотехнологии, являются неэмпирические квантово-химические расчеты в рамках приближения Хартри-Фока, известного также как метод молекулярных орбиталей. Подобные расчеты выполняются

для моделирования протекания химических реакций, приводящих к синтезу составных частей молекулярных устройств.

Наконец, третьим вычислительным подходом, который также активно используется в молекулярной нанотехнологии, является визуализация деталей молекулярных машин с использованием языка моделирования виртуальной реальности VRML. Любопытный читатель может в буквальном смысле облететь в виртуальной реальности некоторые детали молекулярных машин и даже посмотреть, как они выглядят изнутри – это можно сделать через Интернет [8]. Вне всякого сомнения, технология виртуальной реальности является едва ли не единственным способом заглянуть внутрь молекулярных машин и посмотреть, как бы они выглядели при свете. Заметим, что в мире молекулярных машин царит тьма, поскольку размер их деталей намного ниже длины волны видимого света, что крайне важно для человека-разработчика, живущего в освещенном макром мире и привыкшего думать в его категориях.

Активное внедрение вычислительных подходов в молекулярную нанотехнологию потребовало развития специализированного программного обеспечения. Во-первых, были созданы молекулярные компиляторы – программы, переводящие описание детали молекулярной машины с языка высокого уровня на атомно-молекулярный язык, воспринимаемый программами молекулярного моделирования из богатого арсенала вычислительной химии. Использование молекулярных компиляторов дает возможность быстро строить молекулярные модели деталей, пригодные для обработки программами молекулярного моделирования с целью оценки их целевых свойств, что позволяет путем варьирования параметров конструировать молекулярные детали, обладающие оптимальными характеристиками.

Следующим этапом явилось создание специализированных программных систем для молекулярной нанотехнологии, аналогичных CAD-системам в макроскопическом машиностроении. В качестве примера можно привести создаваемую в NASA Ames Research Center – компьютерную систему разработки молекулярных машин NanoDesign.

Основные работы в области вычислительной молекулярной нанотехнологии ведутся в лабораториях NASA Ames Research Center [9] и в Material Simulation Center [10] с использованием новейших парал-

тельных суперкомпьютеров, таких, как Intel Paragon, CRAY T3D, J Machine, SGI Power Challenger и HP-Convex, а также в Institute for Molecular Manufacturing [11] и Xerox Corporation [12]. Во многих случаях подобные исследования проводятся при финансовой поддержке NASA, что не удивительно, поскольку, судя по всему, использование элементов молекулярной нанотехнологии уже в ближайшем будущем может стать одним из ключевых элементов американской аэрокосмической программы. Более того, есть все основания полагать, что именно молекулярная нанотехнология определит лицо технологического развития XXI в.

Компьютерное моделирование стало одним из направлений в исследовании наномира. Везде, где требуется изучение свойств новых материалов, сложных биохимических систем, технологических процессов, где необходимы десятки тысяч лабораторных испытаний — нельзя обойтись без мощных компьютерных ресурсов. Ведущим суперкомпьютерным центром в России, используемым для работ с новыми нанотехнологиями, является Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных (ИВВиБД). Одна из программ этого центра направлена на моделирование биологически активных производных фуллеренов, в частности их воздействия на живые организмы. ИВВиБД участвует в комплексном проекте «Исследование биологической активности и медицинских применений фуллеренов» совместно с Медуниверситетом им. Павлова, ИЭМ РАН, Институтом токсикологии. Математическое моделирование физико-химических процессов и наноструктур осуществляется также в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН и на химическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Компьютерные программы, или программное обеспечение для сканирующей микроскопии, по обработке и построению изображений, составляют ещё одну область исследований в области нанотехнологий. Перспективны те программы, которые допускают многооконный интерфейс. В этом случае на экране монитора можно видеть одновременно разные изображения или одно и то же изображение на разных стадиях его математической обработки. В Центре перспективных технологий (г. Москва) разработана программа «ФемтоСкан-001» для операционных систем Windows 98, Windows NT.

3. НАНОМАТЕРИАЛЫ

Основополагающее значение для развития как нанотехнологии, так и других смежных с ней областей науки имеют исследования и синтез новых материалов с принципиально новыми свойствами и с заданными параметрами. Развитие этой области определит будущее всей современной науки. Без новых синтезированных материалов невозможно прогрессивное развитие ни в медицине, ни в электронике, ни в любой другой области.

Лишь после 1985 г., когда были созданы методы получения компактных нанокристаллических веществ, началось интенсивное заполнение этого пробела в знаниях о твердом теле. Именно тогда интерес к наноматериалам стал буквально всеобщим, так как обнаружилось (в первую очередь на металлах), что уменьшение размера кристаллитов ниже некоторой пороговой величины может приводить к заметному изменению свойств. Такие эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо — при размере зерен менее 10 нм. Таким образом, изучение свойств сверхмелкозернистых материалов требует учета не только их состава и структуры, но и дисперсности. Поликристаллические сверхмелкозернистые материалы со средним размером зерен менее 40 нм называют нанокристаллическими.

3.1. Ультрадисперсные порошки

К множеству нанокластеров (иногда называемых ультрадисперсными материалами) относятся сверхмалые (меньше 100 нм) частицы, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях.

В обычных макротелах, с которыми человек привык иметь дело в обыденной жизни, площадь поверхности тела по сравнению с его объемом невелика. Все физические свойства тела определяются физическими свойствами объемного образца, хотя установлено, что свойства поверхности твердого тела существенно отличаются от свойств объемного образца. Как выразился один из величайших физиков Джозайя Уиллард Гиббс: «Бог создал мир, а дьявол создал поверхность».

Особенность тонких пленок состоит в том, что у них объем, занимаемый поверхностными атомными или молекулярными слоями, вполне сопоставим с объемом самой пленки. Ситуация с пленками нанометровых толщин усугубляется тем, что такую пленку можно рассматривать, как особую двумерную систему, свойства которой определяются исключительно свойствами поверхностного слоя, так как слоев, соответствующих объемному образцу, практически не существует. Однако поскольку в объемном образце атомы, расположенные в объеме, находятся в уравновешенном состоянии и экранированы от внешней среды поверхностным слоем, то существует альтернативная точка зрения, заключающаяся в том, что в наноразмерной структуре доминируют и проявляют себя именно ранее демпфированные объемные свойства материала.

Точно такая же ситуация складывается с частицами нанометрового размера. При диаметре порядка 10-15 ангстрем практически вся частица представляет собой поверхность, и свойства ее будут совершенно уникальными. При диспергировании резко возрастает активность вещества в твердом состоянии и скорость физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Скорость такого взаимодействия всегда пропорциональна величине поверхности. Чем тоньше структура вещества, тем быстрее оно растворяется или тем быстрее протекают твердотельные реакции, например, при взрывах.

Получать тонкоструктурные вещества можно либо тщательным измельчением имеющихся объемных образцов, либо получением новой дисперсной фазы путем объединения молекул или ионов в кластеры, микрокристаллиты или капли нанометрового размера за счет действия молекулярных сил.

3.1.1. Диспергирование

Диспергирование требует затраты некоторой работы (в физическом смысле), которая приблизительно пропорциональна вновь образовавшейся поверхности и пропорциональна поверхностной энергии диспергируемого тела на границе раздела с окружающей средой. Работа на единицу вновь образовавшейся поверхности во много раз выше величины поверхностной энергии для твердых тел вследствие необходимости упругого или пластичного деформирования тела вплоть до его разрушения (на что также затрачивается значительная работа), а для жидкостей – вследствие затраты работы на преодоление вязкого сопротивления.

Следует отметить, что диспергирование не является чисто механическим процессом и его физико-химическая сторона приобретает тем большее значение, чем меньше размер отщепляемых частиц. Диспергирование твердых тел производится в мельницах различных конструкций (шаровых, вибрационных, виброкавитационных, коллоидных, струйных), которые позволяют измельчать вещество до размеров частиц вплоть до 1 мкм. Интенсивное диспергирование может осуществляться с помощью звуковых и ультразвуковых колебаний. Причем частота этих колебаний должна быть тем выше, чем меньше размер получаемых частиц.

Перспективным методом диспергации является ударная волна, которая может применяться не только для синтеза целевых продуктов (таких, как синтетические алмазы), но и для их диспергирования. Алмазы, например, получают путем ударно-волновой обработки смесей графита с металлами при 20–40 ГПа и длительности ударной волны 10–20 мкс. При этом средний размер частиц алмазов составлял 4 нм. Для эффективного диспергирования жидкостей при получении эмульсий необходимо введение различных добавок:

- эмульгаторов, поверхностно-активных веществ, понижающих поверхностное натяжение и этим облегчающих процесс диспергирования;
- стабилизаторов (например, мылоподобных композиций), которые, также адсорбируясь на поверхности образующихся капелек, дают структурированные слои с повышенной вязкостью и упругостью, что препятствует коалесценции.

При диспергировании твердых тел добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ) способствуют диспергированию, облегчая отщепление мелких частиц. Молекулы ПАВ проникают в мельчайшие трещины и поры в процессе их развития при механическом воздействии и адсорбируются на вновь возникающих поверхностях, понижая поверхностную энергию, а следовательно, и работу, необходимую для процесса диспергирования. Такие поверхностно-активные добавки (различные смачиватели, диспергаторы, пептизаторы) могут служить и стабилизаторами образующихся частиц, препятствуя их коагуляции в агрегаты, т. е. удерживая их в состоянии тонкой, достаточно однородной взвеси.

При понижении поверхностной энергии на границе тела с окружающей средой, т. е. при переходе к достаточно лиофильным двухфазным системам, диспергация становится самопроизвольным процессом и происходит без затраты внешней работы, под влиянием теплового движения отделяющихся частиц.

В условиях коагуляции между частицами, разделенными тонкими прослойками жидкой дисперсионной среды, действуют слабые вандер-ваальсовы силы, для которых энергия связи не превышает по порядку энергию теплового движения частиц. Образующиеся в этих условиях дисперсные структуры обладают сравнительно малой прочностью, пластичностью и эластичностью. После предельного разрушения они со временем вновь восстанавливаются (явление тиксотропии). Для его возникновения необходимо наличие достаточно большой фракции высокодисперсных (коллоидных) частиц, совершающих интенсивное броуновское движение, которое содействует сближению частиц коагуляционными (лиофобными) участками их поверхности и соответственно сцеплению частиц. Необходимо также наличие фазовой мозаичности поверхности частиц. Этому, а также образованию пространственной структуры уже при малом объемном содержании дисперсной фазы благоприятствует анизометрия частиц, которые могут иметь форму палочек, нитей или пластинок.

В системах с анизометрическими частицами достаточно прочные пространственные сетки, соответствующие тиксотропному переходу в гель, образуются уже при нескольких процентах объемного заполнения и даже при десятых и сотых долях процента. Для коагуляционных

структур с анизометрическими частицами характерна эластичность, проявляющаяся в упругом последствии при деформациях сдвига. Она связана с уменьшением энтропии системы при ориентации частиц по направлению действующего напряжения сдвига. После снятия напряжения эластичная деформация сдвига постепенно спадает до нуля и энтропия вследствие дезориентации частиц увеличивается.

Надо сказать, вопрос о том, что именно следует понимать под твердым телом, давно дискутируется в определенных кругах научного сообщества. Существуют разные мнения, в том числе и такое, что только кристаллическая структура, имеющая ярко выраженный дальний порядок, может называться твердым телом. По-видимому, более разумной является оценка, исходящая из наличия достаточно высокого потенциального барьера, который бы препятствовал спонтанному переходу из одного равновесного состояния в другое. При достаточной величине потенциального барьера система может быть весьма устойчивой и вероятность фазового перехода становится меньше, чем вероятность разрушения структуры под воздействием случайных причин.

С этой точки зрения, например янтарь, который ни при каких условиях не может перейти в кристаллическую фазу, и множество органических соединений являются полноправными твердыми телами. По всей видимости, вообще кристаллизация является не основным видом отвердевания вещества. Как ни удивительно, но физике твердотельных конденсированных сред присущи свои законы, резко отличающие поведение неупорядоченных аморфных твердых веществ от свойств идеальных кристаллов. Причем оказалось, что дефекты структуры вещества ведут себя совершенно по-разному в идеальной кристаллической решетке и в аморфной структуре с большим количеством других дефектов. Поскольку у аморфных веществ внутреннее строение существенно менее упорядочено, нежели у кристаллических, то для аморфных тел характерны более высокие значения энтропии и внутренней энергии. Неустойчивость приводит не просто к потере равновесия системы, но и к появлению качественно новых физических эффектов, таких, как самопроизвольное зарождение порядка в неупорядоченной системе. Изучением подобных явлений занимается новая область науки – синергетика.

Есть предположение, что наиболее общей характеристикой вещества является не кристаллическая решетка, а его остов — непрерывная система (цепь, сеть или каркас) межатомных связей. Такая система объединяет атомы вещества независимо от того, кристаллическое оно или аморфное, в островки, цепи, сетки или каркасы, представляющие собой ноль, одно-, двух- и трехмерные остовы вещества соответственно. Существование островных, цепочечных, слоистых и каркасных, в том числе и координационных структур, и в кристаллическом и в аморфном состоянии обусловлено существованием в них соответствующего остова.

Тип строения и свойства вещества определяются строением остова и его мерностью, в связи с чем наблюдается определенное совпадение с идеями и концепциями теории фрактального строения вещества. Сохранение или деструкция остова в ходе химических превращений предопределяет тип этого превращения, поэтому возможен синтез материалов на основе их метастабильных состояний. Поскольку у каждого вещества существует неограниченное количество разновидностей аморфного состояния, то это значительно расширяет круг используемых материалов. Тем более, что аморфные материалы обладают совершенно уникальными свойствами, недостижимыми в кристаллическом состоянии.

Наиболее изученной к настоящему времени ультрадисперсной системой являются ультрадисперсные порошки. При изучении ультрадисперсных металлических частиц часто используют термин металлические кластеры. Однако под кластером следует понимать изолированный или дискретный ансамбль из n атомов металла, свойства которого отличаются от свойств как однокомпонентной металлической фазы (когда n стремится к бесконечности), так и от молекулы, содержащей атом металла в лигандном окружении.

Вообще переход «молекула — твердое вещество» представляет особый интерес, поскольку нет общепризнанных теоретических представлений, позволяющих перейти к описанию реального твердого вещества. Особенно это касается химического взаимодействия, потому что твердое вещество ведет себя как химический реагент совершенно иначе, чем низкомолекулярное соединение.

Носителем свойств вещества в твердом состоянии является не молекула, а реальное твердое химическое соединение, выступающее

в реакции как единая квантово-механическая система. Отличие твердого химического соединения от молекулы заключается не в том, что в твердом веществе действует эффект кристаллической решетки, благодаря которому и происходит резкое изменение энергии связей, так как энергия связи в молекуле и в кристалле отличается не сильно.

Предлагается ввести в качестве связующего звена между молекулярной химией и химией твердого тела химию кластеров, полагая, что через кластеры происходит переход от дискретного электронного энергетического спектра (атомы и молекулы) к зонному спектру (твердое тело).

Нижняя граница ультрадисперсной частицы – кластера – естественно очевидна: минимальное число равно двум. Верхняя граница размыта, лежит где-то в области 10³ частиц. Существуют стабилизированные кластеры, имеющие более сложный состав и структуру, в которой выделяется тело кластера (собственно взаимодействующие частицы рассматриваемого типа) и стабилизирующие элементы. Для кристаллических веществ существует дальний порядок в расположении атомов, простирающийся на расстояние, большее 100 постоянных решеток. Для аморфных веществ существует ближний порядок на несколько межатомных расстояний. Для ультрадисперсной частицы область ближнего порядка простирается на несколько десятков межатомных расстояний.

3.1.2. Синтез

Второй путь получения ультрадисперсных частиц – это их синтез на основе физических процессов испарения и конденсации. Самый простой способ – испарение металлов и конденсация их паров, применение метода термического вакуумного испарения, но с особым характером рабочей среды и особыми методиками организации процесса конденсации и сбора получаемого ультрадисперсного порошка. При этом процессы испарения и конденсации могут происходить в вакууме, неподвижном инертном газе или в потоке газа.

Процесс конденсации является определяющим при получении ультрадисперсных порошков. Разработаны физические основы конден-

сации металлов и предложены методы расчета распределения по размерам частиц аэрозоля металлов. Теоретически возможно получение порошка вольфрама со средним размером частиц 3-5 нм без учета процессов коагуляции. Длина зоны коагуляции (90 нм) меньше длины зоны нуклеации (4 мм), что позволяет предотвращать процесс коагуляции путем удаления порошка из зоны конденсации.

Процесс конденсации может осуществляться путем подачи нагретой до 5000-10000 К парогазовой смеси в камеру, заполненную охлажденным инертным газом. В результате при перемешивании температура паров металла резко понижается, происходит пересыщение смеси и быстрая конденсация, приводящая к выпадению мелкодисперсных структур. Подача парогазовой смеси и инертного газа могут осуществляться самыми разными способами: в виде коаксиальных потоков, встречных потоков и пр. В зависимости от способа перемешивания можно менять режимы процесса и его результат. Средний размер получаемых частиц составляет 7-20 нм.

Технологически более сложным является способ получения наночастиц химическими методами, такими, как осаждение, восстановление металлов из оксидов и других соединений, термическое разложение веществ. При этом основными условиями являются протекание реакции вдали от равновесия и высокая скорость образования зародышей новой фазы в сочетании с малой скоростью их роста. Это обеспечивается подбором температуры, при которой химическая реакция идет достаточно интенсивно, а перенос через газовую фазу еще заторможен. Процесс осаждения проводят в растворе, газовом потоке или плазме. Для восстановления оксидов и галогенидов обычно используют водород или оксид углерода. При 750-1600 К этим способом получают порошки железа, ванадия, ниобия, тантала, хрома, молибдена и вольфрама со средним размером частиц 0,1 мкм.

К сожалению, при низкотемпературных процессах образуются сравнительно крупные частицы (0,03-10 мкм), которые дают большой разброс по размерам и содержат много примесей. Поэтому для улучшения качества получаемых порошков целесообразно повышать температуру и проводить процесс, к примеру, в плазме дугового или индукционного разряда. Методом водородного восстановления хлоридов в потоке азотной плазмы при 1380 К получают порошок нитрида

титана с размерами частиц менее 0,5 мкм. В плазме дугового разряда с использованием в качестве исходных веществ хлоридов металлов и углеводородов получены карбиды титана, циркония, гафния, ванадия и других материалов со средним размером частиц 0,01-0,1 мкм. Метод является очень эффективным и производительным, но имеет невысокую селективность процесса, т. е. продукт реакции является смесью целевого продукта и других соединений.

Можно применять метод взрыва проводников под действием мощных импульсов электрического тока, впервые исследованный еще Фарадеем. Материал проводника (обычно проволочка) под действием тока разрушается, часть его испаряется, а часть – разлетается в виде жидких капель. В потоке быстро расширяющегося пара образуются частицы очень малого размера, а отвердевшие капли дают более крупные частицы. Характер разрушения проводника и процесс введения в него энергии определяет соотношение мелкодисперсной и крупнодисперсной фаз.

Метод сушки вымораживанием заключается в приготовлении раствора необходимого состава, содержащего исходные материалы (к примеру, соли металлов) и быстром замораживании раствора путем его распыления в камере с криогенной средой. Затем давление газовой среды над замороженными гранулами уменьшают таким образом, чтобы оно стало ниже равновесного для образовавшейся при охлаждении многокомпонентной системы, и материал нагревают при непрерывной откачке для возгонки растворителя. Полученный продукт состоит из тончайших пористых гранул одинакового состава.

Поскольку развитие технологии продолжается, несомненно, что скоро появятся и другие, выходящие за рамки лабораторного применения, методы получения нанодисперсных частиц.

Ученые из американского университета Lehigh предложили новый способ борьбы с загрязнением окружающей среды – использование наночастиц железа. Этот способ может оказаться очень эффективным при обработке почвы и воды, содержащей самые разные органические и неорганические загрязнения.

Исследованием возможностей микро- и наночастиц железа американские исследователи занимались около 8 лет. В основе нового метода лежит способность железа реагировать с кислородом воздуха

с образованием обыкновенной ржавчины. Однако в ходе этой реакции образуются промежуточные частицы с высокой реакционной способностью, в присутствии которых в реакцию вступают такие устойчивые к действию кислорода и при этом токсичные загрязнители, как трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, диоксины. Более того, окисляются с образованием менее токсичных форм такие металлы, как свинец, никель, ртуть и уран. В результате их окисления образуются оксиды, которые не растворяются в водной среде и остаются в почве. Многие из металлов при образовании оксидов практически теряют свою токсичность.

Стоит отметить, что попытки использовать железо для вовлечения загрязняющих веществ в реакции окисления предпринимались и ранее. Для обработки промышленных стоков были построены реакторы, где микрочастицы железа участвовали в процессе окисления. Однако применить этот принцип для очистки воды или почвы было невозможно.

Переход к наномасштабам (по размерам частиц железа) позволил расширить возможности применения частиц железа. Частицы размером 1- 100 нм оказались в 10-100 раз более реакционноспособными (в первую очередь из-за увеличения площади поверхности). Частицы можно подавать в виде водной суспензии на поверхность почвы, можно закачивать в подземные водные горизонты. Очень важным оказался тот факт, что удалось почти в 10 раз снизить стоимость порошка железа с наночастицами. Процесс очистки не так уж и дорог – очистка 1 м² от грязи будет стоить около 5 дол.

Калифорнийские ученые разработали пену, в которой содержатся наноразмерные частицы стекла. Новая пена в несколько раз прочнее известных нам металлических сплавов. Исследователи ее называют «металлической пеной». Полученный материал обладает не только необычной прочностью, но и является очень легким. Сфера использования нового материала очень велика. Среди возможных вариантов применения наиболее подходящими могут быть ремонт автомобилей, изготовление искусственных костей. Большое будущее пена будет иметь и в строительстве (вместо известной монтажной). Сложные конструкции с помощью пены закрепляются более надежно и устойчиво. Есть предложения и от разработчиков космических конструкций.

Исследователи Hong Kong University of Science and Technology и Chinese Academy of Sciences создали суспензии, состоящие из наночастиц со специальным покрытием, способные под действием электрического тока мгновенно застывать в материал, подобный твердому пластику, и снова обращаться в жидкость в течение тысячных долей секунды после выключения тока. Предполагается, что полученные суспензии будут особенно полезны для создания «умных» смазок, клапанов и зажимов в системах управления транспортных средств.

3.2. Нанопленки

Получением тонких пленок, в том числе и нанометровых размеров, давно и плодотворно занимается субмикронная технология, поскольку тонкая пленка чаще всего является основой для получения двухмерной структуры с помощью литографических методов. Это совершенно естественно, поскольку в микроэлектронике получение сплошной однородной пленки не может являться самоцелью: получать на поверхности какую-либо структуру, соответствующую определенному элементу электронной техники. Необходимо оговорить, какие пленки следует причислять к наноструктурным и наноразмерным. Если с субмикронными пленками все ясно (это все пленки с размерами менее микрона), то диапазон нанометровых размеров охватывает значительную совокупность пленок с различными свойствами. Возможно, что целесообразно причислять к наноразмерным пленкам плоскостные структуры, у которых доля поверхностных атомов или молекул преобладает над долей атомов или молекул, принадлежащих объему.

Получение наноразмерных и наноструктурных пленок связано с еще более жесткими требованиями к чистоте и структурному совершенству материалов, чем в случае субмикронных структур. Те недостатки, с которыми можно мириться в объемных образцах или тонких пленках, совершенно нетерпимы в наноразмерной пленке толщиной в несколько атомных слоев, поскольку примеси, инородные включения или структурные несовершенства изменяют ее физические и эксплуатационные свойства.

Известно, что чем выше структурное совершенство, однородность и гомогенность получаемых материалов (т.е. чем меньше содержится в них неконтролируемых примесей или структурных дефектов), тем лучше их механические и электрофизические характеристики. Поэтому решение задачи максимально возможного повышения чистоты материала и уменьшения структурной неоднородности представляет интерес не только для профессиональных материаловедов, но и для специалистов в области электроники, микро- и нанoeлектроники, нанотехнологии, космических технологий, судостроения, авиации, медицины и многих других областей человеческой деятельности.

Однако для получения наноразмерных и наноструктурных пленок особую важность имеет даже не столько решение проблем чистоты или структурного совершенства материалов, сколько возможность создания наноразмерного изображения на поверхности наноразмерной пленки. Для микроэлектроники структурирование состояло в создании изображения на поверхности пленки и последующем переносе рисунка на структуру пленки (удаление материала). Для нанотехнологии единственным путем структурирования является создание пленок, состоящих из прецизионно локализованных групп атомов и, в идеале — из отдельных строго и упорядоченно локализованных атомов.

3.2.1. Туннельно-зондовый массоперенос

В настоящее время единственным методом, с помощью которого удалось добиться подобного результата, являются туннельно-зондовые технологии, а именно туннельно-зондовый массоперенос. Процесс осуществляется в сканирующем туннельном микроскопе (или аналогичном устройстве) и заключается в создании в туннельном промежутке между иглой-зондом и подложкой условий для эмиссии отдельных атомов с поверхности зонда. Возможно также реализовать осаждение атомов или молекул из объема окружающей среды под воздействием туннельного тока. Конкурентных методов у туннельно-зондовых для создания наноразмерных структур пока не имеется и в ближайшее десятилетие не предвидится.

Однако туннельно-зондовые методы практического значения не имеют ни в настоящее время, ни в сколь угодно далекой перспективе, так как являются методами индивидуальной обработки, нанотехнологическим аналогом электронной литографии с помощью остросфокусированного пучка электронов. Однако то, что допустимо для электронной литографии, совершенно неприемлемо для нанотехнологических методов.

Рассмотрим простой пример. Имеется операционное поле размеров 1 см^2 . Если учесть, что объем атома примерно 10^{-24} см^3 , то он занимает площадь порядка 10^{-16} см^2 . Если время непрерывной работы туннельно-зондовой системы принять за 100 ч, то для заполнения заданной площади необходимо в течение 1 с обеспечить высаживание на поверхность подложки 1016 атомов в строго индивидуальном порядке (чтобы реализовать принцип атомной сборки), что абсолютно нереально. Для локализации одного атома необходимо отпозиционировать зонд-иглу или зонд-нанотрубку и произвести эмиссию атома с поверхности зонда строго определенным импульсом напряжения и туннельного тока.

За 100 ч работы подобной установки (или любой другой, обеспечивающей принцип индивидуальной атомной сборки) на операционном поле в 1 мм^2 необходимо высадить 108 ат/с, а на поле в 1 мкм^2 — 102 ат/с, что представляется также весьма утопичным.

Таким образом, применение индивидуальных методов создания структуры (топологии, рисунка) в нанотехнологии бесперспективно с точки зрения практической применимости. Необходимо разработать групповые методы структурирования наноразмерных пленок, которые позволяли бы за один цикл обработки создавать регулярную упорядоченную структуру одновременно на всей площади обрабатываемого образца.

3.2.2. Самоорганизованные структуры

Для создания функционирующего квантового точечного лазера необходимо в кратчайший срок произвести до 200 млрд. наноструктур на 1 см^2 . На то, чтобы сложить кирпичик за кирпичиком с помощью сило-

вого микроскопа пирамиду размером в 1 нм из атомов полупроводника, в которые включён 1 электрон, не хватило бы человеческой жизни. В природе это достигается путем самоорганизации.

Принцип очень прост: все физические системы стремятся к термодинамическому равновесию. Организовать равновесное состояние таким образом, чтобы желаемый продукт получился естественным путем – вот в чём заключается работа наноинженера. К примеру, на какой-то поверхности при заданных физических условиях выращивают кристалл полупроводника с изменённым расстоянием между отдельными атомами, который по достижении определённой толщины распадается на множество практически одинаковых островков. Так «одним ударом» получается множество квантовых точек.

Согласно классической теории конденсации при осаждении тонких пленок на поверхность подложки на первой стадии процесса происходит зародышеобразование. При этом центрами зародышеобразования являются отнюдь не те локальные участки подложки, на которые попали первые осажденные атомы или молекулы, а неоднородности и нерегулярности поверхностного слоя подложки (примеси, дефекты, вакансии, дислокации и пр.). Вследствие имеющего место быть процесса миграции атомов по поверхности подложки, даже при комнатной температуре атомы локализуются на этих нерегулярностях структуры. Поэтому на первый взгляд достаточно на поверхности подложки создать упорядоченную и должным образом структурированную и упорядоченную систему дефектов или структурных неоднородностей, например вакансий, чтобы получить адекватно структурированную наноразмерную пленку. Однако такое решение является паллиативным, поскольку переносит проблему создания прецизионного структурированного наноразмерного рисунка с пленки на подложку. Вследствие этого применение директивных методов не имеет перспективы, и наиболее целесообразно воспользоваться процессами самоорганизации, самосогласования и самокоррекции вновь получаемых наноразмерных структур.

Для того чтобы система перешла в особый режим, при котором образуются пространственно-организованные структуры, необходимо, чтобы внешнее воздействие достигло некоторого критического значения. Это утверждение находится в полном согласии с принципами

самоорганизации и физики открытых систем. В случае структур Белоусова – Жаботинского это определенное значение концентрационно-го потока реагентов, в случае ячеек Бенара – градиента температур. Общим свойством самоорганизующихся систем является самосогласованность микрообъектов системы. Такое поведение называется когерентным и требует специфических динамических связей внутри системы.

Самоорганизованные структуры возникают в открытых системах, т. е. подвергающихся воздействию извне притока вещества или энергии через границы системы. Однако это условие является обязательным, но не достаточным. Необходимо обеспечить определенную мощность воздействия. Причем оно должно быть настолько интенсивным, чтобы обеспечить переход системы в особую, нелинейную область, т. е. удаленную от равновесия. Процесс самоорганизации является переходом от беспорядочного движения, хаотического состояния через нарастание флуктуаций к новому порядку.

Наиболее простыми случаями, когда формируются сильно неравновесные состояния твердого тела, являются процессы, происходящие при взаимодействии излучения с веществом, когда вещество находится в радиационном поле. В этом случае реализуется классическая открытая система, подвергающаяся притоку энергии извне. Простейший вид такого воздействия – облучение потоком заряженных частиц или высокоэнергетичных квантов электромагнитного поля. При этом в объеме облучаемого вещества в результате внешнего воздействия создаются дефекты, которые вследствие происходящих в твердом теле процессов исчезают. В результате реализуется баланс этих процессов.

При облучении сплава Fe-Cr ионами аргона с энергией 20 кэВ вместо имевшей место гладкой и однородной поверхности образуется упорядоченная структура, состоящая из полос двух систем, напоминающих цепи из пересекающихся звеньев, природа которых пока не ясна. Такая пространственно организованная структура имеет характерные размеры порядка 3 мкм. Однако при анализе в электронном микроскопе наблюдается пространственно организованная структура с характерными размерами 500- 1000 ангстрем. Подобное превращение однородной системы в неоднородную, гетерогенную авторы рабо-

ты наблюдали и в других пространственно организованных структурах. При этом в облученном материале отмечена иерархия самоорганизованных структур и их упорядочение на различных масштабных уровнях, т. е. такие системы можно отнести к фрактальным.

Лазерная обработка используется для модифицирования свойств металлических поверхностей и создания пространственно-организованных структур, которые формируются, начиная с некоторого количества импульсов. Если при облучении потоком заряженных частиц в материале образуются области, в которых вещество находится в различных состояниях, то при лазерном воздействии на материал посылается мощный пучок когерентного светового излучения, но каждый квант не в состоянии сместить атом из положения равновесия, так как энергия смещения составляет примерно 14 эВ.

Излучение одного лазера может подействовать только на электроны твердого тела, которые изменяют состояние ионов и атомных остовов. В данном случае имеется несомненное доказательство существования коллективных эффектов. При образовании пространственно-упорядоченных структур явно проявляется когерентное поведение системы. Ответ на вопрос, каким образом система накапливает необходимую энергию и переходит к когерентному поведению, требует специального исследования и может быть получен в рамках теории ВР.

Когда характерные размеры системы оказываются сравнимыми с масштабом когерентности электронной волновой функции, проявляется квантовый размерный эффект: свойства системы становятся зависимыми от ее формы и размеров. Способность современной полупроводниковой технологии производить структуры, в которых реализуется квантовый размерный эффект, делает реальным исследование поведения подобных систем пониженной размерности (с почти двухмерным, одномерным и даже нульмерным характером электронных состояний) и открывает широкие перспективы их использования в электронике и оптоэлектронике.

Основной проблемой, возникающей при анализе возможности воздействия структурированного электромагнитного (ЭМ) поля на процессы зародышеобразования и роста пленок в твердотельной структуре, является осуществление возможности реализации подобных про-

цессов под влиянием других физических воздействий. Исследования в этом направлении ведутся достаточно интенсивно и эффективно.

Показано, что приложение сосредоточенной механической нагрузки в виде алмазной иглы приводит к переструктуризации материала. При воздействии таковой нагрузки наблюдается интенсивная миграция дефектов из зоны обработки, возникающая за счет воздействия инициируемых нагрузкой механических напряжений. Особо интересным представляется тот факт, что после снятия нагрузки структурные дефекты возвращаются в зону воздействия. Как показали проведенные методом катодolumинесценции исследования, скорость убегания дефектов весьма значительна и достигает нескольких миллиметров в секунду. Интересны в этом плане работы по анализу процессов термодиффузии (возникновение градиента концентраций за счет градиента температур), возникающей как в жидких, так и в твердых телах и инициирующей процессы самоорганизации. Явление термодиффузии относится к так называемому классу перекрестных эффектов, когда градиент одного свойства вызывает градиент, а следовательно, и поток другого свойства. Наиболее известными из них являются термоэлектрические — эффект Пельтье и термоЭДС (электродвижущая сила). Объяснение этим эффектам может быть получено на основании теории Онзагера, согласно которой поток какого-либо свойства линейно зависит от всех термодинамических сил, действующих в системе. В случае векторных потоков эти силы всегда оказываются связанными с градиентами свойств.

Одной из наиболее привлекательных для технологии идей является идея управления механическим поведением твердых тел и их структуры с помощью электрического поля, так называемый электропластический эффект, впервые описанный Дюфором. Поскольку кристалл содержит дефекты различных типов, которые искажают идеальную структуру, то отдельные микрообъемы кристалла неидентичны друг другу. Поэтому можно предположить, что строгое равновесие зарядов в локальной области вблизи дефекта не выполняется. При этом можно ожидать, что электрические поля в диэлектриках и электрические токи в проводниках будут оказывать воздействие на области кристалла, содержащие дефекты. Причем электрическое воздействие может эффективно менять характер пластической структуры кристаллов.

В объеме всего кристалла всегда соблюдается электронейтральность, но его отдельные микрообъемы могут обладать нескомпенсированным зарядом. (К примеру, если в решетку NaCl внедрится двухзарядный ион Ca.) Требование электронейтральности вызывает необходимость появления в одной из позиций решетки вакансии, которая обладает эффективным отрицательным электрическим зарядом. При этом возникает локальная электрическая неоднородность. Поскольку с физической точки зрения металл можно уподобить электронной жидкости, в которую погружены положительно заряженные ионы, образующие кристаллическую решетку, то пропускание электрического тока через такую жидкость существенно влияет на динамику процессов пластической деформации. Впервые проявления такого эффекта наблюдались в опытах по движению дислокаций в монокристаллах цинка. В этом случае также наблюдается ускорение движения дислокаций. Авторы полагают, что этот эффект вызван движением электронов при протекании тока и передаче электронами части энергии дислокациям. Этот эффект получил название электронного ветра.

Более близким к обсуждаемым вопросам по достигнутым результатам являются эксперименты по получению различных структурных и морфологических преобразований и модификаций, использующие электрические поля высокой напряженности, реализуемые в частности, в сканирующих электронных микроскопах. С помощью туннельного зонда в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) можно не только исследовать рельеф поверхности, но и осуществлять модификацию этого рельефа и производить его структурные преобразования. Туннельный зонд представляет собой игольчатый электрод с радиусом острия порядка 10 нм. Межэлектродный зазор между игольчатым электродом и подложкой составляет 1 нм и менее. Поэтому в межэлектродном пространстве легко создавать электрические поля высокой напряженности — порядка 10^8 В/см. Эти поля вызывают столь большие электростатические силы, что возможна локальная пластическая деформация одного из электродов и другие эффекты. Возможно также осуществление локальной глубинной модификации полупроводниковых материалов с образованием в локализованной области модифицированной структуры, отличающейся от основной химическим строением и типом проводимости.

Подобные эксперименты проводились не только на полупроводниковых подложках, но и на металлических. На воспроизводимость и интерпретацию результатов измерения в туннельном микроскопе может оказывать существенное влияние структура острия игольчатого зонда, так как с размером, формой и химической природой острия связано не только разрешение, но и наблюдаемая структура поверхности.

Весьма интересные результаты получены при взаимодействии высокоэнергетического рентгеновского излучения с полупроводниковыми кристаллами. Показано, что воздействие рентгеновского излучения на полупроводниковые кристаллы может приводить к обратимым и необратимым изменениям структурных параметров, а также электрофизических и оптических характеристик. Исследования полупроводниковых соединений A^IVB^VI и твердых растворов на их основе показывают наличие долговременной структурной релаксации, которая наблюдается после воздействия на образец рентгеновского облучения и сопровождается изменением электрофизических и оптических характеристик.

Применение низкоэнергетического электромагнитного излучения (микроволнового) привело к возникновению целого научного направления – микроволновой химии, которая возникла на стыке физики и химии. Она включает химические превращения с участием твердых диэлектриков и жидкостей, связанных с энергией микроволнового поля (СВЧ колебаний). Микроволновое излучение (МВИ) способно в сотни раз ускорять многие химические реакции, эффективно удалять влагу из твердых, в том числе и высокопористых препаратов, модифицировать свойства различных сорбентов. Воздействие МВИ обусловлено действием двух факторов. Во-первых, при наложении МВ поля движение диполей (полярных молекул или иных обособленных групп атомов) приобретает определенную ориентацию, связанную с характером налагаемого поля. Когда интенсивность МВ поля уменьшается, возникающая ориентация либо исчезает, и хаотичность движения молекул восстанавливается, либо происходят соответствующие структурные преобразования. Второй фактор обусловлен направленной миграцией присутствующих, к примеру в растворе, ионов под воздействием внешнего поля. Поскольку глубина проникновения МВ излучения в объем образца зависит от значения $\tan \delta$ и различна для разных материалов, то

это делает МВ излучение весьма привлекательным для обработки тонкопленочных структур.

Воздействие МВ излучения может приводить к деструкции молекул и появлению в облучаемом образце повышенной концентрации свободных радикалов. Однако к настоящему времени теория взаимодействия МВ излучения с диэлектриками не позволяет даже приблизительно сказать, будет или не будет наблюдаться заметное поглощение МВ поля диэлектриком. В кристаллогидратах центрами поглощения МВ энергии выступают протяженные дефекты. Около этих дефектов формируются зоны дегидратации. Так как граница между исходным и обезвоженным веществом сама по себе представляет собой протяженный дефект, то распространение зоны дегидратации носит фронтальный характер. Обнаружено, что небольшое дозированное воздействие МВ поля малой мощности на частицы или кластеры, не приводящее к разогреву образца и изменению его химического состава, вызывает не термический отжиг части объемных дефектов микрочастиц, т. е. чисто полевое воздействие на структуру вещества и, как следствие, его переструктуризации. Проблема подбора оптимальных параметров генерируемого МВ поля, его структуры, частотных и амплитудных характеристик и соответствия их резонансным частотам процессов структуризации вещества является исключительно актуальной, и ее решение позволит вплотную приблизиться к синтезу твердотельных структур с заданными характеристиками.

Наиболее привлекательным с практической и технологической точек зрения является создание на поверхности подложки максимально свободного от примесей и структурных несовершенств и неоднородностей переходного тонкопленочного слоя и выращивание на его поверхности наноразмерной и наноструктурированной пленки. Поскольку на поверхности подложки при этом отсутствуют (в идеале) примеси и структурные несовершенства, а миграция атомов по поверхности в поисках нерегулярностей структуры продолжает иметь место, то необходим некий физический агент, который реализовал бы на поверхности подложки в создаваемой пленке требуемую неоднородность какого-либо параметра.

Естественно, что эта неоднородность должна иметь строго упорядоченную структуру и соответствовать тому локальному распреде-

лению атомов на поверхности, которое является необходимым. Подобный процесс будет полностью соответствовать принципам реализации группового метода обработки, поскольку позволит на всей поверхности пленки за один цикл получить требуемую регулярную структуру, состоящую из локальных упорядоченных групп различных атомов. Необходимо заметить, что если структурные несовершенства (дислокации, вакансии, дефекты) являются значительными и протяженными нарушениями структуры поверхности, то примеси, как центры локализации процесса зародышеобразования, являются всего лишь незначительными нарушениями волновой регулярности структуры твердого тела, выходящей на поверхность.

3.2.3. Графеновая электроника выращивается прямо на микрочипе

Ученые из Корнельского университета благодаря нанотехнологиям разработали новый метод производства электронных графеновых микрочипов. Его преимущество заключается в непосредственном выращивании графеновой пленки на кремниевой подложке.

Как известно, графеновые пленки толщиной всего в 1 атом характеризуются высокой механической прочностью и уникальными электропроводными характеристиками. Это идеальный материал для производства нанотранзисторов, если бы не сложность и дороговизна их производства. Но, похоже, что ученым из Корнелла удалось преодолеть трудности производства графеновых наноустройств. Ранее исследователи сумели вырастить графеновые листы на медной подложке. Теперь они сделали то же самое на пластине из оксида кремния, предварительно покрытой тонким слоем меди.

После того, как нужное количество пленок выросло, с помощью фотолитографии удаляли ненужные фрагменты и получали практически готовый микрочип, в составе которого был не один нанотранзистор. После фотолитографии химическим травлением медный слой-подложку убрали. Как только на кремниевой пластине выростали пленки графена, к ней можно применять все стандартные методы производства микроэлектронных компонентов – фотолитография, травление и т. д.

Планируется создать полноразмерную четырехдюймовую кремниевую пластину с микрочипами, что позволит продемонстрировать простоту и технологичность подхода в микроэлектронике.

Работа ученых будет полезна в развивающейся отрасли графеновых материалов, которую многие специалисты видят в качестве «наследницы» традиционной кремниевой микроэлектроники.

3.3. Фуллерены и фуллериты

В 1990 г. среди физиков и химиков возник бум исследовательских работ, вызванный сообщением о получении нового вещества – фуллерита, состоящего из молекул углерода, а именно фуллеренов. Структура фуллерита, его свойства, а также методы получения – оказались в фокусе внимания исследователей. Открылись богатейшие возможности для создания на основе нового вещества различного рода соединений и структур с необычными физико-химическими свойствами.

Фуллерит является аллотропной модификацией углерода. Поэтому прежде чем перейти к рассмотрению его структуры, свойств и возможных областей применения, вспомним ближайших «родственников» нового вещества – графит и алмаз.

Одной из кристаллических модификаций углерода служит графит. Этот чудесный материал находит широчайшее применение в самых разнообразных сферах человеческой деятельности: от изготовления карандашных грифелей до блоков замедления нейтронов в ядерных реакторах. Расположение атомов углерода в кристаллической структуре графита весьма необычно. Отдельные атомы, соединяясь между собой, формируют шестиугольные кольца, образующие сетку, похожую на пчелиные соты. Множество таких сеток располагаются друг над другом слоями. Расстояние между атомами, расположенными в вершинах правильных шестиугольников, равно 0,142 нм. Соседние атомы внутри каждого слоя связаны весьма прочными ковалентными связями, поэтому слой атомов, образующих гексагональную сетку, достаточно прочен и стабилен. А вот слои в графите находятся на довольно почтительном расстоянии друг от друга: равном 0,335 нм, что более чем в 2 раза превышает расстояние между углеродными атома-

ми в гексагональной сетке. Большое расстояние между слоями определяет слабость сил, связывающих слои. Такая структура – прочные слои слабо связаны между собой – определяет специфические свойства графита: низкую твердость и способность легко расслаиваться на мельчайшие чешуйки.

Другой кристаллической модификацией углерода является алмаз – вещество совершенно уникальное. Каждый атом углерода в структуре алмаза расположен в центре тетраэдра, вершинами которого служат 4 ближайших атома. Соседние атомы связаны между собой ковалентными связями. Такая структура определяет свойства алмаза – самого твердого вещества, известного на Земле.

Изучение этих двух форм чистого углерода имеет давнюю историю. В разное время выдающиеся химики и материаловеды открыли и другие формы углерода, такие, как аморфный углерод, карбин, белый углерод и т. д. Однако все эти формы являются композитами, т. е. смесью малых фрагментов графита и алмаза. До последнего времени считалось, что существуют только 2 способа расположения атомов углерода в пространстве, позволяющих получить кристаллическую форму углерода. Такое положение следует считать весьма удивительным. В самом деле, в настоящее время известно свыше 1 млн соединений углерода с другими элементами. Их изучение составляет предмет огромного раздела науки – органической химии. В то же время исследования в области химии чистого углерода начались сравнительно недавно. В последние 10 лет фундаментальные исследования ознаменовались выдающимися успехами в получении принципиально новой третьей формы чистого углерода, о которой пойдет речь ниже.

3.3.1. Фуллерены – молекулярная форма углерода

Новая форма углерода является новой по существу. В противоположность первым двум (графиту и алмазу), структура которых представляет собой периодическую решетку атомов, третья форма чистого углерода является молекулярной. Это означает, что минимальным элементом ее структуры является не атом, а молекула углерода. Да какая

молекула! Оказывается, молекулы чистого углерода представляют собой замкнутую поверхность, имеющую форму сферы или сфероида. Такие молекулы названы фуллеренами в честь американского изобретателя и архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, получившего в 1954 г. патент на строительные конструкции в виде шестиугольников и пятиугольников, составляющих полусферу или полусфероид, которые можно использовать в качестве крыши больших зданий (цирки, выставочные павильоны и др.).

Большой интерес к молекулярному углероду возник в 1985 г., когда была открыта 60-атомная молекула C_{60} . Кроме того, были обнаружены молекулы C_{70} , C_{76} , C_{84} и т. д. Все они имеют форму замкнутой поверхности, на которой располагаются атомы углерода.

Основным элементом структуры фуллеренов является шестиугольник, в вершинах которого расположены атомы углерода. Подобные шестиугольники также характерны для структуры графита. Исходя из этого логично предположить, что графит должен использоваться как исходное сырье для синтеза фуллеренов. Так и происходит на самом деле. В настоящее время однозначно установлено, что наиболее эффективным способом получения фуллеренов является термическое разложение слоистой структуры графита на малые фрагменты, из которых затем происходит формирование C_{60} и других замкнутых молекул углерода.

Если считать, что молекула C_{60} составлена только из шестиугольных фрагментов графита, то ее радиус должен быть равен 0,37 нм. На самом же деле точное значение радиуса C_{60} , установленное рентгеноструктурным анализом, составляет 0,357 нм. Эта величина всего на 2 % отличается от рассчитанной. Различие в радиусах связано с тем, что атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестиугольников, унаследованных от графита, и 12 правильных пятиугольников, возникших в процессе формирования C_{60} . Можно показать, что из правильных шестиугольников легко выкладывается плоская поверхность. Однако ими не может быть выложена поверхность замкнутая: некоторые шестиугольные кольца необходимо разрезать, чтобы из разрезанных частей сформировались пятиугольники. Точно таким же образом шьется футбольный мяч. Его покрывка также состоит (и в этом легко убе-

даться) из пяти- и шестиугольных лоскутков кожи, образующих сферическую поверхность.

Таким образом, структурные элементы фуллеренов подобны структурным элементам графита. Плоская сетка шестиугольников (в случае графита) свернута и сшита в замкнутую сферу или сфероид. При этом часть шестиугольников преобразуется в пятиугольники.

3.3.2. Получение фуллеренов и фуллерита

Установка для получения фуллеренов путем термического испарения графита была разработана в 1990 г. В качестве сырья используют цилиндрические стержни спектрально чистого графита, имеющие диаметр 1-6 мм. Заточенные концы стержней соединяют, и через них пропускают ток 150-200 А. Можно использовать как постоянный, так и переменный ток. При пропускании тока в месте контакта возникает электрическая дуга и начинается испарение графита. Нагрев должен быть умеренным, чтобы от стержней отделялись не отдельные атомы углерода, а целые фрагменты слоев графита, состоящие из углеродных шестиугольников. Испаренный графит осаждается на стенках камеры в виде сажи.

Описанный процесс осуществляется в камере, в которой предварительно создается вакуум порядка 10^{-6} Торр. Затем камеру заполняют газом гелием. Считается, что атомы гелия способны эффективно отнимать избыточную энергию у фрагментов графита, покинувших зону электрической дуги. Кроме того, гелий уносит энергию, выделяющуюся при объединении фрагментов в молекулы фуллеренов. Оптимальное давление гелия в камере при испарении графита находится в пределах 50-100 Торр. Шестиугольные фрагменты графита, охлажденные в газообразном гелии, служат «кирпичиками» для построения молекул C_{60} и C_{70} .

Чтобы выделить чистые фуллерены, осевшую на стенках испарительной камеры сажу растворяют в метилбензоле (толуоле). При этом фуллерены переходят в раствор, а непрореагировавшие фрагменты графита выпадают в осадок. Отделение осадка может быть произведено одним из трех путей: фильтрацией, вращением раство-

ра в центрифуге, экстракцией при помощи прибора Сокслета. В результате получают жидкость цвета красного вина, которая затем помещается в испаритель. Толуол испаряется, а фуллерены выпадают на дно и стенки сосуда в виде черной пудры, масса которой составляет около 10 % массы исходной графитовой сажи. В состав пудры входят молекулы C_{60} и C_{70} в соотношении 85:15. Для разделения этих фуллеренов используется жидкостная колоночная хроматография, требующая большого количества растворителей. Цвет чистого C_{60} в растворе – красный анилиновый, тогда как цвет раствора C_{70} – оранжевый.

При выпаривании раствора чистого C_{60} образуется новое кристаллическое вещество, которое получило название фуллерит. Впервые твердый фуллерит наблюдали Кречмер и Хуффман в мае 1990 г. в одной из лабораторий Института ядерной физики в г. Гейдельберге (Германия). Фуллерит является третьей формой чистого углерода, принципиально отличающейся как от алмаза, так и от графита.

3.3.3. Структура фуллерита

Установлено, что фуллерит имеет высокую степень кристаллического порядка. Молекулы C_{60} при комнатной температуре конденсируются в структуру с плотной упаковкой, где каждая молекула имеет 12 ближайших соседей. Можно доказать, что существуют 2 плотноупакованные структуры. В кристаллографии (науке о строении кристаллов) они получили названия гранецентрированной кубической (ГЦК) и гексагональной решеток. В кристаллическом фуллерите молекулы фуллеренов образуют ГЦК-решетку. Поскольку 60-атомная молекула имеет диаметр 0,71 нм, размеры элементарной ячейки ГЦК-решетки весьма внушительны: каждая сторона куба равна 1,42 нм, а расстояние между ближайшими соседями составляет около 1 нм. В кристаллах, состоящих из атомов и имеющих ГЦК-решетку, сторона куба обычно не превышает 0,4 нм, а расстояние между ближайшими соседями – 0,3 нм.

Методом ядерного магнитного резонанса доказано, что молекулы C_{60} , занимая определенные места в гранецентрированной решетке,

при комнатной температуре постоянно вращаются вокруг положения равновесия с частотой 1012 с^{-1} . Такое вращение является значительной помехой, когда требуется определить положение атомов углерода в самой молекуле C_{60} . К счастью, по мере понижения температуры вращение молекул замедляется и при очень низкой температуре полностью прекращается.

Интересно отметить, что при понижении температуры до 249 К фуллерит испытывает фазовое превращение первого рода, при котором ГЦК-решетка перестраивается в простую кубическую. При этом объем фуллерита увеличивается на 1% .

3.3.4. Свойства фуллеренов и фуллерита

Логично предположить, что вещество, состоящее из столь удивительных молекул, будет обладать необычными свойствами. Кристалл фуллерита имеет плотность $1,7 \text{ г/см}^3$, что значительно меньше плотности графита ($2,3 \text{ г/см}^3$) и тем более алмаза ($3,5 \text{ г/см}^3$). Да это и понятно — ведь молекулы фуллеренов полые.

Фуллерит не отличается высокой химической активностью. Молекула C_{60} сохраняет стабильность в инертной атмосфере аргона вплоть до температур порядка 1200 К . Однако в присутствии кислорода уже при 500 К наблюдается значительное окисление с образованием CO и CO_2 . Процесс, продолжающийся несколько часов, приводит к разрушению ГЦК-решетки фуллерита и образованию неупорядоченной структуры, в которой на исходную молекулу C_{60} приходится 12 атомов кислорода. При этом фуллерены полностью теряют свою форму. При комнатной температуре окисление происходит только при облучении фотонами с энергией $0,5\text{--}5 \text{ эВ}$. Вспомнив, что энергия фотонов видимого света находится в диапазоне $1,5\text{--}4 \text{ эВ}$, приходим к выводу: чистый фуллерит необходимо хранить в темноте.

Фуллериты достаточно легко растворяются в неполярных растворителях. Наиболее известные растворители образуют следующий ряд в порядке уменьшения растворимости фуллеритов: сероуглерод CS_2 , толуол C_7H_8 , бензол C_6H_6 , тетрахлорметан CCl_4 , декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$, гексан C_6H_{14} , пентан C_5H_{12} .

3.3.5. Проводимость и сверхпроводимость фуллеренов

Твердый фуллерит является полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,5 эВ. Это означает, что при облучении обычным видимым светом электрическое сопротивление кристалла фуллерита уменьшается. Оказывается, фотопроводимостью обладают не только чистый фуллерит, но и его различные смеси с другими веществами. Одна из первых успешных попыток в этом направлении состоит в следующем: полимер поливинилкарбазол в количестве 1,5 и 0,04 г фуллерита растворяли в 12 мл толуола. Приготовленным раствором покрывалась алюминиевая пластина. Толщина слоев изменялась от 1 до 30 мкм. Как оказалось, спектр фотопоглощения полученной смеси полностью охватывает видимый диапазон (длина волн 280–680 нм). При этом квантовый выход по отношению к образованию электронно-дырочных пар составляет 0,9. Иначе говоря, каждый падающий фотон (квант света) рождает в полученном материале в среднем 0,9 электрона. С этой точки зрения рассматриваемый материал является лучшим в ряду органических фотопроводящих материалов.

Очень интересные результаты были получены при добавлении калия или натрия в кристаллические пленки C_{60} . Оказалось, что добавка щелочного металла приводит к повышению электрической проводимости таких пленок на несколько порядков. При этом состоянию с металлической проводимостью отвечает структура M_3C_{60} , где M – атом щелочного металла.

В начале 1991 г. было установлено, что добавление атомов калия в пленки C_{60} приводит к тому, что они становятся сверхпроводящими при 19 К, т. е. электрическое сопротивление таких пленок становится равным нулю. Структура $RbCs_2C_{60}$ становится сверхпроводящей уже при 33 К, а сплав $RbTiC_{60}$ – при 42,5 К. Вероятно, в ближайшем будущем могут быть достигнуты температуры порядка 100 К.

В настоящее время установлено, что фуллерены могут служить основой для создания с другими элементами очень многих соединений. Одна из наиболее интересных и заманчивых проблем в этом направлении – внедрение внутрь молекулы C_{60} атомов различных элементов. В настоящее время известно, что более трети элементов Периодической таблицы могут быть помещены внутрь молекулы C_{60} . Уже

известны сообщения о внедрении атомов лантана, никеля, натрия, калия, рубидия, цезия. С этой точки зрения очень привлекательны атомы редкоземельных элементов, таких, как тербий, гадолиний и диспрозий, обладающих ярко выраженными магнитными свойствами. Фуллерен, внутри которого расположен такой атом, должен обладать свойствами магнитного диполя, ориентацией которого можно управлять внешним магнитным полем.

Возникает перспектива использования фуллеренов в качестве основы для создания запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации. Как известно, в настоящее время в качестве накопителей информации широко используются магнитные диски. При этом информационная среда представляет собой тонкую пленку ферромагнитного металла, что дает возможность получить поверхностную плотность записи порядка 10^7 бит/см². Оптические диски, действие которых опирается на лазерную технологию, позволяют достичь несколько большей информационной плотности, порядка 10^8 бит/см². Если же в качестве носителей информации использовать фуллереновые магнитные диполи, расположенные на поверхности жесткого диска на расстоянии 5 нм друг от друга, то плотность записи достигнет фантастического значения $4 \cdot 10^{12}$ бит/см². Реализация подобных устройств даст человечеству невиданное информационное могущество. Например, станет возможным записать содержание всех книг, изданных в мире с момента появления книгопечатания, всего на одну дискету современного формата.

Очень интересные результаты достигнуты в направлении синтеза полимеров на основе фуллеренов. При этом фуллерен C₆₀ служил основой полимерной цепи, а связь между молекулами осуществлялась с помощью бензольных колец. Такая структура получила образное название «нить жемчуга». Так были синтезированы металлоорганические полимеры типа (C₆₀Pd)_n, (C₆₀Pd₂)_n.

Фуллерит может служить исходным материалом для получения алмаза. Совсем недавно было показано, что поликристаллический фуллерит можно превратить в алмаз при давлении всего лишь 2×10^5 атм и при комнатной температуре. Пока же, как известно, для превращения поликристаллического графита в алмаз необходимо давление $(3-5) \times 10^6$ атм и температура 1200 °С. Таким образом, фуллериты являются наиболее перспективным сырьем для синтеза самого твердого и дорогого материала — алмаза.

3.3.6. Использование фуллеренов

Благодаря наличию у молекулы фуллерена большого количества атомов углерода, открываются неограниченные возможности синтеза множества соединений с новыми свойствами, а значит, и новыми возможностями. Имеются технологические приемы, с помощью которых «мячи» можно вытягивать в трубки. Внешний диаметр их составляет 0,7 нм, а внутренний – 0,5 нм. То есть в 1 мм можно уложить одну около другой больше 1 млн трубок.

Уже научились заполнять такие трубки различными веществами и элементами, начинают изучать их свойства и пытаются использовать в различных областях человеческой деятельности. Они обладают значительной твердостью и жесткостью, высокой прочностью, тепло- и электропроводностью. Профессор Р. Смолли, один из открывателей фуллеренов считает, что волокна, созданные из таких трубок, будут прочнее стали, смогут обеспечить кабели для космических целей или заменить все линии электропередач и в мире.

В мае 1994 г. на Всемирной конференции в г. Сан-Франциско широко обсуждались вопросы практического использования фуллеренов в электронике. Крупнейшая международная промышленная корпорация «Мицубиси» решила использовать фуллерены в качестве основы для производства аккумуляторных батарей, принцип действия которых основан на реакции присоединения водорода, подобно тому, как это происходит в широко распространенных металлгидридных никелевых аккумуляторах. Отличие заключается в том, что аккумуляторы на основе фуллеренов способны запасать примерно в 5 раз большее количество водорода и, следовательно, емкость их в 5 раз больше. Кроме того, батареи на фуллеренах характеризуются малым весом, а также высокой экологической и санитарной безопасностью. Планируется широкое использование таких аккумуляторов для питания персональных компьютеров и слуховых аппаратов.

Пессимизм некоторых исследователей относительно углеродных хранилищ для водорода вполне компенсируется энтузиазмом большинства авторов. Вопрос в том, какие именно углеродные структуры наиболее эффективны для этих целей. В случае успеха будет создан экологически безопасный автомобильный двигатель на водородном

топливе. В большинстве публикаций сообщается об обратимом накоплении до 8 вес. % водорода в углеродных нанотрубках. При этом механизм сорбции водорода в столь больших количествах до сих пор не ясен. Ведь при таком содержании водорода внутри нанотрубок его объемная массовая плотность должна во много раз превышать критическое значение. В связи с последним интересно изучить, как накапливается водород в нанобразцах сферической формы. В отличие от продолговатых нанотрубок, сферические структуры имеют относительно большой внутренний объем, заполнение которого водородом приводит к его более высокому относительному массовому содержанию. Такая работа выполнена группой исследователей из Института физики Академии наук Китая совместно с университетом Баффало (США).

Полимеризованные наносферы из углерода с небольшой примесью азота были получены на кремниевой подложке из смеси водорода с метаном методом СВЧ плазмохимического напыления (катализатор – железо). После синтеза «наносферный» материал подвергался мягкому кратковременному травлению в азотной плазме для очистки. Затем наносферы отделялись от подложки в 37 %-ном растворе HCl в течение 12 ч. Просвечивающий электронный микроскоп выявил полусферы диаметром 15–50 нм. Характер спектров потери энергии электронов указывает на наличие sp^2 связи между атомами азота и углерода. При этом концентрация азота в структурах достигает 10 %.

Для насыщения водородом наносферные образцы массой 10 мг помещались в вакуумную камеру, в которой при вакууме 10^{-7} Торр они предварительно осушались, а затем в камеру вводился высокочистый водород (99,999 %) при атмосферном давлении и образцы выдерживались при 300 °C в течение 4 ч. Наносферы с адсорбированным водородом исследовались термогравиметрическим методом. При температуре немногим выше комнатной наблюдалась десорбция водорода, достигавшая максимально высокой скорости при 230 °C. Полное количество сорбированного водорода достигало 8 вес. %, что соответствует примерно одному атому водорода, приходящемуся на один атом углерода. На ИК спектре поглощения образца, содержащего водород, наблюдается полоса $2700\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, которая хорошо соответствует как частотам колебаний C-H связи $2850\text{--}300\text{ см}^{-1}$, так и N-H связи $3300\text{--}3400\text{ см}^{-1}$. Установлено, что после 10 циклов адсор-

ции-десорбции водорода сорбционная способность образцов снижалась на 15 %. В качестве механизма поглощения водорода авторы указывают хемосорбцию.

Обсуждаются вопросы использования фуллеренов для создания фотоприемников и оптоэлектронных устройств, алмазных и алмазоподобных пленок, лекарственных препаратов, сверхпроводящих материалов, а также в качестве красителей для копировальных машин.

Много внимания уделяется проблеме использования фуллеренов в медицине и фармакологии. Одна из трудностей – создание водорастворимых нетоксичных соединений фуллеренов, которые могли бы вводиться в организм человека и доставляться кровью в орган, подлежащий терапевтическому воздействию. В решении этой проблемы уже имеются успехи. Одно из первых соединений такого рода синтезировано на основе дифенетиламиносакцинита и активно используется в медико-биологических экспериментах с фуллеренами. Широко обсуждается идея создания противораковых медицинских препаратов на основе водорастворимых эндоздральных соединений фуллеренов с радиоактивными изотопами (эндоздральные соединения – это молекулы фуллеренов, внутри которых помещен один или более атомов какого-либо элемента).

Перспективы. В начале 1995 г. 1 г фуллерита стоил около 100 дол. Столь высокая стоимость обусловлена тем, что имеющиеся способы получения и очистки фуллеренов весьма несовершенны и малопроизводительны (около 1 г в 1 ч). Поэтому актуальнейшей задачей является разработка новых эффективных методов их получения. Впрочем, не исключено, что дешевле всего получать фуллерены в готовом виде из земных недр. Не так давно стало известно, что природный углеродсодержащий минерал шунгит, запасы которого в Карелии составляют сотни миллионов тонн, содержит 0,1 % фуллеренов. Таким образом, из каждой 1 т минерала можно получить до 1 кг фуллерита, поэтому на очереди – разработка промышленного метода извлечения фуллеренов из шунгита.

Необходимо дальнейшее развитие работ, связанных с получением эндоздральных молекул C_{60} . В результате могут быть получены фуллериты с особыми, практически ценными физико-химическими свойствами. Приоритетными являются исследования биологически активных соединений фуллеренов. Одна из важнейших задач – выяснение

закономерностей накопления фуллереновых соединений в органах и тканях. Решение этой проблемы может привести к синтезу новых высокоэффективных лекарственных препаратов.

Таким образом, фуллерены, открытые в результате чисто физических исследований, в настоящее время привлекают внимание не только физиков, но и химиков, энергетиков, материаловедов, медиков и биологов. Не исключено, что исследования в этой области приведут к качественно новым результатам глобального масштаба, так же как это было в начале 50-х гг., когда началось широкое использование полупроводников, ставших основой развития информационных технологий.

3.4. Углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки – своеобразные цилиндрические молекулы диаметром примерно от половины нанометра и длиной до нескольких микрометров [13]. Эти полимерные системы впервые обнаружили менее 10 лет назад как побочные продукты синтеза фуллерена C_{60} . Тем не менее уже сейчас на основе углеродных нанотрубок создаются электронные устройства нанометрового (молекулярного) размера. Ожидается, что в обозримом будущем они заменят элементы аналогичного назначения в электронных схемах различных приборов, в том числе современных компьютеров. В результате будет достигнут теоретический предел плотности записи информации (порядка 1 бита на молекулу) и вычислительные машины обретут практически неограниченную память и быстродействие, лимитируемое только временем прохождения сигнала через прибор.

Углерод встречается в различных формах, наиболее известными из которых являются графит и алмаз. Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой углерод с другим взаимным расположением молекул. Наибольшая часть этого материала производится с использованием технологии химического осаждения пара и, как следует из его названия, имеет вид крошечных трубок. Они могут быть одностенными (труднополучаемые и весьма дорогостоящие), двустенными и многостенными (наиболее распространенная модификация).

В отличие от других наночастиц, таких, как глиняные нанотрубки, УНТ, по-видимому, отличаются большей универсальностью, обладая широким кругом характеристик, подходящих для различных областей применения, особенно в сферах, связанных с использованием их антистатических свойств. В частности, углеродные нанотрубки могут использоваться в производстве топливных элементов, литий-ионных аккумуляторных батарей, пластмасс.

УНТ и другие наночастицы по величине на порядок меньше общепринятых наполнителей для пластмасс, но их добавка может улучшить свойства многих полимерных продуктов. Так, при их введении полимерная упаковочная пленка пропускает меньшее количество кислорода. Композитные материалы становятся более прочными и легкими, а у продуктов электроники могут повышаться антишумовые характеристики.

Наибольшая часть УНТ выпускается на опытных предприятиях, но в настоящее время ситуация постепенно меняется. Так, немецкая химическая фирма «Bayer» (г. Леверкузен) начала работы по расширению производства своего материала марки «Baytubes» с 60 до 200 т в год. Причем к 2013 г. возможно его повышение до 3 тыс. т в год. Кроме того, лидирующий в Китае продуцент УНТ занят поиском источника финансирования для реализации проекта по сооружению завода мощностью 100 т в год. Французская химическая компания «Arkema» также планирует увеличить выпуск УНТ в 2010 г. с 20 до 200 т в год. Поставщики УНТ имеются также в США, Индии и Японии. Таким образом, при условии развития крупномасштабных сфер потребления использование УНТ может распространиться за пределы лабораторий и будет иметь реальное коммерческое значение.

Мировой рынок наноматериалов в настоящее время оценивается примерно в 1,5 млрд. дол. (1 млрд. евро), а за ближайшие 2-3 года его стоимость может увеличиться вдвое. Однако сложно прогнозировать, каков будет объем рынка в перспективе, поскольку притом, что производство будет расти, цены на выпускаемую продукцию, вероятно, снизятся. Если в 2008 г. цены на УНТ составляли 80-100 дол./кг, то в 2010 г. они колеблются от 45 до 70 дол. в зависимости от качества. При этом китайские продуценты могут предлагать еще более дешевый товар.

«Arkema» продает свою УНТ-продукцию под маркой «Graphistrength». Компания разработала универсальную маточную смесь, содержащую 30 весовых процентов УНТ, которая может вводиться в различные смолы, включая поликарбонатные (ПК), полиэфирные и полиамидные, для придания им антистатических свойств. Был разработан особый сорт для фторсодержащих эластомеров. «Arkema» начала также распространение в Европе УНТ-содержащих эпоксидных смол базирующейся в США нанотехнологической компании «Zyvex», демонстрируя растущую привлекательность рынка композитных материалов для продуцентов УНТ.

Применение углеродных нанотрубок открыло огромные возможности в сфере сооружения легковесных конструкций. Примером этому служит производство лопастей ветровых турбин, длина которых зачастую ограничена из-за их веса. Лопасты, изготовленные из укрепленных стекловолокном эпоксидных смол на базе УНТ, будут весить примерно на 30 % меньше (при более высокой прочности), чем обычные эпоксидные системы. Специалисты компании «Bayer» утверждают, что при этом характеристики, связанные с ударной вязкостью, улучшатся на 20-30 %. Применение новых композитных материалов для изготовления вращающихся лопастей позволяет увеличить их длину, что даст возможность повысить мощность ветровых электростанций.

«Bayer» сообщает и о другой сфере применения эпоксидных смол на базе УНТ – производстве досок для серфинга, осуществляемом американской компанией «Entropy Surfboards». В данном случае применение новых материалов позволяет продлить срок эксплуатации этих изделий в 2-3 раза при снижении их механической усталости, часто проявляющейся у досок, изготовленных традиционным методом.

Мировой гигант в области производства пластмасс – немецкая компания «BASF» начала выпуск своих первых смол на базе УНТ-материала «Ultraform N2320C», имеющего довольно высокую электропроводность и при этом сохраняющего обычную для ацетала ударную вязкость. Немецкая компания «Bosch» использует этот материал в производстве корпусов топливных фильтров для автомобилей марок «Audi A4» и «Audi A5». Основная проблема заключалась в удовлетворении требований компании «Bosch» в отношении уровня электропроводности материала и его механических свойств, особенно удар-

ной вязкости. Повышенная поверхностная проводимость (в 30 тыс. раз большая, чем у более ранних версий корпусов) позволяет автомобилям «Audi» соответствовать стандартам, установленным «US Society of Automotive Engineers» и направленным на предотвращение искрения вблизи деталей, несущих топливо.

До настоящего времени во многих видах антистатических пластмасс в качестве наполнителя использовался технический углерод. Однако свойственное углеродным нанотрубкам соотношение длины и толщины дает возможность получить соизмеримый эффект при значительно меньшей концентрации добавок. Так, содержание УНТ в деталях компании «Bosch» составляет менее 5 %. В случае применения технического углерода данный показатель был бы равен по меньшей мере 20 %. Более низкая концентрация добавок обеспечивает большее сходство с механическими свойствами ацетала.

По мнению специалистов компании «BASF», перспективное развитие сфер потребления разработанного ею материала связано с такими областями, как микроэлектроника и транспорт. В дальнейшем компания намерена продвинуться дальше производства единственного вида рассматриваемого типа пластмасс. «BASF» является одним из участников организации «CNT Innovation Alliance», насчитывающей около 80 членов из промышленных и академических кругов, которые в исследованиях в области УНТ вложили уже примерно 80 млн евро (111 млн дол.).

Другой потенциальной сферой потребления УНТ, которая, однако, в значительной мере игнорируется, является производство антипиретиков. Хотя углеродные нанотрубки не могут заменить традиционные антипиретики, небольшие добавки УНТ позволят существенно повысить эффективность этих веществ. Данной сфере не уделяется должного внимания, поскольку она не вписывается в привычный «имидж» УНТ. Учитывая, что мировой рынок антипиретиков оценивается в 3 млрд дол. (2 млрд. евро), выход на него производителей углеродных нанотрубок может быть весьма перспективным. Пока нет каких-либо других потенциальных рынков сбыта УНТ, подобных производству антипиретиков, однако, если наноматериалы будут дешеветь, то таковые могут появиться.

Свернутый графитовый слой. Не содержащая дефектов одностенная углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в виде цилиндра ленту с упаковкой атомов по типу графита. В общем случае нанотрубки обладают винтовой осью симметрии (тогда говорят, что они хиральны). Нехиральными оказываются нанотрубки, в которых углеродные шестиугольники ориентированы параллельно и перпендикулярно оси цилиндра.

3.4.1. Металлы и полупроводники

Для создания электронных устройств и их объединения в сложные приборы требуются полупроводники и материалы с высокой электропроводностью. Нанотрубки с разными значениями индексов (n , m) – это полимеры разного строения, а потому они должны обладать разными электрическими свойствами. Зависимости электрических свойств нанотрубок от геометрических параметров были предсказаны на основе квантово-химических расчетов их зонной структуры. Было отмечено, что все атомы углерода в нанотрубках имеют тройную координацию, а значит, нанотрубки – сопряженные ароматические системы, в которых 3 из 4 валентных электронов каждого углерода образуют локализованные σ -связи, а 4-й участвует в образовании делокализованной π -системы (как, например, в бензоле). Эти π -электроны слабо связаны со своими атомами, поэтому именно они могут участвовать в переносе заряда в системе.

Высокая (металлическая) проводимость должна появиться, если занятые π -состояния не отделены от вакантных π^* -состояний. В противном случае нанотрубка – полупроводник. Расчеты показали, что металлическим типом зонной структуры обладают те, для которых разность $n - m$ кратна 3-м, т. е. треть нанотрубок. Остальные нанотрубки должны быть полупроводниками с шириной запрещенной зоны от нескольких десятых до примерно 2 эВ, возрастающей с уменьшением диаметра нанотрубки. Потребовалось целых 6 лет, чтобы квантово-химический прогноз подтвердился экспериментально. Наконец, методами сканирующей туннельной микроскопии для индивидуальных нанотрубок (фактически для объектов молекулярного размера) удалось оп-

ределить атомную структуру (геометрию – по топографическим изображениям) и электропроводность (по зависимости тока I через нанотрубку от напряжения смещения V).

3.4.2. Диод

Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если углеродный шестиугольник заменить, например, на пятиугольник, семиугольник или на два таких дефекта, нанотрубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников оказывается различной. Но с изменением ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняется ее электронный спектр, положение уровня Ферми, ширина оптической щели и т. п. В частности, для приведенного на рис. 3.1 случая слева относительно изгиба нанотрубка должна быть металлической, а справа – полупроводниковой. Таким образом, эта изогнутая нанотрубка должна представлять собой молекулярный гетеропереход «металл – полупроводник».

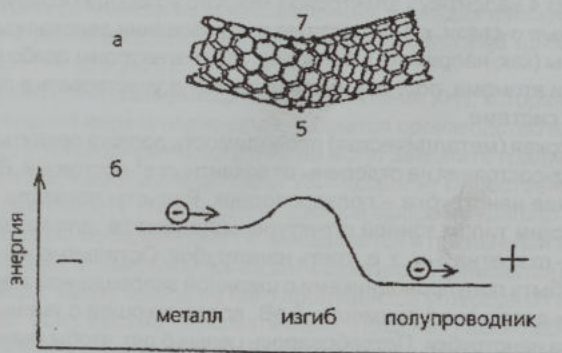


Рис. 3.1. Влияние дефекта семиугольник-пятиугольник на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б)

Если рассматривать данные куски нанотрубки изолированно, с разных сторон относительно изгиба, электроны на уровне Ферми обладают разной энергией. В единой системе выигрыш в энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера. Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области нанотрубки с большей энергией Ферми в область с меньшей. Иначе говоря, ток может течь только в одном направлении. «Одностороннее» прохождение тока через нанотрубку с изгибом используется для создания выпрямляющего диода – одного из основных элементов электронных схем (рис. 3.2).

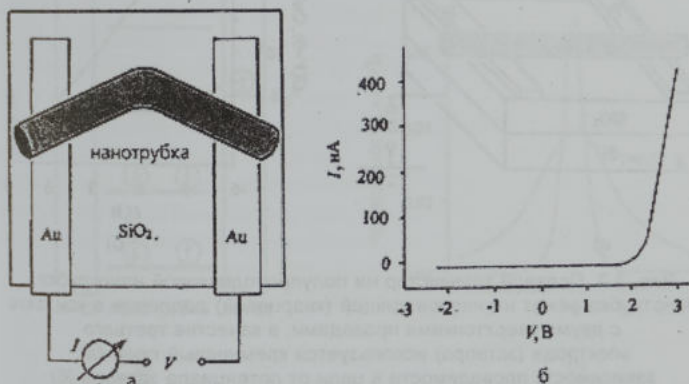


Рис. 3.2. Выпрямляющий диод на изогнутой нанотрубке. Нанотрубка расположена на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводниками (а); вольт-амперная характеристика для такой системы (б)

3.4.3. Полевой транзистор

На основе полупроводниковой или металлической нанотрубки удалось сделать полевые транзисторы, работающие при комнатной (в первом случае) и сверхнизкой (во втором случае) температуре. Полевые транзисторы (триоды) – электронные устройства, на перенос заряда, через

которые оказывает сильное влияние внешнее (управляющее) электрическое поле, что используется в усилителях электрического сигнала, переключателях и т. п.

В транзисторе на полупроводниковой нанотрубке электрическое поле управляет концентрацией носителей в зонах делокализованных состояний (рис. 3.3). В полупроводниковой нанотрубке состояния валентной зоны отделены от состояний зоны проводимости энергетичес-

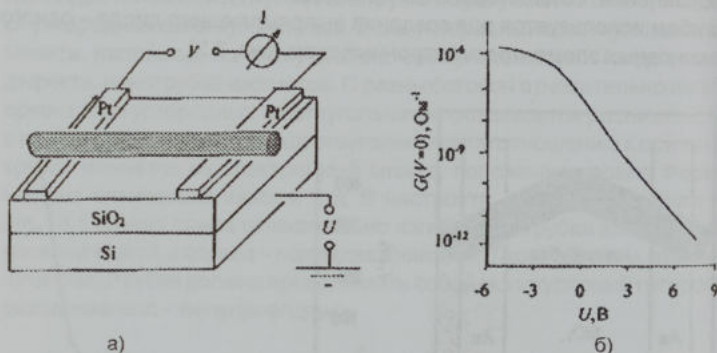


Рис. 3.3. Полевой транзистор на полупроводниковой нанотрубке. Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами, в качестве третьего электрода (затвора) используется кремниевый слой (а); зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора (б)

кой щелью – запрещенной зоной. Из-за наличия этой щели при обычных условиях концентрация носителей в зонах мала и нанотрубка обладает высоким сопротивлением. При подаче на третий электрод (затвор) электрического потенциала U в области нанотрубки возникает электрическое поле, и изгиб энергетических зон изменяется. При этом концентрация дырок в валентной зоне (и соответственно электропроводность) возрастает по экспоненциальному закону со смещением края зоны относительно уровня Ферми. При потенциале затвора около 6 В концентрация дырок достигает максимального значения, сопротивление – минимального, а нанотрубка становится металлической.

При создании полевого транзистора на металлической нанотрубке используются эффекты туннельного переноса электронов через нанотрубку по отдельным молекулярным орбиталям. Из-за конечной длины нанотрубки ее электронный спектр, строго говоря, не непрерывен (рис. 3.4 а) а дискретен, с расстоянием между отдельными уровнями ~ 1 мэВ при длине нанотрубки ~ 1 мкм (рис. 3.4). Такой характер расщепления уровней, конечно, не сказывается на электропроводности нанотрубки, например при комнатной температуре (0.025 эВ), но полностью определяет ее электрические свойства при температуре ниже 1 К.

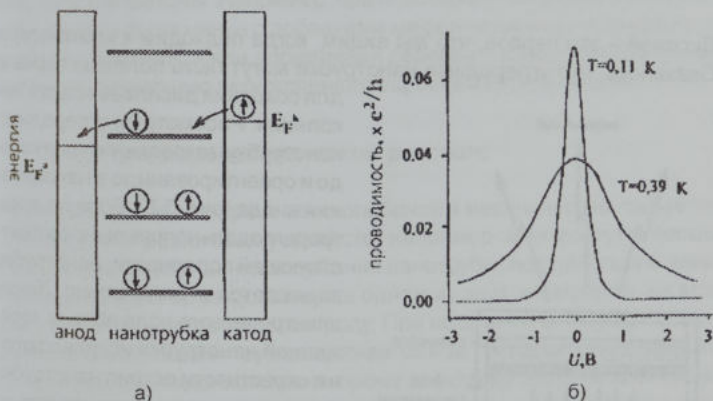


Рис. 3.4. Схема переноса электронов с участием одного дискретного уровня в полеовом транзисторе на металлической нанотрубке (а) и зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора (б)

Проводимость металлической нанотрубки в таких условиях обусловлена тем, что электроны перескакивают (туннелируют) с верхнего заполненного уровня катода на проводящий дискретный уровень нанотрубки, а затем с нанотрубки на нижний незаполненный уровень анода. В пределах нанотрубки туннелирование электрона происходит очень легко (практически без рассеяния и без потерь энергии) за счет π -электронных состояний, делокализованных на всю длину нанотрубки. Высокая металлическая проводимость в электрической цепи

возможна в случае, если также легко осуществляется перенос электронов между нанотрубкой и электродами. В эксперименте это достигается возможно более точной подгонкой уровней Ферми электродов к энергии проводящего уровня нанотрубки. Включение внешнего электрического поля при подаче электрического потенциала на третий электрод смещает электронный уровень нанотрубки, и ее сопротивление возрастает.

3.4.4. Дисплей

Дисплей — это первое, что мы видим, когда подходим к компьютеру. Оказалось, что углеродные нанотрубки могут быть полезны также и

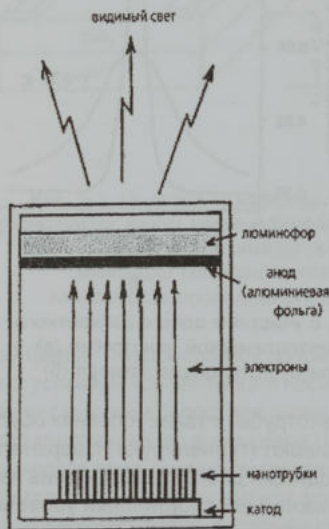


Рис. 3.5. Схема дисплея с автоэлектронной эмиссией из нанотрубок

для создания дисплеев нового поколения. Рассмотрим углеродную нанотрубку, закрепленную на катоде и ориентированную в направлении анода (рис. 3.5). Если на электроды подать напряжение соответствующей полярности, нанотрубка заряжается отрицательно. Линии электрического поля вблизи заряженной нанотрубки искривляются и в окрестности острия нанотрубки напряженность поля становится огромной, причем тем больше, чем тоньше нанотрубка. Такое локальное поле может вырывать электроны из нанотрубки. Под действием внешнего поля летящие электроны формируются в пучок. Этот эффект, называемый автоэлектронной эмиссией, кроме дисплеев используется для создания выпрямителей.

В обоих случаях берут 2 плоских электрода, один из которых покрывают слоем из углеродных нанотрубок, ориентированных перпендикулярно ко второму. Если на электроды подается такое напряжение, что нанотрубка заряжается отрицательно, то из нанотрубки на второй электрод излучается пучок электронов: ток в системе идет. При другой полярности нанотрубка заряжается положительно, электронная эмиссия из нее невозможна и ток в системе не идет.

Чтобы с помощью автоэлектронной эмиссии получить изображение, на аноде закрепляют люминофор. Электронный удар возбуждает молекулы люминофора, которые затем переходят в основное состояние, излучая фотоны. Например, при использовании в качестве люминофора сульфида цинка с добавками меди и алюминия наблюдается зеленое свечение, а при добавлении серебра – синее. Красный цвет получают с помощью легированного европием оксида иттрия.

3.4.5. Электромеханический резонанс

Преобразование электрических колебаний в механические требуется для создания различных устройств, например электроакустических головок. Для возбуждения колебаний нанотрубки под действием электрического поля ее закрепляют на одном из двух электродов, на этот раз под углом ко второму электроду. При подаче на электроды электрического напряжения трубка заряжается и за счет электростатического притяжения отклоняется ко второму электроду. Если на электроды подать переменное напряжение, частота которого совпадает с частотой собственных колебаний нанотрубки, зависящих от ее толщины и длины, возникнут механические колебания нанотрубки.

3.4.6. Квантовые провода нанотрубок

Теоретические и экспериментальные исследования электрических и магнитных свойств нанотрубок обнаружили некоторые эффекты, которые указывают на квантовую природу переноса заряда в этих молекулярных проводах и могут быть использованы в электронных устройствах. Проводимость обычного провода обратно пропорциональна его

длине и прямо пропорциональна поперечному сечению, а в случае нанотрубки она не зависит ни от ее длины, ни от ее толщины и равна кванту проводимости $2e^2/h$ (12.9 кОм^{-1}) – предельному значению проводимости, которое отвечает свободному переносу делокализованных электронов по всей длине проводника. При обычной температуре наблюдаемое значение плотности тока (10^7 А·см^{-2}) на два порядка превосходит достигнутую сейчас плотность тока в сверхпроводниках.

Нанотрубка, которая находится при температурах около 1 К в контакте с двумя сверхпроводящими электродами, сама становится сверхпроводником. Этот эффект связан с тем, что куперовские электронные пары, образующиеся в сверхпроводящих электродах, не распадаются при прохождении через нанотрубку.

При низких температурах на металлических нанотрубках наблюдается ступенчатое возрастание тока (квантование проводимости). При увеличении напряжения смещения V , приложенного к нанотрубке: каждый скачок отвечает появлению очередного делокализованного уровня нанотрубки в промежутке между уровнями Ферми катода и анода (см. рис. 3.4а).

Нанотрубки обладают ярко выраженным магнитосопротивлением: электропроводность сильно зависит от индукции магнитного поля. Если приложить внешнее поле в направлении оси нанотрубки, наблюдаются заметные осцилляции электропроводности: колебательный характер зависимости последней от потока магнитной индукции F через нанотрубку объясняется эффектом Аронова – Бома (зависимостью фазы электронной волны от F). В случае перпендикулярной ориентации поля наблюдается возрастание электропроводности, которое отражает модификацию энергетического спектра – образование уровня Ландау в точке пересечения валентной зоны и зоны проводимости, что дает рост плотности состояний на уровне Ферми.

3.4.7. Химическая модификация

Возможности использования нанотрубок в молекулярной электронике неизмеримо возрастают при переходе от чисто углеродных к химически модифицированным нанотрубкам. Например, благодаря наличию

цилиндрической полости внутри углеродных нанотрубок удается внедрить различные элементы, включая тяжелые металлы. Возможно добавление аддендов (например, атомов фтора) на внешнюю поверхность трубки. Кроме углеродных сейчас умеют получать и бор-азотные нанотрубки. Во всех этих случаях должны получаться материалы с новыми и пока еще экспериментально не изученными свойствами. Подобно тому, как в начале 90-х гг. перед квантовой химией стояла задача прогнозирования свойств чисто углеродных нанотрубок (с которой она блестяще справилась, вызвав бурный рост экспериментальных исследований). Теперь требуются расчеты таких, существенно более сложных систем.

3.4.8. Металлизированные нанотрубки

Расчеты металлизированных нанотрубок потребовали разработки нового квантово-химического метода, названного методом линейаризованных присоединенных цилиндрических волн. В этом методе принимается допущение, что система заключена в непроницаемый потенциальный барьер цилиндрической формы. Причем в области атомов элект-

ронный потенциал сферически симметричен (практически совпадает с атомным), а в межатомном пространстве постоянен (рис. 3.6). Тогда электронный спектр системы определяется свободным движением электронов в межатомном пространстве и рассеянием на атомных центрах.

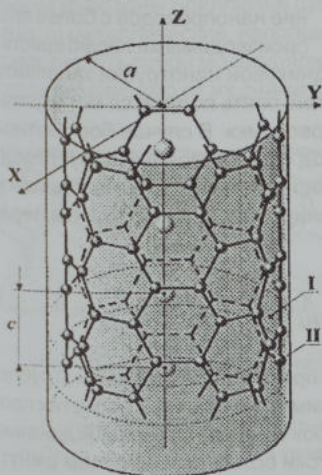


Рис. 3.6. Легированная металлом (цветные шарики) углеродная нанотрубка внутри цилиндрического потенциального барьера: I – область постоянного межатомного потенциала; II – область атомного потенциала (при расчетах атомные сферы считаются касающимися друг друга)

Как показали расчеты, внедрение переходных металлов в углеродные нанотрубки должно вызывать резкое возрастание проводимости как полупроводниковых нанотрубок (за счет появления в запрещенной зоне электронных состояний металла), так и металлических (за счет повышения плотности состояний вблизи уровня Ферми). Все бор-азотные нанотрубки в отличие от углеродных независимо от их геометрии

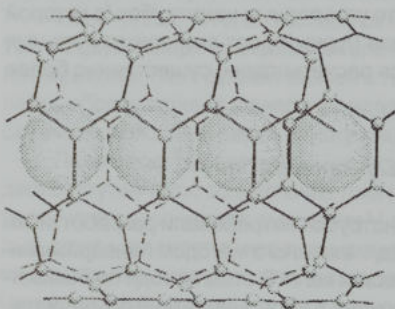


Рис. 3.7.
 $[M \equiv B_{10}N_{10}]_n$

исходно должны быть широкозонными полупроводниками. Внедрение же в них переходных металлов М с образованием структур типа, изображенного на рис. 3.7, должно приводить к формированию металлической зонной структуры в системе. Исходная однотипность электронных свойств бор-азотных нанотрубок может быть полезна в технологическом плане, так как облегчает изготовление нанопроводов с более воспроизводимыми характеристиками.

Если одну половину полупроводниковой нанотрубки заполнить металлом, а вторую оставить нетронутой, опять получится молекулярный гетеропереход «металл – полупроводник». В случае бор-азотной нанотрубки имеет место гетеропереход «широкозонный полупроводник – металл», на основе которого можно конструировать нанодиоды и другие элементы, способные функционировать при высоких температурах.

3.4.9. Нанотрубки с аддендами

Гетеропереход может образоваться и при фторировании нанотрубок. Учет стерических и π -электронных взаимодействий при расчетах полной энергии фторированных нанотрубок показал, что присоединение атомов F с внешней стороны нанотрубки более выгодно, чем с внут-

ренней. При этом атомы фтора должны присоединяться сначала к открытым концам нанотрубок, а затем выстраиваться вдоль образующей. В нанотрубках $F-(n, n)$ и $F-(n, 0)$, достаточно длинных, чтобы можно было пренебречь концевыми эффектами, последний тип присоединения будет основным (рис. 3.8):

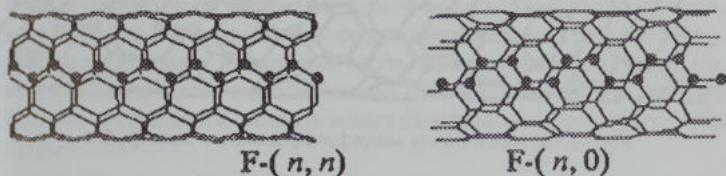


Рис. 3.8. Гетеропереход при фторировании нанотрубок

При добавлении фтора на внешнюю поверхность трубки меняется сетка π -связей, а значит, электрические и другие физические свойства. Как следует из расчетов, все нанотрубки $F-(n, n)$ — полуметаллы, у которых на краю зоны Бриллюэна щель отсутствует и, так как все нанотрубки (n, n) металлические, наполовину фторированные нанотрубки будут представлять собой молекулярные гетеропереходы «металл — полуметалл» независимо от их диаметра (рис. 3.9).

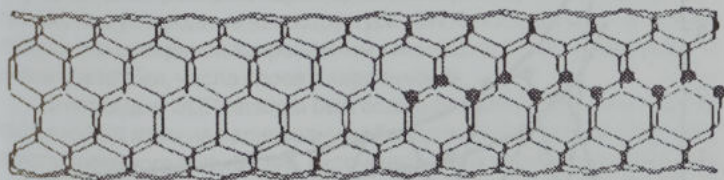


Рис. 3.9. Молекулярные гетеропереходы «металл — полуметалл»

Согласно расчетам, щель запрещенной зоны у нанотрубок типа $F-(n, 0)$ исчезает, если $(n+1)$ кратно 3. В остальных случаях модифици-

рованные трубки – полупроводниковые. Так как в исходных, чисто углеродных нанотрубках $(n, 0)$, запрещенная зона отсутствует, если n кратно 3, то наполовину модифицированные нанотрубки $(n, 0)$ будут

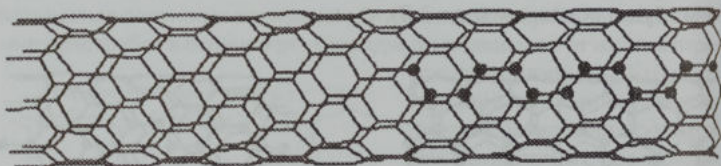


Рис. 3.10. Наполовину модифицированные нанотрубки

зависимости от диаметра, образовывать гетеропереходы различных типов (рис. 3.10). Если $(n - 1)$ кратно 3 ($n = 3l + 1, l = 1, 2, \dots$), это будет гетеропереход «полупроводник – полупроводник». Причем ширина запрещенной щели в модифицированной части трубки примерно в 2 раза меньше, чем в исходной (рис. 3.11). При других значениях n

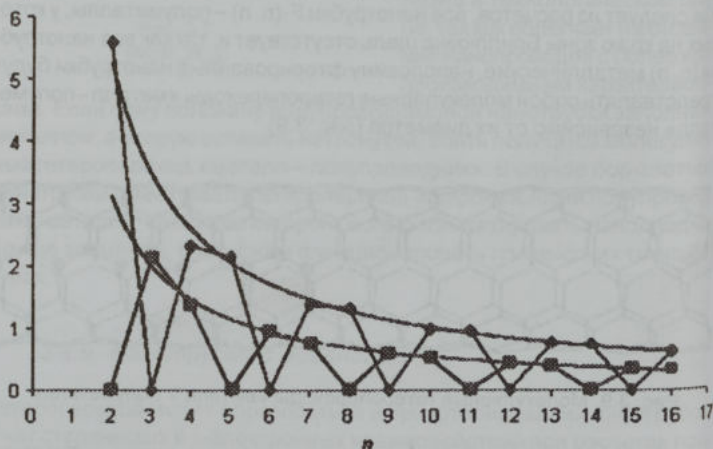


Рис. 3.11. Зависимость ширины запрещенной зоны для исходных и модифицированных нанотрубок типа $(n, 0)$ от параметра их диаметра n :
 —●— — исходные трубки; —■— — модифицированные трубки

образуется гетеропереход «металл – полупроводник», но при n , кратном 3, металлическому концу соответствует немодифицированная часть нанотрубки, а при $n = 3l + 2$ – модифицированная.

Таким образом, путем химической модификации различных участков одной нанотрубки будут создаваться сложные многофункциональные электронные устройства, подобные интегральным схемам современных компьютеров. Можно сказать, что здесь обрела вторую жизнь идея легирования полупроводниковых материалов, породившая современную электронику. Располагая столь перспективным объектом, как нанотрубки, мы имеем все основания в XXI в. с оптимизмом смотреть в будущее технологии и ожидать новых качественных прорывов в этой сфере.

3.4.10. Способы получения нанотрубок

В Нанотехнологическом центре при Northwestern University были выращены наноразмерные трубки, конусы и сферы из нитрида бора (BN). В результате подтвердилось сделанное ранее предположение, что BN наноструктуры крепче и легче стали. Полимеры с введенными в них нанотрубками могут использоваться для упрочнения поверхности металлических изделий и для создания стойких к окислению покрытий. На основе BN наноструктур можно получить очень прочные материалы с лучшими электронными характеристиками, к тому же более технологичные, чем углеродные наноструктуры. BN наноструктуры – это полупроводники с шириной запрещенной зоны около 5,5 эВ независимо от диаметра трубки, числа слоев и хиральности.

С помощью ЭЦР плазмы был осажден слой из BN наноструктур толщиной в 1 атом на полированную беспримесную подложку из поликристаллического вольфрама. Источником бора служил традиционный электронно-лучевой источник испарения, ионами азота обеспечивал компактный ЭЦР источник (Compact ECR source) ф. Astex. Под действием высокой температуры (600 °C) и смещения (~400 В) был выращен BN слой с множеством нанотрубок толщиной в 1 атом, поверхность которого была похожа на шерстяную пряжу. Большой разброс в диаметре этих одностенных нанотрубок (0,5–3 нм), наблюдаемый на

относительно коротких расстояниях, дает возможность создавать конусы и другие заостренные формы. В дальнейшем исследователи планируют осаждать этим же методом наноструктуры из нитрида углерода, которые предположительно будут иметь широкое применение в электронике.

Ученые из компании «Motorola Labs» работают над способами управляемого выращивания нанотрубок (CNT), чтобы сделать транзисторы меньше и быстрее, а химические и биологические сенсоры – ультравысокочувствительными. Одна из технологических сложностей с нанотрубками заключается в управлении размещением на субстрате нанотрубок со специфическими свойствами. Команда исследователей компании создала метод, использующий химическое осаждение паров (CVD), который позволяет позиционировать единичные одностенные нанотрубки в определенные точки на субстрате высокопараллельным способом, совместимым с современными технологиями изготовления полупроводников.

Ученые «Lucent Technologies» синтезировали фуллерены, которые обладают сверхпроводимостью при сравнительно высокой температуре 200 К. Поднять T_c удалось при размещении молекул хлороформа и бромформа среди молекул фуллерена. Производство сверхпроводящих фуллеренов должно быть дешевле СП керамики на основе оксида меди. В настоящее время предпринимаются попытки еще более повысить T_c за счет увеличения расстояния между молекулами фуллерена с помощью других соединений.

В Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова собрана и действует линия по массовому производству фуллерена. Линия имеет ресурс непрерывной работы до 18 ч в сутки. Используется компьютерное управление процессом электродугового испарения на скорости 100-120 г графита в 1 ч. Линия способна производить в месяц до 10 кг фуллереносодержащей сажи, до 10 кг катодного депозита, содержащего многослойные углеродные нанотрубки, до 100 г фуллерена C_{60} чистотой 99,5 %, или 80 г чистотой 99,9 %, и до 10 г C_{70} чистотой 98 %. При этом технология позволяет накапливать значительные количества высших фуллеренов ($C > 76$). Схема работы линии такова: графитовые стержни, прошедшие подготовку и входной анализ, испаряются в атмосфере гелия для получения фуллереносодержащей

сажи. После экстракции фуллеренов в саже остается наноструктурированный углерод. Сама экстракция предусматривает промывку сажи растворителем, фильтрование, сбор и упаривание фильтратов. После отвода технического углерода образуется раствор концентрата C_{70} ($65 \pm 5\%$), доводимый до товарного продукта C_{70} (98%), а также экстракт C_{60} , проходящий дальнейшее фракционное обогащение и хроматографическую очистку в толуоле.

Группе японских учёных удалось при помощи простого оборудования синтезировать углеродные нанотрубки из водки и виски. Успех эксперимента по синтезу нанотрубок из алкоголя показал, что производство ультратонких углеродных трубок, которое сегодня обходится в несколько десятков тыс. йен за 1 г, можно сделать дешевым и массовым. Это уже не первый подобный опыт. В свое время синтезировали из алкогольных напитков алмазы. Электронагреватель и лист никеля поместили в стеклянную бутылку с парами алкоголя. При нагреве приблизительно до 2000°C на листе никеля образовалась сажа, часть которой оказалась углеродными нанотрубками. Затем вместо чистого алкоголя была использована 48-градусная водка и 27-градусный виски. В результате было получено несколько меньшее количество полезного продукта. При использовании растворов с меньшим содержанием алкоголя нанотрубки не образовывались. Химия процесса еще требует объяснения. Однако, по всей вероятности, атомы углерода при нагреве выделяются из алкоголя и во взаимодействии с металлом формируют нанотрубки.

В поисках дешевых массовых методов получения углеродных нанотрубок группа исследователей из американских университетов (штаты Кентукки и Калифорния) обнаружила, что в присутствии металлического катализатора нанотрубки эффективно образуются при горении метана в кислороде. Метан подавался при атмосферном давлении со скоростью $16,3\text{ см/с}$ через горелку из нержавеющей стали диаметром $1,1\text{ см}$ в цилиндрическую стеклянную камеру сгорания диаметром 5 см . Параллельно в эту камеру подавался поток воздуха со скоростью 63 см/с . Это приводило к образованию стабильного ламинарного пламени высотой 65 мм . Образующийся в результате горения осадок собирался на сетку из нержавеющей стали, скрепленную нихромовой проволокой ($60\% \text{ Ni}$, $26\% \text{ Cr}$ и $14\% \text{ Fe}$). В полученном осадке обнару-

жены нанотрубки диаметром 20-60 нм с металлическими частицами на концах, а также углеродные нити диаметром ~120 нм. Интересно, что использование в качестве катализатора только нихромовой проволоки, без сетки из нержавеющей стали, не приводит к образованию нанотрубок. Оптимальная температура процесса – 1500 К, что существенно выше соответствующего значения для образования нанотрубок методом химического осаждения. Отмечается сильная зависимость количества образующихся нанотрубок от концентрации кислорода, температуры и времени нахождения частиц в области оптимальной температуры.

«Zyvex Corporation» анонсировала новые инструментальные средства: Zyvex Dried Film™ (ZDF), Zyvex Microgrippers, Zyvex NanoSharp™ Probes, и программное обеспечение Zyvex MEMulator™ Software.

Zyvex Dried Film™ – новое слово в производстве углеродных наноструктур в больших объемах, убирает все «узкие места» в производстве углеродных нанотрубок, открывая при этом множество вариантов применения. Эта патентованная технология рассеивания и задерживания углеродных нанотрубок в обычных растворах с непревзойденной концентрацией и дисперсией. ZDF растворяется в обычных органических растворах и легко перемешивается с различными материалами, создавая новые композиты. ZDF – это начало серий инноваций на рынке наноматериалов. Zyvex разрабатывает успешные конкурентоспособные продукты для коммерциализации нанотехнологий.

Zyvex Microgrippers и NanoSharp™ Probes – новейшие представители семейства Zyvex в области микро- и наноманипуляторов, которые характеризуются гибкостью, эффективностью, блочным исполнением, которое совместимо со сканирующей электронной микроскопией (SEM), трансмиссионными электронными микроскопами (TEM), системами ионно-лучевого фокусирования (FIB), и оптическими микроскопами. Коммерчески успешный продукт Zyvex-S100 Nanomanipulator System разработан с системой модульной замены носителей образца и структуры внутри устройства. Используя наноманипулятор совместно с инструментом NanoEffector™, можно получить экспериментальную станцию для исследования мезо-, микро-, нано-, или молекулярных структур. Патентованный инструмент Zyvex microgripper – активная микромашина кремниевая структура для

микро- и наноисследований. Рабочий инструмент захвата (tip) размерами 50 мк, что позволяет манипулировать микрокомпонентами размером от 500 до 1 мк. Zyvex NanoSharp Probes позволяет облегчить исследования и разработку электрических и механических систем на наноуровне. Непосредственные пробы дают возможность исследователям манипулировать одностенными и многостенными нанотрубками и наночастицами. Инструмент Zyvex NanoSharp Probes имеет радиус зонда (tip radius) менее 10 нм. С учетом в разработках НЭМС Zyvex's S100 Nanomanipulator System, инструмент NanoSharp probes может быть использован для изучения электрических характеристик места соединения двух нанотрубок. Вся продукция Zyvex направлена на обеспечение гибкого, автоматизированного производства на микро- и наноуровне.

3.4.11. Долгий путь открытий: нанотрубки

Сколько времени обычно проходит от крупного научного открытия до его практического применения? Считается, что рекорд оперативности принадлежит нейлону, изобретённому в корпорации «DuPont» в 1935 г. Уже через 3 года стали выпускаться зубные щетки, щетина которых была сделана из этого материала, а спустя ещё 2 года в продаже появились нейлоновые чулки. Но это скорее исключение из правил [14].

Высокотемпературную сверхпроводимость Йоханнес Беднорц и Карл Мюллер, работавшие в Цюрихской лаборатории IBM, обнаружили ещё в 1986 г. Важность этого открытия, обещавшего революцию во всех областях, которые связаны с электричеством, была осознана очень быстро. Нобелевскую премию по физике им присудили уже на следующий год, в полном соответствии с завещанием Нобеля, требующим отмечать научные достижения прошлого года.

Чаще же проходит не одно десятилетие, прежде чем научная общественность, отбирающая лауреатов, оценит работу по достоинству. Несмотря на титанические усилия, потраченные за прошедшие годы на освоение высокотемпературной сверхпроводимости, её механизмы изучены не до конца, а практические приложения немногочисленны.

Углеродные нанотрубки (а это один из самых популярных и многообещающих объектов исследований нанотехнологов) были открыты в 1991 г. Однако до сих пор об их широком коммерческом применении остаётся только мечтать. Проблема в том, что получить достаточно чистые нанотрубки без примесей очень трудно. Кроме того, всегда образуется сложная смесь из трубок разного размера и структуры, которую тяжело использовать. Причем всё больше возникает опасений, что углеродные нанообъекты могут быть крайне опасны для здоровья. То, что нанотрубки, подобно асбестовым волокнам, способны поражать лёгкие, уже установлено в опытах на мышах. Наночастицы в принципе могут вызывать рак и генетические мутации. Учёные до сих пор не знают, как нанообъекты воздействуют на людей и окружающую среду или как их влияние зависит от длительности контакта и концентрации наночастиц. Пока в этих вопросах нет согласия, и даже отсутствует общепринятая терминология. Что уж говорить о законодательном регулировании рынка. Хотя уже сейчас в США зарегистрировано около 1 тыс. потребительских продуктов, которые якобы используют нанотехнологии. Среди них есть теннисные ракетки, носки и даже кетчуп. Правда, имеются серьёзные подозрения, что утверждения о применении нанотехнологий при их производстве не более чем маркетинговый ход для привлечения внимания покупателей.

Однако есть и прямо противоположные результаты. Например, учёные из Арканзасского университета в Литл-Роке утверждают, что присутствие углеродных нанотрубок в почве способствует быстрому прорастанию семян томатов и дальнейшему росту растений. Так, во время опыта треть семян в почве с нанотрубками взошла спустя 3 дня после посадки: гораздо быстрее, чем на контрольной грядке. Спустя 4 недели растения в земле с нанотрубками были вдвое выше и имели вдвое большую биомассу. Учёные объясняют это тем, что углеродные нанотрубки прокалывают оболочку семени, способствуя доступу в него воды. Однако оппоненты, хотя и не подвергают сомнению результаты экспериментов, весьма скептически относятся к объяснению механизма действия углеродных нанотрубок на семена.

Ещё одно достижение, связанное с нанотехнологиями: команде учёных, координируемой из университета Райса (г. Хьюстон), удалось подобрать хороший растворитель для однослойных углеродных на-

нотрубок — им оказалась хлорсульфоновая кислота. Благодаря ей с нанотрубками можно работать как с обычным пластиком, получая высококачественные волокна, листы и другие изделия из жидкой фазы по отлаженному техпроцессу. В агрессивной хлорсульфоновой кислоте однослойные углеродные нанотрубки спонтанно растворяются в весовой концентрации полпроцента, что в тысячу раз лучше, чем при воздействии других растворителей. При более высокой концентрации нанотрубки в кислоте ведут себя, как жидкие кристаллы, что позволяет получать из них прочные, хорошо проводящие нити.

Такие нити из сплетенных нанотрубок легче и в перспективе прочнее стальных. По мере совершенствования технологии производства нитей из нанотрубок они смогут обогнать по прочности и кевларовые, из которых, например, изготавливают бронежилеты. И теперь дело вроде бы за малым — научиться получать однослойные углеродные нанотрубки определенного размера и структуры в промышленных масштабах. Однако история показывает, что этот процесс может растянуться на долгие годы...

А вот в Гарвардском университете пока не стремятся к массовому производству. Зато там научились «гнуть» нановолокна из кремния, германия и сульфида кадмия, поворачивая рост волокон на нужный угол. Операцию можно проделать, неоднократно варьируя длину прямых участков. Подобные гнутые волокна могут пригодиться в наноэлектронике, фотодетекторах, сенсорах и других приложениях.

Новая теория объясняет природу загадочной самосборки нанотрубок. Новый виток в концепции объяснения принципов образования углеродных наноструктур сформирован учеными из университета Райса: они показали, что в большинстве известных наноматериалов на основе углеродных нанотрубок структура формируется подобно тончайшей ткани, сплетаемой из закрученных углеродных нитей.

Углеродные нанотрубки — это полые наноструктуры, построенные исключительно из атомов углерода и имеющие нанометровые диаметры. Если изобразить схему расположения атомов в них, то становится видна их спиральная организация. Подобно намотанной проволоке или полоскам оберточной бумаги, на конце нанотрубки есть выступающий излишек материала, расположенный под углом «плетения».

В рамках новой теории предполагается, что нанотрубки «сотканы» из закрученных углеродных нитей. Хотя углеродные нанотрубки

служат объектом пристального внимания ученых и довольно хорошо изучены, природа их роста еще не нашла полного объяснения. Принято говорить о самосборке этих структур в процессе осаждения из газовой фазы при жестких условиях и в присутствии катализаторов. Рассматривается взаимосвязь между углом хиральности (степенью закручивания воображаемых нитей, построенных из атомов углерода) и скоростью роста нанотрубок. В рамках новой теории предполагается, что нанотрубки «сотканы» из закрученных углеродных нитей, каждая из которых растет независимо, присоединяя новые атомы к своему свободному концу: чем больше нитей, тем быстрее растет нанотрубка.

Предсказания такой формулировки механизма роста нанотрубок появлялись и ранее в многочисленных работах, анализирующих лабораторные наблюдения. Например, согласно новой теории нанотрубки с большим углом хиральности должны расти значительно быстрее, поскольку они образованы большим количеством нитей, что подтверждено несколькими экспериментами.

Хиральность – это одно из основных свойств нанотрубок. Разработанный подход количественно связывает хиральность возникающей структуры и скорость ее образования, тем самым демонстрируя роль этого фактора. Это наблюдение должно заинтересовать всех, кто занимается разработкой новых технологий, основанных на нанотрубках».

3.5. Наноремни – новый тип наноструктур

Специалисты Georgia Institute of Technology (Атланта) создали новый тип наноструктур, который может использоваться в недорогих неprecизионных сверхминиатюрных датчиках, плоских дисплеях и других электронаноприборах. Получившие название «наноремни», эти тонкие плоские ленточного типа структуры с прямоугольным сечением изготавливаются на основе прозрачных оксидов металлов: цинка, олова, индия, кадмия и галлия. По мнению их создателей, наноремни обладают убедительным преимуществом перед нанопроволокой и углеродными нанотрубками. Новые структуры химически чистые, однородные,

почти бездефектные. Однородность структуры наноремней является одним из условий, обеспечивающих массовое производство наноэлектронных и оптоэлектронных приборов.

Для изготовления наноремней порошок оксида металла помещается в центре трубки из оксида алюминия. Протекающий через трубку аргон или азот нагревает трубку до 1100-1400 °С. Порошок испаряется, оседает на Al_2O_3 подложке, вынесенной в более холодный участок печи, и отвердевает. Будучи оксидами, наноремни не требуют к себе повышенного внимания в виде очистки или специальной технологической обработки, например для защиты от окисления. Поскольку наноремни обладают гибкой структурой, их можно сгибать на 180 град., не ломая их. Ширина наноремней 30-300 нм, толщина 10-15 нм, длина – до сотен и даже может быть до нескольких тысяч мкм. Наноремни не обладают структурной прочностью цилиндрических углеродных нанотрубок. Зато однородность их структур очень важна в электронных и оптоэлектронных устройствах, а бездефектность снимает проблему, от которой страдают структуры типа нанопроволок: в них дефекты могут уничтожить квантово-механические транспортные свойства.

Дальнейшие исследования должны определить оптические, электрические и поверхностные характеристики наноремней.

3.6. Нанотороиды

Ученые из University of Bielefeld (Германия) и Brookhaven National Laboratory (США) открыли новый тип дырчатых сферических везикул. Эти структуры состоят из самособирающихся полиоксимолибдатовых анионных нанотороидов. До сегодняшнего времени эти типы везикул обнаруживались благодаря гидрофобным эффектам, а в данном случае мы имеем реверс – гидрофобные структуры.

Отрицательно заряженные нанотороиды, состоящие из 152 или 154 атомов молибдена, самособираются в сферические везикулы радиусом около 45 нм. Расчеты показывают, что везикулы состоят из 1165 отдельных нанотороидов. Если же нанотороиды располагаются на поверхности в гексагональном порядке, то везикулы будут иметь радиус около 49 нм. Значит, нанотороиды в везикуле не соприкасают-

ся. Было обнаружено, что они могут изменять размер везикул, изменяя pH раствора, добавляя электролиты или используя раствор с низкой поляризацией. Сами же нанотороиды характеризуются большими магнитными моментами.

По результатам исследований видно, что на основе нановезикул можно получить материалы с большим магнитным моментом, и узнать гораздо больше о структурных характеристиках водных кластеров, благодаря которым образуются везикулы.

Исследователи Georgia Institute of Technology разработали новый класс наноразмерных структур, которые спонтанно формируют наноструны из отдельных кристаллов оксида цинка (ZnO), подобных длинным лентам. Названные «нанопружинами» новые структуры с пьезоэлектрическими и электростатическими свойствами, найдут применение в микросенсорах и микросистемах. Нанопружинки имеют ширину 10-60 нм, толщину 5-20 нм и длину в несколько миллиметров – новые структуры еще меньше, чем «нанопояса», о которых ученые Georgia Tech сообщали в журнале «Science».

В университете Мичигана создана нанолипучка. С помощью нановолокна, разработанного американскими исследователями, можно скреплять предметы друг с другом прочнее, чем самым сильным клеем. Этот материал многократного использования покрыт углеродными трубочками с крючками на конце (каждый длиной всего несколько нанометров) и может соединять компоненты сверхмаленьких роботов. По расчетам ученых, новый материал держит в 30 раз надежнее, чем обычные эпоксидные клеи. Он соединяет большинство твердых веществ настолько прочно, что сами материалы разрушаются раньше, чем разделяются крючочки. Ученые рассчитали, что 2 крючка в принципе способны распрямиться достаточно, чтобы их можно было расцепить – если тянуть достаточно сильно. Однако после этого они возвращаются в прежнее положение и при повторном контакте друг с другом снова соединяются. К сожалению, пока никто не знает, как выращивать нанокрючки в промышленных масштабах. Первые крючки были сделаны еще около 10 лет назад и некоторым исследователям удавалось выращивать целые леса, но пока никто не смог поставить это дело на поток.

3.7. Уникальные новые материалы

3.7.1. Сверхпрочные материалы

Связи между атомами углерода в графитовом листе являются самыми сильными среди известных, поэтому бездефектные углеродные трубки на 2 порядка прочнее стали и приблизительно в 4 раза легче стали (!) Одна из важнейших задач технологии в области новых углеродных материалов заключается в создании нанотрубок «бесконечной» длины. Из таких трубок можно изготавливать легкие композитные материалы предельной прочности для нужд техники нового века. Это силовые элементы мостов и строений, несущие конструкции компактных летательных аппаратов, элементы турбин, силовые блоки двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и т. п. В настоящее время научились изготавливать трубки длиной в десятки микрон при диаметре порядка одного нанометра.

3.7.2. Высокопроводящие материалы

Известно, что в кристаллическом графите проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных материалов и, напротив, в направлении, перпендикулярном листу, мала. Поэтому ожидается, что электрические кабели, сделанные из нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электропроводность на 2 порядка выше, чем медные кабели. Дело за технологией, позволяющей производить трубки достаточной длины и в достаточном количестве.

3.7.3. Нанокластеры

К множеству нанообъектов относятся сверхмалые частицы, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях, для разделения газовых смесей и хранения газов.

3.7.4. Магнитные кластеры

Кластеры состоят из атомов переходных металлов, лантаноидов, актиноидов и обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля. Примером является высокоспиновая металлоорганическая молекула $\text{Mn}_{12}\text{O}_{12}(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4$. Эта изящная конструкция состоит из 4-х ионов Mn^{4+} со спином $3/2$, расположенных в вершинах тетраэдра, 8 ионов Mn^{3+} со спином 2, окружающих этот тетраэдр. Взаимодействие между ионами марганца осуществляется ионами кислорода. Антиферромагнитные взаимодействия спинов ионов Mn^{4+} и Mn^{3+} приводят к полному, достаточно большому спину, который равен 10. Ацетатные группы и молекулы воды отделяют кластеры Mn_{12} друг от друга в молекулярном кристалле. Взаимодействие кластеров в кристалле чрезвычайно мало.

Наномагниты представляют интерес при проектировании процессоров для квантовых компьютеров. Кроме того, при исследовании этой квантовой системы обнаружены явления бистабильности и гистерезиса. Если учесть, что расстояние между молекулами составляет около 10 нм, то плотность памяти в такой системе может быть порядка 10 гигабайт на 1 см^2 .

3.8. Хемосенсорные наноматериалы

Одно из перспективных направлений нанотехнологии связано с разработкой способов получения наноматериалов за счет их последовательной самосборки «снизу вверх» из молекул и наночастиц. Такой способ получения наноматериалов позволяет получать наноматериалы с заданными свойствами. Исследования Центра фотохимии РАН сосредоточены на данном направлении и связаны с созданием научных основ технологии получения наноматериалов для устройств фотоники на гибкой основе: люминесцентных хемосенсорных наноматериалов и органических наноматериалов для светодиодов.

В последние годы исследования и разработки института концентрируются в основном на создании люминесцентных хемосенсорных наноматериалов. Большое разнообразие летучих химических веществ, ко-

торое необходимо контролировать в окружающей среде, ставит перед разработчиками задачу получения хемосенсорных материалов различного назначения по единой технологии. Один из подходов к решению подобной задачи состоит в использовании материалов особой архитектуры, а именно многомасштабных иерархических наноматериалов.

- Институтом разработаны методы получения экспериментальных образцов и развиты методы компьютерного многомасштабного конструирования иерархических люминесцентных хемосенсорных наноматериалов. Материалы представляют собой ансамбль плотно упакованных полимерных или силикатных микро- или наночастиц, поверхность которых модифицирована молекулярными или супрамолекулярными центрами флуоресценции и связывания летучих химических соединений. В основу экспериментального получения материалов, так и их компьютерного виртуального конструирования положен подход к созданию хемосенсорных материалов «снизу вверх».

- Процесс получения хемосенсорных материалов включает последовательные стадии синтеза микро- или наночастиц, формирования центров люминесценции и центров связывания аналитов на поверхности частиц, получения за счет самоорганизации модифицированных микро- или наночастиц ансамблей частиц – элементов матричных сенсоров (хемочипов).

Комплекс программ компьютерного проектирования сенсорных наноматериалов построен по модульному принципу и включает модули конструирования молекул, супрамолекул, наночастиц и ансамблей наноструктур (структурные модули). Кроме того, комплекс содержит также модули расчета физико-химических свойств супрамолекул, наночастиц и ансамблей наночастиц (оптических свойств, констант связывания рецепторными центрами молекул аналитов, параметров процессов диффузии и адсорбции на микроструктурах и т. д.).

- Разработаны люминесцентные хемосенсорные наноматериалы для регистрации ацетона, аммиака, спирта и т. д., а также лабораторные образцы малогабаритного прибора для контроля летучих химических веществ. Задача, которую предстоит решить, связана с созданием люминесцентных хемосенсорных чипов и программ обработки сигнала отклика хемочипа на аналиты, позволяющих осуществлять количественный анализ смесей летучих химических веществ [15].

4. НАНОУСТРОЙСТВА

Нанотрубки могут составлять основу новых конструкций плоских акустических систем и плоских дисплеев, т. е. привычных макроскопических приборов. Из наноматериалов могут быть созданы определенные наноустройства, например нанодвигатели, наноманипуляторы, молекулярные насосы, высокоплотная память, элементы механизмов нанороботов. Кратко остановимся на моделях некоторых наноустройств.

Нанопинцет общего назначения, использующий пару электрически управляемых углеродных нанотрубок, сконструирован исследователями Гарвардского университета. С помощью этого механизма удастся манипулировать 300-нанометровыми кластерами полистироловых микросфер или извлекать единственный 20-нанометровый полупроводниковый провод из массы аналогичных перепутанных проводов. В ближайшем будущем ученые надеются создать столь малый нанопинцет, способный захватывать отдельные крупные молекулы. Но вот удастся ли с помощью подобных инструментов пойти дальше и начать создавать недорогие молекулярные машины? Пока уверенного ответа на этот вопрос нет.

Нанотермометры, способные измерять температуры до 1000 °С. Наполнив одну из форм оксида магния жидким галлием, можно получить устройства размером 20-60 нм, которые предполагается использовать для мониторинга состояния наноустройств.

Наносенсор. Ученым из Калифорнийского университета (UCLA) удалось создать биохимический сенсор, состоящий из одной молекулы длиной в 20 нм — в тысячу раз тоньше человеческого волоса. Главное предназначение такого сенсора — опеределение заданной последовательности молекул ДНК или РНК в растворе. Когда молекула-сенсор реагирует (связывается) с нужной молекулой, она меняет свою форму и положение (притягивается к молекуле-объекту). Это отслеживается с помощью так называемой технологии рассеивания исчезающих малых волн (evanescent wave scattering), применяющейся также в томографии.

Новый вид сенсоров может найти применение в биотехнологии и медицине для диагностики генетических заболеваний, при тестировании новых лекарств или даже в военной области, например, для выявления активных агентов биологического оружия. В ближайших планах UCLA – использовать наносенсор для диагностики лейкемии на более ранней стадии, чем это возможно сегодня. Разработка наносенсора может стать первым шагом в создании биохимических «лабораторий», помещающихся на одном чипе. Финансирование работ по созданию наносенсора осуществлялось из Национального фонда научных исследований США.

Нановесы. Единичные углеродные нанотрубки, созданные еще в 1991 г., продолжают интенсивно изучаться, причем находят все более широкое применение в нанотехнике и микроэлектронике. Речь идет о полых трубках диаметром 3-10 нм и длиной 2-4 мкм, стенки которых имеют очень прочную гексагональную структуру из атомов углерода.

Сотрудники Технологического института штата Джорджия (Атланта, США) провели цикл исследований электромеханических свойств нанотрубок. К углеродному волокну, «сплетенному» из нанотрубок, присоединяется золотая проволока. Вся конструкция крепится на специальном держателе и располагается на расстоянии 5-20 мкм от внешнего электрода. Подача переменного напряжения между проволокой и электродом заставляет нанотрубку вибрировать. Контроль за её поведением производится электронным микроскопом. Это позволяло наблюдать трубку и манипулировать ею как обычным предметом на рабочем столе.

На частотах от сотен кГц до единиц МГц трубки начинают резонировать. Причем линии механического резонанса у всех трубок очень узкие и строго индивидуальны в зависимости от их толщины, длины, плотности и упругих свойств. Это позволило исследовать трубки независимо друг от друга.

Наиболее важным механическим свойством нанотрубок оказалась их аномальная упругость: высокие значения изгибной жесткости в очень большом диапазоне деформаций. При подаче постоянного напряжения между электродами и проволокой трубки сгибались под углом до 90°, но полностью восстанавливали свою форму после снятия напряжения. Установлено также, что коэффициент упругости материала, фор-

мирующего стенку нанотрубки, зависит от ее диаметра, что кардинально отличает этот материал от всех известных, коэффициент упругости которых не связан с их геометрическими размерами.

Одним из результатов проведенного исследования стало практическое использование выдающихся свойств нанотрубок для измерения массы частиц крайне малых размеров. При размещении взвешиваемой частицы на конце нанотрубки резонансная частота уменьшается. Если нанотрубка калибрована (т.е. известна ее упругость), можно по смещению резонансной частоты определить массу частицы. Более точных методов измерения массы предельно малых объектов, чем нановесы, пока еще нет. Исследователи полагают, что таким образом можно взвешивать вирусы, помещая их на кончике нанотрубки.

Исследователи из California Institute of Technology разработали дешевый метод производства наноканалов для наножидкостных систем. Наноканалы – важнейший компонент в наножидкостных системах. Методы производства наноканалов должны соответствовать следующим требованиям: низкая стоимость, высокая точность и возможность интеграции в микроэлектронику. Самый простой метод производства наноканалов – с помощью электронно-лучевой литографии. Однако этот метод слишком дорогостоящ, поэтому возник вопрос о разработке более дешевых методов производства наноканалов. Для формирования наноканалов к кремниевому субстрату добавили слой размером 100 нм из аморфного кремния. Толщина этого слоя и определяет глубину наноканала. Исследователи использовали фотолитографию для формирования длины и формы наноканала, удаляя порции аморфного кремния реактивным ионным травлением, а затем оксидированием при температуре 1000 °С. Толщина полученного оксидного слоя (в данном эксперименте 50 нм) образовывала ширину наноканала. На практике установлено, что минимально возможная толщина наноканала составляет 5 нм.

Следующим шагом в исследованиях будет травление 500 нм слоя из аморфного кремния. Это наиболее длинный набор параллельных наноканалов, из всех полученных на сегодняшний день – 1 см длиной и менее 50 нм в диаметре. Также полученные наноканалы были очень гладкие (аморфный кремний гидрофобен), что не составит проблем для свободного протекания через них жидкости. Ученые планируют исполь-

зовать наноканалы для отделения молекул друг от друга по их физическим размерам. Одно из главнейших преимуществ этой технологии в том, что большое количество наноканалов разной толщины могут быть получены на одном субстрате, причем совсем недорого. Благодаря этому можно отделять различные по размерам молекулы друг от друга. Ученые пытаются пропустить через наноканалы квантовые точки, чтобы изучить механизм протекания жидкостей внутри наноканала.

Датчик наноперемещений (США), позволяющий зарегистрировать изменение положения объекта на тысячные доли нанометра. Датчик состоит из наноэлектромеханической перемишки и одноэлектронного транзистора. В устройствах такого типа механический элемент перемещается под действием внешнего воздействия, а высокочувствительный детектор позволяет измерить его перемещение. Область применения устройства – везде, где требуется ультравысокая точность, например, магниторезонансная микроскопия. Если удастся повысить его чувствительность в 100 раз, у ученых появится возможность непосредственной регистрации квантовых эффектов в макросистемах.

В соответствии с квантово-механическим принципом неопределенности невозможно одновременно измерить и положение, и скорость (точнее, импульс) микрочастицы. Таким образом устанавливается фундаментальное ограничение на точность любых измерений макрообъектов. Правда, достигнуть этих теоретических границ в непосредственных измерениях до последнего времени было невозможно из-за отсутствия приборов с требуемой точностью. Точность наноэлектромеханических устройств уже достаточна для проведения подобных измерений.

Удалось создать работающее устройство, в котором механический элемент представляет собой брусок из арсенида галлия, закрепленный с обоих концов. Длина бруска – 3 мк, ширина – 250 нм, толщина – 200 нм. Расположен он в 250 нм от одноэлектронного транзистора, представляющего собой детектор перемещения. Брусок и транзистор соединены электрически через емкость. При приложении внешнего напряжения брусок начинает вибрировать. При его перемещении относительно детектора ток, протекающий через транзистор, изменяется. Одноэлектронный транзистор, по словам изобретателей, представляет собой лучший из существующих детекторов заряда, и имеет чрезвычай-

чайно высокую чувствительность. Измерение тока, протекающего через транзистор, позволяет определить частоту колебаний бруска. В настоящее время ученые работают над тем, чтобы приспособить созданное устройство для измерения квантовых эффектов в макрообъектах.

Пауков отправят на общественные работы – создавать оптическое волокно. То, что паучьи волокна намного крепче металлических нитей такой же толщины – известно давно. Другое дело, что практического применения им никак найти не могут, поскольку пауки производят их довольно мало. Но вот, кажется, придумали использовать эти волокна для создания оптического волокна – сверхтонкого.

Зачем оно нужно? Наличие сверхтонких волокон позволит передавать сигналы (лучи света, то есть) в нанометровых оптических схемах. Компьютеры, в которых обмен данными между различными частями будет происходить со скоростью света, являются компьютерами «предельного класса». До таких компьютеров, впрочем, пока ещё очень далеко. А вот до технологий сверхтонкого оптоволоконного – близко.

Берётся паучья нить длиной в 1 см и обмакивается в раствор ортосиликата тетраэтила. Затем, когда раствор высыхает, его обжигают при температуре 420 °С. Паучья нить выгорает, а образовавшаяся трубка сжимается в целых 5 раз. В результате возникает полая трубка толщиной всего в 1 мк.

В качестве поставщика паучьего сырья учёные использовали гигантского мадагаскарского паука-кругопряда. Надо сказать, что его нити довольно-таки толстые. Обычными методами можно получить гораздо более тонкие оптические волокна – в 25 нм (1 мк равен одной тысячной доле мм, 1 нм – это одна миллионная мм). Но команда ученых собирается освоить технологию создания оптоволоконных нитей толщиной всего в 2 нм. Каким образом? Для этого им просто понадобится другой паук. В качестве кандидата рассматривается *Stegodyphus pacificus* – крошечный общественный паучок, плетущий волокна толщиной всего 10 нм.

После обжига, силикатные трубки, сделанные с помощью нитей *Stegodyphus*, «похудеют» в 5 раз – и вот вам обещанные 2 нм.

Физик Филипп Рассел, сотрудник университета г. Бат (Великобритания), – тот самый, что предложил использовать оптическое волокно в телекоммуникационной области, пришёл в восхищение от просто-

ты и дешевизны предложенного способа. Больше того, по мнению Рассела, благодаря этой технологии можно будет создавать крошечные сенсоры, использующие свойства «супрамолекулярных» химических процессов, происходящих с веществами, когда те оказываются замкнутыми в очень тесном пространстве. В таких ситуациях скорость протекания химической реакции значительно повышается, да и протекают они иначе.

В этой области часто используются пресловутые углеродные нанотрубки, но диапазон их форм, размеров и текстур не слишком велик. Новая технология позволит изменить это положение.

Химик Кристофер Вайни, сотрудник эдинбургского университета Heriot Watt, полагает, что столь тонкие волокна можно использовать для создания более совершенных зондов в ближнепольных микроскопах. Такие используются биологами при попытке рассмотреть наиболее микроскопические особенности того или иного объекта — меньшие, чем длина световой волны. В настоящее время в таких микроскопах используются «линзы» из оптических волокон, полученных из сверхтонких стеклянных трубок. Но они всё равно довольно широки — 100 нм. Обещанные 2 нм обеспечат куда большую точность. Новый тип полого волокна пригоден не только для передачи данных в оптических сетях. Его можно использовать при изготовлении нанопробирок для исследования химических процессов, протекающих в наносистемах. В настоящее время для этих целей применяются углеродные нанотрубки. Однако в некоторых случаях требуются наноматериалы с иными свойствами.

Другой сферой применения волокон на базе паутины может стать микроскопия. С помощью подобных волокон можно создать микроскопы для наблюдения за объектами, размеры которых меньше длины волны света. Важно, что при наблюдении в такой микроскоп не происходит повреждения образца, как в случае электронной микроскопии. Такая особенность может очень пригодиться биологам.

5. НАНОСИСТЕМЫ

Современный образ «большой» системы – это её целевая многофункциональность, наукоёмкость, гетерогенность привлекаемых средств и производств, способность к саморазвитию, модифицируемость, выживаемость в течение длительного срока (годы, десятки лет), перепрограммируемость, адаптивность к техническому и социальному прогрессу, делимость, способность к реконфигурации и живучесть в нестандартных режимах и в условиях деградации подсистем.

Микросистемная техника представлена в настоящее время интегрируемыми устройствами микроэлектромеханики и ассимилирует технологические достижения микроэлектроники. Изделия микросистемной техники (микросистемы) применяются не только как компоненты электронной аппаратуры, но и как подсистемы (биочипы) для биологии. Микросистемы – это трансфер новейших (не только микроэлектронных) технологий, позволяющий производить огромное разнообразие видов и форм продукции, в том числе изделий «двойного» (т. е. народнохозяйственного и специального) применения.

Несомненно, микросистемная техника, развиваемая в дальнейшем на основе наноиндустрии, приобретёт все перечисленные выше качества «большой» системы и позволит ей продуцировать изделия с уменьшенным количеством разнородных деталей и технологических операций. Уменьшение числа деталей и технологических операций в микросистемной технике – это проекция основной тенденции микроэлектроники, т. е. интеграции компонентов в аппаратуре и «вертикальной» интеграции процессов её создания (с помощью развитых средств информатики).

Особенность микросистемной техники заключается в структурном и технологическом объединении электронной составляющей микросистемы с её микромеханическими, оптическими, акустическими и т. п. составляющими. Иными словами, микросистемы «интегрируют» гетерогенность, присущую любой «большой» системе. Поэтому микросистемная техника естественным образом примыкает к нанотехнике как к перспективной технологической, структурной и научной основе.

5.1. Нанотехнологические процессы

Все варианты нанотехнологий основаны на локальном, с точностью до нанометра и даже до отдельного атома, управлении атомно-молекулярными реакциями. Эта возможность, появившаяся вследствие прогресса зондовой микроскопии, позволяет преодолеть ограничения методов литографии (по разрешающей способности или высокоэнергетичности). Нанотехника использует частицы с энергией, необходимой для активации технологических процессов. Значения этой энергии существенно ниже величин, требуемых для фокусировки частиц.

Нанотехнологические реакции могут происходить в вакууме, газе или в жидкости. Тип реакций не всегда связан с типом среды в камере и может зависеть от других условий (электрического поля, давления, температуры, энерговыделения, свойств веществ). Такие свойства (дипольный момент, наличие примесей, капиллярного эффекта и т. д.) определяют характер протекающих реакций. Дополнительные воздействия

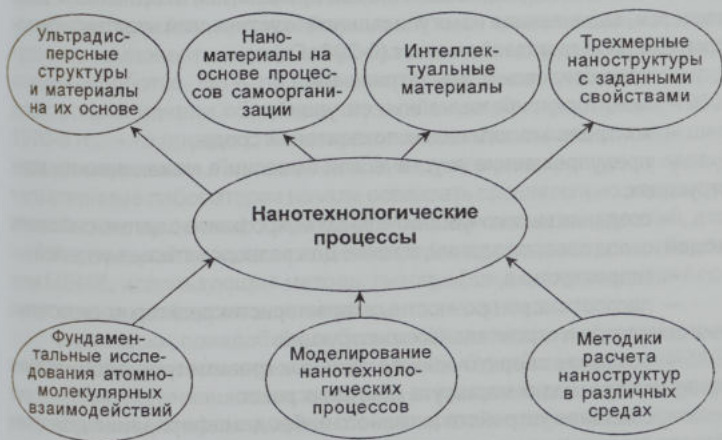


Рис. 5.1. Пример реальной наномикросистемы («суперухо»)

(например, когерентное лазерное облучение с программно-управляемой длиной волны) могут радикально изменять ход и даже направление химических реакций. Эти возможности (управляемый катализ) в сочетании с перечисленными выше вариантами подбора материалов и условий проведения нанотехнологических процессов – делают нанотехнологию самостоятельной и даже изодрённой областью науки и промышленности XXI в. Неотъемлемой частью этой сферы знаний является математическое моделирование нанопроцессов, связанное с такими новыми направлениями, как вычислительная химия, вычислительная физика и вычислительная биология.

Интеграция на общей кремниевой подложке наносенсора, построенного с применением кремниевой электромеханики, электронного блока (пикоамперметра с порогами для опознавания туннельного тока и акустических перегрузок и цепи регулирования величины туннельного зазора) позволяет создать сверхбольшую наноинтегральную микросистему туннельного датчика, допускающую дальнейшую интеграцию (или совместимую) с портативными персональными компьютерами, работающими на платформе Windows.

Отметим следующие возможные применения этого класса микросистем, вытекающие из их уникальной акустической чувствительности в широком диапазоне частот (0-200 кГц):

- прогнозирование землетрясений,
- мониторинг чрезвычайных ситуаций,
- контроль экологических показателей среды,
- предупреждение акустической эмиссии в механических конструкциях,
- создание высокочувствительных микрофонов с целью спасения людей из-под завалов зданий, а также для разведовательных целей,
- гидроакустика,
- паспортизация прочностных характеристик реакторов, летательных аппаратов и строительных конструкций,
- создание сверхточных туннельных гравиметров с точностью 10-9g для прокладки маршрута крылатых ракет,
- создание устройств активного вибродемпфирования для стабилизация стрелкового оружия, размещаемого на возимых и летательных аппаратах и т. д.

- мониторинг конструкций (трубопроводов, оболочек реакторов, зданий), хранящихся боезарядов и геомагнитных явлений (землетрясений, извержений вулканов);
- комплексный индивидуальный медицинский контроль и локация внутренних органов человека.

6. НАНОМЕХАНИКА

6.1. MEMS-технологии и мини-роботы «Сандиа»

Многие эксперты склонны отсчитывать историю микротехнологий от знаменитой лекции Нобелевского лауреата Ричарда Фейнмана, прочитанной им в 1959 г. перед Американским физическим обществом. Богатейшая фантазия Фейнмана и талант визионера позволили ему обрисовать потенциал микротехнологий в самых ярких красках: в его лекции были и крошечные компьютеры, и системы хранения данных, электронные компоненты и даже микроскопический инструментарий миниатюрных роботов. Но если пророчества Фейнмана в области микроэлектроники начали обрастать плотью очень быстро – уже в 1960-1970-е гг., – то прогресс в электромеханических микросистемах шел гораздо медленнее. Лишь в 1980-е гг. ведущие университеты и правительственные лаборатории начали осваивать сравнительно недорогие способы изготовления и сборки крошечных механических деталей, для чего была разработана технология микроэлектромеханических систем, или MEMS, использующая методы литографии и инструментарий полупроводниковой промышленности.

Фактически, понадобилось больше 30 лет на то, чтобы появилось первое коммерческое приложение MEMS. Одной из первых MEMS-технологий, получивших повсеместное распространение, стали сенсоры ускорения, устанавливаемые сейчас практически во все современные автомобили для детектирования столкновения и выпуска защитных воздушных подушек. Массачусетская компания «Analog Devices»,

изготовившая первые такие сенсоры в 1993 г., сейчас продает автобильстроителям около 50 млн MEMS-чипов в год. Есть и еще целый ряд успешных MEMS-изделий, таких, как головки микроструйных принтеров или сенсоры давления, которые компания «Motorola» сотнями миллионов поставляет медицинской и автомобильной промышленности. Или, скажем, цифровые проекторы высокого разрешения Texas Instruments, построенные на основе MEMS-массивов микрозеркал. За последние годы удалось достичь заметных успехов в изготовлении моторов, насосов и зажимов, сенсоров давления и смещения, т. е. множество самых разных по назначению механических агрегатов, настолько малых, что их не видно невооруженным глазом. Однако запустить подобные продукты в массовое производство оказалось гораздо труднее, чем полагали оптимисты.

Сейчас самой перспективной областью внедрения MEMS принято считать телекоммуникации. Так, в конце 2000 г. от Национальной лаборатории «Сандиа», принадлежащей министерству энергетики США, отпочковалась частная компания MEMX, занимающаяся вопросами коммерческого применения создаваемых в лаборатории MEMS-технологий. Компания сфокусировалась в своей деятельности на оптических коммутаторах для оптоволоконных телекоммуникационных систем. В их основу положена фирменная технология «Сандиа» под названием SUMMIT V. Это микромашинный процесс обработки поверхности чипа напылением и травлением, охватывающий 5 независимых слоев поликристаллического кремния, 4 «механических» слоя для построения механизмов и 1 электрический для обеспечения межсоединений электросхемы. Технология позволяет доводить размеры механических элементов до 1 мкм.

Опыт, накопленный разработчиками «Сандиа» в миниатюризации электромеханических систем помог создать и весьма эффективных микроскопических роботов. Построенная в середине 1990-х гг. модель автономного робота MARV имела объем около 1 кубического дюйма, хотя робот почти целиком был изготовлен из коммерчески доступных компонентов. К 2000 г. его размеры удалось уменьшить в 4 с лишним раза. Эта крошечная машина на гусеничном ходу имеет полимерный каркас, 6 колес, 2 электромотора, процессор с 8 Кбайт памяти, датчик температуры, микрофон, видеокамеру, химический сенсор и 3 бата-

рейки от часов. Надо сказать, именно бытовые элементы питания помешали сделать устройство еще миниатюрнее. Машины планируется оборудовать системой беспроводной связи. Затем группа микророботов сможет объединяться для совместного решения задач под управлением центрального компьютера. По замыслу разработчиков, основной областью применения таких роботов может стать поиск и обезвреживание бомб и мин, опасных биологических и химических материалов. Благодаря малым размерам и высокой проходимости микророботы очень перспективны для решения разведывательных задач. Однако емкость современных батарей катастрофически мала, ее хватает лишь на преодоление десятка метров.

Исследователям из Нью-Йоркского университета, избравшим «подход самосбора» [16], удалось научиться генерировать комплементарные нити ДНК, которые объединяются в сложные структуры желаемой конфигурации. Так были выстроены кубы, восьмигранники и другие правильные фигуры, состоящие всего из нескольких тысяч нуклеотидов. Избрав аналогичный подход, ученые Корнельского университета генетически модифицировали природный биомотор, в естественных условиях встречающийся в ферменте аденозинтрифосфатазе (ATPase). В результате был изготовлен первый гибридный наномотор с небιологическими элементами из 100-нанометровых полос азотистого кремния. Подобно микроскопическому пропеллеру, он вращается со скоростью 200 оборотов в минуту.

Как показывают предварительные оценки, механические системы в конечном счете смогут обеспечить более высокие скорости работы и большую эффективность управления нанороботом, нежели системы биологические. Однако важным преимуществом последних является то, что зачастую их функциональные компоненты можно частично или целиком брать из уже имеющихся естественных живых систем, тем самым существенно сокращая время разработки конкретной технологии.

В июне 2001 г. нанотехнологов ждал новый прорыв. Роботы размером с рисовое зерно созданы Казуши Ишиямой из японского Tohuku University. Этими машинками, имеющими внутри цилиндрические магниты длиной 8 мм и диаметром менее 1 мм, можно управлять с помощью электромагнитного поля, под воздействием которого роботы вкру-

чиваются туда, куда надо вкрутиться. Ишияма разработал два прототипа — для жидкой и для плотной среды. Результаты первых испытаний обнадеживают: робот для жидкости успешно передвигался в емкости, заполненной силиконом, а «плотный» робот оказался в состоянии проходить сквозь двухсантиметровый бифштекс. Одно из устройств оснастили металлическим шипом: предполагается, что, нагреваясь, он будет разрушать раковые клетки. Вводить в вены такую машинку можно через обычную иглу.

Разработка в перспективе может оказаться намного эффективнее используемых сейчас катетеров. Если удастся сконструировать еще более миниатюрные устройства, они смогут проникнуть и в самые мелкие, а потому пока недоступные сосуды, находящиеся, например, в головном мозге. Впрочем, ни в какие сосуды новые роботы еще не вводили. Их использование в хирургических операциях — дело неблизкого будущего. Остается масса проблем: прежде всего специалисты опасаются, как бы эти машинки не застряли где-нибудь внутри.

На экранах компьютеров в конструкторских бюро уже возникают узлы будущих наномашин. Здесь показан редуктор для наноробота, который, по мысли изобретателей, будет вводиться в кровь и очищать сосуды от отложений холестерина. Деталь имеет размеры молекулы белка. Уже существует деталь для такого же устройства в металле. Микрофреза для очистки стенок сосудов изготовлена немецкими инженерами. Поверхность самолетных крыльев, чтобы самолет мог разворачиваться чуть ли не на месте, должна быть покрыта откидывающимися чешуйками в форме квадрата, сторона которого — 1 мм.

Сверхминиатюрный дисплей компьютера изготовила американская фирма «Колорадо Майкро Дисплей». На экран размерами 9,6x7,2 мм выводится цветное изображение наивысшего компьютерного стандарта SVGA, четкость изображения — 800 на 600 элементов. Экран, встроенный в карманный компьютер, рассматривается через увеличительный окуляр и, по словам изготовителя, утомляет зрение лишь чуть больше, чем обычный большой дисплей.

6.2. Электромеханическая система нанометрового масштаба

Ученые из Калифорнийского университета в Беркли и Национальной лаборатории им. Лоуренса создали действующую механическую систему, позволяющую вращать прямоугольную металлическую пластинку, насаженную на нанотрубку.

Нанометровые электромеханические приводы и моторы обладают огромным потенциалом. Многие разработчики микроэлектромеханических систем, так называемых MEMS, были бы очень рады использовать наноподшипники, наномоторы и наноприводы в своих системах более крупного порядка – ведь они сталкиваются с проблемой отсутствия высококачественных материалов с низкой силой трения, способных эффективно работать в таком масштабе.

Компоненты разработанного в Беркли устройства интегрированы в кремниевый чип. Вал ротора, каковым является нанотрубка, расположен между двумя электропроводящими опорами. Пластина самого ротора окружена тремя жестко закрепленными электродами – статорами. Прикладывая напряжение до 5 В между ротором и статорами, можно регулировать положение роторной пластинки, так же как и скорость и направление вращения пластины. При этом нанотрубка служит одновременно валом и проводником тока для подачи потенциала на ротор. Для снижения трения на валу и обеспечения возможности вращения ротора на все 360 град. внешняя поверхность нанотрубки была предварительно «отполирована и выпрямлена». Поэтому между ней и статором было приложено очень большое напряжение – около 80 В (при этом поверхностный слой нанотрубки был удален).

Эти наноустройства имеют многочисленные преимущества перед молекулярными моторами, уже известными в биологии. Несмотря на чрезвычайно интересные механизмы, использованные природой при создании различного рода линейных и ротационных молекулярных моторов (т. е. моторов наномасштабов), таких, как кинезин, АТФ-синтаза, флагеллярные моторы у бактерий, применение этих механизмов очень узкоспецифично. Они не могут работать в широком диапазоне температур, нуждаются в водной среде со строго определенным химическим составом и к тому же работают очень медленно – пределом

для них являются килогерцовые частоты. В то же время механические наномоторы вполне могли бы работать, по мнению создателей, при температурах от криогенных до сотен градусов Цельсия, в вакууме и жидких средах, а также в очень широком диапазоне частот — от нескольких герц до сотен мегагерц. Несмотря на то, что в некоторых видах приложений биомоторы кажутся более предпочтительными, механические наномоторы позволят значительно расширить сферу применения наноустройств. Пластина ротора может служить, например, зеркалом для оптических переключателей, либо может использоваться для перемешивания жидкостей.

6.2.1. Молекулярные шестерни и насосы

Модели наноустройств предложены К. Е. Drexler и R. Merkle из IMM (Institute for Molecular Manufacturing, Palo Alto) [17, 18]. Валами шестеренок в коробке передач являются углеродные нанотрубки, а зубцами служат молекулы бензола. Характерные частоты вращения шестеренок составляют несколько десятков гигагерц. Устройства «работают» либо в глубоком вакууме, либо в инертной среде при комнатной температуре. Инертные газы используются для «охлаждения» устройства.

6.2.2. Строительная бактерия

На конференции по био-, микро- и наносистемам в Нью-Йорке ученые представили «строительную бактерию», с помощью которой можно будет создавать сверхминиатюрные устройства, к примеру, микроскопическую электропроводку.

Специалисты в области нанотехнологий пытаются научиться перемещать и устанавливать в нужном порядке объекты в масштабах, сравнимых с размером отдельных молекул. На их пути — масса препятствий. К примеру, огромная сила трения не позволяет перекачивать жидкости, а текущие жидкости не перемешиваются друг с другом.

Последнюю задачу, по мнению Л. Тернер из института Роуланда в Гарварде, можно решить с помощью нитеобразных отростков бактерий. Если нанести пленку из бактерий вида *Serratia marcescens* на

крошечные бусинки, то благодаря вращающимся отросткам бактерий бусинки перемещаются. Если поместить их в микроскопические трубки, отростки позволят перемешивать жидкости в 2 раза эффективнее, чем с помощью одной лишь диффузии. Теперь г-жа Тернер надеется заставить бактерии перемещать бусинку в нужном направлении под действием светового излучения или химических препаратов. Это, например, могло бы позволить перемещать жидкости по микроскопическим каналам. Ученые считают, что бактерии – это идеальные труженики наномира, адаптированные к его условиям и весьма необычным законам.

6.2.3. Разделение наночастиц

В университете штата Вашингтон (г. Сиэтл) заинтересовались способностью бактерий прикрепляться к поверхностям. Ее группа показала, что протеин FimH, находящийся на кончиках фимбрий бактерии *Escherichia Coli*, позволяет бактериям крепко привязываться друг к другу. Если отсоединить крошечные отростки с бактерии и прикрепить их к двум наборам миниатюрных бусинок (в одном из них бусинки были в 2 раза меньшего диаметра, чем в другом), и «выплеснуть» их на поверхность, то поскольку сдвиговое усилие у больших бусинок больше, чем у малых, их отростки сцепляются друг с другом и склеиваются. В то время как маленькие бусинки свободно перемещаются по поверхности. Исследователи намерены использовать это свойство для разделения по размерам как бактерий, так и других микро- и наночастиц.

6.3. Молекулярные двигатели для нанотехники

Для разрабатываемых сейчас микроскопических устройств, которые смогут, например, проплывать по кровеносным сосудам человека и очищать их стенки от отложений холестерина, нужны уж совершенно микроскопические двигатели – размером с молекулу. В поисках таких моторов исследователи обращаются к биологии. Ведь давно известны белковые двигатели, размещающиеся в живой клетке. В качестве горючего эти двигатели используют химическое топливо всего живого –

аденозинтрифосфорную кислоту (АТФ). Их действием обеспечивается перенос в клетку разных веществ, работа мышц, они используются даже при копировании ДНК.

Для создания «моторчика» ученые обратились к одному из «силачей» клетки – ферменту АТФазе. Это комплекс из нескольких белков, которые, действуя совместно, производят АТФ. Выглядит он, как цилиндр диаметром 12 нм и такой же высоты. Его строение очень сложно. Он состоит из 6 белков, собранных вокруг единой оси. АТФаза превращает движение протонов внутри энергетической станции клетки – митохондрии – в механическое вращение оси. Это движение помогает образовать АТФ. Причем действие АТФазы обратимо: если на этот цилиндрический моторчик подавать АТФ, он будет «сжигать» ее, и ось придет во вращение. Японские биохимики впервые смогли заснять это движение. Для этого к концу оси прикрепили флуоресцирующую молекулу, подали в нанодвигатель АТФ и под микроскопом увидели, как вокруг цилиндрика стала вращаться светящаяся точка. Основываясь на числе оборотов, которое можно получить от определенного количества АТФ, исследователи заключили, что КПД этого двигателя близок к 100 %, это существенно выше, чем у всех двигателей, изобретенных человеком. Если бы этот двигатель был размером с человека, он мог бы вращать деревянный столб длиной около 2 км со скоростью 1 об./с.

Этот результат вдохновил ученых из Корнелльского университета на попытку использования нанодвигателя АТФазы для вращения пусть не длиннейшего столба, но какого-нибудь микроскопического объекта. Методами геной инженерии они изменили белки АТФазы: приклеили наномоторчик к покровному стеклу микроскопа, и наклеили на вращающуюся ось микроскопический пластмассовый шарик. К основанию двигателя добавили аминокислотную последовательность с участием гистидина, которая хорошо клеится к металлу. На покровном стекле напылили несколько островков из никеля поперечником примерно по 40 нм. Когда затем на стекло нанесли каплю с взвешенными в ней нанодвигателями, их основания приклеились к никелю, и цилиндрики встали вертикально. К верхнему концу центральной оси моторчиков добавили аминокислоту цистин, а шарики из пластмассы покрыли биотином. Цистин соединился с биотином, и каждый нанодвигатель оказался присоединенным к шарiku. Добавив в каплю АТФ, исследовате-

ли увидели под микроскопом, что шарики вращаются вокруг оси микродвигателя. Вращение продолжалось более 2-х ч, пока не иссяк запас АТФ.

Конечно, вращающиеся шарики еще довольно далеки от нанороботов, которые будут приводиться в движение биологическими моторчиками. Но работы продолжаются и экспериментаторы намерены заменить шарики намагниченными стерженьками. Это позволит точно измерить мощность нанодвигателей. Приложив внешнее магнитное поле и увеличив его, определить, при какой напряженности поля вращение прекратится. Кроме того, моторчики с магнитным ротором превратятся в генераторы электрического тока, который можно будет использовать, например, для перемещения лекарств через мембраны клеток в организме в имплантируемых микронасосах для лекарств. Но это только начало. Можно придумать бесчисленное множество случаев применения для нанодвигателей.

В. Фогель из университета в Сизтле то же самое говорит о созданном в ее лаборатории линейном нанодвигателе. Он выложен на предметном стекле микроскопа из молекулярных двигателей, которые могут передавать, так сказать, из рук в руки тончайшую трубочку. Этот двигатель основан на одной из транспортных систем живой клетки. Он сложен из микротрубочек, состоящих из молекул белка, называемого тубулин, и нанодвигателей, состоящих из другого белка – кинезина. В клетке кинезиновые двигатели, словно вагонетки, бегают по микротрубочкам от одного конца до другого, перевозя молекулы белков и липидов. В эксперименте процесс обратили: закрепили нанодвигатели на поверхности стекла и заставили их передавать от одного двигателя к другому микротрубочки. Биохимики, изучающие кинезиновые двигатели, уже делали такие опыты, но двигатели были разбросаны на поверхности стекла беспорядочно. Когда в каплю с ними добавляли АТФ, кинезиновые моторы начинали вразнобой двигать трубочки во всех направлениях. В лаборатории Фогель моторы расставил рядами. Предметное стекло микроскопа потерли кусочком политетрафторэтилена (тефлона). В результате на стекле остались линейные, цепочкообразные молекулы этого полимера, выстроенные в одном направлении. Получилось нечто вроде «грядок». Когда на стекло капнули раствор с кинезиновыми белками, они уселись в бороздки между «грядками». Затем

внесли немного микротрубочек, покрашенных флуоресцирующим соединением. После этого в каплю добавили АТФ, и здесь служащую горючим. Под микроскопом было видно, как закрепленные рядами наномоторчики передают друг другу по прямой микротрубочки. В будущем эта техника может стать основой для изготовления конвейеров на сборочных линиях наноустройств.

В этих опытах измерена сила тяги одной молекулы кинезина. Она способна развивать силу в пять-шесть пиконьютонов, что примерно равно давлению, оказываемому светом лазерной указки на экран. В масштабах клетки это очень большая сила, она способна согнуть пополам довольно жесткую микротрубочку.

6.3.1. Молекулярный двигатель на основе ДНК

13 января 1999 г. CNN сообщила о построении группой исследователей Надриана Симана молекулярного двигателя на основе ДНК. Размер сгибающегося по команде механизма шарнирного типа составляет 4 десятитысячных толщины человеческого волоса. Устройство изготовлено при помощи соединения 2-х двойных спиралей ДНК посредством ДНК-моста. При подаче определенного химического сигнала часть этой структуры изгибается. Группа работает над тем, чтобы управлять несколькими парами молекул автономно, без воздействия на другие. Таким образом, будут запрограммированы молекулы ДНК, чтобы они могли в заданном порядке самоорганизоваться и объединяться с другими молекулами в более крупную структуру.

В процессе исследований учёные внедрились искусственные нити ДНК в индивидуальные пары молекул. Затем они развернули парные перекрещивающиеся молекулы вполоборота и, удалив обе искусственные нити, заменили их новыми «set strands». Тем самым они изменили конфигурацию ДНК-машины. Созданная учёными ДНК-машина имеет 2 своеобразные «руки» — молекулы, которыми исследователи вроде бы научились управлять, но что-либо сделать, например добавить в раствор определённый химикат, устройство не способно: пока раствор воздействует на все молекулы одновременно и равномерно, т. е. «достаётся и нашим, и вашим».

Пока удалось лишь ограничить движение ДНК-устройства в молекулярной среде, но в будущем нанороботы станут полностью управляемыми машинами. Пока не известно, способен ли подобный механизм передавать нагрузку. Продемонстрировано лишь то, что при движении правильно выдерживаются исходное и конечное положение. Что происходит в промежутке между ними, неизвестно. Ученые надеются использовать это открытие и в случае неудач смогут внести изменения, которые сделают конструкцию более полезной.

Молекулярные двигатели уже разработаны, но инженеры из штата Юта предложили новый подход: использовать бактериальные клетки для преобразования теплового движения атомов в механическую энергию поступательного движения микроробота. Благодаря малости бактериального источника энергии размеры такого плавучего устройства можно будет уменьшить всего до нескольких микронов. А на следующем этапе исследователи намерены приспособить для движения своего робота одни лишь флагеллы с их броуновскими моторами, без бактерий. В таком случае, по предварительным расчетам, размеры биомотора можно будет снизить до 100 нм и менее. Продолжительность его работы будет определяться продолжительностью жизни бактерий или флагелл, использованных для его перемещения, и авторы надеются довести этот срок службы до 1 ч и более. Фирма «Reneissance Technologies» из штата Кентукки уже объявила, что первый прототип такого микробиоробота размером в 1 мм будет выпущен на рынок.

7. НАНОЭЛЕКТРОНИКА

7.1. Нанокomпьютерные технологии

Один из наиболее амбициозных проектов компании «Nantero» разработка NRAM – чип высокой плотности записи данных с использованием нанотехнологии. Цель – создать универсальную память, которая

сможет вытеснить все существующие типы памяти, такие, как DRAM, SRAM и флэш-память. NRAM сможет конкурировать по скорости с SRAM, по плотности – с DRAM, будет так же надежна, как флэш-память, потребляя при этом даже меньше энергии. Был закрыт очередной раунд инвестиций DFJ, составивший 10,5 млн дол. Рынок устройств хранения данных в целом составляет почти 100 млрд. дол., из которых примерно половину занимают DRAM, SRAM и флэш-технологии. «Nantero» разработан CMOS-совместимый процесс производства NRAM, позволяющий сделать ее производство возможным на любой полупроводниковой фабрике без существенных затрат на приобретение нового оборудования.

К 2010 г. 1 млрд. персональных компьютеров и 2,5 млрд. портативных устройств по мощности примерно равных Pentium-4, будут объединены в глобальную сеть. Также «Intel» планирует интегрировать графические чипы в процессоры для повышения производительности компьютеров. Это становится возможным с внедрением нанотехнологии в производство микропроцессоров. Организованы локальные рабочие группы в Китае, Индии и Южной Америке для создания новых разновидностей персональных компьютеров для рынков с низкой платежеспособностью. Сбыт персональных компьютеров на этих рынках будет расти быстрее, чем в Северной Америке и Европе.

7.1.1. Золотые чипы

В университете Райса (Хьюстон, штат Техас) удалось создать молекулярный модуль электронной памяти, размер которого измеряется нанометрами. Это устройство состоит из частиц золота на пластине из двуокиси кремния, помещенной в раствор с органическими молекулами и золотыми нанопроводниками. Компоненты модуля расположены случайным образом. По словам ученых, им впервые удалось продемонстрировать, что упорядоченное расположение элементов схемы не является необходимым условием для создания чипов.

Калифорнийским ученым удалось создать логические цепи из нанопроводников. Молекулярные электронные схемы, позволяющие значительно уменьшить размеры и энергопотребление компьютеров.

являются одной из альтернатив традиционной кремниевой технологии. Их разработкой занимаются крупнейшие хайтек-компании. Одна из них – «Hewlett-Packard» – рассчитывает изготовить чип, который может реально использоваться в электронике. Ученые из University of Wisconsin продемонстрировали технологию, которая может позволить электронным устройствам собираться автоматически и самостоятельно, открывая производителям полупроводников путь к массовому производству высококачественных и недорогих наночипов с элементами шириной в несколько молекул, примерно в 10 раз меньшими, чем в современных чипах. Только для устройств хранения данных это может означать компьютер с 4 Тб памяти.

7.1.2. Нанокольца преобразят компьютерную память

Новые исследования в области нанотехнологий открывают перспективы создания более быстрой и более емкой компьютерной памяти. При этом цена ее останется весьма приемлемой. В американском университете Пердью изобрели неожиданно простой и дешевый способ повышения емкости твердотельной памяти. Им удалось разработать технологию создания крошечных магнитных колец из микрочастиц кобальта. Кольца, диаметр которых намного меньше 100 нм, позволяют хранить информацию при комнатной температуре. И что самое главное – подобные кольца образуются из намагниченных частичек кобальта сами собой, в процессе самосборки.

Магнитные диполи, ответственные за образование наноколец, образуют коллективное магнитное состояние, известное как «замыкание потока». При этом в самом нанокольце существует мощное магнитное поле, в то время как результирующее магнитное поле за его пределами равно нулю. Нанокольца стабильны при комнатной температуре. Поскольку магнитное поле в них может иметь два состояния (быть направлено либо по часовой стрелке, либо против), нанокольца можно использовать для хранения информации. Проведенные исследования подтвердили, что состояние магнитных наноколец можно менять под действием внешнего магнитного поля. Считывать информацию (определять состояние замкнутого потока) можно с помощью электронной

голографии. Благодаря тому, что магнитный поток замкнут в объеме нанокольца, удается снизить наводки, а также уровень ошибок.

Специалисты фирмы «Motorola Inc.» разработали технологию изготовления фотшаблонов для использования в фотолитографии в спектре экстремального УФ (EUV). EUV технология позволяет массовое изготовление компьютерных кристаллов с плотностью упаковки, на 50 % превышающую достигнутый на сегодня уровень. С помощью EUV процесса можно получать даже линии шириной 13 нм.

Ученые из немецкого Института физики микроструктур им. Макса Планка создали новый метод производства кремниевых нанокристаллов, которые используются для нужд оптоэлектроники и устройств хранения информации. До недавнего времени для изготовления светодиодов и подобных им устройств применяли арсенид галлия, фосфид иридия и другие подобные соединения. Однако несколько лет назад выяснилось, что для подобных целей подходит кремний — основное сырье при производстве микросхем. Дело в том, что у кремния на макро- и наноуровне различные оптические свойства. Это означает, что кремниевая пластинка с многочисленными нанопорами может светиться точно так же, как пластинка из арсенида галлия. Использование кремния в оптоэлектронике выгодно прежде всего из-за дешевизны и доступности этого материала, а также из-за возможности производить излучающие устройства и чипы на одной подложке.

7.1.3. Алмазная память для компьютеров

Модель высокоплотной памяти разработана Ch. Bauschlicher и R. Merkle из NASA [19]. Схема устройства проста и состоит из зонда и алмазной поверхности. Зонд представляет собой углеродную нанотрубку (9, 0) или (5, 5), заканчивающуюся полусферой C_{60} , к которой крепится молекула C_5H_5N . Алмазная поверхность покрывается монослоем атомов водорода. Некоторые атомы водорода замещаются атомами фтора. При сканировании зонда вдоль алмазной поверхности, покрытой монослоем адсорбата, молекула C_5H_5N , согласно квантовым моделям, способна отличить адсорбированный атом фтора от адсорбированного атома водорода. Поскольку на 1 см^2 поверхности помещается около 10^{15} атомов, то плотность записи может достигать 100 терабайт на 1 см^2 .

Приведенные выше примеры результатов лабораторного эксперимента и моделей наноустройств являются новым вызовом теории, вычислительной физики, химии и математики. Требуется осмысление «увиденного» и «полученного», а также выработка интуиции для работы в нанометровом диапазоне размеров.

В Калифорнийском университете создан нанопровод из двух материалов, которые ранее не удавалось совместить. Ученый П. Янг вырастил нанопровод диаметром менее 100 нм как кристалл, формируя его структуру поочередным добавлением кремниево-германиевых и кремниевых сегментов. По словам президента компании «Nanosys Inc.», которая лицензировала данную технологию, эти два материала невозможно соединить традиционными методами, используемыми в производстве полупроводников. Полученный в результате «скрещивания» провод обладает лучшими свойствами обоих материалов и способен обеспечивать точное управление электрическим током, излучать свет и даже хранить данные. Кроме того, этот провод можно использовать для нагревания или охлаждения устройств. Ожидается, что он будет применяться в производстве миниатюрных оптических и электронных устройств.

29 января 1999 г. исследовательская группа Чикагского Северо-Западного университета (Northwestern University) опубликовала метод, названный ими dip-pin lithography, позволяющий чертить линии шириной в несколько атомов на поверхности золота. В июне 2000 г. они представили на суд публики 8-перьевой наноплоттер способный создавать 8 идентичных изображений молекулярными чернилами с точностью рисунка до 1 молекулы и шириной линии 30 молекул.

Исследователи из University of Minnesota, US использовали наноксерографию для печати шаблона наночастиц на заряженных поверхностях с разрешением 100 нм. Использовались техники синтеза в растворах для сборки частиц железа, оксида железа и углерода и техники синтеза в газах для присоединения золотых и серебряных наночастиц. Цель – разработать технологию «прямой самосборки», которая позволит производить параллельное позиционирование наночастиц с высокой скоростью. Преимущество наноксерографии – позиционирование любых наночастиц, способных переносить заряды. Наноксерография использует электростатические силы для позиционирования за-

ряженных наночастиц на желаемую поверхность. Для того чтобы создать локальные участки электростатического заряда, использовали гибкие текстурированные электроды, которые контактируют с тонким слоем электрета, нанесенного на кремниевой поверхности. При подаче напряжения на электроды электрет локально заряжается. Затем полученная заряженная поверхность помещается в ультразвуковую ванну, добавляются в раствор наночастицы, которые за считанные секунды располагаются на местах, нанесенных электростатическим шаблоном.

Процесс помещения локального заряда на поверхности используется в ксероксной технике и лазерных принтерах, поэтому новый метод назван наноксерографией. Синтез в газовом окружении происходил методами испарения и конденсации. Раствор наночастиц испаряется в трубе в окружении азота. Далее 2 электрода производят электромагнитное поле, заряжая частицы так, чтобы они «прилипли» к искомой поверхности. Таким образом, удалось нанести слой золотых и серебряных наночастиц. В результате была продемонстрирована текстура площадью 5x5 мм. Разрешение при использовании синтеза в газах было 100 нм, синтез в растворах дал разрешение 200 нм. Причем эти величины в 500-1000 раз лучше аналогичных, используемых в обычных ксероксах. Таким образом, можно ожидать развития в будущем технологий позиционирования, позволяющих изготавливать наномашинны путем присоединения частицы за частицей на определенные места в течение короткого промежутка времени.

7.1.4. IBM, разрушая, создают элементную базу на углеродных нанотрубках

Специалисты IBM Watson Research Center разработали процесс изготовления транзисторных матриц на основе полупроводниковых углеродных нанотрубок. Процесс замечателен тем, что в нем использован принцип групповой обработки нанотрубок, а не индивидуальной, как это делается в других исследовательских лабораториях. Как известно, нанотрубки в зависимости от размера и формы могут быть металлического или полупроводникового типа. Продуктом всех методов осаждения

дения является смесь из металлических и полупроводниковых нанотрубок, склеенных в пучки, жгуты, тросики и пр. Это, естественно, мешает использованию нанотрубок в качестве транзисторов. Чтобы отделить полупроводниковые нанотрубки от металлических, ученые IBM и придумали процесс, названный ими «конструктивное разрушение». Весь процесс разбит на 5 основных стадий:

- Осаждение из газовой фазы пучков из металлических и полупроводниковых нанотрубок на подложку из оксида кремния.
- Формирование электродов (металлических контактных площадок) на нанотрубках с помощью литографической маски.
- При подаче на электроды напряжения электроды работают в ключевом режиме, включая или выключая (блокируя прохождение тока) полупроводниковые нанотрубки.
- Напряжение, приложенное к пластине (она также задействована в качестве электрода), обрушивает на металлические нанотрубки ударную электрическую волну, разрушая их. В результате на пластине остаются неповрежденные полупроводниковые нанотрубки – транзисторы, пригодные для создания логических схем.

Повторно используя метод ударной электрической волны, исследователи удаляют отдельные углеродные оболочки с многостенных нанотрубок, чтобы получить трубки с электрическими свойствами, необходимыми для схем. Например, чтобы изготавливать ПТ с нужной энергетической щелью. Планируется завершить разработку нового процесса и установить, какие характеристики можно получить с определенной степенью гарантии от пластин с полупроводниковыми нанотрубками. Если окажется, что с помощью процесса «созидательного разрушения» получаются нанотрубные транзисторы с лучшими параметрами, чем у нынешних кремниевых транзисторов, тогда закон Мура пролонгируется в область размеров в 500 раз меньших, так как именно во столько раз нанотрубки меньше кремниевого транзистора.

7.2. Спинтроника

До последнего времени спин электрона игнорировался в электронных изделиях массового потребления. Хотя есть подозрение, что спиновая

степень свободы электрона, поставленная на службу схемотехники, значительно повысит функциональные возможности и рабочие характеристики электронных изделий от близкосрочных, типа энергонезависимых, сверхскоростных, сверхплотных оперативных запоминающих устройств (ЗУ), до дальнесрочных – таких, как квантовые компьютеры, понятные лишь посвященным. Сейчас использование эффекта гигантского магнитного сопротивления (ГМС), в котором всем заправляют спины, в винчестерах с ГМС считывающими головками – это лишь верхушка айсберга богатых возможностей новой области спинтроники. А ведь потребовалось 10 лет с открытия ГМС эффекта, чтобы это открытие созрело до практического использования.

ГМС прибор состоит из чередующихся слоев ферромагнетиков и немагнитных металлов. Если магнитные моменты ферромагнитных слоев ориентированы в одном направлении, прибор имеет очень низкое сопротивление. И наоборот, если магнитные моменты смотрят в разные стороны, тогда сопротивление прибора большое. Направление тока в приборе может быть перпендикулярно или параллельно границам раздела. В обоих случаях изменение сопротивления может быть довольно большим и управляться относительной ориентацией моментов 2-х магнитных слоев. Фирма «Non-Volatile Electronics Inc.» (NVE) – небольшая высокотехнологичная компания разработала целый ряд датчиков, переключателей и изоляторов на основе ГМС многослойных приборов. Чрезвычайно низкая стоимость и малое энергопотребление обеспечивают высокую конкурентоспособность этим приборам. Так, рабочие параметры ГМС изоляторов могут быть лучше, чем у оптических аналогов при более низкой стоимости.

Специалисты из Naval Research Lab. (NRL), NVE и Honeywell убеждены, что магнитные ЗУ на основе ГМС приборов могут состязаться с традиционными полупроводниковыми ЗУ в плотности интеграции, скорости и стоимости, обладая к тому же энэргонезависимостью и терпимостью к чрезвычайным условиям.

В совместном проекте NRL и DARPA одной из целей является разработка и демонстрация 16 Кбит энергонезависимого радиационно стойкого магнитного оперативного ЗУ (МОЗУ) с временем выборки не более 100 нс. К проекту подключились «Motorola» и IBM, а также академические и лабораторные организации. Одной из причин высокого

интереса к МОЗУ является весьма благоприятное для этих ЗУ сравнение с другими энергонезависимыми ЗУ типа флэш и энергозависимыми типа динамические оперативные запоминающие устройства ДОЗУ и статические оперативные запоминающие устройства СОЗУ. В табл. 7.1 представлены характеристики основных полупроводниковых ЗУ, которые, по прогнозу SIA, можно ожидать в 2012 г., и потенциальные характеристики МОЗУ.

Таблица 7.1

Сравнение ЗУ технологий

Технология	КМОП	СОЗУ	МОЗУ	
ДОЗУ	Флэш			
Ссылка	SIA 1997	SIA 1997	SIA 1997	
Скорость	150 МГц	150 МГц	913 МГц	750 МГц
Топология	50 нм	50 нм	35 нм	50 нм
Время выборки	10 нс	10 нс	1,1 нс	< 2 нс
Время записи	10 нс	10 мкс	-	< 10 нс
Время стирания	< 1 нс	10 мкс	-	-
Время хранения	2-4 с	10 лет	-	Бесконечно
Циклы перезаписи	Бесконечно	105	Бесконечно	Бесконечно
Рабочее напряжение В	0,5-0,6 Vdd	5 Vpp	0,6-0,5 Vdd	< 1 В
Напряжение переключения	0,2 В	5 В	-	< 50 мВ
Размер ячеек	0,0005 мкм ²	0,0004 мкм ²	-	0,0004 мкм ²

Фирмы «Motorola» и IBM разрабатывают ЗУ на основе туннельного прибора, в котором немагнитный металл заменен на диэлектрический туннельный барьер. Преимущество такого туннельного магниторезистивного прибора – очень большое эффективное магниторезистивное отношение (более 40 %), но критическим местом конструкции является очень тонкий слой диэлектрика (10-15 Å), однородность которого должна сохраняться на площади в несколько десятков см². В соответствии с проектом DARPA планируется через несколько лет на примере 1 Мбит ЗУ продемонстрировать более совершенные прототипы ЗУ.

Не только приборы памяти, но и многие другие традиционные полупроводниковые приборы могут улучшить свои характеристики, если кроме заряда электрона использовать его спин. Например, если в полевом транзисторе исток и сток выполнить из ферромагнитного матери-

ала, тогда изменение частично спин поляризованного тока истока будет более значительным и будет зависеть от магнитного и электрического поля.

Группа немецких исследователей, продемонстрировавшая спиновой инжекционный светоизлучающий диод на основе InCeMnSe , еще раз доказала, что спин-поляризованные токи могут улучшить характеристики и расширить функциональные возможности таких приборов как резонансные туннельные диоды, квантовые лазеры и оптические коммутаторы и модуляторы.

В конце прошлого столетия произошло другое важное неожиданное открытие, которое окажет огромное влияние на фотонику и электронику XXI в. — открытие долговременного когерентного спинового состояния в полупроводниках, квантовых ямах и квантовых точках. Оказывается, при падении поляризованного по кругу света на полупроводник или квантовую яму с концентрацией носителей $10^{16}/\text{см}^3$ возникает когерентное спиновое состояние, которое может сохраняться в течение 100 нс. Этот участок электронов с когерентным спиновым состоянием можно двигать в GaAs на макроскопические расстояния без потери когерентности или фазы. И уже совсем недавно наблюдался эффект долговременного когерентного спинового состояния в CdSe квантовой точке. Не исключено, что именно этот эффект будет использован для создания двухуровневой квантово-механической системы — кубита. Тогда квантовые компьютеры перестанут быть лабораторной диковинкой [20].

Ученые из Cornell University и Yale University (США) показали, что магнитная многослойная структура может трансформировать электрический ток в высокочастотные магнитные волны. Исследователи уверены, что подобные устройства могут работать как наноскопические источники микроволнового излучения. Этот проект — часть проекта «спинтроники» предназначенного для использования не только электронного заряда, но и спина». Спин электрона сильно взаимодействует с магнитными элементами в устройствах, и в прошлом задача определения ориентации спин-поляризованных электронов была труднодоступной. Эти исследования представляют шаг вперед к пониманию механизма инверсии — возможности влияния потока спин-поляризованных электронов на ориентацию магнитных элементов различных устройств.

ройств. В исследованиях использовали многослойный материал, состоящий из 80 нм пленки меди, 40 нм пленки кобальта, 10 нм пленки меди, 3 нм пленки кобальта, 2 нм пленки меди и 30 нм пленки платины на подложке оксида кремния. Преобразовали и расслоили этот мульти-слой так, что получилась колонна с эллиптическим поперечным сечением 130x70 нм. При трансмиссии электронов, отраженных от толстого «фиксированного» кобальтового слоя, ученые получили спин-поляризованный ток, который способен передавать вращающий момент тонкому «свободному» слою кобальта. Изменения намагниченности этого свободного слоя по отношению к фиксированному изменяют электрическое сопротивление устройства. Как следствие, под воздействием переменного напряжения, магнитная динамика представляет собой переменное напряжение с частотой в микроволновом диапазоне. Применением открытого эффекта будут устройства спинтроники — наноустройства, излучающие микроволновое излучение и различные осцилляторы.

7.2.1. Спинтроника на основе кремния

Физикам удалось сделать еще один шаг на пути к созданию нового поколения электронных устройств, названного спинтроникой. Планируется, что в подобных устройствах информация будет кодироваться не только электрическими сигналами, но и спином электронов, составляющих их.

Спины электронов довольно легко контролируются в ферромагнитных материалах, чего нельзя сказать о традиционных и «удобных» с производственной точки зрения полупроводниках; на текущем этапе развития технологии задача исследователей состоит в том, чтобы найти надежный и простой способ введения в полупроводники поляризованных по спину носителей заряда, источниками которых служат ферромагнетики.

Существуют различные решения этой задачи, но все они предполагают использование не самых дешевых полупроводников (к примеру, арсенида галлия) n-типа при температуре ниже 150 К.

Представленный метод, напротив, позволяет работать с кремнием обоих типов проводимости при температурах до 300 К. Для проведения экспериментов ученые выбрали ферромагнитный сплав никеля и железа, который применяется при создании считывающих головок жестких дисков. В контакте с магнитным слоем находилась изолирующая пленка оксида алюминия толщиной около нанометра, с другой стороны которой располагался слой кремния. При подаче напряжения носители заряда, туннелируя, перемещались из ферромагнетика в полупроводник. Причем частицы с определенным направлением спина совершали переход чаще, чем остальные, за счет чего и создавался эффект поляризации по спину. По данным авторов, время жизни спина при 300 К составило около 140 пс для электронов в кремнии *n*-типа и 270 пс — для дырок в материале *p*-типа. Длина диффузии спина (расстояние, на котором сохраняется поляризация) электронов оказалась равна 230 нм; в случае дырок — до 310 нм. Успешность опыта, по мнению ученых, объясняется применением сверхтонкого слоя оксида алюминия: в предыдущих экспериментах использовались слои большей толщины, которые сдерживали перемещение носителей заряда.

Предполагается, что схема может подойти для создания электронных квантовых компьютеров. Причем аналогичное новому устройство поможет получать пучки электронов, спины которых будут запутаны, т. е. окажутся в квантовой взаимосвязи. Считается, что квантовые компьютеры смогут выполнять некоторые вычисления гораздо быстрее, чем традиционные аппараты.

7.2.2. Одноатомный транзистор для квантовых компьютеров

Международная группа ученых из Технологического университета Хельсинки, университета Нового Южного Уэльса и университета Мельбурна успешно завершила цикл научно-исследовательских работ, результатом которых явилось создание полнофункционального транзистора, имеющего размеры, равные всего одному атому. Создание такого транзистора дает ученым полигон для новых исследований и изучения

явлений, которые впоследствии будут использоваться в быстро развивающейся области квантовых вычислений.

Принцип работы устройства основан на последовательном туннельном переходе единичных электронов между атомом фосфора, истоком и стоком транзистора. Туннелирование может быть подавлено или разрешено путём контроля напряжения на ближайшем металлическом электроде толщиной в несколько десятков нанометров.

Несмотря на то, что размеры активной части транзистора равны всего одному атому, размеры других составляющих, стока, истока и затвора (управляющего электрода) достаточно велики для атомарного масштаба. Поэтому с использованием нынешних технологий изготовления полупроводников вряд ли получится разместить на кристалле значительно большее количество таких одноатомных транзисторов, чем обычных транзисторов. Учёные не намеревались создать самый маленький транзистор для классического компьютера, а придти к квантовому биту – сердцу квантовых компьютеров, над которыми сейчас трудятся многие коллективы исследователей. Удалось, используя этот транзистор, достаточно четко зафиксировать два состояния атома фосфора, обусловленные направлением движения электрона, находящегося на верхнем слое. Эти состояния и будут в дальнейшем определять состояния логической единицы и нуля, которые являются основой двоичной арифметики и вычислительной техники.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение полного контроля над состоянием атома фосфора, являющегося сердцем одноатомного транзистора. В конечном счете это будет полная реализация квантового бита (кубита), который может быть быстро прочитан, записан и сохранен на длительное время.

7.3. Нанооптика и фотоника

Успешно завершились испытания лазера, работающего на базе одного единственного атома цезия в Калифорнийском институте. Лазер не обладает большой мощностью, но его излучение строго когерентно, а это дает возможность использовать для управления квантовыми компьютерами. Вероятно, технология сыграет важную роль в создании новых миниатюрных компьютерных схем.

Итальянские разработчики использовали технологию, известную как *pianoimprint lithography* для создания органического лазера на основе распределенной обратной связи (DFB) при комнатной температуре. Получившийся лазер оказался способен генерировать импульсное излучение с длиной волны 637 нм и шириной спектральной линии менее 0,7 нм.

Ученые из Sandia National Laboratories стремятся использовать квантовые точки как менее энергоемкую альтернативу современным флюоресцентным лампам и лампам накаливания. Разработали инкапсулированные нанокристаллы, которые могут быть интегрированы в коммерчески производимые светодиоды белого свечения. Нанокристаллы будут поглощать невидимый свет излучаемый диодом и переизлучать его в видимом диапазоне.

Omron Corporation (г. Киото, Япония) анонсировала «*hybrid integration technology*», заключающуюся в использовании массивов нанопризм для достижения трехкратного увеличения контрастности экранов по сравнению с применением обычных методов обработки прямого света. Эта разработка позволяет уменьшать количество светодиодов в устройствах, снижая тем самым их энергопотребление и увеличить контрастность мониторов ноутбуков, телефонов и КПК.

По словам электротехников из Penn State, добавление фуллеренов или углеродных нанотрубок к нематическим жидким кристаллам изменяет их свойства и делает их дешевой альтернативой для приложений в области голографии и обработки изображений. Внедрение структуры нанотрубок и C_{60} в жидкие кристаллы позволяет получить в миллион раз большие значения показателей нелинейной оптики, чем это возможно с любым из существующих материалов.

7.3.1. Нанотранзисторы

Углерод входит в состав многих биологических структур, и он же служит материалом для нанообъектов (фуллеренов, нанотрубок). В 1997 г. группа исследователей во главе с С.Тансом (Дельфтский технологический университет, Нидерланды) показали, что при низкой температуре углеродная нанотрубка при наложении электрического поля может

быть переведена из металлического состояния в диэлектрическое. Тем самым открылась потенциальная возможность использования нанотрубок как активных элементов для наноэлектроники. Однако необходимость глубокого охлаждения ставила значительное препятствие на пути практической реализации полупроводниковых свойств единичных трубок.

Недавно той же группе физиков удалось продемонстрировать уже при комнатной температуре способность углеродной нанотрубки служить каналом полевого транзистора. На кремниевой подложке, покрытой изолирующим оксидным слоем толщиной 300 нм, формировали параллельные платиновые полосы шириной по 200 нм, разнесенные на расстояние около 600 нм между их осями. Нанотрубку диаметром 1,4 нм и длиной около 1 мкм укладывали поверх полос так, чтобы она перемыкала 2 или 3 Pt-полоски, образуя с ними туннельные контакты. Это позволяло носителям заряда (дырки – в углеродной нанотрубке) участвовать в создании тока между соседними Pt-электродами, служащими истоком и стоком в полученном таким способом полевом транзисторе с изолированным затвором, роль которого играла Si-подложка.

Детальные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в такой системе, проведенные при комнатной температуре с более чем 20 нанотрубками, выявили помимо металлического поведения у некоторых трубок (с линейной зависимостью тока между истоком и стоком и отсутствием зависимости от напряжения затвора V_g). В системах с такими нанотрубками ВАХ оказываются сильно асимметричными. Установлено, что свойства углеродной нанотрубки качественно описываются стандартной полуклассической зонной моделью с шириной запрещенной зоны 0,6 эВ.

В описанном опыте транзистор имел коэффициент усиления по напряжению не более 0,35. Однако его нетрудно повысить, сделав больше единицы за счет уменьшения толщины оксидного слоя с 300 до 5 нм. Максимальную частоту устройства оценивают в 10 ТГц. Полагают, что в будущем с помощью технологии молекулярной сборки удастся получать интегральные схемы на основе нанотрубок.

Используя имплантаты по окружности и литографический процесс с длиной волны 248 нм, компания IBM разработала прототип самого

маленького кремниевого транзистора по технологии SOI. Действующий образец транзистора, который согласно заявлениям IBM в 10 раз меньше любого из производимых сегодня (6 нм длиной), при этом полностью функционален. Дальнейшая работа будет вестись для достижения более высокой производительности и лучшего управления распределением мощности и тепловой энергии. Нанометр — это одна миллиардная доля метра. К 2016 г. транзисторы должны быть меньше 9 нм, чтобы обеспечивать имеющуюся тенденцию увеличения производительности полупроводников. Причем такой размер транзистора позволит изготавливать устройства, содержащие в 100 раз больше транзисторов, чем в настоящее время. Сокращение длины затвора транзистора влечет за собой увеличение производительности и снижение себестоимости. Транзистор IBM уменьшает толщину слоя кремния на подложках типа «кремний-на-изоляторе», которые он использует, при этом тело транзистора составляет только 4-8 нм толщиной.

7.3.2. Ультраострые полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок

Обычно полевые эмиттеры — источники электронов в плоских дисплеях следующего поколения — изготавливаются на основе кремния или металла, чтобы формировать микроострия травлением, электронно-лучевым осаждением или наклонным напылением. Применительно к наноизготовлению сложность этих процессов состоит в невозможности уменьшения размера апекса (вершины острия) за пределы 20-50 нм и достижения однородности острий. При большом апексе требуется большое электрическое поле для эмиссии электронов (пороговое напряжение должно быть >100 В).

Японско-американская группа исследователей в целях изготовления ультраострых полевых эмиттеров осаждает на сформированные Si острия одностенные углеродные нанотрубки с помощью термического химического испарения. Таким образом уменьшается апекс острия до 1-2 нм и пороговое напряжение полевой эмиссии до 10 В. На площади $3,7 \times 3,7$ мм были сформированы 10900 острий. Исследования эмиссионных характеристик эмиттеров проводились в вакууме

10^{-4} Торр. Расстояние между анодом и катодом (кремниевой подложкой с нанотрубчатыми эмиттерами) регулировалось с помощью Si_3N_4 прослойки на подвешенном аноде. Были использованы прослойки с толщинами 6, 10 и 21 мкм. Чем тоньше прослойка, тем меньше пороговое напряжение эмиссии. При толщине 21 мкм пороговое напряжение составляет около 25 В, при 6 мкм – 10 В, что в 10-50 раз меньше, чем в традиционных кремниевых эмиттерах. При этом смещении ток эмиссии был равен 10-10 А. При напряжении смещения 20 В ток увеличивался до 5×10^{-5} А, что эквивалентно плотности тока эмиссии $3,6 \times 10^{-4}$ А/см². Если допустить равномерное распределение тока между 10900 эмиттерами, тогда эмиссионный ток с одной нанотрубки составит $4,6 \times 10^{-5}$ А при смещении 20 В.

7.3.3. Полевая электронная эмиссия из нанотрубок, выращенных на вольфрамовом наконечнике

Холодные катоды из углеродных нанотрубок (для плоских экранов мониторов, для электронных микроскопов, для люминесцентных ламп) отличаются малым весом, компактностью и экологической безопасностью. Для этих целей нанотрубки выращивают на проводящих подложках. В недавней работе группой исследователей из различных научных центров Индии получено рекордное ($\sim 1,5$ А/см²) значение плотности тока электронной эмиссии из нанотрубок, выращенных на наконечнике вольфрамовой проволоки. Вольфрамовая проволока диаметром 0,125 мм и длиной ~ 1 см подвергалась электрохимическому травлению в растворе КОН, затем производился синтез нанотрубок методом пиролиза (1370 К) ферроцена в потоке нагретого аргона.

В настоящее время продолжают работы по созданию плоских экранов (дисплеев) с холодными катодами, где в качестве рабочего тела рассматриваются углеродные нанотрубки, обладающие высокими эмиссионными свойствами при незначительных электрических полях. По габаритам и уровню потребляемой мощности такие мониторы будут существенно превосходить традиционные высоковольтные кинескопы, а по яркости свечения и углу зрения – дорогие дисплеи на жидких кристаллах. Ученые многих стран интенсивно исследуют свойства наност-

руктур, состоящих из атомов одного сорта, — углерода. Среди их большого многообразия существуют такие, благодаря свойствам которых они уже используются или будут широко использоваться в будущем.

Исследовательская компания «Applied Nanotech Inc.» (штат Техас, США), специализирующаяся на углеродных нанотрубках, создала 14-дюймовый монокромный телевизор на основе нанотрубок и сообщила о создании прорывных технологий, снижающих стоимость телевизоров, а также о характеристиках электронного излучения нанотрубок. Разрабатываемые устройства совместимы со стандартными процессами производства чипов.

James Jaskie, главный исследователь Microelectronics and Physical Sciences Laboratory компании «Motorola», считает, что плазменные дисплеи представляют собой «очень неуклюжую технологию». Плазменные панели используют излучающую технологию, при которой изображение создается электродами, ионизирующими газ для получения различных цветов. Планируется выпустить на рынок дисплеи, созданные по технологии NED (Nano-Emissive Display) на основе нанотрубок, а также коммерческое производство цветного 25-дюймового телевизора высокого разрешения на нанотрубках.

Новая технология по изготовлению наноэлектронных устройств на гибких и стеклянных основах позволит создать гибкие и дешевые дисплеи и компьютеры. Нанопроводники действительно могут быть интегрированы в следующее поколение макроэлектронной техники, такой как плоские дисплеи, мобильные компьютеры и устройства хранения данных. Быстродействие и гибкость использования этих устройств позволит реализовать такие фантастические проекты, как сверхдешевые компьютеры, которые не жалко выбросить; и гибкие плоские цветные дисплеи, которые можно носить на одежде или интегрировать в контактные линзы.

Для того чтобы сделать подобные устройства, были выращены монокристалльные нанопроводники. Затем сделана суспензия этих нанопроводников, которые расположили на желаемый субстрат методами синтеза в растворах. Прорывом было то, что удалось синтезировать высококачественные монокристалльные полупроводниковые нанопроводники при высоких температурах, которые можно добавлять в растворы и собирать из них устройства на гибких и дешевых пластиковых и стеклянных субстратах. Высокотемпературный режим для со-

здания монокристалльных полупроводников обычно ограничивает качество электроники на альтернативных (не кремниевых) субстратах, так как пластик плавится при высоких температурах.

Разделение высокотемпературного процесса роста монокристаллов и холодной сборки на субстрате открывает пути к созданию быстродействующей электроники на дешевом стекле и пластике. На кремниевых нанопроводниках р-типа был создан транзистор на субстрате из стекла с дыркой мобильностью в $365 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Для устройства на гибком пластике мобильность была $135 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Согласно последним исследованиям, эти мобильности лучше аналогов р-каналов поликристаллических кремниевых транзисторов на стеклянной основе. Величины мобильности в 2 или 3 раза больше, чем в аналогичных транзисторах на аморфном кремнии и органических транзисторах на стеклянных и пластиковых субстратах. Кремниевые нанопроводниковые пластиковые устройства также проявляют хорошие свойства, когда они изогнуты с радиусом кривизны 0,3 см. Ученые изготовили светодиоды на пластиковой основе из пересекающихся нанопроводников. Они использовали нанопроводники на основе нитрида галлия n-типа и кремниевые нанопроводники р-типа на основе кремния. Под прямым напряжением р-п переход на месте пересечения нанопроводников излучал ультрафиолет. Подобные устройства могут быть использованы при изготовлении гибких цветных дисплеев. Следующим значительным шагом стало применение этого подхода к созданию транзисторных матриц на стеклянной или пластиковой основе. Эти устройства быстродействующие и найдут применение в устройствах хранения данных и другой компьютерной технике.

Объединенная команда исследователей University of Toronto и Carleton University создала новый материал для оптической обработки информации. Под руководством профессора электрики и компьютерной инженерии Ted Sargent (University of Toronto) и профессора химии Wayne Wang (Carleton University) разработан материал, состоящий из фуллеренов (buckyballs) и полиуретана, полимера, используемого для нанесения покрытий на автомобили и мебель. В результате получилась пленка с замечательными нелинейными оптическими свойствами. Возможно, этот материал найдет применение для обработки инфракрасных сигналов в телекоммуникационных устройствах.

7.4. Новые источники энергии

Если нанофункциональные схемы – мозг любого компьютера или прибора, то источник питания – его сердце. Естественно, что наносхемы будут требовать и малогабаритных источников питания достаточно высокой емкости. Такими источниками могут стать металлгидридные аккумуляторы электрического тока, в которых металлгидридный электрод будет полностью или частично заменен композитом на основе выше упомянутых нанотрубок или углеродных нановолокон. Это позволит уже сегодня уменьшить размеры источника питания в 5 и более раз. Емкость металлгидридного аккумулятора определяется водородной емкостью отрицательного электрода, т. е. чем больше атомов водорода способен поместить в себе электрод, тем больше электричества источник сможет отдать во внешнюю цепь. Существующие на современном рынке аккумуляторы способны запасти до 2 мас. % водорода от веса электрода. В научных сообщениях водородная емкость углеродных материалов колеблется от 10 до 67 мас. %, что в 5-33 раз выше таковой у материалов на основе интерметаллических соединений.

Исследователи из University of Tulsa, (США, штат Оклахома), запатентовали технологию, позволяющую создавать аккумуляторы размером в единицы микрон. Технология производства включает в себя продавливание расплава полимера через пористую мембрану из оксида алюминия. Этот полимер служит электролитом, а электроды размещены на противоположных концах пор мембраны и представляют собой керамические или графитовые частицы. Прототип устройства способен давать ток около 1 наноампера при напряжении до 3,5 В.

Учеными Массачусетского университета создан прототип микроскопического генератора электроэнергии на основе микробной клетки. Этот генератор позволяет получать электроэнергию из простых сахаров с 81 % КПД. Предположительно он может быть использован для питания маломощных аппаратов: калькуляторов, мобильных телефонов и записных книжек. При окислении органических веществ выделяется углекислый газ. Это пока что единственный побочный эффект реакции. Бактерия *Rhodospirillum rubrum* передает электроны непосредственно на электрод. Теоретически 1 стакана сахара должно хватить для питания 60-ваттной лампочки в течение 17 ч. Хотя практически

выработанного электричества в ходе реакции хватает для работы калькулятора. Пока что технология еще нуждается в доработке, так как скорость процесса очень мала.

Одним из активно развивающихся направлений разработки наноматериалов является управление структурой вещества на молекулярном уровне для производства субстанций со специфическими, заранее заданными электрическими свойствами. Исследователи из University of Bologna и University of Trieste (Италия), совместно с University of Notre Dame нашли способ модификации углеродных нанотрубок, позволяющий с их помощью эффективно разделять электрические заряды. Данный метод может привести к дальнейшему повышению КПД солнечных батарей.

Новый тип наночастиц, разработанный в Канзасском университете, позволит повысить экономическую эффективность преобразователей солнечной энергии по сравнению с уже существующими. Были проведены исследования свойств наночастиц селенида галлия. Оказалось, что свойства их различны для частиц разного размера. В частности, размер частиц определяет область спектра, в которой излучение поглощается ими – и в результате определяется и их цвет. Удалось подобрать оптимальный размер наночастиц, позволяющий им поглощать излучение во всей области видимого света, не поглощая инфракрасное излучение, чувствительность к которому снижает напряжение. Наночастицы оптимального размера имеют темно-красный цвет, почти черный.

Сегодня солнечные батареи делают из кремния. Вследствие наличия в нем посторонних примесей эффективность таких батарей ограничена. Химическая очистка больших полупроводниковых элементов стоит дорого, и здесь на помощь приходит нанотехнология. Если раздробить заготовку на мириады наночастичек, лишь небольшая часть из них будет содержать примеси, в то время как подавляющее большинство окажется химически чистым.

В перспективе планируется исследовать более сложный, но теоретически и более эффективный материал для солнечных батарей – селенид индия. В отличие от кремния, наночастицы которого получить непросто, селенид индия весьма перспективен для создания солнечных элементов именно из наночастиц. Идея состоит в том, чтобы сде-

лать большие, мощные солнечные батареи по смешной цене. Только в этом случае цена солнечной электроэнергии сможет конкурировать с ценой органического топлива. Несмотря на то, что большинство полупроводников может использоваться в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую, исследования в этой области практически не проводились, поскольку отсутствовала технология производства наночастиц из этих материалов.

В университете Беркли (штат Калифорния) нашли способ производства дешевых солнечных батарей с использованием полимерных пленок. Новые изделия достаточно гибкие — их можно нанести на любую поверхность, которая в итоге станет источником электричества для любого мобильного устройства. Первые образцы полимерных фотоэлементов, генерирующих электричество под действием солнечного света, имели КПД (энергетическую эффективность преобразования света в электричество) всего 1,7 %. Кристаллические полупроводники обладают гораздо более высоким КПД.

В настоящее время лучшие образцы полупроводниковых кристаллов способны превращать световую энергию в электричество с эффективностью не более 35 %. Каждый шаг в увеличении эффективности дается все с большим трудом. Вследствие этого получать новые эффективные полимеры можно лишь в особых условиях, создавая стерильную чистоту и отсутствие примесей в материалах. Ученые из Беркли решили пойти другим путем и использовать преимущества обоих типов полупроводниковых материалов. Они отказались от мысли сделать уникально чистый кристалл и вместо этого изготовили композиционный материал, который является дисперсией крошечных полупроводниковых кристаллических стержней в твердом полимере. Раньше их размеры называли бы микроскопическими (что подразумевает возможность увидеть их в микроскоп), но здесь это определение будет неточным, поскольку характерные размеры этих стержней измеряются десятками нанометров и в оптический микроскоп их увидеть невозможно. Так что более подходящим названием для таких структур будет «наностержни».

Что представляют собой наностержни? Это кристаллы полупроводниковых материалов. Размеры этих кристаллов таковы, что в них содержится 100-100000 атомов. Тем не менее сохраняется трансляци-

онная симметрия при упаковке атомов, что и позволяет создавать кристаллическую структуру. Малое число атомов в этих структурах приводит к появлению у них новых свойств, определяемых квантово-механическими законами. В зависимости от размера кластеров (совокупности атомов) могут по-разному меняться такие показатели, как ширина запрещенной зоны полупроводника (и возможность поглощения света в разных спектральных диапазонах), потенциал ионизации, температура плавления, магнитные свойства. Можно осуществить тонкую настройку этих параметров, если научиться контролировать размеры и форму кристаллических кластеров. Среди многих перспективных применений нанокристаллов отметим, например, возможность их использования в качестве маркеров для биологических исследований на клеточном или молекулярном уровне. В этом случае кластер размером в 2 нм при облучении лазером будет сам излучать свет в зеленом диапазоне спектра, а кластер в 5 нм – в красном диапазоне.

Получают кластеры нанокристаллов, внося затравку из металло-органического соединения в горячий раствор поверхностно-активного вещества. После того, как научились выращивать кристаллы сферической формы, следующим шагом стало получения стержней – структур, длина которых в 10 раз и более превышает их толщину. При изучении их свойств оказалось, что стержни, например из селенида кадмия, в 20 раз эффективнее в процессах преобразования света, чем кристаллы сферической формы. Кроме того, стержни испускают поляризованный свет, что может оказаться особенно важным при использовании их для биохимического анализа.

При попадании света на поверхность кристалла возникают свободный электрон и дырка (вакансия в кристаллической структуре). Электрон перемещается на другой конец наностержня, который присоединен к электроду из алюминия. Дырка дрейфует в направлении полимерного полупроводника, окружающего наностержень, а затем к прозрачному полимерному электроду. Обычно в качестве полимерной среды-наполнителя с полупроводниковыми свойствами используют РНЗТ (поли-3-гексилтиофен) или аналогичный ему полимер, производное политиофена. Напомним, что у политиофена были обнаружены сверхпроводящие свойства при низких температурах. Таким образом, происходит разделение заряда и образование разности потенциалов, которая

достигает 0,7 В, чего уже вполне достаточно для работы многих полупроводниковых устройств.

Самым привлекательным моментом этой разработки является дешевизна изготовления гибридного фотоэлектрического элемента. Дело в том, что для получения чистого полимерного кристалла больших размеров нужны особые условия, и всё равно размеры полупроводниковой пластины не будут превышать нескольких десятков сантиметров. В то же время производство наностержней, а затем и композиционных материалов на их основе, не требует специальных условий и по существу может быть проведено в любой лаборатории или производственном помещении. Синтез при этом ведется при комнатной температуре.

Ученые использовали, таким образом, преимущества как неорганических, так и полимерных полупроводников. Исследования, которые ведутся сейчас, направлены на создание наностержней, которые поглощают свет в разных диапазонах видимого спектра. Это позволит наиболее эффективно использовать весь спектральный диапазон. Предполагается, что в итоге фотоэлемент будет состоять из 3-х слоев, накладываемых друг на друга. Гибкость полимерного носителя позволит придать готовому изделию любую форму и сделать его площадь произвольной.

Компания «Nanosys, Inc.» сосредоточилась на разработке систем, использующих нанотехнологии. Среди них — новые и запатентованные нанометровые нульмерные (точечные) и одномерные (стержневые) материалы — нанокристаллы, нанопроволоки, нанотрубки. Они используют уникальные фундаментальные электрические, магнитные, оптические свойства, а также возможности к сочетанию, связанные с веществами, используемыми в нанометровых размерах. Ожидается, что устройства, построенные с использованием нанотехнологий, революционизируют широкий спектр отраслей — от химических сенсоров до оптоэлектроники и компонентов компьютеров. Они обещают радикальные улучшения скорости, чувствительности, энергопотребления, плотности размещения компонентов и уровня их интеграции.

«Matsushita Electric Works» совместно с «Nanosys» разработали наноструктурные композитные солнечные батареи для строительной промышленности Азии, коммерческую версию новых солнечных бата-

рей. Они представляют собой композитные солнечные батареи, встроенные в декоративную черепицу и сайдинги.

7.4.1. Золотые солнечные батареи

Использование солнечной энергии для получения электроэнергии в домашних условиях тормозится только их высокой стоимостью. Новая методика производства солнечных батарей, разработанная группой ученых под руководством Э. Макфарленда, позволит снизить стоимость батарей настолько, что вырабатываемая ими электроэнергия будет по цене конкурировать с электроэнергией, вырабатываемой тепловыми и атомными станциями. Устройство содержит тонкий слой светопоглощающего красителя, нанесенного на тонкую золотую пленку; она, в свою очередь, нанесена на поверхность слоя очень дешевого полупроводника диоксида титана. (В настоящее время солнечная энергия обходится дороже примерно в 2 раза, так как используется кремний сверх-высокого качества.) Электроны, выбиваемые из молекул красителя, проходят сквозь тончайшую золотую пленку и попадают в полупроводник. Образовавшиеся «дырки» замещаются электронами из золота. Поскольку в данной конструкции полупроводник не является одновременно и поглотителем света, требования к нему значительно снижаются, так что открывается возможность использования в конструкции материалов, стоящих относительно не дорого.

На данный момент солнечные батареи новой конструкции позволяют преобразовать в электрическую менее 1 % световой энергии (в сравнении с 15 % у обычных батарей). Работа по их совершенствованию продолжается.

Специалисты NEC разработали топливную ячейку для мобильных терминалов (например, для мобильных телефонов), в которой в качестве электродов используется разновидность углеродных нанотрубок — нанорога, получивших такое название благодаря своей форме. Энергоемкость такого элемента в 10 раз превышает энергоемкость литиевой батареи, а стоимость изготовления не превысит стоимости изготовления литиевых батарей. Персональный ноутбук, питаемый от батареи таких топливных элементов, сможет работать непрерывно в течение

нескольких дней, а мобильный телефон – в течение месяца. Испытание топливного элемента, проведенное совместно с Japan Sci. and Technol. Corp. и Institute of Research and Innovation, подтвердило его работоспособность. Принцип работы топливного элемента основан на прямом преобразовании энергии химической реакции между водородом и кислородом в электрическую энергию. Мотивом использования нанотрубок в качестве электродов для топливного элемента послужили такие свойства нанотрубок, как чрезвычайно большая площадь поверхности и проницаемость для газа и жидкости.

7.4.2. Сверхпроводящая станция впервые свяжет три электросети

Примеров практического применения промышленных сверхпроводящих кабелей было мало, да и то счёт шёл на сотни метров [21]. Запуск нового комплекса предусматривает переход сверхпроводников из области сравнительно небольшой техники (медицинские томографы, научное оборудование) в гигантскую индустрию распределения энергии.

Уникальная суперстанция-узел «Три товарища» по плану энергетиков соединит в одной точке 3 независимые электросети США – восточную, западную и техасскую. С вводом новой станции решаются многие проблемы энергосети страны и особенно в свете расширения производства альтернативной энергии.

Станция становится первым узлом, способным перекидывать большие мощности в любом направлении сразу между тремя сетями, каждая из которых работает самостоятельно и потому не совпадает по фазе тока с соседями. Для переброски нагрузки между ними имеется несколько ограниченных по пропускной способности узлов, переводящих переменный ток в постоянный, и обратно. Но они могут передавать менее 1 % всей генерируемой мощности, а, к примеру, прямая связь между техасской и западной сетью – отсутствует. Такое положение дел не устраивает энергетиков. И не только потому, что оно ограничивает гибкость общей энергетической системы государства. Невозможность переброски тока в достаточном количестве сдерживает, как

ни странно, развитие альтернативной энергетики — солнечных и ветровых станций.

Дело в том, что выработка на них отличается непостоянством, и компенсировать его негативный эффект можно только двумя путями: создавая колоссальные аккумулирующие мощности (а это дорого) либо соединяя такие станции с как можно большим числом потребителей, т. е. передавая пик генерирующей мощности в те районы, где имеется пик потребления.

Так, техасская сеть слишком мала, что сдерживает строительство там альтернативных электростанций. С другой стороны, имеющиеся большие ветровые фермы Среднего Запада нуждаются в большем числе потребителей (в том числе на юге), дабы сглаживать свою неравномерность в производстве электричества. Равно как пасмурная погода над солнечными станциями в одном штате может быть легко компенсирована ярким солнцем над другим регионом — была бы только связь между ними.

Весь этот узел проблем, по оценке исследовательского института электроэнергетики, участвовавшего в идеологическом обосновании проекта, может разрубить одно суперсоединение, возведённое в точке, где все 3 сети близко подходят друг к другу, а именно близ г. Кловис в г. Нью-Мексико.

Самое примечательное — в новой станции будут использованы сверхпроводящие линии электропередачи постоянного тока от компании «American Superconductor». Они расположатся под землёй в форме многокилометрового треугольника. После строительства первой очереди станции «Три товарища» в любом направлении может быть переброшено до 5 ГВт мощности. А в конечном варианте максимальный поток по каждой из сторон этого треугольника достигнет 30 ГВт. При этом сама узловая станция будет располагать ещё и аккумулирующими мощностями в размере 150 МГВт, помогающими сглаживать нагрузку.

Компания известна как один из пионеров индустрии сверхпроводников и выпускает серийные сверхпроводящие кабели, рассчитанные на промышленные токи. Она сравнивает внедрение таких систем в электросети с переходом индустрии связи с медных жил на оптоволокно.

Если федеральные власти утвердят замысел (станция — частный коммерческий проект), первая очередь узловой суперстанции вступит в строй в 2014 г. Успех будет иметь важное значение и для распространения сверхпроводящих ЛЭП в индустрии, пока ещё осторожно относящейся к новации.

По оценке Института электроэнергетики, как раз при передаче по таким сетям больших мощностей (от 5 ГВт и выше) на большие расстояния (1000 миль) сверхпроводящие ЛЭП сравниваются в цене постройки с обычными, так как доля затрат на криогенное оборудование оказывается уже небольшой. К тому же только при промышленных масштабах в полной мере проявляет себя выгода от обнуления потерь в проводах.

Факт постройки узловой станции на сверхпроводниках будет иметь громадное значение в качестве первой демонстрации технического и экономического потенциала сравнительно новой технологии.

8. НАНОХИМИЯ

Химические нанотехнологии оперируют о достаточно известными химическими процессами, в которых участвуют хорошо известные органические или неорганические элементы и структуры.

Но участвуют они лишь в «наноскопических» количествах. Если сравнить средние размеры наноэлемента с размерами обычного футбольного мяча, то их соотношение будет таким же, как у футбольного мяча с земным шаром! В результате, аккуратно выстраивая миниатюрные структуры из знакомых элементов таблицы Менделеева, сегодня можно получить материалы с удивительными свойствами, которые порою даже противоречат здравому смыслу. Некоторые современные материалы могут проявлять мощную клеящую способность, являясь, однако, репелентами. Другие демонстрируют высочайшую твердость, но остаются гибкими. Покрытия из таких тончайших материалов прозрачны, стойки к химическому воздействию, устойчивы к коррозии, поэтому область применения здесь поистине безгранична.

8.1. Нанокатализаторы

Нанокатализаторы могли бы также предотвратить потери и повысить эффективность многих технологических процессов. Ведь если создавать молекулярные структуры в наномасштабах и подвергать их анализу, становится возможным появление совершенно новых материалов. Например, обычное золото при комнатной температуре не является катализатором химических реакций, а частички золота размером 3–5 нм – отличный катализатор. Одна японская фирма использовала этот эффект для изготовления оригинального продукта – «пожиратель запаха», который с помощью наночастиц золота разлагает молекулы туалетных испарений.

Разработан новый способ производства материалов, способных пропускать через себя один определенный тип молекул, и блокировать химические соединения, отличающиеся лишь хиральностью. Если технология покажет себя эффективной в крупномасштабных экспериментах, то стабильный и относительно простой катализатор может потрясти фармацевтический рынок объемом 100 млрд. дол., позволяя отделять биологически активные соединения от их бесполезных, а порой и токсичных «отражений»

Почти 20 % сырой нефти остаются переработанными по причине несовершенной технологии очистки. Сейчас ведутся работы по созданию специальных керамических цилиндров, пронизанных нанопорами, способных удерживать только одну молекулу. Если пропустить сырую нефть через такой катализатор, то ни одна молекулярная цепочка не уйдет от очистки, и эффективность крекинга достигнет 100 %.

Lealea Enterprise Co., ведущее предприятие «Lealea Group», при помощи нанотехнологии преуспело в создании инфракрасных волокон, т. е. для создания таких продуктов, как огнеупорные, антисептические и антиультрафиолетовые волокна. Американские исследователи соткали ДНК в сеть, способную расширяться и сокращаться. Подобные устройства могут использоваться в качестве наночувствительных или в биологических сенсорах. Кроме того, переключаемая сеть ДНК может включать и выключать наночувствительные в наноконструкциях будущего, изменяя расстояние между ними. В сенсоре, содержащем группу белков, которые ловят другие биологические молекулы, это устрой-

ство может запускать и останавливать процесс, наполняя и опустошая полости в молекулах-сенсорах. ДНК – идеальный рабочий материал для нанотехнологий. Ее можно запрограммировать в заранее определенные формы. В университете Дьюк (США) сделали решетку переключаемой, встроив в некоторые цепочки секции ДНК, способные удлиняться и сокращаться. Каждая из этих секций представляет короткий сегмент двойной ДНК, прерванный небольшой петлей, образованной одной из цепочек – вздувающейся и обворачивающейся вокруг самой себя. Эта петля может расправиться при контакте с «топливом» – маленьким кусочком одинарной цепочки ДНК. «Топливо» отводит в сторону тот сегмент ДНК, который удерживал вместе обе стороны петли, давая ей возможность расправиться. Вторая короткая одинарная самовнедряющаяся цепочка ДНК открывает петлю. Таким образом фрагмент ДНК удлиняется примерно на 6,8 нм. Процесс можно обратить вспять с помощью еще двух кусочков ДНК: первый обнаруживает внедрившийся фрагмент и позволяет петле заново образоваться, а второй надежно скрепляет обе стороны петли, возвращая ей начальное положение.

8.1.1. Нанокатализаторы для фармы

В Институте элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН и Тверском государственном техническом университете разработаны методы формирования моно-(Pt, Ru, Pd), би-(Pt-Pd, Pt-Ru, Pd-Ru) и триметаллических (Pt-Pd-Ru) наночастиц в порах сверхсшитого полистирола. Это позволяет получить активные, стабильные и селективные нанокатализаторы для некоторых важнейших процессов, используемых в синтезе витаминов, пищевых добавок и лекарственных веществ.

Исследованные наноразмерные катализаторы вызывают не только очевидный научный интерес, но и несомненно практически перспективны, так как для них характерны сравнительно невысокие требования к чистоте используемого сырья и реактивов, простота аппаратного оформления и технологии проведения процесса, высокие выходы целевого продукта, экологическая безопасность и высокая стабильность, т. е. достоинства, необходимые для промышленного использования.

Промышленное использование наноразмерных катализаторов на основе сверхсшитого полистирола является вполне реальным, так как последний производится компанией Purolite Int. (U.K.) и поставляется по цене 10 дол. за 1 кг. Разработка высокоэффективных нанокатализаторов для процессов окисления позволит также решить и некоторые другие проблемы в фарминдустрии. Так, например, предлагаемые нанокатализаторы могут быть успешно использованы в промышленной технологии получения инъекционных растворов инсулина с использованием в качестве стабилизаторов и консервантов фенола и его производных. Металлосодержащие наноразмерные системы также показали перспективность для каталитической очистки сточных вод от соединений фенольного типа.

8.2. Нанокompозиты

Одно из перспективных направлений в науке о полимерах и материаловедении последних лет – разработка принципов получения полимерных нанокompозитов, которые являются новейшим типом функциональных материалов и могут быть использованы в самых разнообразных отраслях применения пластмасс. Модифицированные слоистые силикаты, используемые в качестве наполнителей, диспергируются на наномерном уровне внутри полимерной матрицы, придавая ей новые, экстраординарные свойства. Посредством нанокompозитов удаётся улучшить термическую стабильность полимеров и придать им относительную стойкость к горению. Огнестойкость слоистых нанокompозитов заключена в их структуре и основана на способности обугливаться..

Горение полимеров и материалов на их основе – предмет пристального научного и практического изучения на протяжении всего прошлого столетия. На современном этапе развития полимерной химии эта проблема приобрела всеобъемлющий характер системного поиска высокоэффективных и экологически чистых систем, снижающих горючесть полимерных материалов – антипиренов.

Острая токсичность газов, выделяющихся при пожаре, определяется содержанием монооксида углерода. Монооксид углерода явился причиной гибели при пожаре около 90 % людей. Ежегодно в Европе от

огня гибнет около 5 тыс. чел., в США — около 4 тыс. Прямые потери от пожаров составляют 0,2 % валового национального продукта (ВНП), общие потери — 1 % ВНП. В этой связи разработка современных эффективных антипиренов для полимерных материалов, способных минимизировать потери при возникновении пожара, является актуальной проблемой материаловедения. Полимеры находят все большее применение в традиционных и новых отраслях использования с повышенными требованиями к специфическим механическим, электрическим свойствам, а также к термостабильности.

Наноккомпозиты не имеют недостатков, присущих традиционным антипиренам. Вообще говоря, термин «наноккомпозит» описывает двухфазный материал, где подходящий наполнитель наноразмеров диспергирован в полимерной матрице. В сравнении с ненаполненными полимерами соответствующие наноккомпозиты дают существенное улучшение свойств, в то время как содержание наполнителя составляет 2-10 % по весу.

8.2.1. Слоистые силикаты как наполнители

Силикаты, используемые в синтезе наноккомпозитов, представляют собой, как правило, слой толщиной около 1 нм. Длина и ширина таких слоёв может достигать до нескольких микрон. Таким образом, соотношение линейных размеров и толщины частиц наполнителя относительно велико и обычно превышает 1000. Эти слои образуют скопления с зазорами между ними, называемыми прослойками или галереями. Изоморфное замещение внутри слоёв (Mg_2+ замещает Al_3+) генерирует отрицательные заряды, которые электростатически уравнивают катионами щелочных или щёлочноземельных металлов, расположенных в прослойках.

Неорганические катионы внутри прослоек могут замещаться другими катионами. Замещение катионными поверхностно-активными веществами, такими, как объёмные алкиламмоний-ионы, увеличивает пространство между слоями и уменьшает поверхностную энергию наполнителя. Таким образом, эти модифицированные наполнители (называемые органоглинозёмами) лучше совмещаются с полимерами и об-

разуют слоисто-полимерные силикатные наноккомпозиты. Наиболее часто используемыми среди слоистых силикатов являются монтмориллонит, гекторит и сапонит.

8.2.2. Синтез наноккомпозитов

Для приготовления наноккомпозитов «полимер – слоистый силикат» могут быть использованы несколько подходов. Тремя основными процессами при этом являются:

- *Пластовая полимеризация.* Методика стала первым методом получения материалов типа «полимер – слоистый силикат» на основе полиамида-6. Модифицированный слоистый силикат, заливаемый жидким мономером или раствором мономера, разбухает. Мономер мигрирует сквозь галереи слоистого силиката, и полимеризация происходит внутри слоев. Реакция полимеризации может быть инициирована теплотой, излучением или соответствующим инициатором.

- *Методика с использованием растворителя.* Для синтеза полимер-силикатного наноккомпозита используется полярный растворитель. Методика похожа на вышеописанную. Органосиликат разбухает в полярном растворителе, таком, как толуол или N, N-диметилформамид. Затем добавляется растворенный в растворителе полимер, который распределяется между слоями силиката. Финальная стадия заключается в извлечении растворителя путем испарения в вакууме. Основное преимущество этого метода заключается в том, что «полимер-слоистый силикат» может получаться на основе полимера с низкой полярностью или неполярного материала. Тем не менее этот метод не находит широкого использования в промышленности по причине большого расхода растворителя.

- *Метод интеркаляции в расплаве* состоит в смешении расплавленного термопласта с органо-глинозёмом с целью оптимизации взаимодействия между глиной и полимером. В ходе интеркаляции полимерные цепи в существенной степени теряют конформационную энтропию. Вероятной движущей силой для этого процесса является важный вклад энтальпии взаимодействия «полимер – органоглинозём» при смешении и отжиге.

Этот метод получил наибольшее применение и популярность. Стоит добавить, что слоистые нанокомпозиты успешно получают экструзией. Широкий перечень термопластичных полимеров, включая строго полярный полиамид-6, этиленвинилацетат и полистирол, могут интерполироваться в слоистые силикаты. Тем не менее процесс получения таких материалов на основе полиолефинов, представляющих собой наиболее распространенный класс полимерных материалов, пока недостаточно изучен.

8.2.3. Свойства нанокомпозитов

Нанокомпозиты демонстрируют существенные улучшения по сравнению с ненаполненными полимерами при содержании модифицированных слоистых силикатов в пределах 2-10 вес. %, которые наблюдаются в:

- механических свойствах (прочность на растяжение, сжатие, изгиб и излом);
- барьерных свойствах (проницаемость и стойкость к воздействию растворителей);
- оптических свойствах;
- ионной проводимости.

Другие интересные свойства, демонстрируемые нанокомпозитами «полимер — органоглинозём» включают повышенную термостабильность и стойкость к распространению пламени даже при очень низких концентрациях наполнителя. Формирование термоизоляции и незначительная проницаемость обугленного полимера для огня обеспечивают преимущества использования этих материалов.

Термическая стабильность. Термогравиметрический анализ (ТГА) часто используется для того, чтобы охарактеризовать термическую стабильность полимеров. Потеря массы полимера вследствие улетучивания продуктов, образующихся при термическом разложении, измеряется как функция вследствие подъёма температуры. Неокислительное разложение происходит тогда, когда нагревание материала проводится в потоке инертного газа (скажем, гелия или азота). В то время как наличие в газовой среде кислорода дает возможность протекания реакций окислительного разложения.

Термостабильность слоистого сшитого полидиметилсилоксана с содержанием 10 % органомодифицированного монтмориллонита была продемонстрирована в сравнении с ненаполненным сшитым полидиметилсилоксаном [22]. Эксперимент показал, что разница между температурами, при которых достигалась 50 %-ная потеря массы наполненной и ненаполненной композиции, составляла 140 °С. Значительное улучшение термостойкости нанокompозита достигается за счет осложненной диффузии летучих продуктов разложения (циклические силоксаны) как прямого результата затрудненной проходимости, свойственной для слоистых нанокompозитов.

Нанокompозиты имеют много преимуществ перед традиционными антипиренами. В качестве наполнителей используются малые количества модифицированных слоистых силикатов. Таким образом, механические свойства у них такие же, как и у ненаполненных полимеров. Переработка нанокompозитов весьма проста. При этом нанокompозиты не содержат галогенов и рассматриваются как экологически дружественная альтернатива. Механизм подавления пламени посредством введения слоистых силикатных нанокompозитов основывается на образовании углистого слоя и его структуре. Углистый слой изолирует базовый полимер от источника тепла и образует, таким образом, барьер, уменьшающий выделение летучих продуктов в процессе горения. Хотя подавление пламени является относительно новой сферой применения нанокompозитов, в качестве наполнителей они весьма важны для создания относительно огнестойких полимеров с улучшенными свойствами. Сочетания органоглинозёмов с другими антипиренами-наполнителями, такими, как гидроксид алюминия, также демонстрируют многообещающие свойства.

8.3. Нанокерамика

Только на основе нанопорошков можно изготовить нанокерамику и нанокompозиты – материалы XXI в., которые обладают уникальными эксплуатационными свойствами вследствие проявления размерных эффектов в структуре с зёрнами порядка тех же 0,1 мк. Сфера применения нанокерамики сегодня стремительно расширяется. Это материалы элек-

троники: диэлектрическая и сверхпроводящая, пьезо-, сегнетоэлектрическая, полупроводниковая, керамика. Такие материалы повышают свойства электронных резонаторов и фильтров, световодов, инфракрасных и других оптических преобразователей, пьезопреобразователей и многих других элементов. Отсюда и широкий спектр областей применения: огромный рынок средств связи (мобильные телефоны и т. п.), бытовой техники (ИК-датчики для пультов дистанционного управления, пьезодатчики) и пр. Конструкционные детали из высокопрочной, ударновязкой, износостойкой, коррозионно- и термостойкой нанокерамики могут с успехом применяться в автомобильной, текстильной, кабельной промышленности, нефтегазовом, химическом, строительном машиностроении в качестве различных уплотнений, сопел, фильер и т. д. — там, где жёсткие и напряжённые условия эксплуатации.

Подобные материалы необходимы и медицине: это и биоактивная, и биоинертная керамика, композиты для имплантатов в хирургии, стоматологии и др. Разработаны методики обработки порошков, чтобы в момент применения они имели свои уникальные свойства: высокую активность, заданную дисперсность, чистоту. Особенно важной задачей является обеспечение равномерной плотности нанопорошков в прессовке сложной формы — только в этом случае в спечённой керамике не возникают трещины и другие дефекты. Создана специальная технология, когда при обработке порошков, их прессовании, а затем при финишной обработке поверхности керамического изделия используется ультразвук. Такой подход позволил отказаться от различных органических пластификаторов, которые обычно используют для формования непластичных керамических порошков. Благодаря этому нанокерамика получается более качественной: прочной, твёрдой и ударновязкой, однородной, без крупных пор и трещин, с требуемым размером нанозёрен.

В 1999 г. немецкая компания «Nanogate Technologies GmbH» разработала самоочищающееся покрытие для керамики — WonderGliss. На выставке «CEVISAMA-2000» в Испании был показан еще один продукт — покрытие для плитки Sekcid, разработанное фирмой в результате стратегического партнерства с испанским концерном «Torrecid S.A.» — одним из мировых лидеров в сфере производства фритов и глазурей для керамической промышленности. В настоящее время идет

работа над продуктом Cleartec для душевых кабин фирмы «Duscholux GmbH».

Суть подхода Nanogate достаточно проста. Представьте себе дощечку, из которой торчат лес острых гвоздей, забитых изнутри, или массажную щетку и клочок бумаги, который будет изображать пятно грязи. Сила прилипания грязи обусловлена площадью поверхности их взаимного контакта. Если бы гвоздей не было и поверхность была бы гладкой, то площадь контакта оказалась бы значительной и грязь держалась бы прочно. Однако из-за острых кончиков гвоздей площадь контакта минимальна, и грязь «парит на пуанте». То же самое происходит и с каплей воды. Она не может «растечься» по остриям и поэтому сворачивается в шарик. Если слегка наклонить дощечку, то шарик воды покатится по остриям и встретится с пятном грязи.

Перед пятном «встает проблема выбора»: либо продолжать неустойчиво балансировать на остриях, либо «слиться» с гладкой ровной поверхностью катящейся водяной капли. Естественно, выбор решается в пользу второго варианта. И капли воды, покрытые повстречавшимися на пути хлопьями грязи, скатываются вниз, оставляя за собой чистую сухую поверхность.

Другой подход применили исследователи японского концерна «ТОТО». Они проводили эксперименты с фотокатализатором на основе двуокиси титана. Под воздействием ультрафиолетовых лучей двуокись титана, модифицированная разработчиками на основе нанотехнологий, выделяет активный кислород из воды или атмосферного кислорода. Этот процесс подобен фотосинтезу, в котором хлорофилл использует солнечный свет, чтобы превратить воду и углекислый газ в кислород и глюкозу. Выделенного активного кислорода вполне достаточно, чтобы окислять и расчленить органические материалы или пахучий газ, убивать бактерии.

В результате исследований были созданы покрытия для керамических материалов с принципиально новыми свойствами, позволяющими проводить стерилизацию, деодорирование помещений, разрушение частиц грязи. Особенно актуально это для медицинских учреждений или для помещений, где готовят пищу.

Дальнейшие эксперименты с фотокатализатором позволили открыть еще одно необычное явление. При воздействии света угол контакта

поверхности с водой начинает постепенно уменьшаться. И через некоторое время поверхность начинает проявлять свойства супергидрофильности. Другими словами, поверхность не отталкивает воду вообще, вода не может существовать в форме капли, она полностью растекается тонкой пленкой по всей поверхности, превращается в тонкую прозрачную пленку. Базовые решения, найденные японцами, были запатентованы в 1998 г. (всего было зарегистрировано более 350 патентов), которые получили коммерческое название Hydrotect. Эта технология была лицензирована германским концерном «Deutsche Steinzeug», и в 2000 г. на заводах AgrobBuchtal начато серийное производство керамической плитки для облицовки фасадов KerAion Hydrotect.

Любая атмосферная влага – туман, утренняя роса, дождь – постоянно образует на поверхности плитки KerAion Hydrotect тонкую пленку воды, которая, стекая с вертикальных или наклонных плоскостей фасада, увлекает за собой грязь, не дает ей накапливаться. А активный кислород, выделяющийся под воздействием ультрафиолета, расщепляет органические загрязнители. При этом ликвидируются и потенциальные источники биоразрушения зданий – плесень, грибок, мох и лишайник.

Технология нанесения покрытия Hydrotect в слой последнего обжига плитки позволяет получить износостойкую поверхность. Плитка может эксплуатироваться и в качестве облицовки пола в зонах с интенсивным движением. Сегодня все плитки линии KerAion выпускаются с таким покрытием.

Следует отметить один важный момент: самоочищающиеся поверхности рассматриваются сегодня прежде всего в общем контексте борьбы за снижение затрат и рабочего времени на обслуживание.

По данным ETCSC (японской комиссии по изучению поведения плитки в наружной облицовке), именно вследствие неизбежного постепенного накопления грязи расходы на чистку фасадов, облицованных обычной плиткой, за первые 8 лет ежегодно возрастают примерно на 12,5 %. В последующие 8 лет ежегодный рост расходов достигает 18 % (с учетом появления затрат на ремонт). В случае же плитки с самоочищающейся поверхностью Hydrotect эти расходы так и остаются на постоянном уровне.

Керамический материал, усиленный нанотрубками, был создан материаловедами из UC Davis. Новый материал гораздо тверже традиционной керамики, электропроводен и может либо проводить, либо блокировать распространение тепла в зависимости от ориентации нанотрубок. Экспериментально обнаружен способ химической сортировки нанотрубок в зависимости от их электронных свойств. Создание углеродных нанотрубок — весьма простой процесс. Однако ранее было неизвестно, как их рассортировать. С помощью нового метода геометрически идентичные нанотрубки распределяются по многим типам в зависимости от хиральности.

9. НАНОМЕДИЦИНА

Специалисты из Edinburgh University (Шотландия) за 1,3 млн фунтов стерлингов берутся разработать компьютеры миллиметровых размеров, способные не только обрабатывать информацию, но и связываться друг с другом без проводов, образуя единую сеть. С помощью множества таких компьютеров предполагается контролировать состояние пациентов, которые лечатся дома. Это касается прежде всего пациентов-сердечников. В 1 мм³ таких машин могут содержаться датчики температуры, давления, химического состава окружающей среды и др., а также средства связи с другими компьютерами с помощью беспроводных технологий. Крошечные устройства, попадающие в организм больного из некоего разбрызгивателя, будут вести непрерывную запись параметров состояния человека и передавать информацию в реальном времени на стационарный компьютер.

Исследователи Northwestern University обнаружили токсичный белок — предполагаемый разрушитель памяти людей, страдающих болезнью Альцгеймера. Клинические данные в точности подтверждают теорию, согласно которой ADDL (небольшие, растворимые агрегированные белки, названные «amyloid b-derived diffusible ligands»), накоп-

ливаются с началом болезни Альцгеймера и блокируют функцию памяти при помощи процесса, который представляется обратимым. ADDL способны нарушать работу синапсов по построению памяти, не убивая при этом нейроны.

Физики Eric Mazur из Гарвардского университета и его коллеги, разрезав внешнюю клеточную мембрану, удалили отдельную митохондрию — «энергетическую» органеллу клетки, оставив окружающее содержимое клетки неповрежденным, и перерезали нервные окончания, подходящие к клетке, сохранив при этом ее жизнеспособность. Это событие положило начало лазерной нанохирургии. Лазер оперировал солнечной температурой в течение одной квантиллионной доли секунды в очень маленьком пространстве. Разработана технология производства миниатюрных точек на стекле для использования их в устройствах хранения данных. Лазер работал внутри живой клетки, не убив ее, и не нарушив ее работоспособности. Свет был сверхточно сфокусирован с помощью микроскопа в точку размерами в нескольких сотен нанометров. Существующие методы манипулирования клеточными компонентами (с помощью фокусированного света или магнитных полей) имеют меньшую точность, чем разработанный исследователями. Это инструмент для исследования клеточной структуры, с которым можно будет детально изучить структуру некоторых филаментов (входящих в состав скелетных и других мышц) и понять, как они взаимодействуют. С помощью клеточной хирургии можно также оперировать целых животных. Лазеры сейчас часто используются в хирургии. В будущем лазерные скальпели смогут разрезать внутренние ткани пациента без выполнения дополнительных разрезов, т. е. не вторгаясь напрямую в тело. Или же станет возможным удаление раковых клеток. На сегодняшнее время раковые опухоли диагностируют в стадии, когда они слишком велики для подобной лазерной операции, но исследователи надеются, что методы диагностики улучшатся. Если удастся детектировать отдельные раковые клетки среди других, то можно будет говорить о направленном их уничтожении с помощью новой технологии.

На разработку революционного наноцемента для скрепления восстанавливающихся костей и зубов потрачено около 10 лет. Самоустанавливающийся наноцемент из фосфата кальция (CPC) выпускается в

2-х коммерческих формах: Rebone Gutai для костей и Catai для зубов. Ожидается, что предложенный наноцемент вытеснит существующие технологии склеивания костей. Будучи высокоадаптивным, СРС может быть применен в ортопедии, нейрохирургии, пластической хирургии и стоматологии.

«Бионический» глаз состоит из миниатюрных видеокамер на очках и имплантата с беспроводным приёмником размером 4x5 мм, который «внедряют» под кожу выше уха. Сигналы с видеокамер поступают на 16 электродов «протеза». Они «электрически стимулируют» здоровые клетки сетчатки глаза пациента, а оптический нерв передаёт сигналы к визуальным центрам мозга. Ученые считают, что уже сейчас можно говорить об успехе: благодаря новому устройству ослепшие люди смогли отличать свет от темноты и распознавать простые предметы. Пока ни один из участников эксперимента не жаловался на неудобства, связанные с электронным имплантатом.

Исследователи утверждают, что целью первого испытания была демонстрация безопасности технологий. В дальнейшем планируется долгосрочное исследование, которое призвано продемонстрировать эффективность «бионического» глаза.

American Pharmaceutical и American BioScience завершили клинические испытания ABRAXANE, нового водонерастворимого лекарства на основе наночастиц и противоракового лекарства paclitaxel, предназначенного для лечения метастазированного рака груди. Он показал в испытаниях высокую противораковую активность и оказался менее токсичен, чем его водорастворимый аналог TAXOL, который также содержит paclitaxel в качестве активного компонента. Объявлено, что технология «Protosphere», основанная на создании наночастиц с помощью альбуминового присоединения, использованная в новом лекарстве, позволяет интегрировать биосовместимые белки с лекарствами. Полученные при этом аморфные наночастицы действуют как «биологический транспорт», доставляя активный гидрофобный (водонерастворимый) компонент paclitaxel. В отличие от ныне существующих лекарств на основе таксанов ABRAXANE доставляет гидрофобный химиотерапевтический агент с помощью наночастиц, без необходимости использовать токсичные растворители, которые в настоящее время широко используются в подобных лекарствах.

Маленькие частицы кремния, покрытые золотом, введенные в раковую опухоль и обработанные затем инфракрасным излучением, убивают раковые клетки. Были проведены успешные тесты на основе рака груди человека, которые проводились как на мышах, так и *in vitro*. Нанооболочки этих «патронов» разработаны таким образом, чтобы абсорбировать инфракрасное излучение и затем преобразовывать его в тепловую энергию. Также эти оболочки имеют маркеры раковых клеток, чтобы «нанопатрон» присоединился только к больным клеткам. Нагревая раковые клетки всего до 55 °C, можно разрушить их мембрану и вызвать гибель клетки. Разработать «нанопатроны» стало возможным благодаря тому, что тело человека в основном прозрачно для инфракрасного света. Главными преимуществами новой технологии станет нехирургическое лечение раковых опухолей. Кроме того, инфракрасное излучение и новые «нанопатроны» безвредны для здоровых тканей человека. Благодаря этому возможно будут лечить даже очень маленькие метастазы, которые в настоящее время нельзя определить медицинскими методами.

Благодаря нанотехнологиям искусственные кости, суставы и другие имплантаты в будущем смогут обрести возможность самостоятельно бороться с инфекциями. Для исследований в этом направлении ученые из нескольких американских институтов организовали специальную рабочую группу. В нее вошли представители совершенно разных дисциплин, ранее практически не работавшие друг с другом — микробиологи, электронщики, специалисты по MEMS и ученые других направлений. Примерно в 2-3 % случаев в месте имплантации возникает хроническая инфекция. Единственной возможностью остановить воспаление является удаление имплантата, после чего больному необходимо пройти курс лечения мощными антибиотиками. Самолечащиеся имплантаты должны иметь покрытие из наносенсоров, которые смогут идентифицировать конкретный вид микробов. Используя эти данные, имплантат сам выделит из внутреннего резервуара нужное количество определенного препарата и затем посредством тех же сенсоров проконтролирует эффективность лечения. Информация о состоянии имплантата может передаваться «наружу» с помощью беспроводной связи. Первые интеллектуальные имплантаты появятся не ранее, чем через 7 лет.

Специалистами Institute of Bioengineering and Nanotechnology создан прозрачный липкий пластырь, защищающий открытые раны. При этом материал пластыря пропускает воздух и влагу внутрь, ускоряя заживление раны. Сделан пластырь из специальной наноструктурированной полимерной мембраны, которая позволяет врачу контролировать заживление раны. Поэтому с новым пластырем заранее будет известно, когда процесс заживления завершится окончательно. Материал пластыря также сверхчувствителен: он прилипает к теплему человеческому телу, но снимается легко при действии на него холодной воды. Также мембрана может быть наполнена антисептиком, действие которого ускорит заживление раны.

9.1. Наноробот берется за скальпель

Развитие молекулярной хирургии поможет в борьбе с самыми страшными недугами [23]. Оказывается, препараты, резко замедляющие развитие раковых клеток, используются уже почти десятилетие. Однако проблема заключается в том, что эти лекарства плохо растворяются и с трудом абсорбируются в человеческом организме. Поэтому еще недавно их надо было принимать в значительных количествах, что, в свою очередь, приводило к побочным эффектам. Но здесь на помощь пришла нанотехнология. Израильские ученые разработали препарат, мельчайшие количества которого увеличивают абсорбцию антираковых лекарств.

Нанотехнология – комплекс методов работы с объектами менее 100 нм. Доказано, что вещество может проявить уникальные свойства, если использовать его очень маленькую частицу. В медицине проблема применения нанотехнологий заключается в необходимости изменять структуру клетки на молекулярном уровне. Иными словами, речь идет о «молекулярной хирургии». И хирургами в этом случае выступают нанороботы (наноботы). По сути, они будут осуществлять «ремонт» клеток, манипулируя отдельными атомами и молекулами. Если темпы развития нанотехнологии не замедлятся, то к концу нынешнего столетия удастся сделать обратимым процесс старения.

9.1.1. Нанотаблетки вместо уколов

Таблетки – более удобный способ принятия лекарств, чем уколы. Такой способ является первичным в истории медицины, и множество препаратов по сей день выпускаются в виде таблеток. Препарат растворяется в желудке, попадает в кишечник и всасывается в кровеносные сосуды. Однако многие лекарства нельзя принимать, как выражаются врачи, «перорально», их нужно вводить шприцем. Следовательно, нанотехнологии помогут качественно улучшить структуру многих препаратов так, чтобы их было удобно принимать в виде таблеток.

Причина, по которой многие препараты нужно вводить инъекцией проста – они не смогут преодолеть путешествие по пищеварительному тракту. Кислотная ванна желудка, а затем ферменты в кишечнике расщепляют сложные молекулы, как, например, инсулин. Тогда как аспирин представлен простой молекулой и не расщепляется ферментами.

Исследователь Т. Дессай (университет Калифорнии) создал новую структуру, позволяющую лекарственным веществам сохранять стабильность в желудочно-кишечном тракте. Разработанные ею наночастицы представляют собой нечто вроде шипастых сфер, внутри которых содержится молекула лекарства. Шипы представляют собой кремниевые структуры, которые легко сцепляются с реснитчатой поверхностью кишечника. Суть нововведения заключается в том, что лекарство очень быстро сцепляется со стенками кишечника и вводит молекулы препарата в кровь до того, как вся наноконструкция расщепится.

В настоящее время ученый работает над оптимизацией структуры наночастицы, а также над исследованием возможных последствий распада оболочки в кишечнике. Кроме того, проверяется способность наночастицы транспортировать белки, пептиды и другие макромолекулы, которые нельзя принимать перорально. Более того, лекарство в таком виде можно вводить через любые слизистые ткани, в том числе слизистую носа, легких, т. е. любые поверхности, покрытые ресничками, с которыми сцепляются наночастицы [24].

9.1.2. Нанотехнологии избавят больных от уколов

Инсулин – жизненно важный для больных диабетом препарат – в скором времени возможно будут принимать и в таблетках, а не только путем инъекции. Ученые рассчитывают, что нанотехнологии позволят обеспечить доставку через желудок даже тех лекарств, которые сейчас традиционно вводятся больным прямо в кровь. Некоторые лекарства из-за того, что молекулы препарата разрушаются в желудочно-кишечном тракте, можно вводить больному только напрямую в кровь. Например, инсулин доставляется в организм путем инъекций, которые при всех достоинствах в виде быстрого эффекта и точности дозирования имеют и отдельные недостатки.

Во-первых, уколы предполагается ставить, если не в кабинете врача, то хотя бы с соблюдением минимальных требований гигиены. Носить с собой шприц, ампулы и материал для дезинфекции далеко не так удобно, как компактную упаковку с таблетками. А если инъекции необходимо делать ребенку, взрослым вообще приходится проявлять чудеса изобретательности и педагогической мысли.

Поэтому ученые считают, что нанотехнологии в скором времени смогут кардинально расширить способы приема некоторых лекарственных средств. Описаны сверхмикроскопические капсулы, которые способны перенести внутрь себя молекулы лекарства из желудка и кишечника в кровоток. Таблетка – это не так просто. Добиться попадания лекарства в кровь после того как пациент проглотил таблетку или капсулу – на самом деле не так просто, как кажется. Многие вещества всасываются только в определенных отделах кишечника, а до этого их может разрушить желудочный сок.

Для таких случаев и предусмотрена капсула, оболочка которой позволяет препарату миновать желудок и благополучно добраться до тонкой кишки. Но как быть в том случае, когда на всем протяжении кишечника препарат может разрушиться под действием пищеварительных ферментов? Долгое время эта задача не имела решения, и лишь технологии, позволяющие получать капсулы очень маленького размера, оказались способные справиться с проблемой.

Если удастся обеспечить размер капсулы меньше тысячных долей миллиметра, то она сможет попасть в кровь целиком. Добавьте к

этому возможность высвободить препарат внутри сосудов и получить то самое средство, которое позволяет, если не совсем обойтись без уколов (в срочных случаях инъекции – это единственное спасение), то хотя бы без уколов регулярных.

Из «лекарств будущего», которые уже стали реальностью, можно отметить вакцину от ВИЧ (снижает риск заражения на треть) и, как это ни странно, сам ВИЧ – правда, модифицированный генноинженерным путем и превращенный из возбудителя СПИД в орудие генной терапии.

9.1.3. Шипастые капсулы

Справедливости ради надо отметить, что работа американских медиков не является уникальной. Ранее австралийские ученые пытались создать пластырь с крохотными полыми иглами, которые смогли бы впрыскивать лекарство в кожу с минимальными повреждениями, а их израильские коллеги разрабатывали еще и мазь с частицами, похожими на миниатюрные шипастые шарики.

Схожий принцип – сфера с торчащими из нее кремниевыми иглами – использован и исследователями из Калифорнии. Насколько эффективно эти капсулы будут проникать через стенки кишечника, еще не установлено. Однако предварительные опыты показали, что наночастицы как минимум безопасны и не токсичны. Повредить слизистые оболочки они не в состоянии из-за крайне малого размера, и теперь основная задача, которая стоит перед учеными, – добиться того, чтобы безвредность сочеталась с действенностью [25].

9.1.4. Наночастицы для восстановления спинного мозга

Американские учёные нашли новое применение наночастицам, традиционно используемым для доставки лекарств. Оказалось, что мицеллярные наносферы могут сами служить материалом для ремонта повреждений нервных волокон спинного мозга при оперативном введении их в кровь сразу после нарушения.

Синтетические мицеллы размером до 60 нм используются уже с конца 1970-х гг. для адресной доставки лекарств, например при терапии онкологических заболеваний.

Исследователи из университета Пердью предлагают применять мицеллы для восстановления способности повреждённых аксонов проводить электрические импульсы в спинной мозг. Наночастицы могут использоваться вместо традиционных мембранных уплотнителей за счёт свойств полиэтиленгликоля, образующего внешнюю гидрофобную оболочку мицеллы. Мицеллы сами находят повреждения нервных волокон и формируют уплотнения на этом месте.

Наночастицы способны долго оставаться в кровотоке и не отфильтровываться почками. При этом отсутствуют токсичные свойства данных наночастиц при соблюдении правильной дозировки. Проведены эксперименты на животных, подтвердившие эффективность применения мицелл для восстановления способности проводить электрический сигнал к спинному мозгу у парализованных животных. Измерение общего потенциала показало, что использование мицелл в качестве уплотнителя увеличило количество восстановленных аксонов до 60 % от общего количества поврежденных по сравнению с 18 % в контрольной группе.

9.1.5. Гибридный композит для лечения корневого канала зуба

Разработан гибридный композит для лечения корневого канала зуба. Неослабевающая зубная боль означает, что визит к стоматологу становится неизбежной необходимостью и зачастую единственным вариантом лечения запущенного кариеса является лечение корневых каналов зуба. В ходе процедуры, стоматолог сначала удаляет нерв, затем заполняет корневой канал специальным составом, который должен предотвращать попадание бактерий в канал, герметично закупоривая вход в него. Но, с другой стороны, материал при всей своей прочности, должен быть пластичным, что особенно важно, если врач принимает решение восстановить разрушенную коронку натурального зуба с помощью стекловолоконного штифта и композита. Таким образом, в эн-

додонтических процедурах используются разные материалы, к которым предъявляются разные требования. Основной проблемой является несовместимость этих материалов между собой или их неудовлетворительная адаптация к жестким тканям зуба, что приводит к разгерметизации конструкции и, как следствие, ее разрушению.

Немецкие исследователи разработали материал, который может быть использован для всего комплекса эндодонтических процедур. Материалы, используемые для заполнения корневого канала, должны иметь низкую степень усадки, герметично связываться со стоматологическими материалами и обнаруживаться на рентгеновских снимках. Материал, используемый для восстановления зуба, должен иметь те же свойства, что и живые ткани зуба [26].

9.2. Генетика и биотехнологии

Госдепартамент США объявил о выделении 1,7 млн дол. на поддержку проекта сотрудничества между американским Центром интеграции медицины и новейших технологий (г. Бостон) и российским Международным научно-техническим центром (г. Москва). В сообщении пресслужбы госдепартамента подчеркивается, что этот проект реализуется в рамках договоренностей, достигнутых в 2001 г. между В. Путиным и Д. Бушем, о расширении сотрудничества США и России в борьбе с угрозой биотерроризма. В соответствии с планами проекта американский и российский центры начнут работу по поиску перспективных биотехнологий, имеющих коммерческий потенциал, с целью перевода бывшего советского биологического исследовательского потенциала военного характера, на сугубо гражданские проекты.

Stuart Kim, PhD, associate профессор Stanford School of Medicine, создал словарь генома, который может помочь исследователям понять роль вновь обнаруженных генов, а также пролить свет на эволюцию функции гена в течение времени.

Пол Аллен, один из основателей Microsoft, выделил 100 млн дол. на создание частной исследовательской организации Allen Institute for Brain Science в Сиэттле. Объявленная цель работы института – расшифровка взаимосвязи между генами и строением мозга. Одним из

первых проектов станет Allen Brain Atlas – атлас генов, в котором предполагается идентифицировать 10,000 генов в год. Атлас будет реально моделировать мозг мыши, гены которого на 99 % идентичны генам человеческого мозга, что делает результаты исследований применимыми к человеку. Значительно подешевела расшифровка генома человека. Сейчас этот научный процесс стоит «всего лишь» около 50 млн дол. Еще не так давно подобный анализ оценивался в несколько миллиардов долларов. Ученые предполагают, что при таких темпах развития геномной инженерии уже через 10-15 лет стоимость анализа будет не больше 1 тыс. дол.

Quantum Dot Corporation представила Qdot™ Streptavidin Conjugates – новый класс реагентов для создания флюоресцентных меток, основанный на квантовых точках SOTA. Узкий профиль излучения нанокристаллов Qdot делает их удобными для многочисленных приложений. Новые нанокристаллы очень яркие, исключительно фотостабильны и устанавливают эффективные метки на биологические молекулы. Все цвета могут быть получены из единого источника, что упрощает их применение. Уникальные полезные характеристики полупроводниковых кристаллических наночастиц Qdot Conjugates делают их лучшим на сегодня инструментом для биотехнологических и диагностических целей.

Ученые из Harvard University (США) исследовали свойства отдельных молекул ДНК при помощи твердотельной нанопористой мембраны. Эта технология позволяет проводить скоростной анализ структуры ДНК. Согласно отчету исследователей твердотельные поры предоставляют новый способ изучения конфигураций свертывания и соединения отдельных молекул полимеров, обнаруживать разницу между химически идентичными молекулами в статистическом ансамбле и индуцированные изменения в молекулярной структуре.

Altair Nanotechnologies Inc. анонсировала коммерческий наноразмерный оксид циркония как применимый для зубных наполнителей и протезирования. Наноразмерный оксид циркония идеален для применения в стоматологии вследствие своей прочности, прозрачности в оптическом диапазоне и непрозрачности в рентгеновском диапазоне электромагнитных волн. Это делает оксид незаменимым для применения с протезными составами, затвердевающими под действием ультрафиолетовых лучей.

Маркой косметики японского визажиста Шю Уемура разработана серия продуктов для глубокого увлажнения сухой кожи Depsea Therapy Moisture Recovery. В эту линию входит продукт Nanowater, обеспечивающий глубокое увлажнение кожи при помощи нанокапсул.

Фармацевтический концерн «Schering AG» (Германия) расширил свою исследовательскую деятельность в области регенеративной медицины. Для этой цели в г. Кобе (Япония) создается исследовательский центр, который станет частью глобальной исследовательской структуры концерна «Schering AG» и будет играть ведущую роль в области регенеративной медицины, к которой относятся такие инновационные направления, как генная или клеточная терапия. Целью этого направления медицины станет регенерация и восстановление физиологических функций, в том числе функций головного мозга. Эта область открывает широкие перспективы в терапии неизлечимых, хронических, инвалидизирующих заболеваний, для которых пока нет эффективных методов лечения.

Японские ученые (Кансайский университет) закончили разработку нового образца «безболезненной» инъекционной иглы, прототипом для устройства которой послужило жало москита. На это изобретение уже выдан государственный патент и в декабре иглы нового образца поступят в массовую продажу. Стоимость новых игл будет не намного выше обычных. Главная идея изобретения – производство сверхтонких гибких игл. За основу ученые взяли жало москита. Очень тонкое, оно в диаметре достигает всего лишь 80 мк. Состоит жало из гибкого хитина. Когда москит кусает человека, жало немного вибрирует и раздвигает волокна ткани, не повреждая их. Кроме того, жало москита имеет зубчатую поверхность. Тщательно изучив его строение и особенности, исследователи создали иглы диаметром 85 мк (более широким, чем жало москита) и длиной 1-2 мм. Изготавливают иглы из полилактидной кислоты – вещества, которое обычно применяется для производства рассасывающихся хирургических нитей. Острые иглы, так же как и жало насекомого, вибрирует от воздействия электроимпульсов, вырабатываемых микродвигателем. Когда оно вонзается в кожу пациента, производится впрыскивание анестезирующего вещества. При этом достигается полный обезболивающий эффект. Специалисты полагают, что новые иглы будут активно применяться для инъекций не-

больших доз препаратов, особенно практикующихся при лечении кровеносных сосудов, сосудов головного мозга или сердца.

Starpharma образует альянс с IDT для совместного проведения первой фазы клинических испытаний на человеке нового продукта Starpharma, VivaGel, основанного на дендримерах нанопрепарата – ингибитора ВИЧ-инфекции.

10. ВОЕННЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

В лабораториях промышленно развитых стран (США, Японии, Германии и др.) проводятся крупномасштабные разработки многих типов наномикросистем. Возможности военных применений таких микросистем нельзя не учитывать, так как они имеют прямое отношение к проблемам национальной безопасности не только каждой страны, но и всего человечества. Например, США уже провели испытание в Афганистане так называемой «пыли» – микроскопических средств передачи информации. Эта «пыль» буквально разбрасывается по вражеской территории и передает информацию о численности противника, характере его вооружения и т. д. Поскольку «пылинки» ничтожно малы и распыляются в больших количествах, обнаружить и уничтожить это средство разведки полностью фактически не возможно. «Умная» пыль – сенсоры объемом в кубические миллиметры, или «мошки», проделали путь от научных лабораторий к компаниям и корпорациям, таким, как, например, Intel. Они сочетают в себе технологию радиочастотной коммуникации с МЭМС для мониторинга ситуаций, в которых люди не смогут сделать подобного.

Центр надежных нанотехнологий призывает к созданию международной структуры, которая будет следить за развитием нанотехнологий и молекулярного производства. «Самая большая опасность в молекулярной нанотехнологии и производстве – изготовление опасных видов оружия и другие непредвиденности...»

10.1. Военные нанотехнологии в США

В 2003 г. военное ведомство США затратило на научные исследования в сфере нанотехнологий 201 млн дол. Для сравнения: в 2002 г. на эти цели было направлено 180 млн дол., в 2001 г. – 123 млн дол., в 2000 г. – 70 млн дол. Нанотехнологии (технологии на уровне атомов) могут оказать крупнейшее со времени изобретения пороха воздействие на военное искусство.

Первые исследования в этой сфере в США начали проводиться в начале 1980-х гг. В настоящее время нанотехнологии используются в военно-морском флоте США, в частности для изготовления защитных костюмов, которые отличаются особой прочностью, надежностью и долговечностью. Современные военные исследования фокусируются в 3-х направлениях: наноэлектроника (кардинальное уменьшение размеров и веса электронных приборов и деталей); наноматериалы (создание материалов, обладающих различными уникальными свойствами); бионанотехнологии (совмещение свойств живой клетки и искусственного устройства). Совокупные ассигнования администрации США на исследования в нанообласти в 2003 г. составили более 570 млн дол., почти на 60 млн дол. превысив уровень 2001 г.

Оборонный бюджет США на 2008 г. в размере 459,3 млрд. дол. включает ассигнования в размере более 110 млн дол. на научно-исследовательские разработки в области нанотехнологий, которые могут иметь военное применение.

Пентагону предусматривается выделить 1,2 млн дол. на «технологическую инициативу по оружейным микробоеприпасам на основе усовершенствованных нанотрубок» и 3,6 млн дол. – на «нанотехнологический микропроцессорный взрыватель». При этом 1,6 млн дол. выделяется на работы по «броневой защите на основе углеродных нанотрубок» и 900 тыс. дол. – на исследования по «прозрачной нанокомпозитной броне» для использования вместо пуленепробиваемого стекла в военной технике.

В бюджет заложены также 8 млн дол. на работы по наноструктурному титану, 4,8 млн дол. – на создание «компьютерных устройств на основе композитных углеродных нанотрубок для применения в космосе» и 1,6 млн дол. – на работы по «нанокристаллическому взрывоус-

тойчивому цементу». Еще 12,1 млн дол. выделено на несколько параллельных программ по созданию «интегрированных наносенсоров для обнаружения ядерной, биологической и химической угрозы» и 6,4 млн дол. – на две программы по наноспутникам, включая разработку ракеты-носителя для наноспутников.

Конгресс разрешил Министерству обороны США предоставить грант в размере 2,4 млн дол. Институту по нанонаукам и нанотехнологиям при университете штата Айова и грант в размере 4 млн дол. Альянсу по наноздоровью, который является крупнейшим в мире исследовательским проектом по применению нанотехнологий в медицине и здравоохранении, в составе которого более 40 лабораторий из 7 ведущих университетов США.

США – лидер в исследованиях и инновациях по нанотехнологиям». Федеральные инвестиции в наноразмерные науки и инженерные исследования являются хорошо вложенными средствами. Технологии солнечных батарей, улучшенные материалы, сохранение энергии и медицина – это направления, по которым несомненно будут получены выгоды: экономические и общественные – от продвижения в нанотехнологиях.

Годовой бюджет осуществляемой национальной нанотехнологической инициативы в 2007 г. составил 1 млрд. 350 млн дол., а в 2008 г. увеличился до 1 млрд. 450 млн дол. В настоящее время на мировом рынке отмечено уже более 300 ед. продукции, производимых по нанотехнологиям, доходы от реализации которых оцениваются на уровне 32 млрд. дол. К 2014 г. мировой рынок продукции на основе нанотехнологий может достигнуть 2,6 трлн дол.

10.1.1. Военные нанотехнологии в Израиле

Боевой робот-шершень. Израильские специалисты работают над несколькими военными проектами, в которых предполагается использование нанотехнологий. Один из самых амбициозных – боевой робот-шершень. Предполагается, что такой летательный аппарат будет использоваться для обнаружения и уничтожения противника на поле боя в первую очередь в районах жилой застройки. «Шершень» планирует-

ся оборудовать видеокамерой, которая позволит передавать картинку на пункт управления войсками, также он сможет нести на себе заряд взрывчатки.

Помимо боевых нанороботов, израильские ученые разрабатывают систему микродатчиков, которые можно будет разбрасывать на территории противника, чтобы с их помощью в режиме реального времени получать всевозможную информацию о происходящем на месте. Также идут исследования, направленные на создание новых видов индивидуальной защиты военнослужащих. Ученые разработали легкий и суперпрочный материал для производства специальной одежды для бойцов, которая призвана заменить тяжелые бронежилеты. В настоящее время в г. Кирьят-Гата построен завод стоимостью более 3,5 млрд. дол. для разработки и производства подобных материалов.

10.1.2. Нанотехнологии в Великобритании

Наиболее интересным нанопроектom является Micromechanical Flying Insect (MFI) – механическое летающее насекомое. В рамках программы предполагается создание микроробота-шмеля. Доктор Д. Баркер, профессор Центра исследований в области нанoeлектроники (г. Глазго) создал математическую модель процесса сборки микроустройств в стаи и обмена информацией между ними для совместных действий.

Ведутся разработки моделей боевого применения групп MFI в различных видах боя. Планируется, что себестоимость таких насекомых составит около 10 центов, а производить их будут так называемые «нанофабрики» прямо на поле боя.

10.1.3. Нанотехнологии в Китае

В настоящее время в Китае насчитывается около 800 компаний, занимающихся внедрением нанотехнологий, и более 100 научно-исследовательских лабораторий. Характер их работы традиционно остается закрытым. Однако не исключено, что большинство из них ориентиро-

ваны на удовлетворение нужд оборонно-промышленного комплекса. Наибольший интерес у китайских военных вызывают микрочипы, способные повышать живучесть личного состава при применении противником оружия массового поражения.

10.1.4. Биооружие XXI в. – насекомое, съедающее танк

«The Observer» сообщает, что американские военные рассматривают возможность использования в вооруженных конфликтах принципиально нового химического и биологического оружия. Это будут не яды и не вирусы. Новое оружие, как сообщается, вообще не должно будет наносить личному составу физического вреда. Речь идет об использовании против сил противника транквилизаторов, а также генетически измененных насекомых, которые будут истреблять топливо и боеприпасы, а отнюдь не людей.

«The Observer» утверждает, что в редакцию попали копии неких секретных документов. В одном говорится, что еще 2 года назад Пентагон обратился к ученым Пенсильванского университета с просьбой изучить возможность использования успокоительных средств в военных целях. Ученые пришли к выводу, что для военных или антитеррористических операций лучше всего подходят препараты под названием диазепам (также известные как сибазон, седуксен или валиум) и дексмететомидин, использующийся в США для успокоения больных, подвергаемых интенсивной терапии. Эти препараты и предлагается использовать для успокоения толпы людей.

В другом документе говорится о предложении, поступившем из Исследовательского управления ВМС США. Работники управления предлагают выращивать генетически измененных насекомых, способных разъедать дороги и взлетно-посадочные полосы на территории противника, а также целенаправленно разрушать металлические части, покрытия, топливо и смазочные материалы у военной техники и вспомогательное оборудование.

Все эти исследования проводятся в рамках англо-американской «программы несмертоносных вооружений». Однако, как сообщает «The Observer», из попавшего в редакцию документа явствует, что между

британцами и американцами возникли серьезные разногласия. В частности, англичане поддерживают тезис о том, что использование транков против вражеских солдат является нарушением Конвенции о запрещении химического оружия от 1991 г., запрещающей использование в военных целях химических препаратов, которые могут причинить смерть, временную недееспособность или долгосрочный вред здоровью. То же касается использования генетически модифицированных микробов или насекомых: по мнению некоторых экспертов, в результате будет нарушена Конвенция о запрещении биологического оружия.

10.1.5. Нанотехнологическое оружие России

Сверхпрочные бронежилеты толщиной в несколько миллиметров, невидимые пушки, миниатюрные роботы-разведчики и другие разработки оборонных НИИ в недалеком будущем совершат настоящую революцию в военном деле. Путь к созданию оружия на новых физических принципах открыли нанотехнологии. Эту область наши оборонщики стали осваивать сравнительно недавно, и результаты, в том числе очень неплохие, уже есть.

Роль наноисследований в интересах армии – закрытая тема, потому что речь идёт о столь разрушительном оружии, в сравнении с которым бледнеет даже атомная бомба.

Комплексное использование нанотехнологий в оборонной промышленности способно кардинально изменить боевые действия и характер современной войны. Прорывные научные разработки уже применяют при создании военной и специальной техники. В первую очередь упор делается на развитие систем вооружения, связи, элементов армейской экипировки, средств радиационной, биологической, химической разведки и военной медицины. Государство готово и дальше финансировать исследования в этих областях. Напомним, что на реализацию национальной программы развития наноиндустрии до 2015 г. в России собираются направить 180 млрд. руб. Немалую часть этих денег потратят на военно-научные программы.

Наноразработками в оборонном комплексе занимаются не только в России, но и в секретных лабораториях США и Великобритании, Япо-

нии и Китая. Например, Пентагон ежегодно тратит на свои нанопрограммы до полумиллиарда долларов. О таких проектах в России и за рубежом известно мало. Но даже те крохи информации, что просачиваются в открытую печать, впечатляют. «Конструирование» материалов на молекулярном уровне выглядит фантастикой. Представьте себе армейский камуфляж, который с помощью нанокраски делает военную форму мимикрирующей. Облаченный в нее солдат в пустыне сливается с песком, в лесу теряется в зелени, в горах – среди камней. Броня танка или бронетранспортера, изготовленная по нанотехнологиям, может стать «жидкой» – повреждения от вражеских снарядов на ней «затянутся» самостоятельно. Применение так называемого аморфного кремния превратит армейские аккумуляторы в практически неиссякаемый источник электроэнергии.

Но, пожалуй, самыми впечатляющими и одновременно пугающими выглядят возможности нанотехнологий для создания оружия. Ученые, к примеру, всерьез говорят о появлении в армейских арсеналах взрывчатых облаков. Едва заметные глазу запрограммированные бомбы-пылинки станут окутывать вражеские объекты и поднимать их на воздух. Такие же облака «умной пыли», где каждая песчинка представляет собой крохотную систему видеонаблюдения, откроют совершенно новые горизонты для разведки. Речь также идет о создании миниатюрных, размером с насекомое, боевых роботов-разрушителей и воздушных шпионов, которые со временем заменят беспилотные самолеты-разведчики [27].

Российские специалисты работают над созданием вооружения и военной техники с использованием нанотехнологий. Ученым удалось достичь определенных успехов в применении нанотехнологий в оборонно-промышленном комплексе, в производстве современных вооружений, военной и специальной техники. Причем эти результаты носят не чисто научный, а прикладной характер.

Финансирование данных разработок будет продолжаться, а правительство, как и прежде, будет сосредоточено на внедрении нанотехнологий в оборонной сфере. Отечественные и зарубежные военные эксперты сходятся во мнении, что их применение является одним из прорывных направлений развития систем вооружения, связи, элементов экипировки военнослужащих, средств радиационной, биологичес-

кой, химической разведки и военной медицины. Комплексное использование нанотехнологий в оборонной промышленности способно кардинально изменить характер ведения боевых действий и характер современной войны.

В декабре 2008 г. в Москве состоялся первый международный форум по нанотехнологиям. Его посетители смогли ознакомиться с некоторыми разработками в этой области. Напомним, что для реализации различных проектов в этой области в России в 2007 г. создана Российская корпорация нанотехнологий. Основными направлениями оборонных исследований российских ученых являются создание высокопрочных материалов («жидкая броня»), мощных энергоисточников («аморфный кремний»), невидимых и меняющих цвет объектов, наноматериалов для униформы военнослужащих, новой защиты от оружия массового поражения и других.

Работы в этом направлении также ведутся в других странах: США, Великобритании, Израиле и Китае. В середине 1990-х гг. Пентагон включил нанотехнологии в список 6 стратегических областей фундаментальных исследований, что предопределило стабильное финансирование данной научной области на долгосрочный период.

10.2. Жуки-киборги вылетели на пробную разведку

Насекомые, управляемые с пульта ДУ, присутствуют не в одном фантастическом фильме и рассказах. Незаметные и ловкие разведчики, оставляющие позади любой микроскопический беспилотник, до сих пор виделись военным лишь в сладких снах. Но если есть заказ, ученые и инженеры рано или поздно его выполнят.

Небезызвестное научно-исследовательское агентство Пентагона DARPA еще в 2006 г. открыло тему «скрещивания» насекомых с микроэлектромеханическими системами — Hybrid Insect MEMS. За превращение разнообразных букашек в киборгов взялись сразу несколько коллективов. Особенно интенсивно работа закипела в «совместном предприятии» специалистов из Калифорнийского в Беркли и Мичиганского университетов.

Немало экспериментаторы поломали головы над оптимальной системой управления насекомыми. В 2008 г. группа под руководством М. Махарбиза показала общественности первые успехи: сигналы, подаваемые на имплантированные в жуков электроды, заставляли последних начинать или прекращать махать крыльями (в зависимости от полярности напряжения). В первых опытах жуки были закреплены неподвижно, а сигналы посылались по проводкам. Далее ученые сумели отвязать своих подопечных: крошечные схемы управления помещали на самих насекомых. При этом подачей импульсов на отдельные мышцы, а также при помощи полоски светодиодов, расположенной перед глазами летающего существа, исследователи научились задавать жуку направление движения. Но последовательность команд была зашита в память микросхемы, так что насекомое могло выполнять только жестко предписанный «план полета». Чтобы получить подлинное ДУ, нужно добавить радиоканал. А это увеличивало вес электроники, что грозило настоящим тупиком.

И вот в начале 2009 г. объединенная команда двух университетов порадовала продолжением темы; впервые были «созданы» летающие насекомые-киборги с радиуправлением. В конце января американские умельцы выступили в Италии на международной конференции по микроэлектромеханическим системам IEEE MEMS-2009. Жуки-носороги, использованные в данном эксперименте, имели 4-8 см в длину и весили 4-10 г. Им имплантировали 6 электродов в мускулы и «мозги», а команды на взлет, посадку или разворот теперь могли подаваться на расстоянии – с ноутбука.

Для этого были собраны крошечные контролирующие устройства, которые преобразовывали команды, принимаемые по радиоканалу, в электрические импульсы, подаваемые на электроды. Эти контроллеры и наклеили на спины подопытным созданиям. Плата с микросхемой, приемопередатчик, работающий на частоте 2,4 ГГц, дипольные антенны, аккумулятор на 8,5 мм в час – таковой получилась ноша жуков-киборгов. А потянула она всего на 1,33 г, что меньше предельной грузоподъемности жука-носорога, который может взлететь с 3 г «на борту». Это, кстати, одна из причин, по которой для новых опытов выбрали подобных созданий: не каждый жук поднимет даже такой крошечный электронный модуль.

В среднем через полсекунды после электростимуляции соответствующего нерва жуки поднимались в воздух. Вероятность успеха при нажатии на нутбуке кнопки «взлет» составила 97 % (29 выполненных команд из 30 попыток). В самом же полете жуки успешно маневрировали по распоряжениям ученых (выполнялись простые сигналы «вправо» и «влево»).

Причем, как оказалось, для уверенной коррекции курса не требовалось светить в правый или левый глаз создания белыми светодиодами. Достаточно было просто подавать электрические импульсы сразу в зрительные участки нервной системы. Исследователи полагают, что жуки могут сыграть роль универсальных платформ для разнообразных датчиков, в том числе микроскопических видеокамер. Тут опять-таки американские ученые похвалили своих трудяг-носорогов, отметив, что их предельная грузоподъемность в 3 г, за вычетом 1,3 г на схему управления, означает возможность смонтировать на спине насекомого целевую нагрузку весом 1,7 г.

Учитывая спонсорство DARPA, нетрудно предсказать военное применение новой технологии. Но сами разработчики жуков-киборгов отмечают, что гражданское применение также возможно. Скажем, можно вообразить поиск пострадавших в завалах. Долгосрочная цель проекта и вовсе фантастична: ученые мечтают максимальным образом задействовать собственные возможности насекомого. Зачем нужна камера, если у жука есть глаза? Может, лучше научиться снимать сигнал с них и кодировать его в радиоимпульсах, передавая картинку на компьютер? А «тяжелый» аккумулятор для электроники в будущем может уступить место системе, извлекающей толику энергии из самого насекомого, благо он прекрасно умеет пополнять ее запасы (т. е. кормиться).

Первое приближение к такой перспективе, что другая команда исследователей из университета Корнелла превратила мотылька *Manduca sexta* (табачный бражник) в летающий химический сенсор. Как и в предыдущем примере, авторы этой работы имплантировали электроды в насекомое на стадии куколки. Несколько контактов с определенными долями нервной системы (внедренных в голову существа) позволили снимать впоследствии четкий электрический сигнал при «экспозиции» бабочки ряду химических соединений.

Целевые молекулы, к которым чувствительно это насекомое, вызывали в 10 раз более сильный отклик, чем нецелевые. А это значит, что по идее, совместив биоинженерию и генетические модификации насекомых, можно построить живые датчики, облетающие местность по заданному маршруту и передающие по радио результаты измерений.

До полноценного управления насекомыми, конечно, еще далеко. Но ведь Корнеллом, Беркли и Мичиганом список университетов, где работают над насекомыми-киборгами, не исчерпывается. И можно предсказать новые успехи на данной ниве. Так что сны генералов понемногу сбываются.

10.3. Весь мир работает над созданием «солдат будущего»

Сотрудники Центра личных полевых систем военнослужащего армии США (г. Натик, штат Массачусетс) решили подойти к проблеме радикально. Полностью отбросив все современное оборудование, они буквально «с нуля» приступили к разработке нового. По их представлениям, американский солдат в 2011 г. должен носить специальную высокотехнологичную униформу, в которую будет встроено все необходимое ему оборудование. Сама униформа станет отслеживать всю жизненно важную информацию и свяжет солдата с единой сетью армии США, в состав которой будут входить спутники, беспилотные летательные аппараты и машины-роботы, которыми Пентагон планирует обзавестись в ближайшем будущем. Идея разработчиков состоит в том, чтобы создать интегрированный комплекс систем, так чтобы не пришлось всякий раз решать, что из жизненно необходимого оборудования взять солдату с собой, а без чего можно обойтись. При этом новая униформа, получившая название «костюм скорпиона», будет весить не более 22,5 кг, что намного удобнее сегодняшнего комплекта оборудования, весящего в совокупности 54 кг.

Униформа подключит солдата к разрабатываемой в настоящее время «боевой системе будущего», на разработку которой Пентагон уже выделил 15 млрд. дол. Элементами этой системы станут легкие

танки, мощные компьютерные сети, а также мощный флот, состоящий из дистанционно управляемых летательных аппаратов и роботов. Первый батальон новой системы по плану должен быть сформирован в конце 2010 г. Благодаря «костюму скорпиона» солдат станет элементом этой боевой компьютерной сети. Нижнее белье предполагается оснастить датчиками, контролирующими частоту пульса, температуру тела и ритм дыхания. Сама униформа будет включать в состав медицинских жгутов, которые при необходимости могут дистанционно затягиваться или ослабляться. Броня будет интегрирована с емкостями для хранения воды, боеприпасов, источников питания и всего того, что обеспечивает солдату подключение к сети.

Одним из наиболее сложных элементов системы станет шлем со встроенными миниатюрными камерами, позволяющими следить за противником в темноте и под покровом леса. Изображения, получаемые камерами, будут отображаться на полупрозрачных экранах, встроенных в солдатские шлемы. Каждый солдат сможет получать изображение с помощью неохлаждаемых инфракрасных камер, которые даже в сегодняшней американской армии нашли пока только лишь ограниченное применение. Правда, они дают намного худшее разрешение, чем обычные приборы ночного видения, но зато изображение получается значительно более контрастным.

Солдаты, потерявшие связь со своим подразделением – проблема иракской и других войн последнего времени, – смогут прямо на шлеме отобразить цифровые карты местности и данные о собственном местонахождении. На них же могут выводиться изображения, получаемые беспилотными самолетами или, например, датчиками других бойцов подразделения. Шлем будет оснащен также лазерной системой опознавания «свой-чужой».

Пока неясно, каким образом боец будет взаимодействовать с системой. Подошло бы управление голосом, но возможны проблемы из-за различного акцента. Рассматривается возможность встраивания панели управления в рукав. При этом разработчики намерены позаботиться и о том, чтобы дать бойцу доступ к информации, одновременно не перегружая его. И в довершение ко всему – униформа будет обладать открытой архитектурой, а также, возможно, автоматической «хамелеонообразной» системой камуфляжа.

Даже винтовка у бойца будущего будет новой. Через 5 лет на смену M16 и M4 придет XM29. Она рассчитана на те же патроны, но также сможет стрелять программируемыми «гранатами воздушного взрыва». Сможет она стрелять также и нелетальными боеприпасами. На вооружении солдат будущего будут и высокотехнологичные беспроводные сети минных полей.

Отметились и разработчики нанотехнологий: открылась новая лаборатория с целью разработки искусственных мышц для облачения солдата, которые помогут ему стать сильнее и быстрее. Изучается возможность облегчения униформы за счет использования пористых материалов, которые могут закрываться, блокируя доступ химическим веществам, а также создания волокон, которые могут «застывать» в определенном положении, превращаясь в шину для сломанной конечности. Исследуется также возможность контроля за попаданием токсичных веществ в организм с вдыхаемым воздухом. В результате в организм автоматически будет введено необходимое лекарство. Со временем датчики смогут даже определять место ранения.

Новое обмундирование французских пехотинцев носит название «Фелин». Производителем его является компания «Sagem 16454», у которой Главное управление по вооружению Франции намерено закупить в общей сложности более 22 тыс. комплектов, потратив на это около 1 млрд. евро. По условиям контракта, первую тысячу комплектов солдаты наденут на себя в начале 2010 г. Еще 3 тыс. «Фелинов» военные получат до конца будущего года. Как ожидается, полностью поставки наборов индивидуальной экипировки будут завершены к 2015 г. В состав набора, который весит около 25 кг, входят оружие, боеприпасы, бронежилет, защитный шлем с двумя дисплеями и микрофоном, средства связи и обмена данными, портативный компьютер, приемник GPS, а также дневная норма продуктов питания и воды. Учитывая большое насыщение экипировки электроникой, пришлось решать и проблемы с ее подзарядкой. Так, у каждого солдата будут специальные аккумуляторные батареи, которые можно будет заряжать на специальных станциях, установленных на бронетранспортерах.

Что касается вооружения французских «бойцов будущего», то предусмотрены 4 варианта: штурмовая винтовка «Фамас» калибра 5,56 мм, снайперская винтовка FRF2 калибра 7,62 мм, легкий пулемет «мини-ми» калибра 5,56 мм, а также винтовка «Папоп» с подствольным гранатометом.

Решить одну из главных проблем современных военных конфликтов, когда большая часть боекомплекта расходуется впустую, разработчики «Фелин» предлагают при помощи специальных прицелов дневного и ночного видения, а также усовершенствованных средств целеуказания, которые могут работать в видеорежиме. Последняя функция, кстати, позволит внутри сети боекомплектов «Фелин» передавать изображение в режиме реального времени.

В последние годы практически все более-менее значимые в военном отношении страны серьезно работают над проектированием и созданием новой начинки для своих «солдат будущего». В США на базе Массачусетского технологического института (МТИ) создан Институт солдатских нанотехнологий. Ученые этого заведения разрабатывают совершенно новую концепцию солдата. Они намерены сделать из человека, обмундирования и оружия некий гибрид, элементы которого будут тесно связаны между собой. Основу всего этого механизма будет составлять специальная «динамическая броня», которая хотя и будет выполнять функции, в том числе и бронежилета, но будет легкой и плотно облегать тело солдата.

Кроме того, такое обмундирование способно работать и как комплексный медицинский центр, помогая бойцу носить многочисленные килограммы вооружения экзоскелет. Разработчики намерены освободить солдата для выполнения своей главной функции — ведение боя, а броня же самостоятельно будет или трансформироваться в броню, экзоскелет или начать оказывать хозяину медпомощь. Ожидается, что благодаря такой новинке, которая будет создана и поставлена в войска к 2020 г., физическая сила американского солдата увеличится в 3 раза.

Не отстают и немецкие военные, которые уже ведут тестирование нового снаряжения для своих пехотинцев в Афганистане. Униформа «солдата будущего» Бундесвера имеет угольные слои в ткани, предоставляющие защиту от химических веществ, а также систему температурного контроля. Оружие стандартного комплекта обязательно ос-

нащено инфракрасными прицелами нового поколения.

Склонная к быстрому восприятию всяких технических новинок Южная Корея также уже начала реализацию амбициозной программы: к 2025 г. оснастить солдат не хуже героя известного боевика «Робо-коп». В ходе первого этапа, который планируется завершить примерно к 2015 г., будет создана новая автоматическая винтовка ХК-11, стреляющая 20-миллиметровой шрапнелью. Будут также разработаны единое переносное устройство связи, многофункциональный шлем и униформа нового поколения. В шлем монтируются миниатюрные видеокамеры, устройства GPS и аппаратура связи. В результате на командный пункт в режиме реального времени будет поступать видео- и аудиоинформация. Униформа и шлем должны иметь бронезащиту. Все оборудование способно автономно действовать в течение 72 ч, после чего потребуется подзарядка.

В ходе второго этапа программы, который будет завершён к 2025 г., к уже имеющемуся оборудованию добавится автоматическая система наведения и стрельбы в дневное и ночное время. Униформа получит функции защиты от оружия массового поражения, дополнительной бронезащиты, а также мониторинга за состоянием солдата и регулировки температуры.

Примечательно, что в Южной Корее призывников, которых из-за низкой рождаемости становится все меньше и меньше, планируют постепенно заменять боевыми роботами. К 2020 г. корейская армия прогнозирует принять на вооружение 2 вида таких аппаратов: один – размером с большую собаку весом несколько десятков килограммов, а второй – будет представлять полноценную боевую машину размером с БМП. Помимо функций разведки и разминирования эти роботы будут способны принимать самостоятельные решения об открытии огня на поражение [28].

11. НАНОИНДУСТРИЯ

По оценке европейской консультативной фирмы «CMP Cientifica», наноэлектронные приборы могут появиться на мировом рынке через 3-7 лет, а не через 10-15 лет, как прогнозировалось раньше. Наноэлектроника станет источником огромных прибылей. Прогнозируемые высокие прибыли подстегивают разработчиков, развивающих ускоренные темпы продвижения своих изделий к рынку. Новые нанотехнологии (такие, как терабитная энергонезависимая память на нанотрубках) подорывают устои нынешних традиционных технологий.

Близкий рынок нанотехники высветил проблему защиты интеллектуальной собственности и патентов, возникшую по той причине, что европейские и американские патентные службы (по их собственному признанию) еще до конца не разобрались в принципах нанотехнологии. Поэтому весьма вероятно, что ранние патенты по нанотехнологии могли быть слишком непрофессионально определены и, как результат, их защита и использование могут оказаться очень проблематичными в будущем.

Оксиды кремния, алюминия и титана являются наиболее важными наноматериалами, наряду с некоторыми металлическими порошками. Предполагается, что самым быстрорастущим сектором рынка наноматериалов будет химико-механическое полирование, при котором используются суспензии с тонкими абразивными частицами. Например, диоксиды кремния и алюминия применяются в суспензиях для полирования металлических и диэлектрических слоев на кремниевых пластинах в полупроводниковой промышленности. Этот сектор рынка, по оценке, составит 400 млн. дол. со скоростью роста более 20 % в год. Диоксид титана используется в фотокатализе и покрытиях. Потенциальное применение предусматривается для строительного кафеля, автомобильных зеркал и осветительной арматуры, а также защитных солнечных экранов.

Компания «Carbon Nanotechnologies» (CNI), производящая углеродные нанотрубки, собирается расширить производство, что может способствовать началу коммерческого применения технологии. Пла-

нируется довести производство одностенных углеродных нанотрубок до 45 кг в смену. В последние годы углеродные нанотрубки стали главным объектом в мире материаловедения. Одностенные нанотрубки (те, что производит CNI) – это микроскопические спирали из атомов углерода, напоминающие рулон проволочной сетки. Благодаря своему размеру и природным свойствам углерода эти трубки проводят электрический ток лучше меди, а тепло – лучше алмазов.

В числе первых коммерческих применений будет добавление нанотрубок в краски или пластмассу для придания этим материалам свойств электропроводности. Это позволит заменить в некоторых изделиях металлические детали полимерными. Продукт на основе нанотрубок, который CNI собирается выпустить, представляет собой проводящий полимер.

Углеродные нанотрубки – дорогой материал. CNI продает его по цене 500 дол. за 1 г. К тому же технология очистки углеродных нанотрубок (отделение хороших трубок от плохих) и способ введения нанотрубок в другие продукты требуют дальнейшего совершенствования. Принятая в 1998 г. японская десятилетняя государственная программа «Astroboy» предусматривает создание наноразмерной элементной, приборной и системной базы электроники, способной работать в диапазоне температур от нескольких градусов Кельвина до 3000 °C в условиях, существующих на поверхности планет, в космосе и при ядерных взрывах. Корпорация исследований совместно с MITI ведут дополнительно 6 программ объемом 75 млн дол.

Вслед за японской национальной программой Конгрессом США была утверждена Американская нанотехнологическая инициатива [29, 30]. На исполнение этой программы из бюджета 2000 г. было выделено 497 млн дол., что составляет 18 % расходов на федеральную поддержку науки этой страны. На порядок большие средства вкладывают в развитие нанотехнологий частные фирмы США. Японии и других развитых стран.

В 2001 г. государственное финансирование программы NNI составило 422 млн дол. Львиную долю этого бюджета (150 млн дол.) получает National Science Foundation (NSF) – одно из 6 федеральных агентств (Department of Defense, Depart. of Energy, National Institutes of Health, NASA, Depart. of Commerce), инициаторов этой программы. Из

Таблица 11.1

Новые нанотехнологические университетские центры

Университет	Название центра	Объект исследования	Финансирование (млн. дол./ 5 лет)
Columbia Univ.	Центр по исследованию электронного транспорта в молекулярных наноструктурах	Зарядовые эффекты и их использование в электронных, фотонных и медицинских устройствах	10,8
Cornell Univ.	Центр внедрения наносистем в информационные технологии	Нанoeлектроника, нанофотоника, наномagnиты	11,6
Harvard Univ.	Центр научных исследований наносистем	Приборные реализации наносистем; междисциплинарные исследования наноструктур	10,8
Northwestern Univ.	Центр по формированию нанорисунков и сенсорным технологиям	Формирование рисунков в мягких материалах для создания химических и биологических сенсоров	11,1
Rensselaer Polytechnic Univ.	Центр исследования управляемых наноструктурных сборок	Композиты, сенсоры, приборы для введения лекарств	10,0
Rice Univ.	Центр нанотехнологических исследований применительно к биологии и охране окружающей среды	Нанобиология и нанохимия; совместимость «мокрых» и «сухих» молекул (по определению R. Smalley «мокрые» молекулы – это молекулы живых организмов, «сухие» молекулы – это наноматериалы искусственного, неприродного происхождения. Решение проблемы совместимости «мокрых» – «сухих» молекул – ключ к созданию новых диагностических методов в медицине и новых методов охраны окружающей среды	10,5

150 млн дол. NSF выделяет 65 млн дол. (на 5 лет) 6 университетским центрам для продвижения исследований в нанотехнологии и для разработки учебно-образовательных программ с целью подготовки специалистов в этой области.

В 2004 г. США планировалось выделить из бюджета на нанотехнологические исследования 849 млн дол. Всего финансируются 14 государственных компаний и агентств, входящих в состав Национальной нанотехнологической инициативы. Также из бюджета было запрошено 123 биллиона дол. на годовые исследования в области обороны и военной промышленности. Наноинвесторы считают, что, увеличивая финансирование в области нанотехнологий, они убьют сразу 3-х зайцев: выиграют войну с терроризмом, усилят оборону страны и улучшат экономическое положение. Такие программы, как NNI, помогут упрочнить мировое положение США в разных областях.

Китайское правительство инвестировало 250 млн. юаней (около 3 млн дол.) в разработку нанотехнологий. Открыт в Пекине национальный центр нанотехнологий, функциями которого станет не только предоставление своих мощностей исследователям в стране и за рубежом, но и распространение нанотехнологий по всему миру. Специализируясь на передовых технологиях, центр будет заниматься как фундаментальными, так и прикладными исследованиями. Центр будет снабжен самым современным оборудованием и также замкнет на себя сеть лабораторий, переданных из ведения Академии наук Китая и университетов Пекина и Цинхуа.

В ближайшей перспективе ученые говорят о развитии 4 основных направлений: изучение процессов на наноуровне и разработка наноустройств; наноматериалы и структуры; нанотехнологии в сфере медицины и жизнеобеспечения; изучение природы наноструктур и их функций.

Напомним, что сейчас Китай – мировой лидер по исследованиям наноуровня. Нанотехнологические разработки стали частью десяти 5-летнего плана развития страны и широко применяются во многих сферах экономики и промышленности. Развитие нанотехнологий может вызвать новую индустриальную революцию в ближайшем будущем.

В г. Сиане, административном центре провинции Шэньси, началось строительство первого в Китае технопарка по освоению нанотехно-

логий. Его площадь составит около 66 га, а общий объем капиталовложений в его строительство предварительно оценивается в 144 млн. дол. Стоимость производимой здесь промышленной продукции, согласно подсчетам, должна составить 66 млн дол. Китайские источники сообщали, что провинция Шэньси совершила прорыв в освоении нанотехнологий в оборонной, химической, металлургической отраслях, а также в легкой промышленности.

Китай играет важную роль в нанотехнологии пластмасс и углерода (финансирование в 2002 г. 80 млн дол., 13 исследовательских центров). Сегодня Китай – один из мировых лидеров по количеству зарегистрированных нанотехнологических компаний.

Основными преимуществами Китая являются высокая гибкость, низкая стоимость труда, отсутствие барьеров для новых технологий, молодое и энергичное общество, венчурный капитал, недооцениваемая валюта (сегодня около 40 % к американскому доллару), низкие налоги, правительственная поддержка, и внутренний рынок из 1,5 млрд. человек.

11.1. Наноиндустрия ближайших лет

Глобальные инвестиции в НИОКР в сфере нанотехнологий постоянно увеличиваются. Не менее 30 государств инициировали национальные программы в этой области. CORDIS, информационная служба по НИОКР при Европейской комиссии расширила свой охват национальных исследовательских программ, относящихся к нанотехнологии, материалам и производственным процессам. В числе прочего в сферу действия CORDIS были добавлены национальные научные программы Бельгии, Испании и Португалии.

Бюджет NIH за последние 5 лет вырос вдвое и достиг 27,3 млрд. дол. Сама организация проводит не так много исследовательской работы. Большая часть финансирования распределяется в виде грантов 212 тыс. исследователей в 2800 учреждениях науки и образования. Ожидаются серьезные изменения. NIH будут не просто принимать инициативу ученых, а стимулировать исследования в наиболее перспективных направлениях. Это позволит сделать науку «с тур-

бонаддувом». Согласно плану научные учреждения должны принимать больше участия в процессе работы над лекарственными препаратами на ранних стадиях, до начала испытаний на добровольцах. Будущее требует гораздо больше «командной науки», которая делается междисциплинарными группами молекулярных биологов, химиков, математиков, психологов, фармакологов и эпидемиологов. Изменения не потребуют дополнительного финансирования. Оплачивать их будут структурные подразделения NIH из своих обычных бюджетов. В 2004 г. было выделено 130 млн дол., за следующие 5 лет общая сумма составила 2,1 млрд. дол. По данным консалтинговой компании «CMP Cientifica», за прошедший год венчурные капиталисты совершили сделок в сфере нанотехнологий на сумму 250-300 млн. дол.

«Mitsui & Co. Ltd.» планирует инвестировать 35,7 млн дол. в течение 5 лет на исследования в области нанотехнологии, биологии и экологии. В проекте будут участвовать исследовательские центры японской торговой компании, занимающиеся биологией, экологией, нанотрубками и наноустройствами.

Компания «Degussa» (г. Дюссельдорф) инвестировала 25 млн евро в «продвинутые» наноматериалы. Организован независимый внутренний проект «Продвинутые наноматериалы Degussa». Новое подразделение будет производить инновативные наноматериалы и проникать в новые сегменты на привлекательных рынках.

«H₂O Innovation» заключила контракт на сумму 360,000 дол. с Department of Aboriginal and Northern Affairs (Манитоба) на установку и обслуживание мембранной системы наночистот для обработки подземных вод, используемых сообществом «Корморана». Система снизит высокий уровень жесткости, нерастворимых соединений, тригалометана, а также устранил из воды железо, бактерии и вирусы.

«Keithley Instruments» и «Zyvex» подписали соглашение о маркетинговой кооперации. Компании собираются совместно разработать новые решения для нанотехнологического рынка. Соглашение призывает к совместному использованию маркетинговых, сбытовых и предназначенных для прикладных разработок ресурсов как часть нового решения, комбинирующего опыт «Zyvex» в создании наноманипуляторов с нанотехнологическими технологиями «Keithley».

NSF присудил 5-летнюю грантовую программу по 2 млн дол. ежегодно таким учреждениям, как University of Missouri, Rutgers, и University of California-Berkeley для организации новых K-12 образовательных центров, из которых около трети специализируются на нанотехнологии. A NanoBusiness Alliance и National Science & Technology Education Partnership (NSTEP) объявили о стратегическом партнерстве с целью улучшения обучения молодежи в области нанотехнологий и расширения рынка труда в этой отрасли. «Национальная нанотехнологическая инициатива» обозначила образовательные центры K-12 как ключ к развитию человеческой базы трудовых ресурсов для будущего нанотехнологии.

11.1.1. Частные инвестиции в России

На первом Международном форуме нанотехнологии глава группы «ОНЭКСИМ» заявил, что группа намерена вложить в нанотехнологии несколько сотен млн дол. [31]. Так, уже приобретена немецко-финская фирма «ОптоГaN», разрабатывающая технологию производства светодиодов, которые потребляют в 7 раз меньше электроэнергии, чем лампы накаливания. Причем ее производство светодиодов в 2 раза дешевле, чем в среднем в мире. Совместно с госкорпорацией «Роснано» и Уральским оптико-механическим заводом создают фирму по массовому выпуску светодиодов. Инвестиции в проект достигают 3,3 млрд. руб., а доля «ОНЭКСИМ» совместно с разработчиками составит 50 % + 1 акция. К 2013 г. новая компания намерена обеспечить выручку в размере 6 млрд. руб. в годовом исчислении.

В настоящее время 55 стран приняли национальные программы развития нанотехнологии. В 2004-2007 гг. объем мирового нанорынка возрос почти в 3 раза — до 1,4 трлн. дол., а к 2015 г. прогнозируется рост до 4 трлн. дол. В 2008 г. частный бизнес вложил в нанотехнологии около 6,6 млрд. дол., а государственный сектор — 6,2 млрд. дол.

Российская доля на мировом рынке «нано» пока составляет лишь 0,07 %. Эксперты отмечают, что отечественная наука развивается в данной сфере успешно, однако процесс коммерциализации разработок не интенсивен. Создание корпорации «Роснано» позволит карди-

нально изменить ситуацию и довести к 2015 г. удельный вес РФ на мировом рынке наноиндустрии до 3 %, а объем продаж увеличить до 900 млрд. руб. Корпорация уже рассмотрела более 800 заявок, поддерживая лишь 6 на общую сумму 7 млрд. руб. В ближайшее время ожидается утвердить более 40 проектов с объемом инвестиций 40 млрд. руб.

В представленных проектах доля частных вложений составляет 19 %, причем в основном это средства самих заявителей. Поэтому одной из задач «Роснано» является поиск частных инвесторов для их финансирования. Эксперты отмечают, что мировой бизнес значительные средства вкладывает в исследования и разработки нанотехнологии в электронике и информационных технологиях (53 % инвестиций), далее следуют обрабатывающая промышленность и производство материалов (29 %), а удельный вес медицины и биологии составляет лишь 3 %. Однако в 2007 г. инвестиции в данный сектор увеличились по сравнению с 2006 г. на 11 %.

Вклад венчурного капитала в финансирование нанотехнологии в мире составляет 700 млн. дол. (это в основном энергетика и охрана окружающей среды).

12. НАНОБУДУЩЕЕ

В среднесрочной перспективе Россия вложит в нанотехнологии около 10 млрд. дол. И именно они проложат кратчайший путь к инновационной экономике [32].

Оказалось, что частицы нано проникли буквально повсюду: сверхпрочные и суперпластичные нанометаллы и несмываемые наночернила; сконструированный с использованием нанотехнологий суперсовременный микроскоп; очищенная с помощью наночастиц вода. При этом неочищенная вода больше похожа на нефтяную смесь, но, по мнению разработчиков, после прогонки через специальные фильтры она пригод-

на для употребления. Подобные очистительные приборы с большим успехом используются в школах Нижегородской области, идет процесс внедрения в Ленинградской области. В «портфеле» госкорпорации «РОСНАНО» уже есть проекты, предполагающие использование нанотехнологий в промышленности, лечении рака, создании технологического сырья для всей российской солнечной электроэнергетики.

Государство готово вкладываться и всячески продвигать нанотехнологии. Запланированные 10 млрд. дол. вполне сопоставимы с мировыми затратами, которые в прошлом году составили 13,5 млрд. дол. Новые разработки требуют достаточно длительного цикла финансирования, а в условиях кризиса длинные деньги есть только у государства. Его задача (а ее решением как раз и занимается РОСНАНО) запустить всю цепочку – от появления научной идеи до ее коммерциализации и массового производства нанопродукта. При отборе проектов госкорпорация будет делать ставку не только на коммерческую выгоду: обязательно будут поддерживаться социальные проекты, прежде всего в области медицины.

Продвижение нанотехнологий позволит России перейти на инновационный путь развития и встроиться в обновленную структуру мировой экономики. К 2020 г. 40-50 % российских предприятий должны будут работать на инновационных технологиях. Затраты на наукоемкую продукцию вырастут почти в 3 раза, и половина расходов придется на частный сектор

Кризис может приостановить положительные тенденции, и потому главное – не растерять накопленный потенциал. Правительство РФ разрабатывает новые меры для того, чтобы стимулировать предприятия к внедрению инноваций. Так, например, из тех денег, которые планируется выделить на поддержку реального сектора экономики, часть средств может быть израсходована на поддержку ведущих инновационную деятельность компаний, причем не только крупных и малых и средних предприятий. Будут увеличены гранты на наукоемкий малый и средний бизнес. Кроме того, предусматривается принятие законопроекта, позволяющего госучреждениям выступать соучредителями при создании наукоемких малых и средних предприятий. Ключевым союзником государства в продвижении нанотехнологий является госкорпорация.

РОСНАНО в ближайшие 8 лет инвестирует в сферу наноиндустрии более 240 млрд. руб., т. е. объем ежегодных вложений составит более 1 млрд. дол. Но при этом она всегда будет опираться на частных партнеров. Им предлагаются очень привлекательные условия: выделяются на срок более 10 лет кредиты под просто невероятно низкую ставку – 8 % годовых. А госкорпорация никогда не будет претендовать на получение контрольного пакета в проекте и будет выходить из бизнес-проектов после того, как компании встанут на ноги. РОСНАНО готова работать как с российскими, так и с зарубежными партнерами. Но главное условие – производство должно быть развернуто обязательно на территории России.

Уже подписано первое соглашение о создании производства с применением нанотехнологий. На Урале будут выпускать с их применением светодиодные лампы. Это разработка российских ученых, которые работали за рубежом, а теперь их идеи возвращаются в страну.

12.1. Прогнозы экспертов

В 1997 г. Ричард Е. Смоли, лауреат Нобелевской премии 1996 г. в области химии, профессор химии и физики Rice University предсказал сборку атомов и появление первых коммерческих наноизделий уже к 2000 г. Этот прогноз оправдался. Интересны и другие предположения Смоли: к 2010 г. станут возможными молекулярная хирургия и ремонт биологических клеток, т. е. путь к самовоспроизводству молекулярных биороботов.

К 2010-2015 гг. J. Storrs Hall, компьютерный специалист Rutgers University предсказывает создание первых образцов нанокomпьютеров.

К 2010 г. биологи считают вероятным появление таких моделей сложных белковых образований, которые позволят синтезировать гены для воспроизводящих себя молекулярных биороботов. Препятствия для создания этих моделей лежат, как это ни странно, не в биологии, а в информатике. Это – недостаточная вычислительная мощность существующих сейчас супер-ЭВМ. Алгоритмы такого моделирования биологам известны. Ниже перечислены реальные пути прогресса на-

ноиндустрии, обеспеченные существующим научным заделом (в том числе созданным в России).

Наномашиностроение

Создание:

- модульного многозондового нанотехнологического оборудования с наборами зондов и программируемых внешних воздействий;
- совместимых с этим оборудованием систем адаптивного проведения техпроцессов на основе туннельного наномониторинга и программных средств искусственного интеллекта;
- станочного оборудования прецизионной точности;
- специализированного оборудования для нанобиологии (модификации РНК, нанороботов и т. д.);
- технологической документации и математического обеспечения для этого оборудования и его серийного производства, а также оснащение нанопроизводств.

Наномеханика

- наномоторы для нанороботов;
- станки с точностью позиционирования в доли ангстрем.

Наноматериалы

- сверхпрочные и сверхлёгкие нанокompозитные материалы и материалы, полученные нанохимией, в том числе с применением нанотрубок;
- материалы, меняющие цвет в функции от приложенного напряжения.

Вычислительная наноиндустрия

- иерархии программных средств для моделирования:
- процессов в нанореакторах;
- объединения наночастиц;
- управляемого (электро)химического катализа;
- взаимодействий в многослойных наноструктурах;
- схемотехнического дизайна;
- систем опознавания нанообъектов для адаптивной технологии изготовления наноустройств;
- суперкомпьютерного моделирования сложных белковых молекул.

Нанoeлектроника

- квантовые нити как суперпроводящие устройства с поперечным квантованием и как генераторы субмиллиметрового диапазона волн;
- нанотранзисторы;
- запоминающие энергонезависимые нанoeлектронные устройства на основе квантовых точек для терабитной памяти;
- нейроструктуры для нанокomпьютеров;
- изделий нанoeлектронной техники на основе новых материалов (карбида вольфрама, борида вольфрама, карбида бора, нитрида бора) для работы при температуре 2000-3000 °C и в условиях ядерного взрыва;
- высокотемпературных усилителей, генераторов и логических устройств для съема информации с первичных датчиков с частотным диапазоном до нескольких тераГерц;
- моделирования технологий и архитектуры нанокomпьютеров.

Нанооптика

Нанооптические электрически перестраиваемые генераторы когерентного лазерного излучения для применения:

- в приборах для обнаружения наркотиков и взрывчатых веществ («супернос»),
- в плоских экранах на основе карбидов,
- в устройствах дисплейной техники,
- в наноиндустрии при производстве новых материалов методами селективного катализа (проведением управляемых химических реакций),
- высокоэффективных источников когерентного лазерного излучения для использования в нанопроизводствах и антенных решетках нового поколения,
- новых нанооптических материалов для летательных аппаратов с автоматически изменяемой окраской поверхности,
- лазерных наногигроскопов.

Наноспектроскопия

- Анализ нанопризнаков веществ для криминалистики, определения подлинности произведений искусства, создания системы экологической безопасности, а также технологического контроля при нанопроизводстве.
- Пополнение баз знаний таких признаков.

Нанобиология

- Генетический контроль продуктов питания (селекция трансгенных веществ).
- Моделирование РНК и иных биомолекул с целью создания биологических самовоспроизводящихся нанороботов для медицины, prolongation жизни человека, ликвидации атеросклероза и опухолей.
- Применение групп суперкомпьютеров и методов искусственного интеллекта для моделирования и последующего синтеза белковых молекул большой размерности.
- Применение новых наноматериалов для нанофармакопии и повышения эффективности производства и контроля продуктов питания.

Наномедицина

- Новое поколение приборов ультразвуковой диагностики с увеличенной на порядок разрешающей способностью и снижением уровня излучения до безопасных значений за счёт применения туннельных датчиков.
- Замена рентгеновского оборудования и томографов нанолокаторами субмиллиметрового диапазона волн с разрешающей способностью 0,15 мм, и улучшенными показателями по экологической чистоте и безвредности за счёт снижения мощности излучения до безопасных значений, приближенных к уровню фона.

Новые источники энергии

- Прямое выпрямление солнечного света.
- Новые источники энергии (в том числе на основе туннельных ускорителей частиц на нанотрубках).

Микроэлектромеханика (MEMS) и микросистемы.

Микроэлектромеханика базируется на перенесении технологических достижений микроэлектроники [33, 34] в сферу производства:

- сенсоров для получения данных из окружающей среды;
- компонентов, основанных на новых (например, акустоэлектронных и др.) принципах;
- преобразователей для воздействия на окружающую среду.

Темпы роста мировых продаж изделий микромеханики (так тоже можно именовать MEMS) ежегодно удваиваются, что ставит эту область деятельности в один ряд с так называемыми «критическими»

технологиями, определяющими уровень развития экономики. Объём мировых продаж MEMS-изделий составляет уже 1/10 часть продаж изделий «традиционной» микроэлектроники. Микромеханические изделия интегрируемы с кремниевыми СБИС, что позволяет считать их важной составной частью так называемых микросистем. Тем самым микросистемы уменьшают гетерогенность «больших» систем, интегрируют эту гетерогенность.

12.2. Нанофантастика

В 1992 г. один из идеологов нанотехнологий доктор Э. Дрекслер, выступая в Конгрессе США, нарисовал картину обозримого будущего, когда нанотехнологии преобразуют мир: будут ликвидированы голод, болезни, загрязнение окружающей среды и другие насущные проблемы. Ключом к этим проблемам станут крошечные машины размером с бактерию. Созданы они большей частью будут из белковых молекул, т.е. фактически будут представлять собой живые компьютеры. При этом стратегической целью нанотехнологии должна стать самовоспроизводящаяся система. Сначала вручную будут сконструированы ассемблеры-нанороботы, способные создать из любого материала любую вещь, заказанную человеком. Затем уже они построят единственный экземпляр репликатора, самовоспроизводящегося наноробота, который произведет себе подобных в нужном количестве и без малейших усилий со стороны человека. После этого, очевидно, наступит золотой век.

Репликаторы в нашем мире уже существуют, а следовательно, их можно создавать и искусственно. Согласно терминологии Foresight Institute, всем известный (причем только с плохой стороны) вирус – это репликатор, который, будучи введенный в клетку хозяина, может построить молекулярные системы клетки таким образом, чтобы она создавала новые вирусы. В работах по нанороботам постоянно встречаются ссылки на понятие «вирус» и упоминается возможность создания искусственных вирусов – типичных НР. Действительно, достижения вирусологии сегодня активно применяются в генной инженерии, и пока «вирусное» направление в НТ представляется наиболее перс-

пективным. Запустив в человека мириады НР, функционирующих по принципу вирусов, нанотехнологии собираются создать своеобразный симбиоз человека и вируса, т. е. человеко-вирус.

Центр надежных нанотехнологий (CRN) опубликовал разработку нанофабрики небольших размеров, которая может быть использована в «личных» целях. Подобная фабрика способна выпускать широкую гамму продуктов; такие устройства могут собираться в комплекс. В 84-страничной «Разработке простой нанофабрики» автор Chris Phoenix, директор CRN рассмотрел основные вопросы архитектуры подобного устройства. Основная идея проекта следующая: маленькие машины (фабрикаторы) будут манипулировать отдельными атомами и молекулами, собирая некий промежуточный продукт, который затем с помощью более сложных машин будет соединен в единое целое. Простой фабрикатор не сможет строить сложные структуры, поэтому предусмотрены несколько ступеней сборки конечного продукта. Предполагается, что фабрикаторы используют основные принципы молекулярной нанотехнологии: сборку объектов атом-за-атомом при соответствующей точности за малый промежуток времени. Ранее выходило описание отдельных узлов системы, никто еще не пытался описать процесс нанофабрикации в целом. Каждый аспект нанофабрики, кроме фабрикаторов, описывается с учетом возможностей современной инженерной практики. Построение фабрикатора – сложный процесс, который потребует дополнительных исследований и разработок. Но на сегодняшний день нет причин думать, что изготовить простой фабрикатор невозможно, а поэтому возможна и работающая нанофабрика.

Ученым из Колумбийского университета, компании IBM и Новорлеанского университета удалось собрать из наночастиц материал с заданной трехмерной структурой. Американские специалисты предложили метод «точной и энергетически эффективной» самосборки наноматериалов, который предполагает выбор материалов противоположных, дополняющих друг друга свойств. Одни составные части композита (размер зерна 6 нм в диаметре) состояли из селенидов, чувствительных к тепловому излучению полупроводников, которые обычно используются в инфракрасных детекторах. Другие «первокирпичики» диаметром в 11 нм состояли из оксида железа – магнит-

ного материала, часто использующегося в записывающих устройствах.

Российской компанией «Optiva Inc.» разработан новый класс самособирающихся наноматериалов, которые дадут возможность печатать тонкие структурированные пленки почти на любой поверхности. Русские разработки сконцентрированы на топливных элементах, сенсорах, работающих в экстремальных условиях, нанопорошках, а также высокоточных и компактных микроскопах.

Исследователи University of Toronto (Канада) создали новый класс самособирающихся нанокомозитов. Трехколечная *periodic mesoporous organosilica* (ПМО) содержит примерно втрое больше органических компонентов, чем известные ранее подобные материалы.

Lars Samuelson из Lund University предложил новый процесс самосборки полупроводниковых нановолокон по технологии «bottom-up». Это открытие может привести к значительным прорывам в нанoeлектронике, фотонике и технологии материалов.

Исследователи из Duke University использовали самособирающиеся молекулы ДНК как молекулярные строительные блоки, получившие название «tiles» — «плитка», «черепица», что может привести их к программируемому конструированию наноразмерных протеиновых подшипников, «строительных лесов» и металлизированных проводников для нанoeлектронных устройств. Поскольку спирали ДНК собираются самопроизвольно, но избирательно, команда проекта сообщила, что они научились заставлять волокна самоупорядочиваться в крестообразные плитки, способные к образованию молекулярных связей на всех 4-х сторонах перекрещивающихся балок. В результате большие количества таких крестов могут самостоятельно соединяться вместе, образуя полужесткие пористые массивы, названные «стабильными и хорошо себя ведущими». Два вида нуклеотидных оснований избирательно попарно соединяются с двумя другими видами для формирования спирали ДНК: аденин с тиминном, а гуанин — с цитозином. Так, ученые могут использовать эти биохимические свойства, чтобы программировать различные способы соединения плиток между собой. Когда плитки запрограммированы на то, чтобы соединяться, будучи все ориентированными в одном направлении вверх или вниз, они самособираются в узкие и длинные ячеистые «наноленты». Но когда про-

грамма заставляет плитки соединяться так, чтобы соседние были перевернуты относительно друг друга, то образуются широкоячеистые «нанорешетки». Двухшаговая процедура металлизации представляет собой использование 4 x 4 нанолент как матрицы для производства серебряных нанопроводников высокой проводимости и постоянной толщины. Если увеличить размер решеток, то можно тиражировать на них наноэлектронику и создавать полезные устройства и схемы меньших размеров, чем это делалось ранее. В этом заключаются большие перспективы.

Еще пара-тройка десятилетий, и современная медицина безвозвратно уйдет в прошлое, больницы придется переоборудовать под компьютерные центры или жилые дома, шприцы, иглы и прочие инструменты можно будет увидеть разве что в музеях, а современные доктора, увы, останутся без работы. Панацеей от всех болезней станет чудесное снадобье, содержащее все те же нанокomпьютеры. С помощью инъекции или с напитком тысячи и миллионы молекулярных компьютеров будут введены в кровь человека и станут мирно жить в его организме. Наноробот, введенный в организм человека, сможет самостоятельно передвигаться по кровеносной системе и очищать его от микробов или зарождающихся раковых клеток, а саму кровеносную систему — от отложений холестерина. Он сможет изучить, а затем исправить характеристики тканей и клеток. Нанороботы будут запрограммированы на поддержание наиболее оптимального состояния организма, на ремонт больных клеток, штопку поврежденных тканей и т. д. — все это на молекулярном и атомарном уровне. Ничего страшного здесь нет: эти крошки будут практически незаметны для человека, как незаметны сейчас миллионы бактерий и вирусов, живущих на теле человека и внутри него. Таким образом планируется решить вопрос болезней и даже старости.

Нанотехнологии придут и в пластическую хирургию. Вернее, хирургии как таковой не будет, а если кто пожелает изменить форму носа или вставить новые зубы вместо пораженных кариесом, ему достаточно будет обратиться к наноспециалисту, который перегруппирует атомы и молекулы заданной части тела. Не правда ли, заманчивая перспектива: менять внешность так часто и столь причудливым образом, как только пожелаешь?!

Нанотехнология – ключ к бессмертию. В настоящее время наиболее перспективными для продления жизни человека считаются 3 направления: антистарение, крионика и загрузка. Добиться в них наиболее значимых результатов, совершить революционный прорыв в решении проблемы личного бессмертия – возможно при использовании нанотехнологии (НТ). Бессмертие наряду с другими достижениями НТ, коренным образом изменит социальное устройство общества.

12.2.1. Молекулярная хирургия и молекулярные роботы

В наиболее общей постановке проблема применения НТ в медицине заключается в необходимости изменять структуру клетки на молекулярном уровне, т. е. осуществлять «молекулярную хирургию». Это могут быть такие операции, как узнавание определенных фрагментов молекул и клеток, разрыв или соединение частей молекул, добавление или удаление молекулярных фрагментов, полная разборка и сборка молекул и клеточных структур по определенной программе. Хотя они и осуществляются обычными, естественными молекулами белка, набор функций последних недостаточен для обеспечения бессмертия клетки и всего организма. Задача, таким образом, состоит в придании клетке этих недостающих функций, в «разумном» управлении ее работой.

Устройства для молекулярной хирургии обычно называют молекулярными роботами (МР). Они являются аналогами более общего НТ-устройства, называемого ассемблером/деассемблером. МР могут создаваться на основе биологических макромолекул (в основном белков). Такой подход называют молекулярной нанотехнологией. Главная проблема его реализации состоит в проектировании МР. Основной элемент такого проектирования – моделирование молекул. Хотя его алгоритмы известны, большой размер молекул делает расчеты очень трудоемкими. Сейчас подобные расчеты возможны только для анализа небольших модификаций в существующих молекулах. По прогнозам, компьютеры достигнут мощности, необходимой для приемлемой скорости (и цены) моделирования молекул, к 2010 г., т. е. молекулярная НТ может быть реализована через 15-20 лет. С учетом необходимости разработки конкретных типов МР и проведения дополнительных био-

логических исследований, можно ожидать, что описанные ниже возможности будут доступны во второй четверти XXI в. (Прибегнуть к услугам крионики, чтобы дождаться этого времени, можно уже сейчас.)

Другой подход к созданию молекулярных роботов заключается в изготовлении их из кристаллических материалов на основе углерода, кремния или металлов. Его реализация связана с прогрессом в миниатюризации существующих твердотельных технологий (травление, напыление, выращивание кристаллов). Принципы их работы будут состоять в механическом воздействии на клеточные структуры или в создании локальных электромагнитных полей для детекции и инициирования химических изменений в биологических молекулах. Прогнозы здесь делать труднее, так как ключевые технологические процессы, необходимые для достижения наноразмеров, еще находятся на ранних этапах разработки.

Для медицинского применения перспективной может оказаться и гибридная технология изготовления МР. Например, детекторы и манипуляторы изготавливаются из органических молекул, а управляющее устройство может быть твердотельным на основе кремния. Помимо возможности детекции и манипулирования с биомолекулами важной проблемой является энергоснабжение МР и их взаимодействие с управляющим суперкомпьютером. Здесь более эффективным представляется использование магнитного поля, поскольку биологические ткани для него прозрачны. Магнитное поле может изменять структуру МР, заряжая его энергией и сообщая информацию, а для сообщения информации управляющему компьютеру МР может сам изменять свою структуру, что будет зарегистрировано датчиками, расположенными вне тела человека. Аналогом такого подхода является томография на основе ядерного магнитного резонанса – метода, который сейчас широко используется для получения трехмерных изображений внутренних органов в реальном времени.

12.2.2. Антистарение

Первичной причиной старения является повреждение молекул клетки – тепловое, радиационное и побочными продуктами биохимичес-

ких реакций. В процессе эволюции выработались разнообразные механизмы противодействия старению (естественное антистарение), действующие как на молекулярном, так и на более высоком уровне: клеточном, тканевом, организменном. Однако эти механизмы не являются стопроцентно эффективными, и постепенное накопление молекулярных повреждений приводит к ухудшению функционирования клеток, их гибели, что вызывает катастрофическое нарушение регуляции функций организма, появление системных «болезней старения» (большинство форм рака, атеросклероз, гипертония, сахарный диабет), ослабление сопротивляемости вредным воздействиям — все это с неизбежностью ведет к смерти.

Недостаточная эффективность естественного антистарения объясняется тем, что эволюция действует методом проб и ошибок, т. е. нужное приспособление не появляется сразу и в законченном, совершенном виде. В принципе можно представить, что практически нестареющий организм мог бы появиться. Но эволюционный «поиск» долгоживущих организмов и закрепление его результатов возможны только в том случае, если такой организм будет иметь эволюционные преимущества, выражающиеся в высокой выживаемости и увеличении численности вида (иначе случайно «найденный» признак «потеряется» в следующих поколениях). Впрочем, для благополучия вида вполне достаточно, чтобы отдельный организм мог достичь репродуктивного возраста и оставить потомство, а что будет с организмом дальше, для вида не имеет значения (или имеет пренебрежительно малое значение). Таким образом, путь повышения репродуктивности и жизнеспособности в молодом возрасте (что, как правило, негативно влияет на здоровье в старших возрастах) проще и выгоднее для вида (а значит, и более вероятнее), чем увеличение продолжительности жизни отдельной особи. Для этого необходим случайный поиск и, по-видимому, скоординированное изменение большого количества функций, вероятность которого очень мала.

Следовательно, в настоящее время мы имеем стареющий организм, но который в принципе можно изменить, если действовать не методом проб и ошибок, а целенаправленно, системно корректируя его функции на молекулярном и организменном уровне. Что здесь могут сделать МР? Прежде всего они могут осуществлять репарацию («ре-

монт») клетки – исправлять повреждения ее структуры, которые по тем или иным причинам не были исправлены естественными репарирующими системами клетки: разрезать молекулярные сшивки в липидных мембранах и белках (что является причиной ухудшения их функционирования), удалять накапливающиеся вредные продукты обмена (такие, как гранулы липофусцина в нервных клетках), корректировать повреждения в генетическом материале клетки (где даже единичное нарушение в критическом месте может привести к возникновению рака). МР, внедренные (так же, как это делают вирусы) в клетку и выполняющие подобные операции, приведут в конечном счете к омоложению организма.

Более того, МР могут повысить степень защиты клетки – не допуская возникновения молекулярных повреждений, что будет означать нестарение клетки. Например, они могут инактивировать ускользнувшие от естественных защитных систем свободные радикалы (содержащие неспаренный электрон, высокореакционные и неспецифически активные молекулы), которые являются побочным продуктом многих биохимических реакций и служат одной из основных причин молекулярных повреждений. Также МР могут участвовать (как наряду с геной инженерией, так и вместо нее) в перепроектировке генома клетки – в изменении генов или добавлении новых для усовершенствования функций клетки. Вполне возможно, что в конечном счете после такого усовершенствования для обеспечения «вечной молодости» МР уже не будут нужны (или они будут производиться самой клеткой).

12.2.3. Крioniка

Крioniка – это развивающееся направление, которое объединяет криобиологию, криогенную инженерию, а также практику клинической медицины в применении к консервации людей путем их замораживания до ультранизких (криогенных) температур с целью переноса терминальных (обреченных на смерть от старости, болезни или несчастного случая) пациентов в тот момент в будущем, когда появится технология для репарации клеток и тканей, будет возможно восстановление всех функций организма и здоровья в целом и станут излечимы все сегодняшние болезни, включая старение.

Хотя крионика применяется в Америке с конца 60-х гг., она еще не стала общепринятой процедурой (на сегодняшний день заморожено около 100 чел.). Тому есть несколько причин:

- Первая причина — финансовый крах ведущих крионических организаций в конце 70-х гг., приведший к разморозке пациентов и, как следствие, недоверию к надежности хранения (сейчас стратегия финансирования заменена на более надежную).

- Вторая причина — заключается в глубоко укоренившейся в общественном сознании установке, что смерть неизбежна (обычно это установка выражается в обильной религиозной и социологической аргументации о «полезности» смерти, в психологическом желании «быть таким, как все», т. е. таким же мертвым).

- Третья причина — то, что многие люди не хотят жить долго, хотя они и декларируют это, но когда от них требуется предпринять какие-либо серьезные усилия для продления жизни (и заплатить достаточно большие деньги — от 30 тыс. дол.), большинство из них предпочитают спокойно умереть.

- Четвертая причина — то, что существуют лишь теоретические обоснования работоспособности крионики. Этого достаточно для убеждения людей, обладающих необходимой научной подготовкой и имеющих сильные мотивы, чтобы потратить усилия для анализа этих обоснований, но таких людей очень немного. Для убеждения же большинства нужны экспериментальные результаты, которые можно будет получить после реализации возможностей НТ. (Стоит заметить, что ведущие американские специалисты в области НТ являются сторонниками крионики, а некоторые из них имеют и контракт на замораживание.)

В крионике существуют 2 основные проблемы, которые могут быть решены с помощью НТ. Первая состоит в том, что по существующим законам, замораживать пациентов можно только после получения свидетельства о смерти, т. е. когда врачи будут убеждены, что современная технология реанимации уже не может их спасти (это не означает, что будущая медицинская технология, усиленная МР, не окажется в состоянии это сделать). Обычно на это уходит от нескольких десятков минут до нескольких часов. За это время организм получает достаточно серьезные повреждения на клеточном уровне из-за прекращения

поступления кислорода. Однако теоретические оценки и некоторые экспериментальные данные свидетельствуют о том, что структуры головного мозга, обеспечивающие долговременную память (а значит, целостность сознания и личности человека, его память о прошлом), за это время не успевают разрушиться. Следовательно, с точки зрения теории информации (а в медицине будущего лишь это будет настоящим критерием смерти) человек еще жив.

— Пятая проблема: современные технологии замораживания позволяют осуществить полный цикл замораживания/размораживания только для биологических объектов небольших размеров (несколько миллиметров). В более крупных объектах из-за неравномерного насыщения антифризом (без этого безопасное замораживание вообще невозможно), а также вследствие возникающих температурных градиентов возникают многочисленные повреждения на клеточном (разрыв стенок клеток) и на тканевом (микротрещины) уровне. В результате простое размораживание, без предварительного исправления повреждений, невозможно. Эти повреждения, а также последствия частичного разрушения клетки из-за кислородного голодания во время клинической смерти и призваны ликвидировать МР (по предварительным расчетам, понадобится порядка миллиона миллиардов МР, их общий вес составит около 0,5 кг, а время репарации — размораживания — реанимации — лечения — омоложения займет несколько месяцев). Операции МР будут примерно такими же, как и в случае антистарения. В частности, это будет означать, что после опосредованного МР размораживания и реанимации будет излечена и болезнь, явившаяся причиной смерти (например, рак или СПИД); затем оживший человек будет омоложен (самый старый человек был заморожен в 99 лет). Более того, человек, погибший в результате несчастного случая или убитый, также может быть оживлен.

Загрузка. В соответствующем контексте под загрузкой имеют в виду перенос личности в компьютер. Это относительно малоисследованная область. Реализация загрузки будет означать как возможность существования «я» человека в виртуальной реальности, так и «перевоспложение» человека в механическое создание с кремниевым мозгом. У загрузки есть 2 основные проблемы: моделирование мозга и чтение содержимого памяти человека (эту операцию в контексте за-

рузки называют сканированием). На самом деле мозг — довольно несовершенное образование и, по всей вероятности, компьютеры по своей мощности уже к нему приближаются. Так что по большому счету проблема моделирования состоит в познании механизмов работы мозга. Что же касается сканирования, то здесь возможен большой прогресс при использовании МР. Проблема заключается в точном трехмерном картировании частей клеток мозга. Триллион МР (порядка 1 г), помещенных в мозг, картируют его за несколько часов. Осуществляемые ими операции будут включать распознавание участка клеточной поверхности, сообщение об этом в управляющий компьютер и перемещение к следующему участку. (Кстати, сканирование может помочь получить и недостающие данные о механизмах работы мозга.)

Последствия для общества. Хотелось бы подчеркнуть, что НТ — не только техника и улучшение жизни людей. В теперешнем мире — это во многом и политика. Основным социальным последствием применения НТ будет значительное увеличение свободы человека, его независимости как от природных ограничений, так и от ограничений, которые ему пытаются навязать другие люди, чтобы получить больше свободы, благополучия и выгоды для себя (что является сущностью современного государства). Человек получит свободу во времени (т. е. практическое бессмертие), его не будут ограничивать проблемы здоровья или физического несовершенства. Одним из следствий применения НТ станет локализация экономики: у каждого человека в распоряжении будет нечто вроде нанотехнологической «скатерти самобранки». С помощью небольшого устройства, используя локальные источники энергии (солнце или ветер), воду, газы воздуха и некоторые вещества, растворенные в воде или получаемые из песка, человек сможет производить («выращивать») все необходимое ему для жизни, включая продукты питания, одежду, личные самолеты и горючее для них, компьютеры, средства связи. Это сделает человека экономически свободным, он будет работать не по принуждению, а исходя из своих духовных потребностей или для получения каких-нибудь дополнительных благ.

Первый в мире киборг. Британский профессор превратился в самого настоящего киборга. Ему была сделана операция по вживлению чипа в нервную систему, которая обошлась ему в кругленькую сум-

му – 714 575 дол. Хирурги вживили микрочип в нерв на левой руке профессора, и он, таким образом, стал полуроботом. Теперь деятельность его нервной системы контролируется компьютером, который считывает информацию с движений его руки. Ученые из университета Ридинг собираются также немного поэкспериментировать со своим коллегой: посылать его нервной системе искусственные импульсы, чтобы проверить, могут ли быть синтезированы эмоции, например, раздражение и злоба. Сам доброволец надеется, что у него проснется шестое чувство, и он сможет ориентироваться в пространстве даже с закрытыми глазами. Эксперименты над рукой профессора-робота продлятся несколько месяцев, и за это время исследователи надеются получить исчерпывающую информацию о том, как работает обновленная рука. Эмоции профессора будут тщательнейшим образом отслеживаться через чип.

Несколькими годами раньше в его левую руку был вживлен микрочип, который включал и выключал свет, а также открывал автоматические двери. На этот раз ему пересадили более совершенный микрочип, ширина которого составляет всего 3 мм. Сто тончайших электродов были подсоединены к нерву срединной артерии, а снаружи они подведены к компьютеру. В ближайшее время исследователи собираются вживить аналогичный микрочип жене профессора и соединить чету проводочками, чтобы проследить, смогут ли в таком случае супруги шевелить пальчиками друг друга. Ученые надеются, что этот эксперимент поможет разработать новую методику реабилитации людей с ограниченными физическими возможностями.

Космос будет, наконец, освоен: огромная армия роботов-молекул будет выпущена в околоземное космическое пространство и подготавливает его для заселения человеком: сделает пригодными для обитания Луну, астероиды, ближайшие планеты, соорудит из «подручных материалов» (метеоритов, комет) космические станции. NASA собирается построить космический лифт. По подсчётам, постройка лифта обойдётся в 7 млрд. дол., а для начала хватит и 5. Лифт будет состоять из надводной платформы, расположенной в Тихом океане, и орбитального аппарата на высоте 100 тыс. км. Эти два объекта должны быть соединены кабелем из углеродных нанотрубок. Наибольшую опасность для лифта представляет космический мусор.

В промышленности произойдёт замена традиционных методов производства сборкой молекулярными роботами предметов потребления непосредственно из атомов и молекул. Вплоть до персональных синтезаторов и копирующих устройств, позволяющих изготовить любой предмет.

Замена произойдёт и в сельском хозяйстве: комплексы из молекулярных роботов придут на смену «естественным машинам» для производства пищи (растений и животных) их искусственными аналогами. Они будут воспроизводить те же химические процессы, что происходят в живом организме, однако более коротким и эффективным путем. К примеру, по голосовой либо мысленной команде крохи-роботы смогут буквально из воздуха (который состоит из молекул) сотворить любое блюдо: скажем, жаркое из курицы под каким-нибудь экзотическим соусом. Таким образом, вы сможете скушать курицу, и при этом никакая реальная курица не пострадает. Более того, человек сможет по желанию вообще не питаться, — так как невидимые труженики в его организме смогут сами вырабатывать питательные вещества и насыщать ткани. Еда, таким образом, превратится лишь в чистое и абсолютно безвредное удовольствие.

Биологи смогут «внедряться» в живой организм на уровне атомов и станут возможными и «восстановление» вымерших видов, и создание новых типов живых существ, в том числе биороботов.

В кибернетике произойдёт переход к объёмным микросхемам, а размеры активных элементов уменьшатся до размеров молекул. Рабочие частоты компьютеров достигнут терагерцовых величин. Получат распространение схемные решения на нейроноподобных элементах. Появится долговременная быстродействующая память на белковых молекулах, ёмкость которой будет измеряться терабайтами. Станет возможным «переселение» человеческого интеллекта в компьютер.

Прогнозируется, что и в головной мозг человека будут имплантированы компьютеры. Здесь не подразумеваются страшные острые железки и мотки проводов, а все те же белковые молекулы. И это тоже не фантастика, — подобные опыты проводились и проводятся сейчас. Например, некий Билл Дитто из Технологического института (штат Джорджия) присоединил микродатчики к нейронам пиявки. Воздействуя на них, он обнаружил, что такая система может производить математи-

ческие операции, например, суммирование чисел. То есть Билл Дитто получил нечто иное, как биокomпьютер.

За счёт внедрения логических наноэлементов во все атрибуты окружающей среды она станет «разумной» и исключительно комфортной для человека. На всё это, по разным оценкам, понадобится около 100 лет.

Еще более впечатляют радужные прогнозы, касающиеся нанокomпьютеров. Через 20-30 лет komпьютеры можно будет скачивать через Интернет. Что происходит, когда вы устанавливаете какую-нибудь программу? Вы изменяете расположение молекул на жестком диске своего komпьютера. Но если в один прекрасный день сам komпьютер станет не больше молекулы или группы молекул, то, значит, можно будет изменять молекулярное расположение на диске, чтобы получать новые komпьютеры! Не ждите, что это будет привычный для нас, сегодняшних, комп, занимающий треть письменного стола. Komпьютеры будущего на то и нанокomпьютеры, чтобы быть не больше булавочной головки или песчинки. Легкость создания таких крох обещает их дешевизну, а следовательно, и повсеместное распространение. Каждый мини-komпьютер будет выполнять особенную задачу. К примеру, когда вы через 30 лет решите постирать, не забудьте вместе с бельем положить в стиральную машинку нанокomпьютер, который отрегулирует режим стирки и температуру воды. А когда отправитесь на работу, положите komпьютер в ботинки — он «подскажет» вашему автомобилю, что хозяин приближается, а значит, пора разблокировать двери и откорректировать положение зеркал и сидения так, чтобы это было удобно.

Но это — цветочки! «Ягодка» носит название нанобокс. Это та волшебная палочка, с помощью которой мы сможем, не выходя из дома, создавать все необходимые вещи. Технически это будет выглядеть так. К примеру, вы решите побаловать себя новеньким сотовым телефоном. Вам нужно будет найти в Интернете «рецепт» «сотика», затем вложить в нанобокс — это что-то вроде копировальной машины — кусок пластика, «впрыснуть» в картридж электропроводящие молекулы и ввести в подсоединенный к боксу komпьютер нужный «рецепт» (по сути — программу действий машины). Дальнейшую работу предоставьте самому нанобоксу. Он, подобно ксероксу, пропустит лист пластика через

себя, нанося на него «узоры» из молекул и электрически заряжая их так, чтобы они собрались в электронные схемы, антенну, микрофон, панель для кнопок и, наконец, корпус. Через каких-то 10 мин. нанобокс «выплюнет» вам новенький – с пылу, с жару – телефон. Точно так же можно будет «производить» любую бытовую технику, одежду и даже продукты. Природа атом за атомом строит секвойи или китов. Почему же человек не может так же строить предметы быта?! Словом, что нам стоит дом построить?! Даже не построить – вырастить, атом за атомом, как секвойю. И при этом без всякого строительного мусора, шума и загрязнения окружающей среды (нанопроизводство будет использовать только действительно необходимые атомы, а значит, не будет «атомарного мусора» – отходов или выхлопных газов, даже мусор, накопленный прежними поколениями, можно будет разложить на составляющие и использовать их для создания полезной продукции).

Однако новые открытия могут иметь и негативные последствия. Представим себе, что в устройстве, предназначенном для разборки промышленных отходов до атомов, произойдет сбой, и оно начнёт уничтожать полезные вещества биосферы, обеспечивающие жизнь людей. При этом самым неприятным может оказаться то, что это будут нанороботы, способные к самовоспроизводству (саморепликации, размножению). Как видите, нанороботы, вышедшие из-под контроля, могут стать оружием массового поражения.

Можно представить себе и нанороботов, запрограммированных на изготовление уже существующего оружия. Овладев секретом создания подобного робота или каким-то образом достав его, воспроизвести универсального «малыша» в большом количестве сможет небольшая группа людей или даже террорист-одиночка.

Отметим также принципиальную возможность создания устройств, выборочно разрушительных: например, воздействующих на определённые этнические группы или заданные географические районы.

Напомним, что нанороботы (или наноботы) – это гипотетические устройства размером в единицы и десятки нанометров (1 нм – это миллионная доля миллиметра), которые могут самостоятельно манипулировать отдельными атомами. Переставляя атомы, нанороботы смогут самовоспроизводиться, создавать из произвольного материала (земли, воды) любые предметы и так далее: изменениям могут подвергать-

ся практически любые – как органические, так и неорганические вещества. В конечном итоге нанороботы посредством манипуляций с молекулами смогут создать любой предмет или существо.

Нанороботов условно разделяют на два вида: способных конструировать что-либо, например, самовоспроизводиться (ассемблеры), или деконструировать, разбирать (дизассемблеры). Молекулярные ассемблеры – основной инструмент человека для манипуляций в наном мире. Любой вирус в определённом смысле также является ассемблером. Нанороботов нередко так и называют – «искусственные вирусы».

Предусматривается, что в недалеком будущем с помощью нанотехнологий можно будет делать multifunctional спутники весом всего 1 кг. Ракета-носитель может вывести на орбиты одновременно тысячи таких спутников. То есть один запуск позволит охватить спутниками, к примеру, связи всю планету (а ведь такие миниатюрные космические аппараты смогут передавать телесигнал, следить за состоянием погоды и т. д.).

12.2.4. Нанороботы – будущий триумф или трагедия для человечества?

Современная наука и инженерия нуждаются в помощи роботизированной техники для решения различных задач. При этом проблемы, все чаще встающие перед учеными, требуют создания не гигантов, способных вырыть котлован одним движением ковша, а крошечных, невидимых глазу машин. Эти продукты инженерии непохожи на роботов в привычном понимании, однако способны самостоятельно выполнять сложные задачи по имеющимся алгоритмам. Микроскопические роботы могут решать массу важных для человечества задач, совершить переворот в медицине, уничтожить вредные отходы и даже готовить необходимую людям инфраструктуру для жизни на других планетах. Однако любой, даже самый мизерный программный сбой может оказаться для человечества фатальным.

Нанороботы (в англоязычной литературе также используются термины «наноботы», «наноиды», «наниты») – роботы, созданные из наноматериалов и размером, сопоставимые с молекулой. Они должны об-

ладать функциями движения, обработки и передачи информации, исполнения программ. Размеры нанороботов не превышают нескольких нанометров. Согласно современным теориям, нанороботы должны уметь осуществлять двустороннюю коммуникацию: реагировать на акустические сигналы и быть в состоянии подзарядки или перепрограммирования извне посредством звуковых или электрических колебаний. Также важными представляются функции репликации, т. е. самосборки новых нанитов и программированного самоуничтожения, когда среда работы, например человеческое тело, более не нуждается в присутствии в нем нанороботов. В последнем случае роботы должны распадаться на безвредные и быстровыводимые компоненты.

Днем рождения нанотехнологий считается 29 декабря 1959 г. Профессор Калифорнийского технологического института Р. Фейнман (Нобелевский лауреат 1965 г.) в своей лекции «Как много места там, внизу», прочитанной перед Американским физическим обществом, отметил возможность использования атомов в качестве строительных частиц. С тех пор начинается создание атомно-силовых и сканирующих туннельных микроскопов, способных не только давать трехмерный рисунок расположения атомов, но и перемещать их. Другой отправной точкой в теории нанороботов можно считать книгу «Машины созидания» американского ученого Э. Дрекслера, в которой он описывает минироботов, работающих по заданным программам и собирают из молекул что угодно, в том числе и самих себя.

С конца 80-х гг. проводится много опытов по манипулированию атомной структурой. Первым опытным построением было создание 2-х вращающихся шестеренок на валах размером в несколько нанометров. Когда после этого стало ясно, что можно собирать наноустройства на практике, началось развитие нанотехнологий. Так, в 1987-1988 гг. в НИИ «Дельта» под руководством П. Н. Лускиновича заработала первая российская нанотехнологическая установка, осуществлявшая направленный уход частиц с острия зонда микроскопа под влиянием нагрева. В 1991 г. профессор С. Лиджима разработал нанотрубки на основе фуллеренов. На их основе создаются материалы в десятки раз прочней стали. Также следует отметить американские разработки наноманипулятора, устройства, состыкованного с атомным микроскопом и управляемого человеком через виртуальный интерфейс.

Немало нанотехнологических устройств уже создано и, хотя они пока являются экспериментальными разработками, практические перспективы очевидны. Разработан наноэлектродвигатель, имеющий обмотку из одной длинной молекулы, способной без потерь передавать ток. При подаче напряжения начинал вращаться ротор, состоящий из нескольких молекул. Существует также устройство линейной транспортировки, способное перемещать молекулы на заданное расстояние. Разрабатываются также молекулярные биосенсоры, антенны, манипуляторы.

Сфера применения нанороботов очень широка. По сути они могут быть необходимы при создании, отладке и поддержании функционирования любой сложной системы. Наномашины могут применяться в электронике для создания мини-устройств или электрических цепей: данная технология называется молекулярной наносборкой. В перспективе любая сборка на заводе из компонентов может быть заменена простой сборкой из атомов.

Однако приоритетным в настоящее время является применение нанороботов в медицине. Организм человека как бы наталкивает на мысль о нанороботах, поскольку сам содержит множество естественных наномеханизмов: нейтрофилы, лимфоциты и белые клетки крови постоянно функционируют в организме, восстанавливая поврежденные ткани, уничтожая вторгшиеся микроорганизмы и удаляя посторонние частицы из различных органов. Путем обычной инъекции нанороботы могут быть впрыснуты в кровь или лимфу. Для наружного применения раствор с этими роботами может быть нанесен на участок ткани. Одним из разработанных направлений служит транспортировка лекарства к пораженным клеткам. При обычном введении лекарства лишь одна молекула из 100 тыс. достигает цели. В то время как наноустройство в белковой оболочке увеличивает эффективность на два порядка, в перспективе не будет опознаваться фагоцитами как «чужой» и после выполнения функции распадается на безвредные компоненты. Такие нанороботы могут быть эффективны, например, при медикаментозном лечении раковых опухолей.

Нанороботы смогу делать буквально все: диагностировать состояние любых органов и процессов, вмешиваться в эти процессы, доставлять лекарства, соединять и разрушать ткани, синтезировать но-

вые. Фактически нанороботы могут постоянно омолаживать человека, реплицируя все его ткани. На данном этапе учеными разработана сложная программа, моделирующая проектирование и поведение нанороботов в организме. Чрезвычайно детально разработаны аспекты маневрирования в артериальной среде, поиска белков с помощью датчиков. Ученые провели виртуальные исследования нанороботов для лечения диабета, исследования брюшной полости, аневризмы мозга, рака, биозащиты от отравляющих веществ.

Логично задать вопрос: когда же нанороботы придут в наш мир, станут такой же обыденностью, как персональные компьютеры и Интернет? По прогнозам ученых, век нанороботов уже не за горами.

Существующие прототипы двигателя, процессора, захвата будут собраны в единое устройство, и эпоха нанороботов наступит до 2015 г. Все названные перспективы могут осуществиться, наномашин будут в состоянии воссоздавать любые предметы из атомов, смогут омолаживать человека, станут искусственными производителями пищи, заполнят околоземное пространство и сделают пригодными для человека планеты и их Луны.

Существуют, однако, и опасения по поводу наномеханики. Так, в упомянутой выше книге «Машины созидания» повествуется о сбое в программе роботов, в силу чего они превращают всю Землю в мессиво из самих себя. Читатель также может вспомнить роман «Непобедимый» С. Лемма, в котором крошечные роботы, наследие цивилизации Лир, будучи примитивными механизмами, объединяются миллионами, образуя мыслящие конструкции, готовые уничтожить человека с бездушием механизма, чтобы затем снова погрузиться в тысячелетний стазис.

Данные прогнозы не являются прерогативой фантастов, их поддерживают некоторые ученые, которых в прессе иногда называют апокалиптиками. Профессор Е. Абрамян в своей статье «Угрозы новых технологий» рисует ситуацию, при которой роботы, предназначенные для разборки на атомы отходов, начнут разбирать в силу сбоя и все остальное. При этом такие машины будут самореплицироваться. Кроме того, как отмечает ученый, эти микромашин могут стать основой для новых, еще более чудовищных, чем современные средств ведения войны.

Так или иначе, шаг к созданию нанороботов уже сделан и мы в очередной раз сталкиваемся с вопросом постановки формулировки: меняют ли наши нововведения нашу же жизнь, или мы сами её меняем. Сможем ли мы создать на основе наномеханики мир, свободный от голода, нужды и при этом имеющий потенциал к развитию, или дорога из желтого нанокирпича приведет нас к хаосу новых войн — это будет зависеть от нас самих. Но ясно одно: мир меняется и мы стремительно меняемся вместе с ним.

13. НАНОТРЕВОГИ

Итак, сама логика развития новой технологии диктует, что для построения нанообъектов требуются специальные устройства-сборщики нанометровых размеров. При столь миниатюрных масштабах сборки для изготовления чего-то достаточно крупного и пригодного для использования человеком потребуются многие тысячи нанороботов, осуществляющих тысячи манипуляций в течение многих и многих дней, месяцев или даже лет.

Эта проблема решается созданием репликаторов — нанороботов, создающих других нанороботов, способных к самовоспроизведению. Таким образом, говорят энтузиасты нанотехнологий, можно кардинально ускорить процессы производства. Причина в том, что от идеи репликаторов многие люди начинают чувствовать себя крайне неуютно. Вплоть до того, что нанотехнология рассматривается сейчас некоторыми как первый шаг человечества по скользкому краю апокалиптической ямы, заполненной «серой слизью». Этот термин получил довольно широкое распространение с подачи Б. Джоя, главного ученого Sun Microsystems, опубликовавшего в журнале «Wired» нашумевшую статью «Нуждается ли в нас будущее?». Джой и его идейные соратники настойчиво предупреждают, что микроскопические самовоспроизводящиеся роботы, невидимые человеческому глазу, в случае выхода

из-под контроля могут привести к нашествию безликой, липкой и пожирающей все вокруг массы – «серой слизи». Причем идею эту вовсе нельзя назвать беспочвенной, поскольку некоторые рьяные поборники новейших технологий уже выдвигали предложения по разработке армии «синей слизи» – разрушительных микромашин – в качестве мощного оружия для «умиротворяющих» действий правоохранительных органов.

В ответ на подобные опасения и тревогу авторитетные сторонники нанопрогресса выдвигают свои аргументы. Хотя нанотехнология действительно предлагает использовать репликацию для сведения к минимуму стоимости производства, она не рекомендует копировать живые системы. Живые системы адаптируются к среде самым чудесным образом и способны выживать в сложных природных условиях. Нанотехнология, напротив, предусматривает строить молекулярные машинные системы, похожие на микроскопические версии оборудования сегодняшних фабрик и заводов. Рука-манипулятор микроробота, уменьшенная до субмикронного размера, должна уметь брать и собирать молекулярные детали, подобно тому, как манипуляторы заводских роботов орудуют гайками и болтами. К сожалению, очень легко пойти по ложной тропе из-за простого факта: единственная репликационная система, с которой знакомы большинство из нас, – это биологические самовоспроизводящиеся системы. Мы автоматически начинаем подражать, что нанотехнологические репликационные системы будут подобны биологическим. Но машины, которые изготавливают люди, очень мало похожи на живые системы, поэтому и молекулярные системы производства скорее всего будут столь же непохожими.

В качестве иллюстрации приводится экспериментальная система «экспоненциальной сборки», создаваемая техасской корпорацией «Zyvex». Здесь разрабатываются механические системы для сборки устройств микронного, субмикронного и молекулярного масштаба. На микронном уровне, используя уже имеющиеся MEMS-технологии, проектируется простая роботизированная рука «взять-и-положить», способная манипулировать сложными планарными деталями микронного масштаба, изготовленными с помощью литографии. Из этих деталей собирается роботизированная рука, способная манипулировать специально разработанными MEMS-детальями. Процесс получил название

«экспоненциальная сборка», поскольку это репликационная технология, начинающаяся с единственной роботизированной руки на кремниевой пластине, которая сама собирает другие роботизированные руки, беря детали, заранее уложенные на пластине в точно известных местах. Хотя количество собранных таким методом роботизированных рук может возрасти экспоненциально (до некоторых пределов, накладываемых системой производства). Этот процесс требует среди прочего литографически изготовленных деталей, а также подачи электроэнергии и управляющих сигналов для координации сложных движений рук манипуляторов. Достаточно отключить энергию, управляющие сигналы или лишить микробота деталей – и он будет действовать так же, как и его заводской собрат, изъятый со сборочной линии и заброшенный в глухой лес.

13.1. Идеализм, цинизм и реализм

К сожалению, далеко не все ученые, работающие в области нанотехнологий, придерживаются подобной логики, и среди них один из ведущих специалистов лаборатории Сандиа – Д. Бринкер, снискавший международную известность благодаря работам в области самосборных нанокompозитных материалов. При его непосредственном участии достигнуты весьма примечательные успехи в создании материалов, способных к спонтанной самоорганизации в сложные трехмерные конструкции наномасштаба. Главный же интерес исследований – это научиться придавать материалам «жизнеподобные» свойства, т. е. получать такие материалы, которые чувствуют окружающую среду и соответствующим образом реагируют, могут самоисцеляться и избегать угрожающих их существованию обстоятельств. Цель Бринкера – наноматериалы, занимающие промежуточное положение между живым и неживым. Разумеется, робот из таких материалов – это уже далеко не неуклюжий заводской манипулятор в лесной чаще.

Трезвомыслящие ученые прекрасно понимают, что нанотехнология способна породить серьезные проблемы. Любая технология может быть использована для нанесения ущерба, а не только для всеобщего блага. По масштабам будущего воздействия на человечество нано-

технологии наверняка не уступят индустриальной революции. Как относиться к наступающим переменам? Каких принципов придерживаться в процессе разработки и внедрения нанотехнологий?

В калифорнийском Пало-Альто в 1989 г. была создана специальная некоммерческая организация под забавным названием «Предусмотрительный институт» и девизом «Готовясь к нанотехнологиям» (основатель и глава института Э. Дрекслер). Здесь был подготовлен набор правил «техники безопасности» для разработчиков и изготовителей молекулярных систем [35]. Среди руководящих принципов, например такие: искусственные системы-репликаторы не должны иметь способность к воспроизводству в естественной, неконтролируемой окружающей среде. Они должны быть абсолютно независимыми от источника искусственного питания или от искусственных компонентов, не встречающихся в природе. Они должны использовать коды выявления ошибок и шифрование, предотвращающее непреднамеренные изменения в их конструкции. И далее в том же духе.

Все эти правила выкристаллизовались из бурных дискуссий о самых разных сценариях возможного развития нанотехнологий. Очевидно, что наше понимание развивающейся технологии эволюционирует, а значит, претерпевают изменения и рекомендации, отражая степень осмысления учеными того, как обеспечивать безопасное развитие нанотехнологий. Но в конечном счете диктовать реальный спектр нанотехнологических приложений будут вовсе не ученые, а правительства и индустрия. Со свойственным бизнесу цинизмом промышленники охотно соглашались, что потенциальная опасность нанотехнологий «должна, конечно, стимулировать этические дебаты в обществе», однако «инвесторам не следует всерьез задумываться о такого рода вещах». Ну, а что касается политиков, то в этой среде, к сожалению, цинизма еще больше, чем в бизнесе. Так что уповать остается на общее здравомыслие человечества.

13.2. Нанотехнологии могут быть опасны

Не секрет, что непродуманное и поспешное внедрение каких-либо новых технологий, открытий и т. п., в практику, которое делается без дол-

жного изучения последствий этого внедрения, в погоне за прибылью и практической пользой, может быть опасным, и в истории известно немало таких случаев. Новые же технологии, при помощи которых создаётся нечто принципиально новое, не встречавшееся в природе, могут быть опасны вдвойне.

Данная проблема касается и нанотехнологий. Нанотехнологии бросают новый вызов химической безопасности. Наноматериалы могут обладать совершенно иными физико-химическими свойствами, чем обычные материалы, оказывать новое токсическое воздействие. О том, что данная проблема заслуживает обязательного тщательного изучения, говорят и учёные, работающие в области нанотехнологии. Многие эксперты прогнозируют различные неблагоприятные воздействия нанотехнологий на окружающий мир и здоровье человека. В силу своих размеров и уникальных свойств наночастицы в выпускаемых продуктах требуют тщательного изучения на предмет того, могут ли они попадать в тело человека. И если да, то как долго они будут там оставаться? Кроме того, необходимо исследование поведения и перемещений наночастиц в окружающей среде и, самое главное – повлияют ли эти материалы на здоровье человека и состояние природы? Одни эксперты вообще советуют наложить мораторий на некоторые виды материалов. В частности, по данным исследований нанотрубки, которые представляют собой соединение сверхтонких игл, близки по структуре асбесту. А асбест, в свою очередь, серьезно повреждает легкие при вдыхании его частиц. Эксперты НАСА провели эксперимент, в ходе которого выяснилось, что нанотрубки при вдыхании могут вызвать воспаление легких.

Еще одно исследование, которое провели американские нанотехнологи, продемонстрировало опасность наночастиц для организма человека. Исследование проводилось на крысах. Однако сходство эпидермиса животных указывает на то, что любой человек, работающий с квантовыми точками, подвергается риску их проникновения в организм через любые незначительные царапины на коже. Хотя у ученых пока нет однозначного ответа на вопрос, какой вред наночастицы могут нанести человеческому организму, тем не менее, поскольку нанотехнологии все прочнее входят в нашу жизнь, нам следует уже сейчас задумываться о вопросах техники безопасности и возможных рисках.

В наше время о перспективах нанотехнологий не говорит разве что ленивый. Всякий, кто заинтересуется данной темой, моментально найдет информацию о фуллеренах и квантовых точках, о нанотрубках, которые в 60 раз прочней стали и выдерживают температуру в 2500 °C и давление в 6000 атм. О фантастических преимуществах продуктов наноиндустрии написаны десятки аналитических статей. О непредсказуемых опасностях тоже.

В прессе появляется все большее количество страшных историй о возможных опасностях нанотехнологий. Например, что стирка носков с наночастицами серебра приводит к нарушению репродуктивной функции водных животных, свободно проникая через клеточные мембраны. Другие пишут, что нанотрубки, попадающие в почву, делают ее стерильной, подрывая пищевые цепочки растений. Третьи пугают, что США, развивая традицию XIX в. разбрасывать вблизи поселений индейцев зараженные оспой одеяла, будут взрывать на территории неугодных им народов бомбы с «нанотермитом», веществом, которое, обладая гигантской силой взрыва, распылит в воздухе триллионы нанотрубок, проникающих в организм через воздух.

Не отстают в прогнозах и ученые РФ. В ходе конференции, посвященной проблемам биобезопасности нанотехнологий, НИИ медицины труда РАМН, ученые предложили правительству принять определенный регламент по контролю за продуктами наноиндустрии. Россия должна избежать всех ошибок предшественников, которые не учитывали вопросы безопасности при работе с новейшими технологиями. Можно напомнить, как во времена увлечения геной инженерией и биотехнологиями ученые говорили о создании огромного количества кормового белка. Были построены огромные заводы, но потом оказалось, что при его получении загрязняется атмосфера и возникают тяжелые случаи бронхоаллергозов.

Правительства многих стран в наше время организуют специальные конференции и выделяют значительные суммы на изучение влияния нанотехнологий на окружающую среду. Так, в 2006 г. американским агентством по защите окружающей среды были выделены гранты на сумму 5 млрд. дол. для изучения влияния нанотехнологий на природу и здоровье людей.

Одним из вопросов, которым задаются как ученые, так и обыватели, в особенности жители мегаполисов, является воздух, который

мы вдыхаем. Ни для кого не секрет, что наличие гигантского количества заболеваний хроническим бронхитом и астмой, включая врожденные случаи данной болезни, объясняются токсическими и загрязненными выбросами в атмосферу промышленных предприятий и бытовых устройств. Картина мира, в котором, чтобы не умереть от рака легких в 30 лет, нужно дышать через фильтр, изображенная Стивеном Кингом в фильме «Бегущий человек», становится не такой уж фантастической.

В данной связи ученые проводят исследование поведения наночастиц в атмосфере и последствия их вдыхания человеком. Параллель опасений очевидна: микрочастицы обычных промышленных веществ вызывают заболевания легких: антракоз, силикоз, асбестоз, гранулему. Не станут ли столь же опасны нанозлементы? В 2006 г. на конференции «Нанотехнологии-2006: токсичность наночастиц» ученые из Мичиганского университета представили результаты своих работ. В результате опытов над лабораторными грызунами была выявлена высокая чувствительность клеток эпителия дыхательной системы к наночастицам, которые накапливались в носовых путях подопытных животных, вызывая риниты и другие, более тяжелые заболевания.

Не меньшее внимание привлекает проблема влияния наноматериалов на окружающую среду. Группой западных ученых было проведено исследование о риске для окружающей среды 5 основных типов наноматериалов, включая нанотрубки, квантовые точки и бакиболы. Исследователи определяли различные типы рисков загрязнения для разных технологических операций, включая производство лекарств, очистку нефти. На основании полученных данных делаются выводы, что создание наноматериалов представляет меньший риск, чем текущие индустриальные процессы.

Ученые из университета Пердью в США пришли к выводу, что наночастицы, попадающие в почву, не причинят экосистеме никакого заметного вреда. Проведены опыты, в которых фуллерены помещались в различные виды почв для исследования их поведения и их влияния на микроорганизмы и минеральные вещества. Напомним нашим читателям, что фуллерены представляют собой каркасные сферические многогранники, составленные из правильных пяти- и шестиугольников с атомами углерода в вершинах. Существенные изменения могли бы стать фатальными для элементов пищевых цепочек растений.

Однако результаты наблюдений показывают, что никакой негативной динамики не происходит: микроорганизмы живут и здравствуют, баланс веществ не затронут.

Другой проблемой является исследование поведения наночастиц в воде. На данный момент этот вопрос разработан слабо. Сложность в том, что необходимы комплексные исследования по поводу способности каждого из видов грунтов или искусственных фильтров задерживать те или иные наночастицы. Данным вопросом занимаются в настоящее время ученые из Технологического института Джорджии, которые провели серию опытов, в ходе которых через колбы, заполненные песком, грунтом, микрогранулами стекла и иными материалами, пропусклась вода, содержащая фуллерены. Выяснилось, что песок задерживает до 80 % наночастиц. Однако ученые также пришли к выводу, что на фильтрацию влияет состав воды. Наличие в воде гуминовой кислоты или поверхностно-активных веществ позволит наночастицам свободно проходить через песок.

В целом картина, складывающаяся на основании анализа данных проведенных исследований, позволяет придти к выводу, что нанотехнологии не настолько вредны, как можно было бы предположить: наночастицы не отравляют землю и воду, а попадание их в организм не фатально и может быть ограничено системами фильтрации. Это будет стоить дорого, но при всех рисках, которые может таить в себе использование нанотехнологий, положительного эффекта от них все равно больше...

Как писал Ницше, «то, что нас не убивает, делает нас сильнее». Учеными давно выдвигается идея о том, что нанотехнологии не только не причинят экологии вреда, но и смогут помочь ей восстановиться после нанесенного в XX в. нокаута. Уже появилось новое направление, называемое на западе наноэкологией. Во-первых, не стоит забывать, какой принципиальный скачок в индустрии солнечных батарей можно совершить с помощью нанотехнологий. А это означает отказ от массового сжигания каменного угля и нефтепродуктов, исчезновение опасности парникового эффекта и разрывов в озоновом слое, последствий разливов нефти и выбросов отходов нефтепереработки, загрязнения воздуха продуктами сгорания. Что касается токсических выбросов, содержащих соединения мышьяка, ртути, кадмия, свинца, то и тут нано-

технологии могут выручить: достаточно запустить механизм, превращающий химический состав выбросов в нетоксичные вещества и элементы.

Изучая экосистему, мы должны понимать, что ее функции осуществляются определенными организмами или группами организмов. Эту роль могут выполнять и нанобъекты, управляющие экопроцессами там, где бессильны естественные регуляторы. Такие объекты (nanotech managers) могут восстанавливать поврежденные элементы биологических цепочек и вновь запускать нарушенные биопроцессы.

История экологических и социальных проблем нанотехнологий не нова – подобные идеи возникали ещё и несколько сотен лет назад. По одной из версий легенды о пражском големе, создавший его раввин однажды забыл вынуть у того изо рта бумажку с каббалистической формулой шем, которую нужно было вынимать каждый вечер. Последовавшее затем безумие этого первого в истории фантастики робота, разрушенные им дома и убитые жители еврейского квартала есть, по данной версии легенды, следствие нарушения порядка технической эксплуатации. Можно также вспомнить, что некоторые ученые конца XIX в. считали одной из главных проблем будущей экологии – наличие гигантского количества навоза на улицах городов. Развитие технологий предотвратило эту проблему, хотя автор данного текста склонен порой думать, что предпочел бы запах конского навоза автомобильному выхлопу.

Не стоит безусловно считать будущее технологии радужным и безоблачным. Правильное понимание нанопроцессов и побочных эффектов, создание систем фильтрации нового поколения, ограничение недобросовестных производителей и террористов – лишь некоторые пункты из списка задач, которые нам предстоит решать. Однако следует понимать, что выгоды от применения нанотехнологий будут перевешивать возможные трудности на пути их внедрения.

13.3. Наночастицы вредят экологии

Японские эксперты настаивают на более серьезном подходе к проблемам, связанным с использованием нанотехнологий. Иначе при всей

пользе нанотехнологий последствия для здоровья людей и окружающей среды могут быть ужасными. В рамках различных экспериментов установлено, что наноэлементы могут легко впитывать загрязнения и распространять их в окружающей среде. А отдельные вещества, разработанные на базе нанотехнологий, могут вызывать опасные повреждения внутренних органов.

Нанотехнологии, помимо положительного эффекта в самых разных областях, таят в себе и опасности для человечества, по мнению японских ученых. Речь в первую очередь идет об экологических проблемах, связанных с нанотехнологиями. При этом отмечается, что в самой Японии ситуация с нанотехнологиями воспринимается в радужных тонах, в то время как на Западе этими проблемами заняты всерьез.

Эксперты прогнозируют различные неблагоприятные воздействия нанотехнологий на окружающий мир и здоровье человека. При этом возникают серьезные споры, и отдельные эксперты советуют наложить мораторий на некоторые виды материалов.

Наноэлементы обладают абсорбирующими свойствами гораздо более высокими, чем у обычных молекул, т. е. наноэлементы могут поглощать большее количество загрязнений. Это может привести к тому, что при распространении наноэлементов в окружающей среде возникнет опасность распространения ими загрязнений [36].

13.3.1. Осторожно! Инновации

Риски для здоровья, с которыми сталкивается рабочий XXI в., приобретают все более странный характер. Человек все менее рискует надорваться от непосильного физического труда или стать калеккой от неправильной эксплуатации машины или станка. Причем растет опасность заражения новыми химическими средами и необычными видами поражений, связанных с инновациями в технологической сфере.

Исследователи из университета Северной Каролины обнаружили, что распространенный вид наночастиц — квантовые точки — способны проникать в тело человека через порезы и микротрещины. Квантовые точки — это изолированные нанообъекты, свойства которых серьезно

отличаются от свойств объемного материала того же состава. Лауреат Нобелевской премии 2000 г. по физике Ж. Алферов определил эти частицы как искусственные атомы, свойствами которых можно управлять.

Квантовые точки представляют собой структуры из полупроводниковых кристаллов, которые испускают фотоны при определенной длине волны. Квантовые точки до сих пор являются «молодым» объектом исследования, но уже вполне очевидны широкие перспективы их использования для дизайна лазеров и дисплеев нового поколения. Также возможно создание на их основе квантовых компьютеров, систем лечения опухолей, создания новых фотоэлементов.

Проблема экологии занимала человечество с давних времён. А с прогрессом и загрязнением окружающей среды проблемы экологии становятся всё более значительными. В последнее время их всё чаще пытаются решить с помощью нанотехнологий. Нанотехнология – это область науки и техники, которая занимается совокупностью теоретических и практических методов исследования, анализом и синтезом и методами изготовления и применения продукции, которая имеет заданную атомную структуру. Производство таких продуктов осуществляется контролируемым манипулированием отдельными молекулами и атомами. Применение нанотехнологий помогает значительно снизить загрязнение окружающей среды. Методы нанотехнологии применяют в самых разных областях во многих странах мира. Уже имеется немало достижений в нанотехнологиях, которые помогают уменьшить вредное влияние на окружающую среду: например, эта наука даёт новые возможности переработки мусора, очистки воды, определения ртути и т. д. Дальнейшие исследования дадут новые результаты, а значит, и новые возможности. В наше время развитие науки нанотехнологии, а также промышленности, с ней связанной, свидетельствует о развитости государства. Однако нанотехнология – новая наука и, несмотря на свои преимущества и достоинства, вызывает и опасения. Впрочем, любая медаль имеет две стороны. Поэтому, несмотря на явное положительное влияние нанотехнологий на жизнь современных людей, наночастицы могут наносить и вред, используясь в некоторых отраслях. Нанотехнологии в наши дни применяются почти во всех сферах современной жизни. Наночастицы используются даже в косметике и парфюмерии. Так, наночастицы оксида титана, содержащиеся в некоторых солнцезащитных кремах, погло-

щают излучение ультрафиолета с большой эффективностью, что, несомненно, делают такие кремы куда более эффективными, чем обычные. Однако впоследствии были проведены исследования, которые показали, что, например углеродные нанотрубки, оказывали губительное воздействие на крыс, попадая в их лёгкие, вызывали сильные нарушения, а затем разносились кровью по организму.

Или, например, были изобретены носки, содержащие наночастицы серебра, и поэтому не имеющие неприятного запаха. Исследования показали, что при стирке эти наночастицы попадают в воду, в которой могут вызвать сильные нарушения работы мозга и функций размножения организмов, живущих в воде. Так как практически все канализационные воды попадают в природные водоёмы, это может нанести вред не только организмам, живущим в них, но и людям. Главная проблема в том, что наночастицы проникают сквозь абсолютно все очистительные фильтры, которые существуют на наш день. Следовательно, использование нанотехнологий становится всё более активным, что влечет некоторую революцию в экологии. Будут создаваться специальные фильтры, задерживающие наночастицы. И, конечно, практически все новые технологии в первую очередь применяются в военной отрасли. Если применять нанотрубки при создании взрывчатых веществ, то, во-первых, это обеспечит огромную силу взрыва, во-вторых, нанотрубки, рассеивающиеся в воздухе, могут нарушать работу органов и клеток людей. Впрочем, страшилки можно рассказывать про любое новое явление. Так как нанотехнологии видимо облегчают жизнь человека, то можно предположить, что, во-первых, нанотехнологии будут использовать не во всех отраслях, а только в тех, где это необходимо. И, во-вторых, вскоре негативное влияние наночастиц будет изучено и будут придуманы новые методы защиты.

13.3.2. Нанотехнологии могут представлять угрозу для окружающей среды и здоровья человека

Мы живём в период бурного развития нанотехнологий. Развитая нанотехнологическая наука и промышленность – незаменимый атрибут развитого государства, свидетельствующий о том, что страна уже пере-

шагнула барьер, разделяющий индустриальное и постиндустриальное общество. Поэтому коснёмся опасностей, которые подстерегают человечество, переходящее на рельсы нанотеха.

Основной «строительной единицей» нанопроизводства является атом. Из этих элементарных частиц осуществляется «сборка» различных «микроконструкций»: нанотрубок, «нанолекарств», полупроводников нового поколения и т. д. Полученные нанотехнологические продукты обладают поистине фантастическими свойствами. Они сверхпрочны, сверхактивны и сверхмалы. Опасность наноматериалов в первую очередь обуславливается их микроскопическими размерами. Во-первых, благодаря малым размерам, они химически более активны вследствие большой суммарной площади поверхности «нановещества». В результате малотоксичное вещество может стать очень токсичным. Во-вторых, химические свойства «нановещества» могут в значительной степени меняться из-за проявлений квантовых эффектов, что в итоге может сделать безопасное вещество очень опасным. В-третьих, в силу своих малых размеров наночастицы свободно проходят сквозь клеточные мембраны, повреждая клеточные органеллы и нарушая работу клеток. Представьте себе попавшие в клетку многочисленные «иголки» нанотрубок, которые при движении с клеточным соком ломают и крушат всё на своём пути.

Уже сегодня нанотехнологии шагнули практически во все сферы жизни. Это вызывает определённые опасения, особенно после публикаций некоторых исследований.

В США недавно анонсировали «наноткань» для ликвидации нефтяных разливов. Заявлялось, что эта чудо-ткань абсорбирует нефти в 20 раз больше своего веса. К сожалению, о возможных последствиях использования этой наноткани не было сказано ни слова. Можно быть уверенными, что повреждения этого высокотехнологичного материала при использовании неизбежны, а это значит, что фрагменты нановолокон в итоге окажутся в клетках живых организмов, а далее «отправятся в путешествие» по пищевым цепям.

Таким образом, активное развитие нанотехнологии вызовет революцию и в экологии. В ближайшем будущем получат распространение такие понятия, как нанозкология, нанозагрязнение, нанотоксикология...

На смену экологии индустриального общества должна прийти экология постиндустриального общества. Большинство существующих

на сегодняшний день методик оценки качества окружающей среды направлено на выявление степени химического/физического загрязнения. Эти методики абсолютно не применимы для выявления «нанозагрязнения». Экологический мониторинг в будущем ждут большие перемены. Уже сейчас необходимо разрабатывать эффективные методы обнаружения наночастиц в природных средах (воде, воздухе и почве), разрабатывать методики определения токсичности наноматериалов и нормировать содержание различных наночастиц в окружающей среде, разрабатывать новые методы оценки воздействия на окружающую среду антропогенной деятельности. На сегодняшний день способов борьбы с «традиционным» химическим загрязнением недостаточно, что нельзя сказать о предотвращении загрязнения окружающей среды наночастицами. Здесь традиционные фильтры и системы очистки абсолютно бесполезны. Необходимо уже сейчас начинать работу над очистными системами нового поколения.

Особые опасения вызывает наноружие. Как известно из истории развития человечества, все передовые достижения науки первым делом внедряются в военной отрасли. Так, в США уже был анонсирован «нанотермит». Это взрывчатое вещество, упорядоченное на атомарном уровне, производит ещё больше энергии в единицу времени. Чудовищной силы взрывчатое вещество может быть начинено нанотрубками, которые при взрыве рассеиваются на большой площади, вызывая нарушения работы клеток и органов живой силы противника. Кроме того, как наноружие, так и токсичные нановещества могут стать опасной «игрушкой» в руках террористов. Вообще, нас ждёт интересное нанобудущее, господа!

14. МИРОВОЙ РЫНОК НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В последнее время в мире наблюдается быстрый рост государственных и корпоративных инвестиций в НИОКР в области нанотехнологий (НТ). Заметно увеличивается число соответствующих научных

разработок, патентов и публикаций в прессе. Количество нанотехнологических компаний, по некоторым оценкам, удваивается каждые 1,5-2 года и к 2008 г. превысило 16 тыс. [37]. В то же время многие зарубежные эксперты отмечают, что нанотехнологии – это не новая отрасль мировой экономики, а лишь средство для модернизации множества других ее отраслей. По сути дела, никакого строго делимитированного «нанорынка» не существует, и речь идет о заметном возрастании роли НТ в имеющихся производственных цепочках.

Лидерами по числу публикаций являются США (около 15 тыс. статей в 2007 г.) и Европа (чуть менее 12 тыс.). Значительно увеличился объем исследований, проведенных в области НТ в КНР, более 10 тыс. статей в 2007 г.

По числу патентов в области НТ однозначно лидируют США – 40 % мирового показателя. По официальной статистике, количество изобретений в рассматриваемой сфере в США к началу 2008 г. превысило 3 тыс. Наибольшее число патентов, полученных к настоящему времени, приходится на открытия в области обработки и обнаружения наноструктур, т. е. относятся к некоммерческой сфере.

Достижения НТ активно включаются практически во все отрасли экономики. Это приводит к тому, что возникают сложности с количественными оценками рынка. Одна группа экспертов при определении емкости рынка включает в него стоимость конечной продукции с применением наноразработок, другая – только стоимость наноматериалов. Поэтому имеющиеся оценки и прогнозы рынка различаются в несколько раз. Во-первых, не изучены риски, связанные с нанопродукцией. Во-вторых, оптимистичные оценки перспектив рынка зачастую основываются на предпосылке о возможном «прорыве» в сфере НТ (например, изобретение работоспособных нанокomпьютеров и нанороботов), который может и не произойти. В последнем случае будет иметь место линейный рост (например, совершенствование и увеличение объемов выпуска нанотрубок). В-третьих, необходимо учитывать, что приводимые в прогнозах цифры емкости нанотехнологического рынка во многих случаях учитывают стоимость всей продукции, произведенной с использованием наноразработок (например, стоимость всех проданных автомобилей с остеклением из нанопластиков, а не самого остекления), как не более чем грамотный PR-ход, направленный на привлечение инвестиций.

НТ применяются в процессе производства как минимум 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования. Сегодня на полученную с использованием НТ продукцию приходится около 0,01 % мирового валового продукта. По прогнозам ОАО «Роснано-тех», уже к 2010 г. эта доля возрастет до 0,5 %, к 2015 г. – до 2 % и к 2030 г. – до 40 %.

Согласно оценкам консалтинговой компании «Lux Research», в 2007 г. объем мирового рынка НТ составил 146,4 млрд. дол. Его ежегодный прирост оценивается в 15-17 %. Лидерами здесь являются США (59 млрд. дол.) и Европа (47 млрд.), которые с огромным отрывом опережают страны АТР (9,4 млрд.) (табл. 14.1, 14.2).

По оценкам исследовательской компании «Nanoposts» (США), мировые государственные и частные инвестиции в сферу НТ в 2007 г. составили около 10 млрд. дол., из которых 1,8 млрд. пришлось на страны Европы (доля частного сектора – 1/3), 4,8 млрд. – США (доля частного сектора – 55 %) и 3,4 млрд. – страны АТР (доля частного сектора – 65 %). Около половины мировых частных инвестиций в нанотехнологии приходится на долю США. Большинство зарубежных экспертов отмечают, что в условиях глобализации НИОКР такой показатель, как объем национального финансирования, не является представительным и не полностью отражает реальную расстановку сил в мировой нанотехнологической индустрии.

Таблица 14.1

**Государственное финансирование
в сфере НТ в европейских странах, млн. дол.**

Год	Великобритания	ФРГ	Франция	Швейцария	Нидерланды	Финляндия	Ирландия	Бельгия	Дания	Швеция
2002 г.	48	150	45	22	7	4	12	7	2,5	6
2003 г.	65	185	53	22	50	6	14	7	4	9
2004 г.	65	240	53	25	50	8	17	7	4	11
2005 г.	65	300	104	25	50	13	35	12	4	32
2006 г.	65	445	104	30	50	13	37	15	20	32
2007 г.	70	490	222	30	50	13	40	15	20	32
2008 г.	50	490	220	35	55	12	35	12	24	35

Таблица 14.2

**Государственное финансирование в сфере НТ в странах
Азиатско-Тихоокеанского региона, млн. дол.**

Год	Япо- ния	КНР	Респу- блика Корея	Тай- вань	Син- гапур	Ин- дия	Авст- ралия	США	Кана- да
2002 г.	720	50	79	22	21	4	9	697	10
2003 г.	800	55	154	50	22	7	15	863	15
2004 г.	900	60	165	96,5	22	7	23	989	15
2005 г.	975	70	165	108	22	10	27	1200	15
2006 г.	1000	90	190	115	22	14	33	1351	15
2007 г.	1400	200	205	240	25	35	45	1353	15
2008 г.	1400	265	210	240	35	40	55	1440	15
2009 г. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	1510	15

¹⁾ Запланированный объем.

В настоящее время начинается активный передел мирового рынка НТ, который, как ожидается, в основном завершится к 2015 г., когда США займут 30 % рынка (прирост к 2007 г. – 3 процентных пункта), Япония – 25 % (+1 пункт), страны Западной Европы – 20 % (-5 процентных пунктов). Оставшаяся часть рынка будет распределена между КНР, Россией, Республикой Кореей, Канадой и Австралией (-10 пунктов). Таким образом, США и Япония сохранят лидирующие позиции на рынке при снижении на нем удельного веса стран Западной Европы, Азии и других регионов.

Согласно мнениям других экспертов (чрезмерно оптимистично-му), к 2014 г. 15 % общей товарной массы в мире будут произведены с использованием нанотехнологических разработок. При этом в производстве средств информатики НТ будут обеспечивать 100 %-ный выпуск продукции: в бытовой электротехнике – 85, фармацевтике – 23, автомобилестроении – 21 % (табл. 14.3).

По итоговой оценке экспертов секретариата ОЭСР на базе, целого ряда источников, совокупная емкость мирового рынка товаров и услуг, связанных с нанотехнологиями, в 2015 г. составит 1,0-2,6 трлн. дол. Развитие nanoиндустрии к указанному сроку обеспечит создание в глобальном масштабе около 2 млн. новых рабочих мест.

Динамика и отраслевая структура мирового потребления отдельных видов наноматериалов, млн. долл.

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Наночастицы	1225	1600	2300	3200	4700	7600	9100	12400	15500	20500
Наноконпозиты	325,2	437,6	620,9	1335,4	1937	3132	4040	5051,5	6007,5	7298
Энергетика	-	1,3	2,9	7	18	31	47	62	81	100
Автомобильная промышленность	150	175	210	475	680	950	1200	1580	1820	2106
Пищевая промышленность	104	151	195	320	500	740	925	1090	1240	1560
Потребительские товары	40	67	95	178	296	635	790	875	1060	1248
Авиакосмическая промышленность	21	27	82	184	230	315	440	510	700	910
ИКТ	9	14	31	97	188	374	510	690	790	975
Строительство	0,5	1,2	3	9,5	16	76	115	230	300	380
Прочие	0,7	1,1	2	6,5	9	11	13	14,5	16,5	19
Наноканкулы	26,4	32	46,1	69,5	149,1	231,2	419,6	693,8	893,2	1113,7
Здравоохранение	15	18	22	31	79	104	220	440	510	540
Потребительские товары	9	11	14	18	32	46	78,5	102	165	212
Строительство	1,5	1,8	3,2	6	11	15,6	19,5	28	41	106
Пищевая промышленность	0,2	0,3	5,5	12	18	51	84	101	147	220
Хозяйственные товары	-	-	0,3	1,1	7	12	14,5	19	26	31
Прочие	0,7	0,9	1,1	1,4	2,1	2,6	3,1	3,8	4,2	4,7

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Нанопористые материалы	804	956,5	1182	1457,5	1762	2057	2483,5	2909,5	3276	3871
Энергетика	360	396	490	610	700	815	960	1114	1215	1420
Защита окружающей среды	415	520	623	731	860	967	1190	1349	1526	1755
Здравоохранение	7	11	19	37	66	82	114	146	183	220
Пищевая промышленность	21	27	47	75	130	185	210	290	340	462
Прочие	1	2,5	3	4,5	6	8	9,5	10,5	12	14
Нановолокна	11,1	24,7	51,5	120,2	250,4	407,2	634	865,5	1131	1471
ИКТ	2	7	15	39	64	97	194	280	345	480
Энергетика	1,2	3,1	6	14	46	94	125	167	204	265
Здравоохранение	0,1	0,1	0,4	3,7	14,9	21,2	23	26,5	28	31
Защита окружающей среды	6,6	9,8	18	39	78	115	166	200	264	313
Текстильная промышленность	0,2	1,5	2,7	4	7,5	16	24	31	37	45
Автомобильная промышленность	0,5	2	6,5	15	32	54	89	145	230	305
Авиакосмическая и оборонная промышленность	-	0,3	1,4	3,5	5	6	7,5	9	13	18
Прочие	0,3	0,9	1,5	2	3	4	5,5	7	10	14
Фуллерены	39,8	58,5	108,5	218	372	627	866,5	1157	1440	1875,5
Энергетика	14	20	33	77	145	267	330	440	520	610
ИКТ	12	17	29	68	121	200	280	330	400	550

Показатель	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Автомобильная промышленность	9	13	26	36	50	67	100	155	211	320
Авиакосмическая промышленность	2	3	9	16	27	41	87	140	195	250
Здравоохранение	0,2	0,5	1,5	3,5	5	7	10	14	20	25
Потребительские товары	2	4	8	14	19	38	52	70	85	110
Прочие	0,6	1	2	3,5	5	6	7,5	8	9	10
Нанопровода	22,4	34	52,4	79,5	111	158,5	431	731	979	1127
ИКТ	21	30	45	62	80	100	320	550	740	900
Защита окружающей среды	0,5	2	2,7	7	9	18	32	62	85	110
Здравоохранение	0,2	0,7	1,5	5	11	21	46	62	80	115
Оборонная промышленность	0,5	1	2,5	4	8	15	27	50	65	90
Прочие	0,2	0,3	0,7	1,5	3	4,5	6	7	9	11
Углеродные нанотрубки	71	104	168,5	247	411,5	676	962	1314	1963	2792
ИКТ	30	42	49	58	108	230	317	410	865	1095
Автомобильная промышленность	6	8,5	16	36	82	145	210	297	345	560
Авиакосмическая промышленность	9	11	19	50	76	113	211	315	400	590
Энергетика	6	8	12,5	16	34	57	71	90	116	145
Потребительские товары	19	34	57	84	106	122	141	186	213	370
Прочие	1	0,5	1,5	3	5,5	9	12	16	24	32

	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
	(млн. долл.)									
Квантовые точки	40,5	62,2	87,8	161	274	527	748	1011	1073,5	1331
Здравоохранение	2,5	3,5	6	9,5	21	54	68	125	201	325
Средства безопасности	3	6,5	12	37	104	134	187	245	310	370
ИКТ	33	47,5	60	95	111	265	390	460	510	645
Энергетика	1,5	3,4	8	17	35	70	97	119	143	180
Прочие	0,5	1,3	1,8	2,5	3	4	6	7	9,5	11
Нанопокрyтия	528,4	814	1522	2439	3565,7	5724	7493,9	9422	11309	13730
Авиакосмическая и оборонная промышленность	150	180	240	340	390	560	768	1140	1500	1880
Автомобильная промышленность	125,4	180,5	228	361	423,7	1007	1483,9	1748	1938	2451
Энергетика	21	32	46	57	101	179	360	500	620	750
Здравоохранение	30	51	88	175	370	750	930	1250	1475	1800
Строительство	35	48	72	151	245	330	460	563	625	750
Текстильная промышленность	62	110	240	375	630	845	1070	1250	1620	1900
Защита окружающей среды	5	11	30	49	95	140	197	280	325	420
Пищевая промышленность	19	30	85	130	190	245	310	355	420	491
Потребительские и хозяйственные товары	51	125	390	610	815	1264	1450	1700	2010	2350
Средства безопасности	27	41	95	180	293	387	440	605	740	896
Прочие	3	5,5	8	11	13	17	25	31	36	42

Примечание: 2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.
 Источник: данные компании «Nanoposts».

Самый крупный отраслевой сегмент мирового рынка НТ – наноматериалы, по итогам 2007 г. их было произведено на сумму 97 млрд. дол. (лидер по внедрению НТ – производство композитных материалов). На втором месте находятся электронные компоненты (35 млрд. дол.), на третьем – товары и услуги для здравоохранения (15 млрд. дол.). По прогнозам экспертов, к 2015 г. ожидается снижение удельного веса наноматериалов и увеличение – наноинструментов и наноприборов.

Таблица 14.4

**Основные сегменты мирового рынка НТ
для автомобильной промышленности
и транспортного машиностроения, %**

Год	I	II	III	IV	V	VI
			Доля сегмента			
2006	330	-	2	1,5	0,5	3
2007	475	44	2,5	2	0,5	4,8
2008	650	37	3	2,5	1	7
2009	970	49	4,5	6	3	9,5
2010	1150	18,5	14	12,5	6	12
2011	2650	130	-	25	16	9
2012	4000	51	-	36,5	18,5	11,5
2013	4600	15	-	46	24	14
2014	5100	10,9	28,5	17	37	28,5
2015	6450	26,4	31	22	45	31

Примечания: I – всего (млн. дол.), II – прирост к предыдущему году (%), III – покрытия, IV – конструкционные материалы, V – сенсоры, VI – топливные элементы, присадки, катализаторы; 2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.

Таблица 14.5

**Товарная структура продаж НТ
для автомобильной промышленности
и транспортного машиностроения, млн. дол.**

Год	I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6	7
2006	330	125,4	150	69,1	2,5	1,5
2007	475	180,5	175	94	8	23
2008	650	228	210	160	21	9

1	2	3	4	5	6	7
2009	970	361	475	245	29	15,5
2010	1150	423,7	680	305	64	26
2011	2650	1007	950	860	90	41
2012	4000	1483,9	1200	1025	157	110
2013	4600	1748	1580	1264	210	190
2014	5100	1938	1820	1455	305	245
2015	6450	2451	2106	1741,5	451,5	387

Примечания: I – всего (млн. дол.), II – нанопокрyтия, III – нано-композитные наполнители, IV – нанодобавки к катализаторам и смазочным маслам, V – топливные элементы, VI – интеллектуальные материалы и сенсоры; 2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.

Таблица 14.6

**Основные сегменты рынка НТ
для производства потребительских
и хозяйственных товаров, %**

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII
			Доля сегмента				
2006	350	-	0,5	I	-	0,8	0,2
2007	450	28,6	0,7	1,5	-	1,2	0,4
2008	780	73	1	1,8	0,2	3,3	0,9
2009	1245	59,6	1,2	2,5	0,4	6,5	1,5
2010	2100	68,7	1,8	3	0,8	10	3
2011	2715	29,3	2,5	3,5	1,3	21	5,5
2012	3750	38	7	7	3,5	29	8
2013	4600	22,6	9	11	5	37	12
2014	5350	16	12	13	6	42	15
2015	6100	14	15	19	7	54	18

Примечание: I – всего (млн. дол.), II – прирост к предыдущему году (%), III – средства личной гигиены, IV – косметика, V – средства для ухода за детьми, VI – хозяйственные товары, VII – товары для спорта и отдыха; 2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.

Таблица 14.7

**Товарная структура продаж НТ
для производства потребительских
и хозяйственных товаров, млн. дол.**

Год	I	II	III	IV
2006	350	40	70	51
2007	450	67	105	125
2008	780	95	180	390
2009	1245	178	300	610
2010	2100	296	515	815
2011	2715	635	705	1264
2012	3750	790	930	1450
2013	4600	875	1100	2115
2014	5350	1060	1300	2800
2015	6100	1248	1500	3477

Примечания: I – всего, II – нанокompозиты и нанотрубки,
III – нанопокpытия, IV – наночастицы;
2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.

Таблица 14.8

**Товарная структура мировых продаж НТ
для аэрокосмической и оборонной промышленности, млн. дол.**

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII
			Структура продаж				
2006	375	-	21	48,8	135	45	28
2007	450	20	27	58,5	165	56	39
2008	600	33	82	78	230	64	54
2009	850	41,7	184	110,5	323	93	80
2010	975	14,7	230	126,75	389	100	90
2011	1400	43,6	315	182	563	112	135
2012	1920	37	440	249,6	795	133,6	180
2013	2850	48,4	510	370,5	1148	228	272
2014	3750	31,6	700	487,5	1510	300	339
2015	4700	25,3	910	611	1880	376	420

Примечания: I – всего (млн. дол.), II – прирост к предыдущему году (%), III – нанокompозиты, IV – наноэлектронные приборы и сенсоры, V – нанопокpытия, VI – энергетические устройства и топливные присадки, VII – интеллектуальные материалы;
2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.

Таблица 14.9

**Основные сегменты рынка НТ для природоохранной индустрии
и водного хозяйства, %**

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
			Доля сегмента					
2006	40	-	0,3	0,5	0,5	0,2	0,5	-
2007	65	62,5	0,8	1	0,7	0,7	1	0,1
2008	110	69	1,5	2	1,3	1	1,4	0,5
2009	350	218	3	3	2	1,5	2,1	1,5
2010	725	107	4,5	5	2,8	2	3,7	2
2011	1370	89	6	7	4	3	5,5	3
2012	2105	53,6	9	10	11	14	9	4,5
2013	2900	37,8	15	12	17	22	19	6
2014	3350	15,5	19	14	22	30	27	7
2015	3765	12,4	24	18	31	46	37	9

*Примечания: I – всего (млн. дол.), II – прирост к предыдущему году (%),
III – очистка воды, IV – фильтрация воздуха, V – сокращение
вредных выбросов, VI – обнаружение и мониторинг,
VII – ликвидация последствий промышленных аварий,
VIII – повышение пригодности для повторного использования;
2006-2008 гг. – оценка, 2009-2015 гг. – прогноз.*

Таблица 14.10

**Товарная структура продаж НТ для природоохранной индустрии
и водного хозяйства, млн. дол.**

Год	I	II	III	IV	V
2006	40	23	3	16	5
2007	65	41	5	29	11
2008	110	69	8,5	41	30
2009	350	94	11	67	49
2010	725	163	15	91	95
2011	1370	247	21	135	140
2012	2105	340	134	450	197
2013	2900	575	210	1100	280
2014	3350	710	331	1650	325
2015	3765	975	490	1730	420

*Примечания: I – всего, II – нанопористые мембраны,
III – нанобиосенсоры, IV – наночастицы,
V – нанопокртия; 2006-2008 гг. – оценка,
2009-2015 гг. – прогноз.*

Источник: данные компании «Nanoposts».

В мировой наноиндустрии преобладают малые и средние компании. Так, в Германии около 60 % НТ-фирм имеют годовой оборот менее 15 млн дол., в США – 10-500 млн дол. Только в Японии у большинства компаний отрасли годовой оборот превышает 500 млн дол.

Можно выделить множество проблем, которые характерны для современных компаний, занимающихся нанобизнесом (согласно опросу Европейской ассоциации нанобизнеса (ЕНА) среди компаний отрасли), а именно:

- недостаточный размер государственного финансирования;
- отсутствие достаточно емких и сформировавшихся рынков сбыта;
- нехватка квалифицированного персонала;
- отсутствие стандартов в области НТ;
- низкая степень изученности влияния НТ на человеческий организм и окружающую среду, в частности последствий взаимодействия между новыми классами материалов, получаемых с использованием НТ, с одной стороны, и живыми организмами и окружающей средой – с другой.

К числу других барьеров, препятствующих развитию рынка НТ, эксперты американской консультационно-исследовательской компании «Nanoposts» (США) относят:

- спад ажиотажа и некоторое разочарование в мировом общественном мнении относительно перспектив НТ в последние 2-3 года, во многом обусловленное чрезмерно назойливым пиаром и шумихой в СМИ в конце 1990-х – начале 2000-х гг., способствовавших нагнетанию эйфории в деловых и официальных кругах;
- высокую капиталоемкость НИ-ОКР в сфере НТ и производства нанопродукции, ограничивающую возможности внутрифирменных источников финансирования;
- потенциально негативную реакцию общественного мнения на угрозы наноматериалов для здоровья людей и для окружающей среды;
- этические проблемы, связанные с применением НТ военными и силовыми структурами, а также неравенством возможностей справедливого доступа различных стран, регионов и групп населения к результатам НИОКР в наносфере;

- нормативные ограничения на использование НТ в различных сферах в условиях неопределенности соответствующих последствий (к настоящему времени существуют только рекомендательные акты и добровольные обязательства компаний, в частности «Code of Conduct for Responsible Nanosciences and Nanotechnologies Research» в странах ЕС, «Voluntary Reporting Scheme» (VRS) в Великобритании, «Nanoscale Materials Stewardship Program» (NMSF) в США.

В настоящее время в системе государственного регулирования сферы НТ выделяются 3 основные сферы: регулирование 1) химических субстанций (наноматериалов), 2) наноизделий и 3) наносодержащих отходов. По мнению независимых экспертов, ни в одной стране мира нет комплексной и скоординированной системы контроля за нанотехнологиями, в отличие от других технологий, которые будут определять развитие мира в XXI в. (ИКТ, биотехнологии и др.). В США и странах ЕС действуют лишь разрозненные программы, относящиеся к частным аспектам нанотехнологического бизнеса.

Среди законодательных актов, регулирующих сферу наноматериалов (субстанций), в США следует выделить Закон о контроле над токсичными веществами – Toxic Substance Control Act (TSCA), действующий с 1976 г. и с тех пор практически не менявшийся, что ограничивает его эффективность в отношении новых материалов, в Европе – Положение о регистрации, оценке и лицензировании химических веществ – REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) Regulation (EC) № 1907/2006, вступивший в силу 1 июня 2007 г. REACH не делает разделения между «новыми» и «старыми» субстанциями и возлагает бремя доказательства безопасности субстанции на изготовителя. С момента принятия REACH в Европейской комиссии ведутся постоянные дискуссии о механизмах применения его норм в отношении наноматериалов.

Межгосударственное регулирование рынка НТ в настоящее время практически отсутствует. Не существует официально согласованных на международном уровне терминов и определений в отношении НТ, процедур тестирования наночастиц на токсичность, стандартизованных процедур оценки последствий влияния наночастиц на окружающую среду. Известные методы испытания зачастую не пригодны для использования в отношении наноизделий. Имеется острая необходи-

мость в создании и согласовании измерительных приборов и методов измерения. Лишь небольшое число международных стандартов может быть частично применимо к нанотехнологиям (в частности, стандарты химического анализа и отображения ISO TC 201/202 и стандарт обнаружения и классификации частиц ISO TC 24).

По мнению экспертов Международного научного центра им. Вудро Вильсона, в будущем нормативное регулирование в сфере НТ будет сосредоточено в основном на наноизделиях, а не на наноматериалах. Поскольку один и тот же материал может оказывать совершенно разное воздействие на окружающую среду и живые организмы в зависимости от изделия, в котором он используется.

Если ближайшие перспективы мировой наноиндустрии связаны главным образом с технологиями «сверху вниз» (например, миниатюризацией полупроводниковых приборов), то в дальнейшем акценты все более будут смещаться к технологиям «снизу вверх» (молекулярные устройства, технологии самоорганизации материалов и т. д.). Распространение последних порождает ожидания более радикального прогресса, однако обладает значительно большей неопределенностью, что предъявляет серьезные требования к построению инновационных систем для коммерциализации НТ и актуализирует проблему совершенствования методов управления НИОКР.

15. О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ГЕРМАНИИ

В настоящее время в ФРГ существуют 740 компаний, действующих на различных стадиях процесса создания стоимости нанотехнологических товаров и услуг, в том числе примерно 600 из них (т. е. 80 %) являются малыми и средними фирмами. В 2008 г. оборот в сфере нанотехнологий достиг 33,3 млрд. евро, а численность занятых – 62,6 тыс.

Нанотехнологические разработки ведут 190 научных коллективов университетов и вузов, а также 105 научно-исследовательских институтов (самые крупные из них – Научное объединение Лейбница, Объединение Гельмгольца, Общество Макса Планка, Фраунгоферовское общество). Наибольших успехов в развитии нанотехнологического предпринимательства достигли федеральные земли: Северный Рейн – Вестфалия, Бавария, Баден – Бюртемберг, Гессен и Саксония.

Чуть более половины нанотехнологических компаний относятся к обрабатывающей промышленности (в лидирующей тройке отраслей – производство медицинских, прецизионных и оптических приборов, химическая промышленность, машиностроение). Весьма высок удельный вес сферы НИОКР и услуг (примерно 40 % общего числа фирм). Около 10 % компаний заняты в торговле соответствующими товарами и услугами.

Большинство (70 %) нанотехнологических фирм созданы после 1985 г., когда Федеральное министерство образования и исследований приступило к реализации первых государственных программ, стимулирующих развитие рассматриваемой области. Основанные ранее компании начинали свою деятельность в других сферах, а затем перешли на нанотехнологии. Более четверти (27 %) фирм использовали для начала своего бизнеса средства бюджетных программ, осуществляемых Министерством образования и исследований, Министерством экономики и технологий, Германскими землями и Евросоюзом. Чуть менее четверти компаний получили доступ к разработкам исследовательских институтов, а 16 % фирм – к венчурному финансированию.

Примерно 50 % компаний (т. е. около 370) имеют выраженную специализацию на нанотехнологиях, получая более чем 30 % оборота от продажи соответствующих товаров или услуг (в том числе у 30 % компаний эта доля превышает 60 %, а у 20 % – находится в диапазоне от 30 до 60 %). Для остальных нанотехнологии являются дополнительным направлением деятельности (это характерно прежде всего для крупных и средних компаний, действующих в традиционных промышленных отраслях). Существуют также крупные концерны, бизнес которых полностью сосредоточен на нанотехнологиях (особенно это касается такой отрасли, как электроника, поскольку стандартные размеры полупроводниковых структур в настоящее время заметно ниже 100 нм).

Распределение фирм по отдельным этапам процесса создания стоимости выглядит следующим образом: лидируют группы, объединяющие производителей наносистем и нанокomпонентов (на каждую приходится более четверти общего количества нанотехнологических компаний), менее крупные группы включают в себя производителей наноматериалов (около 20 %), сопутствующих услуг (примерно $\frac{1}{6}$), наноинструментов (около 10 %).

Степень ориентации на рынки других стран у нанотехнологических фирм значительна. Внутренний рынок является основным (свыше 50 % оборота) лишь для 28 % компаний. Среди зарубежных рынков основную долю занимают европейские государства, тогда как страны Северной Америки и Азии имеют меньшее значение. Почти $\frac{2}{3}$ фирм отдают приоритет в рамках производственной кооперации европейским партнерам.

Затраты на НИОКР в сфере нанотехнологий, осуществленные компаниями в 2007 г., составили 4,7 млрд. евро, в том числе 97 % этой суммы пришлось на 12 % фирм, годовые расходы которых превысили 1 млн. евро. Таким образом, НИОКР концентрируются в основном в крупном бизнесе. Собственные нанотехнологические исследования и разработки ведут около 120 крупных концернов. Так, в 2006-2008 гг. соответствующие расходы химического гиганта «BASF» составили 180 млн. евро.

Более половины (52 %) сотрудников нанотехнологических компаний имеют высшее образование, 20 % являются высококвалифицированными рабочими, 10 % – мастерами и техниками, остальные – неквалифицированными рабочими и администраторами. В период 2008-2013 гг. ожидается рост численности занятых в малых и средних фирмах более чем в 1,5 раза, потребность в профильном обучении работников в 2009-2010 гг. оценивается на уровне около 15 тыс. чел.

Специализированные учебные курсы по нанотехнологиям имеются в определенных германских университетах, расположенных в г. Вюрцбурге (нанометрическая техника), г. Ганновере и Эрлангене/Нюрнберге (нанотехнологии), г. Дуйсбурге/Эссене (наноинжиниринг), г. Касселе (нанометрические науки), г. Саарбрюккене (микро- и наноструктуры), а также в пяти вузах (Изерлон и Иски – базовое обучение; Мюнхен, Нюрнберг, Цвиккау – расширенное обучение).

Для улучшения рамочных условий внедрения нанотехнологий и объединения усилий науки, бизнеса, образования и общественных организаций федеральное правительство приняло еще в 2006 г. стратегический документ «Наноинициатива – план на 2010 г.». Основные направления этого плана, реализуемого Федеральным министерством образования и исследований и 8 другими федеральными ведомствами: поддержка малого и среднего бизнеса, занимающегося развитием нанотехнологий (проект «NanoChance»); создание сети из 6 центров взаимодействия на»; обеспечение доступа общественности к информации о развитии нанотехнологий (проект «NanoTruck»); изучение воздействия нанотехнологий на окружающую среду (проект «NanoCare»); поддержка нанотехнологических проектов, осуществляемых молодыми учеными (проект «NanoFutur»).

Существенно продвинулась в сфере подготовки специалистов по нанотехнологиям федеральная земля Северный Рейн-Вестфалия. Здесь работают более 300 кафедр по исследованиям в сфере нанотехнологий, многочисленные исследовательские институты и более 200 компаний, использующих нанотехнологии. Комплексным исследованием инновационных наноматериалов занимается Междисциплинарный центр при Рурском университете в г. Бохум, учрежденный компанией «ThyssenKrupp». Партнерами центра являются Институт Макса Планка (г. Дюссельдорф), а также Северный Рейн-Вестфальский технический университет (г. Аахен). Земельное правительство планировало в 2009 г. инвестировать в исследование и развитие нанотехнологий и инновационных наноматериалов 100 млн. евро.

«Университетский альянс Рурской метрополии» («Universitaetsallianz Metropole Ruhr») с 2008 г. сотрудничает с Пенсильванским университетом США, 3 университета – Бохумский (Universitaet Bochum), Дортмундский (Universitaet Dortmund) и Дуйсбург-Эссенский (Universitaet Duisburg-Essen) наладили сотрудничество с элитным американским университетом в области инженерных наук и нанотехнологий. Одним из важнейших партнеров для американской стороны стал Научно-исследовательский центр наноинтеграции Дуйсбург-Эссенского университета («Forschungszentrum fuer Nanointegration Universitaet Duisburg-Essen»).

Объединение научно-исследовательских центров им. Гельмгольца и Российский фонд фундаментальных исследований отобрали 6

- исследовательских групп, из которых каждая в течение 3-х лет будет ежегодно получать на свои исследования по 158 тыс. евро. Президент Объединения им. Гельмгольца проф. Ю. Млинек отметил, что Россия входит в число его ключевых партнеров, участвующих в реализации целого ряда совместных проектов, и это сотрудничество расширяется.

В 2008 г. был подписан меморандум о взаимопонимании с «Росатомом», и уже начаты совместные работы в области наноматериалов для энергетики. В Москве на базе Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) открыт Исследовательский центр для содействия Международному ускорительному центру по исследованию тяжелых ионов и антипротонов «FAIR» («Faculty for Antiproton and Ion Research») в г. Дармштадт. Российские физики участвуют в работе рентгеновского лазерного центра («X-ray Free Electron Laser» – «XFEL»), который построен в г. Гамбург на базе ускорителя элементарных частиц «DESY».

Издание «Lebensmittel Zeitung» в репортаже о конференции «Nano-Dialog» во Франкфурте, организованной в июле 2003 г. объединением предприятий «Forumnano», отметило, что Германия занимает 3 место в мире после США и Японии по числу запатентованных открытий в сфере нанотехнологий. Так, в 2007 г. ассигнования Федерального министерства образования, науки и технологии на нанопроекты составили 145 млн. евро, что в 4 раза больше, чем в 1998 г. Однако экономические возможности нанотехнологий в Германии до сих пор не используются в полной мере, тогда как темпы коммерциализации отрасли в США и Азии совершенно невероятные.

Объем бюджетных средств, выделяемых Федеральному министерству образования и исследований на поддержку развития нанотехнологий, вырос за 1998-2008 гг. в 10 раз, достигнув в конце 2008 г. 165 млн. евро. Кроме того, Германия получает значительное финансирование из средств исследовательских программ Евросоюза. В период действия 6-й Рамочной программы ЕС (2002-2006 гг.) на поддержку нанотехнологической сферы было выделено около 1,44 млрд. евро. Доля германских бенефициаров в общей сумме средств, выделенных в рамках указанной программы по направлению «нанотехнологий и нанонауки», составила 23,3 % (Великобритания получила 14, Франция – 10, Италия – 9, Испания – 4 %). Структура германских бенефициаров выглядит следующим образом: компании – 45, научно-исследо-

вательские учреждения – 27, университеты – 22, прочие – 6 %. В среднем по ЕС доля компаний среди бенефициаров 6-й Рамочной программы составила 38 %; повышенный уровень этого показателя в Германии рассматривается экспертами как положительный признак активного вовлечения бизнеса в процесс развития нанотехнологий.

В настоящее время действует 7-я Рамочная исследовательская программа ЕС (2007-2012 гг.), включающая в себя соответствующее направление с объемом финансирования на сумму 3,5 млрд. евро. Кроме указанной программы важную роль в качестве источника поощрения нанотехнологических исследований и бизнеса в Германии играет Европейский фонд регионального развития. Правительство ФРГ рассматривает нанотехнологии в качестве одного из наиболее значительных источников инноваций для германской промышленности, поскольку их применение может придать продуктам новые свойства, и соответственно будет способствовать появлению новых рынков сбыта.

Важным шагом федерального правительства стало создание в 2006 г. Нанокомиссии – национального форума, обеспечивающего взаимодействие представителей науки, бизнеса, природоохранных организаций, союзов потребителей, профсоюзов, министерств и ведомств. Ее главными задачами являются разработка и развитие принципов ответственного использования наноматериалов с учетом всесторонней оценки связанных с ними рисков и выгод.

Германское научно-исследовательское сообщество «Deutsche Forschungsgemeinschaft» (DFG) утвердило в июле 2008 г. 8 новых направлений научных исследований, среди которых представлено изучение молекулярных компонентов на наноуровне. На развитие новых направлений в течение 2008-2012 гг. намечалось выделить 59,5 млн. евро.

По сообщению германского издания «General Anzeiger», Союз потребителей ФРГ провел специальное социологическое исследование, в ходе которого 6 из 10 опрошенных признали, что им известно о нанотехнологиях крайне мало. Первоначально граждане относились к нанотехнологиям исключительно позитивно благодаря заявлениям ученых о необычайно широких возможностях наночастиц. Однако в последнее время все больше жителей страны задумываются о возможных рисках, связанных с использованием нанотехнологий. Среди наиболее опасных последствий рассматривается возможность проникновения наночастиц, содержащихся в кремах, через поры кожи в орга-

низм человека. Безопасность производимых кремов доказана в результате многочисленных исследований. Однако в некоторых случаях неизвестно их действие на поврежденных участках кожи.

Союз потребителей Германии пока не намерен активно выступать против распространения нанотехнологий. Тем не менее критически относится к их использованию в продуктах питания и упаковочных материалах. Союз выступает за то, чтобы все продукты, при изготовлении которых использовались нанотехнологии, имели соответствующее обозначение на упаковке. Кроме того, с точки зрения защитников прав потребителей, необходим специальный государственный реестр подобных продуктов, с которым потребители имели бы возможность ознакомиться.

В Германии, как и в некоторых других странах – членах ЕС, специалисты склоняются к принятию специального закона, регулирующего сферу нанотехнологий. Евросоюз, равно как и отдельные европейские государства, проводит оценку возможных рисков использования наноматериалов и пригодности для этих целей уже существующего законодательства, регулирующего оборот химических веществ, которое в значительной степени отличается от американского. Европейское законодательство требует предоставления сертификата безопасности для всех химических веществ, находящихся в обороте. При этом бремя доказательства безопасности возложено на производителя. (При подготовке статьи использовались материалы Торгово-экономического бюро Посольства РФ в ФРГ.)

16. О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ НАНОИНДУСТРИИ ФИНЛЯНДИИ

По данным исследования, выполненного консалтинговой компанией «Spinverse» по заказу Агентства по финансированию технологий и инноваций Финляндии «Tekes», в 2008 г. оборот наноиндустрии в стране, в ко-

торой активно работали 202 компании, превысил 300 млн. евро. В 2008 г. частные промышленные инвестиции в развитие нанотехнологий впервые превысили государственные (соответственно 56,6 и 38 млн. евро), венчурные инвестиции составили 9,5 млн. Экспортные операции обеспечили 60 % выручки всей отрасли, что в 3 раза больше, чем в 2004 г.

Таблица 16.1

**Динамика численности
финских нанотехнологических компаний**

Компании	2004 г.	2006 г.	2008 г.
Всего	61	135	202
В том числе имеющие коммерческий продукт	27	50	65

Источник: «Spinverse».

Основные кластеры, в которых ведут свою деятельность нанотехнологические компании в Финляндии, – это химия, информационные технологии, медицина, лесная промышленность и энергосбережение. Одной из главных целей компаний, внедряющих нанотехнологии в ближайшие несколько лет, становится наращивание объемов экспорта продукции.

Несмотря на малочисленность населения, Финляндия занимает первые места во всемирных инновационных рейтингах. Особенности ее национальной системы НИОКР являются интеграция в европейское и мировое пространство, ориентация на экспорт и ограниченное число направлений приоритетной поддержки. В стране достигнуто тесное взаимодействие государственного аппарата и бизнес-структур в сфере инновационного бизнеса.

Разработки в сфере нанотехнологий (в экспертизе которых обязательно участвуют специалисты из других стран) из-за малой емкости внутреннего рынка ориентированы в основном на экспорт. Государственное стимулирование НИОКР осуществляется с помощью грантов, льготных кредитов, участия в капитале и экспертной поддержки на всех этапах.

Основной принцип господдержки инноваций – использование минимума финансовых средств для получения максимума структурных изменений. По заявлению президента государственного фонда «Sitra» М. Косонена, ранее в этой сфере были допущены существенные ошибки. Так, значительные средства тратились на мелкие улучшения в лесной промышленности, но не использовались для ее структурной перестройки.

Нанотехнологии в Финляндии объявлены приоритетной областью НИОКР. Их развитие в 2005-2010 гг. стимулируется программой «FinNano» объемом 120 млн евро. Среднегодовые ассигнования по этой программе составляют 1,33 % всех государственных расходов на НИОКР (1,8 млрд. евро в 2008 г.). Для сравнения: бюджет Национальной нанотехнологической инициативы (США) в 2008 г. составил 1,5 млрд. дол., или 1,07 % государственных расходов на НИОКР.

Программу «FinNano» осуществляют:

- Министерство торговли и промышленности через Агентство по финансированию технологий и инноваций «Tekes» (70 млн. евро на прикладные НИОКР) и напрямую – по программе нанотехнологических кластеров (24 млн).

- Министерство образования (24 млн. – университеты/образовательная инфраструктура, 10 млн – Академия наук Финляндии/фундаментальные исследования).

- Министерство торговли и промышленности финансирует программу нанокластеров (12 млн евро/взаимодействие с промышленностью).

Государственное финансирование нанотехнологий сконцентрировано на приоритетных для страны отраслях – энергетике и защите окружающей среды, здравоохранении, информационных и коммуникационных технологиях, лесном кластере, машиностроении и металлообработке.

Исследования и разработки частных компаний ведутся в сотрудничестве с государственными университетами и исследовательскими институтами. Программу «FinNano» и национальную программу по функциональным материалам координирует частная консалтинговая компания «Spinverse».

Связь между индустрией и наукой осуществляется с помощью рабочих групп. Три из них имеют отраслевой характер (электроника, лесной кластер, нанобиотехнологии), другие относятся к широкому междисциплинарным направлениям (процессы и материалы, метрология и инструменты, безопасность и стандартизация).

Сектор электроники представляют 3 направления: мобильная электроника (компания «Nokia»), сенсоры («Vaisala» – мониторинг окружающей среды, «Suunto» – магнитные и медицинские сенсоры) и оптоэлектроника (один из крупнейших в мире производителей полупроводниковых лазеров – «Coherent Finland»). Разработка лазеров сосредоточена в Лазерном кластере (г. Тампере). Кроме «Coherent Finland», там действуют компании: «Cavitar» (лазерный мониторинг), «Coriease» (волоконные лазеры), «Epicrystals» (материалы следующего поколения для лазеров), «Modulight» (полупроводниковые лазеры для телекоммуникаций, медицины и специальных применений), «Reflekron» (зеркала для волоконных лазеров).

Лесная промышленность традиционно была фундаментом финской экономики. В настоящее время значение отрасли снизилось, но ее продукция все еще обеспечивает около 25 % экспортных поступлений. Нанотехнологии используются для повышения эффективности существующих процессов переработки древесины (покрытия и химикаты для бумагоделательных машин) и разработки новых видов продукции, таких как бумажные батарейки компании «Enfucell». Созданным исследовательским кластером «KCL» совместно владеют предприятия лесного кластера, Финский технический исследовательский центр (VTT) и несколько университетов.

В химической промышленности доля компании «Kemira» составляет около 3 % мирового производства диоксида титана, наночастицы которого непрозрачны для ультрафиолета и разлагают органические вещества под действием света. Компания «Granula» использует их для изготовления полуфабрикатов для косметической отрасли, а «Tikkurila» – для выпуска красок и покрытий. Наноструктурированные покрытия и материалы с помощью различных технологий производят несколько компаний.

«Vapeq» изготавливает самоочищающиеся и антимикробные покрытия для керамики и стекла с помощью технологии плазменного напы-

ления. Другой вариант этой технологии использует производитель оптического волокна – фирма «Liekki». Метод послойного атомного осаждения (atomic layer deposition – ALD) применяется финскими компаниями уже более 20 лет. Компания «Planar Systems» выпускает дисплеи на его основе, а также оборудование для ALD. Недавно реакторы нового поколения для ALD представила компания «Picosun», фирма «Nanoscale» предоставляет услуги по нанесению покрытий, в том числе на ювелирные изделия.

Финские фирмы в сфере биотехнологий и медицины используют нанотехнологии в диагностике, биоматериалах и лекарствах с направленной доставкой. В рамках «FinNano» группой из 50 научных и отраслевых экспертов создана подпрограмма «NanoLife», представившая долгосрочный прогноз развития финских биомедицинских исследований, охватывающий существующие направления и перспективные области взаимодействия с другими отраслями. В настоящее время в сфере нанобиотехнологий и медицины работают следующие компании: «Ani Biotech» (экспресс-тесты, в том числе первый в мире тест на целиакию); «Arctic Diagnostics» (лабораторная диагностика); «Ark Therapeutics» (генная медицина и вирусные векторы); «Biogenon» (биосенсоры с использованием оптоэлектроники); «Bioretex» (биосовместимые имплантаты и хирургическое оборудование); «Delsitech» (контролируемое высвобождение лекарств); «Inion» (рассасывающиеся имплантаты); «Innotrac Diagnostics» (лабораторная диагностика с использованием флуоресценции); «Karyon-CTT» (в структуре Хельсинкского университета, направленная доставка лекарств и методы визуализации с использованием липосом и пептидов); «Labmaster» (методы клинической диагностики, основанные на электролюминесценции); «Magnasense» (диагностика с использованием магнитных наночастиц); «Orion Diagnostica» (старейшая финская диагностическая компания, с 1989 г. разрабатывает и производит реагенты на основе полимерных наночастиц); «Stick Tech» (волоконные композиты для стоматологии); «Vivoxid» (имплантаты с использованием наночастиц диоксида титана).

В сфере междисциплинарных наноисследований и разработок Финляндия достигла успехов в развитии отдельных методов исследований и изготовлении материалов, используемых в нанотехнологиях.

Хельсинкский университет, Хельсинкский технологический университет и отраслевой кластер ведут исследования и разработки в области ALD и углеродных нанотрубок. Компания «Canatu» при Хельсинкском технологическом университете занимается коммерциализацией НИОКР.

Исследования в области молекулярной самосборки ведутся в Юваскюльском университете и Хельсинкском технологическом университете. Результатом являются новые сенсоры, мини-ферменты, нанопористые и другие новые материалы. Хельсинкский технологический университет также проводит исследования в области квантовой электроники и фотоники, в том числе в области низких температур. Центр нанонауки при Юваскюльском университете экспериментирует в области молекулярной электроники на основе ДНК, а в Центре оптоэлектронных исследований при Технологическом университете в г. Тампере ведутся исследования в области лазеров, сверхмощной и высокоскоростной оптики. Услугами центра пользуются около 40 компаний.

В области нанобиотехнологий лидируют лаборатории университета Турку и Хельсинкского университета. Для компьютерного моделирования используется крупный Центр коллективного пользования при Хельсинкском университете (COMP). Финские университеты также бесплатно используют суперкомпьютер Министерства образования, который поддерживает компания «Scientific Computing» (CSC).

Для исследования возможных рисков от применения наночастиц Академия Финляндии в рамках «FinNano» финансирует совместный проект Финского института профессионального здоровья и университета Куопио. Проект включен в европейскую программу исследований нанотехнологических рисков. Компания «Dekati» в сотрудничестве с университетом Тампере разработала прибор для измерения содержания отдельных видов наночастиц в окружающей среде.

Для проведения нанотехнологических исследований и коммерциализации их результатов используются центры компетенции и экспертизы в городах Хельсинки, Тампере, Миккели, Юваскюле, Коккола, Йоенсуу и Оулу. Разработки практически всех направлений в области нанотехнологий коммерциализируются в Техническом исследовательском центре (VTT) – самом крупном мультитехнологическом центре прикладных исследований в Северной Европе.

В области международного сотрудничества поощряется научный обмен: финские исследователи работают по всему миру, стимулируется также приезд в страну иностранных специалистов. Финляндия участвует во всех крупных европейских исследовательских проектах и координирует европейскую группу по исследованиям материалов «MATERA». В последние годы «Tekes» проявляет большой интерес к сотрудничеству со странами Азии. Финляндия первой подписала в декабре 2007 г. стратегическое соглашение с КНР о сотрудничестве в области нанотехнологий и представлена в нанотехнологическом парке в г. Сучжоу.

В декабре 2008 г. на Международном форуме по нанотехнологиям в г. Москва Министерство занятости и экономики Финляндии и ГК «Роснано» подписали Меморандум о взаимопонимании, который предусматривает обмен информацией о национальной политике в области нанотехнологий, научных исследованиях, производстве и потенциальных рынках. Кроме того, осуществляется взаимодействие при разработке механизмов оценки перспектив применения и рисков использования нанотехнологий, сертификации и стандартизации результатов исследований, защите интеллектуальной собственности в области нанотехнологий.

В апреле 2009 г. Финский институт развития нанотехнологий «FinNano» и ГК «Роснано» проанализировали возможности реализации совместных проектов, в том числе и финских проектов, нуждающихся в участии российских потенциальных инвесторов.

«FinNano» и администрация г. Санкт-Петербург интенсивно развивают сотрудничество в наносфере, основными задачами которого в ближайшие несколько лет будут являться: реализация государственной политики в области нанотехнологий; коммерциализация результатов научно-технической деятельности в области нанотехнологий; продвижение инфраструктурных проектов, ориентированных на развитие и коммерциализацию нанотехнологий; подготовка и переподготовка кадров в области нанотехнологий, а также возможность создания Петербургского нанофаба.

17. ДОСТИЖЕНИЯ СТРАН СНГ

17.1. Россия нанотехнологическая

Значительные усилия прилагаются российскими учёными в области получения ультрадисперсионных наноматериалов, с большим спектром практического применения, реализуемого практически во всех современных научно-технических разработках. Сфера применения ультрадисперсионных наноматериалов (УДМ) – нанотрубок, фуллеренов, ультрадисперсионных порошков, определяется прежде всего технологией их получения.

Исторический приоритет в практическом изготовлении и использовании наноразмерных материалов принадлежит России. Ещё в 50-е гг. на закрытых предприятиях Минсредмаша СССР были получены ультрадисперсные порошки (УДП) металлов с размером частиц около 100 нм, называвшиеся тогда оксалатными, которые были тогда успешно применены при изготовлении высокопористых мембран для изотопов урана. К началу 90-х гг. исследования позволили разработать около 20 способов производства ультрадисперсных материалов, выявить основные особенности их структуры и свойств, найти многочисленные примеры возможного практического применения. Причём работы велись со значительным опережением других стран. Сейчас в России некоторыми научными центрами и институтами разрабатываются и совершенствуются различные методы получения ультрадисперсионных порошков.

Широкое применение в порошковой металлургии нашёл метод механического диспергирования. При помощи механохимического воздействия получают нанокристаллические порошки сложных оксидов, нашедшие применение при получении наноструктурной магнитокерамики. Также у нас в стране механохимический метод признан перспективным при получении нанокompозитов, интерметаллических соединений, в системах с большими разностями температур плавления. Методы, основанные на процессах испарения и конденсации также нашли своё применение в получении ультрадисперсных порошков. Ультра-

дисперсные порошки различных типов и свойств в полупромышленном масштабе получают также плазмохимическим способом.

В настоящее время в России действует несколько промышленных участков по получению ультрадисперсных материалов взрывными методами, позволяющими реализовать высокие термодинамические параметры. Химические методы получения УДП на сегодняшний день являются наиболее традиционными и на их основе налажено широкое промышленное производство.

В отечественной науке существует несколько основных методов консолидации УД-порошков: одноосное изостатическое прессование, высокотемпературная газовая экструзия, прессование, ударно-волновое воздействие и ультразвуковое прессование, все эти способы описаны в работах Карагедова Г. Р., Алымова М. И., Иванова В. В., Шевченко А. А., Хасанова О. Л. соответственно. При МИФИ проводятся исследования в области механохимической активации УД-порошков с последующим холодным прессованием и спеканием. Этот метод является одним из перспективных методов получения нанокompозитных материалов, и сочетает в себе импульсное и статическое воздействие на наночастицы. Здесь же проводится работа по разработкам методики электроимпульсного прессования, применяемой при уплотнении и спекании электропроводящих порошковых материалов. Порошковый сплав меди, полученный этим методом, превосходит по твердости более чем в 10 раз медь марки М1. В Институте металлургии проводится усовершенствование технологии и организация производства активных металлических ультрадисперсных порошковых материалов. Получением нанопорошков различных материалов с использованием нагрева мишени частотным наносекундным пучком электронов занимаются в институте электрофизики (ИЭФ) УрО РАН.

Ультразвуковое воздействие позволяет при обычном одноосном прессовании сохранить ультрадисперсионное состояние в спрессованном порошке, ингибировать рост зерна в процессе спекания. Разработки в области исследования и получения УД-порошков, в частности механохимическим методом воздействия, ведутся в Новосибирске в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН. Исследования по ультразвуковому воздействию на УД-порошки при прессовании проводятся в Томском политехническом университете. Разработками ме-

тодов магнито-импульсного прессования занимается институт электрофизики УрО РАН.

Изучение фуллеренов в России ведется уже несколько десятилетий. В 1992 г. эти исследования, имевшие разрозненный характер, были объединены в поисковую программу общественного объединения ученых – Фонда интеллектуального сотрудничества, поддержанную Министерством науки и технической политики РФ. С 1995 г. программа – одно из трех направлений в ГНТП «Актуальные направления в физике конденсированных сред».

Синтезом фуллеренов и нанотрубок у нас в стране занимаются многие научные коллективы. Актуальной задачей для российской науки остаётся оптимизация известных методов и разработка новых методов получения фуллеренов и нанотрубок. Наиболее перспективным и распространённым методом является синтез фуллеренов в дуге с графитовыми электродами. По этому методу получают фуллерены в десятках лабораториях. Из-за высокой себестоимости производства фуллеренов широкомасштабное внедрение их в промышленность задерживается. Для изменения ситуации в данной отрасли требуются инвестиции, необходимые в разработке новых и модернизацию старых методов получения этого вида наноматериалов. Разработка способов получения фуллеренов и нанотрубок проводится в таких организациях: ОАО «Фуллереновые технологии»; фирма «Астрин»; ГНЦ Курчатовский институт; Институт неорганической химии (Новосибирск); Институт проблем химической физики РАН (Черноголовка), РНЦ Прикладная химия (Санкт-Петербург); Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург); Институт металлоорганической химии им. Г. А. Разуваева РАН (Нижний Новгород).

Нанотехнология затрагивает практически все сферы современной жизни. Развитие авиастроения, автомобилестроения, энергетической и транспортных областей невозможно без решения многих задач, таких, как разработка новых конструкционных и теплоизоляционных материалов, новых источников энергии, совершенствование механических конструкций.

Только на основе нанопорошков можно изготовить нанокерамику и нанокompозиты – материалы XXI в., обладающие уникальными эксплуатационными свойствами вследствие проявления размерных эффектов в

структуре с зёрнами порядка тех же 0,1 микрон. Сфера применения нанокерамики сегодня стремительно расширяется. Это материалы электроники: диэлектрическая и сверхпроводящая, пьезо-, сегнетоэлектрическая, полупроводниковая, керамика. Такие материалы повышают свойства электронных резонаторов и фильтров, световодов, инфракрасных и других оптических преобразователей, пьезопреобразователей и многих других элементов. Отсюда и широкий спектр областей применения: огромный рынок средств связи (мобильные телефоны и т. п.), бытовой техники (ИК-датчики для пультов дистанционного управления, пьезодатчики) и пр. Конструкционные детали из высокопрочной, ударновязкой, износостойкой, коррозионно- и термостойкой нанокерамики могут с успехом применяться в автомобильной, текстильной, кабельной промышленности, нефтегазовом, химическом, строительном машиностроении в качестве различных уплотнений, сопел, фильер и т. д. — там, где жёсткие и напряжённые условия эксплуатации. Нуждаются в таких материалах и медицина: это и биоактивная, и биоинертная керамика, композиты для имплантатов в хирургии, стоматологии и др.

Наноматериалы используются для создания пожаробезопасных и прочных теплоизоляционных материалов, для энергосбережения, для повышения эффективности сжигания топлива, для применения в аккумуляторах (системы подвижного состава). Уже сегодня они используются для повышения надёжности систем токосъёма на электротранспорте. Так, в АОА «Московские монорельсовые дороги» совместно ОАО «Цветметобработка» создан новый композиционный сплав на медной основе, структурированной астраленами. Повышение ресурса механических узлов транспортных систем за счёт использования новых смазочных материалов, создаваемых с применением ультрадисперсионных наноматериалов. Выявлено, что добавка фуллерена к машинному маслу существенно уменьшает трение. Антифрикционные и износостойкие характеристики материалов с добавками фуллеренов вполне сопоставимы с другими твёрдыми смазками из графита и дисульфида молибдена.

Созданием новых композиционных материалов с применением фуллеренов и нанотрубок для повышения износостойкости, прочности и трещиностойкости элементов, и совершенствованием других характеристик модифицированных ими сплавов, занимаются такие органи-

зации: ОАО «Московские монорельсовые дороги», ОАО «Цветметобработка», ИМЕТ РАН, ЗАО «Астрин». В Институте физики металлов УрО РАН исследуются прочность и трибологические свойства нанокристаллических структур, формирующихся при фрикционном воздействии с целью разработки новой технологии поверхностного упрочнения стальных изделий.

Материалы, полученные обработкой давлением (3-5 ГПа) при повышенных температурах смеси металла и фуллеренов в различных соотношениях, обладают высокой износостойкостью и прочностью. Материал, полученный прессованием из порошка железа и смеси фуллеренов C_{60}/C_{70} (10 % массы), обладает износостойкостью превышающей износостойкость стали X165CrMoV₁₂ в 4-5 раз, а также повышенной микротвёрдостью. Например, твёрдый сплав, модифицированный ультрадисперсным Al_2O_3 , обладает повышенной в 1,3-2,5 раза износостойкостью, прочностью и трещиностойкостью.

Разработка технологии получения высокопрочных нанофазных композитов методом ударного нагружения металлов и сплавов проводится в Институте проблем машиностроения РАН. Также созданием и внедрением новых материалов и высоких технологий производства изделий из нанокompозитных материалов занимается Институт химии Коми НЦ УрО РАН. Он же проводит разработку технологий получения высокотвёрдых ударовязких керамокомпозитов с нанокристаллической матрицей на основе карбидов титана, алюминия, кремния.

В Институте металлургии созданы новые нанокристаллические сплавы с высокими электрокаталитическими и механическими свойствами. Подобные разработки по нанокристаллическим сплавам ведутся в г. Черноголовка в Институте твёрдого тела, в котором изучаются структура и механические свойства нанокристаллических сплавов на основе Fe и Ni.

Разработку новых смазочных и охлаждающих составов с применением добавок ультрадисперсионных наноматериалов, для повышения ресурса механических узлов трения транспортных систем, проводят в таких организациях, как ЗАО «Астрин», НИИВН ТПУ, ЦНИИ КМ «Прометей». Научно-производственная фирма «Астрин» совместно с Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом создали сорбент редкоземельных металлов и солей урана на

основе многослойных углеродных нанотрубок для использования в процессах химической технологии. Получены результаты исследований, указывающих на повышение коэффициента ослабления рентгеновского излучения различных материалов, при введении определённых концентраций наполнителей из различных металлов и их соединений. Самый простой и близкий к реализации российский проект — производство паркетного лака с «нанодобавками», которые повышают износостойкость паркета в 10 раз по сравнению с обычными лаками. Этот лак планирует производить компания «Астрин» (Санкт-Петербург). Помимо этого, в «Астрине» производят сверхпрочный легкий «нанобетон».

На заводе «Ангстрем» (г. Зеленоград) сейчас реализуется проект по налаживанию производства датчиков, созданных с применением нанотехнологий. Эти датчики в тысячу раз чувствительнее всех ныне существующих и имеют широчайший спектр применения — ранняя диагностика землетрясений, появления микротрещин, медицинские исследования и т. д.

Разработка новых лекарственных средств на основе наночастиц является одним из наиболее перспективных направлений в фармакологии, поскольку лекарственные формы, содержащие металлы (Fe, Ag и Au), являются, например, менее токсичными, чем их неорганические и органические соли и комплексы. Лекарственные препараты могут использоваться в значительно меньших дозах, а также обладать некоторыми уникальными свойствами. Работы в этом направлении ведутся в Институте химии твёрдого тела РАН под руководством Павлюхиной Л. А. Полученные результаты могут быть использованы для создания биотехнологий в области средств защиты человека, животных и растений.

Получены УДП металлов и их солей с размерами частиц около 100 нм, которые были успешно применены при изготовлении высокопористых мембран для диффузионного разделения изотопов урана. В работах отечественных учёных сообщается о применении ультрадисперсионных оксидно-гидроксидных адсорбентов на основе порошков алюминия, для решения широкого круга технологических и экологических задач (тонкая комплексная очистка питьевой воды от тяжёлых металлов и органических загрязнений, очистка стоков гальванических

производств, добыча и переработка нефтепродуктов). Адсорбционная технология очистки нефтесодержащих сточных вод с использованием УДП оксидных адсорбентов реализована в промышленных масштабах в АОА «Томскнефтепродукт».

В России сегодня существуют разработки по использованию нанотехнологий при создании аккумуляторов механической энергии и разработки энергетических установок. В настоящее время энергетические установки, функционирующие на основе традиционной теплоэнергетики, практически вышли за пределы своих возможностей. Один из способов создания новых энергетических установок может быть реализован на основе лиофобных капиллярно-пористых систем на основе нанопористых матриц. Эта технология ведёт к разработке таких устройств, как преобразователи энергии, аккумуляторы механической и тепловой энергии, дефимеры пульсации давления и механических колебаний, пассивных защитных устройств по температуре и давлению.

Возможно применение наноматериалов для различных электрохимических устройств. Электроды из углеродных нанотрубок однородны по толщине, легко воспроизводимы, доступны потокам носителей заряда, обладают высокой механической прочностью и проводимостью, легко режутся на куски любой формы. Работы по производству и разработкам твёрдотельных аккумуляторов с использованием разработок в области нанотехнологии ведутся в Санкт-Петербургском НИИ физики. Известны работы, где электроды из прессованных нанотрубок применяются в качестве анодов литиевых химических источников тока. У нас в стране уже созданы аноды с ёмкостью порядка 600 мА ч/г, что гораздо выше, чем в известных промышленных образцах.

Разработку фильтров, поглотителей и адсорбентов на основе наноматериалов в России проводят: РНЦ-ФЗИ, АОА «Томскнефтепродукт», а также ассоциация предприятий Минатома «Аспект». Разработка нанокатализаторов ведётся в ТНИИ высоких напряжений и МИСИС. Существует программа Минатома РФ «Получение, исследование свойств и применение ультрадисперсионных материалов-нанокристаллов». В её рамках были произведены исследования и разработки, в ФЗИ (г. Обнинск) были изготовлены опытные образцы фильтров для очистки воды и радиационных отходов, новые сверх-

твёрдые материалы произведены на комбинате «Электрохимприбор», (г. Лесной).

Другая формирующаяся программа Минатома РФ «Ультрадисперсные наноматериалы и технологии». В её рамках в Курчатовском институте были созданы полупроводниковые и металлические нанокластеры в твёрдотельных матрицах с целью визуализации информации и создания солнечных элементов. В НПО «Луч» произведён материал на основе интерметаллических соединений титана и магния с ультрадисперсной структурой и повышенной водородоёмкостью. Разработана технология изготовления высокопористых деталей из наноалюминия, а также проводились исследования в ВНИИЭФ (г. Саров) по применению новых видов наноматериалов в производстве оборонной техники.

17.2. Казахстан

Сказать, что в Казахстане имеет место развитие нанотехнологий как науки, это означает ничего не сказать. Все исследования, проводившиеся в научном мире в области нанотехнологии в советские времена, имели отношение к казахстанской науке. А потому, разумеется, какие-то заделы и исследования есть и развиваются дальше. Об этом лучше, чем в аналитической работе «Нанотехнологии» из серии публикаций по проблемам научно-технического развития «Состояние исследований в Казахстане по приоритетам научно-технологического развития», выпущенной в АО «НЦ НТИ», не написать.

Данный аналитический доклад достаточно полно отражает состояние исследований в области нанотехнологий в республике, кто и как продвинулся в своих работах, каковы приоритеты казахстанских исследователей.

Следовательно, однозначно можно сказать, что мы далеки от перехода к наноиндустрии, далеки от широкого внедрения достижений нанотехнологий в какие бы то ни было отрасли индустрии страны. Нет и значимых достижений в сфере трансферта технологий.

В первую очередь это связано с отсутствием импульса широкого развития самой индустрии республики, что влечет и отсутствие потреб-

ности. Только в индустриально развитой, промышленно работающей стране имеет место потребность в реконструкции действующих предприятий с применением инновационных технологий.

Нанотехнологиям пророчат большое будущее, но о развитии этого прогрессивного направления в Казахстане, честно говоря, мало кто знает. По крайней мере те ответственные лица, от которых зависит финансирование науки будущего, кажется, еще не проснулись. Может быть, от своего неверия в светлые умы соотечественников, а может, и от собственной дремучести в этом вопросе. Но тот факт, что Казахстан реально является первой страной, осуществившей прорыв в механохимии (являющейся одним из разделов нанотехнологии) знают единицы. И человек, совершивший невозможное, проживает здесь – в Усть-Каменогорске. Но почему же его голову все еще не украшают лавры международного признания и ему приходится носить терновый венец безразличия к достижениям, которые могли хотя бы в этом вопросе возвысить нашу страну над всеми державами мира?

Главный конструктор ТОО НПО «Инновационные нанотехнологии Казахстана» Алексей Алексеевич Башкирцев (он же ИП «NSB: Сверхизмельчение Башкирцева») уже 22 года занимается разработкой и усовершенствованием метода сверхизмельчения самых различных материалов с помощью собственных мельниц – механоактиваторов. Кандидат технических наук, под руководством профессора В. И. Баловнева, закончивший аспирантуру в МАДИ, он даже был лично знаком с Сергеем Сергеевичем Марковым, лауреатом Ленинской и четырех Государственных премий, награжденным орденом Ленина за полет Юрия Гагарина в космос.

В 1995 г. по инициативе главы ВКО Ю.И. Лавриненко и главы г. Усть-Каменогорска Н.Т. Носикова, при поддержке помощника Президента РК И. Тасмагамбетова и первого вице-премьера В. Л. Метте, метод сверхизмельчения, мельницы и продукция в виде ультрадисперсных порошков были представлены Президенту РК Н. А. Назарбаеву.

Как перекликаются нанотехнологии и мельницы? В одном миллиметре тысяча микрон, в одном микроне тысяча нанометров, а микро-

скопический размер нанометра соответствует 10 атомам кислорода, расположенным в цепочке. Представить такое сложно, еще сложнее – получить. Применяя метод сверхизмельчения, Алексей Башкирцев научился перемалывать компоненты до размеров, приближенных к наночастицам.

Существует и другая проблема в республике. Вышел закон об инновациях, ученые готовы действовать, а чиновники отмалчиваются, кормят обещаниями или предлагают финансовую поддержку, которой хватит разве что на ремонт офиса. Хотя оснащение одной нанолaborатории тянет на 160 тыс. дол. Ведь разговор идёт о науке нового века!

Как можно двигать высокие технологии, если чиновники говорят, что в Казахстане нанотехнологий нет и быть не может! Получается, деньги, выделяемые на развитие инноваций, это то, чего нет и не будет. Вот оно – отношение чиновников.

Однако, несмотря на трудности и препоны, ТОО НПО «Инновационные нанотехнологии Казахстана» продолжает осваивать новые технологии в сверхизмельчении, уже есть собственные продукты.

Большую помощь в работе оказывают частные предприниматели, руководство ТОО «Эмиль» в лице С. Быкова и братьев Аберле. На их личные средства в Санкт-Петербурге были приобретены уникальные приборы, проведена капитальная реконструкция производственных помещений. Но возможности их не безграничны.

Одним из инновационных продуктов является цемянка, которая ранее применялась в древнегреческой, древнеримской и древнерусской архитектуре в кладочных растворах и в штукатурке под роспись храмов. Римские акведуки, вечная штукатурка Сикстинской капеллы – это цемянка.

Конечно, современный инновационный продукт не совсем то, что пришло к нам из глубины веков – продукт, полученный Башкирцевым, говоря языком научным, является наноструктурированной цемянкой, навечно срастающейся с основой, на которую ее нанесли. Цемянке не страшны время, морозы, сырость. Сейчас продукт проходит исследование на воздействие кислот. Учитывая то, что цемянка обладает уникальными свойствами, ее цена в 5 раз ниже стоимости любой фасадной краски.

Сейчас А. Башкирцев совместно с Академией питания Казахстана работает над вопросами извлечения биологически активных веществ из растительного и животного сырья и перевода их в биодоступную форму, что открывает дорогу к созданию мощных БАДов, иммуномодуляторов и антиоксидантов – продуктов, которые при нашей злобующей экологической обстановке могли бы подаваться каждому горожанину на стол в качестве утешительного десерта. За счет промышленных гигантов, конечно.

17.3. Украина

Украина, благодаря разработке целой группы нанотехнологий – эрозионно-взрывных нанотехнологий получения наноматериалов, имеет возможности выйти в мировую группу ведущих производителей наноматериалов в целом. В частности, с помощью эрозионно-взрывных нанотехнологий получены следующие новые наноматериалы:

- неионные коллоидные растворы наночастиц металлов;
- анионоподобные высококоординационные аквахелаты нанометаллов;
- гидратированные наночастицы биогенных металлов;
- гидратированные и карботированные наночастицы биогенных металлов;
- электрически заряженные коллоидные наночастицы металлов;
- электрически нейтральные и электрически заряженные металлических наночастицы в аморфном состоянии;
- структурированные агломераты наночастиц;
- наногальванические элементы;
- энергоаккумулирующие металлические наноматериалы.

Применительно к большой группе наноматериалов на основе металлов Au, Ag, Cu, Co, Mn, Mg, Zn, Mo, Fe, получены технические условия (ТУ У 24.6-35291116-001:2007) и налажено их производство.

17.4. Узбекистан

В Институте химии и физики полимеров Академии наук Узбекистана открылась научно-практическая конференция, посвященная актуальным вопросам химии, физики и технологии полимеров. Директор Института химии и физики полимеров Академии наук Узбекистана С. Рашидова отметила, что развитие, поддержка инновационной деятельности, расширение интеграции науки и производства являются приоритетным направлением реформ, проводимых под руководством Президента И. Каримова. Благодаря созданным широким возможностям последовательно развиваются фундаментальные и прикладные научные направления и инновационные исследования, в практику внедряются новейшие технологии.

В ходе изысканий наших ученых достигаются весомые результаты в создании композиционных материалов на основе местного сырья и производственных отходов, научных основ формирования наночастиц и наноструктур в полимерных системах. Эти новшества эффективно внедряются в производство.

Примером тому служит новая технология, применяемая на Ферганском заводе фурановых соединений. На предприятии широко используется эффективный метод получения карбоксиметиловой целлюлозы, где производится около 1200 т продукции в год.

Научные проекты, реализуемые в сотрудничестве со специалистами комплекса «Шуртангазкиме», способствуют получению в будущем импортозамещающей продукции из местного сырья, дальнейшего развитию отраслей экономики [38].

При кафедре иммунологии и иммунофармакологии Ташкентского института усовершенствования врачей создан Центр молекулярной медицины и нанотехнологий. Специалисты центра будут способствовать развитию медицинской науки, внедрять в практику высокие технологии, основанные на молекулярной медицине и нанотехнологиях.

Большое внимание ученые намерены уделить совершенствованию таких широко применяемых методов диагностики, как иммуноцитохимия, иммуноферментный, радиоиммунный, иммунохимический анализ и другие. Используемые в стране методики – это в основном разработки зарубежных специалистов, нуждающиеся в адаптации к

региональным условиям. В целях достижения наиболее высоких результатов своей деятельности центр устанавливает деловые контакты с ведущими компаниями, занимающимися производством фармацевтической продукции и средств медицинского назначения. Приоритетным направлением является возможность прогнозирования и предупреждения заболеваний. При помощи способов молекулярной иммунологии можно определить генетически обусловленные заболевания задолго до их клинического проявления, а значит, и принять более эффективные меры по их профилактике.

По данным Академии наук РУ, изучение наноразмерных структур и разработка на этой основе нанотехнологий для создания материалов с заранее заданными свойствами является сегодня одним из самых перспективных направлений современной науки. Область применения таких уникальных материалов широка – от разных отраслей промышленности и сельского хозяйства до медицины и фармацевтики. Подобные технологии построения наноструктур и создания нового поколения полимерных материалов с заранее заданными свойствами, в том числе на основе полисахаридов, уже в течение нескольких лет успешно разрабатываются в Институте химии и физики полимеров. Принципиальное значение имеет то, что создаются они в основном из местного природного сырья и получаемых из него веществ, в том числе из хитина, хитозана, целлюлозы, которые относятся к полисахаридам. Так, для сельского хозяйства были разработаны экологически безопасные средства защиты, регуляторы и стимуляторы роста растений, технология капсулирования посевных семян. Из природных полимеров созданы многие эффективные лекарственные препараты. Синтезированные в лабораториях института новые полимеры используются при производстве строительных материалов, сварочных электродов, бумаги, в химической, пищевой промышленности. Работа по всем этим направлениям, в том числе по созданию особо прочных композиционных материалов, продолжается, тематика исследований ориентирована на конкретные потребности отечественной экономики и социальной сферы. Налажено тесное сотрудничество с крупными зарубежными научными центрами, проводятся совместные исследования.

Узбекистан обладает огромным научным, научно-техническим и производственным потенциалом, позволяющим успешно внедрять со-

временные технологии в изготовление так называемых «умных тканей». Именно эти широкие возможности привлекли французскую компанию «Olmix» к налаживанию сотрудничества с Узбекистаном в области нанотехнологий. На рынке Узбекистана эта французская компания работает уже 10 лет, тесно сотрудничая с Алмалыкским ГМК.

В изготовлении материалов нового поколения используются в качестве нанокomпонентов такие материалы естественного происхождения, как глина. На основе глины создаются вещества, которые могут использоваться в различных видах производства. Если говорить о конкретном материале, то один из них – амадеит, который применяется в таких отраслях промышленности, как изготовление комбикормов, пластмасс, керамики, косметики и косметотекстиля. Внедрение нового наноматериала в хлопковое волокно либо в синтетические материалы существенно повышает эффективность, расширяет диапазон применения веществ и улучшает качество конечного продукта. В перспективе предполагается информирование и обучение местных специалистов по внедрению нового наноматериала в хлопковые волокна.

18. НАНООБРАЗОВАНИЕ

В мире, в Европе и США, наука вплотную подошла к моменту крупнейших нанотехнологических открытий, которые обязательно коснутся всех областей человеческой деятельности. Коренные изменения, которые последуют за этим, поставят вопрос об адаптации человеческого общества к тем новым достижениям, которые принесёт с собой нанотехнологическая революция. Возникнет необходимость пересмотра отношения человечества к миру не только в материально-техническом плане, но и в философско-социальном. Человечество уже столкнулось с неприятием научного движения, с непониманием роли последствий нанотехнологических изменений. Возникла острая необходимость в коррекции не только системы образования, но и всех об-

щественных институтов. Потребуется переподготовка технического персонала и научных сотрудников, чей образовательный уровень в области нанотехнологии будет непосредственно влиять на положение государства в мировой экономике, на его технические и научные достижения и соответственно на благосостояние всего общества.

Уже сегодня в США значительное место в образовательных программах отводится подготовке и переподготовке специалистов по нанотехнологии. Крупнейшие университеты и институты по всей стране создают и разрабатывают специальные образовательные программы для студентов, семинары для преподавательского состава по нанотехнологии. Существуют даже курсы лекций для школьников – «Нанотехнология детям». Огромные средства тратятся на создание образовательных центров и лабораторий. Подготовка высококвалифицированных специалистов есть основа для прогрессивного развития науки и внедрения нанотехнологических открытий в человеческую жизнь. Крупные программы по подготовке специалистов по нанотехнологии проводятся в США рамках государственной программы «Нанотехнологическая инициатива», для всех областей науки и техники. На их основе такие области, как машиностроение, электроника, энергетика, компьютерная и военная техника, биотехнология и медицина, получают специалистов с более высоким потенциалом для разработки новых технологий и направлений с учётом современных нанотехнологических достижений. Подобные образовательные программы проводятся также и в Европе. Причём большую их часть разработали университеты и научные центры Германии.

В Российской Федерации, несмотря на тяжёлое экономическое положение, отсутствие централизующих головных программ со стороны государства, нанообразование также имеет место. Естественно, прерогатива в этом принадлежит Москве, как наиболее развитому в экономическом отношении региону. Как и нанотехнология, нанообразование в России находится на низком уровне – отсутствие государственных специализированных программ, недостаточная информированность преподавателей в сфере современных научно-технических открытий – приводят к тому, что проблемы и вопросы нанотехнологии у нас в стране известны не многим. Среди московских вузов освещение области нанотехнологии и работа со студентами проводится в МИФИ, МИРЭА,

МГТУ, МГУ. Значительную роль в российском нанообразовании занимает Институт нанотехнологий МФК. Необходимо организовать переподготовку и повышение квалификации перспективных молодых специалистов и преподавателей и с их помощью модернизировать технологию и содержательную часть образовательных процессов в вузах. Уже сейчас ощущается острая нехватка специалистов, способных обеспечить становление и развитие в России новых технологий будущего. В этих условиях Наноцентр ИНАТ МФК взял на себя инициативу проведения различных семинаров и организацию курсов лекций по предмету нанотехнологии. Также предмету нанотехнологии уделяется внимание в НГУ, Санкт-Петербургском ГУ, Томском ГУ, Воронежском университете и в других крупнейших российских вузах. Основная проблема заключается в отсутствии базовой программы, способной объединить усилия преподавателей, и разрозненные учебные курсы. В России сегодня нет единой образовательной программы, утверждённой Министерством образования, почти отсутствует специализированная литература, не написаны в достаточном количестве учебники, посвященные рассмотрению предмета нанотехнологии.

18.1. Интернет-ресурсы

Образовательные учреждения

На веб-страницах университетов и институтов, в образовательных программах которых уделяется внимание дисциплинам, связанным с нанотехнологией, а преподаватели и студенты проводят исследования в этой области, непосредственная информация по деятельности в рамках нанотехнологии недостаточна. Данные ресурсы представляют интерес прежде всего как Интернет-представительства этих образовательных учреждений, благодаря которым можно ознакомиться с общими направлениями их деятельности и получить контактную информацию: МИФИ; МГУ; МГТУ им. Н. Э. Баумана; МИРЭА; НГУ (Нижегородский государственный университет); МИСИС; Санкт-Петербургский государственный университет; Воронежский государственный университет.

Научно-исследовательские институты, научные центры и коммерческие организации

Ниже представлены Интернет-ссылки на веб-страницы российских организаций, производящих исследования и разработки в области нанотехнологии: Наноцентр; НИИ физических проблем; НТ-МДТ, (г. Зеленоград); Институт прикладной физики (г. Санкт-Петербург); Институт нанотехнологий международного фонда конверсий; ОАО «Ангстрем»; МИСИС; Объединённый институт ядерных исследований; Институт общей физики РАН; ИФП СО (Институт физики полупроводников СО РАН); Институт проблем химической физики; Институт физики твёрдого тела РАН; Институт биохимической физики; Центр фуллеренов и наноструктур; ФТИ им. Иоффе; ФИАН им. Лебедева (Физический институт РАН им. Лебедева); Институт квантовой физики; ИПМ РАН им. М. В. Келдыша; ИПТМ РАН (Институт проблем технологии микроэлектроники).

Одной из важных задач в области развития нанотехнологии в России остаётся создание единой информационной электронной базы, связывающей все российские научные центры и институты, даже при отсутствии централизованной поддержке государства. Содействие государства и поддержка российской сети Интернет, а также, организация головных программ по развитию отечественных разработок в области нанотехнологии, способны повлиять на положение российских Интернет-ресурсов, посвящённых нанотехнологии.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Мировая наука и исследовательские центры, занимающиеся исследованиями в области нанотехнологий, стоят на пороге крупнейших научных достижений, которые непременно коснутся всех областей человеческой деятельности. Изменения, последующие вслед за этим, поставят вопрос о нашей адаптации к тем достижениям, которые готовит нанотехнологическая революция.

Во всём мире наблюдается рост государственных и корпоративных инвестиций в НИОКР в области нанотехнологий, увеличивается число соответствующих научных разработок, патентов и публикаций. Количество нанотехнологических компаний удваивается каждые 1,5-2 года и в 2008 г. превысило 16 тыс.

Свидетельством воздействия нанотехнологий в имеющихся производственных цепочках является тот факт, что нанотехнологии применяются в процессе производства как минимум 80 групп потребительских товаров и более 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования. В мировой наноиндустрии, как правило, преобладают малые и средние компании. Основными проблемами, характерными для современных компаний, занимающихся нанобизнесом, являются:

- недостаточный размер государственного финансирования;
- отсутствие достаточно емких и сформировавшихся рынков сбыта;
- нехватка квалифицированного персонала;
- отсутствие стандартов в области НТ;

– низкая степень изученности влияния НТ на человеческий организм и окружающую среду, в частности последствий взаимодействия между новыми классами материалов, получаемых с использованием НТ, с одной стороны, и живыми организмами и окружающей средой – с другой.

К числу менее существенных барьеров, препятствующих развитию рынка нанотехнологий, эксперты американской консультационно-исследовательской компании «Nanoposts» (США) относят:

- спад ажиотажа и некоторое разочарование в мировом общественном мнении относительно перспектив НТ в последние 2-3 года, во многом обусловленное чрезмерно назойливым пиаром и шумихой в СМИ в конце 1990-х – начале 2000-х гг., способствовавшей нагнетанию эйфории в деловых и официальных кругах;

- высокую капиталоемкость НИОКР в сфере НТ и производства нанопродукции, ограничивающую возможности внутрифирменных источников финансирования;

- потенциально негативную реакцию общественного мнения на угрозы наноматериалов для здоровья людей и для окружающей среды;

- этические проблемы, связанные с применением НТ военными и силовыми структурами, а также неравенством возможностей справедливого доступа различных стран, регионов и групп населения к результатам НИОКР в наносфере;

- нормативные ограничения на использование НТ в различных сферах в условиях неясности соответствующих последствий.

Ближайшие перспективы мировой nanoиндустрии, связанные главным образом с технологиями «сверху вниз» (например, миниатюризацией полупроводниковых приборов) сегодня, в дальнейшем будут смещаться к технологиям «снизу вверх» (молекулярные устройства, технологии самоорганизации материалов и т. д.). Распространение последних порождает ожидания более радикального прогресса, однако обладает значительно большей неопределенностью, что предъявляет серьезные требования к построению инновационных систем для коммерциализации НТ и актуализирует проблему совершенствования методов управления НИОКР.

Развитие нанотехнологий в Казахстане необходимо начинать:

- с определения ключевых стратегических областей исследований, на которые следует сосредоточить внимание;

- с достижения межгосударственных соглашений с Россией и странами Европы, продвинутыми в области исследований и имеющими значительные наработки и достижения в нанотехнологии;

- с решения проблем nanoобразования и подготовки квалифицированных кадров;

- с трансферта практических достижений нанотехнологий или новейших технологий с применением нанотехнологий в различные отрасли индустрии страны, как один из путей выполнения индустриально-инновационной политики государства.

Создание или ориентация имеющихся, нескольких параллельно развивающихся региональных нанотехнологических центров или нанотехнопарков в зависимости от их исследовательских направлений:

- *металлургия и ядерные исследования* – создание или улучшение с помощью нанотехнологических методов оборудования для горнодобывающей отрасли (Восточный Казахстан);

- *нефте- и газовая промышленность, нефтехимия* – производство полимерных материалов с применением нанотехнологических методов, разработка полимеров с применением наночастиц для более полного извлечения нефти из скважин, разработка новых смазочных и охлаждающих составов с применением добавок ультрадисперсионных наноматериалов, для повышения ресурса механических узлов трения транспортных систем (Западный Казахстан);

- *сельскохозяйственное машиностроение* (Акмолинская область);

- *фундаментальные нанотехнологические исследования* – создание единой информационной электронной базы, создание новых композиционных материалов, с применением фуллеренов и нанотрубок, для повышения износостойкости, прочности и трещиностойкости элементов, совершенствование других характеристик модифицированных ими сплавов, создание новых нанокристаллических сплавов (г. Алматы);

- *нанобиология* – создание новых лекарственных препаратов с применением наночастиц, внедрение в организм наночастиц;

- создание пожаробезопасных и прочных теплоизоляционных материалов для энергосбережения, как для повышения эффективности сжигания топлива, так и для применения в аккумуляторах (г. Алматы).

Только с учетом перечисленных условий возможно создание и финансирование малого и среднего нанотехнологически ориентированного бизнеса с основными направлениями:

- улучшение качества используемых узлов и частей агрегатов для автомобильного парка,

- улучшение нефтегазового и горнорудного оборудования,

- совершенствование отдельных частей и деталей сельскохозяйственной техники и оборудования с целью продления сроков износоустойчивости, придания новых свойств и т. д.

- внедрение в производства новых разработок.

Только через малый и средний нанотехнологический ориентированный бизнес возможно внедрение достижений нанотехнологической индустрии, только этот путь откроет широкие внедренческие возможности.

Сильный толчок в развитие нанотехнологии в республике может способствовать заинтересованности крупных национальных компаний, поиск ими и привлечение зарубежных технологических партнеров и технологий. И эти нацкомпании будут создавать малый и средний нанотехнологически ориентированный бизнес.

Другая, требующая решения основная проблема, заключается в отсутствии базовой программы, способной объединить усилия преподавателей и разрозненные учебные курсы. Сегодня в нашей стране нет единой образовательной программы, отсутствует специализированная литература, совершенно нет отечественных учебников и учебно-методических пособий для изучения предметов нанотехнологии и биотехнологии. В школах не практикуются курсы лекций для учеников по нанотехнологии и биотехнологии. Отсутствует популяризация этих предметов для населения.

Одной из важных задач в области развития нанотехнологии и биотехнологии остаётся создание единой информационной электронной базы, связывающей все казахстанские научные центры и институты. Порой под громкими нанотехнологически и биотехнологически названными программами скрываются банальные исследования, не имеющие отношения к этим наукам.

Обеспечение правовой охраны создаваемых нанотехнологий и продукции является одним из показателей реализации программы развития nanoиндустрии любой страны. Только наличие правовой охраны

созданных результатов интеллектуальной деятельности обеспечивает возможность их легального использования и введения в гражданский оборот.

Для подачи заявки на выдачу охранного документа необходимо проведение патентных исследований, подтверждающих новизну и изобретательский уровень разработки. Патентные исследования также позволяют обеспечить высокую конкурентоспособность результатов научно-технической деятельности (РНТД) путем постоянного отслеживания мировых тенденций развития определённой области техники и сопоставления достигнутых показателей собственных разработок с последними мировыми достижениями. Определение научно-технического уровня разработок на основе патентной информации представляется чрезвычайно важным как в рамках деятельности организаций – разработчиков в сфере нанотехнологий, так и при проведении комплексной научной и технологической экспертизы проектов и программ. Однако при проведении патентных исследований необходимо учитывать многоотраслевой характер нанотехнологий и некоторые их специфические особенности, требующие особого подхода при проведении патентного поиска. Поэтому работы по определению патентоспособности разработок, технического уровня, тенденций развития, патентной чистоты и конкурентоспособности разработок в сфере нанотехнологий требуют создания специальной нормативно-правовой и методологической базы.

Данная работа вполне по силам департаменту интеллектуальной собственности и патентной экспертизы АО «НЦ НТИ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Российский энциклопедический словарь.
2. (http://www.smalltimes.com/..._display.cfm Section=ONART&C=
=RD&ARTICLE_ID=303151&p=109 Нанотехнологии: инвесторов стимулируют будущие применения).
3. Drexler K.Eric, Engines of creation, Anchor Books Doubleday, New York, 1986. – 299 p.
4. <http://nano.xerox.com/nanotech/nano4/merklePaper.html>
5. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. // Appl. Phys. Lett. 1982, 40; Phys. Rev. Lett. 1982, 49; 1983, 50.
6. Kroto H., Heath J., O'Brien S., Curl R., Smalley R. // Nature. 1985, 318.
7. Binning G., Rorer H., US Pat.43433993, Aug.4,1982 .Scanning tunneling microscope.
8. <http://www.construct.net/project/nanotech/conference>
9. [http://science.nas.nasa.gov/Groups/Nanotechnology/publications/
MGMS_EC1/program/index/html](http://science.nas.nasa.gov/Groups/Nanotechnology/publications/MGMS_EC1/program/index/html))
10. http://www.wag.caltech.edu/gallery/nano_comp.html)
11. <http://www.imm.org>
12. <http://nano.xerox.com/nanotech>
13. О развитии сфер использования углеродных нанотрубок // БИКИ. – 2009. – № 91. – С. 12-13.
14. <http://www.computerra.ru/science/480783/>
15. http://www.sovetnikprezidenta.ru/72/4_nano.html
16. (www.nyu.edu/projects/nanotechnology)
17. Drexler K. E. Molecular Manufacturing: Perspectives on the Ultimate Limits of Fabrication. Phil. Trans. R. Soc. London A. 1995. – 353 p.

18. Drexler K. E. Building Molecular Machine Systems // Trends in Biotechnology, 1999, 17.
19. Bauschlicher Ch., Merkle R. Diamond Memory. <http://nanozine.com>.
20. J. Superconductivity. – 2000. – V. 13, № 2.
21. Источник: <http://www.membrana.ru/.../174300.html>
22. Burnside, E.P. Giannelis, Chem. Mater. 7 (1995) 1597].
23. Гельман З., Тель-Авив – Иерусалим // Российская газета. – 2008. – Федеральный вып. № 4775.
24. <http://nanodigest.ru/...view/386/42/>
25. Тимошенко А. <http://www.gzt.ru/.../271467.html>
26. <http://dentalworld.ru/news/54022/>
27. Гаврилов Ю. Российские специалисты создают оружие с использованием нанотехнологий // Российская газета. – 2009. – Центральный вып. № 4829.
28. Кирьянов О. <http://www.rg.ru/...op-poln.html>
29. National Nanotechnology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan. National Science and Technology Council, Committee on Technology, Sub-committee on Nanoscale Science // Engineering and Technology, Washington, D.C., July 2000. – 141 p.
30. Nanotechnology Research Directions: Interagency Working Group on Nanoscience // Engineering and Technology (IWGN) Workshop Report. National Science and Technology Council (NSTC), Committee on Technology (CT). Kluwer Academic Publishers, 2000. – 316 p.
31. О частных инвестициях в нанотехнологии // БИКИ. – 2009. – № 4. – С. 3.
32. Кукол Е. Через двенадцать лет 40-50 процентов российских предприятий должны работать на инновационных технологиях // Российская газета. – 2008. – Центральный вып. № 4805.
33. Лихарев К. К. О возможности создания аналоговых и цифровых интегральных схем на основе эффекта дискретного одноэлектронного туннелирования // Микроэлектроника. – 1987. – Т. 15, вып. 3. – С. 3-11.
34. Неволин В. К. Нанотехнология // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. – 1988. – Вып. 4 (128). – С. 81. 35. (www.foresight.org/guidelines)
36. По материалам www.inopressa.ru
37. Мировой рынок нанотехнологий // БИКИ. – 2009. – № 92. – С. 10-13.
38. NanoWeek. – 2009. – № 88.

СОДЕРЖАНИЕ

Глоссарий	3
Введение	8
1. Нанона начало	11
1.1. Наносегодня	11
1.2. Наноистория	14
1.3. Базовая системная концепция	16
2. Наноинструментарий	20
2.1. Туннельная микроскопия	20
2.2. Наноассемблеры	23
2.3. Компьютерное обеспечение	26
2.3.1. Компьютерное моделирование в молекулярной нанотехнологии	26
3. Наноматериалы	31
3.1. Ультрадисперсные порошки	31
3.1.1. Диспергирование	33
3.1.2. Синтез	37
3.2. Нанопленки	41
3.2.1. Туннельно-зондовый массоперенос	42
3.2.2. Самоорганизованные структуры	43
3.2.3. Графеновая электроника выращивается прямо на микрочипе	51
3.3. Фуллерены и фуллериты	52
3.3.1. Фуллерены – молекулярная форма углерода	53

3.3.2. Получение фуллеренов и фуллерита	55
3.3.3. Структура фуллерита	56
3.3.4. Свойства фуллеренов и фуллерита	57
3.3.5. Проводимость и сверхпроводимость фуллеренов ...	58
3.3.6. Использование фуллеренов	60
3.4. Углеродные нанотрубки	63
3.4.1. Металлы и полупроводники	67
3.4.2. Диод	68
3.4.3. Полевой транзистор	69
3.4.4. Дисплей	72
3.4.5. Электромеханический резонанс	73
3.4.6. Квантовые провода	73
3.4.7. Химическая модификация	74
3.4.8. Металлизированные нанотрубки	75
3.4.9. Нанотрубки с аддендами	76
3.4.10. Способы получения нанотрубок	79
3.4.11. Долгий путь открытий: нанотрубки	83
3.5. Наноремни – новый тип наноструктур	86
3.6. Нанотороиды	87
3.7. Уникальные новые материалы	89
3.7.1. Сверхпрочные материалы	89
3.7.2. Высокопроводящие материалы	89
3.7.3. Нанокластеры	89
3.7.4. Магнитные кластеры	90
3.8. Хемосенсорные наноматериалы	90
4. Наноустройства	92
5. Наносистемы	98
5.1. Нанотехнологические процессы	99
6. Наномеханика	101
6.1. MEMS-технологии и мини-роботы «Сандиа»	101
6.2. Электромеханическая система нанометрового масштаба	105
6.2.1. Молекулярные шестерни и насосы	106
6.2.2. Строительная бактерия	106
6.2.3. Разделение наночастиц	107
6.3. Молекулярные двигатели для нанотехники	107
6.3.1. Молекулярный двигатель на основе ДНК	110

7. Нанoeлектроника	111
7.1. Нанокomпьютерные технологии	111
7.1.1. Золотые чипы	112
7.1.2. Нанокольца преобразят компьютерную память	113
7.1.3. Алмазная память для компьютеров	114
7.1.4. IBM, разрушая, создают элементную базу на углеродных нанотрубках	116
7.2. Спинтроника	117
7.2.1. Спинтроника на основе кремния	121
7.2.2. Одноатомный транзистор для квантовых компьютеров	122
7.3. Нанооптика и фотоника	123
7.3.1. Нанотранзисторы	124
7.3.2. Ультраострые полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок	126
7.3.3. Полевая электронная эмиссия из нанотрубок, выращенных на вольфрамовом наконечнике	127
7.4. Новые источники энергии	130
7.4.1. Золотые солнечные батареи	135
7.4.2. Сверхпроводящая станция впервые свяжет три электросети	136
8. Нанохимия	138
8.1. Нанокатализаторы	139
8.1.1. Нанокатализаторы для фармы	140
8.2. Нанокomпозиты	141
8.2.1. Слоистые силикаты как наполнители	142
8.2.2. Синтез нанокomпозитов	143
8.2.3. Свойства нанокomпозитов	144
8.3. Нанокерамика	145
9. Наномедицина	149
9.1. Наноробот берется за скальпель	153
9.1.1. Нанотаблетки вместо уколов	154
9.1.2. Нанотехнологии избавят больных от уколов	155
9.1.3. Шипастые капсулы	156

9.1.4. Наночастицы для восстановления спинного мозга	156
9.1.5. Гибридный композит для лечения корневого канала зуба	157
9.2. Генетика и биотехнологии	158
10. Военные нанотехнологии	161
10.1. Военные нанотехнологии в США	162
10.1.1. Военные нанотехнологии в Израиле	163
10.1.2. Нанотехнологии в Великобритании	164
10.1.3. Нанотехнологии в Китае	164
10.1.4. Биооружие XXI в. – насекомое, съедающее танк	165
10.1.5. Нанотехнологическое оружие России	166
10.2. Жуки-киборги вылетели на пробную разведку	168
10.3. Весь мир работает над созданием «солдат будущего»	171
11. Наноиндустрия	176
11.1. Наноиндустрия ближайших лет	180
11.1.1. Частные инвестиции в России	182
12. Нанобудущее	183
12.1. Прогнозы экспертов	185
12.2. Нанофантастика	189
12.2.1. Молекулярная хирургия и молекулярные роботы	193
12.2.2. Антистарение	194
12.2.3. Крионика	196
12.2.4. Нанороботы – будущий триумф или трагедия для человечества?	204
13. Нанотревоги	208
13.1. Идеализм, цинизм и реализм	210
13.2. Нанотехнологии могут быть опасны	211
13.3. Наночастицы вредят экологии	216
13.3.1. Осторожно! Инновации	217

13.3.2. Нанотехнологии могут представлять угрозу для окружающей среды и здоровья человека	219
14. Мировой рынок нанотехнологий	221
15. О перспективах развития нанотехнологий в Германии	235
16. О перспективах развития наноиндустрии Финляндии ...	241
17. Достижения стран СНГ	248
17.1. Россия нанотехнологическая	248
17.2. Казахстан	255
17.3. Украина	258
17.4. Узбекистан	259
18. Нанообразование	261
18.1. Интернет-ресурсы	263
Выводы и рекомендации	265
Литература	269

Мурат Смагулович Тасекеев

НАНОТЕХНОЛОГИИ:
от нанофантастики к нанореализму
(обзорно-аналитическое исследование)

Редактор *А. А. Козлова*
Компьютерная верстка *Л. Е. Чертковой*

Подписано в печать 26.04.2010.
Формат 70x108/16. Печать офсетная. Бум. офсетная.
Усл. п. л. 16,0. Тираж 100 экз. Заказ 135.

Редакционно-издательский отдел и типография НЦНТИ.
050026, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 221