



## От редактора

Новейшие нанотехнологии наряду с компьютерно-информационными технологиями и биотехнологиями являются фундаментом научно-технической революции в XXI в., сравнимым и даже превосходящим по своим масштабам с преобразованиями в технике и обществе, вызванными крупнейшими научными открытиями XX в.

В развитых странах осознание ключевой роли, которую уже в недалеком будущем будут играть результаты работ по нанотехнологиям, привело к разработке широкомасштабных программ по их развитию на основе государственной поддержки.

Так, в 2000 г. в США принята приоритетная долгосрочная комплексная программа, названная Национальной нанотехнологической инициативой и рассматриваемая как эффективный инструмент, способный обеспечить лидерство США в первой половине текущего столетия. К настоящему времени бюджетное финансирование этой программы увеличилось по сравнению с 2000 г. в 2,5 раза и достигло в 2003 г. 710,9 млн долл., а на четыре года, начиная с 2005 г., планируется выделить еще 3,7 млрд долл. Аналогичные программы приняты Европейским союзом, Японией, Китаем, Бразилией и рядом других стран.

В России работы по созданию нанотехнологий начаты еще 50 лет назад, но слабо финансируются и ведутся только в рамках отраслевых программ. К настоящему времени назрела необходимость формирования программы общегосударственного масштаба с учетом признания важной роли нанотехнологий на самом высоком государственном уровне.

Широкомасштабное и скоординированное развертывание на базе существующего задела работ в области нанотехнологий позволит России восстановить и поддерживать паритет с ведущими государствами в науке и технике, ресурсо- и энергосбережении, в создании экологически адаптированных производств, в здравоохранении и производстве продуктов питания, уровне жизни населения, а также обеспечит необходимый уровень обороноспособности и безопасности государства.

Нанотехнологии могут стать мощным инструментом интеграции технологического комплекса России в международный рынок высоких технологий, надежного обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции.

Разработка и успешное освоение новых технологических возможностей потребуют координации деятельности на государственном уровне всех участников нанотехнологических проектов, их всестороннего обеспечения (правового, ресурсного, финансово-экономического, кадрового), активной государственной поддержки отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.



От редактора



Формирование и реализация активной государственной политики в области нанотехнологий позволят с высокой эффективностью использовать интеллектуальный и научно-технический потенциал страны в интересах развития науки, производства, здравоохранения, экологии, образования и обеспечения национальной безопасности России.

В Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года, одобренной в основном Правительством Российской Федерации (18 ноября 2004 г.), используются следующие термины:

- *нанотехнология* – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;
- *наноматериалы* – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками;
- *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;
- *«наноиндустрия»* – вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Актуальность и важность указанных работ определили необходимость включения научных направлений, связанных с нанотехнологиями, в Перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденный Президентом Российской Федерации.

Для информационного обеспечения в области нанотехнологий издательством «Техносфера» в последние годы читателям представлен ряд книг: «Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века», «Зондовые нанотехнологии в электронике», «Нанотехнологии в электронике», «Нано- и микросистемная техника. От исследования к разработкам», «Нанотехнологии». Подробную информацию об этих и многих других книгах можно найти на сайте издательства <http://www.technosphaera.ru>.

Регулярное освещение современного состояния, перспектив и тенденции развития нано- и микросистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения в различные области науки, технологии



## 12 *От редактора*

и производства осуществляется на страницах ежемесячного междисциплинарного теоретического и прикладного научно-технического журнала «Нано- и микросистемная техника» (<http://www.microsystems.ru>). Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России с апреля 2003 г. С мая 2003 г. журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

В данной книге приведены мировые новости за 2005 г., сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В работе представлены примеры реализации и применения с цветными иллюстрациями в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Выход этой книги связан с усилиями специалистов из разных коллективов. Прежде всего хотел бы поблагодарить автора раздела «Новости нанотехнологии» журнала «Нано- и микросистемная техника» Ю.Г. Свидиненко и редактора издательства «Новые технологии» Е.В. Григорин-Рябову, а также директора ИПИ РАЕН Л.Ю. Бочарова — за создание электронной версии сообщений для книги и коммерческого директора издательства «Техносфера» О.А. Казанцеву — за создание макета, оперативное издание и распространение книги.

*Главный редактор журнала «Нано- и микросистемная техника»*

*Петр Мальцев*

*23 мая 2006 года*



## ГЛАВА 1

# НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Наноматериал графен – пленка толщиной в атом<sup>1</sup>

Профессор Эндрю Гейм и его коллеги из Университета Манчестера (США) совместно с командой доктора К. Новоселова из Черногловки (Россия) впервые в мире сумели получить ткань толщиной в один атом. Новый наноматериал представляет собой «развернутую» нанотрубку. Это пленка из атомов углерода, составляющая собой одну молекулу. Журналисты окрестили новый наноматериал «двумерным», так как он толщиной в один атом углерода.

Новый материал назвали графеном (graphene). Профессору Гейму впервые удалось отделить атомарный слой от кристалла графита. При этом отделённые атомы сохранили связь друг с другом, образовав «заплатку» из ткани толщиной в один атом. Исследователи назвали новый материал двумерным фуллереном. Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электричество (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Графеновая пленка – симуляция и микрофотография

При такой толщине поперечник кусочка «ткани» в десять микрон выглядит огромным, но учёные говорят, что нет никаких принципиальных ограничений для создания таких тканей размером в сантиметры.

Исследователи сосредоточились на исследовании электрических свойств нового материала. С помощью графена ученые создали полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обыч-

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

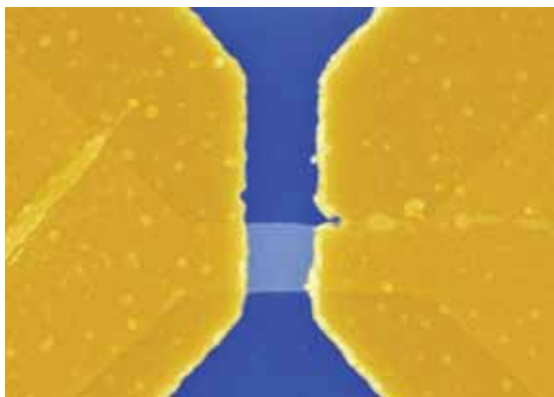


Рис. 1.2. Графеновый транзистор

ных условиях (рис. 1.2). Было также установлено, что электроны в транзисторе могут перемещаться на субмикронные дистанции без рассеивания, что очень важно для применения графена в микроэлектронных устройствах.

Авторы работы прочат графену большое будущее в новых материалах, а также — суперкомпьютерах будущего, где размеры логических схем будут уменьшены в миллионы раз.

Однако на сегодняшний день ученые могут производить графен кусочками размерами  $10 \times 10$  мкм. Как сказал Гейм, «когда мы научимся синтезировать графеновую пленку размерами в  $10 \times 10$  дюймов, то только тогда можно будет говорить о том, что новый материал будет успешно применен в микроэлектронике».

Доктор Новоселов добавил, что «сегодня многие исследователи производят нанотрубки все большей длины, поэтому и технологии по производству графена тоже будут развиваться».

### Прозрачные пленки из нанотрубок<sup>1</sup>

Для производства гибких компьютерных мониторов нужны такие электронные компоненты, которые были бы и электропроводными, и гибкими, и прозрачными.

Исследователи из Университета Флориды (США) и ученые из Венгерской академии наук разработали технологию производства гибких прозрачных пленок из однослойных нанотрубок. При этом пленка является электропроводной. Прозрачные и гибкие дисплеи на основе нанотрубок могут использоваться в компьютерной технике, инфракрасных камерах, мобильных телефонах, электронной бумаге и т.д.

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.



## Пленки из наночастиц формируют «резиновые» нанотрубки



Технология изготовления пленок проста: исследователи погрузили нанотрубки в жидкость, а затем профильтровали раствор на специальном мембранном фильтре, который потом растворили. В итоге получилась пленка, состоящая из электропроводных нанотрубок и гибкого пластикового субстрата.

Как утверждают исследователи, толщину пленки можно изменять с нанометровой точностью. Сейчас же ученые изготовили пленочный диск диаметром 10 см и толщиной всего от 50 до 150 нм.

Пленка толщиной в 50 нм пропускает 70% видимого света и 90% инфракрасного.

Исследователи использовали пленку для того, чтобы сделать «оптический транзистор», который изменяет свою прозрачность в зависимости от присутствия электрического поля. Производственный процесс нанотрубчатых нанополенок может быть налажен уже через два года, сообщают ученые. Они описали свою работу в августовском выпуске Science.

### Пленки из наночастиц формируют «резиновые» нанотрубки<sup>1</sup>

Исследователь Шахрау Чиеб из Иллинойского университета создал гибкие кремниевые нанотрубки. Это удалось сделать благодаря синтезу из наночастиц кремния нанополенки, которую затем свернули в трубку. Полученные нанотрубки гибкие, как резина, и могут проводить электричество. Похожие структуры отдаленно напоминают нанотрубки, они больше всего походят на миниатюрные свитки.

«Эти миниатюрные наносвитки могут быть полезны в качестве катализаторов химических реакций. Также наносвитки будут применяться в наноробототехнике, наноэлектронике и микроскопических лазерах», — говорит Чиеб, профессор механики и промышленной инженерии из университета Иллинойса. Для того чтобы сделать нанотрубки-свитки, Чиеб и его коллега профессор физики Адам Смит взяли за основу коллоидную спиртовую суспензию кремниевых наночастиц (каждая наночастица кремния в диаметре составляет около 1 нм). Суспензию поместили в сильное электростатическое поле, после чего наночастицы переместились к положительно заряженной плоскости контейнера, где они находились, образовав тонкую пленку. Когда пленка была высушена, ученые свернули ее в нанотрубку. После измерения образцов ученые установили, что диаметр полученных образцов колеблется от 2 до 5 мкм, а их длина составляла около 100 мкм.

Используя атомно-силовой микроскоп, ученые измерили модуль Юнга (модуль Юнга — это показатель эластичности механического объекта) нанотрубок. Оказалось, что он в 5000 раз меньше модуля Юнга для

<sup>1</sup> EurekAlert ([http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2005-06/uoi-a-tfo061405.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2005-06/uoi-a-tfo061405.php)).



кристаллического кремния и всего в 30 раз больше значения эластичности для резины. Грубо говоря, полученные нанотрубки из кремния чуть жестче аналогичных образцов из резины. Поскольку кристаллический кремний совсем не может изгибаться, то достижение ученых из Иллинойса будет использоваться в первую очередь в микроэлектронных устройствах: гибких мониторах и компьютерах, «умной» одежде и электронных продуктах для медицины.

«Мы предполагаем, что нанотрубка, или наносвиток, состоит из кремниевых наночастиц, которые связаны между собой атомами кислорода и образуют трехмерную структуру, похожую на сеть, — говорит Чиб. — А необычно высокая гибкость наноматериала вызвана тем, что кремниевые наночастицы не связаны кристаллической решеткой, а структурированы совместно с атомами кислорода. Для создания этих наносистем мы использовали новый метод, который может применяться при конструировании дешевых лабораторий-на-чипе».

Ученые предвидят еще несколько областей для применения нанотрубок. «Так как кремниевые наночастицы, из которых состоят наносвитки, характеризуются такими свойствами, как фотолюминесценция, фотостабильность и фотоэмиссия, то вполне вероятно, что на их основе можно сделать фотодиоды и гибкие лазеры, которыми можно будет управлять с помощью электрического поля», — говорит Смит.

### Электропроводящие нанотрубки большой длины<sup>1</sup>

Специалисты из университета Калифорнии в Ирвайне создали самые длинные в мире электропроводящие нанотрубки. Длина этих углеродных нанотрубок (фактически — сверхбольших молекул) — 0,4 см. Ранее мы уже сообщали о том, как исследователям удалось создать обычные нанотрубки длиной 4 см, но они плохо проводили электричество.

Новая длина нанотрубок в 10 раз больше прежнего рекорда. Также полученные трубки оказались замечательными проводниками, превосходящими по электрическим свойствам медь. Работали над проектом ученые Питер Берк, Кристофер Рутгерлен и Жен Ю.

Ученые получили рекордные молекулы, нагнетая в специальную печь природный газ. В печь подавали наночастицы железа, с которыми реагировал газ. В итоге удалось синтезировать углеродные нанотрубки, которые осаждались на золотой подложке, представлявшей собой скопление тонких проводников. Присутствие золотой подложки и наночастиц железа позволило создать длинные нанотрубки.

Трубки повисали между отдельными золотыми электродами, к которым потом и подводили ток исследователи. На рисунке можно увидеть

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.



матрицу золотых проводников, между которыми росли нанотрубки. Эта работа – важный шаг на пути к созданию новых типов вычислительных устройств и компьютерной памяти.

Исследователи доложили о своем открытии в сентябрьском выпуске журнала Nano Letters.

### Новый инструмент визуализации наномира: яркие квантовые точки<sup>1</sup>

Ученые из Корнеллского университета создали новый тип ярких квантовых точек, названных исследователями «Cornell Dot». Эти наноструктуры практически универсальны: их можно использовать в медицине, компьютерной технике, микроэлектронике и биотехнологии.

Новая технология, разработанная исследователями, заключается в том, что квантовые точки обрабатывают, нанося на них специальное кремниевое покрытие, и добавляют специфические метки, которые позволяют придавать «Cornell Dot» различные свойства. Так, например, можно сделать квантовые точки флуоресцентными и использовать их для исследования живых тканей с помощью оптической микроскопии. С помощью наших квантовых точек ученые могут проводить исследования, которые без их использования невозможны», – сказал Ульрих Вайснер, профессор материаловедения из Корнеллского университета.

Квантовые точки – это наночастицы полупроводников (селенид кадмия, например), ведущие себя как отдельные атомы. Они могут поглощать световые волны, перемещая электроны на более высокий энергетический уровень, и выделять свет при переходе электронов на низкоэнергетический уровень. Благодаря этому свойству их и используют в качестве флуоресцентных меток.

С помощью оптического микроскопа мы не можем проследить за перемещением отдельных молекул внутри живой клетки, а с помощью электронного микроскопа отдельные молекулы видны, но для этого клетку приходится умертвить. Однако если снабдить квантовые точки специальными маркерами, то можно прикрепить эти наносистемы к отдельным типам молекул. Для клетки это не представляет вреда, и, что самое главное, результаты видны в оптический микроскоп благодаря флуоресценции маркеров. Поэтому исследователи используют квантовые точки в биологических исследованиях.

Что же нового удалось привнести в уже отлаженную процедуру исследований ученым из Корнелла? Во-первых, обычные квантовые точ-

<sup>1</sup> Cornell University: After quantum dots, now come glowing «Cornell dots», for biological tagging, imaging and optical computing (<http://www.news.cornell.edu/stories/May05/CUdots.ws.html>).



ки химически активны, а это может негативно повлиять на проводимые с их использованием исследования. Во-вторых, они в 30 раз ярче обычных, что позволило «высвечивать» внутри клетки отдельные молекулы. И в-третьих, они могут присоединяться только к тем молекулам, маркеры которых исследователи «запрограммируют» в квантовой точке. Все эти выгоды ученым принесла новая архитектура построения наночастиц: теперь квантовая точка — это довольно сложное программируемое наноустройство.

«Cornell dots», или «CU dots», — наночастицы, состоящие из ядра диаметром 2,2 нм, помещенного в кремниевую оболочку, содержащую молекулы флуоресцентной краски (рис. 1.3). Диаметр наночастицы целиком — 25 нм. Ученые назвали такое строение квантовой точки архитектурой «ядро-оболочка».

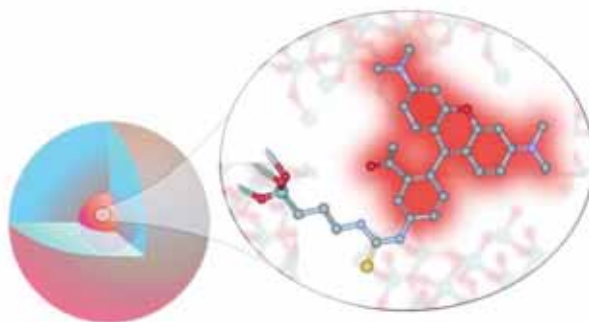


Рис. 1.3. Схематическое представление квантовой точки «Cornell Dot»

Ранее для нанесения на поверхность квантовой точки белкового маркера нужно было использовать дорогостоящий производственный процесс, который состоял в том, что квантовую точку инкапсулировали в полимер. Переход на кремний позволил значительно сократить стоимость диагностики и, как следствие, сделать ее общедоступной для больниц (для ранней диагностики рака, например).

Вайснер говорит, что «кремний — это дешевый инертный материал, который к тому же легко нанести на поверхность квантовой точки. Вместе с тем кремний — материал № 1 в электронике, а это дает уверенность в том, что у квантовых точек, инкапсулированных в нем, большое будущее в микро- и нанoeлектронике. Например, благодаря длительной флуоресценции «CU dots» можно сделать новые типы дисплеев или сконструировать из них оптический компьютер». В контрольном исследовании ученые выявили раковые клетки в образце ткани человека, больного лейкемией. Антитела иммуноглобулина E (IgE), расположенные на поверхности раковых клеток, связывались с наночастицами, а результат было видно в оптический микроскоп.





Ученые из Брукхейвена создали уникальную наноструктуру

19

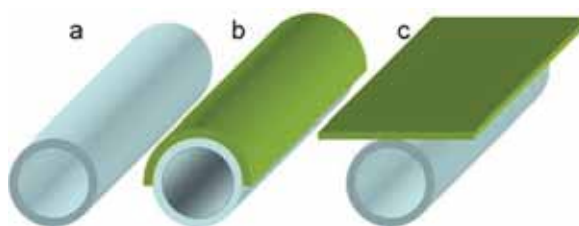
Оптические свойства новых квантовых точек довольно необычны. Физики задались вопросом: почему эти квантовые точки такие яркие? Ведь суммарная яркость всех частей одной наночастицы меньше всей световой энергии, излучаемой ею. Было предложено несколько объяснений. Одно из них заключается в том, что кремниевая оболочка защищает флуоресцентные метки от контакта со средой.

Вне всякого сомнения, нанотехнологи вскоре получат еще один мощный инструмент визуализации наномира. «Умное» использование квантовых точек только начинается.

### Ученые из Брукхейвена создали уникальную наноструктуру<sup>1</sup>

Ученые из Национальной лаборатории Брукхейвен разработали метод производства новых наноструктур. Это ультратонкие «наноленты», нанесенные на поверхность нанотрубок. Эта команда исследователей уже несколько раз становилась первооткрывателем различных наноструктур с необычными свойствами. О своем достижении ученые сообщили в онлайн-выпуске Nano Letters от 4 июня 2005 г. Как оказалось, наноструктуры в виде нанопоясов характеризуются уникальными механическими и электрическими свойствами. «Мы можем синтезировать нанопояса толщиной от 2 до 5 нм. Это довольно важно, так как изменение толщины слоя достигается новым методом производства наноструктур, – говорит один из исследователей Вей-Кванг Хан. – Также мы очень гордимся тем, что создали новый тип наноструктур».

Чтобы вырастить нанопояса, состоящие из германия, на поверхности нанотрубки, ученые использовали новую методику (рис. 1.4). Углеродные нанотрубки (после успешного наращивания нанопояса на углеродных нанотрубках ученые экспериментировали с нанотрубками из



**Рис. 1.4.** Процесс создания нанопояса. Нанотрубка (а) покрыта атомами германия (б), которые кристаллизуются под воздействием температуры, образуя нанопояс из германия, связанный с нанотрубкой (в)

<sup>1</sup> Brookhaven Center for Functional Nanomaterials: Brookhaven Scientists Create a New Nanostructure.



нитрида бора) были помещены на медную поверхность. Далее верхние части нанотрубок были покрыты аморфным (неупорядоченным) слоем атомов германия. Толщину слоя ученые измеряли специальным устройством, которое позволило контролировать процесс нанесения слоя с точностью до нанометра.

Наконец, нанотрубки нагрели до 750°C внутри микроскопа специального исполнения. По мере того как нанотрубки нагревались, аморфный слой атомов германия кристаллизовался, покрывая нанотрубку однородной наноструктурой, напоминающей пояс. Нанопояс оказался химически соединен с поверхностью нанотрубки, образовав новую гибридную наноструктуру «германиевая оболочка – углеродная нанотрубка».

«Этот метод позволяет наносить покрытие толщиной от 2 до 5 нм, в то время как ранее удавалось синтезировать только 10-нанометровый слой, – говорит Хан. – Наноструктуры, синтезированные с такой точностью, характеризуются новыми физическими свойствами, например, они лучше проводят электричество, чем простые нанотрубки. Это может пригодиться в будущих нанoeлектронных устройствах. Также возможно создание гибридной нанoeлектроники (подобно полупроводниковым гетероструктурам). Мы уверены, что наше открытие повлияет на методы производства наноструктур в нанотехнологии, синтез наноструктур, производство наночипов».

В следующих исследованиях В.-К. Хан и его команда планируют детально исследовать транспорт электронов в гибридном наноустройстве. По словам ученых, это поможет узнать, как использовать эти наноструктуры в производстве электронных чипов.

Работа исследователей была проведена в рамках программы Департамента энергетики США.

## Серебряные цветы и карта Новой Зеландии в наномире<sup>1</sup>

Производство наноструктур и наноматериалов с наперед заданными свойствами – одно из главных направлений современных нанотехнологий. Каждый год технологии производства наноструктур совершенствуются, и нет месяца, в котором не разработали бы новую технологию. Здесь мы расскажем о двух революционных методах производства наноматериалов: выращивание наноструктур с «узорами» и плоских микроструктур произвольной геометрии. С помощью первого метода ученые смогли сделать «металлические цветы» размером в несколько микрометров, а с помощью другого – микрометровую карту Новой Зеландии высокого разрешения.

<sup>1</sup> Nanotechweb: Stressed-out microstructures form botani cal-style patterns; Nanotech-Now: Nano cluster devices announces new nano-patterning technologies.



Начнем с описания первой технологии. Ее новизна состоит в том, что ученые из Китайской академии наук научились наносить на поверхности сферических и конических микроструктур ряд правильных форм, изменяя механические напряжения на поверхности образца. Полученные структуры обладают правильной симметрией и по расположению похожи на симметричные объекты, встречающиеся в ботанике. Как говорят ученые, этот новый метод может помочь в производстве макроскопических поверхностей с регулярными паттернами различной симметрии на их поверхности.

Микроструктуры, на которые ученые сумели нанести симметричный узор из наночастиц, состояли из серебряной основы, покрытой  $SiO_x$ . Зей-Хан Као, глава исследователей, предложил сделать уже готовые микроструктуры с наночастицами, испаряя нанопорошок  $Ag_2O$  и  $SiO$  на субстрате поликристаллического сапфира при температуре 1270 К. В результате этого у ученых получились жидкие капли серебра, покрытые тонким слоем  $SiO_x$ . Это и были основы для дальнейшего формирования текстурированных микроструктур. Постепенно охлаждая капли, исследователи добились возникновения неравномерных напряжений в материале, что привело к формированию регулярных симметричных наночастиц, находящихся на поверхности капли. Этот подход ученые назвали «инженерией напряжений» (stress engineering).

На поверхности сферической микроструктуры сферулы (так назвали исследователи эти наночастицы) образовали узор, сводящийся к отдельным треугольникам (рис. 1.5).

Конечно, узор содержит некоторые дефекты симметрии, вызванные сферической формой капли. Симметрия такого рода часто встречается в растительной природе. Например, цветы некоторых растений, имею-

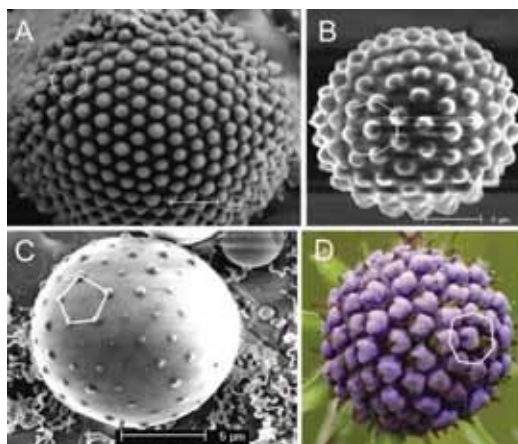


Рис. 1.5. Узор (паттерн) треугольниками

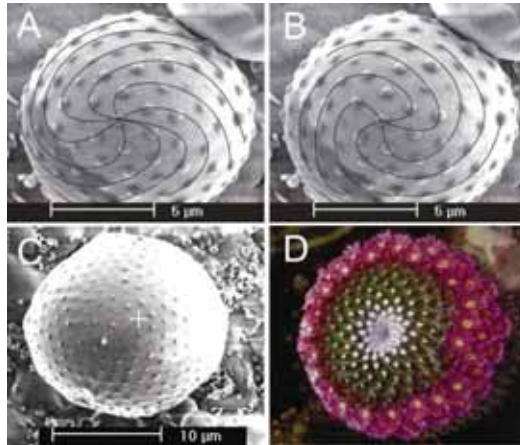


Рис. 1.6. Спиралевидные узоры

щие круглую форму, содержат триангуляционный узор. Далее ученые сделали ряд конических микроструктур похожим методом и попробовали образовать сферулы на их поверхности. Получился рисунок со спиралевидным узором (рис. 1.6), складывающимся в ряд Фибоначчи. Например, на поверхности конуса диаметром 9,5 мкм расположилось 92 сферулы, образовав последовательность Фибоначчи  $5 \times 8$ . А 18-микрометровый конус, покрытый 230 сферулами, образовал узор Фибоначчи  $13 \times 21$ . Этот последний узор можно встретить на поверхности кактуса *Mammillaria pejarpensis*.

«Происхождение этих узоров в живой природе часто вызывает диспуты, — говорит Као. — В нашем случае точно известно, как образовались эти узоры — напряжение на поверхности распределяется так, чтобы минимизировать энергию стресса. Скорее всего, те же законы действительны и в живой природе. Узоры на цветах тесно связаны с распределением энергии стресса, а не с биохимическими или генетическими факторами».

Конечно, эти выводы чрезвычайно ценны для ботаников, однако технология нанесения на микроструктуры сферул поможет в микроэлектронике при создании различных гетероструктур и других полупроводниковых устройств. Так, например, матрицы, сформированные сферулами на поверхности «металл-полупроводник», могут найти применение в электронике на гибких основах и микрофотонике. «Можно даже создавать с помощью металлических сферул на полупроводниковой основе отдельные матрицы полупроводниковых приборов, это очень ценное достижение для микро- и нанoeлектроники», — говорит в заключение Као.

Теперь расскажем о другом инновационном методе, разработанном в Новой Зеландии компанией Nano Cluster Devices Ltd (NCD). Как



говорит один из исследователей, Рене Рэйчел, «наша новая технология позволит убрать один производственный процесс, необходимый для микро- и нанолитографии при производстве микроэлектронных чипов».

С помощью нового метода ученые могут производить двумерные структуры любой геометрии. В доказательство этого они сделали карту Новой Зеландии размерами в 1000 раз меньше диаметра человеческого волоса (рис. 1.7). Как говорят представители компании NCD, ее технологии направлены на технологии сборки из отдельных кластеров нанометровых размеров плоских структур заданной формы.

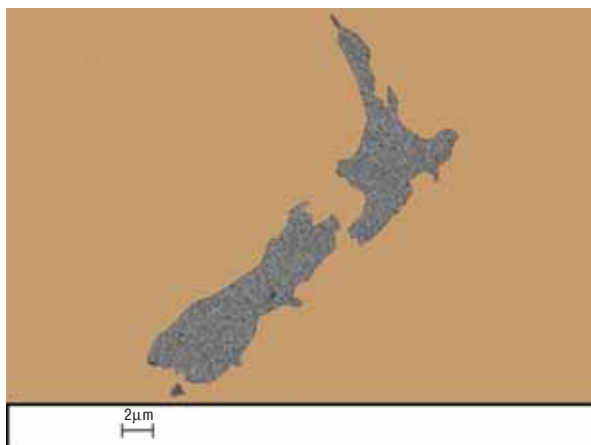


Рис. 1.7. Микрометровая карта Новой Зеландии

Технология кластеров позволяет решить еще одну проблему, часто возникающую в микроэлектронике. Это проблема «засорения трафарета», используемого в нанолитографии и микроэлектронике для производства нанопроводников. «Представьте себе краскопульт, с помощью которого через трафарет рабочий делает различные узоры. Со временем сопло краскопульт засоряется краской и распыляет уже не так точно, как это было вначале, — говорит Рене. — Мы же для производства наноструктур пользуемся вместо краски нанокластерами, которые распыляются в условиях, препятствующих их налипанию к рабочему инструменту. Вот почему с помощью нашей технологии мы можем достигать высокой точности в производстве двумерных структур. Также мы делаем очень тонкие и прямые нанопроводники, которые другими методами создать вообще невозможно».

Ранее компания NCD разработала метод производства нанопроводников путем самоорганизации нанокластеров. Совместив этот метод с технологией распыления, ученые получили возможность производить нанопроводники в больших количествах.



Нанопроводники — один из ключевых элементов в микроэлектронике. Они соединяют между собой отдельные части внутри микросхем и применяются в некоторых типах нанотранзисторов. Поэтому технологии, разработанные компанией NCD, очень важны для будущего развития микроэлектроники.

Как мы видим, нанотехнологии не стоят на месте, и с каждым днем ученые сообщают о новых методах производства наноструктур, продвигаясь по размерной шкале все ниже и ниже.

### Что будет, если надавить на нанотрубку?<sup>1</sup>

Компактные и сверхбыстрые компьютеры, пуленепробиваемые футболки, космический лифт, роботы размером с клетку и меньше — все это обещают человечеству нанотехнологии, где будут использоваться в качестве основного материала углеродные нанотрубки.

Однако все эти чудеса невозможны без предварительных исследований наномира и нанообъектов. Поэтому ученые сегодня сосредоточились на детальном изучении свойств нанотрубок в наноразмерном диапазоне. Другими словами — без науки о наноразмерном диапазоне не было бы и нанотехнологий.

В новом исследовании ученые из Университета Джорджии (США) и их коллеги из исследовательского центра Уотсона IBM установили, что, несмотря на довольно большую жесткость углеродных нанотрубок, если их тянуть с обоих концов, они легко деформируются при надавливании посередине. Чем больше радиус нанотрубки, тем больше они прогибаются под надавливающим зондом. Это важное для наноэлектронных разработок заключение исследователи опубликовали в майском выпуске журнала *Physical Review Letters*.

«Мы уже хорошо знаем, что в осевом направлении нанотрубки чрезвычайно жесткие. Однако мы никак не могли проверить их радиальную жесткость из-за малых размеров этих нанообъектов. Как только мы попытались надавить на нанотрубку зондом, она соскальзывала и отодвигалась в сторону. Но теперь мы все-таки установили, что в радиальном направлении нанотрубки довольно эластичны», — комментирует Элиза Райдо, профессор физики из Университета Джорджии (рис. 1.8).

Чтобы надавить на нанотрубку, ученые воспользовались зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) с радиусом рабочей части 35 нм. Они проделали серию нажимов на нее с разной силой для того, чтобы измерить эластичность нанотрубки.

«Серией слабых надавливаний мы смогли измерить радиальную эластичность однослойной и многослойной углеродной нанотрубки.

<sup>1</sup> The Georgia Institute of Technology: Like the Famous Doughboy, Nano-tubes Give When Poked (<http://www.gate-ch.edu/news-room/release.php?id=565>).



Что будет, если надавить на нанотрубку?

25

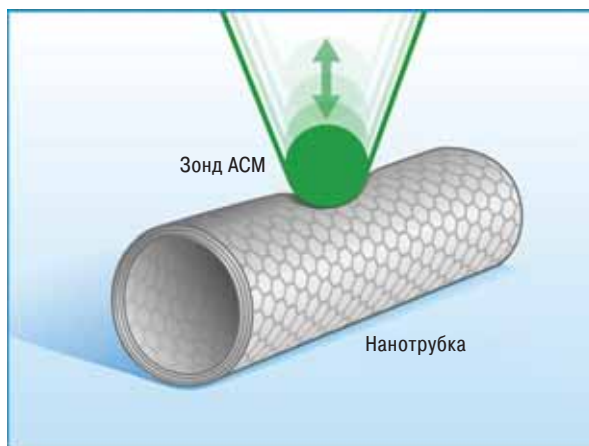


Рис. 1.8. Используя АСМ, исследователи надавили на середину нанотрубки, чтобы узнать, как она себя поведет

Также мы экспериментировали с нанотрубками разных радиусов и установили, что нанотрубки меньшего радиуса намного жестче в радиальном направлении, чем те же с большим радиусом», — сказала Райдо.

Элиза Райдо и ее коллеги начали серию исследований с однослойной нанотрубки радиусом 0,2 нм и потихоньку добрались до нанотрубок радиусом 12 нм. Всего ученые измерили радиальную эластичность 39 нанотрубок. «Затем мы повторили те же измерения с многослойными нанотрубками. Наши исследования показали, что многослойные нанотрубки с малым внутренним радиусом жестче, чем такие же с большим внутренним радиусом», — продолжает Райдо. Однако для многослойных нанотрубок с большими радиусами эластичность объекта в целом — постоянная величина. Это значит, что ослабление радиальной жесткости нанотрубки происходит с увеличением жесткости из-за отдельных слоев.

Понимание того, почему нанотрубки имеют различную жесткость из-за радиуса и числа слоев, а также анализ радиальной и осевой жесткости помогут ученым в дальнейших исследованиях в области нанопроводников и нанoeлектронных устройств. Как недавно доказали исследователи из Калифорнийского университета, транзисторы на основе нанотрубок могут работать гораздо быстрее обычных полупроводниковых ключей.

Дальнейшая цель Райдо — измерение эластичных свойств нанотрубки с постоянным внешним радиусом и изменяющимся числом слоев, и наоборот. Так ученые узнают, как число и радиус слоев влияют на эластичность нанотрубки в целом.



## Светоизлучающие нанотрубки в телевизорах и дисплеях<sup>1</sup>

Углеродным нанотрубкам уже найдено немало разнообразных применений, в том числе в качестве элементной базы для будущих нанoeлектронных схем, однако в компании Applied Nanotech полагают, что могут предложить еще одно – в плоскоэкранных телевизорах и дисплеях нового поколения.

Напомним, что нанотрубки из углерода, используемые в качестве полупроводниковых приборов, были впервые обнаружены в лаборатории NEC, которой принадлежат права на коммерческое использование этих технологий и которая собирается выпустить первый чип на нанотрубках к 2010 г.

Нанотрубки, как было открыто в конце 1990-х гг., проявляют себя как проводники или как полупроводники в зависимости от ориентации шестиугольников, состоящих из атомов углерода, относительно направления оси нанотрубки (хиральности), а также от различных примесей, входящих в состав нанотрубки.

Ранее созданные микроскопические твердотельные излучающие нанотрубки электрически управлялись «модулятором» из одной-единственной молекулы. Новые светоизлучающие нанотрубки (light-emitting nanotube, LEN) (рис. 1.9) излучают в диапазоне 1,5 мкм, что в перспективе делает потенциально возможным создание оптических коммуникационных элементов на кремниевых подложках с интегрированными LEN-излучателями диаметром всего 1,4 нм.

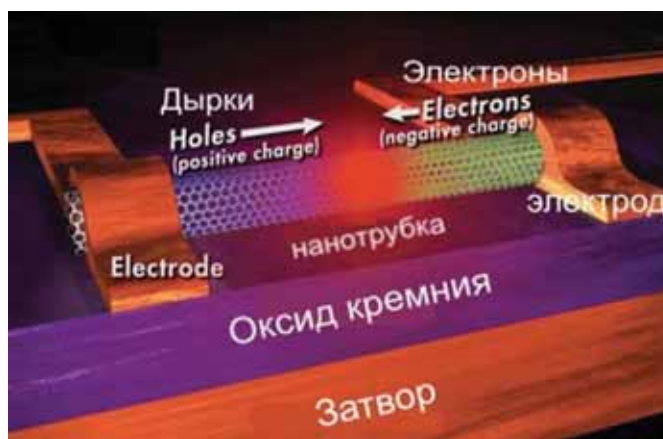


Рис. 1.9. Принцип работы светоизлучающих нанотрубок

<sup>1</sup> EE Times; IXBT: Светоизлучающие углеродные нанотрубки.





В телевизорах нового поколения Applied Nanotech предлагает использовать нанотрубки в качестве источников света, чтобы заменить лампы подсветки в жидкокристаллических телевизорах большой диагонали (40–60 дюймов). Причем компания надеется это сделать к 2007 г., т.е. всего через четыре года после того, как светоизлучающие нанотрубки были впервые созданы.

Как сообщает источник, Applied Nanotech, являющаяся дочерней фирмой Nano-Proprietary, создала лампу подсветки, используя технологии печати чернилами на основе нанотрубок. В отличие от обычных ламп, в новой разработке используются фосфоросодержащие покрытия и катод, в буквальном смысле напечатанный чернилами на основе металлической краски и собственно нанотрубок.

Себестоимость созданных таким образом ламп подсветки очень невысока (в отличие, скажем, от катодов, в которых нанотрубки бы выращивались), что очень важно для безумно дорогих на сегодняшний день больших дисплеев.

Утверждается, что созданная по новой технологии лампа подсветки для 32-дюймовых телевизоров потребляет от 50 до 60 Вт. Applied Nanotech продемонстрировала подробности своей технологии на выставке NanoEurope 2005 в Швейцарии.

Стоит также отметить, что кроме Applied Nanotech возможностями применения технологий нанотрубок в дисплеях в качестве источников света также интересуются и такие производители, как, например, Samsung.

### Кисть из нанотрубок<sup>1</sup>

На сегодняшний день ученые довольно много узнали о свойствах нанотрубок. Пришло время составлять из них сложные конструкции и наносистемы. Однако первую более-менее сложную структуру, изготовленную из нанотрубок, можно смело назвать «нановеником». Профессор Паликель Аджаян (об этом ученом, работающем в области исследования свойств нанотрубок, мы уже писали) и его коллеги из Политехнического института в Нью-Йорке создали самую маленькую в мире щетку, щетинки которой — не что иное, как отдельные нанотрубки. Диаметр каждой нанотрубки 30 нм, т.е. каждый волос щетки в тысячу с лишним раз тоньше человеческого волоса.

Исследователи не собирали веник «по волоску», а вырастили нанотрубки прямо на ручке щетки. А чтобы вся ручка не обросла ворсом из

<sup>1</sup> BBC NEWS: Brush Up Your Nanotechnology (<http://news.bbc.co.Uk/2/hi/science/nature/4085214.stm>).



нанотрубок, ученые покрыли ее местами тончайшим слоем золота. Нанотрубки они выращивали, используя обычный метод синтеза нанотрубок, состоящий в том, что в атмосфере горячего газа, содержащего углерод, на нитях углеродистого силицида происходит рост этих наноструктур.

Как и обычные щетки, это достижение нанотехнологий имеет несколько способов применения: ими можно «подметать» нанопыль (рис. 1.10) на сверхминиатюрных НЭМС- и МЭМС-устройствах, окрашивать микроструктуры и удалять загрязнители из воды. Также кистью можно прочищать тонкие капилляры подобно тому, как мы чистим бутылки ершиком. Поэтому нанокисть, по мнению изобретателей, будет востребована медиками – они смогут использовать ее в будущем для «прочистки» сосудов и удаления атеросклеротических бляшек.

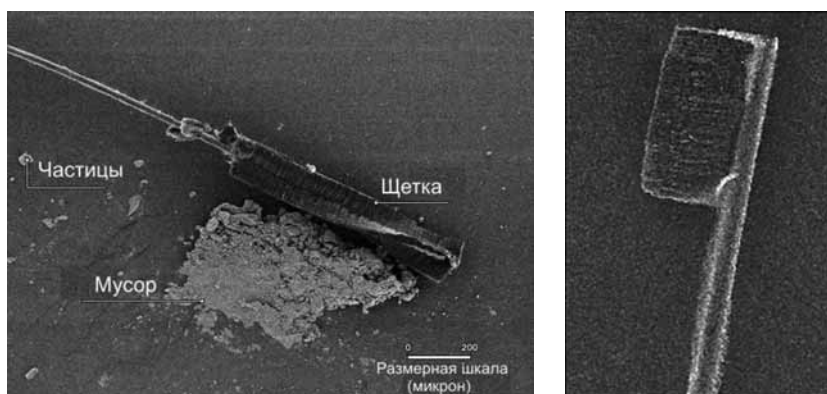


Рис. 1.10. Щетка из нанотрубок в действии

Как говорит Аджаян, эта щетка – одно из первых гибких наноустройств. Это свойство очень полезно в наномире, так как многие микро- и нанообъекты имеют сложную геометрию, а гибкий инструмент с большим числом степеней свободы сможет проникнуть даже в самые труднодоступные места.

Как говорят исследователи, щетка проводит электричество. Этого и стоило ожидать, ведь углеродные нанотрубки сами по себе хорошо проводят электричество.

Исследователи даже попытались сделать зубную «наношетку»! Один из исследователей предполагает, что такие щетки будут полезны при нанесении ультратонких покрытий на труднодоступные места. С их помощью можно будет даже отлавливать отдельные вирусы и бактерии, предварительно покрыв устройство специфическими антителами.

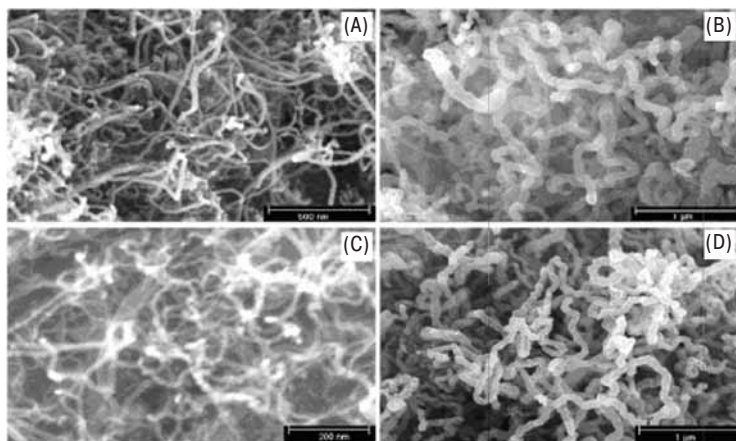
## Нанотрубки для топливных элементов<sup>1</sup>

Уникальные свойства углеродных нанотрубок (УНТ) и нановолокон (УНВ) — высокая удельная поверхность, электропроводность, прочность — позволяют создавать на их основе эффективные носители катализаторов для различных процессов. Неудивительно, что эти новые углеродные наноматериалы вызвали большой интерес у разработчиков топливных элементов (ТЭ) (*топливные элементы (fuel cells) — химические источники тока, допускающие длительную непрерывную работу благодаря постоянному подводу к электродам жидких или газообразных реагентов (топливо подается к одному электроду, а окислитель, обычно кислород, — к другому).* Наиболее перспективным топливом является водород; в так называемых прямых метанольных топливных элементах используется метанол) и энергоустановок на их основе — в ТЭ используются электрокатализаторы (металлы платиновой группы) именно на углеродных носителях. В последнее время большое внимание уделяют топливным элементам с твердым полимерным электролитом (ТПЭ). В России их успешные исследования и разработки ведутся в РНЦ «Курчатовский институт» и некоторых других организациях. В качестве носителей катализаторов сейчас, как правило, используют сажу или технический углерод. Недавние эксперименты показали, что замена их на углеродные нанотрубки или нановолокна позволяет повысить активность электрокатализаторов и эффективность работы топливных элементов с ТПЭ.

Так, китайские исследователи синтезировали катализатор из наночастиц платины на УНТ (10 вес. % Pt) и использовали его в качестве катодного электрокатализатора для прямых метанольных топливных элементов вместо обычного катализатора на углероде марки XC-72. Продемонстрирована высокая активность восстановления кислорода и более эффективная работа ТЭ. Российские ученые (РХТУ им. Д.И. Менделеева) разработали электрокатализаторы на основе УНТ и УНВ (в том числе в виде «нанобумаги») с нанесенными наночастицами Pt и Pd.

Исследования выявили зависимость электрохимических характеристик от размеров и морфологии УНТ и УНВ (рис. 1.11), которые, в свою очередь, определяются размерами, формой и распределением частиц катализатора, а также условиями синтеза. Для создания эффективного носителя катализаторов для топливных элементов с ТПЭ авторы синтезировали и исследовали углеродные нанотрубки и нановолокна разных размеров и морфологии (УНТ диаметром 25 и 15 нм; скрученные УНВ диаметром 40, 65 и 100 нм; прямые УНВ диаметром 70 нм). В эксперименте использовали метод термического каталитического CVD (источник углерода — ацетилен; катализаторы Ni-MgO, полученные механохимическим путем).

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 6.



**Рис. 1.11.** УНТ и УНВ, синтезированные при разных температурах на катализаторе, обработанном механохимическим методом в течение 360 мин: А – 500°С; В – 600°С; С – 650°С; D – 700°С [6]

Основные факторы, влияющие на размеры и морфологию УНТ и УНВ, – длительность механохимической обработки катализатора и температура CVD. Средние диаметры УНТ и УНВ – 25–100 нм, диаметры скрученных УНВ – 65, 40 и 10 нм. После очистки и химического восстановления платины полученные образцы 20% Pt/УНТ или Pd/УНВ наносили в качестве каталитического слоя на газодиффузионный слой/подложку электродов. Мембрано-электродный блок создан из двух электродов с полимерной электролитической мембраной (Nafion 1035) между ними.

Вольтамперные характеристики топливных элементов с электродами из шести разных типов Pt/УНТ и Pd/УНВ получены при 800°С и давлении  $9,8 \cdot 10^4$  Па. Лучшие результаты получены для УНТ и УНВ с меньшими диаметрами (см. табл.). Интересно, что наиболее эффективными оказались скрученные УНВ (возможно, неровная поверхность скрученных нановолокон малого размера способствует равномерному распределению частиц Pt).

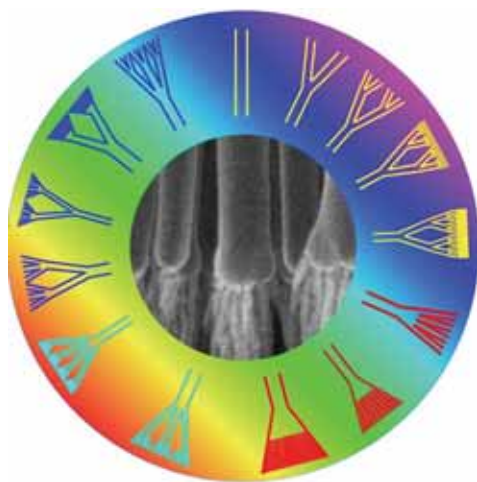
Таблица

Тип элемента	Диаметр, нм	Напряжение, мВ (при плотности тока 500 мА/см <sup>2</sup> )
Скрученные УНВ	65	645
УНТ	25	609
Прямые УНВ	70	532

Активность и оптимизм авторов вселяют надежду – уже в ближайшем будущем углеродные нанотрубки и нановолокна начнут работать в реальных топливных элементах.

## Наноструктуры по шаблону<sup>1</sup>

Исследователи из Политехнического института Ренсслеера создали керамические шаблоны, на которых удалось вырастить ветвящиеся нанотрубки с ранее заданной конфигурацией ответвлений. При этом нанотрубки могут ветвиться иерархически, создавая несколько разветвляющихся пучков. Ученым удалось вырастить таким образом не только нанотрубки, но и металлические нанопроводники. В качестве основы для шаблона исследователи использовали подложку из анодированного оксида алюминия (рис. 1.12). «Наше управление ростом и ветвлением нанотрубок очевидно. Достаточно взглянуть на СТМ-фотографии, — говорит Паликель Аджаян, один из исследователей. — Морфология полученных нанотрубок схожа с морфологией дендромеров, поэтому трудно представить, что синтез этого нанодерева произошел по заданной заранее программе».



**Рис. 1.12.** Шаблоны и полученные наносистемы на основе нанотрубок

Аджаян, Гуовен Менг и их коллеги сделали подложки из алюминия методом анодирования, в процессе которого они изменяли напряжение. Другие исследователи создали углубления на подложке в виде символа Y, еще раз изменив напряжение анодирования. Проведя эту операцию 4 раза, ученые получили массив вытравленных на подложке Y-веток. При этом ученым удалось получить до 16 разветвлений на матрице-подложке. Комбинируя разветвления и простые Y-углубления, команда получила массу различных разветвляющихся «шаблонов», размер которых исчисляется десятками нанометров.

<sup>1</sup> Nanotechweb. Nanostructures branch out with templates (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/5/3/1>).



## 32 Глава 1. Наноматериалы

Для того чтобы привязать углеродные наноструктуры к этим шаблонам, ученые синтезировали их непосредственно в углублениях, проведя реакцию пиролиза ацетилена. Затем ученые удалили слой оксида алюминия путем травления, открыв полученные углеродные нанотрубки различной формы. В другом эксперименте Менг и коллеги вырастили внутри подложки-матрицы нанопроводники из никеля. «Так как мы разработали общий принцип производства наноструктур по определенному шаблону, то теперь станет легко изготавливать металлические, полупроводниковые, полимерные, углеродные наносистемы», — говорит Аджаян. Также исследователи уверены, что смогут создать гетероструктуры различной формы на основе нанотрубок. При этом такая наносистема может состоять из трех и более компонентов. «Конечно, одна из областей практического применения нашего открытия состоит в создании микроэлектронных схем на основе новых гетероструктур. Это и сенсоры, детектирующие отдельные молекулы, и нанопроводники, обеспечивающие перенос сигнала от нано- к микромасштабу, и как ни странно, системы доставки лекарств, — заключает Аджаян. — Но безусловно помимо этого наше открытие позволит создавать заранее спроектированные наноструктуры со сложной архитектурой. Это очень важно для развития нанотехнологий и наноинструментария».

### Батарейку от Toshiba можно зарядить за 60 секунд<sup>1</sup>

Компания Toshiba разработала литиево-ионную батарею на основе наноматериалов, которая заряжается примерно в 60 раз быстрее обычной. За одну минуту ее можно заправить на 80%, а полная емкость аккумулятора (у первого образца она была равна 600 мА·ч) заполняется через несколько минут (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Нанобатарейка (3,8×62×35 мм)

<sup>1</sup> New battery offers unsurpassed recharge performance and high energy density ([http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005\\_03/pr2901.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005_03/pr2901.htm)).



### Батарейка на основе «нанотравы» от mPhase Technologies

33

Как сообщает компания, новый аккумулятор обладает рядом других преимуществ перед распространёнными аккумуляторными батареями (в том числе литиево-ионными).

Создать нанобатрейку удалось благодаря новой технологии, основанной на использовании наночастиц, находящихся в составе материала отрицательного электрода батареи. При зарядке батареи наночастицы быстро собирают и хранят ионы лития.

Прекрасные показатели времени зарядки батареи – не единственное достоинство прототипа. Нанобатарея будет служить дольше: за 1000 циклов заряда-разряда она теряет всего 1% своей емкости. Также она может работать на сильном морозе: при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  емкость батареи составляет 80% (при  $+25^{\circ}\text{C}$  она равна 100%).

Опытный образец имеет размеры  $3,8 \times 62 \times 35$  мм и предназначена, в первую очередь для бытовой электроники и мобильных электронных устройств. Однако данную технологию Toshiba намерена распространить и на другие области, например гибридные автомобили.

На рынке скоростная батарейка появится в 2006 г.

### Батарейка на основе «нанотравы» от mPhase Technologies<sup>1</sup>

Компания mPhase Technologies в сотрудничестве с Bell Labs и научно-исследовательским подразделением Lucent Technologies создала батарею, основанную на достижениях нанотехнологии. Ключевые преимущества нового источника питания – возможность интеграции в полупроводниковые изделия и большой срок хранения.

Во многих устройствах необходим резервный источник питания. Как известно, обычные батареи теряют около 10% емкости за один год хранения, поэтому в таких случаях часто используют батареи, в которых химические материалы объединяются в нужный момент механическим способом. Эти изделия могут храниться достаточно долго, они надежны и могут обеспечить большую плотность энергии. К сожалению, такие батареи трудно сделать миниатюрными. Кроме того, процесс их производства слишком отличается от процессов производства полупроводниковых компонентов, и батареи не могут быть встроены непосредственно в микросхемы. Еще одним ограничением существующих батарей является потребность в механическом усилии для активации, вследствие чего переход в рабочее состояние занимает довольно много времени. Необходимость иметь резервуар для электролита и механизм активации уменьшает полезный объем внутри источника питания.

В основе работы как новой, так и существующих батарей лежит химическая реакция. Нанотехнологии обеспечивают уникальный способ со-

<sup>1</sup> IXBT: mPhase Technologies представляет нанобатрейку (<http://www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?newsl18268id>).



34

Глава 1. Наноматериалы



Рис. 1.14. «Нанотрава» и электролит — основные составляющие нанобатарейки

единения химических компонентов и управления параметрами реакции. На рис. 1.14 показан пример трубчатой наноструктуры, так называемой «нанотравы». Из нее формируется сверхгидрофобная наноструктурированная поверхность («Superhydrophobic NanoStructured Surface»), над которой размещается капелька электролита. Капелька находится над трубочками, не взаимодействуя с ними. В нужный момент ее можно заставить упасть в пространство точно между трубочками, моментально увеличив площадь поверхности, на которой электролит взаимодействует с материалом батареи, вызывая электрический ток. Падение капельки можно вызвать разными способами, например импульсом напряжения или радиоизлучения.

Новая технология значительно увеличивает срок хранения батареи — до 15–20 лет. К другим преимуществам относятся высокая скорость активации элемента питания и выход на полную мощность, совместимость с технологическими процессами производства полупроводников, высокая плотность энергии. Батарея легко поддается миниатюризации и может быть изготовлена из материалов широкого спектра. Кроме того, как обещают разработчики, новинка будет очень дешевой при массовом производстве. Другими словами, потенциал батареи mPhase в самых разнообразных областях применения, включая космическую и оборонную отрасли, бытовую и промышленную электронику, средства спасения и здравоохранения, огромен. По крайней мере, так считают аналитики из компании Frost & Sullivan Research, присвоившие проекту престижную награду.

По оценке разработчиков, на выход коммерческого продукта понадобится полтора-два года.

### Создана прозрачная наноткань с прочностью стали<sup>1</sup>

Нанотрубки, похоже, становятся открытием №1 в области нанотехнологий. Две различные команды исследователей из США и Австралии создали прозрачную ткань, состоящую из нанотрубок длиной 1 (!) м и шириной 5 см. Ранее ученым удавалось получить нанотрубки длиной только несколько сантиметров.

<sup>1</sup> Nanotechweb.org: Carbon-nanotube fabric measures up.



**Рис. 1.15.** Наноткань из нанотрубок. Эмблема снизу показывает прозрачность ткани

Как и ожидалось, лента обладает высокой прочностью. Соотношение прочность/масса материала ленты выше, чем у стали высокой закалки. При этом ткань возможно оборудовать органическими светодиодами, превратив ее в гибкий сверхтвердый OLED-экран. Это похоже не на «рядовое» открытие, а на научную фантастику. Тем не менее это так. Давно известно, что нанотрубки по прочности превосходят сталь и при этом способны проводить электричество. Вся загвоздка состояла в том, что до сих пор их не могли производить длиннее 2 см и тем более не могли прядь из них ткань.

«Наноткань ожидает масса применений: строительные материалы, снаряжение, бронезилеты, OLED-дисплеи; всего и не перечислить... – говорит Рэй Бохман из Техасского университета. – То, что это очень ценный и востребуемый продукт, ускорит его коммерциализацию, и, я уверен, мы увидим уже скоро в различных продуктах использование нанотекстиля».

Наноткань (рис. 1.15) – это, конечно, не массив «цельных» нанотрубок, а композит, состоящий из переплетенного «леса» многослойных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм. Образец таких спутанных нанотрубок длиной всего 1 см может «развернуться» в трехметровую ленту 18-микронной толщины. Если же использовать пластиковый цилиндр в качестве вала, по которому протягивается лента, то исходный материал можно раскатать до десятиметровой длины. Оборудование ученых обеспечивало «разворачивание» леса до 1 м/мин.

В результате первого цикла производства у ученых получился анизотропный аэрогель на основе нанотрубок с плотностью 0,0015 г/см<sup>3</sup>. Этот лист выдерживал миллиметровые капли, которые были в 50 000 раз тяжелее места контакта с аэрогелем.

Но ученые решили сделать наноткань более прочной. Для этого они поместили пленку из нанотрубок на плоскость и вертикально погрузили ее в раствор этанола. При этом погружение велось в направлении соединения нанотрубок между собой. После того как пленку вытащили, испарение этанола вызвало сокращение толщины пленки до 50 нм из-за эффектов поверхностного натяжения. При этом плотность пленки стала равна 0,5 г/см<sup>3</sup>.



## 36 Глава 1. Наноматериалы

Усиленная нанопленка и есть конечный продукт. Она прозрачна и проводит электричество. Вдоль направления нанотрубок сопротивление ткани составляет  $700 \text{ Ом/м}^2$ . При этом сопротивление остается постоянным при изгибе пленки в любом направлении.

Как говорят ученые, наноткань может использоваться даже в системах освещения, заменяя традиционные лампы дневного света и лампочки. Прочность пленки –  $160 \text{ МПа/(г/см}^3)$ . Прочность полимерных пленок майлар и каптон, использующихся в сверхлегких самолетах, –  $140 \text{ МПа/(г/см}^3)$ , а прочность закаленной стали –  $125 \text{ МПа/(г/см}^3)$ .

Новый метод производства нанотрубок, названный технологией «развертки», имеет ряд преимуществ перед химическим синтезом наноструктур, так как до сих пор удавалось получить нанотрубки длиной только 2–3 сантиметра.

Возможно, благодаря этому открытию запуск коммерческого космического лифта в 2018 г. может-таки состояться. Напомним, что основная составляющая космического лифта, транспортирующего грузы на орбиту Земли и гораздо дальше, – сверхпрочная и легкая лента на основе нанотрубок.

### Нанопокрывтие NanoMATRIX для одежды<sup>1</sup>

Японская компания Toray Industries заявила, что она создала новую технологию обработки тканей, которая позволяет наносить на каждый монофиламент ткани определенный наноматериал. Как заявило руководство компании, этот прорыв в производстве был достигнут благодаря новым достижениям в области самосборки наноструктур.

Новая технология обработки тканей «NanoMATRIX» позволяет наносить на монофиламенты обрабатываемой ткани покрытие толщиной от 10

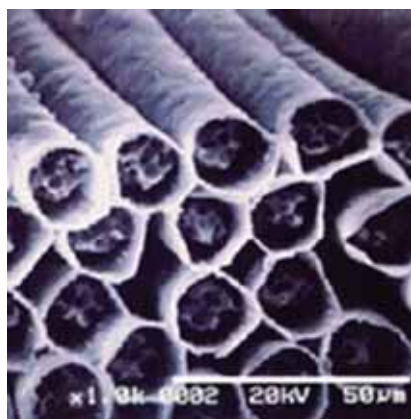


Рис. 1.16. СТМ-изображение нанопокрывтия «NanoMATRIX» отдельных монофиламентов полиэстера

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.



до 30 нм (рис. 1.16). Такое полное покрытие филаментов ткани на сегодняшний день было достичь невозможно, утверждает руководство. Современные текстильные технологии позволяют наносить покрытие в пространство между монофиламентами или в участках пересечения волокон ткани.

Технология «NanoMATRIX» стала возможной благодаря нанотехнической самосборке. Исследователи изменяли окружающие условия (температуру, давление, электрическое поле и т.д.) для того, чтобы молекулы материала, который необходимо нанести на ткань, образовали покрытие на полиэстеровых монофиламентах.

При обработке ткани с помощью новой технологии отдельные монофиламенты не повреждаются и текстура ткани не изменяется.

Как говорят специалисты из Toqay Industries, новая технология не позволит растягиваться вещам, изготовленным из обработанной ткани. Также можно будет изготовить водоотталкивающие и антистатические ткани на основе уже использующихся материалов (хлопка, полиэстера).

### Нанотехнологии выходят на корт<sup>1</sup>



Рис. 1.17. Серию наноракеток от фирмы Babolat можно купить в России

В конце августа, когда лучший теннисист мира Роже Федерер выйдет на корт U.S.Open, у него будет ракетка, снабженная наночастицами, благодаря которым она при сохранении своей массы станет прочнее. Ракетка Андре Агасси при соприкосновении с мячом будет «принимать его форму», что слегка усиливает контроль во время игры.

Но производители этих ракеток делают технологию доступной и для тех, кто играет в теннис на досуге. Фирмы Head, Prince, Babolat, Wilson и Fischer, использующие нанотехнологии, снабжают ракетки (рис. 1.17) магнитной силой, аэродинамическими и другими свойствами, которые позволяют игрокам увеличить мощь и точность удара.

Австрийская фирма Fischer GmbH, известный производитель лыжного снаряжения, в сентябре представит высокотехнологичную ракетку, обладающую магнитными свойствами. Ракетка, получившая название Magnetic Speed, осна-

<sup>1</sup> Pittsburgh Post-Gazette: Nanotechnology hits the tennis court; перевод: Inopressa: Нанотехнологии выходят на корт.



щена однополярными магнитами, установленными на ободе. Магниты отталкиваются друг от друга, что позволяет ракетке сохранять форму после столкновения с мячом. Идея в том, что быстрое восстановление увеличивает скорость полета мяча. Чтобы магниты заряжались, в ручке ракетки установлены пьезоэлектрические кристаллы. Ракетка стоимостью 189 долл. США появится в продаже нынешней осенью. В Европе ею уже пользуются такие спортсмены, как Андрей Павел и Вера Звонарева.

Новые ракетки призваны вызвать новый приступ интереса у любителей. Продажи теннисного снаряжения в последние годы выросли, но они ниже, чем десятилетие назад. По данным Ассоциации теннисной индустрии, в 2004 г. компании продали около 3,9 млн ракеток. Это больше, чем 3,1 млн в 2003 г. и 3,3 млн — в 2002-м, но меньше, чем 4,4 млн в 1992 г.

«Технологические новшества заставляют потребителей покупать новые модели», — говорит Марк Мейсон, владелец специализированного магазина Mason's Tennis на Манхэттене, который продает почти 2 тыс. ракеток в год. Поэтому компании и мудрят с формами и материалами. Ракетка Flexpoint голландской компании Head NV, которую предпочел Агасси, снабжена отверстиями и «впадинами» на обеих сторонах обода. Компания утверждает, что впадины увеличивают гибкость и ракетка принимает форму мяча.

Компания разработала девять моделей для игроков разного уровня. Ракетка стоит около 200 долл. Частная компания Prince Sports Inc. из Нью-Джерси изменила форму отверстий для струн. На смену крошечным круглым отверстиям пришли крупные овальные, что делает струны более чувствительными. Компания утверждает, что увеличивается также аэродинамичность и игроку легче посылать ракеткой мяч.

Созданы четыре модели стоимостью от 220 до 300 долл. Ими играют аргентинцы Гильермо Кориа и Паола Суарес. Компании меняют не только дизайн, но и материалы. Французский производитель Babolat в 2003 г. начал с того, что вмонтировал в свои ракетки углеродные нанотрубки. Трубки в 10 раз плотнее графитовых и служат очень долго. Ракетка кажется более жесткой, что увеличивает силу удара. Стоимость ракеток для любителей — 199 долл.

Крупнейший в США производитель ракеток, чикагская компания Wilson Sporting Goods Inc. начала снабжать свои ракетки nCode — выбор Федерера — кристаллами двуокиси кремния прошлой весной. Ими играют Серена и Винус Уильямс.

Звезды тенниса не всегда охотно берутся за высокотехнологичные ракетки. Но соглашения между производителями и профессионалами нередко подразумевают, что известные игроки вооружатся новейшими технологиями.

Правила тенниса разрешают пользоваться множеством вариантов ракеток. Международная теннисная федерация не занимается оценкой ракеток, она лишь проверяет их на предмет соответствия правилам, когда



с такой просьбой обращаются производители или когда поступают жалобы на то, что правила нарушены.

Все ускоряющийся темп изменений иллюстрирует тот факт, что Международная теннисная федерация меняла правила, касающиеся ракеток, 14 раз с 1978 г., когда они впервые были облечены в слова. И похоже, что в ближайшее время эта тенденция не замедлится.

### Наноматериалы частично поражают легкие<sup>1</sup>

Наноматериалы – сегодняшние фавориты индустрии – выявлены в номенклатуре выпускаемых изделий от косметики до электроники. Тем не менее новое исследование на животных показало, что, попав при дыхании в легкие, эти микроскопические сферы (фуллерены) и углеродные нанотрубки могут стать причиной больших проблем, особенно для рабочих, изготавливающих их и манипулирующих ими.

Это заявление поступило со встречи Общества по токсикологии, проходившей в Нью-Орлеане. Особенно ошеломили сообщения, раскрывающие детали того, как наноматериалы взаимодействуют с организмом человека. Большинство исследований фокусировалось на эффектах воздействия на легкие, потому что размер частиц позволяет им достигать их наиболее чувствительных тканей.

John T. James из NASA Johnson Space Center в Хьюстоне и его коллеги впрыскивали наночастицы в дыхательные пути мышей и исследовали их через неделю, а затем через 3 месяца. Несмотря на то что фуллерены не вызывали повреждений, равное по массе количество углеродных нанотрубок причиняло значительное повреждение легким и даже вызвало смерть нескольких животных.

Воздействие наночастиц и нанотрубок на ткани животного видно на одном из рисунков: клетки иммунной системы, называемые макрофагами, захватывают нанотрубки, но затем погибают (рис. 1.18). На рис. видно, как воспаление постепенно переходит в рубцевание ткани легких (так называемая гранулема легких) при воздействии на ткань раствора нанотрубок.

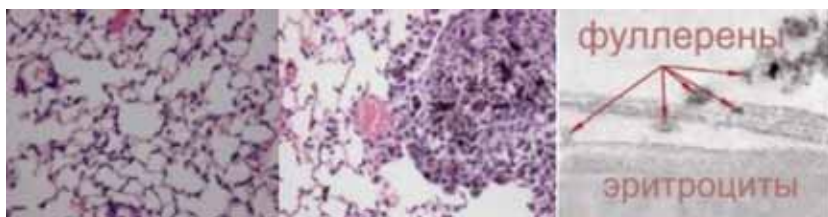


Рис. 1.18. Развитие воспаления тканей легких от воздействия на них раствора фуллеренов и нанотрубок

<sup>1</sup> Exposure to minute particles harms lungs, circulatory system (<http://www.sciencenews.org/articles/20050319/fob1.asp>).



Джеймс описывает дозу, которую использовала его группа, как завышенную. Он полагает, что при текущей федеральной норме ПДК (предельно допустимой концентрации) для вдыхаемого углерода (не структурированного в виде наноматериалов) рабочие могут получить эквивалентную дозу за 17 дней.

Исследователи во главе с Petia Simeonova из National Institute of Occupational Safety and Health in Morgantown в Западной Вирджинии также наблюдали насыщенные наночастицами гранулемы в тканях подопытных мышей, получивших схожие дозы углеродных трубок.

Исследователи также оценивали повреждение митохондриальной ДНК в тканях сердца и аорты. Митохондриальное повреждение предвещает начало атеросклероза. Опыты на мышцах, подвергшихся воздействию нанотрубок, продемонстрировали значительное повреждение ДНК, которое продолжалось по меньшей мере 6 месяцев. Simeonova заявила, что произошло существенное повреждение тканей — а это еще один фактор риска для атеросклероза — в сердце, аорте и легких животных.

На собрании Akinori Shimada из Tottori University (Япония) представил первую серию снимков, изображающих наночастицы, попадающие из легких в кровь. Контактируя в течение минуты с капиллярами дыхательных путей тканей легких мыши, углеродные наночастицы начинают поступать через межклеточное пространство в капилляр. Там отрицательно заряженные наночастицы улавливаются красными кровяными клетками, которые в организме имеют положительный заряд. Если это присоединение вызовет смену знака заряда на поверхности клетки крови, предполагает Shimada, это может стимулировать скопление и образоваться тромб.

Исследователи из University of Rochester (N.Y.) сообщили об увеличении чувствительности свертываемости крови у кроликов, которые вдыхали углеродные фуллерены. Команда повреждала кровеносные сосуды уха животных лазером и затем измеряла время образования тромба.

Имитируя загрязнение воздуха в городе, исследователи давали кроликам воздух, содержащий  $70 \text{ мк/м}^3$  фуллеренов, в течение 3 часов. В этом режиме время свертывания составило меньше половины от времени испытания, проведенного двумя днями ранее, при котором животные дышали чистым воздухом. Эффект проявлялся вскоре после воздействия, сообщает Alison Elder.

Многие исследователи, допускающие потенциальную опасность наночастиц, указывали, что на производствах часто используются многочисленные токсины и опасные вещества. «Эти исследования очень важны, — сказал на заседании Anthony Seaton, почетный профессор University of Aberdeen (Шотландия). — Будет замечательно, если промышленность сохранит КДК низким».