

И.В. Разумовская

НАНОТЕХНОЛОГИЯ – ОСНОВА ТРЕТЬЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора, определили облик XX столетия»

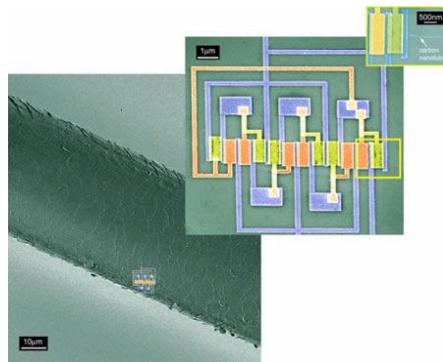
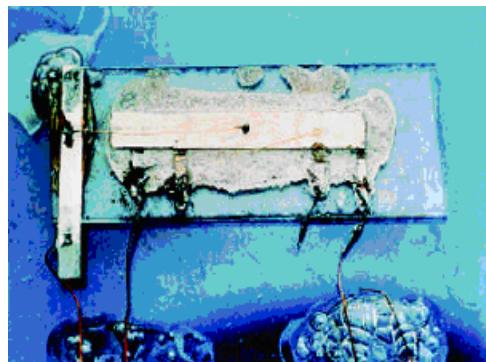
Ж.И. Алферов

В статье рассматриваются проблемы, определившие широкое развитие на современном этапе нанотехнологий. Показана связь наноразмеров с живой природой, проблемами экологии и быстродействием наносистем. Представлены возможности таких инструментариев наноэлектроники, как силовой и туннельный микроскопы. Обсуждаются свойства и возможности нанотрубок, фуллеренов, кластеров.

нанотехнологии, научно-техническая революция, силовой и туннельный микроскопы, наноматериалы, нанотрубка, фуллерен, кластер.

Первая научно-техническая революция – *энергетическая* – началась с применения парового двигателя, запатентованного Джеймсом Уаттом в 1769 году. До этого в качестве источника энергии использовалась энергия ветра, падающей воды и просто мышечная сила животных и людей. Энергетическая революция, начавшаяся с использования энергии пара, затем обратилась к энергии электричества, двигателей внутреннего сгорания, атомной и непосредственно солнечной энергии, к реактивным двигателям. От использования мышечной силы человечество за 230 лет пришло к сложным энергетическим комплексам современного производства. Первая научно-техническая революция резко увеличила физические возможности человека.

В 60-х годах XX века, во многом как следствие Второй мировой и последующей холодной войны, началось развитие микроэлектроники – основы второй, информационной, научно-технической революции. Управляющие элементы в технических устройствах, в том числе для передачи и приема информации, в средствах транспорта становились все сложнее, а составляющие их единицы (транзисторы, конденсаторы, сопротивления) все миниатюрнее. На рисунке 1 приведены для сравнения первая интегральная схема нобелевского лауреата Джека Кирби (1958 г.), первая интегральная схема на углеродной нанотрубке (2004 г.) и человеческий волос. В настоящее время на 1 мм^2 помещаются миллионы конденсаторов, транзисторов и т. д. и плотность информации становится сравнимой с плотностью информации на ДНК.



*Рис. 1. Слева – первая интегральная схема Дж. Килби (1958 г);
справа – первая интегральная схема на углеродных нанотрубках (2004 г.),
для сравнения рядом дана фотография человеческого волоса
(источник: CNews.ru. 2006. 28 March)*

Информационная революция подняла на новый уровень автоматизацию на производстве и транспорте. Автопилоты на самолетах и автомобилях, беспилотные объекты в воздухе, на суше и в воде, высокоавтоматизированные заводы, управляемые зонды-исследователи космоса и т. д. – это сочетание достижений первой и второй научно-технических революций. Но информационная революция создала, кроме того, новую информационную среду для всего человечества. Радио и телевидение, мобильная связь и Всемирная паутина – Интернет – за 30–40 лет неизмеримо увеличили информационные возможности каждого человека. Информационную революцию по значимости для человечества сравнивают с развитием книгопечатания, однако в XX веке возникновение сети разнообразных наземных и космических каналов связи произошло за десятилетия, в то время как развитие книгопечатания заняло столетия. Мы узнаем о событиях в любой точке Земли практически моментально, мы общаемся с людьми на любых расстояниях. Достижения информационной революции, в том числе так называемое «открытое» (электронное) образование, увеличили способность человека – способность передачи информации, которая сделала его ведущим биологическим видом на Земле.

Третья научно-техническая революция, основанная на нанотехнологии, привела человечество к осознанному созданию и использованию наноструктур, являющихся промежуточными объектами между отдельными атомами и макроскопическими твердыми телами.

Нанометр (нм) – одна миллиардная (10^{-9}) метра. По международной классификации к наноструктурам относятся объекты, которые хотя бы в одном измерении имеют размер не больше 100 нм. На рисунке 2 приведены примеры наноструктур, имеющих наноразмер по трем измерениям (квантовая точка, собрание атомов на границе полупроводника), двум измерениям (углеродная нано-

трубка) и одному измерению (графен, представляющий собой моноатомный слой графита).

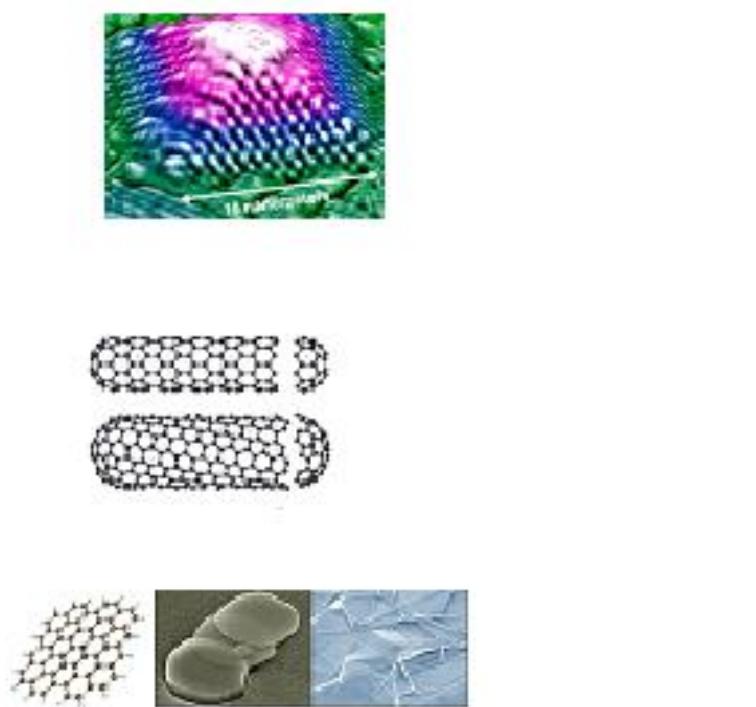


Рис. 2. Примерыnanoструктур разной размерности

Наноструктуры подчиняются квантовым закономерностям, поэтому их использование затруднено, но вместе с тем они открывают совершенно новые, неожиданные технические перспективы. Наноматериалы, то есть материалы, содержащие наноструктуры, также отличаются нетривиальными свойствами.

Нанотехнология впервые поставила задачу принципиального изменения технологии получения материалов, структур и устройств. Принцип «сверху вниз» (top-down) заменен принципом «снизу вверх» (bottom-up). В технологии «сверху вниз» из макроскопических материалов различными методами получали другие макроскопические или микроскопические материалы и устройства, применяя дробление, растворение и осаждение, обработку поверхности электронным или лазерным излучением и т. д. Новая технология провозглашает принцип «снизу вверх»: любой материал или устройство, уже существующее в природе или создаваемое впервые, можно собирать начиная с отдельных атомов по безотходной технологии, по принципу конструктора. При этом на первый план выходят характерные для природы процессы самоорганизации. Н.Н. Леденцов, сотрудник нобелевского лауреата академика Ж.И. Алферова, в популярном докла-

де, посвященном работе их лаборатории, писал, что не нужно пытаться бороться с природой, нужно эту природу изучать, радоваться ей и просто следовать тому, что она сама хочет сделать, а сделать она очень хочет наноструктуры, сама хочет определять размеры, плотности, относительное расположение нанообъектов. Так была сформулирована новая парадигма отношения к росту квантовых точек – переход к самоорганизующимся наноструктурам.

Очень важно, что наноразмер характерен для живой природы. Поэтому нанотехнология граничит с биотехнологией и иногда их трудно разграничить. Нанотехнология не только открыла необыкновенные перспективы для современной техники, но, по словам одного из ее идеологов Эрика Дрекслера, стала «путем к бессмертию и свободе». Предполагается, что использование нанотехнологии в медицине и физиологии человека позволит вводить в живой организм нанороботы и наноустройства, которые будут целенаправленно лечить от всех болезней, последствий радиации и прочих внешних воздействий, исправлять генетические ошибки. Ставится задача не только сохранения человеческих способностей, но и их радикального улучшения. Рассматривается возможность имплантации в мозг человека элемента памяти с объемом информации, эквивалентным информации Библиотеки Конгресса США или Российской государственной библиотеки в Москве. Разрабатывается проект искусственных эритроцитов, за счет введения которых в кровь человек сможет до четырех часов находиться под водой без легочного дыхания. Военные разрабатывают возможности изменений метаболизма в организме солдата (космонавта, спасателя), которые позволили бы ему неделю обходиться без пищи и воды.

Дистанционная хирургия позволяет проводить операции и исследовать организм человека с помощью дистанционно управляемых роботов, при этом хирург-оператор может находиться даже на другом континенте, что особенно важно при стихийных бедствиях и во время военных действий. На рисунке 3а приведена фотография американских роботов-хирургов, правда, пока 8-сантиметровой длины. Японский дистанционно управляемый робот-чистильщик кровеносных сосудов имеет миллиметровые размеры.

Развивается идея «умной пыли» – организованного собрания наземных, воздушных, подводных или космических микро- и нанороботов, объединенных в единый «псевдоорганизм» с центральным управлением (рис. 3б). «Умная пыль» может использоваться как для мирных, так и военных целей. Американцы использовали ее вариант в Афганистане, а также для слежения за миграцией диких уток. Национальное агентство аэро- и космической промышленности США (НАСА) планирует освоение космоса за счет системы самовоспроизводящихся микро- и нанороботов.

Объективных причин возникновения нанотехнологии было, по крайней мере, две. Во-первых, развитие микроэлектроники. Сорок лет назад был сформулирован эмпирический закон Мура (удвоение плотности чипов каждые полтора-два года), который оказался достаточно универсальным и уже сорок лет используется в ряде областей, основанных на так называемых «критических» технологиях. Дальнейшее развитие микроэлектроники неизбежно приводит ее

к наноэлектронике: транзисторы и другие элементы вскоре должны будут состоять из считанного числа атомов. В основном именно микроэлектроника послужила технической основой появления нанотехнологии, и по прогнозам в ближайшие годы из финансовых вложений в мировую нанотехнологию на долю наноэлектроники будет приходиться 40–50 процентов.

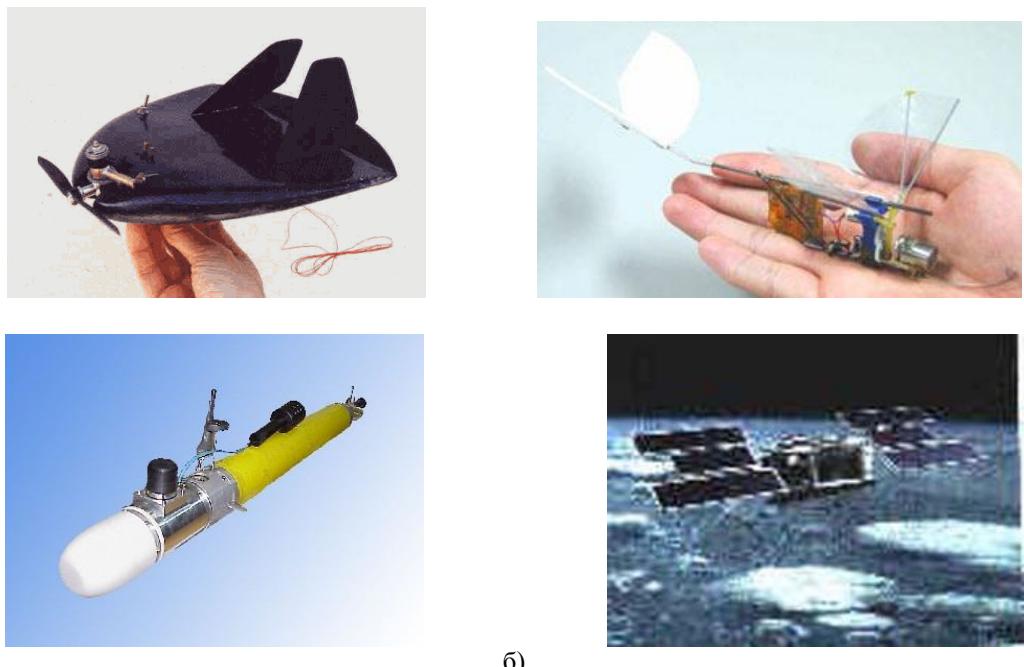
Второй объективной причиной третьей научно-технической революции стали общемировые экологические проблемы. Нанотехнология дает реальные надежды на уменьшение ненужных энергетических затрат, уменьшение загрязнений атмосферы и воды и т. д. В настоящее время 20 процентов всей вырабатываемой в мире энергии тратится на освещение с низким коэффициентом полезного действия. Переход к световым диодам, использование фотонных кристаллов в лампах накаливания может резко улучшить ситуацию. Существенным фактором атмосферного загрязнения являются автомобили. Уменьшение их веса за счет применения нанокомпозитов поможет сократить расход топлива. Переход на экологически чистое водородное топливо, безопасно заключенное в углеродные нанотрубки, предполагает один из японских патентов. Возможность перехода к оптическому компьютеру уменьшит электромагнитное воздействие на окружающую среду.

Когда Ж.И. Алферов получил Нобелевскую премию, одним из первых его поздравил нобелевский лауреат Лео Исааки, который сказал, что до получения гетероструктур можно было говорить о God Made Crystals – кристаллах, сделанных Богом, а сейчас мы можем говорить о Man Made Crystals – кристаллах, сделанных человеком. Третья научно-техническая революция делает человека своеобразным демиургом не только по отношению к техническим устройствам, но и по отношению к собственному организму. Пожалуй, самым важным достижением нанотехнологии в сотрудничестве с биотехнологией станет возможность поддерживать и усовершенствовать все функции организма человека, включая функции мозга.

Вероятно, именно этот путь, наряду с чисто техническими достижениями, включая достижения робототехники, – путь полноценного освоения космоса. «Планета – колыбель разума, – писал К.Э. Циолковский, – но нельзя вечно жить в колыбели».



a)



б)

Rис. 3: а) роботы-хирурги; б) «умная пыль»: микролетательный аппарат, микроэнтомоптер – «механический мотылек», подводный микроробот, микроспутник (источник: Князьков, М. Микромеханика. Всеобщая чувствительная сеть – «Умная пыль» // INTERNET-сайт ТекстПерсТ, 24, 2002).

Термин «нанотехнология» ввел в 1974 году японский исследователь Но-рио Танигучи. Фактически этот международный термин понимается шире, чем русский термин «технология». Технологией (technology) в англоязычных странах обозначают умение, систему знаний, процессов, средств создания и применения продуктов труда.

Человек давно разрабатывал эмпирическое использование микро- и наноструктур в технике. Это мельчайшие частицы железа и углерода в стали, катализаторы с развитой поверхностью, частицы серебра в фотоэмulsionиях. Недавно немецкие специалисты обнаружили углеродные нанотрубки на поверхности дамского клинка. Видимо, утраченный ныне рецепт изготовления булата включал получение этих наночастиц при термообработке и травлении стали.

Природные наночастицы, в частности, образуют разные по функции части живых организмов: ДНК, различные белки и пр.

Таким образом, объектыnanoструктурных размеров, составляющие части макроскопических тел, являются, скорее, правилом. Однако нанотехнология впервые объединила все эти разнообразные структуры по размерному принципу, а единый принцип, подход дает возможность сразу увидеть иные перспекти-

вы для исследования и применения (достаточно вспомнить кибернетику и синергетику).

Нанообъекты обладают физическими и химическими свойствами, отличными от свойств макроскопических тел. Вода в нанопорах горных пород не замерзает до $-20\text{--}30$ $^{\circ}\text{C}$, а температура плавления наночастиц золота существенно меньше по сравнению с массивным образцом. Свойства наночастиц металлов меняются в зависимости от числа их составляющих атомов. Поэтому число атомов иногда называют третьей координатой таблицы Д.И. Менделеева. В лондонском музее Королевского института хранятся коллоидные растворы золота, которые получены еще Майклом Фарадеем, впервые связавшим вариации их цвета с размером частиц. Коллоидные растворы золота могут дать целую гамму цвета – от оранжевого (размер частиц меньше 10 нм) и рубинового (10–20 нм) до синего (около 40 нм).

Доля поверхностных атомов становится все больше по мере уменьшения размеров частицы. Для наночастиц практически все атомы «поверхностные», поэтому их химическая активность очень велика.

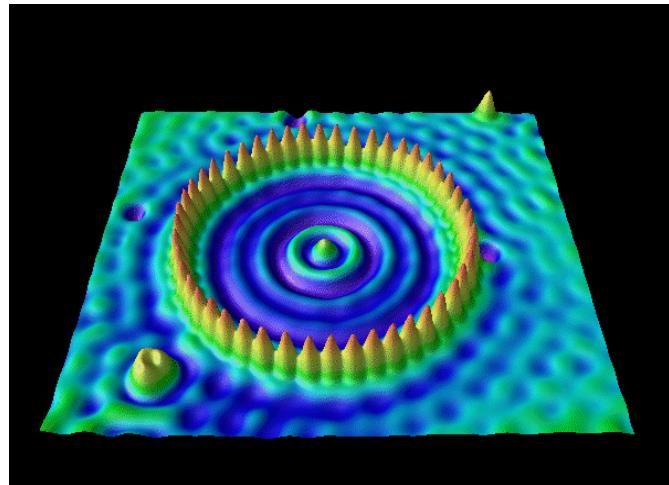
Корпускулярно-волновой дуализм позволяет приписать каждой частице определенную длину волн. В частности, это относится к волнам, характеризующим электрон в кристалле, к волнам, связанным с движением элементарных атомных магнетиков, коллективным тепловым колебаниям и пр. Общая причина отличия свойств наносистем от свойств макроскопических систем – это сопоставимость их размеров с длиной волн, определяющих эти свойства. Соответствующая длина волны может «не уместиться» на наночастице. Поэтому наночастички железа при комнатной температуре ведут себя не как ферромагнетик, а как парамагнетик. Размеры макроскопических тел на много порядков больше этих длин волн.

Наконец, еще одна особенность наноструктур, важная для электроники – это уменьшение с размерами системы времени протекания в ней разнообразных процессов, то есть увеличение быстродействия.

Отцом нанотехнологии считают одного из самых знаменитых физиков нашего времени, лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана. На лекции перед Американским физическим обществом 29 декабря 1959 года, которая называлась «Есть много места там внизу» и которая была опубликована в № 12 журнала «Химия и жизнь» за 2002 год, он высказал мысль, что принципы физики не говорят о невозможности манипулирования веществом на уровне атомов. Р. Фейнман развел эту идею, предположив возможность создания устройств микроскопических размеров с колоссальным запасом информации, возможность безотходной сборки из атомов различных веществ и устройств и т. д. В те годы это казалось научной фантастикой. Но уже в 1981 году Герд Биннинг и Генрих Ререр (швейцарское отделение IBM) изобрели сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), а в 1986 году Герд Биннинг с сотрудниками – атомно-силовой микроскоп (АСМ). Их называют «глаза и пальцы нанотехнологии».

Принцип действия СТМ основан на туннельном токе между иглой (зондом) и исследуемой проводящей поверхностью. Сила туннельного тока резко зависит от расстояния между ними, что позволяет визуализировать топографию поверхности на атомном уровне. За счет большого значения приложенного элек-

трического напряжения зонд может «выдирать» атомы из поверхности и переносить их в другое место. Таким образом, используя СТМ, можно манипулировать отдельными атомами и «видеть» отдельные атомы. На рисунке 4 дана знаменитая фотография так называемого «загона для скота», или «квантового коралла». С помощью СТМ на чистую поверхность меди высажены по окружности с радиусом примерно 140 ангстрем 48 атомов железа, и после этого СТМ воспринимает не только их, но и электроны меди внутри окружности: «волны» на фотографии отражают состояние свободных электронов меди внутри «загона».



Rис. 4. «Загон для скота». Разная интенсивность электрического поля с помощью компьютера выражена в условных цветах (источник: Internet сайт Physics News Graphics)

Принцип работы АСМ иной и не требует вакуума и проводящей поверхности. Зонд АСМ реагирует на силы взаимодействия с объектом, иногда его сравнивают с патефонной иглой на пластинке. С помощью АСМ можно исследовать живые клетки и даже жидкость.

Идея зондовой микроскопии оказалась очень плодотворной. Появились сканирующие микроскопы, фиксирующие локальные магнитные поля на поверхности, локальные тепловые, электрические поля и пр. Активно развивается оптическая сканирующая микроскопия ближнего поля, которая позволяет преодолеть дифракционный предел в оптике. Сканирующая микроскопия стала достаточно распространенным методом не только в физике и химии, но и в медицине и биологии. Одновременно сканирующие зондовые микроскопы широко используются для текущего неразрушающего контроля различных технических изделий (например, CD, DVD) и материалов. Фирма IBM разработала многозондовую форму памяти («Многоножка», «Milli-ped»), которая будет конкурировать с флеш-памятью.

Зонд сканирующих микроскопов на конце имеет наноразмерный радиус кривизны, иногда заканчивается буквально одним атомом. Поэтому локальные электрические поля под зондом сравнимы по величине с внутримолекулярными и атомными, под влиянием которых возникают сверхплотные локальные потоки тепла и идут химические реакции. С помощью сканирующего микроскопа можно воздействовать в наномасштабе на поверхность: царапать ее, осуществлять нанолитографию. Сейчас зондовое технологическое воздействие на поверхность играет все большую роль для создания элементов наноэлектроники, запоминающих устройств с терабитным объемом памяти. В этой области ожидается резкий прорыв зондовых технологий в ближайшие 10 лет. На рисунке 5 приведен портрет Ж.И. Алферова, выполненный в наномасштабе методом анодно-окислительной литографии (фирма NT-MDT, г. Зеленоград).

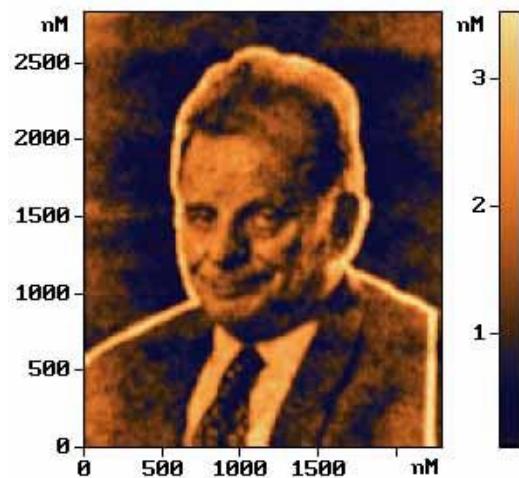


Рис. 5. Российский нобелевский лауреат по физике 2000 г.

академик Жорес Иванович Алферов, *ACM* литография.

Изображение получено с помощью методики локального зондового электрического окисления на сверхтонкой титановой пленке.

Изображение предоставлено Александром Алексеевым, НТ-МДТ

Сборкаnanoструктур с помощью сканирующей микроскопии не может быть массовой. Эрик Дrexслер выдвинул идею сборки с помощью нанороботов – ассемблеров (собирателей), которые могут к тому же собирать других нанороботов, то есть самовоспроизводиться. В книге «Машины созидания», вышедшей в 1986 году, Э. Дrexслер, работавший в то время в лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института, объединил идеи Р. Фейнмана и знаменитого кибернетика Джона фон Неймана, разрабатывавшего теорию самовоспроизводящихся роботов. Позднее, в 1992 году, Э. Дrexслер предложил и в настоящее время вместе с К. Фениксом развивает идею нанофабрик. По их мнению, эффективнее и безопаснее использовать жест-

ко позиционированных нанороботов на больших производствах типа сборочных конвейеров с контролируемым запасом сырья.

Э. Дрекслер организовал и возглавил «Предупреждающий» институт, или Институт «Предвидения» (Forecast), где с 1989 года проводятся ежегодные Форсайтовские конференции, которые фиксируют достижения нанотехнологии и отмечают возможные опасные для общества моменты ее развития.

Создание нанороботов – сложная задача, требующая, скорее всего, международного проекта и финансирования. Компьютерные модели отдельных частей асSEMBлеров и их соединений разрабатываются, но для этого не всегда хватает мощности современных компьютеров. Основной идеей массового создания макроскопических объемов наноматериалов и наноустройств пока остается самоорганизация. На рисунке 6 приведена фотография кластеров (квантовых точек) на поверхности полупроводника, полученных за счет самоорганизации.

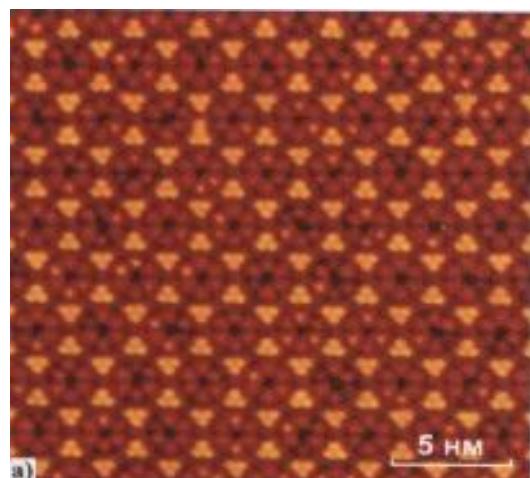


Рис. 6. Магические кластеры Al на поверхности Si (итог самосборки)
(источник: Саранин, А.А. Самосборкаnanoструктур из атомов адсорбатов
на поверхности полупроводниковых кристаллов / А.А. Саранин, А.В. Зотов //
Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 5–6. С. 28–43)

Технически развитые страны во всем мире вкладывают все увеличивающиеся средства в нанотехнологию. В 2003 году государства всех стран мира потратили на нанотехнологию 2 миллиарда долларов. В 2006 году эти затраты составили уже 4,8 миллиарда долларов. По активности научных исследований и их внедрениям первые пять мест занимали США, Япония, Китай, Германия и Франция. В последние годы резко активизировались, в основном в области прикладных исследований, Южная Корея, Сингапур, Тайвань, Индия. Небольшие национальные нанотехнологические программы имеют Южная Африка, Аргентина, Чили, Мексика.

Однако примерно в 10 раз больший объем средств тратят ведущие фирмы: IBM, INTEL, Kraft, Hitachi, Motorola, Mitsubishi и др. Возникают новые фирмы, ориентированные исключительно на нанотехнологию (создание, внедрение, реклама, юридические услуги). Полагают, что нанопромышленность во всем мире в ближайшие годы вырастет практически от нуля до триллиона долларов в год с ежегодным приростом рынка на 40 процентов. В условиях современности наиболее очевидные внедрения нанотехнологии приходятся на такие отрасли, как бытовая (электроника), энергетическая, медицина, парфюмерия, сельское хозяйство (см. табл.).

Таблица

Прогноз долей рынка
по направлениям наноиндустрии в ближайшие годы, %

<i>№ n/n</i>	<i>Направления наноиндустрии</i>	<i>Доли рынка</i>
1.	Наноэлектроника	40–45
2.	Наноматериалы	30–35
3.	Нанобиотехнологии	9–14
4.	Полимеры	8–12
5.	Наноэлектрохимия	3–5
6.	Нанооптика	2–4

Источник: U.S.National Science Foundation, 2001.

Принятая в 2006 году российская нанотехнологическая программа накладывает большую ответственность на научные учреждения и промышленные предприятия. Полагают, что к 2010–2015 годам в основном произойдет разделение мирового рынка нанотехнологии.

Не меньшее значение приобретает психологическая подготовка молодого поколения и адаптация общества в целом к задачам и проблемам третьей научно-технической революции. Поэтому в ряде технически развитых стран (Германия, Япония и др.) в школах изучают основы нанотехнологии. Нанотехнология потребует квалифицированных кадров и новых подходов к подготовке и переподготовке специалистов. Нанотехнология, будучи междисциплинарной областью, объединяет идеи и методы физики, химии, биологии, медицины, информатики и когнитивных наук. Директор ФГУ «Российский научный центр – Курчатовский институт», член-корреспондент РАН М.В. Ковальчук рассматривает нанотехнологию как основу объединения межотраслевой науки и технологии в единую картину естествознания, как изменение парадигмы научного развития – переход от анализа к синтезу.

Следовательно, школа и соответственно педагогический вуз играют свою, уникальную, роль в развитии российской нанотехнологии. В этом отличие педа-

гогических вузов от классических университетов и технических вузов, готовящих специалистов в важных, но конкретных областях нанотехнологии.

Четырехлетний опыт преподавания основ нанотехнологии на факультете физики и информационных технологий Московского педагогического государственного университета показал, что интерес к нанотехнологии «заразителен». Студенты и выпускники во время педагогической практики в школе начинают читать короткие спецкурсы по нанотехнологии, организовывать проектную деятельность, оформлять со школьниками стенды. Школьники с 7 по 11 класс легко и с интересом вовлекаются в этот процесс и даже начинают делиться новыми знаниями с родителями. Мы не должны недооценивать наших учащихся, они будут реально овладевать нанотехнологией и развивать ее.

В 2005 году в издательстве «ДРОФА» вышел сборник программ элективных курсов для профильной школы, в том числе программа курса «Нанотехнология». В ближайшее время в этом издательстве выйдет учебник по основам нанотехнологии (автор И.В. Разумовская).

К наиболее известным наноструктурам относятся кластеры, фуллерены и нанотрубки.

Кластерами называются нанообъекты, состоящие из сравнительно небольшого числа атомов или молекул – от единиц до сотен тысяч. Кластеры имеют наноразмеры по трем направлениям. Наиболее устойчивы кластеры правильной формы, число составляющих их атомов образуют дискретный ряд так называемых магических чисел.

В макроскопических образцах физические характеристики твердых тел и жидкостей (строение, температуры плавления и кипения, удельное электрическое сопротивление и др.) не зависят от объема или пропорциональны ему (например, теплоемкость). Но эти свойства возникают при большом скоплении атомов и молекул, при этом свойства отдельных частиц не просто складываются, очень важно их коллективное взаимодействие. При небольшом же числе атомов их свойства «складываются» по-иному. Так, кластеры металла в зависимости от размеров могут быть диэлектриками, полупроводниками, проводниками. Макроскопическим можно считать тело, свойства которого уже не зависят от числа атомов.

Малые размеры нанокластеров позволяют управлять их физическими свойствами при малых воздействиях: при введении атома другого сорта, помещении на подложку, добавлении электрона и пр.

В электронике используются кластеры, которые называются квантовыми точками. На их основе разработаны технологии нового поколения полупроводниковых приборов, лазеров, диодов, ячеек солнечных батарей и пр.

Квантовые точки представляют собой регулярно расположенные кластеры полупроводника (например, InAs) на границе с другим полупроводником, близким по составу и структуре (например, GaAs); они имеют размер в несколько десятков нанометров и содержат тысячи и сотни тысяч атомов. Для электронов квантовые точки являются трехмерными квантовыми ямами. Дискретный энергетический спектр электрона в квантовой яме позволил назвать их «искусствен-

ными атомами». Если облучать квантовые точки лазером в УФ области, они переизлучают его в видимом диапазоне с высоким коэффициентом полезного действия (55 процентов), который предполагается увеличить почти до 100 процентов. При варьировании размеров квантовых точек можно получать диоды с разным цветом излучения. Отсюда один из методов применения квантовых точек в медицине. Используя нанокластеры, химически связанные с биологическими молекулами типа антител, пептидов, белков или ДНК, получают сенсоры, реагирующие на разные биообъекты. Кластеры разных размеров и цветом свечения, связанные с разными распознающими агентами, приводят к многофункциональному детектированию разных биообъектов. Квантовые точки-флюорофоры стабильны, и в течение ряда дней или даже недель можно следить за эволюцией биосистемы.

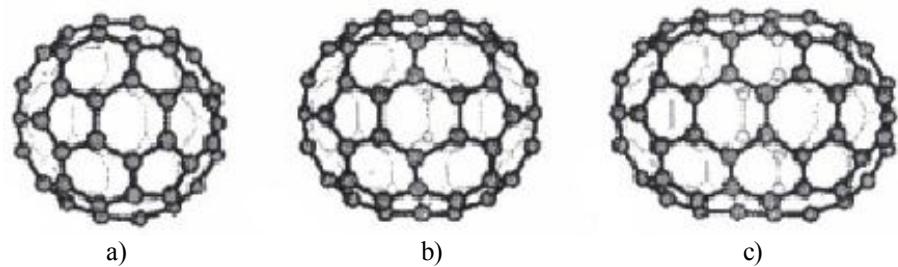
Кластеры имеют разнообразное применение в медицине, особенно для фиксации и лечения раковых опухолей. Разработан метод, в котором включение магнитного поля вызывает достаточно сильный разогрев активных нанокластеров и связанные с ними раковые клетки погибают без вреда для здоровых клеток.

Кроме медицины и электроники, нанокластеры получили широкое промышленное применение в производстве принципиально новых материалов и покрытий, а также в парфюмерии.

Второй класс перспективных для науки и техники наноструктур – фуллерены (рис. 7) и углеродные нанотрубки (рис. 1), представляющие собой полые каркасные структуры из атомов углерода. Они являются четвертой аллотропной формой углерода, наряду с алмазом, графитом и карбином.

Из правильных шестиугольников можно выложить плоскую поверхность, как в случае с графитом, однако ими не может быть сформирована замкнутая поверхность фуллерена. Для этого необходимо часть шестиугольников заменить на пятиугольники.

Реально открытие фуллеренов произошло случайно. В лаборатории Р. Смолли в Техасском университете Райса получали и исследовали металлические кластеры. В августе 1985 года в лабораторию Р. Смолли приехал известный астрофизик Г. Крото с просьбой исследовать кластеры углерода. Г. Крото предполагал, что спектры некоторых межзвездных скоплений, основу которых составляет углерод, связаны с излучением углеродных кластеров. Во время эксперимента в масс-спектре кластеров углерода обнаружились пики, соответствующие магическим числам 60 и 70. Единственным возможным объяснением было существование стабильных, совершенных по форме полых структур углерода из 60 и 70 атомов, что было подтверждено дальнейшими исследованиями. Свое название фуллерены получили в честь поэта, философа и архитектора-авангардиста Бакминстера Фуллера (Buckminster Fuller), сконструировавшего и запатентовавшего купол павильона США на выставке в Монреале в 1967 году в виде сочлененных пентагонов и гексагонов (рис. 7).



a)

b)

c)



Рис. 7. Вверху – структура некоторых фуллеренов: а) C_{60} , б) C_{70} , в) C_{80} ;
внизу – купол павильона Б. Фуллера

Молекулы различных фуллеренов, вплоть до гигантов C_{1840} , проявляют существенно различные свойства. Например, фуллерен C_{28} имеет ту же валентность, что и атом углерода, и образует устойчивый кристалл со структурой алмаза – гипералмаз. Фуллерены могут образовывать молекулярный кристалл фуллерит, аналогичный кристаллу из атомов инертных газов. Фуллерены способны иметь широкий класс химических соединений, обладающих различной структурой и физико-химическими свойствами. В последние годы появился даже термин «химия фуллеренов», определяющий новое направление в органической химии. Молекулы фуллеренов, в которых атомы углерода связаны между собой как одинарными, так и двойными связями, являются трехмерными аналогами ароматических структур.

Внутрь фуллеренов можно помещать разные атомы – «гостей». Такие фуллерены получили название эндоэдральных. Имеются сообщения о внедрении атомов лантана, никеля, натрия, калия, рубидия, цезия, атомов редкоземельных элементов.

В 1996 году Гарольд Крото, Ричард Смолли и Роберт Керл получили Нобелевскую премию по химии за открытие и изучение фуллеренов.

Сложный способ получения фуллеренов с помощью мощного лазера (первые работы Г. Крото и Р. Смолли) удалось заменить более производительным процессом испарения графита в электрической дуге в атмосфере гелия. Этим же способом в 1991 году Сумо Иджима получил первые углеродные нанотрубки.

Фуллерен представляет собой молекулярную форму углерода; углеродные нанотрубки имеют наноразмеры только по двум направлениям и рассматриваются как нанообъекты, сочетающие свойства молекул и макроскопического твердого тела.

Теоретически идеальную нанотрубку можно получить, сворачивая плоскую гексагональную сетку графита под разными углами. От угла свертывания зависят свойства углеродной нанотрубки, прежде всего характер ее проводимости, при этом в одних случаях они обладают металлическим типом проводимости, при других являются полупроводниками.

Многослойные углеродные нанотрубки могут быть похожи на свиток либо образовывать так называемую «русскую матрешку» (вложенные друг в друга однослойные нанотрубки) С увеличением числа слоев проявляются различные дефекты структуры, образуются изогнутые и спиралевидные, складывающиеся в сложные. Большой интерес для наноэлектронники представляют разветвленные Y- и T-образные углеродные нанотрубки.

Углеродные нанотрубки имеют большую перспективу использования прежде всего благодаря своим необычным электрическим свойствам. Электрическое сопротивление некоторых из них меньше, чем даже у меди, поэтому они могут служить нанопроводами в интегральных схемах, как зонды в сканирующих микроскопах. В одиночной углеродной трубке можно получить гетеропереход, если создать в ней дефект структуры (например, два гексагона превратить в пентагон и семиугольник при ее изгибе). На рисунке 8 приведена схема и изображение на АСМ такого нанодиода.

Фантастические перспективы применения углеродной трубы в электронике связаны с возможностью извне, с помощью, например, АСМ, менять их скрученность, «узор» и тем самым электрические свойства. Всего один электрон может изменить состояние «проводник – диэлектрик» в ту или иную сторону – и в результате мы получаем транзистор на одном электроне.

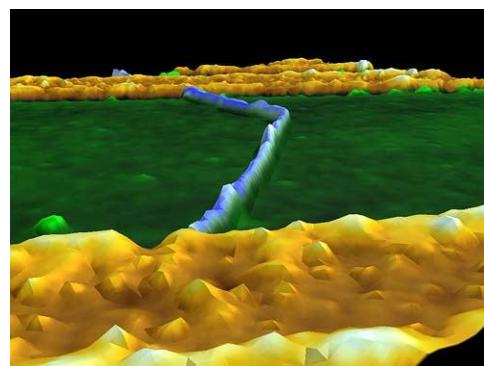
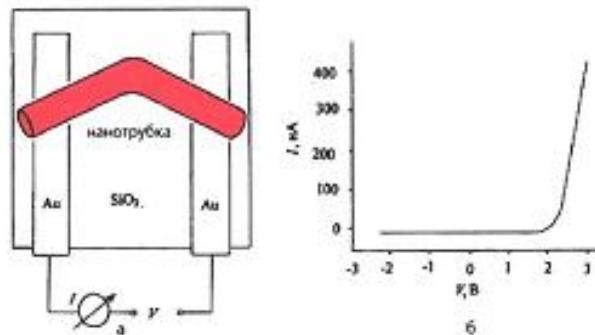


Рис. 8. Вверху – схема нанодиода на углеродной нанотрубке с дефектом структуры на изгибе, благодаря которому по одну сторону изгиба трубка ведет себя как проводник, по другую – как полупроводник; внизу – углеродная нанотрубка на двух электродах – изображение в АСМ; (авторы: С. Dekker и др.; Университет в Делфте, Голландия)

Многослойные углеродные трубы являются низкотемпературными эмиттерами. При комнатной температуре и напряжении всего 500 В они создают ток такой же плотности, как стандартный вольфрамовый катод при 1000 °С. Горячие эмиттеры современных электронно-лучевых трубок требуют опасных напряжений в 20–30 кВ. Холодные эмиттеры на углеродных нанотрубках – основной элемент плоских телевизоров будущего, портативных источников рентгеновского излучения, СВЧ-излучения и пр. Их разработкой занимаются известные фирмы, и многие из них уже находятся в полупромышленной стадии внедрения.

Вторая область применения углеродных нанотрубок связана с уникальными механическими свойствами этих легких и прочных структур. Нанотрубки проявляют высокую жесткость на изгиб и вместе с тем большую гибкость. После сгибания на 90° они могут полностью восстанавливать свою форму. Их прочность в 60–100 раз выше, чем прочность хорошей стали, при этом в силу своей «ажурности» они в 6 раз легче. Поэтому именно материал из углеродной

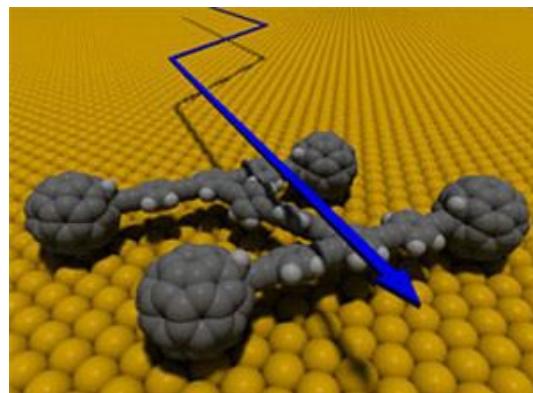
трубки рассматривается как основа троса космического лифта и как конструкционный материал для уникального моста через Гибралтарский пролив, соединяющего Испанию с Марокко. Сделаны шаги по получению из углеродных нанотрубок макроскопического материала, тканей и пленок.

Развиваются способы использования фуллеренов и углеродных трубок как наноконтейнеров для различных материалов, в том числе биологических или радиоактивных. Заполненные углеродные наночастицы можно применять в биологических сенсорах, в ядерной медицине, для введения в организм лекарств. При этом важен метод открывания «по сигналу» крышечек, закрывающих концы углеродных трубок и схожих по структуре с половинками фуллеренов.

Публиковались отдельные данные о токсичности нанотрубок, что заставило осторожно относиться к ним, как к контейнерам для лекарств. Однако выяснилась недостоверность этих данных, связанная с недостаточной чистотой эксперимента. Другие эксперименты показали, что сам фуллерен не только не токсичен, но в ряде случаев проявляет в организме защитные свойства в качестве антиоксиданта.

В Японии в 1998 году получен патент на способ хранения водорода – энергетически выгодного, но взрывоопасного топлива. Вместо огромных тяжелых баллонов он будет храниться под давлением в углеродных трубках, покрытых палладием или платиной. При необходимости водород будет извлекаться за счет подогрева. На 500 километров пробега автомобиля его потребуется всего около 3 килограммов.

Нанотрубки и фуллерены рассматриваются в нанотехнологии как элементы конструкции различных наномеханизмов и нанороботов. На рисунке 9 изображен самый маленький в мире автомобиль с вращающимися колесами – фуллеренами. На основе многослойной углеродной трубы был создан первый электромеханический наномотор.



*Rис. 9. Самый маленький в мире автомобиль
(Источник: Science.compulenta.ru/234901/)*

Фуллерены и углеродные трубы из экзотических объектов быстро превращаются в коммерческие продукты, что подтверждается резким ростом патентов в этой области.

В природе существует огромное количество слоистых неорганических кристаллов и можно предсказать синтез разнообразных фуллереноподобных nanoструктур и нанотрубок. В настоящее время созданы и исследуются фуллереноподобные наночастицы и нанотрубки нитрида бора, карбида кремния, карбида бора и других соединений.

Макроскопические материалы можно отнести к наноматериалам, если элементами их структуры являются нанообъекты, наноразмерные элементы. Например, трековые мембранны представляют собой макроскопическую полимерную пленку с микро- или наноразмерными сквозными каналами (треками), пробитыми тяжелыми ионами на ускорителе. Их используют прежде всего как фильтры. Мировым лидером в этой области является Институт кристаллографии РАН.

В последние годы конструкторы автомобилей стремятся снизить их вес с целью экономии топлива и снижения выброса в атмосферу двуокиси углерода. Полимерные нанокомпозиты, армированные наночастицами, почти не уступают металлу по жесткости и прочности, а по звукопоглощению и стойкости к коррозии превосходят его. Полимерные нанокомпозиты найдут массовое применение в строительстве (детали отделки зданий, трубы и пр.), мебельной и бытовой промышленности.

Особый интерес для физики и современной техники представляют фотонные кристаллы. В современной технике успешно используются так называемые сверхрешетки (crystal superlattice) – твердые тела, состоящие из периодически чередующихся областей с разными значениями какой-либо физической характеристики (магнитных, электрических, упругих и других свойств). Размеры областей существенно больше межатомных расстояний. Еще в 1962 году академик Л.В. Келдыш рассмотрел теоретически сверхрешетку и особенности ее зонной структуры.

Одномерная (1D) магнитная сверхрешетка – чередование нанослоев ферромагнетика и полупроводника – используется для считывания магнитной записи. Полупроводниковые сверхрешетки – это система квантовых ям, разделенных барьерными слоями с туннельным типом проводимости. Фотонные кристаллы – оптические сверхрешетки, в которых перемежаются области с разным коэффициентом преломления. Термин «фотонный кристалл» (photonic crystal) появился в 80-х годах XX века.

Для трехмерной оптической сверхрешетки условия максимума интерференции настолько усложняются, что для данной длины волн они могут не выполниться ни для одного направления в пространстве. В такой решетке волны с некоторыми длинами волн распространяться вообще не могут. Так появляется представление о «фотонной запрещенной зоне». Ситуация аналогична запрещенной энергетической зоне для электронов в зонной теории твердых тел. Понятие запрещенной зоны для электромагнитных волн (photonic band gap) ввел в 1987 году Эли Яблонович. Он же создал в 1989 году первый фотонный кристалл для миллиметрового диапазона электромагнитных волн, который получил название «яблоновит».

Физическая природа возникновения запрещенных зон для электронов и фотонов одна и та же – это условия распространения волн в среде с периодически изменяющимися свойствами.

По-видимому, фотонные кристаллы в первую очередь получат широкое применение в качестве световодов. В случае фотонных кристаллов световые волны не могут распространяться в поверхностных слоях световода из-за наличия запрещенной зоны. Вместе с тем внутри такого световода за счет полостей или цепочек нерегулярностей структуры (аналог примесного полупроводника) формируются световедущие каналы. Ситуация аналогична распространению электрического тока по металлическому проводу с изолирующей обмоткой. Важно, что такой механизм передачи энергии позволит сгибать световод под любым углом, в то время как для обычного световода даже изгиб под прямым углом приводит к существенной потере энергии из-за нарушения условия полного внутреннего отражения. Эффективность передачи в уже созданных фотонных кристаллах составляет 95 процентов. Для стандартных светопредающих сред этот показатель равен примерно 30 процентам.

В будущем планируется переход на компьютеры, основанные исключительно на фотонике и обладающие рядом преимуществ по сравнению с компьютерами, основанными на электронике. Свет, по сравнению с электрическим током, имеет колоссальное преимущество: волны различной частоты фактически не взаимодействуют и могут нести независимую информацию. Кроме того, световые лучи устойчивы к посторонним электромагнитным «шумам». Без ретрансляторов и усилителей сигнал проходит тысячи километров. Использование передачи информации за счет фотонов позволит разрешить серьезнейшую проблему тепловыделения.

В последние годы все чаще используется сочетание неорганических наноустройств с отдельными элементами живых организмов. Это естественно, если учесть, что в живых организмах многие процессы идут на наноуровне, и за миллионы лет эволюции они оптимизировались. Так, разработан ряд нанодвигателей, использующих элементы живых клеток, которые в процессе жизнедеятельности совершают вращательное или поступательное движение, в частности комплементарность (дополнительность) ДНК. Если одна из двух спиралей ДНК оборвана, то образуется так называемый «липкий конец». На рисунке 10а изображен двуногий шагающий наноробот; он шагает за счет того, что по очереди то присоединяет, то отсоединяет «ноги» от «липких концов» к основанию, стоящему тоже из ДНК.

Комплементарность цепей ДНК сегодня используется при составлении различных плоских и трехмерных искусственных конструкций, важных для трехмерных устройств наноэлектроники, а также в медицинских приложениях.

На рисунке 10б миллиметровый чип, содержащий 16 384 транзистора и сотни конденсаторов, взаимодействует с генетически «подкорректированным» нейроном крысы. Связь двухсторонняя: когда ионы натрия перемещаются через клеточную мембрану нейрона, транзистор реагирует на изменение ее заряда; если же транзистор через конденсатор шлет ток нейрону, тот реагирует на это влияние. Подобная схема может стать основой искусственного мозга, основой чипов-протезов и чипов-имплантантов.

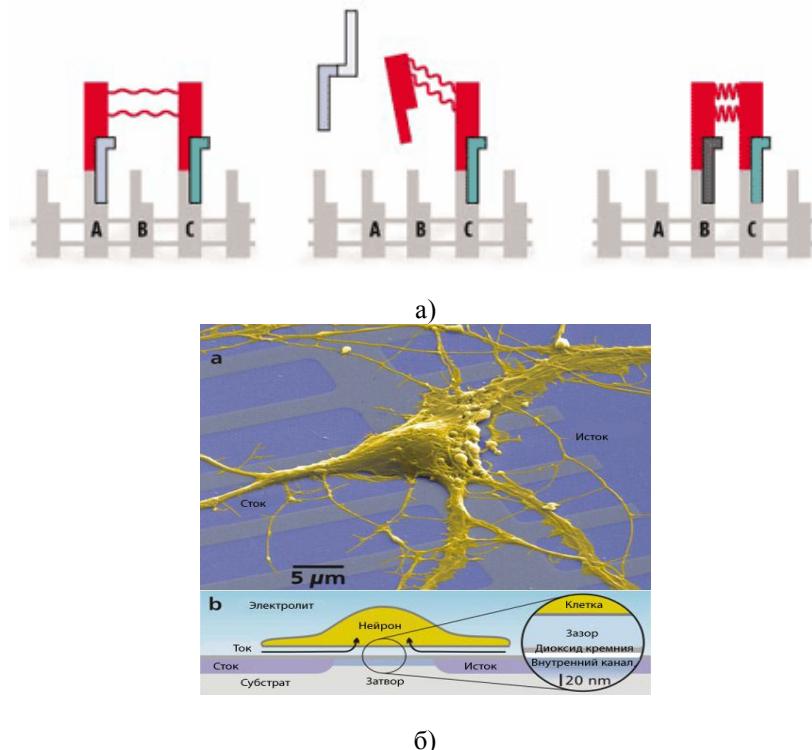


Рис. 10: а) «шагающий робот» на основе ДНК;
б) одиночный нейрон крысы на микросхеме
(Источник: biochem/mpg.de)

Нанотехнология граничит и взаимодействует не только с биотехнологией и информационной технологией, но и с когнитивными науками. В ряде областей она ставит задачи создания «умных» устройств, а также «умных материалов». «Умные», или «интеллектуальные», материалы должны эффективно и самостоятельно действовать в непредвиденных обстоятельствах или при смене режима работы устройства. Так, в Австралии специальная научно-промышленная организация разрабатывает «интеллектуальные» поверхности для самолетов и ракет, которые должны менять конфигурацию (например, при смене режима полета самолета), самовосстанавливаться при повреждениях, и все это при минимальном вмешательстве человека.

Соответственно разрабатывается «умная» одежда и обувь, прежде всего для экстремальных ситуаций. В ткань, готовую одежду или обувь интегрируются электронные приборы, замаскированные провода и аккумуляторы. С развитием нанотехнологии эти дополнительные детали становятся все меньше и мягче. Разработки «умной одежды» перспективны для обеспечения безопасности (в том числе при освоении космоса и в военном деле), в здравоохранении, сфе-

рах коммуникации и развлечений. Самым продвинутым вариантом «умного» костюма является костюм солдата будущего, разрабатываемый в рамках новой американской военной доктрины.

Всякая новая технология и новые достижения науки вместе с улучшением жизни человека создают новые проблемы и опасности. Будущий «нанорай» омрачен или усложнен по меньшей мере тремя проблемами и опасностями.

Во-первых, развитие нанотехнологии приведет к ряду социальных проблем. Может усилиться социальное неравенство, особенно на первых стадиях внедрения достижений нанотехнологии, к примеру в медицину, когда стоимость новых лекарств и методов будет еще достаточно высока. Значительное увеличение продолжительности жизни за счет наномедицины вызовет необходимость пересмотра пенсионного законодательства. Наноустройства для перехвата информации могут стать проблемой не только для коммерческих организаций и военных, но и для отдельных граждан. Высказываются опасения по поводу усиления на фоне научно-технической революции роли крупных корпораций по сравнению с ролью государства и большими возможностями их «закрытости» от общества. Достижения нанотехнологии в области наносенсорики позволят повысить степень безопасности, эффективно контролируя малейшие следы отравляющих и биологических веществ, наркотиков, взрывчатых и радиоактивных веществ. Вместе с тем использование нанотехнологии в военных целях потребует развития новых форм международного контроля за вооружением и антитеррористического контроля. Прогнозируется, что развитие нанотехнологии может существенно изменить баланс сил между государствами в экономической или военно-политической области. Придется решать ряд проблем образования, причем не только в конкретной профессиональной области.

Вторая проблема – влияние нанопродуктов и наноустройств на человека. Здесь не идет речь о предельных случаях генетических изменений человека и вмешательств в его метаболизм. Обоснованные опасения высказываются по поводу высокой химической активности наночастиц, которые могут на производстве и в потребительской сфере попадать в легкие, кровь, на кожу. Наночастицы могут случайным образом повлиять на животных и растения. Наконец, они могут оказаться аллергенами для некоторых людей. Эта область пока мало исследована.

Широко обсуждалась и третья проблема. Э. Дрекслер назвал ее проблемой «серой слизи». Речь идет о возможной потере контроля надnanoассемблерами, которые начнут при этом безудержно размножаться, все вокруг превращая в другие асSEMBлеры. Подобная ситуация обыграна в ряде фантастических произведений, что в массовом сознании испортило репутацию нанотехнологии. Однако решение этой проблемы не является столь сложной, особенно по сравнению с основной проблемой создания асSEMBлеров.

Нанотехнология принципиально изменит жизнь человечества, создаст для каждого человека новые перспективы не только в области бытовых удобств, но и в области здоровья. Положительное влияние нанотехнологии на все сферы жизнедеятельности людей, несомненно, перевешивает те проблемы и опасности,

которые сопутствуют ее конкретным приложениям и которые требуют конкретных предосторожностей. К сожалению, средства массовой информации проблемы нанотехнологии практически не освещают или освещают недостаточно квалифицированно. Вместе с тем благодаря фантастическим романам и фильмам у широкого слоя населения иногда создается превратное мнение об опасностях использования нанотехнологии. Одна из задач преподавания основ нанотехнологии в школе и педагогическом вузе – объективный анализ перспектив и проблем ее развития.