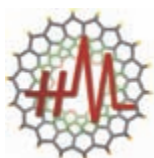


# НАНОТЕХНОЛОГИИ

АЗБУКА ДЛЯ ВСЕХ



**Нанометр**  
Нанотехнологическое  
Сообщество  
[www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)

## ОБ АВТОРАХ

**Концепция книги:**

акад. Ю.Д. Третьяков;

**Подбор терминов:**

акад. Ю.Д. Третьяков, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин.

**Главный редактор:**

акад. Ю.Д. Третьяков,

**Ведущие редакторы:**

А.А. Елисеев, Е.А. Гудилин, Е.А. Киселева, А.В. Лукашин, Е.А. Померанцева.

**Редакторы:**

Ю.Г. Метлин, Е.А. Еремина, Д.М. Иткис.

**Подготовка графического материала:**

А.А. Елисеев, Е.А. Киселева, И.В. Колесник, Е.А. Гудилин, Н.С. Овчинникова.

**Авторы статей:**

Н.С. Абрамчук, С.М. Авдошенко, А.Н. Баранов, А.Е. Баранчиков, О.В. Бойцова, И.А. Большаков, О.А. Брылев, А.С. Ванецев, А.В. Васильев, Р.Б. Васильев, А.Г. Вересов, А.С. Вячеславов, А.В. Гаршев, А.В. Григорьева, Е.А. Гудилин, С.Н. Дедюлин, С.Г. Дорофеев, А.В. Дунаев, А.А. Елисеев, Е.А. Еремина, Д.Д. Зайцев, К.О. Знаменков, Д.М. Иткис, П.Е. Казин, Е.А. Киселева, С.О. Климонский, А.В. Кнотько, М.Г. Козлова, И.В. Колесник, И.Е. Корсаков, А.В. Кузнецов, О.Н. Литвиненко, А.В. Лукашин, А.М. Макаревич, Ю.Г. Метлин, В.А. Мурашов, К.С. Напольский, Н.С. Овчинникова, Н.А. Пичугин, О.С. Полежаева, Е.А. Померанцева, В.А. Притужалов, В.И. Путляев, Н.А. Саполетова, Т.В. Сафронова, А.С. Синицкий, П.С. Соколов, Ю.Д. Третьяков, Л.А. Трусов, А.А. Фёдорова, Д.О. Чаркин, А.Е. Чеканова, М.В. Чернышева, Б.Р. Чурагулов, А.С. Шапорев.

Азбука – первая книга, которую держал в руках любой грамотный человек. Мы попытались доступно рассказать о научных, промышленных и социальных аспектах того, что называют сейчас нанотехнологиями и наноматериалами. Настоящая книжка рассчитана на любого читателя, включая школьников старших классов, людей, делающих политику или бизнес в нашей стране, студентов и аспирантов, инженеров и учителей, то есть на всех, кто хочет хотя бы для самого себя разобраться со ставшими модными сейчас терминами. России уже сегодня нужны специалисты, способные эффективно работать в этой области. Мы надеемся, что после ознакомления с «азбукой для всех» читатели будут объективно и без опаски смотреть на триумфальное шествие

© Обложка, компания Микромаш, 2007

© электронное издание, коллектив авторов, ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007

© оформление, А.А. Елисеев, ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007

**Главный редактор****Третьяков Юрий Дмитриевич**

Академик РАН, профессор.  
Декан факультета наук о материалах, заведующий кафедрой неорганической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: химия твердого тела, самоорганизация, функциональные материалы, нанотехнологии

**Ведущие редакторы****Елисеев Андрей Анатольевич**

Кандидат химических наук, ассистент факультета наук о материалах, научный сотрудник кафедры неорганической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: низкоразмерные наноструктуры, нанонити, нанокомпозиты, намагнетизм, самоорганизация и самосборка

**Гудилин Евгений Алексеевич**

Член-корреспондент РАН, зам. декана факультета наук о материалах, профессор кафедры неорганической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: сверхпроводники, графотекстурирование, самоорганизация

**Киселева Екатерина Анатольевна**

Кандидат химических наук, преподаватель факультета наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: углеродные нанотрубки, нанокомпозиты, квантовые нити

**Лукашин Алексей Викторович**

Кандидат химических наук, зам. декана факультета наук о материалах, старший научный сотрудник кафедры неорганической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: нанореакторы, слоистые соединения, функциональные нанокомпозиты

**Померанцева Екатерина Андреевна**

Кандидат химических наук, ассистент факультета наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные интересы: нанонити, вискеры





Авторы **"Азбуки"** – сотрудники, аспиранты и студенты Факультета наук о материалах и Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова:

Н. С. Абрамчук, С. М. Авдошенко, А. Н. Баранов, А. Е. Баранчиков, О. В. Бойцова, И. А. Большаков, О. А. Брылев, А. С. Ванецев, А. В. Васильев, Р. Б. Васильев, А. Г. Вересов, А. С. Вячеславов, А. В. Гаршев, А. В. Григорьева, Е. А. Гудилин, С. Н. Дедюлин, С. Г. Дорофеев, А. В. Дунаев, А. А. Елисеев, Е. А. Еремина, Д. Д. Зайцев, К. О. Знаменков, Д. М. Иткис, П. Е. Казин, Е. А. Киселева, С. О. Климонский, А. В. Кнотько, М. Г. Козлова, И. В. Колесник, И. Е. Корсаков, А. В. Кузнецов, О. Н. Литвиненко, А. В. Лукашин, А. М. Макаревич, Ю. Г. Метлин, В. А. Мурашов, К. С. Напольский, Н. С. Овчинникова, Н. А. Пичугин, О. С. Полежаева, Е. А. Померанцева, В. А. Притужалов, В. И. Путляев, Н. А. Саполетова, Т. В. Сафронова, А. С. Синицкий, П. С. Соколов, Ю. Д. Третьяков, Л. А. Трусов, А. А. Фёдорова, Д. О. Чаркин, А. Е. Чеканова, М. В. Чернышева, Б. Р. Чурагулов, А. С. Шапорев.





*Уважаемый читатель!*

*«Мы, возможно, стоим на старте великой нанотехнологической гонки, результаты которой способны изменить мир. От нас с Вами зависит место, которое наша страна займет в этой гонке. Мы не можем и не должны упустить свой шанс в исследовании и применении нанотехнологий. Вместе с вами мы сможем освоить и дать им применение в обыденной жизни, чтобы изменить ее к лучшему...»*

С уважением,  
Генеральный директор ГК «Роснанотех»  
Леонид Меламед



**ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
РОССИЙСКАЯ КОРПОРАЦИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Место нахождения и почтовый адрес:  
117219, Москва, ул. Кржижановского, д. 14, корп. 3.  
Тел. (справочная): +7 (495) 642 73 35  
Адрес электронной почты: [info@rusnano.com](mailto:info@rusnano.com)  
<http://www.rusnanotekh.ru/>

## ОБРАЩЕНИЕ РЕКТОРА МГУ им. М.В. Ломоносова

*Уважаемый читатель!*

Развитие нанотехнологий в России, как и во всем мире, приобретает все большее значение. Возникновение нанотехнологий означает качественно новый скачок в философии получения практически важных веществ и устройств, невидимых простым глазом и различимых лишь с использованием современных электронных микроскопов. Во всем мире происходит своеобразная нанотехнологическая революция. Сейчас уже все – от школьника и студента до академика и Президента РФ – осознают то стратегическое, предопределяющее значение, которое имеет это приоритетное направление науки и техники, открывающее воистину новые, фантастические перспективы. Можно с уверенностью сказать, что XXI век будет веком наноматериалов и нанотехнологий. Нанотехнологии – это прорыв в Будущее!

В то же время не надо забывать, что создание нанотехнологий – это борьба, это труд, это сложно и наукоемко. Московский университет на протяжении ряда лет успешно развивает исследования в области наноматериалов. Нам удастся не только создавать оригинальные курсы лекций в лучших традициях классического университетского образования, но и проводить фундаментальные и прикладные исследования с использованием самого современного научного оборудования. В этой многоплановой междисциплинарной области невозможно предложить блестящие идеи, основываясь на старых знаниях и старом менталитете научного исследования. В области нанотехнологий невозможно победить, стать успешным и конкурентоспособным лишь на одном желании и удаче. Создать новые наноматериалы



Ректор МГУ, академик В.А. Садовничий



и устройства невозможно с использованием только отработанных годами традиционных подходов. Именно университетский дух является тем катализатором, который помогает реализовать уникальные экспериментальные находки, поскольку для нанотехнологий, как нигде и никогда, жизненно необходимо уникальное сочетание фундаментальных знаний, современных навыков научной работы, молодой энергии, умения нетривиально мыслить и нетривиально действовать.

Московский университет уже второй год проводит подготовку принципиально новых, инновационных образовательных программ, которые призваны дать толчок к профессиональной подготовке новой генерации исследователей, всесторонне подготовленных к развитию нанотехнологий в нашей стране и коммерциализации полученных научных и прикладных разработок. Это еще одна, может быть, самая важная, самая острая, самая востребованная сейчас и в ближайшем будущем область деятельности МГУ и других ВУЗов, развитие которой оправдывает любые вложенные в нее усилия и средства. Нет также никаких сомнений, что для развития нанотехнологий важнейшим критерием является научный и творческий потенциал исследователей. В МГУ усилия ученых из совершенно разных областей знаний объединены благодаря недавно созданному координационному совету по нано- и биотехнологиям. Авторы этой книжки – сотрудники и аспиранты факультета наук о материалах и химического факультета МГУ, активно участвующие в реализации университетской программы нанотехнологических исследований и имеющие большой опыт в получении новых наноматериалов. Уникальное издание «Нанотехнологии. Азбука для всех» является одной из интереснейших попыток распространить современные профессиональные знания на широкую аудиторию. Я желаю всем читателям найти себя в той увлекательнейшей и, может быть, самой перспективной области современной науки и техники, которой посвящена эта книга!

Ректор МГУ, академик  
*В.А. Садовничий*





## Предисловие

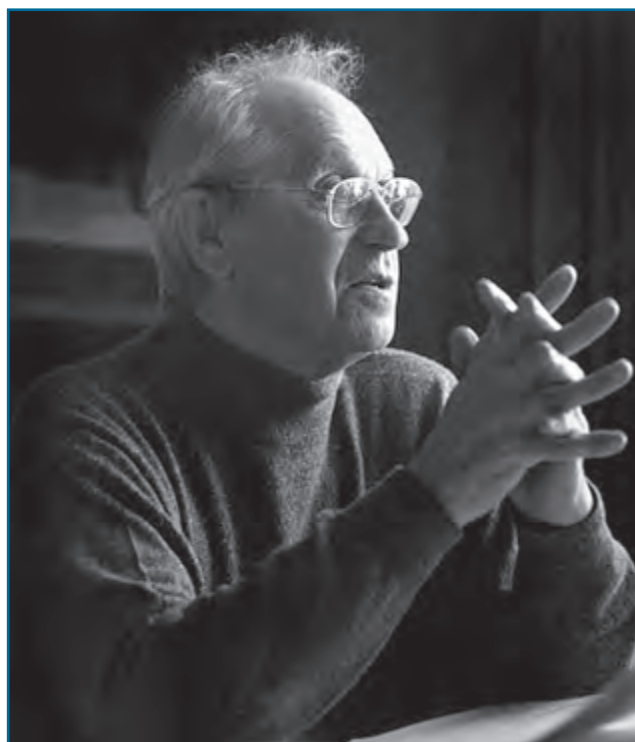
### ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Приставка «нано», означающая одну миллиардную часть целого, а вместе с ней и термины «нанометр», «наночастицы», «наноструктуры», «наноматериалы» и «нанотехнологии» распространились в научной литературе сравнительно недавно. Тем не менее, многие из давно используемых человечеством материалов являются именно нанообъектами.

Одним из самых древних примеров таких систем могут служить цветные стекла, окрашенные наночастицами металлов, технология получения которых была известна еще в Древнем Египте. Эта технология дожила до наших дней, войдя в основу окраски кремлевских звезд. Мало кто знает, что рубиновое стекло в буквальном смысле является золотым, поскольку представляет собой наночастицы золота, «растворенные» в высококачественном стекле. Широкую гамму цветов – от фиолетового до желтого – можно наблюдать и в «Кассиевом пурпуре», представляющем собой наночастицы золота, распределенные равномерно в геле оловянной кислоты, и названном так по имени гамбургского стекловара Андреаса Кассия (XVII век).

В уникальном музее художественной керамики, размещенном в небольшом итальянском городе Фаенца, посетители могут любоваться экспонатами, украшенными цветной глазурью, технология изготовления которой была разработана гончарами Умбрии еще в XV веке и использовала отражающую способность ультрадисперсных металлических частиц для придания керамике необычного блеска. Как тут не вспомнить поэтические строки О. Хайяма:

«Я к гончару наведалься вчера,  
Его искусство – давняя игра»...



Главный редактор, декан факультета наук о материалах МГУ, академик, Ю.Д. Третьяков





Во многих широко известных процессах (например, в фотографии и в катализе) традиционно реализуются нанодисперсные состояния веществ, хотя в некоторых случаях их роль до сих пор остается неясной. При любых обстоятельствах, прежде всего, было бы целесообразно определиться с содержанием понятия «нанотехнологии», впервые появившегося в литературе в 1974 г. с легкой руки Н. Танигучи (Япония).


В самом общем смысле **нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм.**

Согласно рекомендации 7-ой Международной конференции по нанотехнологиям (Висбаден, 2004 г.) выделяют следующие типы наноматериалов: нанопористые структуры; наночастицы; нанотрубки и нановолокна; нанодисперсии (коллоиды); наноструктурированные поверхности и пленки; нанокристаллы и нанокластеры. Последние представляют собой частицы упорядоченного строения размером от 1 до 5 нм, содержащие до 1000 атомов. Собственно наночастицы диаметром от 5 до 100 нм состоят из  $10^3$ – $10^8$  атомов. Нитевидные и пластинчатые частицы могут содержать гораздо больше атомов и иметь один или даже два линейных размера, превышающих пороговое значение, но их свойства остаются характерными для вещества в нанокристаллическом состоянии. Если наночастица имеет сложную форму и строение, то в качестве характеристического рассматривают не линейный размер частицы в целом, а размер ее структурного элемента. Такие частицы, как правило, называют наноструктурами, причем их линейные размеры могут значительно превышать 100 нм. В зависимости от того, какую преимущественную анизотропию имеют структурные элементы наноструктур, последние также подразделяют на нуль-, одно-, двух- и трехмерные.



Факторы, определяющие многообразие наноструктур





Следует отметить, что многие свойства материалов (в том числе магнитные, оптические, электрические) являются следствием коллективных взаимодействий в твердом теле и не сохраняются при переходе от объемного состояния к наноматериалу. В этом случае свойства веществ не могут быть объяснены только увеличением их удельной поверхности и ростом относительного числа поверхностных атомов без учета квантоворазмерных эффектов.

Примерами могут служить такие явления, как образование квантовых точек, изменение ширины запрещенной зоны за счет локализации экситонов, переход ферромагнитных материалов в суперпарамагнитное состояние. Однако иногда размерный эффект проявляется даже в таких свойствах веществ, как их каталитическая активность или реакционная способность: с уменьшением размера частиц может наблюдаться как резкое увеличение, так и уменьшение активности, отнесенной к одному атому металла. Как правило, этот эффект особенно ярко выражен у кластеров.

Важнейшей стадией нанотехнологий является химический синтез нанопродуктов. В связи с этим уместно напомнить, что Нобелевский лауреат Р. Хоффман (физик по образованию, проработавший некоторое время в Московском университете) в ответ на вопрос, что такое нанотехнология, остроумно заметил, что рад тому, что для химии люди нашли новое название. Теперь у них появился стимул изучать то, что они не желали изучать в школе.

В этом смысле химики занимаются нанотехнологиями уже на протяжении двух с половиной столетий. Современная нанотехнология отличается тем, что она соединяет талант химика-синтетика и физика-теоретика с мастерством инженера, и именно этот союз позволяет создавать самые замысловатые наноструктуры. Не менее важным с точки зрения перспективы является и то обстоятельство, что переход от традиционных макро- и микротехнологий к нанотехнологиям означает создание нанопродуктов и наносистем, обеспечивающих существенную экономию сырья и энергии и открывающих путь к более эффективному решению экологических проблем.

Академик  
Ю.Д. Третьяков



## ВВЕДЕНИЕ

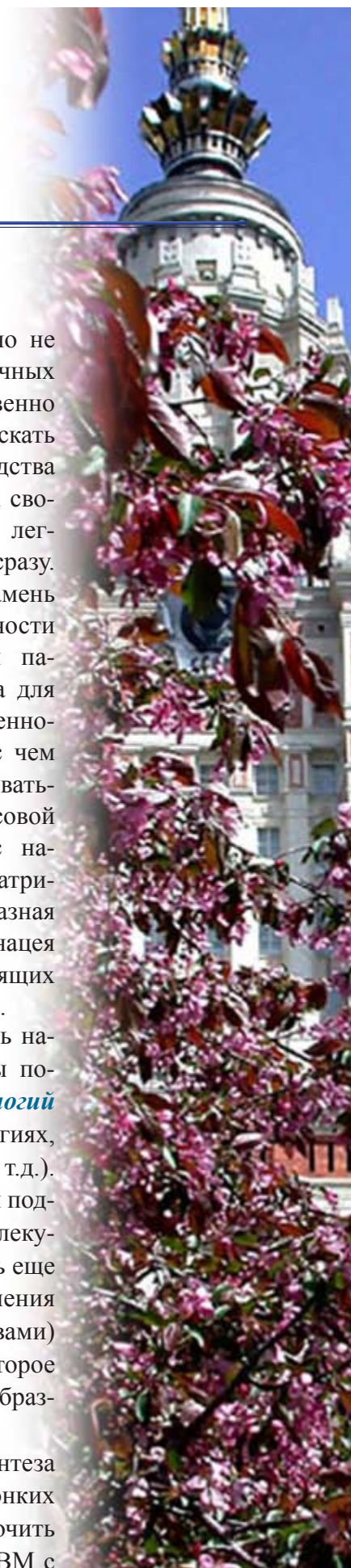


«Мыслитель» Родена

Человеку, особенно не испытанному в научных изысканиях, свойственно верить в чудеса и искать универсальные средства для достижения всех своих желаний, чтобы легко получить все и сразу. Как философский камень для алхимиков древности или как волшебная палочка Гарри Поттера для мечтателей современности. Судя по тому, с чем приходится сталкиваться в средствах массовой информации, сейчас нанотехнологии рассматриваются как своеобразная чудодейственная панацея от всех проблем, стоящих перед Человечеством.

Оправдан ли этот эйфорический оптимизм и как можно воплотить нанотехнологические мечты в реальность? Исследовательские работы последних 10–15 лет действительно открыли важную роль **нанотехнологий** в различных областях науки и техники (информационных технологиях, медицине, физике, химии, материаловедении, биологии, экологии и т.д.). Произошла своеобразная революция, поскольку нанотехнологический подход означает целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном и надмолекулярном уровне, что невозможно было реализовать еще несколько лет назад. Лучшим символом идеи универсального получения **наноматериалов** (и вообще материалов с контролируемыми свойствами) можно считать **демона Максвелла** – гипотетического существа, которое способно сортировать молекулы или атомы и собирать из таких своеобразных кирпичиков любой материал с любыми свойствами.

Увы, дойти до такой фантастической детализации процесса синтеза крайне трудно, если вообще возможно. Сегодня с помощью очень тонких игл (например, зондов атомно-силовых микроскопов) можно упорядочить нужные атомы поштучно (как это впервые сделали ученые фирмы IBM с





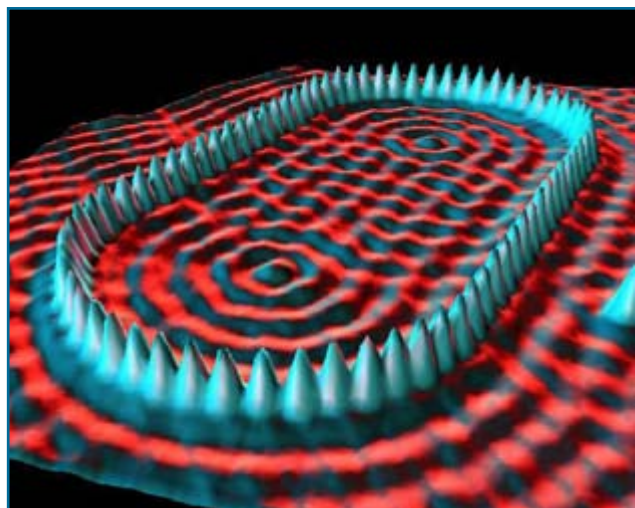


атомами кислорода). Но... в количестве всего лишь нескольких штук. Чтобы собрать таким образом сколько-либо полезную и реально работающую систему, потребовалось бы чрезвычайно много времени и энергии (работы), причем в условиях космически низких температур, иначе атомы самопроизвольно «разбредутся» во все стороны. Это одно из проявлений второго закона термодинамики, который

уж точно носит универсальный характер и в своей простейшей формулировке гласит: «чудес не бывает» – невозможна самопроизвольная передача тепла от холодного тела к горячему, как невозможно и самопроизвольное закипание воды в чайнике, не подключенном к электросети. Сейчас очень много говорят о **нанороботах** – подобных **демону Максвелла** искусственных машинах небольшого размера, которые, как предполагают, могут делать все. Однако как сделать сами **нанороботы** настолько умными, чтобы они могли выполнять требуемые от них действия?

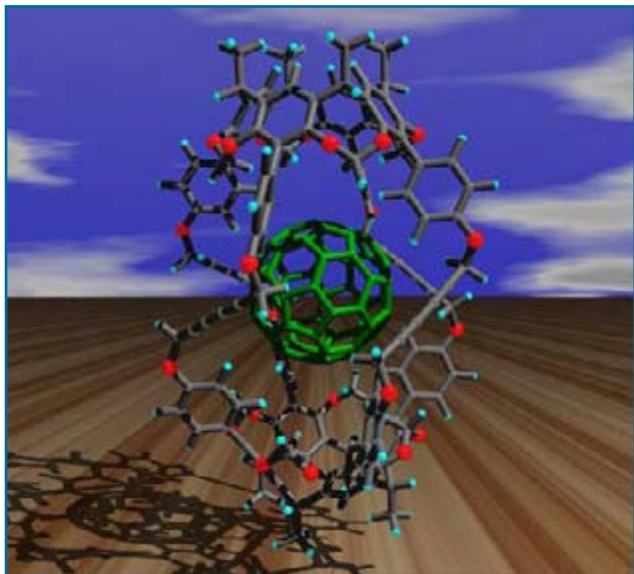
И тут мы приходим к основному вопросу – сроках осуществления нанотехнологических идей и путях создания эффективных (в том числе – экономически) нанотехнологий для массового потребления. Ответ есть. Например, при использовании принципов самоорганизации наноматериалы можно создавать «снизу вверх», то есть переходя от молекул к надмолекулярным структурам, в отличие от практиковавшегося до последнего времени подхода по созданию наноматериалов «сверху вниз», когда мелкие объекты формируют из крупных путем диспергирования. Управляя размерами и формой наноструктур, можно в определенных рамках придавать таким материалам совершенно новые свойства, резко отличающиеся от имеющих у обычных материалов-прародителей, то есть добиться желаемой цели. Однако для этого нужно детально исследовать всю систему, а система должна быть сложной и открытой, то есть способной обмениваться с окружающей средой как веществом, так и энергией, иначе упорядочения с образованием заданной наноструктуры не произойдет.

Подходы самоорганизации (коллективного взаимодействия атомов с образованием упорядоченной структуры) сокращают наши усилия, однако такие процессы реализуются только при полном соблюдении всех законов нелинейной термодинамики, то есть при наличии большого числа ограничений. На этом примере становится понятно, что на самом деле основным условием развития нанотехнологий должен быть выверенный, профессиональный научный подход, требующий больших усилий, знаний и финансовых вложений в дорогостоящие фундаментальные исследования. Поэтому нанотехнологии не могут возникнуть из ничего и мгновенно решить все



Структура («квантовая изгородь»), полученная с помощью сканирующей зондовой микроскопии





Компьютерная модель комплекса фуллерена

нет ничего необычного. «Обычная» промышленность работает с тоннами и кубометрами, к этому тоже все привыкли. Наноматериалы – продукт нанотехнологий – это нечто особое, что гораздо сложнее атомов и молекул, но как продукт высоких их технологий не требует многотоннажного производства, поскольку даже один грамм такого хайтековского вещества способен решить множество проблем. Это пример современной «гомеопатии», которая поставлена на вполне научную основу и глубоко продумана. Наноматериалы – не один универсальный материал, это обширный класс множества различных материалов, объединяющий их различные семейства с практически интересными свойствами. Заблуждением является и то, что наноматериалы – это просто очень мелкие, «нано»частицы. На самом деле многие наноматериалы являются не отдельными частицами, они могут представлять собой сложные макроили микрообъекты, которые наноструктурированы на поверхности или в объеме. Такие наноструктуры можно рассматривать в качестве особого состояния вещества, так как свойства материалов, образованных с участием наноструктурных элементов, не идентичны свойствам объемного вещества.

Итак, наноматериалы характеризуются несколькими основными чертами, ставящими их вне конкуренции по сравнению с другими материалами, находящими практическое использование в деятельности человека. *Во-первых*, все наноматериалы действительно состоят из очень мелких составных частей, которые нельзя увидеть невооруженным глазом. Это первый плюс – суперминиатюризация, приводящая к тому, что на единице площади можно разместить больше функциональных устройств, что жизненно важно, скажем, для нанoeлектроники или для достижения сверхплотной магнитной записи информации, вплоть до 10 Терабит на 1 квадратный сантиметр. Кроме того, ничтожный размер наноустройств позволяет им проникать в любые труднодоступные участки человеческого тела или макромашин, которых невозможно достичь любыми другими способами без внутреннего вмешательства.

*Во-вторых*, наноматериалы обладают большой удельной площадью поверхности, ускоряющей взаимодействие между ними и средой, в которую

наши проблемы: их развитие займет длительное время даже в условиях жесточайшей нанотехнологической гонки, стартовавшей во всем мире. Если не учитывать налет ажиотажа, появление наноматериалов закономерно и не подрывает никаких известных нам основ мироздания, просто пришло их время.

«Обычная» химия работает с молекулами и атомами, в этом уже давно







они помещены. Например, каталитически активные материалы позволяют в десятки, сотни, тысячи и даже миллионы раз ускорить химические или биохимические реакции. В качестве примера можно привести разложение воды на водород и кислород в присутствии наночастиц диоксида титана, который традиционно известен как компонент титановых белил. Наночастицы позволяют отсечь бактерии, эффективно поглотить примеси или токсины. Наночастицы также могут переносить на себе лекарства, программируемо доставляя их к заранее выбранной цели, например, к раковой опухоли.

*В-третьих*, наноматериалы уникальны тем, что в них вещество находится в особом, «наноразмерном», состоянии. Изменения основных характеристик обусловлены не только малостью размеров, но и проявлением квантовомеханических эффектов при доминирующей роли поверхностей раздела. Эти эффекты имеют место при таком критическом размере, который соизмерим с так называемым корреляционным радиусом того или иного физического явления (например, с длиной свободного пробега электронов, фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы и т.д.). Характерной особенностью наночастиц является также отсутствие структурных дефектов. Это делает, в частности, полупроводниковые наночастицы идеальными элементами совершенных энергосберегающих лазерных и светоизлучающих элементов. А индивидуальные **углеродные нанотрубки** обладают прочностью, в десятки раз превышающей прочность лучшей стали. При этом они во много раз выигрывают у стали и по своей удельной массе. Все эти признаки вполне объясняют тот факт, что даже грамм наноматериала может быть более эффективен, чем тонна обычного вещества, и что их производство – вопрос не количества, не тонн или километров, а качества человеческой мысли, «ноу-хау» (от англ. «*know how*» – «знаю как»).

Возникновение нанотехнологий и начало эры исследования наноматериалов глубоко закономерно. Человек расширяет сферу знаний и интересов во всех направлениях, и как Юрий Гагарин стал первым покорителем макрокосмоса, так и изобретатель первого микроскопа Левенгук оказался



Футуристический образ нанобиотехнологий





Ю.А. Гагарин

ше бактерий, которые наблюдал Левенгук. Они во столько же раз меньше нас с вами, во сколько раз человеческое тело меньше планеты Земля. Поэтому сейчас бороздить просторы микромира могут лишь те, кто обладает наисовременнейшими электронными и атомносиловыми микроскопами, которые, в отличие от оптических микроскопов, стоят сотни тысяч и даже миллионы долларов. Но и этого мало. Таким оборудованием нужно уметь профессионально пользоваться. Между тем, добиться стадии визуализации необходимо, но совершенно недостаточно для принадлежности к касте исследователей наномира.

**Нанотехнологии** – чрезвычайно сложная, профессиональная, междисциплинарная область, объединяющая усилия дипломированных химиков, физиков, материаловедов, математиков, медиков, специалистов в области вычислительной техники и др. Талантливые дилетанты и романтики, к сожалению, часто не обладают необходимой подготовкой или необходимыми возможностями, а также не всегда могут распознать, что они изобретают (в который раз!) велосипед, не зная текущего положения дел в том ворохе разноплановой научной информации, которая появляется ежечасно. В области наноматериалов удивительным образом переплетены как глубоко фундаментальные научные основы, так и прорывные (как любят говорить наши официальные лица) аспекты практического использования человеческих знаний. Только полностью контролируемая исследователем цепочка – от новой (или, на современном политико-экономическом языке, инновационной) идеи до синтеза, анализа и установления практически важных свойств – может помочь войти в элитный клуб исследователей наномира.

**Нанотехнологии** – детище современной фундаментальной науки. Последние достижения свидетельствуют о возможности создания новых поколений функциональных материалов, а проекты возможного использования нанотехнологий затрагивают практически все области человеческой деятельности. В то же время постепенно происходит переосмысление научных фантазий, которые приобретают черты реалистичности. Нанотехнологии – капиталовложение человечества на долгие годы, но только если ими разумно распорядиться и позволить ученым, а не только политикам или менеджерам, использовать наногаммы высокотехнологичной продукции для будущих мегаоткрытий.

первопроходцем микромира. Однако даже самые современные оптические микроскопы принципиально не приемлемы для визуализации нанообъектов в силу своего малого разрешения и увеличения, которое должно составлять не тысячу крат (а это практически предел оптических микроскопов), а сотни тысяч и миллионы. Типичные нанообъекты в сотни и тысячи раз мень-





Что можно сказать об истоках нанотехнологии и о фундаментальном вкладе российских исследователей в развитие нанотехнологий? Отправной точкой можно считать найденные Г.А. Гамовым еще в 30-х годах прошлого века решения уравнения Шредингера, которые показали возможность преодоления частицей энергетического барьера даже в том случае, когда энергия частицы меньше высоты барьера. Это явление, называемое туннелированием, позволило объяснить многие экспериментально наблюдавшиеся процессы. Развитие электроники подошло к использованию процессов туннелирования лишь тремя десятилетиями позже, когда появились туннельные диоды, открытые японским ученым Л. Есаки, удостоенным позднее Нобелевской премии. В настоящее время процессы туннелирования положены в основу технологий, позволяющих оперировать со сверхмалыми размерами порядка нанометров. Другим эпохальным событием нанотехнологической революции обычно считают легендарную лекцию Нобелевского лауреата Р. Фейнмана «Там внизу еще много места» («There's Plenty of Room at the Bottom»), в которой он предложил манипулировать отдельными атомами для создания очень малых объектов с необычными свойствами. Эта идея была реализована в дальнейшем благодаря созданию сканирующего туннельного микроскопа (Г. Биннинг, Г. Рорер, 1981 г.) и атомно-силового микроскопа (Цюрихское отделение корпорации IBM, 1986 г.).

Многие фундаментальные исследования, без которых было бы невозможно развитие современных нанотехнологий, проводились на протяжении десятилетий научными школами академиков В.А. Каргина, П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина и особенно Нобелевского лауреата Ж.И. Алферова. Было бы несправедливо замалчивать пионерские работы В.Б. Алесковского по развитию методов «химической сборки», то есть послойного синтеза (atomic layer deposition), заложившие начало его научной школе в Санкт-Петербурге, успешно функционирующей и сейчас.

Несомненно, чрезвычайно важным для своего времени достижением является создание и внедрение в атомную энергетику оригинальных технологий получения ультрадисперсных (нано-) порошков, выполненное группой советских ученых под руководством И. Д. Морохова. Примерно к тому же времени относятся фундаментальные исследования научной школы академика И.В. Тананаева (1977 г.), впервые предложившего



Лауреат Нобелевской премии,  
академик Ж.И. Алферов



дополнить классические диаграммы «состав–структура– свойство» координатой дисперсности (1987 г.), а также оригинальные исследования академика И.И. Моисеева и М.Н. Варгафтика по созданию гигантских кластеров палладия, ядро которых насчитывает 561 атом металла.

Систематическое изучение частиц малых размеров началось с развития коллоидной химии. В этой связи следует упомянуть знаменитую книгу Вольфганга Оствальда «Мир обойденных величин», написанную им в окопах Первой мировой войны. Именно коллоидные системы (золи, **коллоидные растворы**, прямые и обращенные **мицеллы**, **жидкие кристаллы**, адсорбционные слои, **пленки Лэнгмюра–Блоджетт**, мини- и микроэмульсии) можно назвать прямыми предшественниками наносистем. Формирование коллоидных систем обычно происходит в результате нековалентных (лиофильных/лиофобных, Ван-дер-Ваальсовых, электростатических) взаимодействий молекул между собой, причем характеристический размер элементов коллоидных систем находится в интервале от 1 до 1000 нм. Например, золи содержат частицы размером 1–100 нм, равномерно распределенные в какой-либо среде (вода, масло, воздух или другой газ). Наиболее часто встречаются коллоидные системы, формируемые в результате гидрофильных/гидрофобных взаимодействий. В этом случае молекулы, формирующие нанообъект, должны являться **амфифильными**, то есть иметь неполярный или гидрофобный «хвост» и полярную «головку», обладающую гидрофильными свойствами. В воде гидрофобные части таких молекул стремятся объединиться, формируя неполярный «островок» в полярном растворителе. Самыми яркими ам-

фифильными свойствами обладают молекулы и ионы **«поверхностно-активных веществ» (ПАВ)**. Примером ПАВ может служить додецилсульфат натрия  $C_{12}H_{25}SO_4Na^+$  – один из наиболее распространенных компонентов моющих средств. Именно на этом принципе построены природные нанореакторы и **наноконтейнеры**: нековалентно связанные молекулярные системы ограничивают реакционную зону, а встраиваемые в стенки реактора органические мембраны служат для регулировки потока веществ. Так происходит биоминерализация, транспорт и хранение биологически активных компонентов в живых ор-



Учебник по коллоидной химии В. Оствальда





ганизмах. Однако биологические нанореакторы и процессы, происходящие в них, оказываются слишком сложными для непосредственной репликации в технологии.

Синтез наноструктур в пространственно-ограниченных коллоидных «реакторах» является наиболее распространенным способом получения наноразмерных частиц. По целому ряду известных всем причин активность российских ученых в области нанотехнологий и наноматериалов, равно

как и в других научных направлениях, значительно сократилась в последнее десятилетие прошлого века. Парадокс заключается в том, что именно в этот период за рубежом, в первую очередь в США и в Японии, были сделаны важные открытия, включая создание объемных **фотонных кристаллов** с запрещенной оптической зоной (Яблонович и соавт., 1991 г.), синтез **углеродных нанотрубок** (Ижима и соавт., 1991 г.), а в дальнейшем и **нанотрубок нитрида бора** (Чопра и соавт., 1995 г.),  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$  (Тенне и соавт., 1995 г.),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (Аджайян и соавт., 1995 г.),  $\text{TiO}_2$  (Хойер и соавт., 1996 г.). В этот же период были предприняты попытки создания молекулярных переключателей и измерения электропроводности отдельных молекул, продемонстрирован полевой **транзистор** на углеродной нанотрубке, продолжены исследования по **самосборке молекул** на металлической поверхности.

Почти одновременно группа экспертов Национального научного фонда (NSF) США сделала заключение о безусловной приоритетности исследований в области нанотехнологий и наноматериалов, а в 2000 г. в США была принята долгосрочная комплексная программа, названная «Национальной нанотехнологической инициативой». В соответствии с этой программой объем бюджетного финансирования нанотехнологических исследований в США уже в 2001 г. составил 460 млн долларов, в 2004 г. почти достиг 1 миллиарда долларов, а в дальнейшем вышел на стационарный уровень около 1,2 млрд долларов в год. В Японии и в странах Европейского Союза государственная поддержка нанотехнологических исследований немногим уступала США. Вместе с тем значительно возросла активность частного капитала. В 2002 г. во всем мире число венчурных компаний, занимавшихся производством нанопроductов, достигло 320, причем среди них преобладали компании, специализировавшиеся на производстве нанопорошков, нанотрубок, нанопористых материалов, фуллеренов, квантовых точек, нановолокон, нанокапсул, нанопроволок и дендримеров.



Углеродные нанотрубки,  
полученные в 1952 г. в  
ИФХЭ РАН





Производство ультрадисперсных порошков оказалось довольно масштабным и было связано с изготовлением катализаторов дожигания выхлопных газов автомобилей (11,5 тыс. тонн), абразивов (9,4 тыс. тонн), материалов для магнитной записи (3,1 тыс. тонн) и солнцезащитных материалов (1,5 тыс. тонн). Согласно прогнозам, рынок нанопорошков, оцениваемый сейчас в 1 млрд долларов, должен к 2010 г. возрасти до 11 млрд долларов, тогда как мировой рынок нанотехнологий в целом к этому времени предположительно должен превысить 1 триллион долларов США. Акт об исследованиях и развитии нанотехнологий в XXI веке, подписанный президентом США Дж. Бушем в 2003 г., предполагает фронтальное решение проблем нанотехнологии как в фундаментальном, так и в прикладном направлениях с выделением свыше тысячи направлений поиска, объединенных вокруг **нанозлектроники, нанобиотехнологии, молекулярной электроники, нанозлектромеханики, нанознергетики**, оптоэлектроники, создания новых поколений функциональных и конструкционных **наноматериалов**, наноматериалов для медицины, машиностроения и робототехники, компьютерных технологий, экологии, авиации, систем безопасности и борьбы с терроризмом.

Среди проблем, связанных с развитием **нанотехнологий**, реализуемая в США «Национальная нанотехнологическая инициатива» считает приоритетной анализ социальных и экономических последствий нанотехнологической революции. Речь идет о доступе к благам, которые возникают в результате развития наноиндустрии, ее позитивном влиянии на рынок труда и на прогресс медицины, а также о возможном негативном влиянии нанопроductов на здоровье человека и на окружающую среду. Позитивные аспекты развития нанотехнологии уже сейчас широко рекламируются в печати и на телевидении. Для 120 млн человек, ежегодно посещающих научные музеи США, в качестве пиар-акции предлагается экспозиция, посвященная развитию нанотехнологии. Передвижную выставку «Это – наномир» в 2004 г. увидели почти 800 тысяч посетителей, среди которых доминировали 8–13-летние дети. Разнообразные направления развития наномедицины включают биосенсорную нанодиагностику, наночастицы как средство доставки лекарств и новые формы лекарственных препаратов, создание нанороботов, **наноинструментов** и **наноманипуляторов** для медицинских целей и многое другое.

Не меньшее внимание в США и в странах Европейского Союза уделяется изучению **потенциального ущерба, который наноматериалы могут нанести здоровью человека и окружающей среде**. Речь идет, прежде всего, о респираторных и легочных заболеваниях, включая рак легких. Любопытно, что в Белой книге, содержащей информацию об основных организациях, занимающихся нанотехнологиями в России и подготовленной под редакцией академика В.Я. Шевченко по результатам всероссийского опроса ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий, среди многочисленных направлений наноисследований, проводимых в России, отсутствует даже упоминание о возможных рисках и негативных социальных последствиях развития нанотехнологий и применения наноматериалов.

Созданная в США инфраструктура включает ведущие университеты, национальные лаборатории и производственные структуры, функционирующие в составе венчурных компаний. Число продуктов, произведенных в







США с помощью нанотехнологий, уже сейчас превысило 3 тысячи, а более половины патентодержателей в области нанотехнологий в мире составляют американские компании, университеты или частные лица. Даже Японии оказалось довольно трудно конкурировать с США, и ей пришлось ограничить активность в области нанотехнологий более узким кругом решаемых задач. По числу нанотехнологических публикаций в международных журналах лидируют 6 стран, три из которых, представляющие Запад (США, Германия, Франция), несколько опережают Восток (Япония, Южная Корея, Китай), причем на второе место уже в 2004 г., безусловно, вышел Китай, увеличивший за десятилетие число нанотехнологических публикаций более чем в 20 раз, и лишь немногим (на 25%) уступивший США. Вместе с тем по числу полученных патентов Китай намного уступает другим странам, находясь пока лишь на 20 месте.

Ну а что же Россия? Научному сообществу нашей страны сильно не повезло. Прежде всего потому, что оно после распада СССР и мучительных поисков путей элементарного физического выживания потеряло почти целое десятилетие для интенсивной творческой активности. Разумеется, это касалось не только развития нанотехнологий, но, прежде всего, именно их, поскольку визуализация и контролируемое создание **нанопродуктов** требовало крайне дорогостоящего оборудования, которым наши исследователи, в большинстве своем, не располагали, а многие не располагают и сейчас. Исключение составляли лишь те, кто сотрудничал с зарубежными коллегами, имевшими такое оборудование.

В этой связи заслуживает одобрения инициатива РФФИ (Российского фонда фундаментальных исследований, <http://www.rfbr.ru>) по поддержке международных грантов, позволяющих эффективно использовать уникальное диагностическое оборудование научных центров Германии, Франции, Италии, Бельгии, Голландии, Японии, а в последнее время и США. Даже в трудные 90-е годы фундаментальные исследования, вносившие несомненный вклад в развитие нанотехнологий, не прекращались в России. Достаточно назвать научные группы, которые возглавляли М.В. Алфимов, Р.А. Андриевский, В.В. Болдырев, А.Л. Бучаченко, Р.З. Валиев, С.П. Губин, Б.В. Дерягин, А.Л. Ивановский, Ю.А. Котов, И.В. Мелихов, И.И. Минкин, А.Д. Помогайло, А.И. Русанов, И.П. Суздаев, Ю.В. Цветков, А.Ю. Цивадзе и многие другие. В 1996 г. по инициативе М.А. Ананяна был организован институт нанотехнологий, а в 2001 г. – концерн «Наноиндустрия».

Справедливости ради надо сказать, что после 2000 г. отечественные исследования в области **нанотехнологий** и **наноматериалов** заметно оживились. В 2002 г. был создан Научный Совет по наноматериалам при Президиуме РАН, а в программе фундаментальных исследований РАН выделено (правда, довольно ограниченное) финансирование работ по разделу «Фундаментальные проблемы физико-химии наноматериалов». Примерно в это же время началось финансирование инициативных проектов РФФИ по нанотехнологиям и наноматериалам, а также по отраслевым программам Минобороны, Минатома (Росатома), Роскосмоса, Минпромэнерго, что по приближенным оценкам в сумме составляло 20–25 млн долларов в год и в 30–40 раз уступало размерам государственной поддержки нанотехнологий в США. Тем не менее, некоторые академические, вузовские и отраслевые





Просвечивающий электронный микроскоп Titan

развития науки и техники на 2002–2006 годы» были внесены существенные изменения, а в перечне приоритетов появилось направление «Индустрия наносистем и материалы», на поддержку которого было предусмотрено выделить из средств федерального бюджета в 2005 г. 2 млрд рублей (около 70 млн долларов), а в 2006 г. – 2,12 млрд рублей (около 80 млн долларов, с учетом изменения курса доллара). Однако, поскольку направление «Индустрия наносистем и материалы» объединяет две составляющие, из которых вторая включает многотоннажные продукты, такие, как полимеры и эластомеры, композиты и керамику, кристаллические материалы на основе металлов и сплавов, а в определенной мере также мембраны и каталитические системы, указанное выше финансирование лишь частично относится к нанотехнологиям. В июле 2006 г. правительство Российской Федерации утвердило концепцию **ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы»**, установив объем финансирования за счет федерального бюджета в размере 134 млрд рублей (примерно 5 млрд долларов). Очевидно, что в рамках этой суммы значительно возрастает и господдержка приоритетного направления «Индустрия наносистем и материалы».

Разумеется, мы не стоим на месте. В конце мая 2006 г. РАН впервые пополнила свои ряды новыми членами, избранными по специальности «наноматериалы и нанотехнологии» в результате серьезного конкурсного отбора с ограничением возраста. В конце июня 2006 г. принято решение об учреждении Российской ассоциации наноиндустрии. Распоряжением Правительства РФ от 25 августа 2006 г. утверждена программа координации работ

лаборатории были быстро переориентированы на исследования в области нанотехнологий и наноматериалов, хотя большинство из них по-прежнему не располагало и до сих пор не располагает необходимым современным оборудованием. Достаточно сказать, что современный **электронный микроскоп** высокого разрешения стоит свыше 5 млн долларов, а чистая комната достаточно высокого класса – и того больше.

Ситуация несколько улучшилась, когда в федеральную целевую научно-техническую программу (ФЦНТП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям раз-







в области нанотехнологий и наноматериалов в Российской Федерации. Но есть ли у нас основания испытывать чувство удовлетворения нынешними темпами и состоянием нанотехнологических разработок в России? Конечно, после 2000 г. отечественные исследования в области нанотехнологий заметно оживились, но все познается в сравнении. Напомним написанную известным ученым и некогда любимую детскую сказку «Алиса в стране чудес», персонажам которой, чтобы оставаться на месте, надо было быстро-быстро бежать, а чтобы продвигаться вперед – бежать еще быстрее. Боимся, что по причинам, изложенным выше, нам этого сделать пока не удалось. Достаточно сказать, что информационный вклад российских ученых в мировую нанотехнологическую науку за последние 5–6 лет заметно снизился и составляет сейчас всего 1,5% против 6% в 2000 г. Еще в большей степени это касается числа международных патентов, полученных россиянами, и, особенно, лицензионных выплат, которые в пересчете на 1 млн жителей оказались в 100 раз меньше, чем в США. О скромности российского нанотехнологического вклада свидетельствует и степень нашего участия в международных встречах-конференциях и конгрессах по нанотехнологии.

Напрашивается вопрос, насколько реально в России создание и эффективное выполнение *целевой федеральной программы* по нанотехнологиям и наноматериалам? Потребность в существовании такой программы была осознана научным сообществом давно, особенно после старта в США упомянутой выше «Национальной нанотехнологической инициативы». Но время шло, примеру США последовало около 50 стран, но среди них по-прежнему отсутствовала Россия. Многочисленные совещания и круглые столы, в том числе слушания в Госдуме и Совете Федерации, однозначно высказывались в пользу открытия национальной нанотехнологической программы, но, как сказал один уважаемый физик: «Чтобы дожидаться открытия нанотехнологической программы в России, надо быть бессмертным». Реализация такой программы была бы наиболее важным шагом, способным в достаточно короткий срок вооружить наше нанотехнологическое сообщество совершенно необходимым, но отсутствующим сейчас современным научным и технологическим оборудованием.

Извечный для российского менталитета, во всяком случае, со времен Н.Г. Чернышевского, сакраментальный вопрос «Что делать?» заставляет авторов предложить перечень первостепенных действий, которые надо совершить, чтобы заметно продвинуться вперед:

1. Осуществить отбор приоритетных направлений нанотехнологических разработок с учетом перспектив их дальнейшей коммерциализации, конкурентоспособности и востребованности, в первую очередь на внутреннем рынке.

2. В кратчайший срок оснастить отечественных исследователей новейшим (как правило, импортным) оборудованием, необходимым для синтеза и диагностики нанопродуктов, реализовав проект федеральной целевой программы «Развитие исследовательской и технологической инфраструктуры для nanoиндустрии Российской Федерации» и предусмотренное в этом проекте создание национальной нанотехнологической сети, включая национальную лабораторию, научно-исследовательские центры и центры коллективного пользования современным оборудованием.



3. Создать целостную образовательную систему подготовки нового поколения исследователей, материаловедов и технологов, обладающих междисциплинарными фундаментальными знаниями и владеющих новейшим синтетическим и диагностическим оборудованием, используемым в нанотехнологиях (по приближенным оценкам, в ближайшее десятилетие миру потребуется не менее 2–3 млн специалистов, а следовательно, по самым скромным масштабам, в России их должно быть не менее 30–40 тысяч).

4. Организовать независимую сертификационную службу для выработки стандартов, метрологии и сертификации, способную объективно оценивать качество нанопродуктов.

5. Создать и реализовать целостную систему подготовки всего российского общества к переменам, связанным с фронтальным развитием нанотехнологий и использованием нанопродуктов, включая соответствующие школьные курсы, музейные экспозиции, выпуск научно-популярной литературы, телевизионные передачи, фестивали науки и прочее.

6. Разработать систему мер, обеспечивающих развитие нанобизнеса, в том числе устранение таможенных сборов на импорт нанотехнологического оборудования и введение льгот для потребителей и производителей нанопродукции.

Именно такая программа была предложена свыше года назад, глава государства. – Однако нанотехнологии уже становятся ключевым направлением развития современной промышленности и науки... Оценки ученых говорят о том, что изделия с применением нанотехнологий войдут в жизнь каждого – без преувеличения – человека, позволят сэкономить невозобновляемые природные ресурсы...».

На развитие **наноиндустрии** президентом было предложено выделить 180 млрд руб. – сумма, сопоставимая с той, которая запланирована в бюджете на всю остальную науку. Управлять процессом и координировать расходование средств должна специально созданная **Российская корпорация нанотехнологий**, легитимизация которой потребовала принятия соответствующего федерального закона.

18 апреля 2007 г. во время визита В.В. Путина в Курчатовский институт, которому придается статус головной научной организации по развитию наноиндустрии в России, было прямо заявлено, что нанотехнологии могут стать «ключевым элементом в создании новейших современных и **сверхэффективных вооружений как наступательных, так и оборонительных**». В связи с этим многие СМИ обратили внимание на то, что военные нанотехнологии привлекли внимание к себе довольно давно и опубликованный недавно на русском языке перевод книги американского ученого Альтмана дает представление о масштабе проводимых в этом направлении исследований. Недаром еще в 1995 г. Д. Джеримайя – один из командующих вооруженными силами США – заявил: «Нанотехнологии способны радикально изменить баланс сил в большей степени, чем даже ядерное оружие».

Благодаря возможностям молекулярного конструирования становится возможным создание невидимых видов вооружений, которые будут более точными и «адресными», чем все запрещенные виды оружия массового поражения. Это – средства геноцида, которые создают, чтобы стереть противника с лица земли, а не добиться его капитуляции. Самое страшное, что но-





вейшее нанооружие может оказаться более доступным, чем традиционное, и ускользнет из-под контроля государства. Достаточно сказать, что летальная доза токсина ботулизма (100 нанограмм), будучи мультиплицированной на все человечество, весит всего 1 кг, а создание нанороботов размером в 100 мкм, зараженных таким токсином, обеспечивает реальную возможность быстро и точно уничтожить миллионы людей. Правда, согласно официальным данным, планируемые инвестиции в военные нанотехнологии в России, как и в других развитых странах, не превысят 10% от общего объема затрат.

На первом заседании Совета по нанотехнологиям, состоявшемся 21 июня 2007 г., вице-премьер правительства РФ Сергей Иванов сообщил, что на развитие наноиндустрии в России до 2015 г. планируется выделить около 200 млрд руб. что на 20 млрд руб. превышает сумму, указанную в президентском послании. Своеобразным сюрпризом может быть заявление о том, что большая часть финансирования – 130 млрд руб. войдет в транш этого года. Привлечение огромного финансирования порождает вопрос поиска оптимального пути для скорого и эффективного использования средств, выделяемых на развитие наноиндустрии в России. Однако не все так просто: например, приобретение абсолютно необходимого дорогостоящего оборудования невозможно осуществить в течение нескольких месяцев, а несравненно больше времени будет потрачено на подготовку специалистов высокого класса, владеющих высокоразрешающими электронными микроскопами, чистыми станциями и многим другим. В рамках Совета по нанотехнологиям было предложено создать по меньшей мере три рабочих группы, одна из которых должна рассматривать нормативную базу с целью повышения надежности, конкурентоспособности и безопасности наноиндустрии, вторая – осуществлять координацию научных исследователей, подготовку высокопрофессиональных нанотехнологов и создание новых рабочих мест, а третья – заниматься проблемами рынка и бизнеса.

В соответствии с президентской инициативой, эту работу должна выполнять **Российская государственная корпорация нанотехнологий** («Роснанотех»), наделенная функциями государственного органа и бизнес-



Солдат будущего, вооруженный нанотехнологическим оружием



структуры одновременно. И хотя создание корпорации Роснанотех обрело в начале июля 2007 г. силу федеративного закона, подписанного президентом РФ, после достаточно оживленных дискуссий как в Госдуме, так и вне ее, далеко не все представители научного и бизнес-сообщества однозначно оценивают этот шаг.

Некоторые западные эксперты считают, что сама идея госкорпорации не оптимальна для нанотехнологий, особенно в российских условиях. Основатель первой американской нанотехнологической компании ZyVex Джеймс Фон Эр считает, что: «Если много денег – надо запустить кучу маленьких проектов, направленных на решение важных, но предельно конкретных задач. А у вас пока нет индустриальной базы, бизнесменов и традиций венчурного инвестирования, чтобы создавать небольшие компании, которые потом будут расти, как Google.

Многие отечественные исследователи также убеждены, что принципиально новые нанопродукты могут появиться только благодаря активной деятельности небольших университетских или академических групп, часто представленных молодыми учеными. Такие группы получают гранты на собственные проекты, их анонимно, во избежание коррупции и протекционизма, передают экспертам. Часть гранта отчисляется в общий котел за пользование оборудованием, а потом те, кому удалось достичь успеха, могут основывать собственные высокотехнологические компании и, может быть, станут миллионерами.

Интересно отметить, что именно в малой научной группе рождались первые российские сканирующие зондовые микроскопы, которые на сегодняшний день получили международное признание и дали начало первой получившей признание российской нанотехнологической компании – ЗАО «НТ-МДТ» (<http://www.ntmdt.com>). Так же была подготовлена к изданию первая научно-популярная книга в области нанотехнологий «Нанотехнология для всех» М. Рыбалкиной. И хотя в этой книге специалист найдет немало проколов и промахов, она, несомненно, окажет и уже оказала положительное влияние на формирование общественного мнения о нанотехнологиях, особенно среди поколения молодых. Организованное молодыми же аналитическое агентство Nanotechnology News Network предлагает через открытые им сайты новейшую информацию по нанотехнологиям (<http://www.nanonewsnet.ru>). Другой нанотехнологический портал (<http://www.nanometer.ru>), созданный на факультете наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова (<http://www.fnm.msu.ru>), ежедневно представляет новые разработки, создан-







ные как зарубежными, так и российскими учеными, проводит интернет-олимпиады, реализует перспективные образовательные проекты.

Время идет, а мы по-прежнему рискуем потерять время на создание холдинга, на выстраивание в нем вертикали власти, на определение приоритетов финансирования и на сложные бюрократические процедуры согласования.

Нельзя исключить вероятность исполнения прогноза, сделанного профессором Э. Годиком в интервью электронной газете «Утро.ру». Он, в частности, сказал: «Все идет к тому, что получится «как всегда». Огромные государственные деньги привлекут огромный административный ресурс, который полностью парализует нацеленную на результат частную инициативу и исключит формирование необходимой конкурентной среды. Вместо экономического развития мы получим борьбу за административный ресурс. Какая уж тут открытая экономика... Наоборот, здесь все по максимуму закроют: административный ресурс не любит публичности».

Однако далеко не все выглядит столь пессимистично. Несмотря на серьезные различия в подходах к решению гигантских задач развития отечественной **нанотехнологии** и **нааноиндустрии**, представители научного, образовательного, бизнессообщества и властных структур все больше приходят к сознанию того, что они нуждаются друг в друге и не способны достигнуть успеха по одиночке вне национальной нанотехнологической сети, головным элементом которой уже определен Курчатовский институт.

Принятое совсем недавно Постановление правительства РФ предусматривает выделение из госбюджета 25 млрд рублей на реализацию ФЦП «развитие инфраструктуры нааноиндустрии в РФ на 2008–2010 гг.». И это в дополнение к той сумме, которую получит Российская корпорация нанотехнологий.

Отрадно также, что существенную часть финансирования предполагается выделять на образование и подготовку научных кадров новой формации в области наноматериалов и нанотехнологий. Без этого шага любое эпохальное начинание было бы обречено на неизбежный крах, поскольку только высококвалифицированные специалисты и защита национальной интеллектуальной собственности могут явиться реальной гарантией подъема нааноиндустрии до мирового уровня, в противном случае Россия станет (за собственные же деньги!) третьесортным рынком сбыта продуктов нанотехнологий развивающихся стран.

Мы и так потеряли целое десятилетие, и только чудо может спасти то, что кажется безвозвратно утерянным. Такие чудеса случались в прошлом и в России, и за рубежом. Всякий раз они были связаны с появлением нового поколения исследователей в результате национального образовательного прорыва.

Достаточно вспомнить о знаменитом атомном проекте, успешная реализация которого, казалось, поставила США вне конкуренции впереди остального мира. Однако потребовалось менее 10 лет, чтобы наша страна сумела успешно реализовать собственный атомный проект и стать могучей ядерной державой. Исключительно важный вклад в этот успех внесли выпускники МГУ и рожденного в его стенах по инициативе Нобелевского лауреата П.Л. Капицы и академика С.А. Христиановича знаменитого Московского физико-технического института, впервые наиболее удачно соединившего фундаментальную и инженерную подготовку специалистов. Другой пример образовательного прорыва связан с космическим проектом. 12 апреля 1961



г., когда Ю.А. Гагарин первым побывал в космосе, стало днем поражения США, затративших колоссальные средства на реализацию альтернативной программы «Апполон». И если 8 с небольшим лет спустя Нейл Армстронг первым ступил на поверхность Луны, то в этом огромную роль сыграло принятое в 1961 г. решение президента США Джона Кеннеди кардинально перестроить подготовку специалистов-материаловедов в крупнейших американских университетах. Успешная реализация нанотехнологического проекта невозможна ни в одной стране, если ей не удастся подготовить или привлечь со стороны специалистов, хорошо владеющих одновременно фундаментальными знаниями в области математики, физики, химии, механики, биологии.

Лишь **междисциплинарные** образовательные программы способны обеспечить нанотехнологический прорыв. Созданный в МГУ 16 лет назад факультет наук о материалах может служить своеобразной моделью междисциплинарного естественно-научного образования, обеспечившего многоуровневую подготовку материаловедов-исследователей, включая бакалавров, специалистов и магистров в направлении «Химия, физика и механика материалов», кандидатов и докторов наук по специальностям «Химия твердого тела» и «Физика конденсированного состояния». В 2003 г. Министерством образования РФ в порядке эксперимента в технических университетах было открыто образовательное направление «**Нанотехнология**» по двух специальностям: «**Нанoeлектроника**» и «**Наноматериалы**». В настоящее время подготовка по этим специальностям проводится в таких вузах, как РХТУ им. Д.И. Менделеева, МГТУ им. Баумана, СанктПетербургский государственный технологический университет, СанктПетербургский политехнический университет и другие. Специальные образовательные программы по нанотехнологии разработаны и реализуются в ряде европейских стран, включая Германию, Данию, Швецию и Швейцарию. Вместе с тем ведущие американские университеты считают целесообразным осуществлять **подготовку специалистов по нанотехнологиям** в рамках образовательных программ по фундаментальному материаловедению.

Итак, если мы сумеем сохранить то лучшее, что было заложено в отечественной системе университетского образования (прежде всего, его фундаментальность) и пополним последнее междисциплинарностью и способностью владеть современным синтетическим и диагностическим инструментарием, то появится надежда на возможность преодоления нашей страной нанотехнологического отставания.

...Как тут не вспомнить когда-то популярный роман-хронику В. Катаева «Время, вперед», название которого, как никакое другое, выражает пафос нанотехнологической эпохи.

Мы надеемся, что книга, которую Вы держите сейчас в руках, позволит многим разобраться, что такое нанотехнологии и наноматериалы, и включиться в научную или практическую деятельность по успешному осуществлению очередной мечты Человечества о светлом будущем и новых удивительных достижениях.





## АМФИФИЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ (*Amphiphilic compounds*)

*«Грязь хвостом она цепляет,  
Головой ныряет в воду, –  
Эти свойства объясняет  
Амфифильная природа».*

*Е.А. Померанцева*



Всем известно, что рыбы комфортно чувствуют себя только в воде, а большинство кошек относится к водным процедурам с явным недовольством, зато такие животные, как лягушка или тритон, вполне способны как плавать в реке или луже, так и свободно передвигаться по земле! Эти животные получили название земноводных или амфибий (от греч. *αμφίβοος* – ведущий двойной образ жизни).

Свои амфибии, способные растворяться как в гидрофильных, так и гидрофобных растворителях, есть и в химии. А называют их амфифильными соединениями (греч. *αμφίφιλα*). Так же, как и у амфибий, приставка *αμφί* означает «двойной»,

а корень *φιλα* (дружить, любить) – указывает на сродство таких молекул к раз личным типам растворителей. Даже сами молекулы амфифильных соединений похожи на головастика: они состоят из длинного углеводородного хвоста (построенного обычно более чем из десяти  $\text{CH}_2$  групп), обеспечивающего растворимость в неполярных средах, и полярной головы, ответственной за гидрофильные свойства. Таким образом, амфифильные соединения одновременно «любят» и воду (то есть являются гидрофильными), и неполярные растворители (проявляют гидрофобные свойства).

В зависимости от типа гидрофильной группы выделяют амфифильные соединения, несущие заряженную катионную (амины  $\text{RNH}_3^+$ ) или анионную (карбоксилаты  $\text{RCO}_2^-$ , сульфаты  $\text{RSO}_4^-$ , сульфонаты  $\text{RSO}_3^-$ , фосфаты  $\text{RNHPO}_4^-$ ) функциональную группу, и амфифильные соединения с незаряженной функциональной группой (спирты  $\text{ROH}$ , тиолы  $\text{RSH}$ ). Абсолютное большинство известных органических соединений несут более чем одну заряженную функциональную группу. Примером таких веществ являются макромолекулярные соединения – белки, липопротеиды, **блок-сополимеры** и т.д. Наличие у молекул белка третичной структуры, образующейся в результате внутримолекулярных взаимодействий функциональных групп (полярных или неполярных) между собой, само по себе демонстрирует амфифильную природу этих соединений. Другим примером амфифильных соединений является большинство лекарственных средств, молекулы которых сочетают в себе набор определенных функциональных групп, необходимых для эффективного связывания с рецептором-мишенью.



Роль амфифильных соединений в получении наноматериалов и нанотехнологических продуктов сложно переоценить. Амфифильные соединения часто являются *поверхностно-активными веществами*. Их молекулы «самоорганизуются» (самособираются) на различных границах раздела, образуя тонкие пленки *самособирающихся монослоев* толщиной всего в одну молекулу, формируют «*мицеллярные*» системы.

Амфифильные соединения играют особую роль в живой природе. Ни одно животное или растение не может существовать без них! Именно из амфифильных молекул состоит мембрана клетки,

которая отделяет живой организм от враждебной внешней среды. Именно такие молекулы составляют внутренние органеллы клетки, участвуют в процессе ее деления, задействованы в обмене веществ с окружающей средой. Амфифильные молекулы служат нам пищей и образуются в наших организмах, участвуют во внутренней регуляции и цикле желчных кислот. Наш организм содержит более 10% амфифильных молекул. Именно поэтому синтетические поверхностно-активные вещества могут быть опасны для живых организмов и, например, способны растворить мембрану клетки и привести к ее гибели.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Щукин Е.А., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. 3-е изд. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.: ил. ISBN 5-06-004100-X.



## Атомно-силовая микроскопия (АСМ) (Atomic force microscopy, AFM)

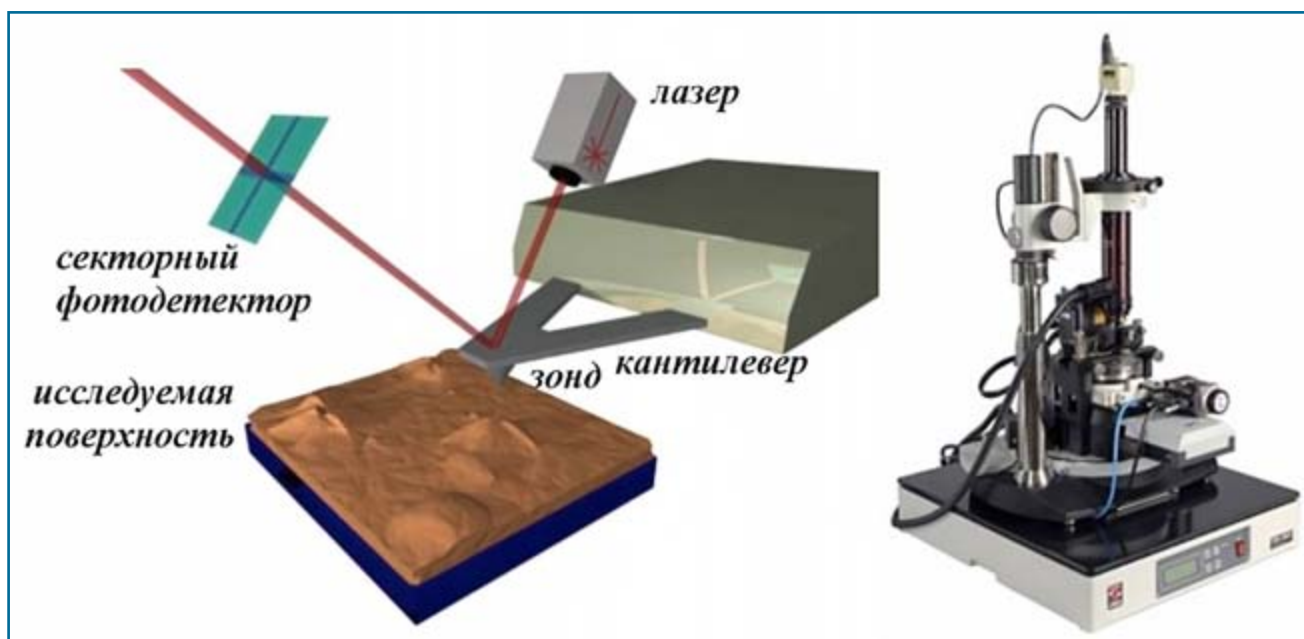
«Атом — это сила».  
Крылатое выражение

Одной из наиболее распространенных разновидностей **сканирующей зондовой микроскопии** является атомно-силовая микроскопия. Первый микроскоп такого типа был сконструирован Г. Биннигом, Х. Гербером и С. Квайтом в 1986 году, после того как годом ранее Г. Бинниг показал принципиальную возможность неразрушающего контакта зонда (атомно-острой иглы) с поверхностью образца.

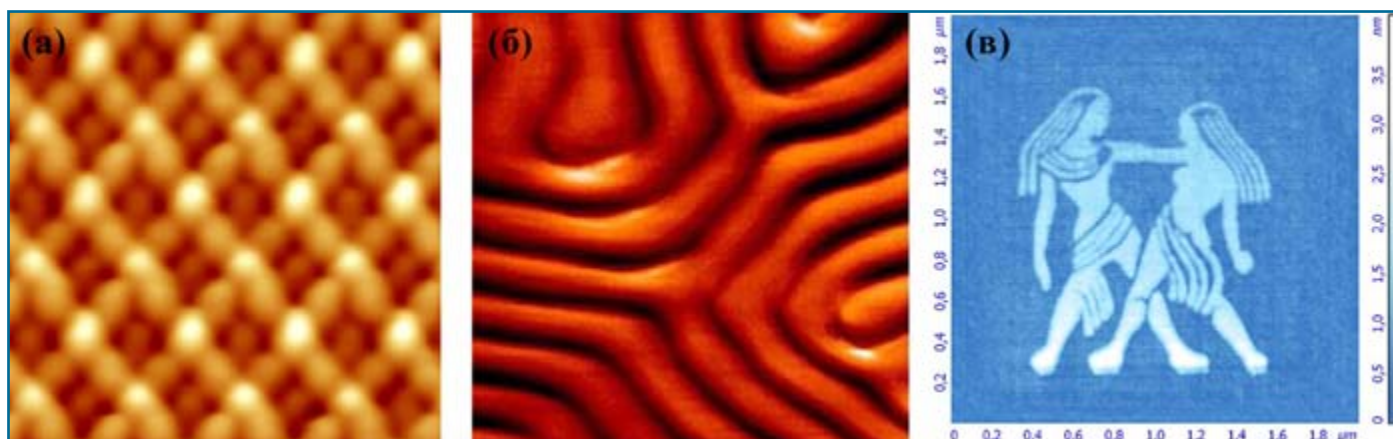
Действительно, если подвести зонд к образцу на расстояние в несколько ангстрем, то между атомами, образующими острие, и атомами, расположенными на поверхности образца, начнет действовать Ван-дер-Ваальсова сила притяжения. Под действием этой силы зонд будет приближаться к образцу до тех пор, пока не начнется

электростатическое отталкивание одноименно (отрицательно) заряженных электронных оболочек атомов зонда и поверхности.

В первых атомно-силовых микроскопах зонд (иголку кристаллического сапфира) закрепляли на тонкой платиновой фольге, за перемещением которой следили по изменению туннельного тока, по аналогии со **сканирующей туннельной микроскопией**. В настоящее время зонд закрепляют на гибкой балке, называемой **кантилевером** или консолью. При подводе зонда к образцу и возникновении отталкивающего взаимодействия **кантилевер** изгибается до тех пор, пока давление со стороны зонда (определяемое силой упругости консоли) не окажется больше предела упругой деформации материала образца или зонда.



Принципиальная схема и общий вид атомно-силового микроскопа (НТ-МДТ)

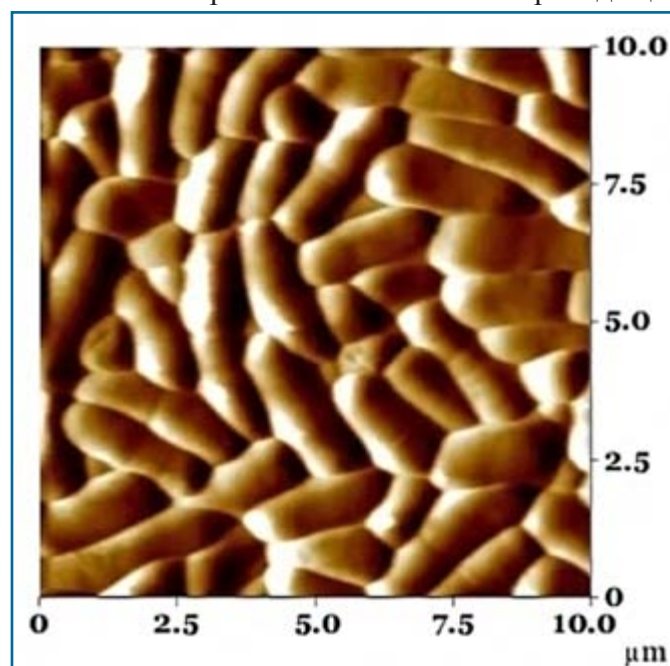


**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности Ge/Si (а) (Т. Eguchi и др., Omicron); магнитных доменов в монокристалле  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (б) (А. Wadas, R. Wiesendanger, Omicron); локально окисленной тонкой пленки титана (в) (Смирнов В.А., ТИ ЮФУ, НТ-МДТ)

Таким образом, основным свойством кантилевера является его жесткость, а подбор материала и геометрических характеристик кантилевера позволяет использовать метод АСМ для самых различных приложений.

Перемещаясь в плоскости образца над поверхностью, кантилевер изгибается, отслеживая ее рельеф. При сканировании образца в контактном режиме его поверхность частично повреждается, а разрешение метода оказывается достаточно низким. Разработка методов полуконтактного и бесконтактного сканирования, когда зонд входит в контакт с поверхностью только в нижней точке траектории собственных резонансных колебаний или не входит в контакт вообще, позволила увеличить разрешение АСМ, значительно снизив давление на образец со стороны зонда. Для регистрации отклонения кантилевера предложены различные системы, основанные на использовании емкостных датчиков, интерферометров, систем отклонения светового луча или пьезоэлектрических датчиков. В современных приборах угол изгиба кантилевера регистрируется с помощью лазера, луч которого отражается от внешней стороны консоли и падает на фотодиодный секторный датчик. Система обратной связи отслеживает изменение сигнала на фотодетекторе и управляет системой нанопозиционирования. Использование *пьезодвигателей* и атомно-острых зондов позволяет добиться атомного разрешения АСМ в высоком вакууме.

Помимо непосредственного исследования структуры поверхности методом контактной АСМ, можно регистрировать силы трения и адгезионные силы. В настоящее время разработаны многопроходные методики, при которых регистрируется не только топография, но и электростатическое или магнитное взаимодействие зонда с образцом. С помощью этих методик удастся определять магнитную и электронную структуру поверхности, строить распределения поверхностного потенциала и электрической емкости и т.д. (рис. 1). Для этого используют специальные кантилеверы с магнитными или проводящи-



**Рис. 2.** АСМ изображение культуры бактерий *Escherichiacoli* (А. Razatos Institute for Molecular Cell Biology, США, Digital Instruments)



ми покрытиями. АСМ также применяются для модификации поверхности. Используя жесткие зонды, можно делать гравировку и проводить наночеканку – выдавливать на поверхности крошечные рисунки. Применение жидкостной атомно-силовой микроскопии позволяет локально проводить электрохимические реакции, при-

кладывая разность потенциалов между зондом и проводящей поверхностью (рис. 1в), а также открывает возможность применения АСМ для исследования биологических объектов (рис. 2). АСМ уже стал одним из основных **наноинструментов** нанотехнологов, быть может, следующий шаг за покорением **бионанотехнологий**?

#### Литература:

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Мир, 2004.
2. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications Ed. Dawn Bonnell Wiley-VCH; 2 edition, 2000.
3. [www.ntmdt.ru](http://www.ntmdt.ru)

## БИОМАТЕРИАЛЫ

### (Biomaterials)

«...Железный Дровосек глубоко задумался.  
– Как вы полагаете, великий Гудвин может дать мне сердце?  
– Думаю, что может, – отвечала Элли, – Ему это не труднее, чем дать Страшиле мозги».  
А. Волков. «Волшебник Изумрудного города»



Страшила и Железный Дровосек – примеры сказочных персонажей, которым могли помочь биоматериалы: Страшила мечтал о мозгах, а Дровосек – о сердце.

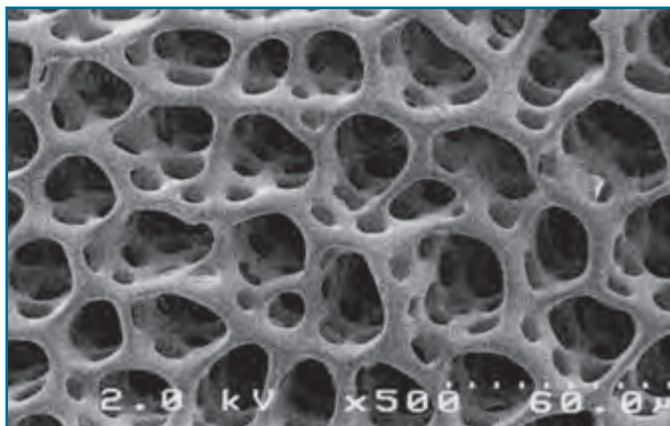
Биоматериалы – это материалы, призванные заменить поврежденные участки организма: их отдельные органы и ткани. Например, перелом или травма кости ведет к необходимости замены искусственным имплантатом поврежденной области. При ослаблении слуха пациенту необходим слуховой аппарат. Пластическая хирургия, когда люди хотят как-то изменить черты своего лица, тоже прибегает к помощи биоматериалов.

Биоматериалы можно условно разделить на две группы: трансплантаты и имплантаты. Особое место занимают биоматериалы, построенные из клеток или являющиеся их носителями. Первая группа – это органы и ткани, пересаженные от самого пациента или его близких родственников (например, почка, участок кости, кожа). В таком случае проблемы совместимости материала или не возникает, или, наоборот, орган отторгается, зато при удачном исходе он полностью обеспечивает необходимое функционирование. Однако невозможность предсказания итогов пересадки, а также более чем ограниченное количество трансплантатов накладывают свои ограничения на данный тип биоматериалов.

Вторая группа представляет собой «неживые» материалы, не имеющие непосредственного отношения к организму: полимеры, керамические блоки, скелеты кораллов и тому подобное. В случае имплантатов проблемы генетической несовместимости материала не возникает, тут встает вопрос о его принципиальной токсичности или биосовместимости. Имплантаты могут быть произведены в любом количестве, чтобы обеспечить необходимый спрос, что является их несомненным плюсом, однако полностью восстановить функции заменяемого органа они не в состоянии.

Как оказалось, при создании совершенных биосовместимых имплантатов огромное значение имеет организация биоматериала на наноуровне, а именно наличие различных включений или пустот нанометрового размера приводит к кардинальному улучшению биосовместимости (рис. 1). Так, например, использование нанопористого полимера при изготовлении искусствен-





**Рис. 1.** Пористый материал для биорезорбируемых имплантатов

ного сердечного клапана позволяет добиться 3–4-кратного ускорения адаптации организма к инородному телу, а нанотекстурирование поверхности аортного катетера позволяет снизить вероятность его отторжения на 80%. Иногда проводят поверхностное модифицирование биоматериалов небольшим количеством антисептика в нанокристаллическом состоянии для предотвращения воспалительных процессов после имплантации.

Совершенно новые горизонты открываются при использовании последних достижений генной инженерии и операций с клеточными культурами. Представляется возможным «заселять»

клетками имплантируемый биоматериал (например, при замене кости, которая является довольно пористым материалом) с тем, чтобы постепенно материал в среде организма растворился, а клетки построили бы на его основе естественную биологическую костную ткань – произошла биоминерализация. Особую роль отводят при этом стволовым клеткам, которые потенциально могут восстановить любые поврежденные ткани. В этом случае также чрезвычайно важна организация материала на наноуровне, позволяющая материалу, с одной стороны, быть достаточно «дружественным» к стволовой клетке, а с другой стороны, быстро растворяться в организме.

Проводятся работы в области ней, выращенных в питательной среде на основе клеток человека, нуждающегося в помощи. Такие ткани не только не вызывают осложнений при замене ими поврежденных участков (ведь они идентичны тканям конкретного пациента), но и по всем свойствам повторяют утраченные или поврежденные органы.

Именно успех в области создания биоматериалов открывает дорогу к увеличению продолжительности жизни человека, а **нанотехнологии** и, тем более, развивающиеся в последнее время **бионанотехнологии** занимают здесь далеко не последнее место.

### Литература:

1. Хенч Л., Джоунс Д. Биоматериалы, искусственные органы и инжиниринг тканей. М.: Техносфера, 2006. 304 с.
2. Баринов С.М., Комлев В.С. Биокерамика на основе фосфатов кальция. М.: Наука, 2005. 204 с.
3. Репин В.С., Ржанинова А.А., Шаменков Д.А. Эмбриональные стволовые клетки: фундаментальная биология и медицина. М.: Реметэкс, 2002. 184 с.

## БИОМИМЕТИКА (*Biomimetics*)

«...отчего люди не летают так, как птицы?»

А.Н. Островский

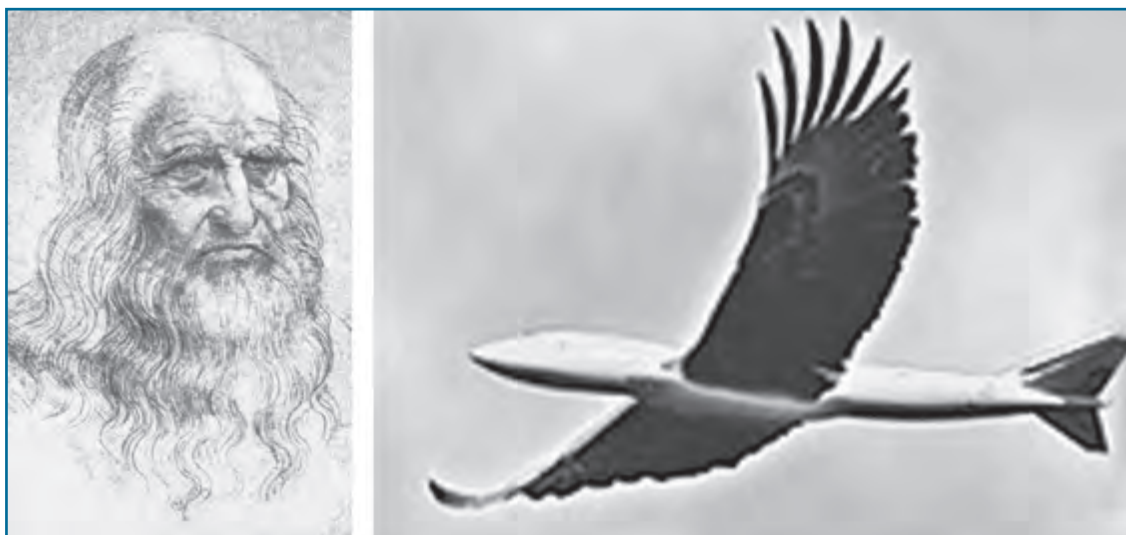
Усилия изобретателей всего мира направлены на создание современных экономических средств передвижения, приспособлений для наблюдения за различными явлениями и просто вещей, приносящих комфорт повседневной жизни. Но на примерах многих уникальных изобретений человечества можно понять, что внимательное наблюдение за природой подчас может принести не меньшие плоды.

Так, в детстве многие сталкивались с репейником, чьи плоды обязательно цепляются к одежде и волосам. Секрет плодов в мягких клейких крючочках, которые прицепляются к волокнам свитера, носкам и путешествуют так на многие километры, расширяя зону своего обитания. К тому же отодранный репей может пристать снова. Швейцарский инженер Жорж де Местраль однажды решил прогуляться на природе, а когда вернулся домой, заметил, что к его одежде креп-

ко прицепились соцветия растения дурнишник (родственник нашего репейника). Вместо того чтобы просто почистить одежду и посетовать на пристающий сорняк, инженер задумался о созданном самой природой оригинальном механизме. В результате этих размышлений возникла идея застежки-«липучки». Если две половинки этой застежки плотно прижать друг к другу, они слипнутся. И все это благодаря крошечным крючочкам и петелькам, сделанным из синтетического материала.

Наука, призванная подражать природе в ее великолепных творениях и черпать из этого подражания идеи для новых изобретений, носит название биомиметика (от латинских слов «биос» – жизнь и «мимесис» – подражание).

Кстати, первым инженером, попытавшимся «украсть» у природы хитрую задумку, был Леонардо да Винчи. Он пытался построить летатель-



Идею самолета Леонардо да Винчи позаимствовал у птиц



ный аппарат с машущими крыльями, как у птиц, – орнитоптер. Сейчас же, благодаря наблюдению за земными живыми существами и растениями, созданы уже сотни изоощренных механизмов и приспособлений. Например, змеиные зубы послужили прототипом игл для инъекций. Летучие мыши подсказали ученым, как сделать радары, подсолнухи – солнечные батареи, киты – безопасные водные суда, голуби – навигационные приборы. И список открытий, которые нам дарит природа, не оскудевает.

В **нанотехнологиях** использование примеров из живой природы приносит еще больше пользы, чем при создании макрообъектов. Если в макромире у ученых и инженеров есть огромное поле для самовыражения, то в наном мире приходится быть зажатыми в очень узкие рамки наномасштаба для реализации своих идей. И несомненным подспорьем является возможность подсмотреть, а затем и попытка скопировать что-то, уже придуманное матушкой природой.

Одним из наиболее ярких примеров является рукотворная реализация молекулярного мотора, с незапамятных времен реализованного в природе. Биологические **молекулярные моторы** – системы, ответственные за основные жизненные процессы на молекулярном уровне в живой клетке, – это созданные природой наномашин, превращающие химическую энергию в механическую работу. Эффективность, т.е. КПД таких моторов, во многих случаях близка к идеальным ста процентам. Размер биомоторов составляет от нескольких нанометров до нескольких микрон. В большинстве своем это белковые машины, ферменты и катализаторы, такие, как кинезин, миозин, аденозинтрифосфат (АТФ)-синтетаза и другие. Миллионы миозиновых двигателей обеспечивают сокращение мышц, заставляя сердце биться, линейные моторы транспортируют вещества в клетки мозга. В каждой клетке, передвигаясь вдоль спирали ДНК, работают и различные моторы-роторы.

Одним из представителей молекулярных моторов является АТФ-синтетаза – белок, предназначенный для синтеза или гидролиза молекул АТФ, а также для переноса протонов ( $H^+$ ) через мембрану клетки, чем обеспечивает стабильный внутриклеточный рН цитоплазмы. Он преобразует потенциальную энергию, обусловленную протонным градиентом, в химическую энергию.

За выявление механизма его функционирования внутри клетки Е. Скоу, П. Бойер и Дж. Уолкер (J.C. Skou, P. Boyer и J. Walker) получили Нобелевскую премию в 1997 году. Интересно, что при гидролизе АТФ одна из частей белка совершает вращательное движение. По эффективности работы и развиваемой силе АТФ-синтетаза существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы. Типичная сила, развиваемая такой молекулярной турбиной, составляет около 1 пН, а мощность – порядка 1 аВт ( $1 \cdot 10^{-18}$  Вт).

Другой пример молекулярного мотора представляет флагеллярный мотор бактерий, которые вынуждены передвигаться в поисках лучших условий для жизни и размножения. Модель работы такого мотора была предложена в 1978 году А.Н. Глаголевым и В.П. Скулачевым. Согласно ей вращение жгутика (неподвижной спирали – флагеллы) объясняется работой «роторного мотора», расположенного на клеточной мембране. Так же, как и в АТФ-синтетазе, движущей силой для флагеллярных моторов бактерий является градиент протонов или ионов  $Na^+$  на внешней мембране бактерии. Скорость вращения такого мотора может достигать нескольких тысяч оборотов в секунду. В целом механизм вращения флагеллярного мотора очень сложен (его считают одним из самых сложных известных механизмов в клетках) и до сих пор подробно не изучен. Однако известно, что во вращении оказываются задействованы несколько сотен молекул белков, образующих на один оборот до 16 различных последовательностей комплексов и химических связей.

Самый известный молекулярный мотор – миозин, который является движущей силой мышц. Миозин (а также родственные ему диенин и кинезин) – белок, ответственный за «линейное» перемещение и способный преобразовывать энергию, получаемую при гидролизе АТФ в механическую энергию. Помимо сокращения мышечных волокон, белки этого семейства отвечают и за движение сперматозоидов, и за перенос питательных веществ в клетках мозга. Миозин состоит из линейного участка, образованного двойной димерной спиралью и двух глобульных головок. Последовательное взаимодействие головок белка с поверхностью, по которой он движется (в случае миозина с волокном актина или микротрубочкой в случае кинезина), и АТФ при-

водит к тому, что молекула как бы шагает по поверхности, поворачиваясь на каждом шаге вокруг одной из головок, используя белковый «хвост» в качестве рычага. «Шаг» движения для миозина составляет 4–5 нм. В мышечных волокнах молекулы миозина собраны в жгуты, из которых выступает множество миозиновых мостиков в сторону нитей актина. Во время сокращения мышцы лишь 10–15% мостиков одновременно находится в контакте с окружающими их нитями актина и взаимодействует с АТФ. Таким образом, большую часть времени молекула миозина в жгуте не выполняет работу, перемещаясь, однако, вместе с остальными молекулами миозинового жгута. Длина «шага» такой совокупности миозиновых молекул составляет 35–40 нм, что многократно превышает размер шага индивидуальной молекулы.

Естественно, число моторных белков не ограничивается названными примерами. Одних только аналогов миозина в клетках различных организмов насчитывается свыше 80 видов. Хотя такие сложные молекулы вряд ли будет возможно воспроизвести в лаборатории в ближайшие годы, они являются замечательным источником вдохновения для исследователей, создающих искусственные молекулярные моторы.

В течение уже многих лет исследователи интересуются возможностью имитации движения молекулярных моторов в искусственно созданных нанобъектах. Человеческая фантазия подсказывает, что «приручение» биологических моторов

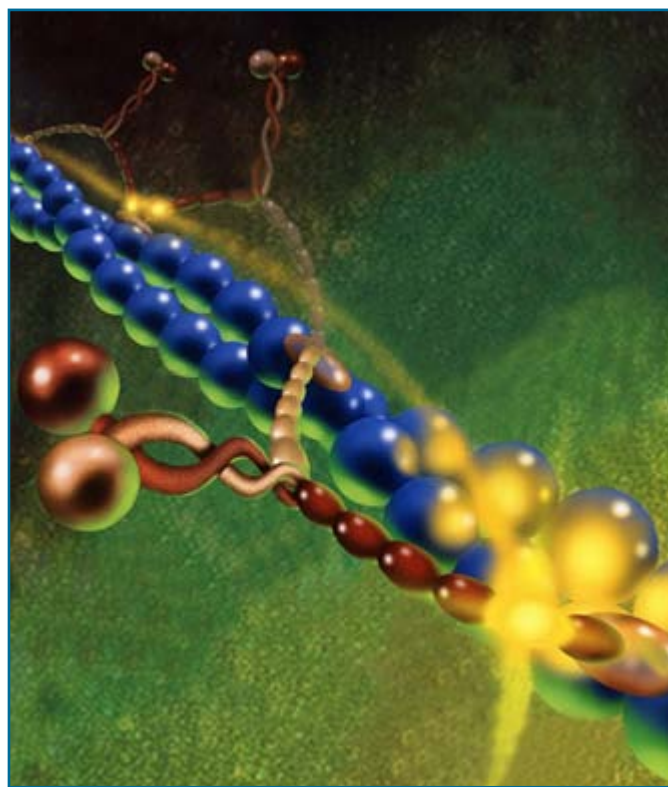


Рис. 1. Белок миозин, передвигающийся по актиновому волокну

позволит значительно увеличить возможности **преобразования энергии**, добиться более щадящих и эффективных методов лечения многих болезней. За последнее десятилетие было создано большое количество различных молекулярных систем, потенциально пригодных для использования в наноразмерных устройствах, но нам еще есть чему поучиться у природы!

#### Л и т е р а т у р а :

1. Биомиметика, или как человек имитирует Божественную природу (фильм, подготовленный по материалам книги Харуна Яхьи).
2. Фенелонов В.Б. МММ без обмана, или Новое в биомиметике. Химия и жизнь. 2001. № 11. Электронное издание [http://school-collection.edu.ru/dlrstore/74103683-8459-68CF-8B70-ECC0037B6CE9/0811\\_11\\_2001.djvu](http://school-collection.edu.ru/dlrstore/74103683-8459-68CF-8B70-ECC0037B6CE9/0811_11_2001.djvu)
3. Кузина С. Тараканы и стрекозы дарят ученым гениальные идеи. Комсомольская правда. 2003. 23 октября. <http://www.kp.ru/daily/23142/24195/>
4. Ализар А. Нанотехнологии вдохнули новую жизнь в бионику. <http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2003/10/24/150716>



## БИОНАНОТЕХНОЛОГИИ

### (Bionanotechnology)

*«Биосистемы – это самые совершенные системы на свете, а бионанотехнологии – это попытка воспроизвести их».*

*Дж. Райан*



Как водится, все самое интересное всегда происходит на стыке наук. Так появились нанотехнологии, ставшие основным приоритетом всех развитых государств мира. Так сегодня появляются бионанотехнологии, сочетающие в себе как биологические, так и нанотехнологические подходы к созданию новых систем, то есть биологию, химию, физику и материаловедение.

Фактически бионанотехнологии означают попытку совместить биологические молекулы, системы живой клетки и созданные человеком наноструктуры – живое с неживым. Уникальность природы всегда вдохновляла и завораживала человека, искушала его повторить совершенство биологических структур и механизмов в искусственно создаваемых системах. Вот и сейчас популярность биологических подходов в на-

нотехнологиях вызвана стремлением создавать уникальные микромашины, осуществлять сборку сложных наноструктур из составных блоков, доставку и разделение наночастиц и компонентов смесей – все то, что уже миллионы лет реализуется в природных системах. Одна из наиболее острых проблем, стоящих перед человеком, – это проблема старения, решить которую безуспешно пытались на протяжении многих веков, изобретая эликсиры молодости и чудодейственные снадобья. Поэтому особое место в бионанотехнологиях занимают материалы для медицины – очередной шанс попытаться обмануть природу и продлить молодость.

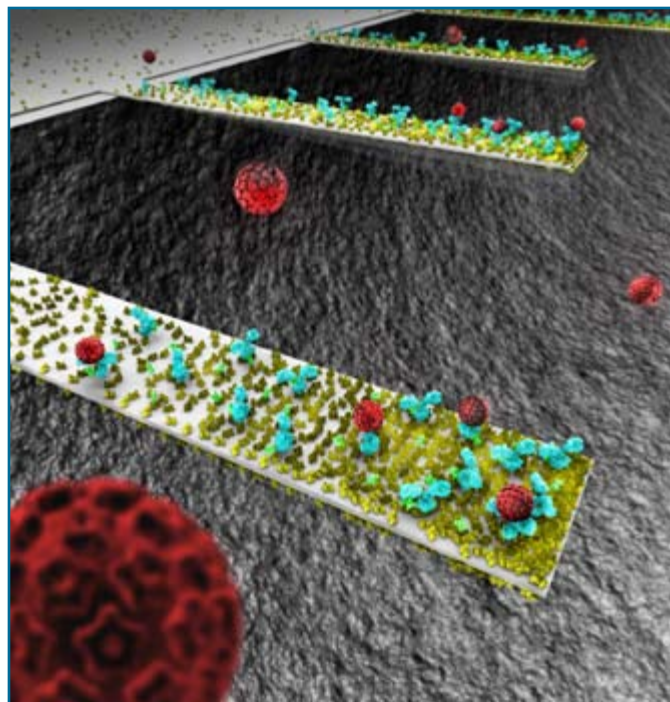
Интерес к применению наносистем в биологии и медицине объясняется несколькими причинами. Во-первых, их малые размеры позволяют беспрепятственно перемещаться внутри живых организмов даже по самым тонким капиллярам и проникать в клетки. Во-вторых, развитая поверхность дает возможность закреплять молекулы различных лекарственных веществ, создавая своеобразные нанокомпозиты *«наночастица/биологически активная оболочка»*. Такие нанокомпозиты способны направленно концентрироваться в требуемом месте организма, повышая локальную дозу препарата в тысячи раз, и обладают селективностью воздействия на тот или иной тип клеток. Поэтому создание лекарственных средств нового поколения опирается на специфические системы доставки, обеспечивающие направленное поступление лекарственных веществ исключительно в определенные органы.

Бионанотехнологии легли в основу диагностики и контроля биосред на уровне отдельных

молекул. Так, например, созданы прототипы **наносенсоров**, способных не только обнаруживать определенные белковые молекулы или отдельные спирали ДНК, но и определять их концентрацию. Одним из последних достижений стала разработка резонансных нанокантилеверов, покрытых различными антигенами или антителами к различным белковым молекулам (рис. 1). Уже сейчас возможно не только создать покрытие **кантилевера**, но и сделать его специфичным только к определенному типу биомолекул, то есть способным захватывать лишь строго заданные биологические объекты, не соединяясь с другими.

При этом захват антителом бактерии, **вируса** или молекулы патогена приводит к изменению частоты колебаний кантилевера, что позволяет точно определить содержание биологически активного вещества. Представьте себе, что, объединив несколько кантилеверов в матрицы, можно будет одновременно детектировать присутствие в среде нескольких типов патогенов, на определение которых «настроены» резонирующие нановесы. Такие устройства обеспечат гораздо более быструю, дешевую и точную диагностику сложных заболеваний. Например, согласно самым смелым прогнозам, один наночип сможет обеспечить полную диагностику по единственной капле крови.

Еще одна область, в которой бионанотехнологии занимают лидирующие позиции, это так называемый биологический наноконструктор, когда биологические системы участвуют в сборке сложных конструкций из наночастиц. В качестве простейшего примера такого конструктора можно привести **самосборку** наноструктур на основе одиночных молекул ДНК, привитых к наночастицам. Такие частицы будут соединяться только с теми частицами, которые несут вторую комплементарную молекулу ДНК, прочно связываясь с образованием двойной молекулы ДНК. Причем



**Рис. 1.** Захват весами-кантилеверами биологических объектов

для этого частицы даже не надо специально подводить друг к другу, они сами находят свою вторую «половинку», свободно плавая в растворе. Комбинируя молекулы ДНК, привитые к различным наночастицам, можно создавать достаточно сложные наноструктуры. Считается, что в будущем станет возможным создавать очень сложные наносистемы, используя механизмы, похожие на те, которые работают при строительстве живых организмов из отдельных клеток в живой природе.

Улучшение здоровья и качества жизни человека – наиболее важная сфера применения современных технологий, поэтому неудивительно, если через пару лет именно бионанотехнологии станут основным приоритетом научных исследований во всем мире. Уже в 2006 году только в США и Японии бюджет бионанотехнологий составил свыше 3 млрд долларов. В России эта сумма гораздо скромнее – около 300 млн рублей.

### Литература:

1. Nanobiotechnology. Edited by C.M. Niemeyer and Ch. Mirkin. 2004 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
2. Нолтинг Б. Новейшие методы исследования биосистем. М.: Техносфера, 2005.



## Блок-сополимеры (Block-copolymers)

*«...вдруг мимо него промчался в долину табун диких коней. Но, приглядевшись пристальнее, Геракл увидел, что это были не кони. Словно полчеловека срослось с половиной лошади – на конском крупе человеческое туловище с головой и руками...».*

*Мифы Древней Греции*



Кентавр: получеловек-полуконь  
(художник Борис Валледжо)

Воображение древних людей породило множество мифологических чудовищ, сочетавших в себе части разных животных. Читая «Мифы Древней Греции», мы сталкиваемся с крылатым конем Пегасом; кентавром, нижняя часть тела которого принадлежала лошади, а торс и голова были человеческими; медузой Горгоной, напоминавшей обычную женщину, но вместо волос у нее были змеи... Историки быются над загадками: какие природные явления и события могли привести к возникновению в мифологии

столь необычных существ, а ученые стараются совместить несовместимое в реальных объектах и получают различные полифункциональные системы (**фотонные кристаллы, наносенсоры, нанолечения, нанокмппозиты**, генетически модифицированные продукты и т.д.). Кстати, «полифункциональность» перечисленных выше мифических тварей делала их уникальными, поскольку они приобретали новые свойства из сочетания присущих только им характеристик – кто, кроме кентавров, и быстро бегал, и быстро думал; кто, кроме медузы Горгоны, был обворожителен ...до окаменения?

Пожалуй, наиболее легко добиться полифункциональности в органической химии. Каждый школьник знает, что способность органических молекул вступать в те или иные реакции определяется наличием в их структуре определенных функциональных групп. А если в молекуле есть разные функциональные группы, то она сочетает в себе свойства нескольких классов органических соединений.

Переход от одиночной молекулы к нанобъектам возможен с помощью контролируемой полимеризации молекул с различными функциональными группами. Соединение нескольких полимерных блоков различной химической природы в единую макромолекулу позволяет получать блок-сополимеры, уникально сочетающие в себе свойства составляющих их мономеров. По числу блоков выделяют диблок-сополимеры, триблок-сополимеры, тетраблок-сополимеры и т.д. Блоки могут быть непосредственно сшиты между собой или соединены через звено низкомолекулярного вещества. Блок-сополимеры по-

лучают по механизму «живой» (безобрывной) ионной полимеризации компонента А (до полного исчерпания мономера), возобновляемой добавлением мономера В. Альтернативными способами являются взаимодействие между собой полимеров и олигомеров, содержащих на концах функциональные группы, или рекомбинация макрорадикалов.

В блок-сополимерах, содержащих сильно различающиеся по химической природе блоки, часто наблюдается расслаивание и образование микрогетерогенных систем (систем, неоднородных на микроуровне). Например, термоэластопласты состоят из гомополимеров, образующих жесткие блоки термопласта, и эластичных блоков. Благодаря образованию неоднородной структуры на наноуровне, они сочетают в себе легкость обработки (возможность придать форму при нагревании) и эластичность.

Расслаивание блок-сополимеров используют при формировании массивов самоорганизованных наноструктур в качестве некоторого шаблона («трафарета»), способствующего возникновению упорядоченной структуры. Аналогично **жидким кристаллам** блок-сополимеры также образуют пространственно-упорядоченные системы ламеллярных, цилиндрических или сферических агломератов, представляющих собой **мицеллы** одного гомополимера в матрице другого. Стоит отметить, что ламеллярные наноструктуры во многом подобны клеточным мембранам живых организмов.

Современные нанотехнологии предполагают использование блок-сополимеров в качестве перспективных оптических материалов (**фотонных кристаллов**) или матриц для формирования наночастиц. Температурная обработка или облучение сополимера позволяют осуществить селективную деградацию одной из фаз, одновременно связывая фрагменты другой в жесткую пористую матрицу, которая может использоваться в качестве шаблона для формирования различных наноструктур. Так, пленки сополимера  $PS_{70}PMMA_{30}$  (полистирол/полиметилметакрилат) самопроизвольно формируют упорядоченную

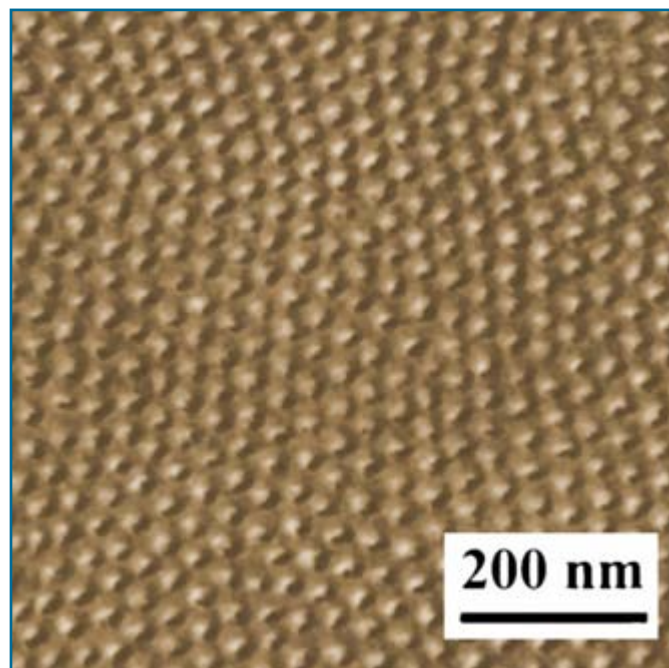


Рис. 1. АСМ-изображение пленки блок-сополимера  $PS_{70}PMMA_{30}$

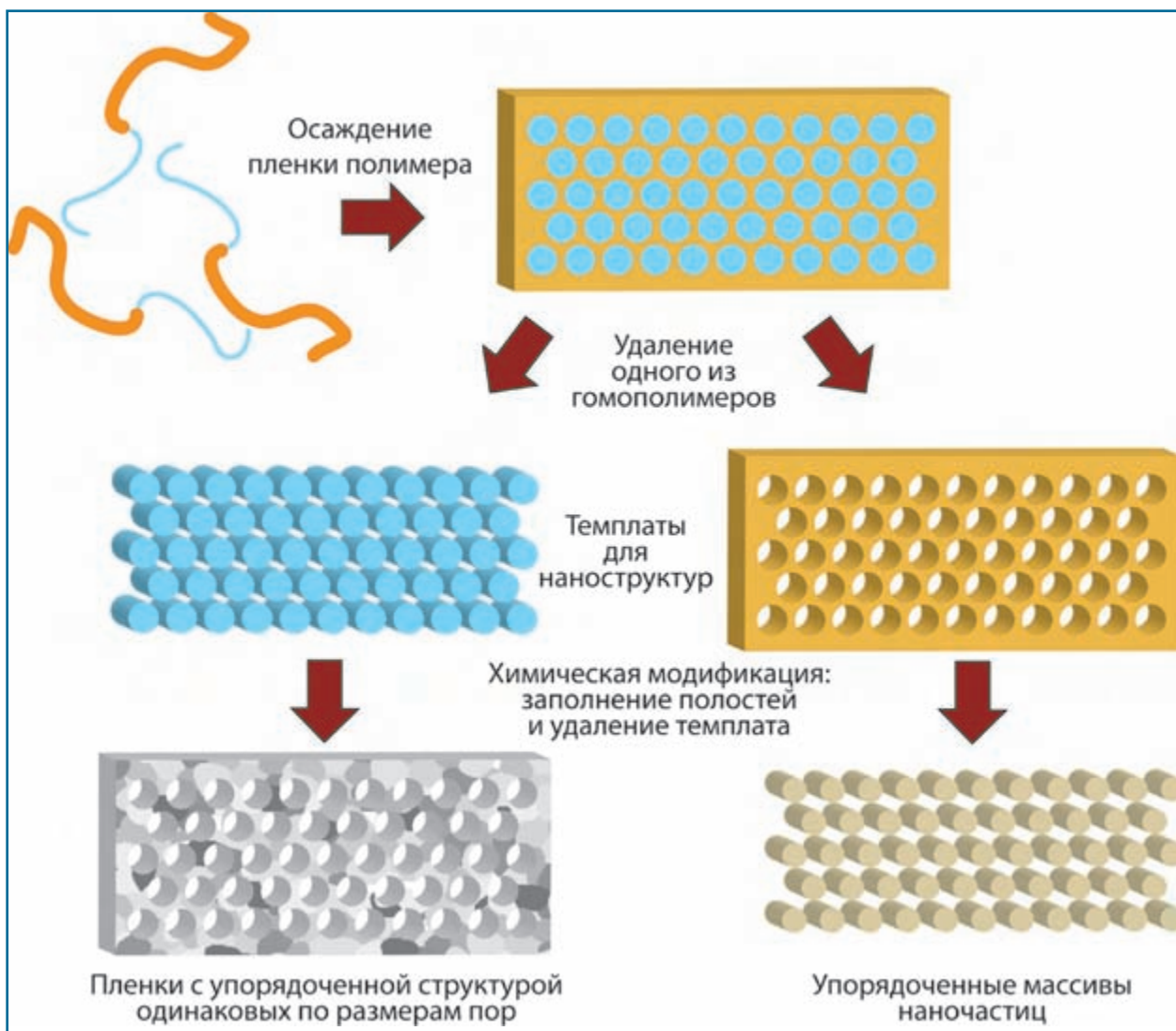
систему цилиндров полиметилметакрилата диаметром  $\sim 25$  нм в матрице полистирола. Селективное удаление РММА приводит к формированию регулярной системы изолированных цилиндрических пор, которая в дальнейшем может быть использована для формирования нанонитей металлов или полупроводников с плотностью расположения элементов  $\sim 10^{11}$  шт/см<sup>2</sup> (рис. 1).

Такие системы находят применение для разработки устройств сверхплотной записи информации и позиционно чувствительных сенсоров. Блок-сополимеры, имеющие в своем составе гидрофильные/гидрофобные блоки или блоки с разной растворимостью (например, полиэтиленоксид и полипропиленоксид), используются, соответственно, в качестве **темплата** для синтеза монодисперсных **наночастиц** или **мезопористых молекулярных сит** (рис. 2). **Поверхностно-активные вещества** на основе блок-сополимеров являются эффективными и экологически безопасными деэмульгаторами, широко используемыми в нефтепереработке, а также в бытовых синтетических моющих средствах.

#### Литература:

1. Ruzette A.-V., Leibler L. Nature Materials. 2005. Vol. 4. P. 19.

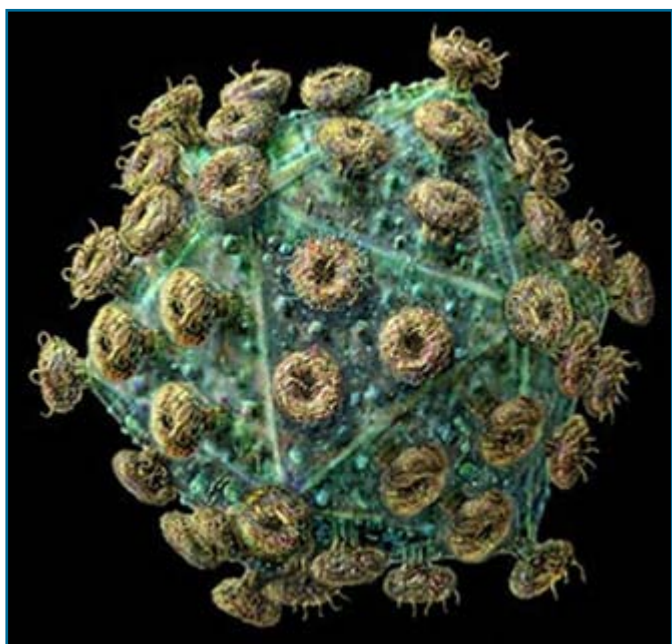




**Рис. 2.** Химический дизайн наноструктур на основе блоксополимеров

## ВИРУСЫ (Viruses)

*«Кусает больно и обидно,  
Хоть самого подчас не видно...».*  
Дж. Свифт



Вирус иммунодефицита человека (ВИЧ). На поверхности расположены белки, с помощью которых вирус связывается с клеткой – лимфоцитом. Отчетливо видны каналы, через которые выделяются ферменты, повреждающие оболочку лимфоцита. Вслед за этим в клетку поступает генетический материал вируса. Вместо защиты организма от болезней лимфоцит превращается в машину по производству новых вирусов

«Что же, пусть наша прекрасная незнакомка так и останется незнакомкой, лишь бы она полюбила нас», – сказал, по преданию, выдающийся микробиолог Л. Пастер, так и не сумев выделить возбудителя бешенства – страшной болезни, от которой в XIX веке не было никакого спасения. Получить вакцину и тем самым спасти многие тысячи человеческих жизней ему удалось, так и не познав природу инфекционного агента. Сде-

лать это в те времена не смог бы никто, поскольку возбудителем бешенства оказался не микроб, как того ожидал Л. Пастер, а вирус.

Вирусы – это мельчайшие частицы, которые являются своеобразными инфекционными агентами и паразитируют внутри клеток. Вначале вирусы считали просто ядовитыми веществами, затем – одной из форм жизни, позже – биохимическими соединениями. Сегодня предполагают, что вирусы существуют на границе между живым и неживым мирами: даже на шкале размера они располагаются между типичными живыми объектами, например бактериями, и не живыми – огромными молекулами (макромолекулами) белков и полимеров. Подобно обычным химическим веществам, вне клеток вирусы образуют кристаллы. Когда в 1935 г. У. Стэнли удалось впервые выделить кристаллы вируса табачной мозаики (рис. 1), обнаружилось, что они состоят из сложных биохимических компонентов и не обладают необходимым для биологических систем свойством – обменом веществ. Одиннадцатью годами позже он получил за эту работу Нобелевскую премию по химии.

Вирус обладает достаточно сложной внутренней структурой. Его сердцевина («ядро») содержит одну (иногда больше) молекулу нуклеиновой кислоты, представляющую собой ДНК или РНК. Нуклеиновые кислоты самых мелких вирусов содержат 3–4 гена, а самые крупные вирусы имеют до 100 генов. Снаружи вирус покрыт белковым «чехлом», защищающим нуклеиновую кислоту от вредных воздействий окружающей среды. Форма вирусов очень разнообразна. По размерам вирусы подразделяют на крупные (300–400 нм в диаметре), средние (80–125 нм) и мелкие (20–30



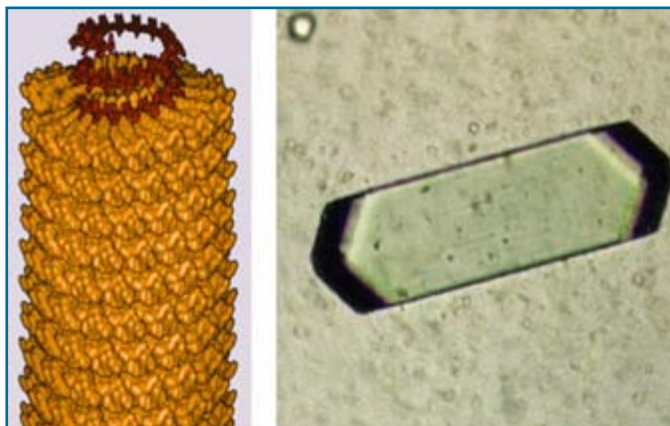


Рис. 1. Кристалл вируса табачной мозаики, выращенный в космосе (фото ИК РАН)

нм). Крупные вирусы можно увидеть в обычный световой микроскоп, более мелкие изучают под электронным микроскопом. В таблице приведены размеры некоторых вирусов, а для сравнения – бактерий и молекул белков.

Попав в чувствительные к ним клетки живых организмов, вирусы внедряются и заставляют клетки производить все новые и новые копии вирусных частиц за счет собственных питательных веществ. В результате клетка, превращаясь в «копировальный аппарат», перестает выполнять свои обычные функции, в конце концов истощается и погибает. У высших организмов (растений и животных) это приводит к различным заболеваниям. Бешенство, иммунодефицит (человека, обезьян, кошек и т.д.), энцефалит, полиомиелит, оспа, грипп, желтуха шелкопряда, мозаика табака, курчавость малины, махровость черной смородины – лишь наиболее значимые из них. Однако не во всех случаях действие вируса негативно – если он атакует одноклеточные организмы, к которым, в частности, относятся бактерии, те погибают. Поэтому с помощью таких вирусов –

Объект	Масса ( $10^6$ а.е.м.)	Диаметр (нм)
Клетка эритроцита	173000000	7500
Бактерия кишечной палочки	180000	~2000
Вирус герпеса	1400	213
Вирус гриппа	700	103
Вирус табачной мозаики	39.2	300
Вирус полиомиелита	6.7	28
Вирус ящура	5.1	28
Белок гемоцианин	6.7	59
Белок гемоглобина лошади	0.069	2.8

бактериофагов – можно уничтожать многие бактерии, вызывающие такие опасные заболевания человека, как дизентерия, холера, чума.

Способность вируса убивать клетку-хозяина можно использовать при борьбе с отдельными клетками многоклеточных организмов, и прежде всего – раковыми. При этом залогом успеха является точная «наводка» вируса на клетку, которую предстоит убить, поскольку сам по себе он готов поразить все чувствительные к нему клетки организма. Для этого вирус и специальный белок (антитело), способный селективно связываться с участком поверхности клетки (мишени), прикрепляют к наночастице, выступающей в роли своеобразного транспортного средства. Такой «снаряд» атакует только определенные клетки, разрушая их (см. *Нанолечение*). Разумеется, нужно еще позаботиться о том, чтобы, сделав свое дело, вирус в дальнейшем мог покинуть организм, не повредив здоровые клетки. В *нанотехнологиях* вирусы используются также в качестве *темплата* для создания *наноструктурированных систем*.

#### Литература:

1. Основы медицинской бактериологии, вирусологии и иммунологии / Под ред. Г.М. Шуба. М.: Логос, 2001. 264 с.
2. О вирусах. <http://immunologia.ru/virus.html>

## ВОЕННЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

### (Military nanotechnology)

*«Над чем бы ни работал ученый, в результате всегда получается оружие».*

*Станислав Ежи Лец,  
польский сатирик*

Не секрет, что военная промышленность использует достижения научного прогресса для разработки все более совершенных видов вооружений, военной техники, обмундирования и средств защиты. Неудивительно, что именно военные одними из первых заинтересовались нанотехнологиями, поскольку применение высоких технологий в современной военной промышленности является залогом успешного ведения боевых действий.

И пока в военных операциях участвуют люди, а не машины роботы, актуальной является проблема создания обмундирования для солдат. Примерить «высокотехнологичную» форму можно будет только ближе к 2020 году, а сейчас ведется большая работа над разработкой, например, «динамической брони». Она будет представлять собой бронежилет толщиной всего несколько миллиметров и облегать тело солдата наподобие водолазного костюма. Вес такого обмундирования уменьшится больше, чем в два раза по сравнению с используемым в настоящее время. Новая форма будет служить не только бронежилетом, но и универсальным медицинским диагностическим инструментом, способным измерять все жизненно важные параметры солдата (пульс, кровяное давление, температуру тела и др.) с помощью встроенных в костюм датчиков. Предполагается, что состояние солдата будет выведено как на проектор на шлеме, так и на медицинский компьютер, а прозрачные стекла для солдатских шлемов будут непробиваемыми для пуль. Так, компания NanoTriton выпустила покрытие NanoTuf™ для прозрачных полимерных поверхностей, состоящее из наночастиц в растворе, ко-

торое в несколько раз увеличивает прочность пластика и защищает от биологических и химических агентов, а также попадания пули. На рис. 1 показаны убедительные результаты теста защитного стекла для солдатского шлема, обработанного NanoTuf™, в который было выпущено несколько пуль.

Помимо этого медицинский компьютер, получающий информацию о состоянии солдата, сможет самостоятельно принимать решения о трансформировании костюма в экзоскелет или броню. Этого можно достичь, так как полимерные актюаторы, из которых будет состоять костюм, по сигналу от медицинского компьютера смогут делать определенные его участки жестче или мягче. Если, например, солдат ломает ногу, местный экзоскелет позволит захватить ее в искусственные шины, сформированные тканью костюма. Такая ответная реакция обмундирования будет аналогична работе





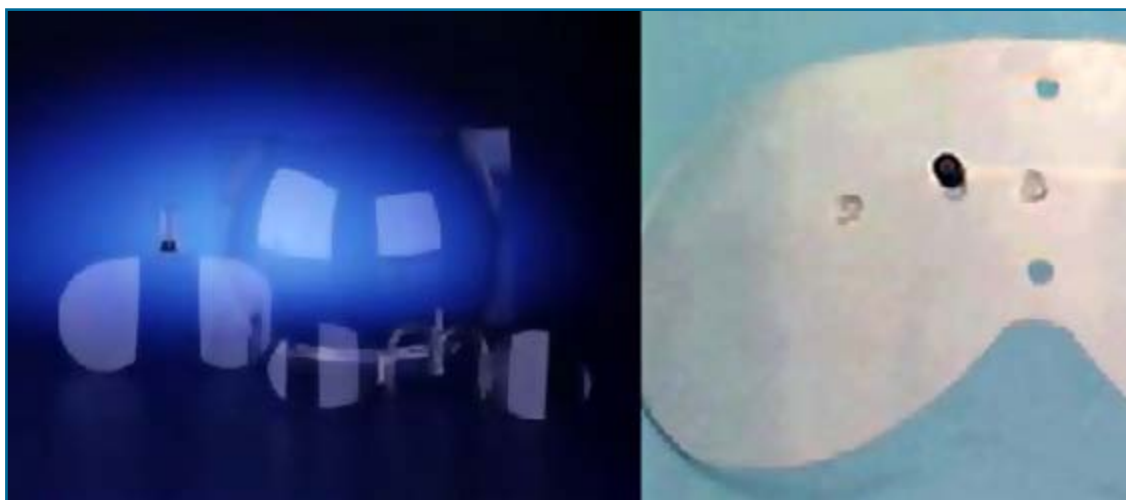


Рис. 1. Пуленепробиваемый пластик, обработанный NanoTuf™

подушек безопасности в автомобилях. Все это возможно благодаря существующим «МЭМС»-акселерометрам (через несколько лет, вероятно, речь уже будет идти о «НЭМС»-акселерометрах) (рис. 2). В недалеком будущем МЭМС-сенсоры и системы навигации на их основе, позволяющие реализовать высокую точность навигации и быстроту определения скорости транспортного средства, будут использовать в снарядах, ракетах и торпедах нового поколения. Кроме того, разрабатываются системы микроактюаторов, с помощью которых в процессе полета будут раскрываться стабилизаторы снаряда. Также МЭМС-сенсоры используются в системе мониторинга и охраны заданной территории от вторжения в любых погодных условиях.

Чтобы костюм толщиной всего несколько миллиметров был достаточно прочным, предложено делать ткань паутиноподобной, так как природная паутина прочна, водостойчива, гибка и лег-

ка – все эти свойства необходимы и для обмундирования. Изучив структуру паутины, ученые создали *нановолокна* из полиурета на диаметром около 100 нм, которые структурно похожи на обычную паутину, но гибче, легче и жестче, а чтобы сделать такой материал еще прочнее, ученые добавили к ним наночастицы, соединяющие нановолокна (рис. 3). Добавление наночастиц также позволяет изменять электропроводность нановолокон. Таким образом можно создать в материале участки проводимости, связать расположенные внутри него сенсоры с компьютерами и обеспечить передачу энергии к наноактюаторам экзоскелета.

Немаловажным является направление развития военных нанотехнологий, связанное с совершенствованием защиты от химического и биологического оружия. Так, компания NanoScale Materials Inc. предложила коммерческий продукт на основе нанотехнологий, который нейтрализует

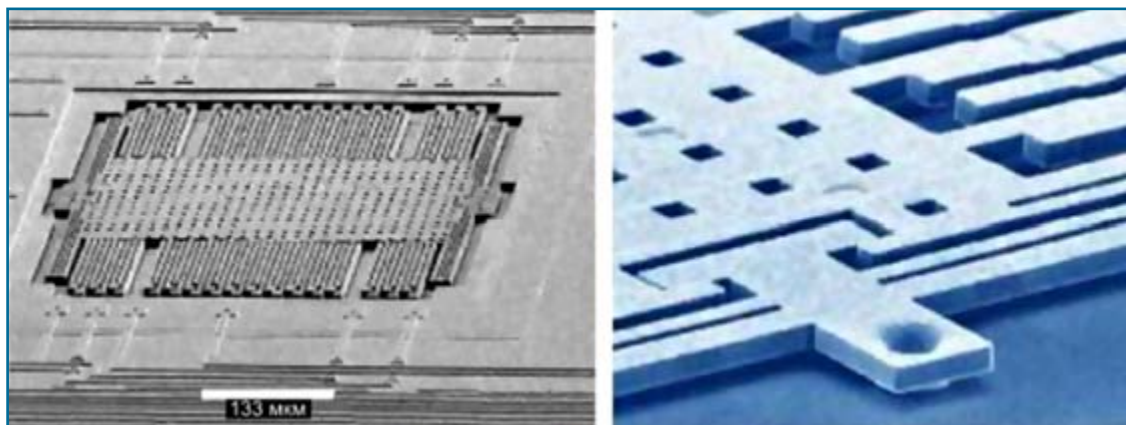
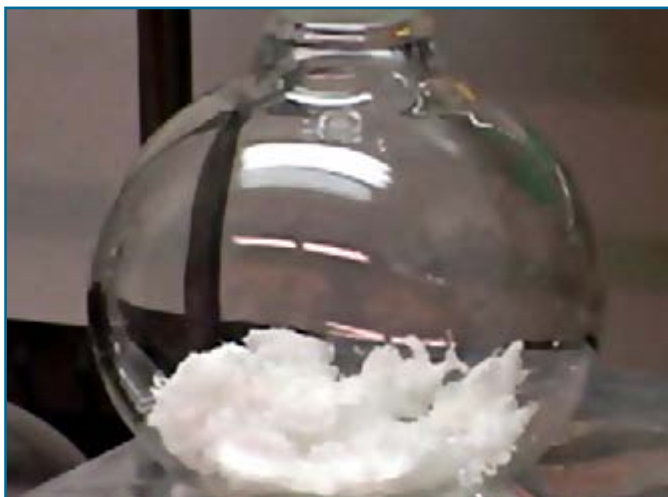


Рис. 2. МЭМС-акселерометр



**Рис. 3.** Нановолокна на основе полиуретана

ет токсичные химикаты. Такой продукт представляет собой наночастицы, способные связывать и деактивировать ряд токсичных химических соединений, используемых при химических атаках. А компания Nanomaterials Research Corp. в качестве антибактериологического агента против спор бактерии *Bacillus Anthracis* (сибирской язвы) предложила использовать фуллерены, соединенные с антителами. Результаты клинических испытаний показали, что такой препарат убивает саму бактерию и ее споры до того, как

концентрация патогенов в организме приведет к его смерти.

Другая компания, CombiMatrix, разрабатывает чип для определения биологической опасности. Размер такого чипа всего с почтовую марку! Это устройство может определить присутствие нескольких видов различного бактериологического оружия. А в компании U.S. Global разработали воздушные фильтры на основе нановолокон: благодаря нанопорам (около 50 нм) фильтр не пропускает отдельные вирусы и бактерии.

**Умные материалы** также находят применение в военных нанотехнологиях. Так, умную пыль, состоящую из микророботов, несущих заряд, предполагают использовать для взрывания бронированных машин или для слежения за подводными лодками противника и их уничтожения. А плащ-невидимку можно создать на основе оптического камуфляжа. Такая система маскировки может привести к перевороту в военном деле – ведь подразделение солдат, оснащенных современным высокоточным оружием, оставаясь невидимкой на поле боя, может быстро уничтожить многократно превосходящие силы противника!

#### Л и т е р а т у р а :

1. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера РИЦ, 2006.



## ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ (Heterostructures)

«...Собрать торт в таком порядке: 1) темный орж; 2) крем; 3) измельченные грецкие орехи; 4) светлый корж; 5) крем; 6) тертый шоколад. Повторить слои...»

*Из рецепта по приготовлению торта «Пражский» (полосатый)*

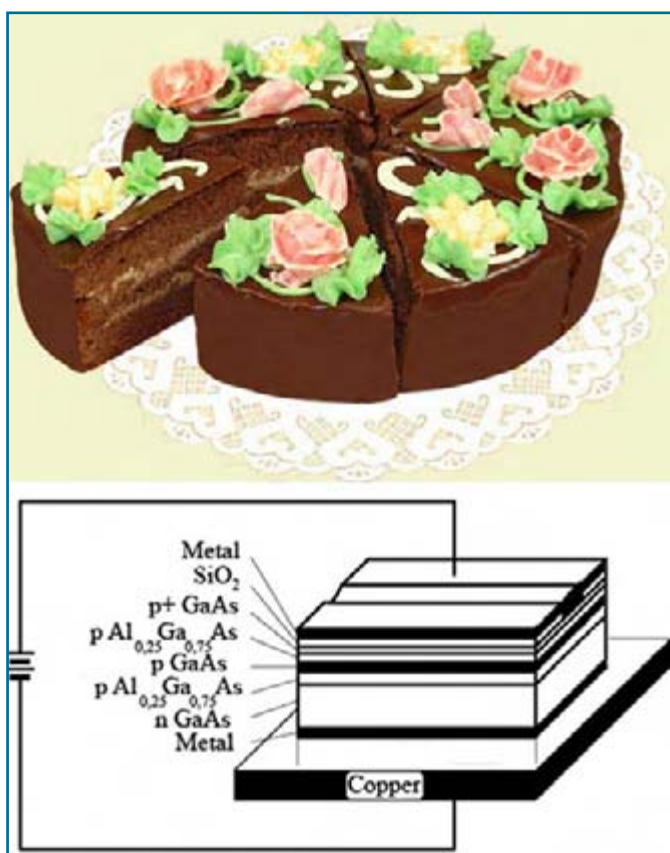
«Термин в физике полупроводников, обозначающий выращенный на подложке слоистый пирог из различных полупроводников...»

*Из определения гетероструктуры (на нижнем рисунке показана структура первого в мире полоскового полупроводникового лазера).*

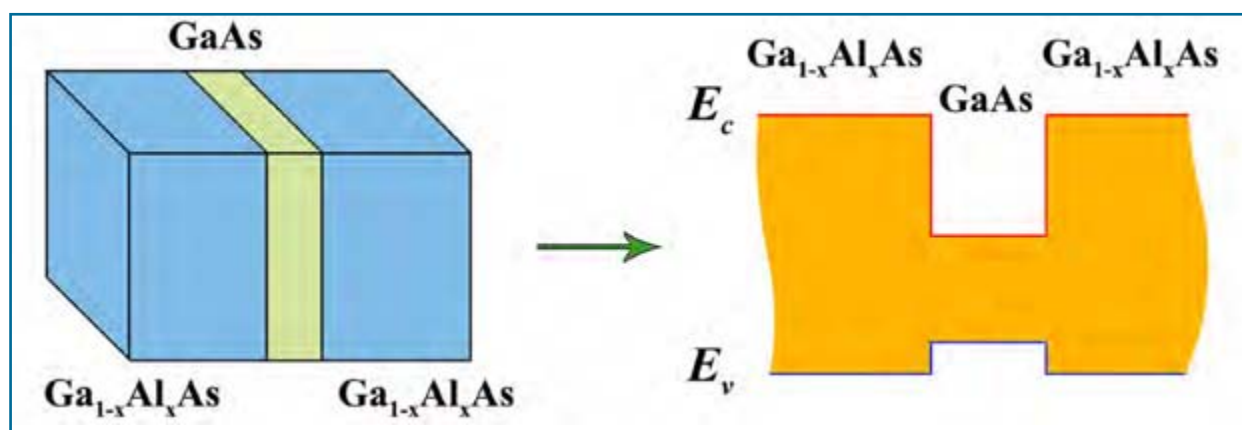
дискретных уровнях, подобно электронам и дыркам в **квантовых точках**. Меняя размер «ям», можно изменять расстояние между уровнями и, соответственно, длину волны поглощаемого или излучаемого системой света.

Контакт двух различных по химическому составу полупроводников (двух разного цвета коржей в пироге) называется гетеропереходом, а рассмотренная выше структура – простейший пример двойной, т.е. состоящей из двух гетеропереходов, гетероструктуры. В общем случае гетероструктурой называют полупроводниковую структуру с несколькими гетеропереходами (многослойный пирог). Гетероструктуру на основе соединений А и В принято обозначать А/В, при этом соединения А и В называют гетеропарой. Для получения гетероструктур используют различные методы, включая **молекулярно-лучевую эпитаксию**, газофазную эпитаксию металлорганических соединений и химическую сборку.

Проявление эффекта размерного квантования в гетероструктурах позволяет создавать электронные устройства с повышенным быстродействием и информационной емкостью. Лазер с двойной гетероструктурой присутствует теперь фактически в каждом доме в проигрывателе компакт-дисков, а содержащие гетероструктуры солнечные элементы широко используются как для космических, так и для земных программ.



Если привести в тесный контакт два различных по химическому составу полупроводника, отличающихся шириной запрещенных зон, постоянными кристаллической решетки и другими параметрами, то схематическая зонная диаграмма образующейся структуры будет напоминать картинку с «ямой», заполненной носителями заряда (электронами или дырками) (рис. 1). При этом в силу **квантово-размерных эффектов**, которые проявляются при размерах «ям», т.е. толщины среднего слоя, от нескольких до ста параметров кристаллической решетки или от 1 до 50 нм, носители заряда будут располагаться на



**Рис. 1.** Зонная диаграмма структуры, образованной плотно контактирующими слоями полупроводников различного химического состава

В 2000 году российский ученый Ж.И. Алфёров получил Нобелевскую премию по физике за «работы по получению полупроводниковых структур, которые могут быть использованы для сверхбыстрых компьютеров». Ж.И. Алфёров совместно с Г. Кремером разработали быстрые опто- и микроэлектронные компоненты, которые создаются на базе многослойных полупроводниковых гетероструктур (прежде всего на основе гетероперехода GaAs/AlGaAs)(рис. 1).

На сегодняшний день термин гетероструктура применяют не только в отношении чередующихся полупроводниковых «коржей» различного состава, исторически открытых первыми. Очень интересны, например, гетероструктуры F/S, об-

разованные чередованием тонких слоев ферромагнетика (F) и сверхпроводника (S), что обеспечивает сочетание свойств, которое не встречается в природе. В общем случае сверхпроводимость и ферромагнетизм являются противоположными явлениями: сверхпроводник стремится вытолкнуть магнитное поле (эффект Мейснера), а ферромагнетик, напротив, концентрирует силовые линии поля в своем объеме (эффект магнитной индукции). Такие гетероструктуры могут использоваться в электронике следующего поколения как логические элементы и переключатели сверхпроводящего тока, причем сверхпроводимостью можно управлять с помощью слабого внешнего магнитного поля.

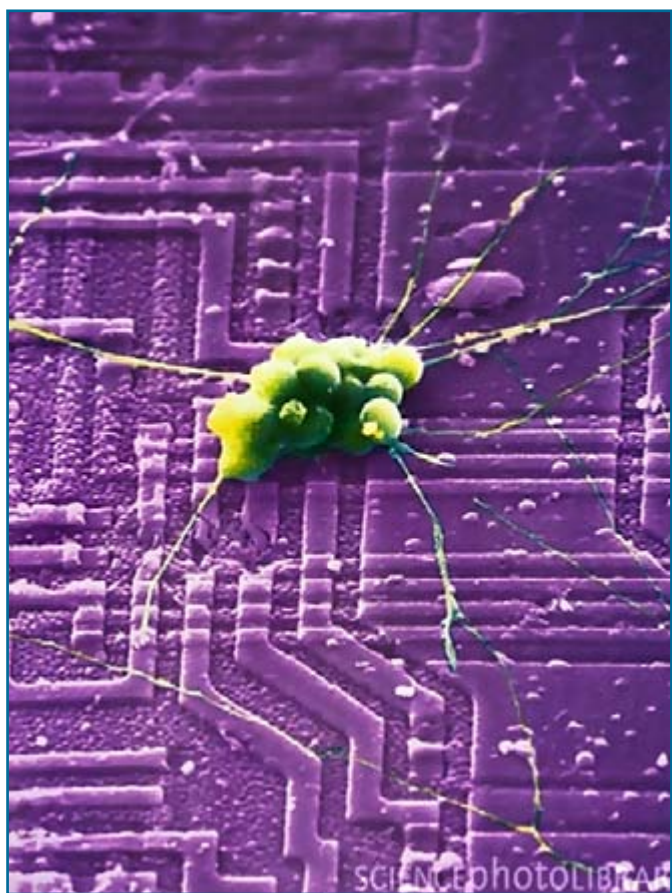
#### Литература:

1. Ежовский Ю.К. Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 1. С. 56–63.
2. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга, К. Плога. М.: Мир, 1989, 584 с.



## ГИБРИДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (Hybrid nanomaterials)

*«Они сошлись: волна и камень,  
Стихи и проза, лед и пламень»  
А.С. Пушкин*

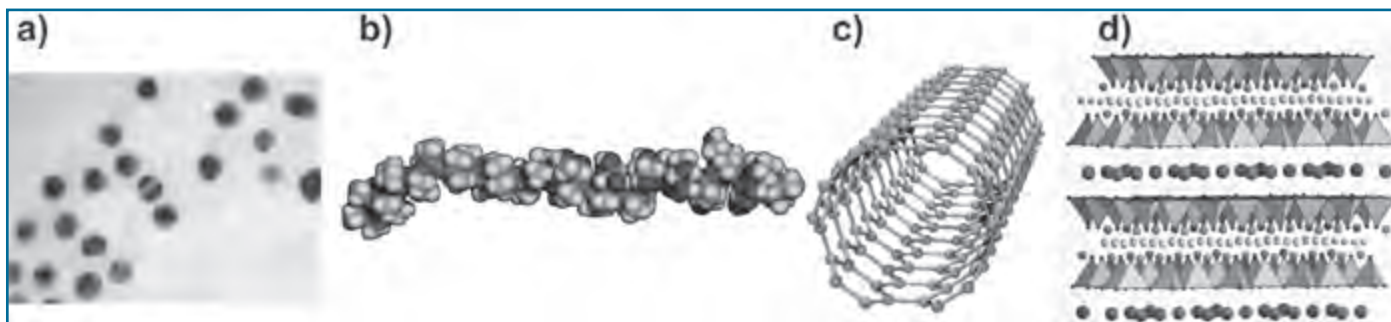


Большинство известных и хорошо изученных материалов, таких как, например, металлы, керамики и пластмассы, не всегда могут полностью удовлетворить потребности человека. Однако ученые и инженеры уже давно заметили, что зачастую комбинации различных материалов проявляют улучшенные свойства по сравнению с индивидуальными веществами. Одними из самых успешных примеров таких смесей являются композитные материалы, которые сформированы из основного вещества, тем или иным образом

распределенного в объеме второго вещества, называемого матрицей. Особый интерес представляют материалы, построенные одновременно из органической и неорганической составляющих. Типичными примерами таких композитов, встречающихся в природе, являются кости или перламутр. Однако для природных композитов размер неорганических частиц лежит в пределах от нескольких микрон до нескольких миллиметров, и поэтому материал получается неоднородным, что иногда можно заметить даже невооруженным глазом.

Если уменьшать размер неорганических частиц гибридного материала до размера молекул органической части (несколько нанометров), то можно повысить однородность композита и получить улучшенные или даже абсолютно новые по свойствам материалы. Их называют гибридными наноматериалами. В качестве примера можно рассматривать материал, в котором, например, неорганические волокна распределены в полимерной матрице, при этом неорганическая составляющая придает материалу механическую прочность, а органическая является связующим веществом между неорганическими частями и придает материалу гибкость и некоторую мягкость.

Неорганическими строительными блоками таких материалов могут являться наночастицы, макромолекулы, нанотрубки или слоистые вещества (рис. 1). Число органических строительных блоков огромно, поэтому количество возможных комбинаций органических и неорганических блоков очень велико. Соответственно неограниченным является и число новых гибридных материалов.



**Рис. 1.** Неорганические строительные блоки гибридных наноматериалов : наночастицы (а), макромолекулы (b), нанотрубки (с) или слоистые вещества (d)

В зависимости от назначения, гибридные материалы условно разделяют на три группы: конструкционные, функциональные и полифункциональные. Конструкционные композиты, используемые для создания строительных и технологических конструкций (цементобетон), являются, как правило, продуктом многотоннажных производств. Функциональные и полифункциональные композиты со специфическими магнитными, оптическими, электрическими, химическими или биологическими свойствами производят в различных масштабах – от многотоннажных количеств до партий в несколько грамм (например, фотонные кристаллы со структурой инвертированной опаловой матрицы, получаемые в результате самоорганизации моносферных микросфер  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ ).

В настоящее время область науки, связанная с гибридными наноматериалами, только начинает развиваться, но уже есть примеры успешного внедрения этих композитов в промышленные разработки.

Так, вещества, состоящие из неорганической матрицы, образованной различными силикатами, с включениями органических молекул, применяют как фотохромные (изменяющие цвет

при облучении светом) и электрохромные (изменяющие цвет при пропускании электрического заряда) материалы. Меняя органическую составляющую, можно управлять оптическими свойствами. Очень широкая область применения связана с созданием различных покрытий на основе гибридных материалов. Эти покрытия обладают повышенной механической прочностью и устойчивостью к царапинам за счет неорганической части. Существует возможность введения в такие композиты дополнительных компонентов, что придает покрытию специфические, например, гидрофобные свойства. Типичной областью применения гибридных наноматериалов является медицина. Такие материалы обладают механической прочностью за счет неорганической части и хорошей биосовместимостью за счет органических молекул. Кроме того, одна из областей применения гибридных материалов – это твердые электролиты – сочетание ион- и электрон-проводящих свойств различных органических молекул с термостойкостью и прочностью неорганической матрицы.

Здесь представлены только некоторые области применения гибридных наноматериалов. На самом деле число таких областей неограниченно.

#### Литература:

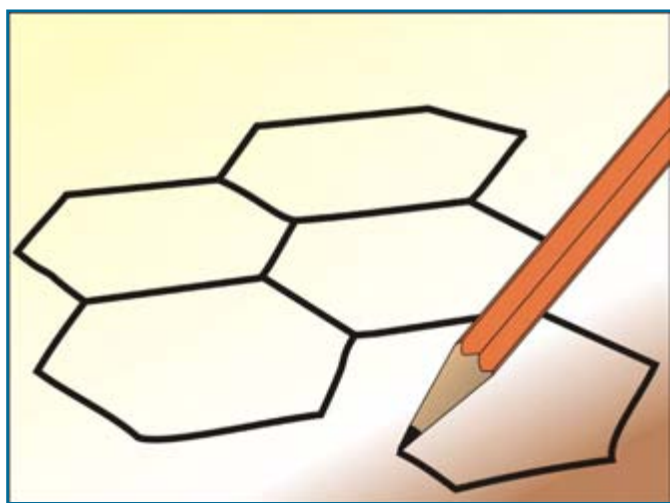
1. Информационный бюллетень «Нанометр». 2006. № 3. Сентябрь. С. 4–5 ([www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)).



## ГРАФЕН (Graphene)

*«Мы часто не замечаем важного в том, что кажется нам привычным и простым».*

*Людвиг Витгенштейн,  
австрийский философ XX века*



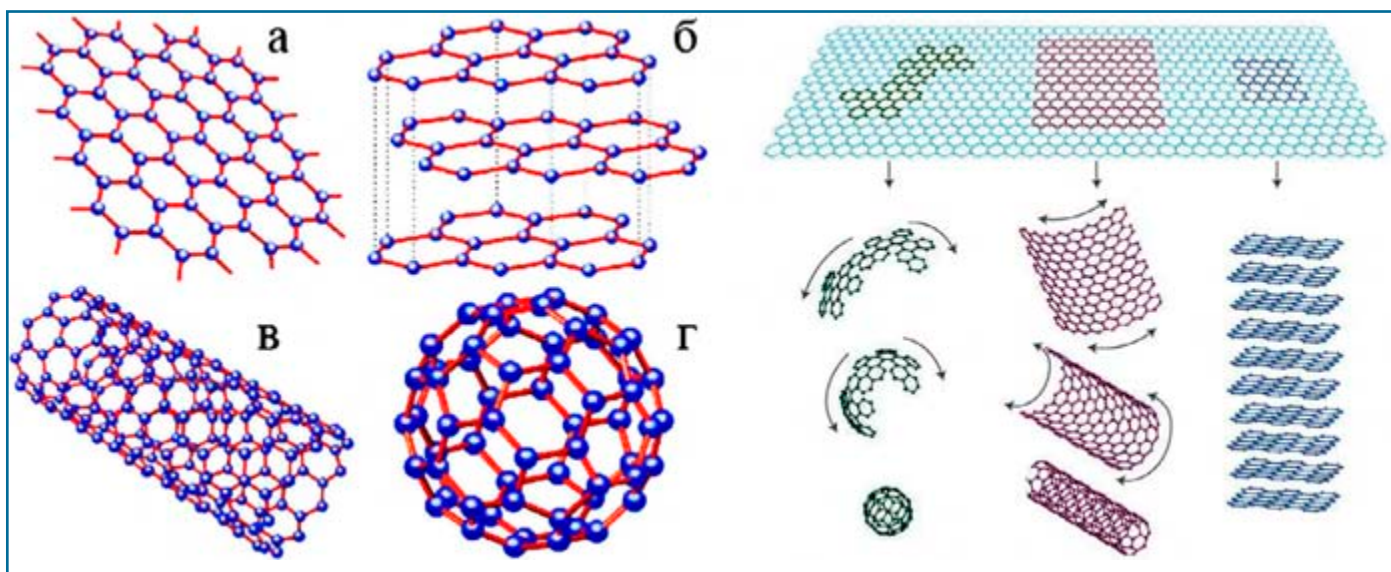
Идея рисунка из A.C. Neto, Fr. Guinea and N.M. Peres. Drawing conclusions from graphene. Physics World November 2006.

Каждый из нас в своей жизни регулярно сталкивается с графитом – делая наброски рисунков или заметки в тексте, наверняка вы пользуетесь «простыми» карандашами с графитовыми стержнями. Действительно, это очень удобно – сделав ошибку или неверно проведя линию, достаточно воспользоваться ластиком – и порядок! А знаете ли вы, что это возможно благодаря тому, что графит имеет слоистую структуру. В этой структуре каждый слой, сформированный атомами углерода, сложен из плоских шестиугольников, напоминающих ячейки пчелиных сот. Химические связи между соседними слоями весьма слабые, поэтому даже при легком нажатии графитовый стержень оставляет серый след на бумаге. Удивительно то, что из такого, казалось бы, знакомого нам графита можно получить материал, обладающий принципиально новыми свойствами. Воз-

можно, именно благодаря этому открытию многие фантастические идеи, витающие в области современной **нанoeлектроники**, станут реальностью. Этот уникальный материал называется графеном и представляет собой всего лишь один углеродный слой, выделенный из структуры графита (рис. 1).

Углерод, один из наиболее интересных элементов в Периодической таблице Менделеева, играет уникальную роль в природе – способность его атомов образовывать сложные органические молекулы является основой жизни на нашей планете. Даже атомарный углерод демонстрирует необычайно сложное поведение, которое выражается в образовании весьма различающихся по свойствам структур. До недавнего времени были известны трехмерные (3D, алмаз, графит), одномерные (1D, нанотрубки) и нульмерные (0D, фуллерены) аллотропные формы углерода (рис. 1). Как видно, в этой последовательности явно не хватает двумерной формы углерода и, казалось бы, неспроста – теоретические расчеты указывают на невозможность существования идеальных 2D-структур, которые должны распадаться или скручиваться при толщине даже в несколько атомных слоев.

Несмотря на то, что уникальные свойства неуловимой двумерной модификации углерода – графена, теоретически изучены еще в 30–40-х годах, проблема ее получения была решена только в 2004 г. Первооткрывателями стали физики из Манчестерского университета (Великобритания) во главе с А. Геймом (Andre Geim) совместно с группой К. Новоселова из российского Институ-



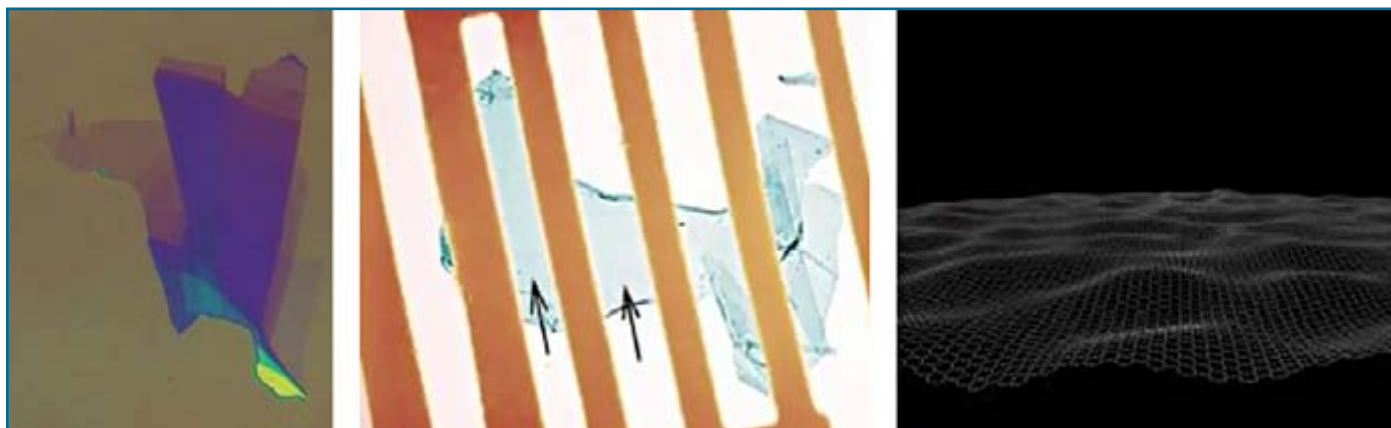
**Рис.1.** Графен (а) является самым простым по строению среди других модификаций углерода и может рассматриваться в качестве их структурного блока. Например, если слои графена расположить друг над другом с небольшим смещением по плоскости, то получится обыкновенный графит (б). Графен можно свернуть в цилиндр и тогда получится однослойная углеродная нанотрубка (в). Если же лист графена определенной формы свернуть так, чтобы образовалась сфера, то получится похожий на футбольный мяч фуллерен  $C_{60}$  (г).

та проблем технологии микроэлектроники и особенно чистых металлов в г. Черноголовка (Россия). Источником углерода служила пластина монокристалла графита, из которого двумерные слои выделяли по технологии микромеханического скалывания. Успеху ученых во многом помогла способность графена давать слабую интерференционную картину и становиться видимым в оптический микроскоп, если его разместить на поверхности кремниевой подложки с тщательно выбранной толщиной слоя  $SiO_2$  (рис. 2).

Является ли графен исключением из правила о неустойчивости двумерных кристаллов? Нет,

потому что он не является идеально плоским. В этом можно убедиться, если зафиксировать графен в виде изолированной пленки на металлическом каркасе. Вооружившись комплексом современных методов исследования поверхности, ученые показали, что графеновый слой имеет волнообразную структуру (рис. 2).

Теперь перейдем к самому интересному, а именно, к удивительным свойствам графена, которые пророчат ему большое будущее в области **нанoeлектроники**. В квазидвумерной кристаллической структуре графена электроны ведут себя как релятивистские частицы с нулевой эф-



**Рис.2.** Пленки графена, полученные на окисленной кремниевой подложке и на золотом каркасе. Модель искаженной графеновой пленки толщиной в один атом.



фактивной массой, при этом их скорость всего лишь в 300 раз меньше скорости света в вакууме. В 2006 году на графеновой основе был сконструирован первый полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обычных условиях и в котором подвижность электронов была на порядок выше, чем в современных кремниевых транзисторах. Однако говорить об изготовлении таких устройств в промышленных масштабах пока рано. Существующие в настоящее время разработки предполагают целый ряд возможных применений графена: от газовых сенсоров и электронных линз до наполнителей для

электропроводящих пластиков и электрических батарей.

Графен, помимо своих уникальных проводящих свойств, обладает еще и великолепными механическими характеристиками – он очень гибок и прочен. Кусочки графена при своей сверхмалой толщине могут достигать в длину до 10 микрон, и нет никаких принципиальных ограничений для создания таких тканей размером в сантиметры. Графен можно, например, использовать как *нановесы*, с помощью которых можно проводить высокоточные измерения массы микроскопических объектов.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Katsnelson M.I. Mater. Today. 2007. Jan.–Feb. Vol. 10. №1–2.
2. Neto A.C., Guinea Fr., Peres N.M. Phys. World. Nov. 2006.

## ДЕМОН МАКСВЕЛА

### (Maxwell demon)

*«...как и полагается демонам Максвелла, всю жизнь они занимались открыванием и закрыванием дверей...».*

*Аркадий и Борис Стругацкие  
«Понедельник начинается в субботу»*



Иллюстрация Regina Fernandes

В 1850 году Р. Клаузиус сформулировал второй закон термодинамики, согласно которому «теплота сама по себе не может перейти от более холодного тела к более тепловому» (самая простая и понятная всем формулировка этого закона – «чудес не бывает»). Для того чтобы показать, что второй закон термодинамики не является абсолютным и всегда выполнимым законом природы, а имеет статистическую природу, Д. Максвелл

в 1867 году предложил следующий мысленный эксперимент. Представьте себе ящик, который состоит из двух отсеков – А и В – разделенных между собой перегородкой с отверстием и наполненных газом, находящимся при одинаковой температуре и давлении (рис. 1). Некое разумное существо – демон – закрывает и открывает это отверстие с помощью очень легкой заслонки. Что это за демон, откуда он взялся и как его зовут – Максвелл не уточнил, поэтому впоследствии его так и прозвали – демон Максвелла. Умный демон по замыслу ученого может работать в нескольких режимах. В первом из них он устраивает жесткий отбор для молекул: из отсека А выпускает только синие (предположим, что они холодные), красным (горячим) выход закрыт (рис. 1а). Из отсека В, наоборот, демон выпускает только красные молекулы, синие же остаются внутри. Через некоторое время в одном отсеке останутся горячие молекулы, а во втором соберутся холодные, т.е. будет наблюдаться очевидный температурный дисбаланс. В другом режиме демон готов выпускать через отверстие какие угодно молекулы, но только из одного отсека (рис. 1б). В этом отсеке молекул становится все меньше и меньше, но итог оказывается такой же, как в первом случае: один из отсеков, в котором молекул много, становится горячее.

Если бы такой демон существовал в реальности, то его проделки должны были бы привести к нарушению второго закона термодинамики и самопроизвольному переходу тепла от холодного тела к горячему (например, чайник, стоящий на электрической плите, вдруг самопроизвольно покрывался бы льдом, а плита, на против, нагрелась бы от охлаждающегося чайника). На самом деле,



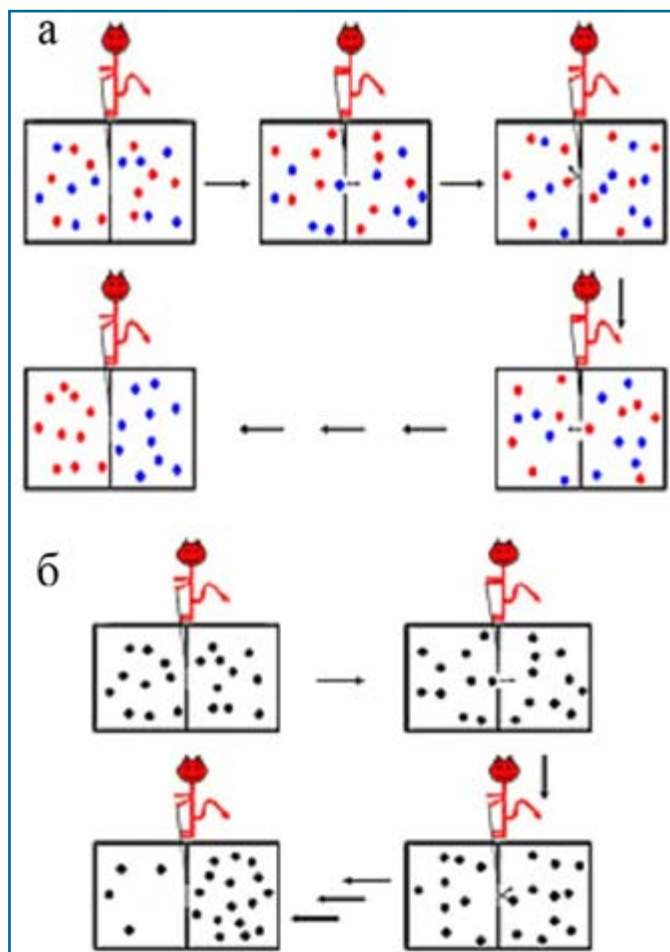


Рис. 1. Иллюстрация с сайта <http://s119716185.websitehome.co.uk/>

если в систему из двух отсеков включить еще и самого демона, то ни какого нарушения законов не произойдет, ведь даже несмотря на то, что демон всемогущ, для выполняемой работы ему нужно открывать и закрывать заслонку, а также знать, какие молекулы подлетают к ней. Для получения такой информации необходимо, например, направлять на молекулы электромагнитное излучение и принимать отраженные сигналы, что невозможно сделать без затрат энергии.

По прошествии более века после того, как Максвелл придумал своего демона, все чаще и чаще стали появляться сообщения о создании искусственных **наномашин**, **нанороботов**, принцип действия которых схож с работой того самого демона из XIX века.

Возьмем, к примеру, разработанный недавно наноклапан, разрешающий движение молекул лишь в одном направлении. Такая наномашина представляет собой молекулярную структуру под названием ротаксан, состоящую из длинной

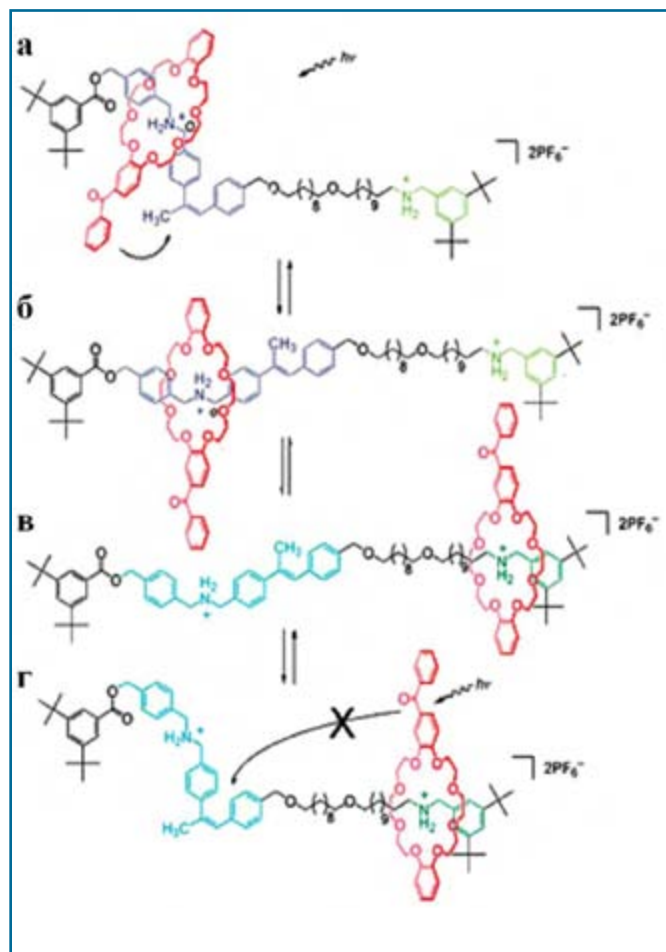
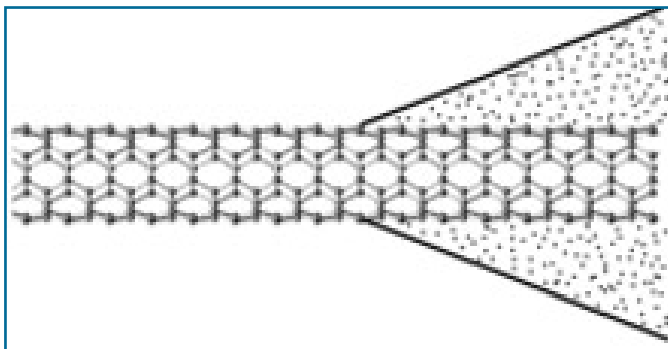


Рис. 2. Строение наноклапана, контролирующего движение молекул

гантелеобразной молекулы с объемными углеводородными группами на концах, «опоясанной» другой циклической структурой (обозначена красным на рис. 2). В нормальном состоянии ротаксанный стержень изогнут, в результате чего молекулярный цикл оказывается зажат между объемными группами (рис. 2а). Однако под воздействием света происходит изменение угловой конфигурации углеводородного фрагмента на линейный, приводящее к свободному перемещению молекулярного кольца к противоположному концу «гантели» ротаксана (рис. 2б,в). Таким образом, в предлагаемом приборе обозначенный синим структурный фрагмент играет роль активируемых светом «ворот». Через некоторое время за счет светопоглощающих молекул растворителя, в котором находятся молекулы ротаксана, возбуждение в системе гасится, и углеводородная цепь вновь изгибается – молекулярные ворота запираются (рис. 2г).



**Рис. 3.** Упрощенная схема теплового диода. Решетку нанотрубки с одного конца закрывает конус из аморфного композита

Другой иллюстрацией к проделкам демона Максвелла является недавно созданный твердотельный термический выпрямитель или термический диод, представляющий собой одномерную проводящую систему – *углеродную нанотрубку* или нанотрубку из нитрида бора, у которой на одном конце сосредоточено больше массы, чем на другом. Для создания разницы в распределении массы нанотрубки покрывались неравномерным слоем специально подобранного аморфного материала. Модифицированную

таким образом нанотрубку закрепляли между электродами, служившими нагревательным элементом на одном конце трубки и термодатчиком на другом. Нагревая попеременно то один, то другой край трубки, исследователи измеряли ее теплопроводность. Оказалось, что при передаче тепла от конца с большой массой к более легкому краю этого устройства по трубке пробегало на 7% больше фононов, чем при передаче энергии в обратном направлении, т.е. происходила потеря теплового равновесия без затраты энергии. Чем вам не демон Максвелла? Конечно, такое отличие в теплопроводности при протекании энергии в разных направлениях – недостаточная для практического использования эффективность. Однако дальнейшие эксперименты с различной конфигурацией нанотрубок, вариацией химического состава аморфного материала, возможно, приведут в будущем к созданию более эффективного устройства, теплопередача которого зависит от направления потока энергии. И тогда мы не раз еще вспомним демона Максвелла и поразимся гениальности его создателя.

#### Литература:

1. Serreli V., Chin-Fa Lee, Kay E.R., Leigh D.A. Nature. 2007. Vol. 445. P. 523.
2. Chang C.W., Okawa D., Majumdar A., Zettl A. Science. 2006. Vol. 314. P. 1121.



## ДЕНДРИМЕРЫ (Dendrimers)

*«От ствола исходят ветви,  
На ветвях растут листья.  
Нанодерево в пробирке  
Можешь получить и ты!»  
Е.А. Померанцева*



Три баобаба, завладевшие планетой лентя из сказки Антуана де Сент-Экзюпери «Маленький принц»

Помните ли вы, чем грозили ужасные, зловередные семена баобабов планете Маленького принца из сказки Антуана де Сент-Экзюпери? Один лентяй на своей планете не выполол вовремя всего три кустика баобабов и..., согласно сказке, из этих кустика выросли огромные деревья, которые завладели всей планетой и разорвали ее. Дендримеры в химии не столь ужасны и даже полезны, хотя само слово **дендример** и происходит от греческого «dendron» – дерево!

Дендримеры относятся к классу полимерных соединений, молекулы которых имеют большое число разветвлений (рис. 1). При их получении с каждым элементарным актом присоединения мономера количество разветвлений увеличивается. В результате с увеличением молекулярной массы таких соединений изменяются форма и жесткость молекул, что, как правило, сопровождается изменением физико-химических свойств дендримеров, таких как характеристическая вязкость, растворимость, плотность и др.

Синтез дендримеров проводят таким образом, чтобы в процессе роста полимерной молекулы не было ни соединения растущих ветвей, ни объединения молекул друг с другом. Точно так же



Рис. 1. Молекула дендримера

ветви одного дерева или кроны рядом стоящих деревьев не срастаются. «Строительство» таких молекул проводят по заранее намеченному плану, например используя реагирующие группы трех типов (А, Б и В), которые должны удовлетворять требованиям определенной логической схемы: каждая группа не может реагировать с себе подобной (А не взаимодействует с А и т.д.), группы А и Б могут реагировать между собой, но каждая из них не может реагировать с В, группа В должна иметь возможность превращаться в определенный момент в группу А.

Сначала в реакционную среду помещают центры будущих дендримеров, которые представляют собой молекулы, содержащие три группы А. К ним добавляют реагент, содержащий в своем составе одну группу Б и две В. Реагенты берут в таком количестве, чтобы соотношение групп А и Б было эквимольным (точка, где происходит соединение реагирующих групп, обозначена звездочкой). В полученном соединении с помощью химической реакции проводят превращение групп В в А. Далее две показанные стадии многократно повторяют, в результате чего наращиваются новые слои вокруг центральной молекулы (рис. 2). Показанная схема была впервые реализована при синтезе дендримеров в виде полиамидоаминов группой Тоиалиана в середине

80-х годов прошлого века. Полученный продукт представлял собой ветвящиеся полимеры наподобие лучей взрывающейся сверхновой звезды (рис. 2, вставка).

Полимеризация ведется с использованием стратегии «защита – снятие защиты», применяемой при синтезе белков и нуклеиновых кислот с заданной последовательностью аминокислот и нуклеотидов. В результате первой стадии полимеризации на концах ветвей оказываются свободные группы, каждая из которых способна реагировать с двумя дополнительными мономерами, таким образом формируется дендример первого поколения (рис. 3). Таких последовательных стадий может насчитываться конечное число, поскольку в определенный момент образуется плотная упаковка из мономеров, что препятствует дальнейшему протеканию полимеризации. Представьте себе, в слое девятого поколения дендримера содержится уже 3069 мономеров, а диаметр такой молекулы составляет ~10 нм.

На сегодняшний день ученые научились удерживать на поверхности дендримеров с помощью хелатных групп ионы металлов. Такие дендримерные «метки» на основе гадолиния и магния активно используются в качестве контрастов при проведении исследований методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Они позволяют,

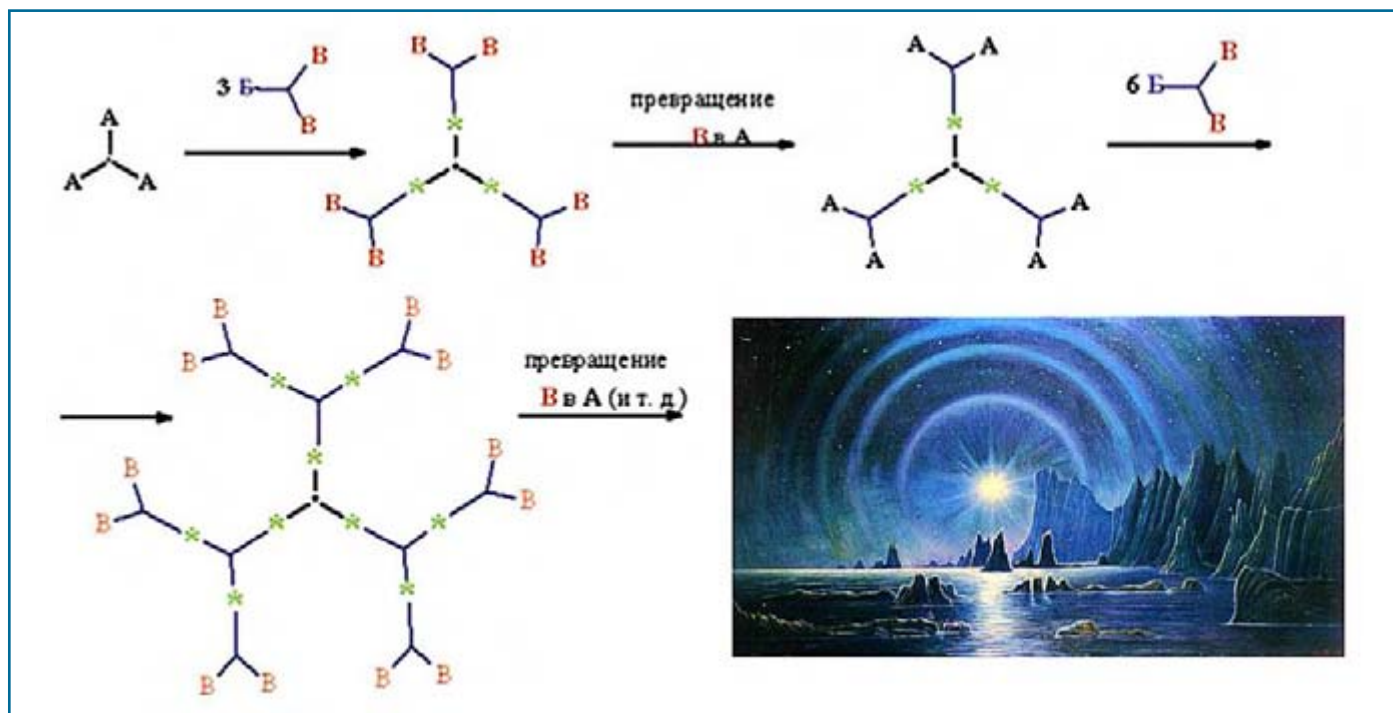
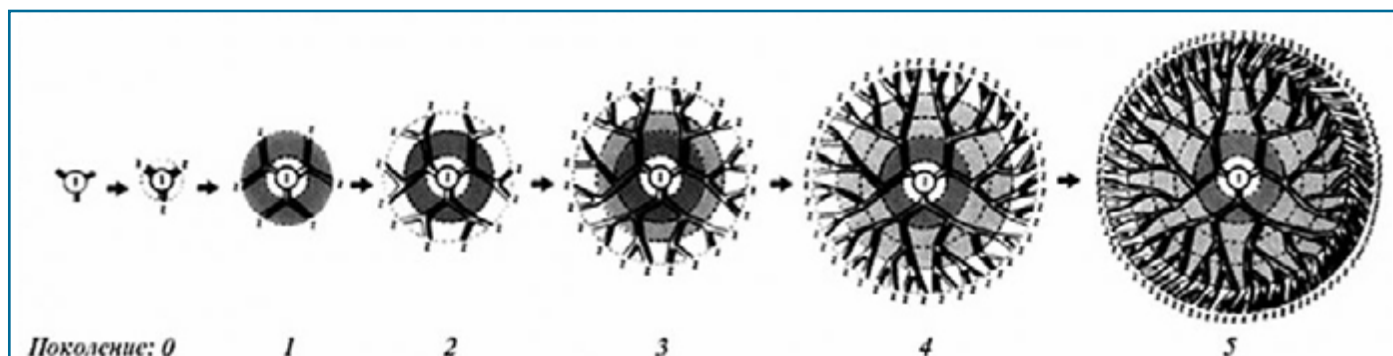


Рис. 2. Схема получения дендримеров (на вставке – взрыв сверхновой звезды)





**Рис. 3.** Двумерные схематические проекции разветвленного дендримера, растущего с сердцевины

например, легко проследить «судьбу» введенных в организм подопытного животного стволовых клеток и их миграции. Это особенно важно в случае клеток, подсаженных в мозг.

Благодаря соприкасающимся «ветвям» разветвленной молекулы образуются внутренние полости, в которых могут находиться различные небольшие молекулы, химически не связанные с дендримером. В полости могут вводиться различные лекарственные препараты, что позволяет обеспечивать их длительное лечебное действие. Дендримеры могут также удерживать вещества с радиоактивной меткой, что можно применить для диагностики различных заболеваний.

Возможность прикрепления к дендримерам сразу нескольких различных молекул нашла свое применение при лечении злокачественных опухолей. Известно, что своеобразным «витами-

ном» для любой делящейся клетки является фолиевая кислота – она в равной степени необходима как здоровым клеткам, так и раковым, однако на мембранах последних располагается в тысячу раз больше рецепторов, способных присоединять фолиевую кислоту. Поэтому если одновременно с ней к «веткам» дендримеров прикрепить сильный противоопухолевый препарат – метотрексат или флюоресцентный краситель, то раковые клетки будут гораздо активнее здоровых ловить и втягивать в себя такое **нанолекарство**. Это позволит, во-первых, осуществлять диагностику раковых заболеваний на ранних стадиях, а во-вторых, точно доставив препарат в раковую область, минимизировать побочные эффекты во время лечения онкологических заболеваний токсичным метотрексатом.

### Литература:

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. 2-е изд. М.: Техносфера, 2006.
2. Семчиков Ю.Д. Дендримеры – новый класс полимеров // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 12. С. 45–51.

## ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ

### (Dissipative structures)

*«Передо мной лежат дороги,  
Куда пойду?  
Верное сердце, любовь как звезда, —  
Они мне помогут везде и всегда  
В бою обрести и как песню сложить  
Мою судьбу».*

*О. Генри «Дороги судьбы»*



В. Васнецов «Витязь на распутье»

Помните богатыря из старинных русских былин, который то и дело встречает придорожный камень, гарантирующий ему разные неприятности, пойдет ли он направо, налево или продолжит путь прямо? Или главного героя рассказа О. Генри «Дороги судьбы», который решает изменить свою жизнь и уходит из родной деревни? «Три лье через туманную, залитую лунным светом равнину тянулась дорога, прямая, как борозда, проведенная плугом пахаря. В деревне считали, что дорога ведет, по крайней мере, в Париж; шагая по ней, молодой поэт не раз шептал про себя это слово. Никогда еще Давид не уходил так далеко от Вернуа. Итак, три лье тянулась дорога и вдруг озадачила его. Поперек ее пролегла другая дорога, большая и торная. Давид постоял в раздумье и...». Далее автор описывает три варианта развития жизни Давида, в зависимости от того, какую дорогу он выбирает.

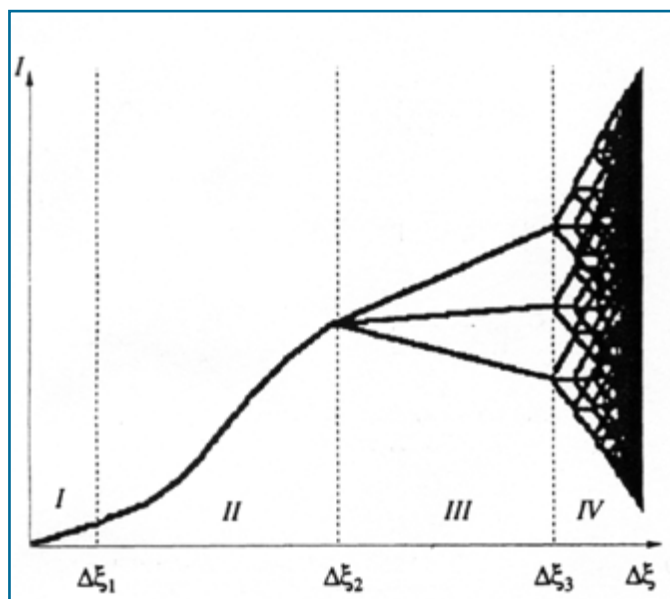
С точки зрения ученого, момент, когда Давид подошел к пересекающей его путь дороге, а бо-

гатырь — к камню на перепутье, можно назвать точкой бифуркации. Иначе говоря, в этот момент вместо одного устойчивого пути развития их судеб, как раньше, до разветвления дороги, появилось несколько.

Выбор альтернативного направления дальнейшей эволюции физико-химической системы осуществляется ею самой за счет случайных флуктуаций — всплесков параметров, «толчков», «встряски». Флуктуации могут усиливаться необратимыми диссипативными процессами и приводить к возникновению новых упорядоченных пространственно-временных структур, которые называют диссипативными, в отличие от равновесных структур, например кристаллов. Речь идет об устойчивом состоянии, возникающем в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне (или уходит) в открытую систему.

Рисунок 1 иллюстрирует возникновение «самоорганизации» в открытой системе. На нем представлена зависимость обобщенного потока  $I$  (массы, теплоты и т.п.) от источника процесса  $\Delta\zeta$  (например, энергии Гиббса  $\Delta G$ ). Равновесному состоянию системы соответствует  $\Delta\zeta = 0$ . При небольших отклонениях от равновесия (область I) зависимость  $I = f(\Delta\zeta)$  линейна, а поведение системы строго детерминировано и может быть описано с помощью соотношений Онзагера. В области II, где заметную роль начинают играть незатухающие флуктуации, зависимость  $I = f(\Delta\zeta)$  становится нелинейной, а в области III (там, где движущая сила процесса превышает некоторое





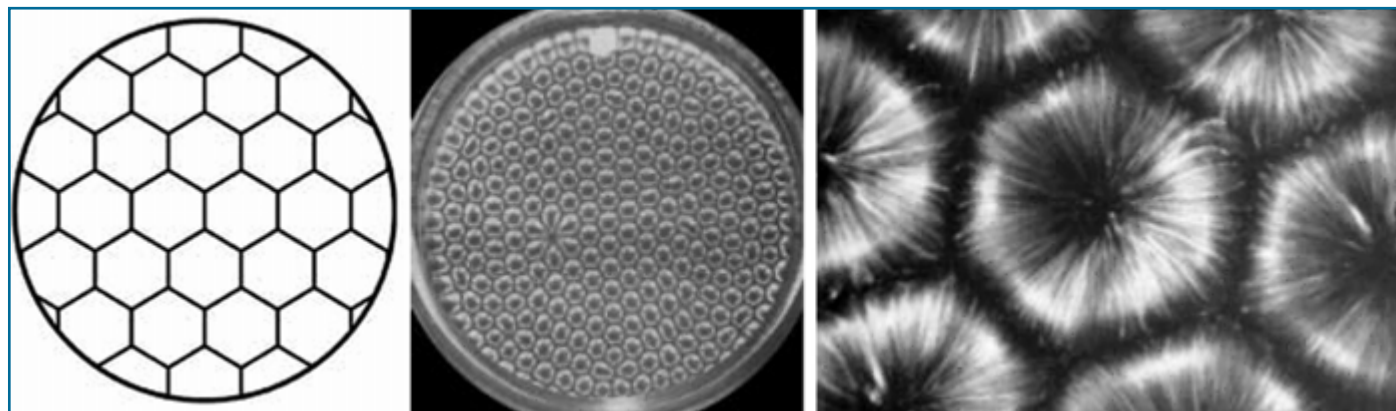
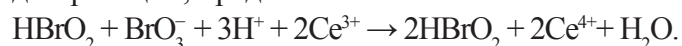
**Рис. 1.** I – область линейной зависимости, II – область нелинейной зависимости, III – область бифуркаций, IV – область детерминированного хаоса.

критическое значение  $\Delta\zeta > \Delta\zeta_2$ ) возникает бифуркация. В области IV наступает хаос.

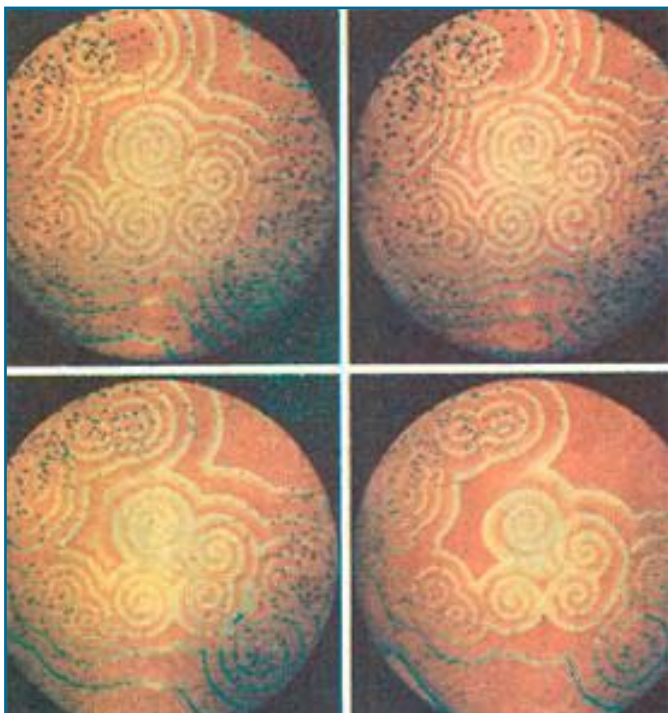
Классическим примером диссипативной структуры может служить структурирование жидкости под действием температурного градиента в виде ячеек Бенара. Они появляются, когда разность температур в плоскостях, ограничивающих слой жидкой фазы, превышает некоторое критическое значение, и беспорядочное движение молекул сменяется самосогласованным. Для демонстрации ячеек Бенара достаточно иметь сковороду, немного масла и какой-нибудь мелкий порошок (например, тальк или муку), чтобы было заметно движение жидкости (рис. 2). Если дно сковороды плоское и нагревается равномер-

но, то можно считать, что у дна и на поверхности поддерживаются постоянные температуры. Пока разность температур невелика, частички порошка неподвижны, а следовательно, неподвижна и жидкость. С ростом разности температур выше определенного предела возникают конвективные потоки (нагретая «донная» жидкость поднимается вверх, охлажденная на поверхности жидкость опускается вниз), которые закручивают взвесь частиц в лево- и правовращающиеся ролики (причем только единственная флуктуация в точке «закручивания» определяет ту ли иную последовательность вращений роликов!). Сверху становится видно, что вся среда разбивается на правильные шестигранные ячейки, целиком покрывающие поверхность – ячейки Бенара. Аналогична и природа узоров, возникающих на поверхности горячего кофе или чая.

Самый известный пример самоорганизации в гомогенных химических системах – это колебательные реакции, среди которых выделяют, прежде всего, реакцию Белоусова–Жаботинского: процесс окисления лимонной (или малоновой) кислоты бромитом калия в присутствии катализатора сульфата церия (III). Происходящие в системе процессы можно наблюдать визуально благодаря индикатору ферроину, придающему раствору голубую окраску при избытке  $\text{Ce}^{3+}$  и красную – при избытке  $\text{Ce}^{4+}$ . Ритмическая смена окраски с идеальным периодом и амплитудой позволяет рассматривать систему как химические часы. Важнейшим условием их функционирования является автокаталитический характер стадии реакции, предположительно:



**Рис. 2.** Ячейки Бенара, возникающие в подогреваемом слое жидкости



**Рис. 3.** Конфигурации, возникающие при реакции Белоусова–Жаботинского в тонком слое в чашке Петри

Автоколебательный характер этой реакции наиболее наглядно проявляется в возникновении пространственного упорядочения в этой системе (рис. 3).

Возникновение диссипативных структур является чрезвычайно важным для разработки новых процессов формирования наноструктурированных материалов. Это относится, например, к формированию колец Лизеганга в минералах, шестиугольных кольцеобразных структур из наночастиц золота на гладкой подложке, областей рассеяния света в жидких кристаллах при наличии градиента электрического поля, псевдокристаллов и других иерархически упорядоченных структур, сформированных из трехмерных блоков, уложенных в правильную структуру в потоке питающей жидкости – коллоидного раствора.

Во многих областях науки, прежде всего в химии, физике и биологии, важная роль необратимых процессов получила в настоящее время всеобщее признание. Это произошло во многом благодаря создателю термодинамики сильно неравновесных процессов, лауреату Нобелевской премии по химии бельгийскому ученому русского происхождения И.Р. Пригожину, работы которого во многом определили стиль современного научного мышления. Они позволили с единой точки зрения описать химические, биологические и социальные явления. «Поэт термодинамики» – так называют И.Р. Пригожина за красоту и элегантность его работ.

#### Л и т е р а т у р а:

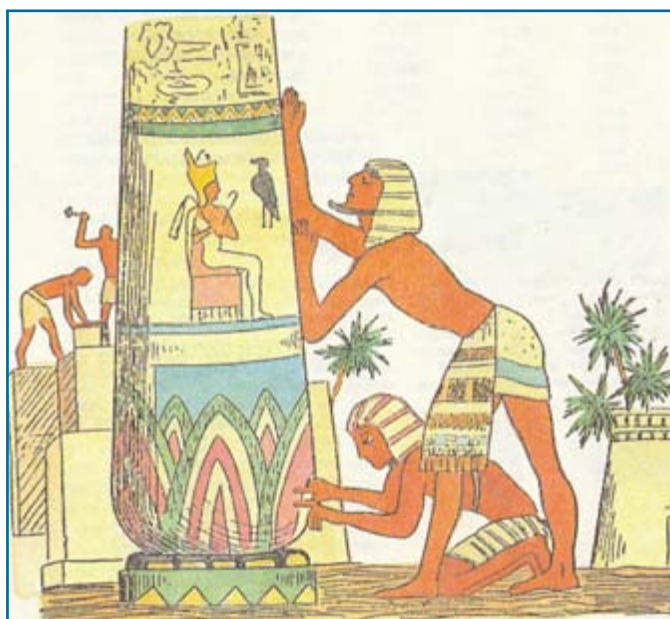
1. Третьяков Ю.Д. Процессы самоорганизации в химии материалов // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 8. С. 731–763.



## ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

### (Measure units)

«Семь раз отмерь, один отрежь».  
Русская пословица



С давних времен человек старался определить параметры окружающих его природных и искусственных объектов и выразить их в определенных единицах. При этом единицы измерения выдумывали «кто во что горазд», например в Междуречье и Древнем Египте линейные размеры предметов измеряли не привычными нам сегодня метрами – там были приняты такие еди-

ницы, как палец, ладонь, локоть, шаг. В Древней Руси массу твердых и сыпучих тел мерили пудами, в Америке – унциями, а объем выражали в пинтах. Локти, аршины, галлоны, караты – все это несистемные единицы измерения, стандартизовать которые удалось только с развитием метрологии (см. [Нанометрология](#)).

Ежедневно мы сталкиваемся с огромным количеством окружающих нас объектов: здания, машины, деревья, книги, одежда и т.д. – все они очень разные, но совершенно привычные для нас, поэтому мы можем легко их описать, примерно оценивая размеры, массу и другие характеристики. Например, ширина обычного альбомного листа составляет около 30 см, стакан чая имеет объем 200 мл, а мобильный телефон в среднем весит около 200 г. Сегодня ни для кого уже не является секретом тот факт, что весь окружающий нас мир состоит из структурных элементов более мелких, чем заметные человеческому глазу. Поэтому было бы интересно оценить величины, в которых выражаются те или иные характери-

Тип частицы	Линейные размеры	Масса	Объем	Электростатическая емкость*	Электростатическая энергия заряжения
Кластеры (~30-500 атомов)	$1-5 \cdot 10^{-9} \text{ м} =$ $= 1-5 \text{ (нм)}$ нанометра	$1-100 \cdot 10^{-21} \text{ г} =$ $= 1-100 \text{ (зг)}$ zeptogram	$\sim 10^{-24} \text{ л} =$ $= \sim 1 \text{ (ил)}$ yoctoliter	$10^{-19}-10^{-18} \text{ Ф} =$ $= 0.1-1 \text{ (аФ)}$ attofarad	$\sim 0.1-0.3 \text{ эВ}$ электронвольт
Наночастицы (~500-1000000 атомов)	$5-100 \cdot 10^{-9} \text{ м} =$ $= 5-100 \text{ (нм)}$ нанометра	$1-100 \cdot 10^{-15} \text{ г} =$ $= 1-100 \text{ (фг)}$ femtogram	$\sim 10^{-21} \text{ л} =$ $= \sim 1 \text{ (зл)}$ zeptoliter	$10^{-18}-10^{-17} \text{ Ф} =$ $= 1-10 \text{ (аФ)}$ attofarad	$\sim 0.05-0.1 \text{ эВ}$ электронвольт

\* – рассчитано по формуле для уединенного сферического конденсатора

ки этих элементов, и в частности размер, масса и объем *наночастиц*.

Проще всего дело обстоит с линейными размерами – уже из самого понятия «наночастицы» вытекает, что ее размер не превышает в среднем 100 нм, в чем наглядно позволяют убедиться *электронная микроскопия* и *сканирующая зондовая микроскопия*. Исходя из того, что 1 атом-

ная единица массы (а.е.м.) равна  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г, зная линейные размеры объекта, нетрудно оценить массу и объем кластеров и наночастиц, содержащих разное количество атомов (см. таблицу). С момента изобретения самых чувствительных в мире *нановесов* теоретическим расчетам массы наночастиц появились строгие экспериментальные подтверждения.

#### Л и т е р а т у р а:

1. Деньгуб В.М., Смирнов В.Г. Единицы величин: Словарь-справочник. М.: Издательство стандартов, 1990. 240

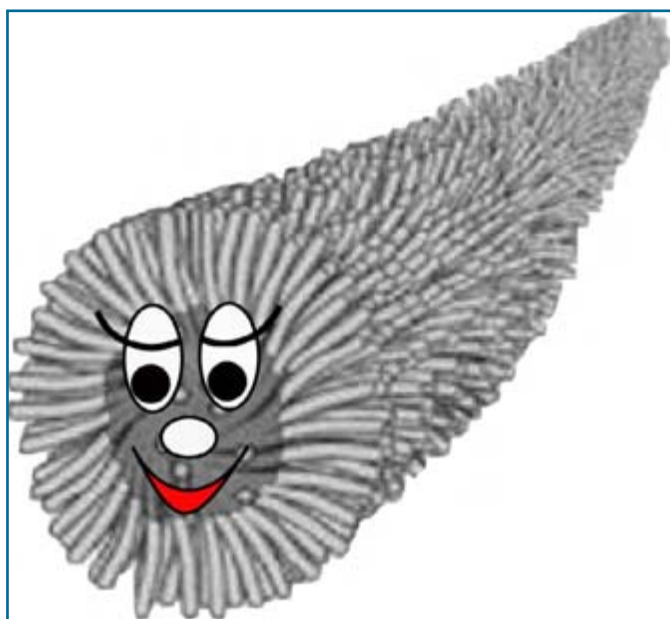


## ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

### (Liquid crystals)

*«В химии чудес немало.  
Мог ли кто-то предсказать,  
Что когда-нибудь КРИСТАЛЛЫ  
Можно будет НАЛИВАТЬ?»*

*Е.А. Померанцева*



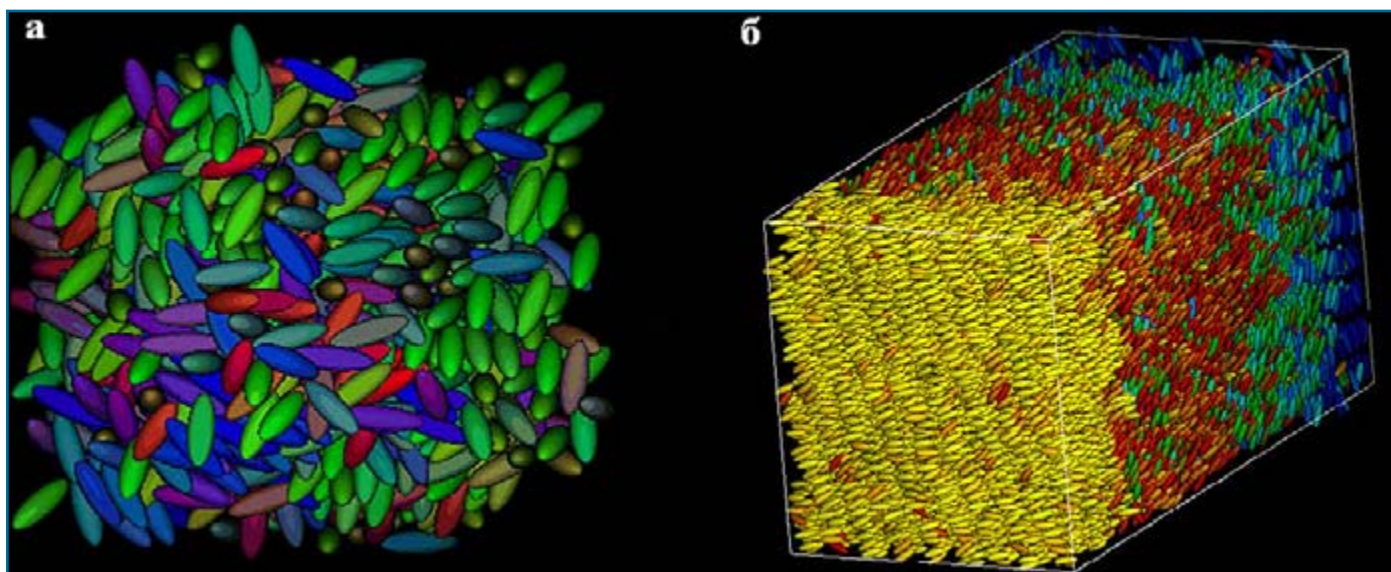
Чем жидкость отличается от кристалла и в чем смысл понятия *жидкий кристалл*? Давайте попробуем разобраться. Если вы посмотрите определение жидкости в словаре, окажется, что жидкость – это агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым телом и газом. Жидкие тела текучи, не обладают определенной формой, могут образовывать свободную поверхность и стремятся сохранить свой объем. В жидкостях атомы не имеют определенного положения, но в то же время им недоступна полная свобода перемещений. В кристаллах же, наоборот, характерно закономерное расположение атомов в периодической кристаллической решетке твердого тела. Так как же совместить два противоположных свойства в одном веществе?

Оказывается, такое возможно, если упорядочить в пространстве молекулы амфифильных веществ (которые, как правило, имеют вытянутую или дискообразную форму), но при этом не связывать их в жесткий каркас, а оставить возможность коллективно перемещаться вдоль какого-либо из направлений. Такую систему можно сравнить с потоком бревен, сплавляемых по реке: в целом они все выстроены в одном направлении, по течению, хотя каждое бревно плывет само по себе\*. В таком потоке все бревна-молекулы будут обладать определенной ориентацией, но полный порядок в расположении их центров тяжести будет отсутствовать (рис. 1). Именно такую структуру и имеют жидкие кристаллы. Как и любая жидкость, они обладают текучестью и способностью к каплеобразованию, и вместе с тем, подобно обычному кристаллу, характеризуются упорядочением в пространстве образующих его молекул.

Такого упорядочения достаточно для того, чтобы жидкие кристаллы проявляли необычные механические, магнитные, но, что еще более важно, аномальные электрические и оптические свойства.

Считается, что жидкие кристаллы открыл в 1888 году австрийский ботаник Фридрих Рейнитцер, изучавший роль холестерина в растениях. Нагревая синтезированное им твердое вещество холестерилбензоат, он обнаружил, что при температуре ~145 °С кристаллы плавятся и образуют мутную, сильно рассеивающую свет

\* Меткое сравнение доктора химических наук Ю. Евдокимова.



**Рис. 1.** Схематическое представление (а) изотропной среды (жидкость, свойства которой во всех направлениях одинаковы) и (б) анизотропной среды (жидкий кристалл, ориентационное упорядочение)

жидкость, ныне называемую жидким кристаллом, которая при дальнейшем нагревании ( $\sim 179^\circ\text{C}$ ) становится совершенно прозрачной. Почти все жидкие кристаллы, обнаруженные на сегодняшний день, представляют собой органические соединения; однако далеко не все органические вещества могут находиться в жидкокристаллическом состоянии.

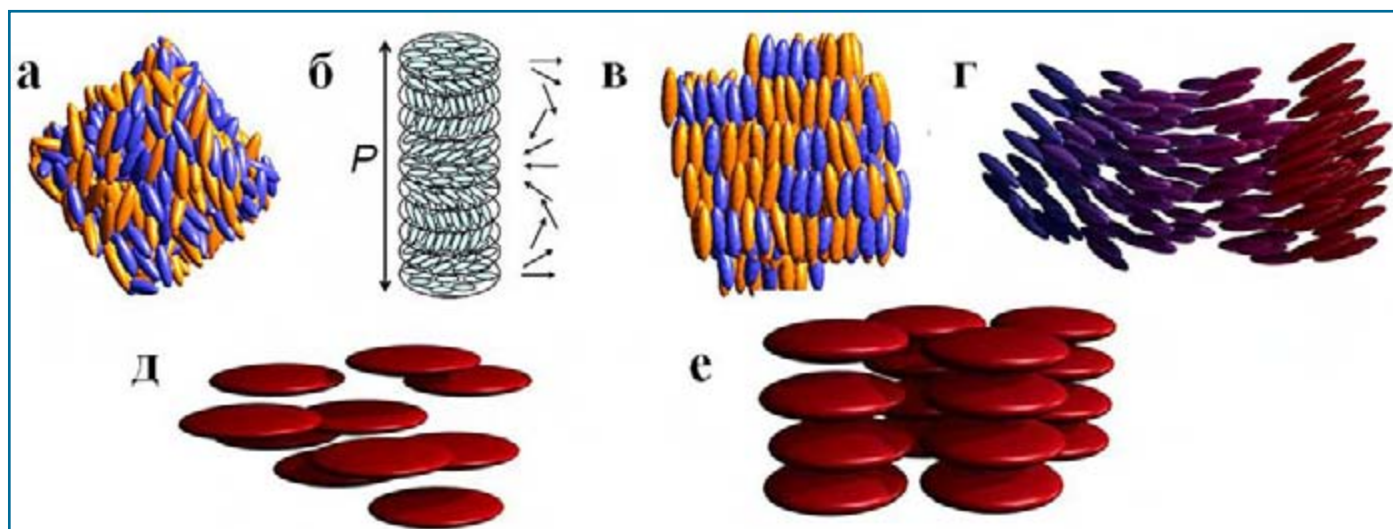
В зависимости от способа получения жидкие кристаллы можно разделить на термотропные и лиотропные. К первому типу относятся вещества, получаемые нагреванием кристаллической фазы (как, например, нагревание холестерил-бензоата). Лиотропными называют жидкие кристаллы, которые получают при растворении некоторых веществ в контролируемом количестве растворителя (например, воды). Существует два класса термотропных жидких кристаллов: нематические и смектические. Разновидностью нематических являются холестерические кристаллы.

Нематические жидкие кристаллы характеризуются наличием ориентационного порядка, но отсутствием позиционного (т.е. центры масс молекул расположены беспорядочно, и молекулы могут свободно вращаться вокруг своей продольной оси). Их можно сравнить с карандашами в коробке: каждый карандаш может вращаться и скользить вперед и назад, но все вместе карандаши должны оставаться практически параллельны друг другу (рис. 2а).

Холестерики (или хиральные нематики, получившие свое название от вещества холестерина, которого очень боятся люди, не соблюдающие диету) имеют слоистую структуру, в которой ориентация молекул каждого последующего слоя несколько развернута относительно предыдущего. Они характеризуются расстоянием ( $P$ ), за которое ориентационный вектор совершит оборот в  $360^\circ$  (рис. 2б). Для многих холестерических жидких кристаллов это расстояние сравнимо с длиной волны видимого света, что крайне важно для формирования оптических свойств. Например, нагрев жидких кристаллов этого типа на десятые доли градуса незначительно изменяет угол поворота соседних слоев молекул, однако это небольшое изменение приводит к тому, что изменяется угол вращения плоскости поляризации отраженного света, и холестерик изменяет свой цвет. На этом основано, например, использование холестерических жидких кристаллов в детских «налобных» термометрах, которые были какое-то время очень популярны в Японии.

Смектические жидкие кристаллы (от греч. *смегма* — мыло) характеризуются как ориентационным, так и позиционным порядком (рис. 2в). Молекулы размещаются так, чтобы их оси были параллельны, образуя слоистую структуру. Слои могут скользить друг по другу, а каждая из молекул двигаться в двух измерениях: скользить вместе со слоем и вращаться вокруг





**Рис. 2.** Типы жидкокристаллических систем: а – нематические, б – холестерические (хиральные нематические), в – смектические, г – хиральные смектические, д – дискоидные нематические, е – дискоидные колоннообразные

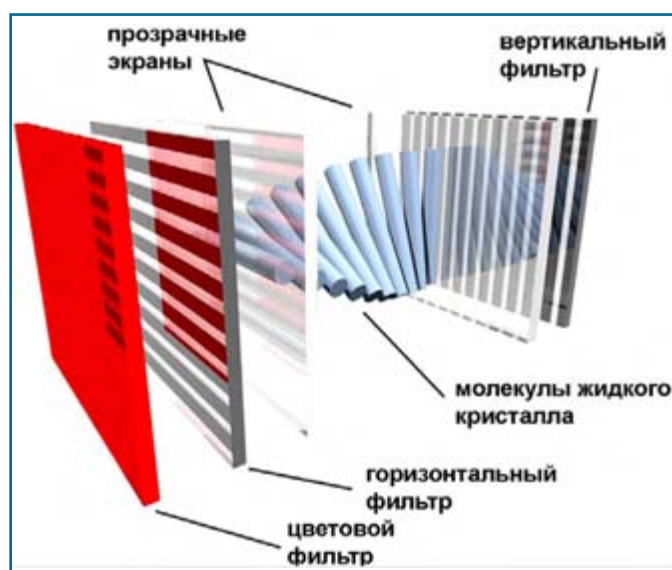
своей продольной оси. Выделяют также хиральные смектические жидкие кристаллы, у которых продольные оси молекул одного слоя повернуты на небольшой угол относительно молекул соседнего слоя (рис. 2г). Кроме того, существуют дискоидные жидкие кристаллы (образующие их молекулы имеют дискообразную форму). Дискоидные нематические фазы (рис. 2д) состоят из одинаково ориентированных дисков, но у них отсутствует позиционный порядок; дискообразные молекулы также могут выстраиваться в колонны (рис. 2е).

Долгое время считалось, что с точки зрения практического применения жидкие кристаллы не обладают никакими полезными свойствами. Однако было замечено, что жидкие кристаллы способны изменять направление поляризации проходящего через них излучения, практически не поглощая его, поэтому свое первое применение они нашли в дисплеях для калькуляторов и электронных часов, а затем их стали использовать в мониторах для портативных и настольных компьютеров, а также телевизоров.

Для создания жидкокристаллических мониторов (рис. 3) наиболее активно используют нематические жидкие кристаллы. Так, известное англоязычное обозначение ЖК-мониторов STN означает *supertwisted nematics*, то есть «суперперекрученные нематики», и их действительно перекручивают! Свет от лампы-подсветки про-

ходит через специальный фильтр, размещенный с тыльной стороны монитора, и поляризуется. С фронтальной стороны монитора также расположен поляризационный фильтр, который повернут относительно первого на  $90^\circ$  и поэтому не пропускает свет от первого фильтра.

Если бы между фильтрами не было никаких жидких кристаллов, то монитор всегда оставался бы темным. Однако в ЖК-мониторе есть также два прозрачных электрода с параллельными рядами бороздок на их поверхности, вдоль которых легко ориентируются приповерхностные слои жидкого кристалла. При этом бороздки на



**Рис. 3.** Схема жидкокристаллического экрана

противоположных электродах, как и фильтры, перекрещены, поэтому нематики перекручиваются электродами (если помните, они состоят из ориентированных нитей). А это приводит к тому, что перекручивается и плоскость поляризации света, идущего от первого фильтра. Ко второму фильтру свет приходит с другой поляризацией и уже может выйти наружу – монитор начинает светиться. Остается только научиться управлять ориентацией молекул жидкого кристалла, что делают путем приложения электрического потен-

циала между электродами, изменяющего светимость точки-пикселя. Если к этому добавить три цветовых фильтра (красный, зеленый, голубой, так называемая схема RGB, Red-Green-Blue), то можно легко смешивать цвета, формируя гаммы из тысяч и даже миллионов цветов.

В нанотехнологиях жидкие кристаллы очень часто используют в качестве темплатов, или шаблонов, для создания упорядоченных наноструктур, например мезопористых систем, наноструктурированных электродов и т.д.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Жидкие кристаллы / Пер. с англ. С. Чандрасекар. 1980. 344 с.
2. <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/textbook.htm>



## ЖУРНАЛЫ ПО НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

### (Journals on nanotechnology)

«Чем только не занимаются люди!»

И. Ильф и Е. Петров

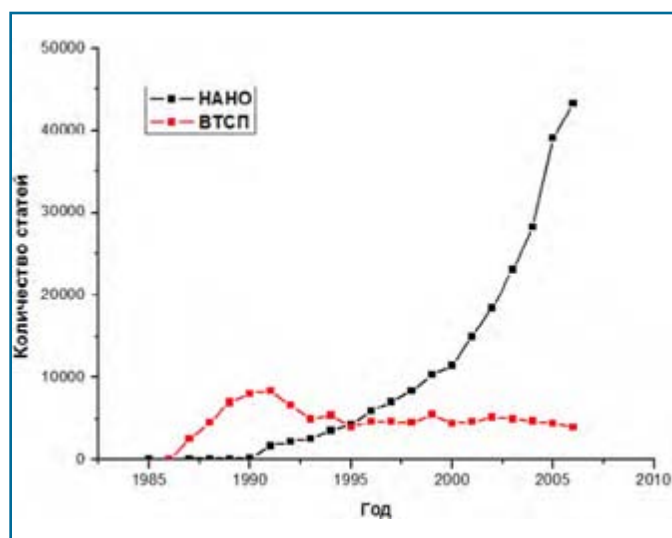


Каждое вновь появляющееся научное направление сопровождается интенсивными исследованиями и всплеском научных публикаций в виде журнальных статей, монографий, сборников и т.п. Так было после открытия высокотемпературных сверхпроводников, так было после псевдооткрытия холодного термоядерного синтеза, так происходит и в наши дни – дни повального увлечения работами в области наноматериалов и нанотехнологий.

На рис. 1 явно прослеживается экспоненциальный рост числа публикаций по тематике «напо...» в последнее двадцатилетие, причем наиболее заметным этот рост стал в начале 90-х, после открытия углеродных наноструктур (фуллерены, нанотрубки и др.). Заметим, что максимум публикаций по тематике высокотемпературной сверхпроводимости, приходящийся на 1991 г. (порядка 8000 статей), не идет ни в какое срав-

нение с тем, что мы сегодня наблюдаем по нанотематике.

Где же публикуются основные статьи по наноматериалам и нанотехнологиям? Назвать все журналы, публикующие статьи по нанотематике, а их более 400, невозможно. В первую очередь исследователи стараются представлять свои результаты научной общественности в таких традиционных и высокорейтинговых журналах, как «Physical Review B», «Journal of Applied Physics», «Applied Physics Letters», «Langmuir», «Advanced materials», «Chemistry of Materials», «Journal of Materials Chemistry», «Journal of Materials Science», «Materials Letters» и др. Затем в новых или относительно новых журналах, специализирующихся на нанотематике. Их сегодня свыше



**Рис. 1.** Темпы роста числа публикаций по тематике нанотехнологий и наноматериалов и по высокотемпературной проводимости

50. Назовем лишь наиболее популярные – «Nature Nanotechnology», «Nano Letters», «Nanotoday», «Small», «Nanotechnology », «Nano», «Journal of Nanoparticle Research», «NanoEthics», «NanoNow», «Journal of Experimental Nanoscience» и др.

Что же касается нашей страны, то мы тоже не остались в стороне от общемировых тенденций. В нашей стране выходят такие журналы, как «Наноиндустрия», «Нано- и микросистемная техника», «Нанотехника», «Российские нанотех-

нологии», а в Украине на русском и английском языках издается журнал «Наноструктурное материаловедение».

Понятно, чтобы достичь мирового уровня исследований (и оставаться на нем) отечественные ученые, помимо экспериментальной базы, должны получить возможность своевременно и регулярно иметь доступ если уж не к жестким копиям, то хотя бы к электронным библиотекам.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурированные материалы. М.: Академия, 2005. С. 180.
2. [www.webofscience.com](http://www.webofscience.com)

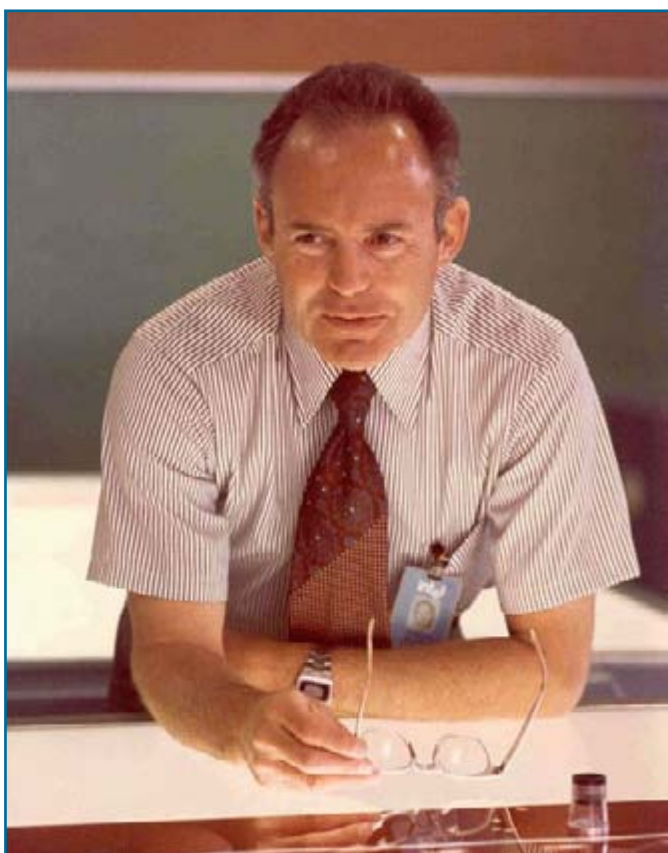


## ЗАКОН МУРА

### (Moore's law)

*«...Еще любопытно, который из законов испустит дух прежде – закон Мура, закон о всеобщей воинской обязанности или закон всемирного тяготения? ...»*

*с сайта [www.computerra.ru](http://www.computerra.ru)*



В одном из выпусков журнала «Electronics» за 1965 г. в разделе «Эксперты смотрят в будущее» была опубликована ставшая теперь легендарной статья Гордона Мура (Gordon Moore), в которой один из будущих основателей корпорации Intel дал прогноз развития микроэлектроники на ближайшие десять лет, предсказав, что количество элементов на подложках интегральных микросхем будет ежегодно удваиваться.

Интересно, что сорок лет назад, когда Мур сделал свое предсказание, микроэлектроника пребывала на самой начальной стадии своего

развития: первый транзистор был создан в 1947 г., а первая микросхема заработала в 1958 г., причем в 1965 г. в самой сложной микросхеме было всего лишь 64 транзистора. Поэтому к заслугам Мура следует отнести способность предвидеть темпы развития микроэлектроники, которые в то время казались недостижимыми.

Подтвержденное в последующие годы, это предсказание получило название закона Мура, хотя в отличие от законов Ньютона, Ома и др., строго говоря, таковым не является. Тем не менее, хотим ли мы этого или нет, прогресс компьютерной отрасли в течение следующих 10 лет следовал закону Мура. Позднее (в 1975 г.), учитывая возросшую сложность интегральных схем, Мур скорректировал свое предсказание, предположив, что удвоение числа транзисторов в чипах будет происходить медленнее – каждые два года. И хотя вначале предсказанный темп соблюдался, действительность превзошла ожидания – в наши дни число транзисторов в чипах удваивается каждые 18 месяцев.

Все вышесказанное хорошо иллюстрируется на примере увеличения емкости микропроцессоров, выпущенных всем известной корпорацией Intel. Помимо увеличения плотности транзисторов в процессоре наблюдается экспоненциальный рост частоты процессоров (рис. 1).

По подсчетам того же Мура, мировое производство транзисторов в 2003 г. достигло 1019, а себестоимость их производства в микросхемах упала настолько, что теперь один транзистор обходится примерно во столько же, сколько стоит напечатать любой типографский знак в газете – например, запятую.

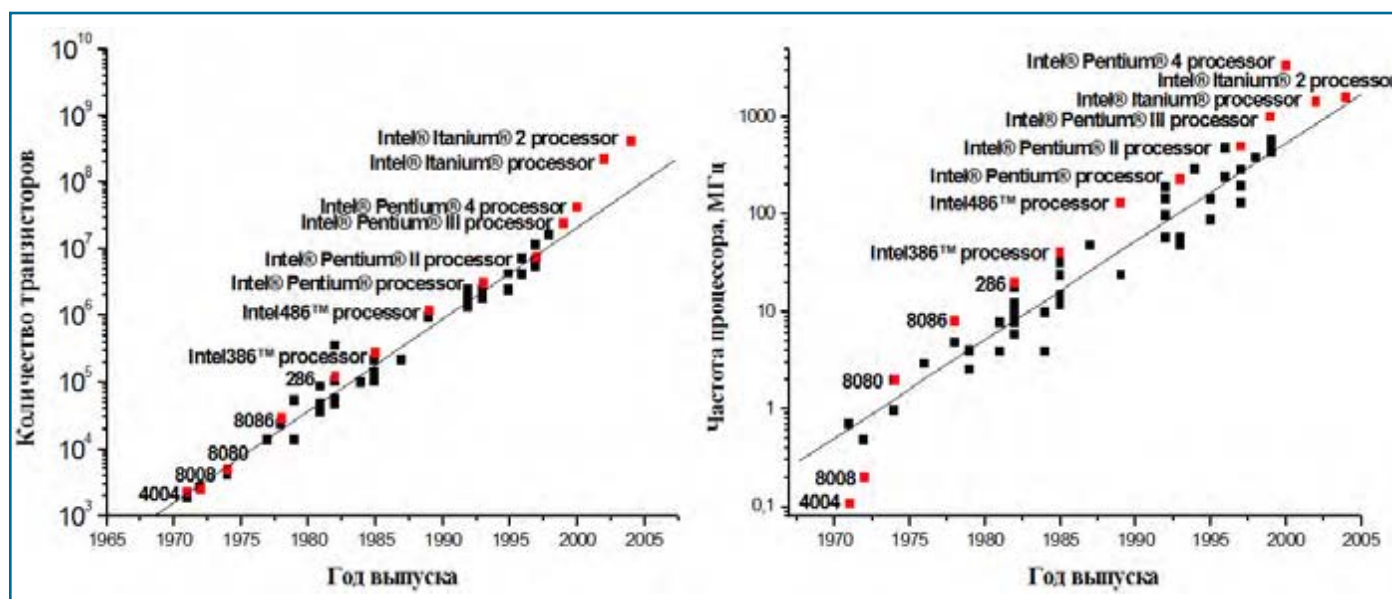


Рис. 1. Темпы увеличения плотности транзисторов и частоты процессоров Intel

Кстати, для информационных технологий характерен еще ряд интересных закономерностей, которые иногда называют вторым, третьим и т.д. законом Мура. Так, например, стоимость строительства современной микроэлектронной фабрики (в силу усложнения технологии производства микросхем при все большей их миниатюризации) удваивается каждые три года и к 2010 году может достичь фантастической суммы – 50 миллиардов долларов. Интересно также, что в последние 20 лет технологии производства микросхем сменяют друг друга с периодичностью раз в два года, причем эта смена сопровождается двукратным уменьшением площади, занимаемой схемотражающим элементом (например, транзистором) на подложке, т.е. линейные размеры элемента уменьшаются на 30%. Аналогичные закономерности наблюдаются в информационных технологиях в целом. Так, емкость жестких дисков удваивается каждые 15–18 месяцев, а скорость записи и считывания информации на магнитные и оптические устройства хранения информации возрастает на порядок за 8–10 лет.

До настоящего времени быстродействие вычислительной техники увеличивалось за счет увеличения плотности размещения транзисторов, т.е. уменьшения их размеров. В настоящее

время наибольшее распространение имеют 130-нанометровые (2001 г.) и 90-нанометровые (2003 г.) технологии. Созданы прототипы и разрабатываются технологические процессы создания микросхем на основе 20-нм технологий. В 2007 году предполагается начать производства микросхем по 45 нм, а в 2009 – 32 нм-технологиям. Однако при дальнейшем уменьшении размеров элементов микропроцессора производители сталкиваются с некоторыми проблемами. Достаточно быстрое уменьшение размеров полупроводниковых транзисторов приведет к тому, что через 15 лет размер транзистора достигнет того предела, что он не сможет работать. Да и представить себе транзистор размером всего в несколько атомов достаточно проблематично.

Но не все так безнадежно, как кажется. Уже растет смена современной кремниевой технологии – разрабатываются диоды и переключатели на основе отдельных молекул (см. *Молекулярная электроника*), появляются первые *одноэлектронные транзисторы*, разрабатываются новые алгоритмы вычислений и реализуются проекты по созданию *квантовых компьютеров* – устройств, работающих на коллективной логике, о которых также можно узнать из этой книги.

#### Литература:

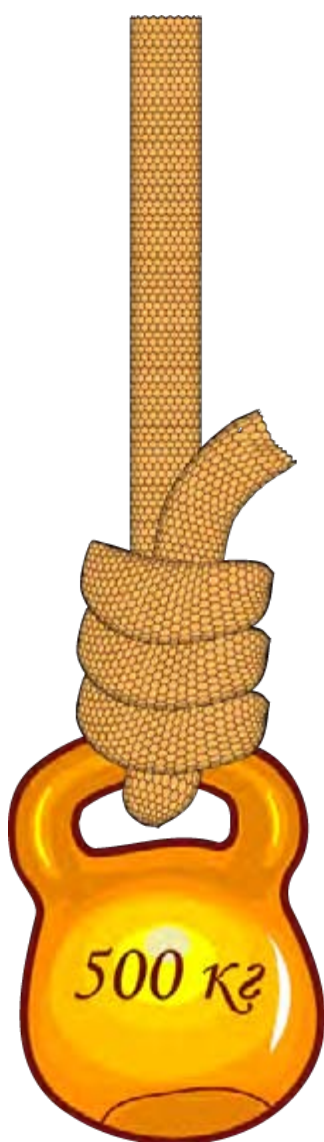
1. А. И. Карабуто А. Сорокалетие закона Мура и интервью с его автором. (<http://www.ferra.ru/online/market/25856/>)



## Закон Холла–Петча. Наномеханика (*Nanomechanics*)

*«Где тонко, там и рвется».*

*Поговорка*



Легко ли сломать или разорвать стальной стержень? Если взять калькулятор и посчитать теоретическую прочность материала на разрыв, приняв в расчет энергию его химических связей, вы получите значения, намного превосходящие действительную прочность изделий. Так что же на самом деле происходит при приложении нагрузки, и почему так сильно различаются экспериментальные и теоретически рассчитанные значения прочности? Оказывается, при механическом напряжении материалы ведут себя согласно поговорке «где тонко, там и рвется», и в данном случае «тонким звеном» оказываются места локализации дефектов, т.е. те области,

где нарушается непрерывная структура материала. Сравните, например, усилия, которые нужно приложить для того, чтобы сломать плитку обычного или пористого шоколада, свежесрубленную или сухую палку, обожженный или сырой кир-

пич. Именно благодаря дефектам мы можем разломить стекло по линии, проведенной стеклорезом, или открыть пакетик с соком или молоком по предварительно нанесенной перфорации.

Но что же происходит с материалом при переходе от объемного состояния к наноструктурированному? Что будет, если постепенно уменьшать толщину стержня, станет ли он еще более хрупким? Именно такой вопрос задал себе в 1920 г. сотрудник Авиационного исследовательского центра в Фарнборо А.А. Гриффитс и нашел на него ответ, проводя эксперименты со стеклянными стержнями и обнаружив неочевидную с первого взгляда закономерность: при уменьшении диаметра стержня его механическая прочность возрастала, причем значительно. Такое изменение прочности в зависимости от диаметра стержня связано с тем, что при уменьшении толщины дефекты структуры все легче и легче выходят на поверхность, приводя к образованию практически идеальной решетки. Все более и более прочность материала приближается к теоретической. Рекордсменами среди макроскопических объектов являются нитевидные кристаллы, их прочность в десятки раз превышает прочность и гибкость объемного материала. Пробовали ли Вы сплющить бабушкин бриллиант? И не пробуйте, в лучшем случае получите алмазный порошок! А вот алмазные «усы», выращенные в особых условиях, можно практически завязать в узел. При этом и в том, и в другом случае речь идет об одном и том же структурном состоянии углерода – алмазе. Получается, что «усы», а не крупные бриллианты, – самые совершенные из кристаллов!

Большинство наноструктур также практически не содержит дефектов, а для отдельных углеродных нанотрубок предел прочности на разрыв превышает 60 ГПа. Аналогичным образом было обнаружено, что прочность слоистых структур зависит от толщины отдельных слоев, а прочность некоторых объемных материалов – от размера образующих их зерен. Математически эта закономерность выражается в виде формулы, получившей название закона Холла–Петча, согласно которой твердость материала  $H$  возрастает при уменьшении размеров частиц по формуле

$$H(D) = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}}$$

в которой  $D$  – размер зерна,  $H_0$  – твердость тела зерна,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Однако не стоит думать, что безграничное уменьшение толщины стержня или размера зерен материала приведет к закономерному улучшению его механических свойств и достижению значений теоретической прочности. На самом же деле практически любой материал состоит из зерен, границы которых сами являются дефектами, по которым может происходить разрыв. Чем меньше размер зерен, тем меньше силы трения между ними и тем проще деформировать материал. В частности, при определенных размерах зерен (< 50 нм) керамика может переходить из прочного состояния в сверхпластичное, когда даже при небольшом нагреве и малых нагрузках можно деформировать (прессовать или вытягивать) материал без разрушения. Этот переход объясняется сменой механизма деформации – уже не происходит деформации зерен при нагрузке, а они начинают скользить вдоль межзеренных границ (зернограничное проскальзывание). Разумеется,

это расширяет технологические возможности. Так можно получить керамику с наноразмерными зёрнами, прессованием или формованием задать форму детали (обычная керамика может быть прочной, но хрупкой и разрушаться даже при малых деформациях), а потом отжигом увеличить размер зерен, придав материалу хорошие прочностные характеристики.

Уникальных прочностных характеристик можно достичь переходом от однородного объемного материала к анизотропным наноструктурам, размер которых по одному или двум направлениям лежит в нанодиапазоне, что дает возможность выхода дефектов на поверхность, сохраняя структуру и прочность монокристалла по другим направлениям. Примером таких нанообъектов являются *вискеры*, *нанонити* и *углеродные нанотрубки*. В связи с практически идеальной структурой и отсутствием дефектов, прочность нанотрубок близка к теоретической. Нанотрубку сложно разорвать как растягиванием, так и изгибом – при своей прочности они не являются хрупким материалом и могут быть согнуты более чем на 90° без излома.

Практическое использование уникальных механических свойств наноматериалов зачастую ограничивается их высокой стоимостью. Однако вовсе не обязательно изготавливать всю деталь из наночастиц – достаточно армировать удобный в применении материал прочными нановолокнами и нанотрубками, подобно тому, как, применяя стальные прутья – арматуру, увеличивают прочностные характеристики бетона (см. *Наноконкомпозиты*). Сегодня в продаже уже появились первые продукты нанотехнологической эры – компании Easton Sports и Babolat выпустили бейсбольные биты и теннисные ракетки, армированные углеродными нанотрубками.

### Литература:

1. Poole Ch.P., Owens F.J. Introduction in nanotechnology. John Wiley & Sons, Lnc 2003.



## Золь-гель ТЕХНОЛОГИЯ

### (Sol-gel technology)

«Молочная река, кисельные берега».  
Из русской народной сказки  
«Гуси-лебеди»

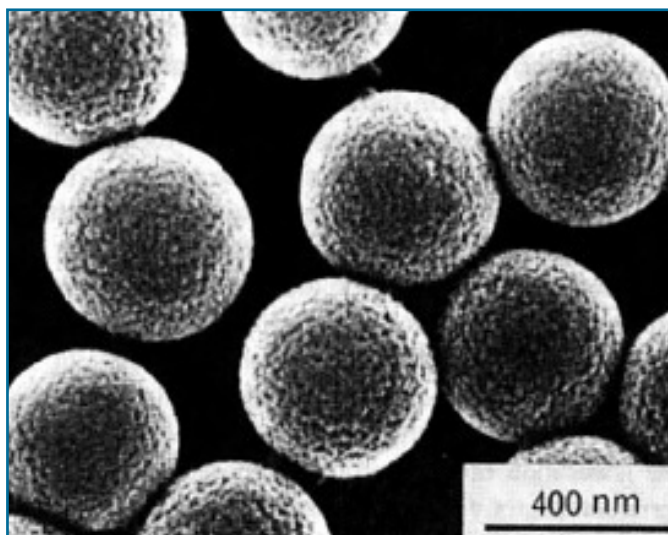


Наверное, в детстве мама или бабушка варила вам кисель? А знаете ли вы, что для этого она использовала золь-гель технологию? В нанотехнологии золь-гель метод применяется намного шире, чем в кулинарии. И если в киселе важно только то, чтобы он был вкусный, то при синтезе **наночастиц** необходимо контролировать огромное количество параметров – форму частиц, распределение по размерам и др.

Золь-гель технология – это один из способов получения наночастиц, основанный на синтезе «коллоидных частиц» неорганических и неорганано-органических гибридных материалов. Из таких коллоидных дисперсий можно получить **нанопорошки**, **нанонити**, **тонкие пленки** и неорганано-органические **нанокомпозиты**.



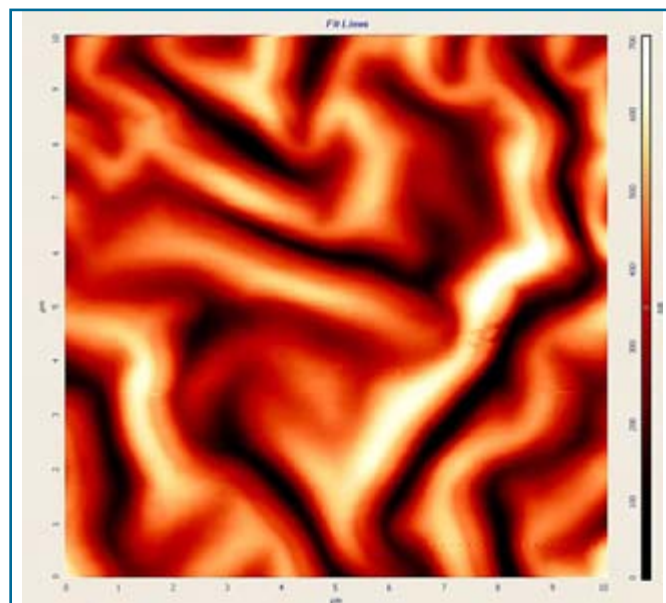
Рис. 1. Схематичное представление золь-гель процесса



**Рис. 2.** Частицы  $\text{SiO}_2$ , полученные с помощью золь-гель процесса

Схема золь-гель синтеза представлена на рис. 1. Начинают с того, что из однородного раствора, содержащего все необходимые ингредиенты (алкоксиды, органические и неорганические соли), добавлением специального вещества получают золь – стабильную суспензию наночастиц, которые плавают в растворе, не оседая на дно сосуда. Со временем частицы начинают слипаться и получается пространственный каркас геля, в пустотах которого остается растворитель. При высушивании геля образуются наночастицы и другие нанобъекты.

Преимуществами золь-гель технологии, как и многих других методов химической гомогенизации или «мягкой химии», являются низкие температуры процессов и гомогенность на молекулярном уровне, поэтому исполь-



**Рис. 3.** Тонкая люминесцентная пленка, полученная с помощью золь-гель технологии (осаждение на вращающуюся подложку, АСМ-изображение, ФНМ МГУ)

зование этой технологии особенно полезно для получения сложных оксидов металлов, неорганно-органических гибридных материалов, чувствительных к высоким температурам, метастабильных, люминесцентных, наноструктурированных, поверхностно-модифицированных материалов, мембран и т.д. (рис. 2, 3).

С помощью золь-гель технологии можно создавать такие интересные материалы, как аэрогели, обладающие чрезвычайно низкой плотностью, и ксерогели, характеризующиеся высокой пористостью и площадью поверхности (рис. 1). Золь-гель процесс применяют для создания покрытий, например для защиты от коррозии и создания просветленных стекол.

### Л и т е р а т у р а:

1. Третьяков Ю.Д., Метлин Ю.Г. Керамика — материал будущего. М., 1987.
2. Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications / Ed. Sumio Sakka, Springer, 2004. 1980 p.



## ИНВЕСТИЦИИ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

### (Investments in Nanotechnology)

*«Когда деньги есть, то идей полна голова, а когда денег нет, то идея одна – где бы занять».*

*А.С. Макаренко.*

*«Педагогическая поэма»*



Как и во многих сферах нашей жизни, в научных исследованиях финансирование решает многое, особенно если речь заходит о нанотехнологиях. Ведь электронный микроскоп, позволяющий разглядеть самые мелкие наночастицы, может стоить несколько миллионов долларов! А одним микроскопом не обойдешься – нанообъекты надо сначала получить, охарактеризовать их физические свойства.

Согласно известному журналу Science (Science. 2007. № 1), в 2007 году США инвестируют в исследования, связанные с изучением наноструктур и развитием нанотехнологий, око-

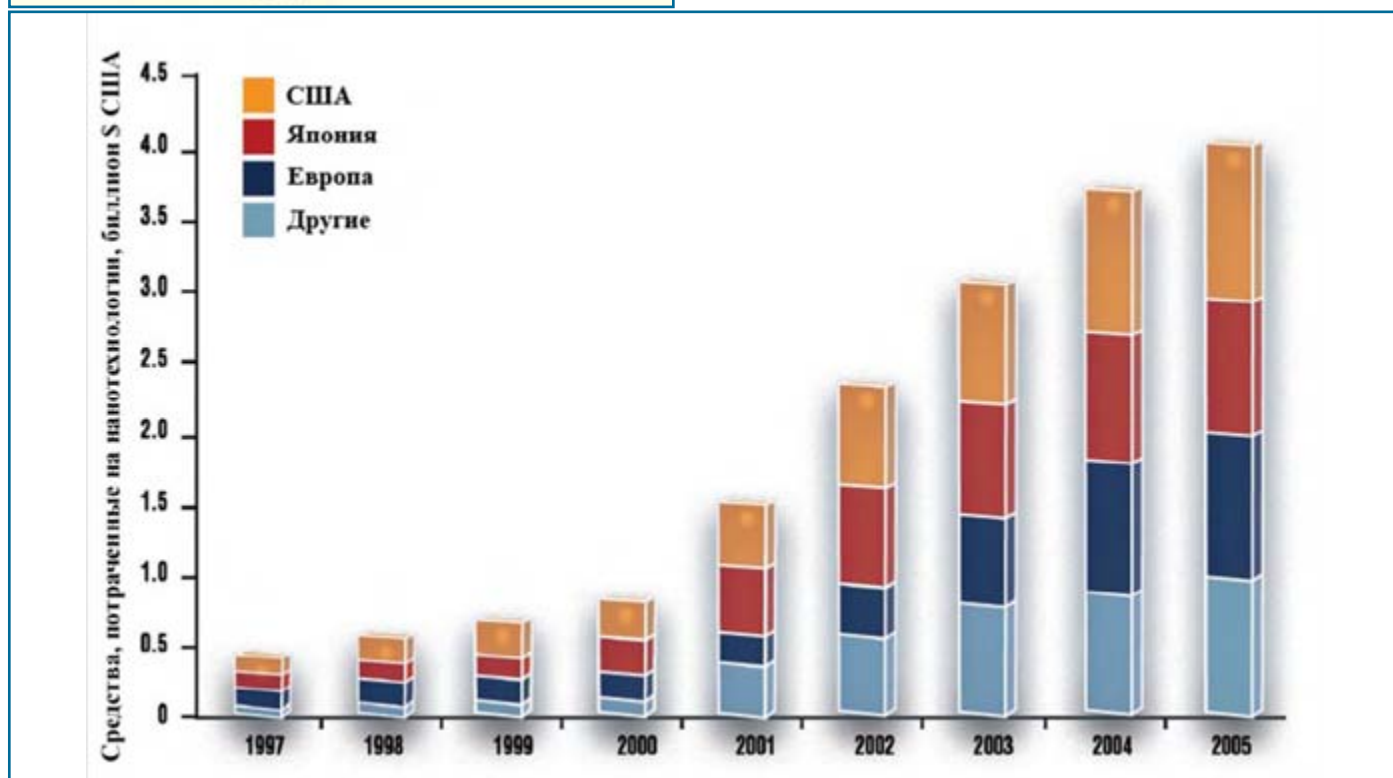


Рис. 1. Средства, потраченные из бюджета различных стран на нанотехнологии в 1997–2005 г.

ло 4 млрд долларов (с учетом финансирования национального научного фонда, министерства энергетики и других правительственных фондов), Япония – 3 млрд долларов, а страны Европейского союза примерно столько же, сколько и Япония. И это только бюджетные затраты, а частные инвестиции коммерческих организаций существенно превышают эти суммы. Ведь ведущие производители электроники, такие, как IBM, HewlettPackard, Hitachi, Lucent, Infineon, Mitsubishi, Motorola, NEC, имеют собственные программы по развитию нанотехнологии (см., например, статью «*Нанoeлектроника*»), которые финансируются из прибыли этих компаний.

Россия тоже наращивает объем средств, вкладываемых в нанотехнологии, хотя отставание от США, Европейского союза и Японии пока очень существенно. Только с 2008 года Россия принимает отдельную программу финансирования по

нанотехнологиям. Объем средств, которые планируется вложить в ближайшие три года – 180 млрд рублей, т.е. около семи миллиардов долларов. Ну а пока все это только в планах, ученые используют возможности других программ, например федеральной целевой программы с длинным, но емким названием «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (см. *Федеральная целевая программа*).

Сегодня уже очевидно, что государство в одиночку не может обеспечить достаточного финансирования, необходимого для развития нанотехнологий и внедрения их в производство. Поэтому требуется более широкое привлечение бизнеса, компаний как к финансированию научных нанотехнологических разработок, так и к формированию задач для ученых.

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://www.nsf.gov>
2. <http://www.fcntp.ru>



## ИНСТРУМЕНТЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ (Nanotechnology instruments)

«Все профессии важны,  
Все профессии нужны...»

Перефразируя С.Я. Маршака



Согласитесь, какой бы профессией вы ни занимались, вам всегда потребуется определенный набор специфических инструментов, без которых невозможно было бы добиваться желаемого результата – для художника это, как минимум, краски и кисти, для садовника – грабли, лопаты, для врача – шприцы, скальпели, термометры... А какие инструменты использует нанотехнолог, чтобы оперировать объектами, размеры которых составляют одну миллиардную – одну миллионную долю метра, существует ли для этого специальный наноинструментарий? В том, что такая специфическая «приборная база» должна быть, ни у кого не возникнет сомнений – чтобы просто визуализировать наночастицы, недостаточно разрешения оптического микроскопа. Чтобы, к примеру, препарировать клетки, нужны иглы в тысячу раз тоньше человеческого волоса, скальпели, заточенные до немыслимой остроты.

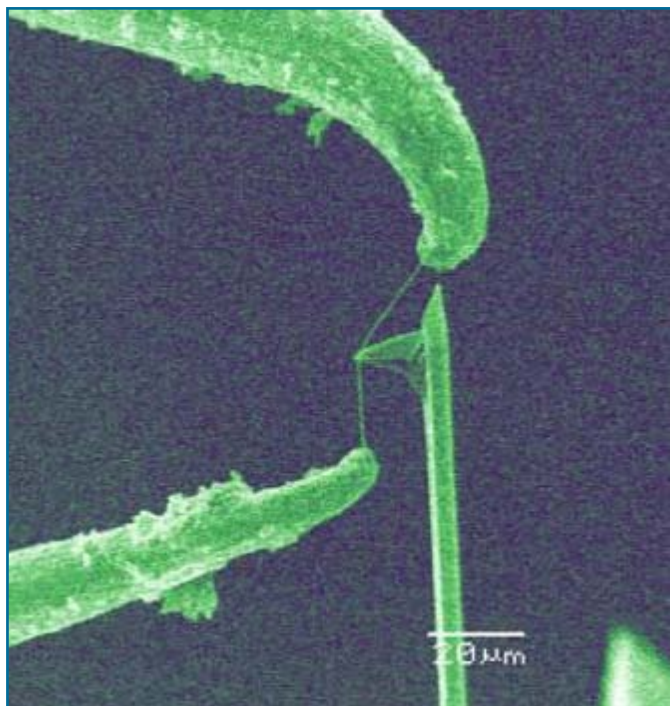
Недаром огромный прорыв в развитии нанотехнологий произошел лишь тогда, когда появилась возможность сначала «увидеть» наночастицы с помощью **электронного микроскопа**, а затем и «пощупать» их с помощью **сканирующе-**

**го зондового микроскопа**. Сегодня современные методы зондовой микроскопии позволяют не только изучать рельеф поверхности наноструктур, но и определять состав, атомную и магнитную структуру наночастиц и даже перемещать единичные атомы и молекулы (см. также **Системы нанопозиционирования**).

Благодаря открытию в 1991 г. новой модификации углерода – **углеродных нанотрубок**, обладающих необычной структурой и, как следствие, уникальными физическими и механическими свойствами, ученым удалось создать целый арсенал наноинструментов (наноскальпель, наношприц, **нанотермометр**, **нанопинцет**, **нановесы**), с которыми связывают большие перспективы в развитии **наномедицины**, микробиологии и новых подходов к созданию наноструктур методами **нанолитографии**.

Первыми в ряду наноинструментов стали нанопинцет, позволяющий углеродными нанотрубками, как китайскими палочками, «подцеплять» и, удерживая, перемещать отдельную крупную молекулу, а также **оптический пинцет**, осуществляющий аналогичные операции, но при помощи лазерного луча. Вслед за ними были разработаны самые чувствительные в мире нановесы, с помощью которых молекулу можно взвесить, и самый маленький нанотермометр, очень похожий на обычный медицинский градусник.

Следует сказать, что на создании нанотермометра ученые не остановились, и в 2006 году ученые из Института стандартов и технологий (NIST) и Университета Колорадо разработали наноскальпель (рис. 1), состоящий из **одностен-**



**Рис. 1.** Наноскальпель на основе одностенной углеродной нанотрубки

**ной углеродной нанотрубки**, натянутой между двумя вольфрамовыми иглами. С помощью такого прочного и острого ножичка под микроскопом можно производить вскрытие единичных клеток с более высокой точностью, чем это позволяют сегодня стеклянные микроскальпели, легко повреждающие исследуемые объекты такого размера.

И вот, наконец, уже в 2007 году американские исследователи из Drexel University сообщили о создании первого наношприца, способного до-



**Рис. 2.** Введение наношприца в клетку (в качестве иглы – углеродная нанотрубка)

зироованно вводить жидкие пробы через клеточные мембраны, не повреждая их (рис. 2). Идея шприца достаточно проста – надо лишь соединить углеродную нанотрубку, которая будет выступать в качестве иглы, и макроскопический стеклянный капилляр, являющийся резервуаром шприца. Легко сказать, да сложно сделать! Однако американским ученым удалось заполнить углеродную нанотрубку диаметром 200 нм магнитной жидкостью (см. [Наножидкости](#)), содержащей 10-нм частицы оксида железа, а потом с помощью магнитного поля частично ввести такую «магнитную» нанотрубку в канал стеклянного капилляра и герметизировать место стыка оптически клеем – наношприц готов.

Как видите, последнее десятилетие подарило нам много удивительных наноустройств и открыло головокружительные перспективы их использования. Ну что ж, теперь с нетерпением будем ждать первых нанохирургических операций!

### Литература:

1. Poole Ch.P., Owens F.J. Introduction in nanotechnology. John Wiley & Sons, Lnc, 2003.
2. Freedman J.R., Mattia D., Korneva G., Gogotsi Y., Friedman G., Fontecchio A.K. Applied Physics Letters. 2007. Vol. 90. P. 103108.



## -САЙТЫ О НАНОТЕХНОЛОГИЯХ (Nano\_Web)

---

*«О сколько нам открытий чудных  
Готовит просвещения дух...»*

*А.С. Пушкин*



В XXI веке Интернет является самым популярным источником информации о любой области человеческой деятельности, в том числе и о нанотехнологиях (рисунок из коллекции MicroSoft Office)

Любознательному человеку сегодня становится все проще и проще найти интересующую информацию по любому вопросу – чтобы прочитать редкую книгу или журнальную заметку, не обязательно бегать по библиотекам или редакциям – для этого, как правило, достаточно лишь «выйти» в Интернет, набрать в одной из многочисленных поисковых систем заветные ключевые слова и... получить «море» ссылок. Нанотехнологии сегодня становятся одной из самых модных и обсуждаемых тем в нашем обществе, поэтому не удиви-

тельно, что количество посвященных им сайтов растет такими же стремительными темпами, как и количество печатной продукции по данной тематике, а может даже быстрее. На русском языке нанотехнологические новости представлены на нескольких десятках общенаучных и специализированных порталов – выбор зависит от того, какие сведения требуется найти.

Сайт <http://www.nanometer.ru/> является на данный момент наиболее популярным и динамично развивающимся русскоязычным ресурсом. Организованный совместными усилиями Факультета наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова и компании Samsung, сайт объединил высококвалифицированных специалистов в области нанотехнологий, обеспечив тем самым высокий уровень размещаемых на нем материалов. Помимо последних новостей из мира нанотехнологий, на сайте публикуются аналитические обзоры, подготовленные сотрудниками МГУ, имеется обширная база данных российских научных коллективов, работающих в области нано. В июне 2007 года на базе сайта проведена Первая Всероссийская интернет-олимпиада по нанотехнологиям, в которой приняло участие свыше 1000 человек.

<http://www.nanonewsnet.ru> – первый по времени создания русскоязычный сайт о нанотехнологиях, поддерживаемый несколькими научными, исследовательскими и производственными организациями. Этот интернет-ресурс содержит новости, интервью известных деятелей в области нанотехнологий, обширный форум, архив из около тысячи научных и технических статей, предоставляет услуги по подготовке аналитиче-

ских материалов, а также сотрудничает с рядом других тематических сайтов.

Сайт <http://www.nanoenot.pisem.net> невелик по объему ресурсов, но позволяет найти весьма квалифицированную научную информацию, необходимую, чтобы сориентироваться в множестве нанотерминов. Здесь можно прочитать, например, о том, что представляют собой **углеродные нанотрубки**, **нанотранзисторы**, **квантовый компьютер**, а также около сотни других интересных и познавательных научно-популярных статей и заметок по нанотехнологиям, нанокomпьютерам и другим направлениям современной техники и технологии.

Итак, для первого знакомства с тем, что такое нанотехнологии, можно обратиться к сайту <http://www.nanoenot.pisem.net>; для того, чтобы найти и купить книги по **нанотехнологии**, советуем воспользоваться поисковыми системами <http://www.bookland.ru> или <http://www.bookman.ru>, объединяющими сеть интернет-магазинов; если интересуют новости по нанотематике, популярные публикации, обсуждения на форуме, заходите на <http://www.nanonewsnet.ru>, <http://www.nanometer.ru> или <http://www.nanorf.ru>.

Если вы уже подготовленный читатель и хотите узнать, какие научные публикации по данному направлению сейчас выходят в печать, посетите англоязычные сайты ведущих специализированных периодических изданий, например журналов «Nature Nanotechnology» <http://www.nature.com/nnano/index.html> или «Nano Today» <http://www.nanotoday.com> (см. также статью «**Журналы по нанотематике**»).

Стоит отметить, что знание английского языка резко расширяет поисковые возможности,

поскольку помимо специализированных журналов существует огромное множество высокопрофессиональных англоязычных сайтов, посвященных нанотехнологической тематике. Вот лишь некоторые из них (списки наносайтов можно найти также на <http://www.nanoenot.pisem.net> и <http://www.nanonewsnet.ru>):

<http://www.nanotech-now.com> — один из самых оперативных наноportалов с ежедневно обновляемыми профессионально написанными новостями для широкого круга пользователей;

<http://www.foresight.org> — сайт Института Предвидения (Foresight Institute), содержащий новости с американского континента, огромное число материалов и фундаментальных трудов по нанотехнологиям;

<http://www.nano.gov> — официальный сайт американского правительства, посвященный нанотехнологиям;

<http://www.nanowerk.com> — сайт с большим количеством новостей и собственными оригинальными публикациями, содержит также раздел, публикующий информацию о вакансиях в области нано;

<http://nanotechweb.org> — английский сайт Издательства института физики (Institute of Physics Publishing), делающий акцент на промышленное использование нанотехнологий;

<http://www.research.ibm.com> — исследования IBM в области нанотехнологий;

<http://www.nano.org.uk> — сайт английского Института нанотехнологий (The Institute of Nanotechnology). Конечно, это только капля в информационном море всемирной паутины, но, как говорится, кто ищет, тот всегда найдет...



# ИНТЕРНЕТ-ОЛИМПИАДА

## «НАНОТЕХНОЛОГИИ — ШАГ В БУДУЩЕЕ!»

### (e\_NANOΣ'07)

---

*Быстрее, выше, сильнее...*

*Олимпийский девиз*



Олимпиада – самое представительное, самое значимое, самое зрелищное соревнование современности. В древности на время олимпиад прекращались войны. Первые олимпиады состоялись в Греции, в 1980 году Олимпийские игры пришли в Москву, а в 2007 году в виртуальном пространстве была проведена первая Всероссийская Интернет олимпиада по нанотехнологиям «Нанотехнологии – шаг в Будущее!» (e-NANOΣ'07).

Интернет и нанотехнологии – близнецы-братья по значимости для развития человеческого сообщества в XXI веке, поэтому их симбиоз оказывается мощным и успешным. Интернет-олимпиада по нанотехнологиям, организованная Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова на портале [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru), стала интересным, но достаточно трудным со-

стыжением для ее участников, в упорной борьбе проверившим их знания, волю к победе и умение нестандартно мыслить в новой, междисциплинарной области наноматериалов и нанотехнологий. Более тысячи человек из России, Украины, Белоруссии, Азербайджана, Армении, Казахстана, Узбекистана, Германии, США, Швеции, Латвии, Израиля решились испытать свои силы. Только в России Олимпиада охватила Москву, Санкт-Петербург, Зеленоград, Екатеринбург, Новосибирск, Ростов-на-Дону, Саратов, Астрахань, Владивосток, Улан-Удэ и др. – всего около 70 городов и сел. Средний возраст участников не превышал 20,5 лет и охватывал самую активную часть всемирной компьютерной сети, при этом более половины участников составляли студенты, пятую часть – школьники, примерно столько же – аспиранты, менее десятой части – инженеры, менеджеры компаний и пр.

Все задания можно было решить дистанционно. Две недели участники олимпиады через Интернет решали 15 задач – от простых (объяснить, почему именно такую эмблему выбрали организаторы олимпиады) – до сложных (блиц-турнир из 30 каверзных вопросов и детективная история с разгадкой предыстории микрофотографий). Во время олимпиады участники должны были показать свои знания математики, способов получения, анализа и физических свойств различных **наноматериалов**. В этом проявилась естественная **междисциплинарность** нанотехнологий, основанных на знании химии, физики и математики. И даже понимание социальных аспектов нанотехнологий очень пригодилось участникам,



Победители Интернет-олимпиады «Нанотехнологии – шаг в Будущее!»

когда в качестве отдельного задания они писали художественное эссе на тему «За и против нанотехнологий», в котором должны были сначала доказательно похвалить, а потом раскритиковать выбранную тему. С этим заданием все справились хорошо, а двум участникам написать эссе удалось даже в стихотворной форме.

27 июня были подведены итоги Олимпиады, церемония закрытия которой проходила в зале Ученого совета МГУ под председательством ректора МГУ В.А. Садовниченко, в присутствии членов Российской академии наук, ученых, преподавателей, профессоров МГУ, представителей инновационных компаний, работающих в сфере нанотехнологий, а также средств массовой информации. Победители и призеры получили денежные премии и подарки от спонсоров в общей сложности на 200 тысяч рублей. Это были персональные компьютеры-коммуникаторы от

компаний Samsung и NT MDT, подписки на издания журнала «Наука и жизнь» за последние 16 лет, годовые подписки или комплекты журналов «Российские нанотехнологии», «Альтернативная энергетика и экология», «Нанотехника» и др. Но не в деньгах счастье! Главный результат – это новые знания и опыт, полученные участниками.

Первый заместитель председателя Правительства РФ С.Б. Иванов, президент Национальной академии наук Украины Б.Е. Патон, члены Российской академии наук и многие другие выдающиеся деятели науки и культуры, средств массовой информации пришли поздравить победителей лично или прислали свои поздравления по Интернету или с использованием устаревшего способа коммуникации – телеграмм. Похоже, Московскому университету удалось зародить новое олимпиадное движение. И это правильно...

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://www.nanometer.ru>
2. <http://www.msu.ru>

## КАНТИЛЕВЕР

### (Cantilever)

*«Сильные и могущественные не имеют того преимущества, какое есть у нежного и слабого».*

*Лао-цзы*

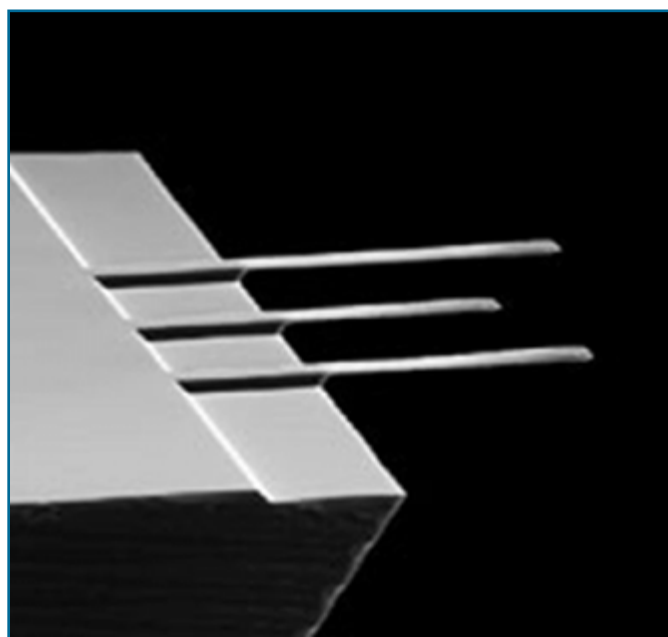


Кантилевер – консоль, кронштейн – одна из основных частей сканирующего зондового микроскопа. Представьте себе трамплин для прыжков в воду, но не для обычных людей, таких, как мы с вами, а для малюсеньких микрочеловечков, ноги которых в 10 раз тоньше человеческого волоса, – именно так выглядит кантилевер. С одной стороны, кантилевер – это всего лишь крошечная балка, толщина которой составляет от 0,1 до 5 мкм, ширина – от 10 до 40 мкм, а длина – от 100 до 200 мкм (рис. 1). С другой стороны, кантилевер является незаменимым помощником нанотехнолога. Только с его помощью ученые могут «ощупывать» поверхность и лежащие на ней отдельные молекулы, перемещать их, производить химические опыты со столь малыми количествами веществ, которые нельзя взвесить даже на самых точных лабораторных весах.

От длины, ширины, толщины, а также природы материала, из которого сделан кантилевер, зависит его жесткость. Чем кантилевер длиннее

и тоньше, тем легче он гнется. Можно сделать такой мягкий кантилевер, что с его помощью возможно будет надавить на поверхность с силой в одну миллиардную долю ньютона. Это в тысячу раз меньше, чем сила, с которой пылинка давит на стол, на котором она лежит!

Такие маленькие силы нужны в первую очередь в **сканирующих зондовых микроскопах**, которые «ощупывают» поверхность и могут отличить даже лежащие на ней отдельные молекулы. В этих приборах используются кантилеверы, на кончике которых расположена микроскопическая и очень острая иголка – зонд. Если бы кантилевер не мог хорошо гнуться, то при подводе его к исследуемой поверхности с помощью системы нанопозиционирования, зонд просто по-



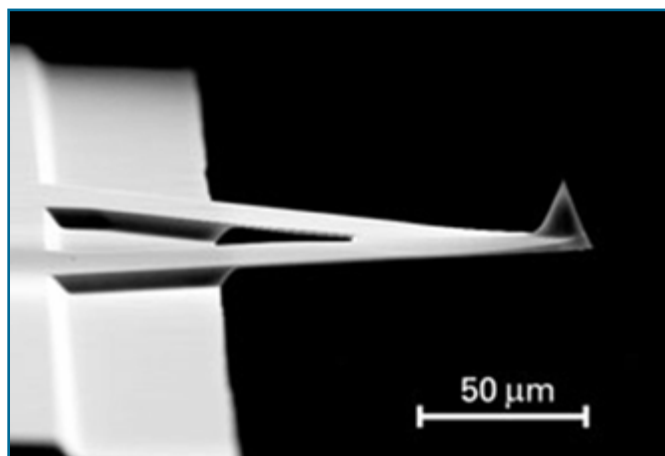
**Рис. 1.** Микрофотография трех кантилеверов разной длины



вредил бы поверхность, воткнувшись в нее. Но кантилевер всегда подбирают настолько мягким, чтобы при подводе к поверхности происходил его изгиб, а поверхность оставалась в целостности и сохранности. Величина отклонения или частота колебаний кантилевера определяется силой его взаимодействия с атомами или молекулами на поверхности исследуемого образца.

Промышленное производство кантилеверов основано на двух материалах — кремнии и нитриде кремния. Острия кантилеверов для **атомно-силовой микроскопии** (АСМ) также изготавливают из кремния, нитрида кремния или алмаза, а также используют покрытия TiN, W<sub>2</sub>C, Pt, Au или магнитных материалов Fe-Ni/Cr, Co/Cr, CoSm/Cr. Чтобы сделать столь маленькие детали, используют процессы литографии, химического и физического травления. Для улучшения светоотражающих свойств обратную сторону зонда АСМ обычно покрывают алюминием или золотом с помощью термического напыления в вакууме. Покрытие кантилевера пьезоэлектрической керамикой на основе цирконата-титаната свинца (Pb[Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>]O<sub>3</sub>, ЦТС или PZT) позволяет управлять движением кантилевера, прикладывая к контактам разность потенциалов, или непосредственно считывать частоту его свободных колебаний. Такие устройства находят сегодня широкое применение для разработки и создания **нанoeлектромеханических систем, систем нанопозиционирования, наноактюаторов, наносенсоров, нановесов** и т.д.

Геометрия кантилевера определяет важные механические свойства (в первую очередь, жесткость и резонансную частоту) и варьируется в



**Рис. 2.** V-образный кантилевер для атомно-силового микроскопа с пирамидальным зондом (фирма MikroMasch)

широких пределах. Ниже приведена формула, определяющая константу жесткости  $k$ :

$$k = \frac{Ewt^3}{4L^3}$$

где  $E$  — модуль Юнга материала кантилевера,  $w$  — ширина,  $t$  — толщина, а  $L$  — длина прямоугольного кантилевера. Жесткие кантилеверы применяются для модификации поверхности — используя алмазные иглы, можно делать гравировку и проводить наночеканку, выдавливая на поверхности крошечные рисунки (см. **Наноиндентер**). Кроме обычных прямоугольных кантилеверов, похожих на трамплин для прыжков воду, делают, например, V-образные кантилеверы (рис. 2), которые легко гнутся в перпендикулярном своей плоскости направлении, но практически не перекручиваются.

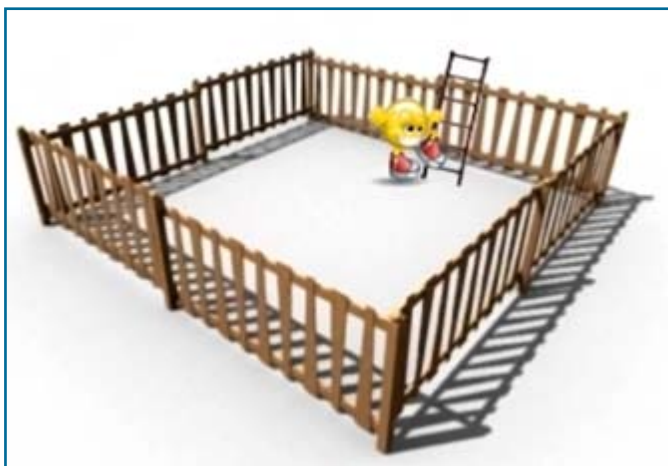
### Литература:

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Мир, 2004.

## КАТАЛИЗ (Catalysis)

«Если бы я желал выбрать одно единственное понятие, которое наиболее полно передает всю сущность химии, я предложил бы слово катализатор. Ни в какой другой области знаний нельзя найти эквивалент этого термина».

Ричард Зар, профессор химии  
Стэнфордского университета



Лестница (как катализатор) помогает молекуле преодолеть забор (потенциальный барьер)

Если бы не было препятствий на пути главных героев множества приключенческих книг, мы не зачитывались бы ими до середины ночи, с замиранием сердца ожидая, как же справятся с очередной трудностью персонажи книги. А ведь бывает и так, что на пути у них возникает высоченная стена, перелезть через которую не представляется никакой возможности. И приходится героям идти в обход, тратить свою энергию и время. А как было бы просто, если бы где-нибудь рядышком со стеной лежала лестница! С ее помощью можно было бы перебраться через стену, сэкономить энергию и добраться до цели гораздо быстрее! А лестницу можно оставить в неизменном виде у той же стены для следующей группы героев. В химии такой лестницей является катализатор.

Катализатором химии называют вещество, введение которого в реагирующую смесь даже в

небольшом количестве ускоряет (обычно довольно сильно) реакцию. При этом сам катализатор, хотя и включается в реакцию, но остается неизменным по окончании процесса. В ходе реакции катализатор помогает молекулам преодолеть потенциальный барьер, точно так же, как лестница помогает перебраться через стену или забор. Воздействие катализатора открывает новый реакционный путь, обычно с бóльшим числом стадий, на котором катализатор входит в состав активного комплекса, по крайней мере, на одной из стадий. При этом новый «путь» от реагентов

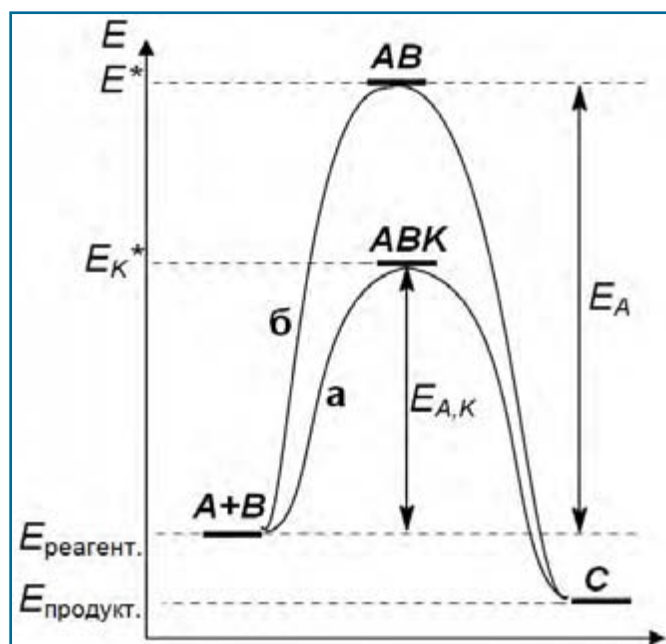


Рис. 1. Энергетическая диаграмма реакции типа  $A + B \rightarrow C$  с катализатором (а) и без катализатора (б)



Нобелевские лауреаты 2005 г. И. Шовен, Р. Граббс и Р. Шрок

к продуктам характеризуется меньшей высотой энергетического барьера, то есть меньшей энергией активации по сравнению с энергией активации некатализируемой реакции (рис. 1).

Различают положительный и отрицательный катализ, в зависимости от того, ускоряет катализатор реакцию или замедляет ее. Как правило, термин «катализ» отождествляют с ускорением реакции, при замедлении реакции каким-либо веществом говорят о ее ингибировании, а вещество называют ингибитором. По фазовому признаку различают гомогенный катализ – реакции в газах и растворах, гетерогенный катализ – реакции на границе раздела фаз (обычно это система твердое тело – газ), и микрогетерогенный катализ – катализ ферментами и коллоидами.

Биокаталитические процессы люди использовали с глубокой древности, например при приготовлении теста, брожении виноградного или фруктового сока для получения вина, брожении молочных продуктов для получения простокваши или сыра. Первую гетерогенную каталитическую реакцию наблюдал, видимо, Дж. Пристли. Пропуская пары этилового спирта через горячую глиняную курительную трубку, он обнаружил разложение спирта на этилен и воду. В начале XIX века было открыто каталитическое действие платины – главного катализатора для огромного числа реакций, а затем и других металлов. XX век ознаменовался разработкой промышленного использования каталитических процессов: это и процессы нефтепереработки (алкилирование,

гидрокрекинг, изомеризация, риформинг), и промышленный метод получения аммиака, и метод получения синтетического каучука и т.д. В 2005 году Нобелевская премия по химии была присуждена И. Шовену, Р. Шроку и Р. Граббсу за изобретение метода метатезиса – органических реакций перераспределения алкеновых связей, катализируемых наноструктурированными металлами (никель, вольфрам, рутений и молибден).

Если ферментативный катализ играет ведущую роль в химических превращениях в живой природе, то для большинства промышленных реакций основным является гетерогенный катализ. Принципиальное отличие гетерогенного катализа от гомогенного состоит в том, что стадии превращения предшествует стадия адсорбции, а свойства каталитически активных участков зависят от свойств поверхности твердого тела. Поэтому очевидно, что использование массивных материалов экономически невыгодно, поскольку большая часть атомов находится в объеме и недоступна реагирующим молекулам. Гораздо выгоднее и эффективнее использовать катализаторы на основе наноразмерных частиц. При этом большая часть атомов катализатора оказывается доступной реагентам (сфера радиусом 1 нм, составленная из атомов диаметром 0,2 нм, содержит только 20% атомов в объеме), и эффективность катализа возрастает в десятки раз! Однако важным остается вопрос о том, при каких размерах **наночастиц** начинают проявляться каталитические особенности наносостояния. В то время как компактное



золото является плохим катализатором, в наноструктурированном состоянии оно отлично катализирует ряд процессов – например, золото с размером частиц менее 10 нм обладает высокой каталитической активностью в реакциях окисления СО и метанола. Металлический палладий широко используется в гетерогенном катализе. В свою очередь, наночастицы Pd применяются в качестве катализаторов в виде дисперсий в жидких средах или закрепленными на поверхности подложек (носителей) различной природы, в том числе – внутри мезопористых носителей. Применение методов модифицирования наночастиц катализаторов открывает новые возможности их

использования. В последнее время в качестве лигандов, покрывающих наночастицы Pd, активно используются «дендримеры» различного состава. В частности, было показано, что изменяя периферию дендримеров, можно влиять на селективность катализируемых такими комплексами процессов. Еще одна развивающаяся область – биокатализ с участием «наночастиц» металлов. Например, установлено, что наночастицы Pd на поверхности бактерий являются гораздо более эффективными катализаторами по сравнению с химически приготовленными наночастицами тех же размеров, по крайней мере в процессе восстановления ионов Cr(VI) в сточных водах.

#### Л и т е р а т у р а :

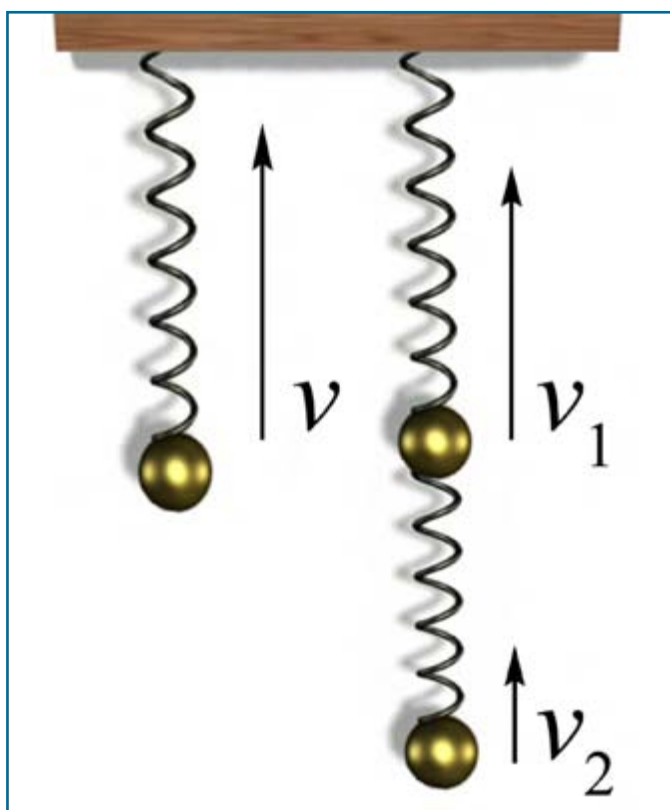
1. Кубасов А.А. Почему катализатор ускоряет химические реакции // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. №11. С. 59–66.
2. Темкин О.Н. Каталитическая химия // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 1. С. 57–65.

## *КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ*

### *(Quantum size effects)*

*«Человек должен верить, что непонятное можно понять; иначе он не стал бы размышлять о нем».*

*В. Гете*



Вспомните школьную задачу по физике: «На невесомой, неподвижно закрепленной пружине с коэффициентом упругости  $k$  подвешен шарик массой  $m$ . Шарик вывели из равновесия смещением по вертикальной оси. Определите частоту свободных колебаний маятника». Решением этой задачи является единственная частота, не зависящая от амплитуды колебаний шарика, потенциальная и кинетическая энергия которого однозначно связаны со смещением относительно положения равновесия. Если же к этому шарiku подвесить на пружине еще один, то они будут колебаться вместе, хотя из-за инерционности

(замедленной передачи энергии) пружины их ход несколько различается по фазе – каждый из шариков имеет свою потенциальную и кинетическую энергию в каждый момент времени. Бесконечная же последовательность из соединенных шариков и пружин, ввиду той же инерционности, колеблется по еще более сложной схеме, передавая вдоль цепочки своеобразную волну.

Аналогичная ситуация реализуется и в случае объединения атомов в кластер или в твердое тело. Электроны в изолированном атоме принимают лишь определенные значения энергий и находятся на определенных энергетических уровнях. При сближении двух атомов энергетические положения их внешних электронных подуровней несколько расходятся, образуя два отдельностоящих уровня. А при переходе от отдельного атома к макрокристаллическому твердому телу происходит формирование сплошных энергетических зон (с непрерывной совокупностью возможных значений энергии валентных электронов в кристаллах) (рис. 1). Положение и размер энергетических зон определяются силой связи атомов между собой (энергией кристаллического поля), так же, как период «бегущей» по цепочке волны в рассмотренном выше примере определяется коэффициентом упругости пружины. Промежутки между зонами в твердом теле называют запрещенными зонами или *энергетическими щелями*.

В отличие от макрокристаллических тел, в наночастицах число атомов весьма невелико ( $10^2$ – $10^6$ ), причем большая их часть составляет поверхность наночастицы. Если рассмотреть ко-

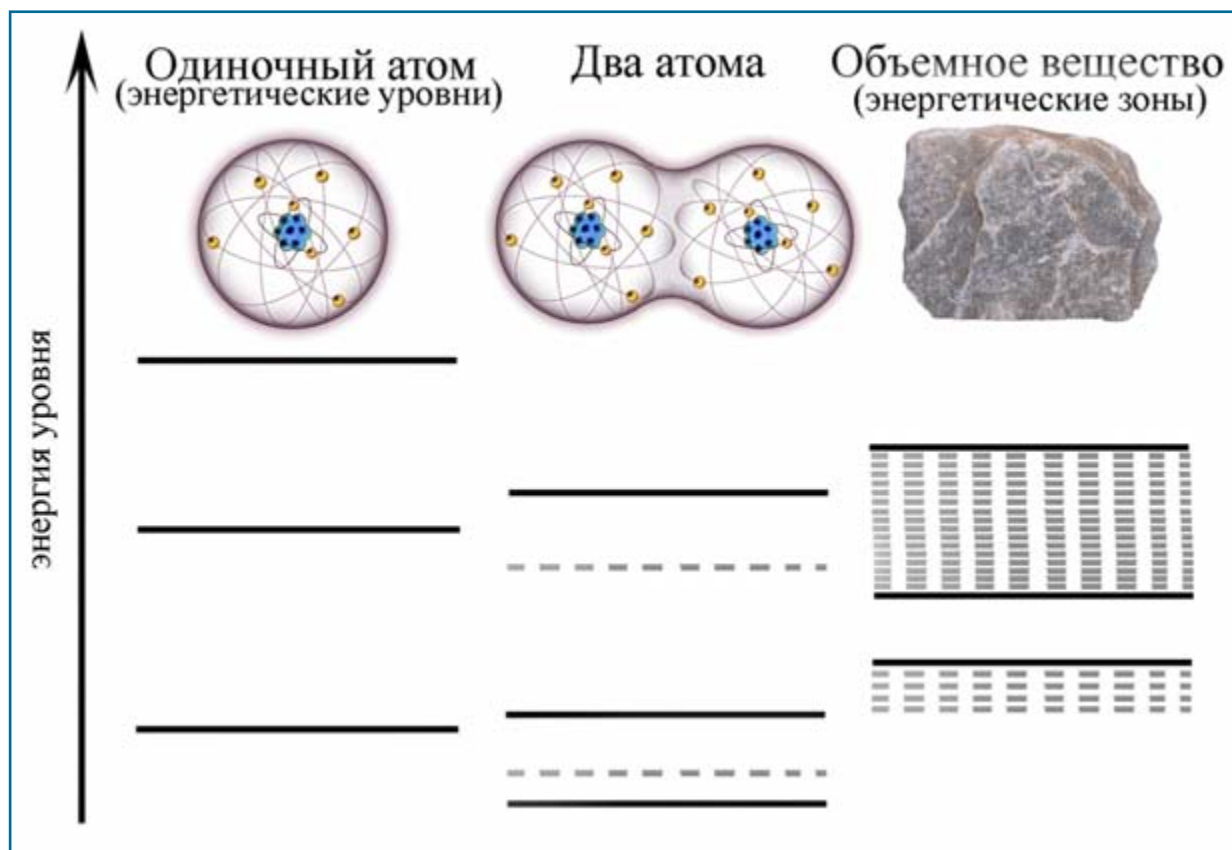


Рис. 1. Формирование энергетических зон твердого тела

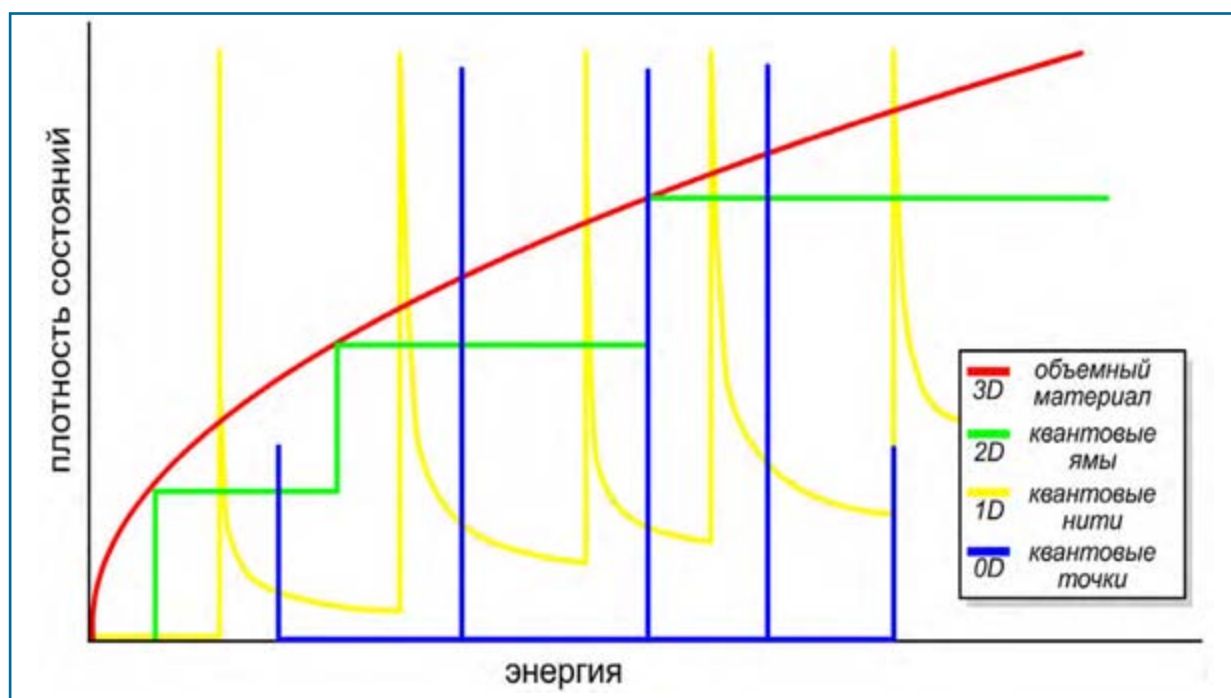
лебания достаточно длинной, но не бесконечной последовательности из шариков и пружин, длина волны колебаний будет несколько различна в центре и по краям цепочки ввиду отсутствия упругих связей у крайних шариков. Иначе говоря, лишь «внутренние» атомы будут формировать непрерывную энергетическую зону, тогда как энергетические уровни внешних (поверхностных) атомов будут дискретны и четко выражены. Именно в этом состоит одно из основных положений теории размерного квантования, предложенной Ал. Эфросом и А. Эфросом в 1982 году, согласно которой центр наночастицы имеет зону с непрерывной электронной плотностью, а края состоят из дискретных уровней. Наиболее сильно этот эффект проявляется для полупроводниковых наночастиц с большим радиусом *экситона*. Для очень малых кластеров полупроводников вообще не происходит образования непрерывных энергетических зон вследствие больших зазоров между подуровнями.

Таким образом, в частицах с характерным размером меньше 10 нм электроны ведут себя по-

добно электронам в изолированном атоме (рис. 1, случай двух атомов), то есть как квантовые объекты, а эффекты, проявляющиеся в таких частицах, называют квантово-размерными. Кроме того, уменьшение размера частиц сопровождается уменьшением ширины энергетических зон, что приводит к росту энергии оптических переходов (см. *Щель энергетическая*).

Очевидно, что сокращение размера частицы в одном, двух или трех измерениях соответственно будет приводить к проявлению частичного квантования зоны в четко выраженных направлениях. В зависимости от формы *нанокристалла* можно выделить три основных типа низкоразмерных наноструктур: квантовые ямы (двумерные объекты, толщина которых лежит в нанодиапазоне), квантовые нити (одномерные объекты, диаметр которых лежит в нанодиапазоне) и квантовые точки (мольмерные (нольмерные) объекты, наноразмерные во всех измерениях), причем последние иногда называют искусственными атомами. Интересно, что в оптическом спектре (спектре плотности состояний) таких структур происхо-





**Рис. 2.** Спектры плотности состояний носителей заряда для систем с различной размерностью

дит постепенный переход от линейчатого спектра отдельных атомов к непрерывному поглощению объемного материала (рис. 2). Этот эффект сегодня активно используется для формирования излучающих компонентов с четко заданной ши-

риной и формой полос испускания, что необходимо, к примеру, при производстве оптических сенсоров и лазеров с перестраиваемой длиной волны.

#### Литература:

1. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
2. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000.

## *КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ*

### *(Quantum computers)*

*«Я думаю, на мировом рынке можно будет продать штук пять компьютеров».*

*Директор компании IBM*

*Томас Уотсон (1943 г.)*

*«Машины должны работать. Люди должны думать».*

*Девиз компании «IBM»*



Музыкантам из басни Крылова далеко до слаженности квантового компьютера

Для того, чтобы представить, чем отличаются квантовые компьютеры от обычных, представим себе следующую ситуацию. Выходит на сцену оркестр, музыканты рассаживаются по местам, и начинает играть первая скрипка .... всю свою партию .... 2 часа. Далее следует виолончель, габой, кларнет, флейты, барабаны, духовые инструменты, дирижер свои 2 часа палочкой отмашет... все, на третьи сутки концерт окончен. Смешно и

нелепо? Но именно так, последовательным перебором, и решаются некоторые задачи на обычных компьютерах. Хотя при определенных условиях все могло бы быть совершенно по-другому, как в слаженном оркестре. Представим, что каждый музыкант может либо играть, либо не играть (его состояние обозначим соответственно цифрами 1 и 0 – это квантовый бит или кубит), причем состояние оркестра в каждый момент можно представить (если отвлечься от того, что они играют и как хорошо они играют по отдельности) набором чисел, например  $\langle 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1... \rangle$  – квантовым регистром. Мало того, что такая система позволяет выполнять несколько действий одновременно (квантовый параллелизм), благодаря слитности действий появляется дополнительный эффект. Как в оркестре возникает гармония множества партий, так и в квантовых системах возникает связанное состояние, в результате чего можно говорить об общем состоянии системы, а не только о совокупности отдельных элементов.

А если всей этой системой, как мановением палочки дирижера, можно управлять, то такая вычислительная машина с легкостью решит самые сложные задачи. Что же позволит ей работать гораздо эффективнее классического компьютера? Если производительность обычного процессора пропорциональна количеству элементов (транзисторов), то в квантовом компьютере добавление каждого последующего элемента экспоненциально увеличивает его производительность. Считается, что квантовый компьютер, состоящий из 1000 кубитов, будет заведомо превосходить по производительности любые современные компьютеры (на настоящий момент производитель-

ности современного персонального компьютера хватает для моделирования системы, состоящей примерно из 50 кубитов). Использование квантовых компьютеров, работающих по специальным (квантовым) алгоритмам, позволит быстро решать задачи, с которыми классические алгоритмы не справляются даже за весьма значительное время. К числу таких задач относятся поиск в неупорядоченном массиве, разложение чисел на простые множители (используется в криптографии) и моделирование квантовых систем (сложных молекул).

Для создания квантовых компьютеров нужны следующие условия:

- достаточное для решения задачи число элементов – кубитов, как для каждой симфонии необходимо определенное, минимальное число музыкантов.

- элементы квантового компьютера должны быть связаны между собой, образуя единый ансамбль. Только если музыканты играют вместе, подстраиваясь под единый ритм и темп, можно добиться гармонии.

- возможность задать начальные условия (партитуры) и менять их в зависимости от задачи (функции дирижера).

- возможность получать информацию (уши слушателей) и проверять ее на правильность (аплодисменты или помидоры).

Пока все эти условия не реализованы в полной мере. В настоящий момент разработаны две принципиально различные конструкции квантового компьютера, в которых в качестве кубитов выступают либо ядерные, либо электронные спины. Примером квантового компьютера с электронными кубитами являются сложные Si/Ge *гетероструктуры*, в которых обработка информации осуществляется на электронах проводимости отдельных изолированных друг от друга слоев. Наиболее удачным экспериментом можно считать 7-кубитный ядерный квантовый

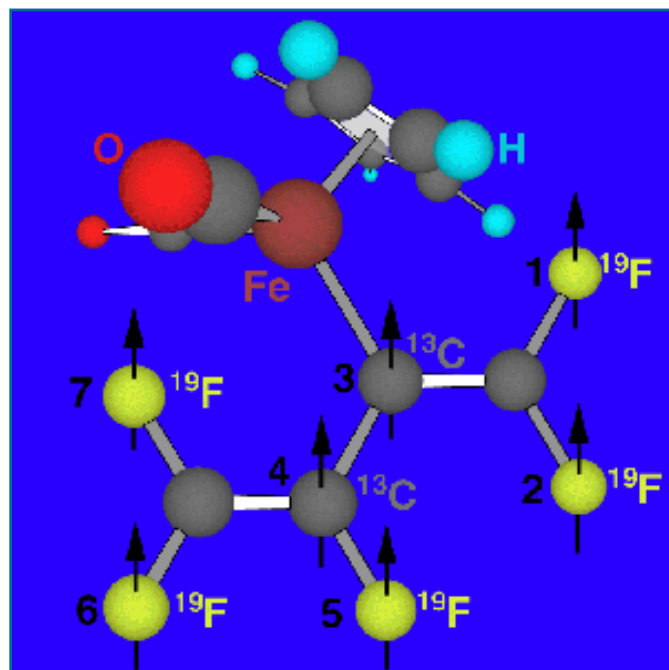


Рис. 1. Органическая «семикубитовая» молекула

компьютер, созданный группой ученых из IBM и Стенфордского университета, который недавно позволил разложить число 15 на множители 5 и 3. При этом кубитами являлись спины ядер атомов отдельной сложной органической молекулы  $(^{19}\text{F})_2-\text{C}=\text{}^{13}\text{C}(\text{}^{19}\text{F})-\text{}^{13}\text{C}[\text{Fe}(\text{CO})_2(\text{C}_5\text{H}_5)]=\text{C}(\text{}^{19}\text{F})_2$  (рис. 1). Благодаря колоссальным вложениям в разработку квантового калькулятора (более 100 млн долларов США), ученым удалось добиться значительного сокращения числа операций (1 действие и 1 проверка вместо 4 действий и 4 проверок). Как показывают теоретические расчеты, при использовании большего количества кубитов станет возможным за минуты решать задачи, которые современными компьютерами должны решаться веками. Уже сейчас нет сомнений в том, что *нанотехнологии* смогут помочь в создании высокоэффективных квантовых компьютеров будущего на основе *квантовых точек* и *квантовых нитей*.

#### Литература:

1. Валиев К.А. Квантовая информатика: компьютеры, связь и криптография // Вестник РАН. 2000. Т. 70, №8. С. 688.
2. Китаев А., Шень А., Вялый М. Классические и квантовые вычисления. М.: МЦНМО, 1999.



## КВАНТОВЫЕ НИТИ

### (Quantum wires)

*«Невидимые нити связывают больше всего».*  
Фридрих Ницше

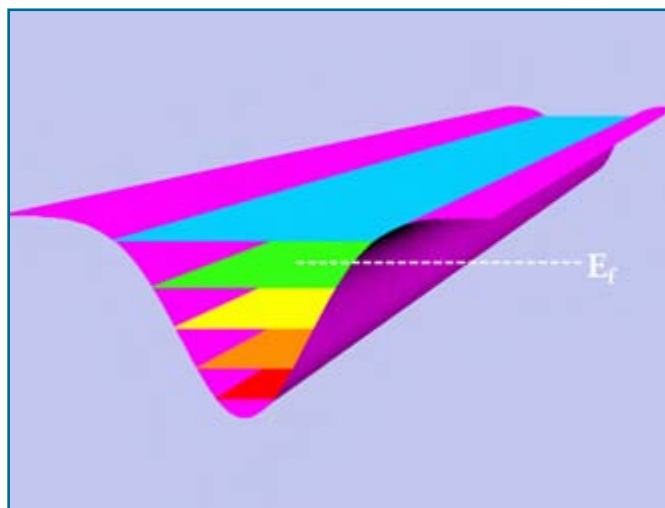


Дорогой читатель! Если Вы открыли эту статью, не успев прочитать про **квантовые точки**, не читайте ее, оставьте, не поленитесь пробежать на пару страниц вперед. Квантовые нити (провода) представляют собой одномерные структуры (сформированные, как правило, из полупроводникового материала), в которых в силу ограничения возможности движения носителей заряда в определенном направлении проявляются **квантово-размерные эффекты**. Когда на пути

потока воды, струящегося по равнине, оказывается овраг или канава, то вода, стекая по склонам, собирается на дне. То же происходит и с электронами: если перейти от трехмерной системы к квантовой нити, непрерывный энергетический спектр вырождается – в нем возникают энергетические барьеры, ограничивающие движение электронов в направлениях, перпендикулярных оси нанонити, так же, как стены оврага «запирают» потоки воды. Сужение же нанонити до размеров в несколько десятков или сотен атомов вызывает квантование энергетического спектра: электрон может свободно перемещаться вдоль оси нанонити, но лишь в том случае, если он находится на полузаполненном электронном уровне, а к проводу, естественно, приложена разность потенциалов, то есть если у канала есть некоторый уклон. В полупроводниковых квантовых проволоках, как и в кристаллах, электрон необходимо предварительно возбудить, приложив достаточно высокое напряжение или облучив светом с необходимой длиной волны.

Именно анизотропия электронных свойств и является основой для создания наноустройств на основе квантовых нитей и источником интереса к формированию квантовых нанопроволок полупроводников. На сегодня разработано множество подходов к формированию таких наносистем, включая **нанолитографию**, **молекулярно-лучевую эпитаксию** или непосредственный синтез коллоидных **наночастиц** в колбе или пробирке. Контролируя условия процессов синтеза, можно получать квантовые нити определенных размеров с заданными свойствами.

Ожидается, что квантовые провода, подобно квантовым точкам, займут почетное место среди материалов нового поколения, найдя применение, например, для создания инжекционных лазеров с низким пороговым током. Уже сейчас полупроводниковые *углеродные нанотрубки*, являющиеся квантовыми проводами, эффективно используются при построении дисплеев и лазеров с высокой плотностью фотонов. Не так давно стало известно о построении многообещающих кубитов, базирующихся на двух квантовых проводах, помещенных в двухмерный электронный газ квантовой ямы (см. *Квантовые компьютеры*)..



#### Литература:

1. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000.
2. Garnett W. Bryant, Glenn S. Solomon. Optics of Quantum Dots and Wires. Artech House Publishers. 2004.

## КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

### (Quantum dots)

*«Квантовые точки – это искусственные атомы, свойствами которых можно управлять».*

*Ж.И. Алферов,  
лауреат Нобелевской премии*



Древнегреческий амфитеатр

Квантовые точки (КТ) – это изолированные нанообъекты, свойства которых существенно отличаются от свойств объемного материала того же химического состава. Сразу следует отметить, что квантовые точки являются скорее математической моделью, нежели реальными объектами. И связано это с невозможностью формирования полностью обособленных структур – малые частицы всегда взаимодействуют с окружающей средой, находясь в жидкой или твердой матрицах.

Чтобы разобраться в том, что такое квантовые точки, и понять их электронное строение, представьте себе древнегреческий амфитеатр. Теперь вообразите, что на сцене разворачивается увлекательное представление, а зрительские ряды наполнены публикой, пришедшей посмотреть игру

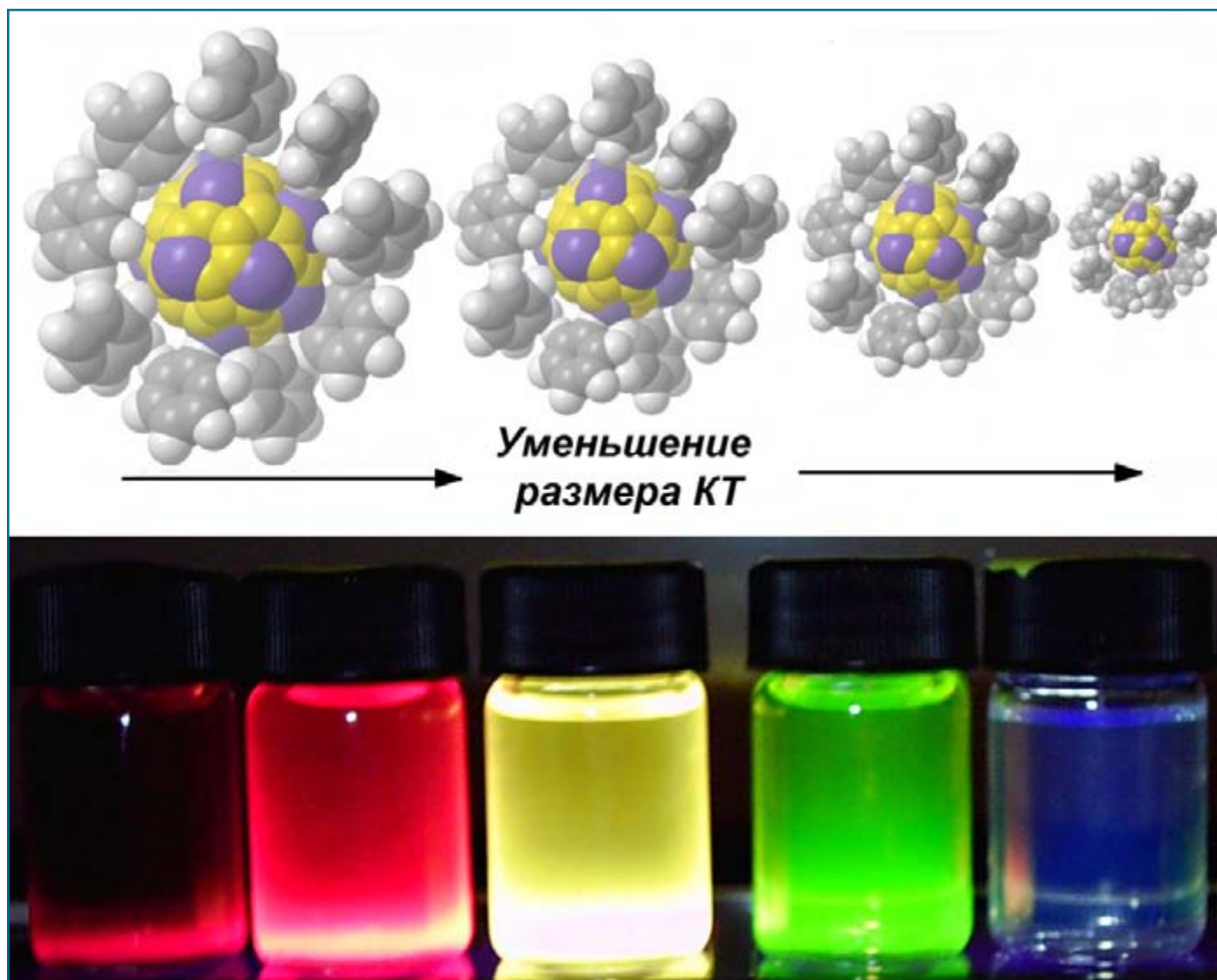
актеров. Оказывается, что поведение людей в театре во многом похоже на поведение электронов квантовой точки (КТ). Во время представления актеры передвигаются по арене, не выходя в зрительный зал, а сами зрители следят за действием со своих мест и не спускаются на сцену. Арена – это нижние заполненные уровни квантовой точки, а зрительские ряды – электронные уровни проводимости. При этом как зритель может находиться в любом ряду зала, так и электрон способен занять любой энергетический уровень квантовой точки, но не может располагаться между ними. Покупая в кассах билеты на представление, все стремились получить самые лучшие места – как можно ближе к сцене. Действительно, ну кто же захочет сидеть в последнем ряду, откуда лицо актера не рассмотришь даже в бинокль! Поэтому, когда перед началом представления зрители рассаживаются, все нижние ряды зала оказываются заполнены, так же как в стационарном состоянии КТ, обладающем наименьшей энергией, нижние энергетические уровни полностью заняты электронами. Однако во время представления кто-то из зрителей может покинуть свое место, например потому что музыка на сцене слишком громко играет или просто сосед неприятный попался, и пересест на свободный верхний ряд. Вот так и в КТ электрон под действием внешнего воздействия может переходить на более высокий, не занятый другими электронами энергетический уровень, приводя к образованию возбужденного состояния квантовой точки. Наверное, Вам интересно, что при этом происходит с тем пустым местом на энергетическом уровне, где раньше был



электрон – так называемой «дыркой»? Оказывается, посредством зарядовых взаимодействий иногда электрон остается с ней связан и в любой момент может перейти обратно, так же как пересевший зритель всегда может передумать и вернуться на обозначенное в его билете место. Пару электрон–дырка называют **экситоном** от английского слова «excited», что означает «возбужденный». Миграция между энергетическими уровнями КТ, аналогично подъему или спуску одного из зрителей, сопровождается изменением энергии электрона, что соответствует поглощению или излучению кванта света (фотона) при переходе электрона соответственно на более высокий или низкий уровень. Описанное выше поведение электронов в квантовой точке приводит

к нехарактерному для макрообъектов дискретному энергетическому спектру, за который КТ часто называют искусственными атомами.

Энергия связи дырки и электрона определяет радиус экситона, который является характерической величиной для каждого вещества. Если размер квантовой точки меньше радиуса экситона, то экситон оказывается ограничен в пространстве ее размерами, а соответствующая энергия связи значительно изменяется по сравнению с объемным веществом (см. **Квантово-размерные эффекты**). Нетрудно догадаться, что если энергия экситона изменяется, то, следовательно, изменяется и энергия фотона, излучаемого системой при переходе возбужденного электрона на свое исходное место (экситонный



**Рис. 1.** Изменение цвета (полосы испускания) коллоидного раствора частиц CdSe в оболочке CdS в зависимости от размера квантовых точек (КТ получены на ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

переход). Таким образом, получая монодисперсные коллоидные растворы наночастиц различных размеров, можно управлять энергиями переходов в широком диапазоне оптического спектра (рис. 1).

Первыми квантовыми точками были наночастицы металлов, которые синтезировали еще в Древнем Египте для окрашивания ими различных стекол, хотя более традиционными и широко известными КТ являются выращенные на подложках полупроводниковые частицы GaN и коллоидные растворы микрокристаллов CdSe. В настоящий момент известно множество способов получения квантовых точек, например их можно «вырезать» из тонких слоев полупроводниковых *гетероструктур* с помощью *наноитографии*, а можно спонтанно сформировать в виде наноразмерных включений структур полупроводникового материала одного типа в матрице другого.

Методом *молекулярно-пучковой эпитаксии* при существенном отличии параметров элементарной ячейки подложки и напыляемого слоя можно добиться роста на подложке пирамидальных квантовых точек, за исследование свойств которых Ж.И. Алферову была присуждена Нобелевская премия. Контролируя условия процессов синтеза, теоретически можно получать квантовые точки определенных размеров с заданными свойствами.

Исследования КТ начались сравнительно недавно, но широчайшие перспективы их практического использования уже совершенно очевидны для дизайна лазеров и дисплеев нового поколения. Уникальные перестраиваемые оптические свойства КТ находят применение в самых неожиданных областях, например в медицинских исследованиях, для построения кубитов квантовых компьютеров и т.д.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 134 с
2. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000.

## КОЛЛОИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ (Colloid Nanoparticles)

*В погоне за открытием он был слишком воспален,  
И миг настал, когда нажал на крантик Кокильон.  
И закричал безумный: «Да это же коллоид!  
Не жидкость это, братцы, — коллоидальный газ!»  
Вот так, блеснув в науке, как в небе астероид,  
Простой безвестный гений безвременно угас.*

*В. Высоцкий*



Демонстрация эффекта Тиндаля

Взгляните на растворы, изображенные на рисунке. Внешне они кажутся практически одинаковыми — бесцветные и прозрачные. Впрочем, есть одно «но»: лазерный луч беспрепятственно проходит сквозь правый стакан, а в левом сильно рассеивается, оставляя красный след. В чем секрет?

В правом стакане — обычная вода, а вот в левом — коллоидный раствор серебра. В отличие от обычного или, как говорят химики, «истинного» раствора, коллоидный раствор содержит не молекулы или ионы растворенного вещества, а его мельчайшие частицы. Эти частицы настолько малы, что их невозможно увидеть невооруженным глазом и, более того, бывает сложно наблюдать даже с использованием новейших электронных микроскопов. Впрочем, даже мельчайшие частицы могут рассеивать свет. В физике это яв-

ление известно как «эффект Тиндаля». По этой же причине видны пылинки в солнечном луче, падающем через щель между занавесками в темную комнату. Правда, размеры и форму каждой частицы в растворе разглядеть не удастся, но все в целом они дают возможность проследить путь света.

То, что мы не сразу различили истинный раствор и коллоидный — неудивительно. Шотландский химик Томас Грэм (1805–1869), изучавший коллоидные растворы, долгое время называл их «псевдорастворами». Поскольку при выпаривании таких растворов, как правило, вместо кристаллов образуется аморфная масса, похожая на канцелярский клей, он и дал им название «коллоидных» (от греч. kolla — клей, kollodes — клейкий и eidos — вид). Кстати, каждый легко может купить концентрированную взвесь мельчайших частиц серебра в аптеке под названием «коллодий», она обладает отличными бактерицидными свойствами.

Каким же должен быть размер частиц, чтобы их раствор можно было назвать «коллоидным»? В различных учебниках коллоидными предлагается считать частицы, размер которых составляет от 1 нм до 100 нм, от 1 нм до 200 нм, от 1 нм до 1 мкм... (рис. 1). Впрочем, классификация по размерам, как и любая другая, весьма условна. Частицы должны быть настолько малы, чтобы вследствие малой массы вклад силы тяжести в их поведение был сопоставим с броуновским движением. Таким образом, под действием силы тяжести частицы либо совсем не оседают (такие





**Рис. 1.** Некоторые коллоидные системы и характеристические размеры распространенных биологических объектов. На данной диаграмме диапазон размеров коллоидных частиц существенно расширен за счет полимерных (латексных) частиц, обладающих низкой плотностью. Адаптировано на основе Microscopy & Histology Catalog, Polysciences, Warrington, PA 1993–1994

коллоидные растворы называют «стабильными»), либо оседают очень медленно (расслаивание происходит в течение дней или даже месяцев, что в большинстве случаев также позволяет работать с такими растворами как со стабильными). Уже отсюда понятно, что привязка к размерам условна – в случае тяжелых веществ (например, металлов) коллоидный раствор будет стабильным лишь тогда, когда размер частиц не будет превышать несколько нанометров, а для веществ с малой плотностью (например, полимеров) даже при размере частиц более ста нанометров раствор будет оставаться стабильным. Дисперсные среды, содержащие частицы настолько крупные, что они распределяются в диспергирующей среде при перемешивании, но быстро оседают, называются взвесями. Не менее важно отметить, что вне зависимости от размера частиц коллоидный раствор не будет стабильным, если частицы не несут электрический заряд. Одноименно заряженные частицы отталкиваются, и раствор

остается стабильным, тогда как если частицы не несут заряд, они быстро слипаются и оседают.

Коллоидные растворы окружают нас повсюду. В огромном количестве их можно увидеть на кухне – это растворы желатина, крахмала, яичного белка и даже кисель. Помимо продуктов питания, коллоидные частицы могут быть найдены в таких промышленных продуктах, как лакокрасочные изделия, бумага, канцелярские принадлежности, косметические товары, различные покрытия, фото пленки и др. Дым (например, дымовая завеса на поле боя) тоже образован коллоидными частицами, формирующими аэрозоли. Кстати, во время боевых действий в Афганистане использовали бомбы объемного взрыва – в воздух распылялась перекись ацетона, в которую выстреливали детонаторы. В результате это облако взрывалось, а взрывная волна (в 3–4 раза более сильная, чем при обычной детонации) уничтожала противника даже в окопах. Обычные кучерявые облака – это тоже коллоидная система, но состоящая из взвеси капелек воды в воздухе.

Все крема, мази и эмульсии – тоже коллоиды, в которых жидкие капли (или твердые частицы) распределены в жидкой среде. Еще один пример коллоидной системы – коварные зыбучие пески, состоящие из мельчайших частиц, «перемешанных» с воздухом. Это пример тиксотропного коллоида. Не менее важную роль коллоидные частицы играют в научных исследованиях.

Как видно из рисунка, размер различных коллоидных частиц полностью перекрывает весь нано- и мезодиапазон, что позволяет решать с их помощью самые разнообразные методологические задачи – от калибровки электронных микроскопов (см. *Сканирующая электронная микроскопия*) до изучения биологических объектов (см. *Бионанотехнологии* и *Оптический пинцет*).

Как уже отмечалось, во многих случаях размер коллоидных частиц не превышает 100 нм, а значит, их можно смело называть *наночастицами*. По этой причине многие выдающиеся нанотехнологические эксперименты современности

являются современными вариациями на тему коллоидной химии. Среди важнейших примеров коллоидных наночастиц, активно используемых в современных нанотехнологиях, – коллоидные частицы полупроводников  $A_2B_6$ , обладающие яркой люминесценцией (см. *Квантовые точки*), магнитные коллоидные частицы (Fe/Pt, различные оксиды железа) для лечения раковых заболеваний методом магнитной гипертермии (см. *Наномедицина*), коллоидные частицы золота (см. *Плазмонный резонанс*) для медицинских применений, сферические коллоидные частицы на основе полистирола или оксида кремния для получения фотонных кристаллов и двумерных упорядоченных структур (см. *Фотонные кристаллы*, *Самоорганизованные системы* и *Наносферная литография*) и многие другие.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Зимон А.Д. Занимательная коллоидная химия. М.: Агар, 2002. 168 с.

## КОСМИЧЕСКИЙ ЛИФТ (Space elevator)

*«Спокойно, не спеша и не суетясь, займут пассажиры места в герметичных вагонах космического поезда... Электровоз даст последний гудок, медленно наберет скорость и помчится в переплетении ажурных нитей вертикально вверх. Вот остался позади первый слой облаков. Все растет скорость движения... Сверкают на черном бархате небе Космоса немигающие звезды...».*

*Ю. Ариутанов. «Вкосмос—наэлектровозе»,  
газета «Комсомолка», 31 июля 1960 года*



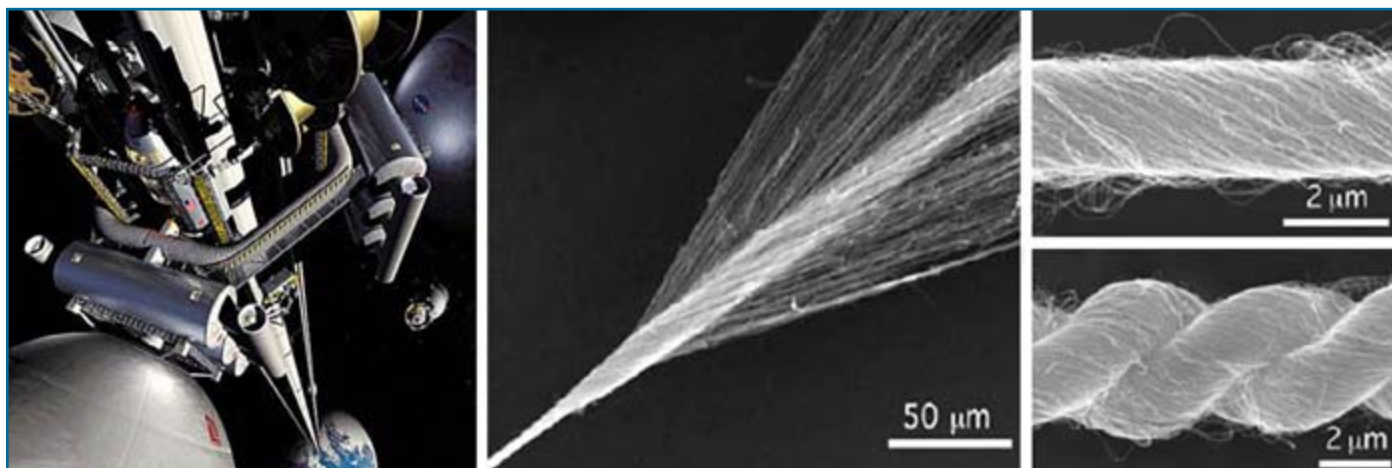
К.Э. Циолковский

Каждый из нас ежедневно пользуется лифтом для подъема на 5, 10, 20, а иногда на 50 этаж, или даже на телебашню. Как же высоко можно подняться на лифте и можно ли создать лифт, переносащий нас за пределы стратосферы в космос? Оказывается, теоретических преград для этого нет, а сама идея создания космического лифта была предложена К.Э. Циолковским еще в 1895 г., когда он впервые увидел Эйфелеву башню в Па-

риже. По замыслу Циолковского, лифт должен подниматься по тросу, соединяющему поверхность планеты с геостационарной орбитальной станцией. Согласно оценкам, такой способ подъема грузов в перспективе окажется на порядок дешевле использования ракет-носителей. В настоящий момент современная ракетная техника требует затрат в 30–40 тысяч долларов США для подъема каждого килограмма груза на орбиту, тогда как прогнозируемая оценка стоимости услуг космического лифта составляет лишь 1000 долларов США. Само же создание лифта оценивают в 10 млрд долларов США.

Но что же общего между космическим лифтом и современными нанотехнологиями? Космический лифт должен выдерживать, по крайней мере, свой вес, весьма немалый из-за длины троса, а соответственно, от материала троса требуется чрезвычайная прочность на разрыв в сочетании с малой плотностью. Утолщение троса, с одной стороны, повышает его прочность, а с другой – увеличивает его массу. Кроме того, следует учитывать, что нагрузка на различные участки троса будет различна в зависимости от высоты над уровнем Земли: в одних случаях участок троса должен выдерживать вес сегментов, находящихся ниже, в других – обеспечивать центробежную силу, удерживающую верхние части троса на орбите. С учетом гравитации Земли и центробежной силы, сечение однородного троса в зависимости от высоты описывается формулой, в соответствии с которой толщина троса экспоненциально увеличивается вплоть до





**Рис. 1.** Иллюстрация космического лифта и электронные микрофотографии жгутов углеродных нанотрубок

высоты нескольких земных радиусов, а достигнув геостационарной орбиты, снова уменьшаться, создавая эффективный противовес рабочей части лифта.

Возникает вопрос, из какого материала сделать трос? Подставив в расчетную формулу плотность и прочность, например, стали, и взяв диаметр троса у поверхности Земли в 1 см, мы получим диаметр на уровне геостационарной орбиты, равный нескольким сотням километров! Таким образом, сталь, кевлар и другие традиционные высокопрочные материалы непригодны для строительства такого лифта. Его реальная реализация возможна только при условии разработки новых высокотехнологических материалов, у которых прочность на разрыв составляет более 100 ГПа, а плотность не превышает 2000 кг/м<sup>3</sup>. Казалось бы, совершенно немыслимые требования? Но именно таких свойств исследователи ожидают от идеальных «одностенных углеродных нанотрубок» (ОСНТ). Согласно теоретическим оценкам, их прочность может достигать прочности графитового листа (до 1 ТПа) при плотности ~1700 кг/м<sup>3</sup>. В настоящий момент уже получены одностенные нанотрубки с прочностью на разрыв ~60 ГПа. Но не стоит забывать,

что 60 ГПа – это прочность отдельной углеродной нанотрубки, длина которой составляет лишь сотни микрон. Чтобы использовать нанотрубки в качестве материала троса, необходимо сначала «свить» из них жгуты, что приведет к значительному уменьшению прочности.

Именно с появлением нанотрубок NASA был разработан проект по созданию космического лифта, а уже в 2000 году выпущен отчет, согласно которому трос из углеродных нанотрубок сможет выдержать свою массу при диаметре всего в несколько сантиметров. Быстрые темпы развития нанотехнологий привели к тому, что уже сегодня изготовление жгутов из ОСНТ не является невыполнимой задачей и может производиться в достаточных для постройки космического лифта масштабах (см. рис. 1). Работы по созданию космического лифта, включая разработку подъемника, способного самостоятельно двигаться по тросу, проводятся компанией HighLift Systems при поддержке NASA, а частная компания Liftport Inc. пытается самостоятельно достичь той же цели к 2031 году. И уже сегодня Вы можете приобрести первый билет на лифт, поднимающий Вас к самой высокой точке планеты.

#### Литература:

1. Борисов М. Космический «фуникулер» // Вокруг Света. 2007. № 1. Рубрика «Планетарий».
2. Доклад в НАСА доктора Б. Эдвардса (2003 г.) <http://www.liftport.com/files/521Edwards.pdf>

## *КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РФ*

### *(Critical technologies)*

*«Мы идем неизвестно куда,  
но придем быстрее других».*

*С. Кара-Мурза*



Понятие «критические» или «ключевые» технологии (key technologies) впервые появилось в США в 60-х годах прошлого века. Так назвали перечень технологических направлений и разработок, которые в первую очередь поддерживало правительство США в интересах экономического и военного первенства. Их отбирали на основе чрезвычайно тщательной, сложной и многоступенчатой процедуры, включавшей экспертизу каждого пункта перечня финансистами и профессиональными учеными, политиками, бизнесменами, аналитиками, представителями Пентагона и ЦРУ, конгрессменами и сенаторами.

Ни одно государство, каким бы богатым оно ни было, не в состоянии развивать исследования и разработки по всем без исключения направлениям. Важнейшим условием реализации эффективной государственной научно-технической политики является концентрация научного потенциала, финансовых и материальных ресурсов на приоритетных направлениях развития науки и техники. Под приоритетными направлениями

развития науки и техники понимаются основные области исследований и разработок, реализация которых должна обеспечить значительный вклад в социальное, научно-техническое и промышленное развитие страны и в достижение за счет этого национальных социально-экономических целей.

В каждом из приоритетных направлений развития науки и техники можно выделить более конкретные прикладные направления, называемые критическими технологиями. Критические технологии носят межотраслевой характер, создают существенные предпосылки для развития стратегических технологических областей исследований и разработок и дают в совокупности главный вклад в решение ключевых проблем реализации приоритетных направлений развития науки и технологии. Одной из таких технологий является нанотехнология. Выбор критических технологий происходит с учетом прогноза наиболее перспективных направлений науки и техники для достижения максимальной отдачи в области инновационной сферы.

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в России и перечень критических технологий России впервые были сформированы в 1996 г. при участии сотен экспертов – представителей академической, вузовской и отраслевой науки, а также промышленности. Выбор и уточнение приоритетов – динамичный, живой процесс, что обусловлено самой спецификой науки и технологий. Поэтому их своевременному пересмотру уделяется постоянное внимание. Последний перечень приоритетных направлений и критических технологий был утвержден Президентом РФ 21 мая 2006 г.:

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
развития науки, технологий и техники  
в Российской Федерации:

- Безопасность и противодействие терроризму.
- Живые системы.
- Индустрия наносистем и материалов.
- Информационно-телекоммуникационные системы.
- Перспективные вооружения, военная и специальная техника.
- Рациональное природопользование.
- Транспортные, авиационные и космические системы.
- Энергетика и энергосбережение.

ПЕРЕЧЕНЬ  
критических технологий  
Российской Федерации:

- Базовые и критические военные, специальные и промышленные технологии.
- Биоинформационные технологии.
- Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии.
- Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных.
- Геномные и постгеномные технологии создания лекарственных средств.
- Клеточные технологии.
- Нанотехнологии и наноматериалы.
- Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.
- Технологии биоинженерии.
- Технологии водородной энергетики.
- Технологии мехатроники и создания микросистемной техники.
- Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы.
- Технологии новых и возобновляемых источников энергии.
- Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений.
- Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации.
- Технологии оценки ресурсов и прогнозирования состояния литосферы и биосферы.
- Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.
- Технологии производства программного обеспечения.
- Технологии производства топлив и энергии из органического сырья.
- Технологии распределенных вычислений и систем.
- Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф.
- Технологии создания биосовместимых материалов.
- Технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления.
- Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов.
- Технологии создания и обработки кристаллических материалов.
- Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров.
- Технологии создания и управления новыми видами транспортных систем.
- Технологии создания мембран и каталитических систем.
- Технологии создания новых поколений ракетно-космической, авиационной и морской техники.
- Технологии создания электронной компонентной базы.
- Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии.
- Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем.
- Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания.
- Технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых.

Интернет-ресурсы:

1. Федеральное агентство по науке и инновациям – [www.fasi.gov.ru](http://www.fasi.gov.ru)
2. Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы – [www.extech.ru](http://www.extech.ru)



## КТО ЕСТЬ КТО В НАНОНАУКЕ

### (Who is who in nanoscience)

*«Любой ученый мечтает получить Нобелевскую премию — ведь получая ее, он являет всему миру торжество разума»*

*Смешарик. «Торжество разума»*

Попытаться ответить на этот вопрос – задача непосильная и неблагодарная. Всегда найдутся обиженные и обойденные. Судьей в этом деле может служить только время. Поэтому ограничимся в нашем перечне лишь теми учеными, чей вклад в нанонауку отмечен высочайшей наградой – Нобелевской премией.

В первую очередь следует назвать ученых, которых следует считать создателями основ современной коллоидной химии – науки, которая уже в начале прошлого века исследовала объекты нанометровой природы и по сей день открывает новые возможности на пути создания наноматериалов.



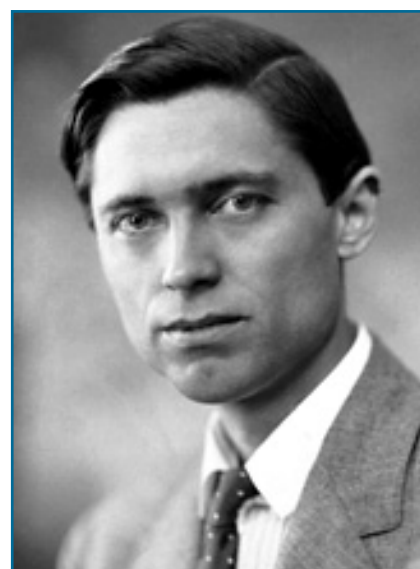
Рихард Зигмонди  
(Zsigmondy, Richard Adolf)  
Германия, Goettingen University  
(1865–1929)

Премия по химии 1925 г. за установление гетерогенной природы коллоидных растворов и за разработанные в этой связи методы, имеющие фундаментальное значение в современной коллоидной химии.



Ирвинг Лэнгмюр  
(Langmuir, Irving)  
США, General Electric Company  
(1881–1957)

Премия по химии за 1926 г. за работы в области дисперсных систем и разработку метода ультрацентрифугирования.



Теодор Сведберг  
(Svedberg, Theodor)  
Швеция, Uppsala University  
(1884–1971)

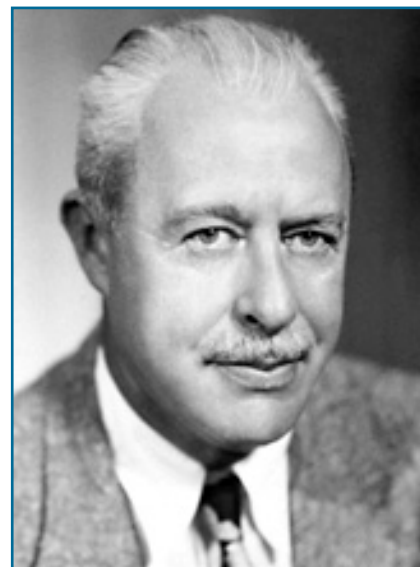
Премия по химии 1932 г. за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений.



Джон Бардин  
(Bardeen, John)  
США, University of Illinois  
(1908–1991)



Уильям Шокли  
(Shockley, William Bradford)  
США, Semiconductor Laboratory  
of Beckman Instruments, Inc.  
(1910–1989)



Уолтер Браттейн  
(Brattain, Walter Houser)  
США, Bell Telephone  
Laboratories  
(1902–1987)

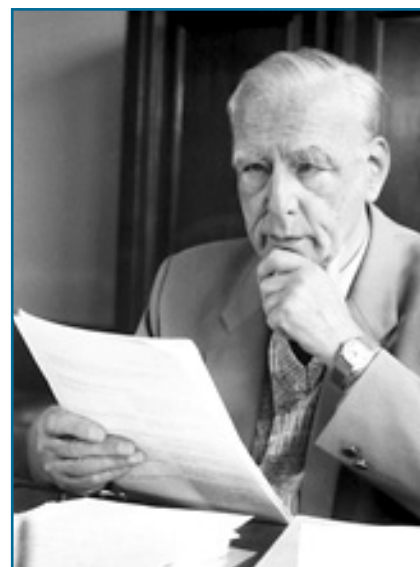
Премия по физике 1956 г. за открытие транзисторного эффекта и создание первого полупроводникового транзистора, что привело к возникновению новой научно-технической дисциплины – микроэлектроники.



Герд Бинниг  
(Binnig, Gerd)  
ФРГ, IBM Zurich Research  
Laboratory  
(р. 1947)



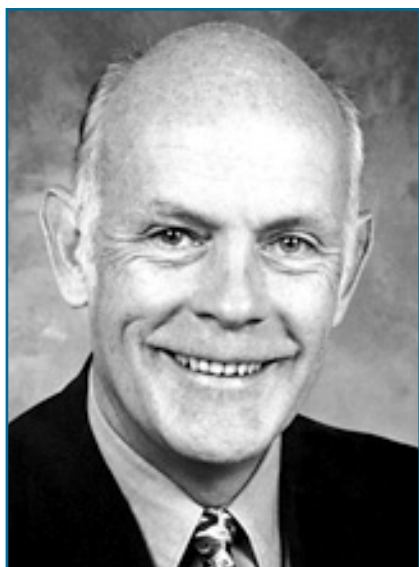
Генрих Ропер  
(Rohrer, Heinrich)  
Швейцария, IBM Zurich  
Research Laboratory  
(р. 1933)



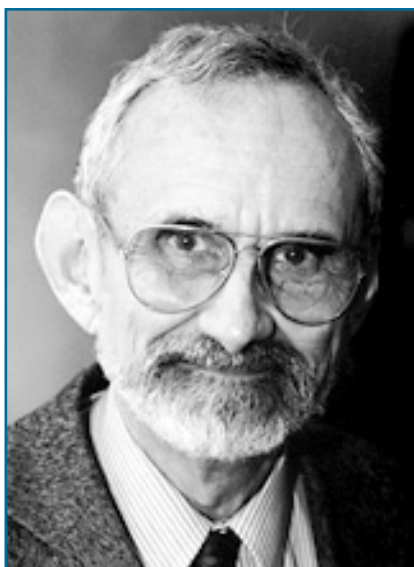
Эрнст Руска  
(Ruska, Ernst)  
ФРГ, Fritz-Haber Institute  
(1906–1988)

Премия по физике 1986 г. за создание сканирующего туннельного микроскопа, основанного на сканировании поверхности твердого тела атомно-острой иглой.

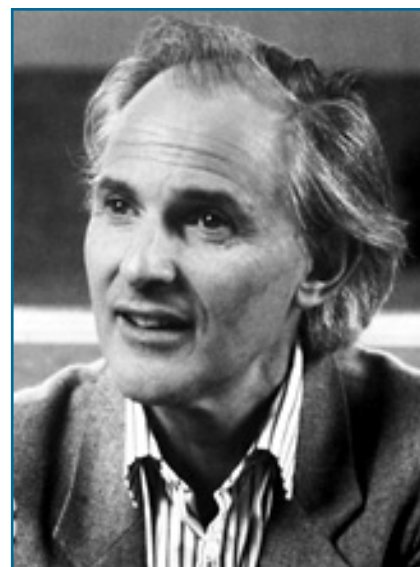
Премия по физике 1986 г. за фундаментальные работы по электронной оптике и создание первого электронного микроскопа.



Ричард Смоли  
(Smalley, Richard)  
США, Rice University  
(р. 1933)



Роберт Керл  
(Kerl, Robert)  
США, Rice University  
(1943–2005)

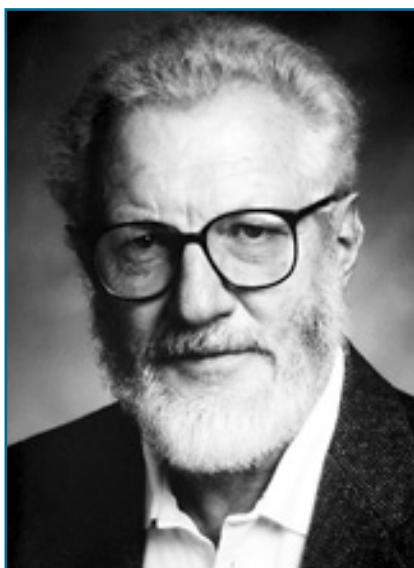


Гарольд Крото  
(Kroto, Gerald)  
Великобритания, University of  
Sussex (р. 1939)

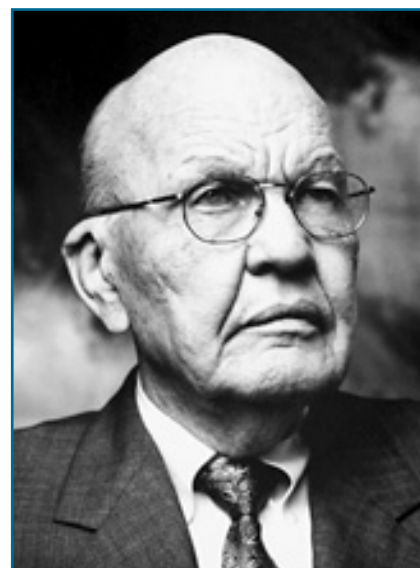
Нобелевская премия по химии 1996 г. за открытие фуллеренов.



Ж.И. Алферов  
Россия, Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
(р. 1930)



Герберт Кремер  
(Kroemer, Herbert)  
Германия, Univ. California  
(р. 1928)



Джек Килби  
(Kilby, Jack Saint-Clair)  
США, Texas Instruments  
(1923–2005)

Премия по физике 2000 г. за достижения в электронике, разработку полупроводниковых гетероструктур и создание быстрых опто- и микроэлектронных компонентов, за разработку идеологии и технологии создания микрочипов.

Интернет-ресурсы:

1. <http://nobelprize.org>



## ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ (Laser Ablation)

*«И листы, и бруски во многих местах были просверлены, иные разрезаны пополам, места разрезов и отверстий казались обожженными и оплавленными».*

*А.Н. Толстой.*

*«Гиперболоид инженера Гарина»*



Абляция (от лат. *ablatio* – отнятие) – физико-химический процесс удаления вещества с поверхности или из объема твердого тела. Следуя значению латинского корня, абляцией можно называть любую потерю. Так, в гляциологии (науке о ледниках, их эволюции и разнообразии) абляцией называют уменьшение массы ледника или снежного покрова в результате таяния, испарения или механического разрушения; в геоморфологии (науке о рельефе суши, дна океанов и морей) – совокупность процессов эрозии и плоскостного смыва, формирующих рельеф. В

космонавтике, ракетостроении и авиации абляция – способ эффективного снижения перегрева конструктивных элементов фюзеляжа или двигателя набегающим потоком воздуха. Абляция в астрономии – уменьшение массы малых небесных тел (метеоритов, комет и т.д.) при прохождении плотных слоев атмосферы планет или сильном нагревании вблизи звезд. В медицине – это хирургическая операция удаления органа или какой-либо части тела.

В физику термин «абляция» вошел задолго до появления лазеров для обозначения удаления вещества в электрическом разряде, потоке горячего газа, плазмы и т.д. Лазерной абляцией называют удаление (испарение) вещества с поверхности твердого тела (иногда жидкости) при воздействии на него лазерного излучения. Глубина воздействия лазерного импульса и, следовательно, объем удаляемого вещества зависят от состава материала, его оптических свойств, а также энергии (мощности) лазерного импульса. При низкой мощности лазера вещество испаряется или сублимируется, а при высокой – происходит ионизация атомов вещества – образуется плазма. Современные технологии позволяют очень точно контролировать фокусировку, длительность (в диапазоне от нано- до фемтосекунд) и мощность воздействия лазерного луча. Это открывает широкие возможности для применения процесса лазерной абляции в промышленности и научных исследованиях.

Простейший пример – сверление микроскопических отверстий в любых, в том числе очень твердых материалах (алмаз, рубин, боразон, керамика, другие искусственные сверхтвердые материалы). Сфокусированный до толщины



**Рис. 1.** Схема метода лазерной абляции для нанесения тонких пленок

меньше человеческого волоса пульсирующий лазерный луч удаляет вещество настолько быстро, что расположенные вблизи слои материала даже не успевают нагреться. Эта удивительная особенность используется в таких разных областях, как изготовление печатных плат для полупроводниковой промышленности, брегговских решеток – наиболее широко применяемого элемента в оптоволоконных линиях связи, при сверлении сопел струйных принтеров, для изготовления подшипников в часах, обеспечивая им точность и долговечность. В последнее время лазерную абляцию научились использовать для получения отверстий нанометрового диаметра (от 40 нм), несмотря на то, что длина волны лазерного излучения, как правило, не меньше 200 нм. Для этого используют специальные оптические системы, позволяющие фокусировать лазерный луч.

С помощью лазерной абляции можно получить и придать нужную форму таким материалам, которые сложно или просто невозможно изготовить другими способами. Например, *углеродные нанотрубки* образуются при обработке лазерным лучом графита или смеси графита с металлическими катализаторами (Co, Nb, Pt, Ni или Cu). Причем в первом случае получают многослойные, а во втором – однослойные структуры.

Разновидностью этого приложения является использование абляции для получения *тонких пленок* из соединений, которые трудно испарить другими методами (рис. 1). Так изготавливают некоторые высокотемпературные сверхпроводники (например, тонкие пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ), многослойные полупроводниковые структуры (*гетероструктуры*) и сверхрешетки. В физике этот метод называется импульсным лазерным напылением (pulsed laser deposition).

Лазерную абляцию широко используют и для получения *нанокластеров* путем быстрого испарения того или иного вещества, пересыщенные пары которого при быстром охлаждении затем кристаллизуются с образованием конечного продукта.

Приведенные примеры – лишь малая часть из уже работающих технологий, использующих процесс лазерной абляции. Создание новых высокоэффективных технологических процессов еще шире откроет двери в мир многогранных возможностей лазерной техники, и, может быть, кому-то из Вас, наши дорогие читатели, посчастливится сыграть свою роль в ее развитии.

### Литература:

1. Krause C. Laser ablation: opening doors to new materials for industry. <http://www.ornl.gov/info/ornlreview/rev27-12/text/lasmain.html>
2. Петров М. Лазерная обработка материалов в электронике // Компоненты и технологии. 2002. № 8. <http://www.spezial.ru/article/laser.html>.

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОСТЬ (Interdisciplinary)

*«Перекресток семи дорог – жизнь моя...».*  
*Популярная песня*



Лебедь, Щука и Рак из одноименной басни И.А. Крылова демонстрируют, как не надо вести междисциплинарный диалог

Междисциплинарность – это характеристика области знаний или научной проблемы, где успех возможен только при совместных усилиях отдельных наук. Междисциплинарное знание основано на идеях интеграции отдельных областей и на их синергизме. Последнее означает, что использование множества идей и подходов, присущих различным наукам, не приводит к их неупорядоченной смеси, а напротив – рождает качественно новое знание.

В более широком смысле, междисциплинарность есть (современный) способ взаимодействия между науками в процессе познания окружающей нас действительности. Вероятно, первой попыткой наведения мостов между отдельными науками было стремление соединить совершенно разнородные знания в рамках личности отдельного ученого. Это достигло своего апогея в период эпохи Возрождения. Уместно вспомнить здесь выдающуюся фигуру Леонардо да Винчи – художника, естествоиспытателя, инженера. Аналогичную роль в России сыграл двумя с лишним столетиями позже Михаил Васильевич Ломоно-

сов. Век промышленной революции принес в науку принцип разделения труда. Оказалось необходимым, чтобы различные науки соединялись в деятельности одного человека. Весьма продуктивной для решения общих (междисциплинарных) задач может быть кооперация отдельных ученых (или даже научных коллективов), специализирующихся в различных областях. Часто работа в подобном направлении занимает не одно десятилетие. Это приводит к необходимости: а) оформления накопленных знаний в виде новой междисциплинарной науки и б) передачи знаний путем создания системы междисциплинарного образования.

Классическим примером междисциплинарной науки является материаловедение. Заметный вклад в эту междисциплинарную науку о материалах внесли физика, химия, механика деформируемого твердого тела, инженерные дисциплины и экономика. Упомянем лишь два достижения науки о материалах, которые буквально пере-



Леонардо да Винчи (1452–1519) и М.В. Ломоносов (1711–1765) – универсальные гении своего времени



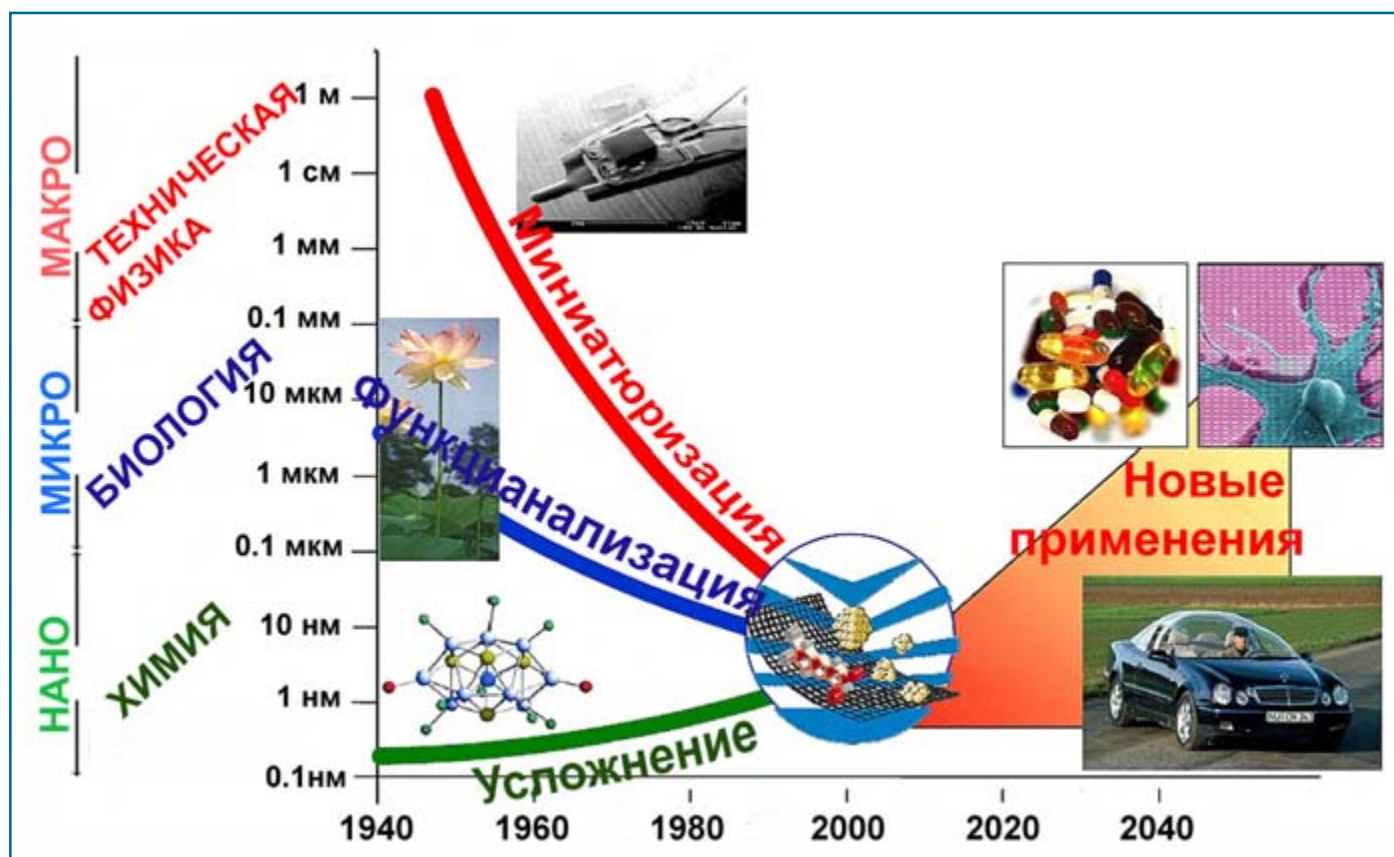


Рис. 1. Междисциплинарность нанотехнологии по мнению авторов Интернет-портала [www.nanotruck.net](http://www.nanotruck.net), созданного при участии Федерального министерства образования и науки Германии (BMBF)

вернули жизнь человека в XX веке: полимеры, давшие пластмассы и новые композиты, и полупроводниковые материалы, ставшие основой для создания компьютерной техники и электроники.

Для понимания характера взаимодействия между науками полезно привести два образа междисциплинарности. Первый из них, заведомо неправильный и карикатурный, олицетворяют персонажи известной басни И.А. Крылова о лебеде, раке и щуке, тщетно пытающихся сдвинуть воз. При описании второго образа междисциплинарной науки используют такие слова, как встреча и диалог. Наиболее адекватной картинкой здесь будет перекресток дорог, на который пришли разные народы, каждый со своим языком и обычаями. В зависимости от цели, результат встречи может быть как конфронтационным, так и конструктивным. В последнем случае останется и материальный, и духовный продукты общения (подводя итоги успешной встречи, историки напишут «...и построен был город»; в нашем же случае возникнут основы новой науки и соответствующей ей образовательной программы). Интересна диалектика такого общения. На

начальном этапе взаимопроникновение наук частично разрушает целостную систему созданных ими языков. В дальнейшем устойчивые обломки языковых конструкций собираются в новых сочетаниях в соответствии с направлениями междисциплинарных взаимодействий и формируют язык новой науки.

Науки о наноматериалах и нанотехнологиях ведут свое происхождение от материаловедения и обладают несомненными междисциплинарными качествами (рис. 1). Особенностью этих новых областей является то, что в междисциплинарном диалоге, помимо естественных и технических наук, активно участвуют специалисты в области экономики, философии и гуманитарных дисциплин (в частности, истории и социологии). Роль экономики обусловлена высокими затратами на проведение исследований в области наноматериалов и рисками, связанными с внедрением результатов этих работ (инновационными рисками). Новая область науки требует невиданной прежде степени обобщения знаний, новой методологии исследований, осознания своего места среди других дисциплин – здесь серьезную

помощь может оказать философия науки. Хороший урок, позволяющий не повторять известных ошибок, может дать новой науке история, если прислушаться к ее опыту. Наконец, в обществе наличествуют как завышенные ожидания в отношении нанотехнологий, так и откровенные страхи, которые вызваны тем, что нанообъекты нельзя увидеть и потрогать руками, а по размерам они сопоставимы с опасными вирусами и канцерогенными частицами. Зачастую подобные страхи – свидетельство недостаточной или неправильной информированности общества. Представляется, что социология позволит осуществить мониторинг общественного мнения и реализовать обратную связь, т.е. помочь ученым грамотно информировать общество о своих разработках. Завершая характеристику наук о наноматериалах и нанотехнологиях как новой междисциплинарной области, следует подчеркнуть другой атрибут междисциплинарности – образовательный аспект. Нанотехнологии направлены в будущее, и передать накопленные знания следующему поколению исследователей наномира невозможно без эффективной системы **нанообразования**.

Примером учебного заведения России, реализующего нанообразовательные программы, является Факультет наук о материалах (ФНМ)

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Необходимость создания специального материаловедческого факультета в классическом университете была продиктована насущными потребностями быстро развивающейся науки и техники на рубеже XXI века, особенно в областях, находящихся «на стыке» различных наук. ФНМ был изначально задуман как междисциплинарный факультет, предназначенный для формирования специалистов, подготовленных для проведения исследований в смежных областях химии, физики и механики материалов; для воспитания элитарных материаловедов-исследователей, приобретших за годы обучения как хорошие навыки конкретной экспериментальной работы, так и усиленную общенаучную подготовку. Особое внимание на ФНМ уделяется **нанотехнологиям**. Приоритетными направлениями на факультете также являются **биоматериалы**, **электрокерамика**, функциональные **композиты**, **тонкие пленки** и **гетероструктуры**. За последние 5 лет удалось достичь перспективных результатов, сопоставимых по своему научному уровню с лучшими мировыми достижениями, в различных областях передовых наукоемких исследований.

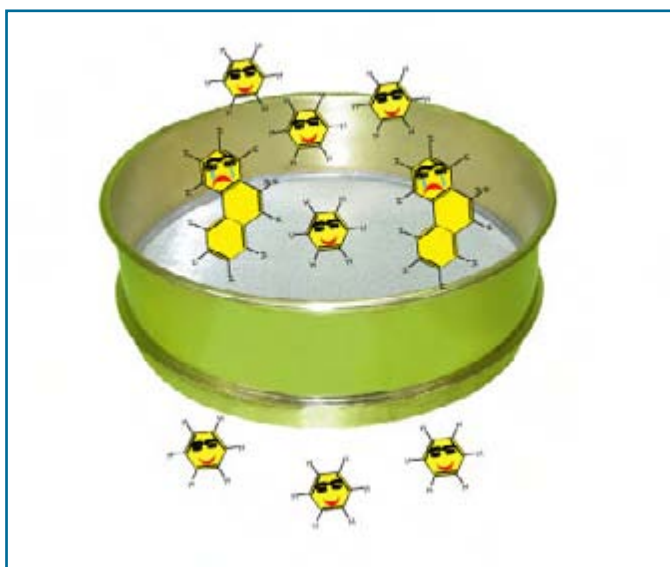
#### Литература:

1. Роко М. Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2002. Т. XLVI, №5. С. 90–95 (<http://www.chem.msu.su/rus/journals/jvho/2002-5/90.pdf>)
2. Cahn R. The Coming of Materials Science. Amsterdam: Pergamon, 2001.
3. Егикова В. Интеллект (газета о вузах и науке). 2004. № 4(48).
4. Егикова В. Московская правда. 2004. 5 мая.

## МЕЗОПОРИСТЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИТА (Mesoporous molecular sieves)

«В решете воду не носят».

Армянская поговорка



Что вы делаете, когда хотите приготовить на завтрак блины? Отмеряете необходимый объем молока, разбиваете в него нужное количество яиц, кладете сахар и соль по вкусу и, перемешивая, постепенно добавляете муку, предварительно просеивая ее через специальное сито. Даже начинающая хозяйка знает, что мелкие поры позволяют избавиться от крупных комков слежавшейся муки, не давая им испортить тесто. Сита – материалы с однородным распределением пор строго контролируемого размера – можно найти не только на кухне хорошей хозяйки, но и в природе (*цеолиты*) или даже искусственно синтезировать в лаборатории. Первые молекулярные сита, обладающие порами нанометрового размера и способные «просеивать» молекулы химических соединений, были получены в 1992 году исследователями американской компании Mobile Research and Development Corporation.

Им удалось синтезировать семейство материалов на основе диоксида кремния с чрезвычайно высокой удельной поверхностью (~1000 м<sup>2</sup>/г), в которых поры размером 3 нм были строго упорядочены, как в известных всем кулинарных ситах, а их размер в пределах материала не отличался более чем на 5% (рис. 1). Сформировать такую структуру оказалось возможным с помощью *темплатного метода*, используя *мицеллы* различных *поверхностно-активных веществ* в качестве шаблона, на котором происходило образование сетки диоксида кремния. Удаление темплата из сформировавшегося каркаса приводило к образованию упорядоченных полостей такого же размера и формы, как органическая мицелла. Дальнейшее развитие метода и использование различных темплатов позволило синтезировать хорошо упорядоченные и однородные гексагональные, кубические и ламеллярные структуры. Кроме того, поскольку размер мицелл определяется длиной «углеводородного хвоста» образующих их молекул ПАВ, то, изменяя ее, удалось расширить возможные размеры пор получаемых молекулярных сит практически на весь «мезо» диапазон пористости – от 2 до 50 нм.

Уникальные свойства мезопористых материалов привлекают к ним пристальное внимание. И, действительно, молекулярные сита в полной мере оправдали возложенные на них надежды – в настоящий момент мезопористый диоксид кремния применяется в качестве катализаторов и носителей для катализаторов, адсорбентов, селективных мембран, а также матриц для получения однородных по размеру наноструктур и большого числа функциональных композитных материалов.



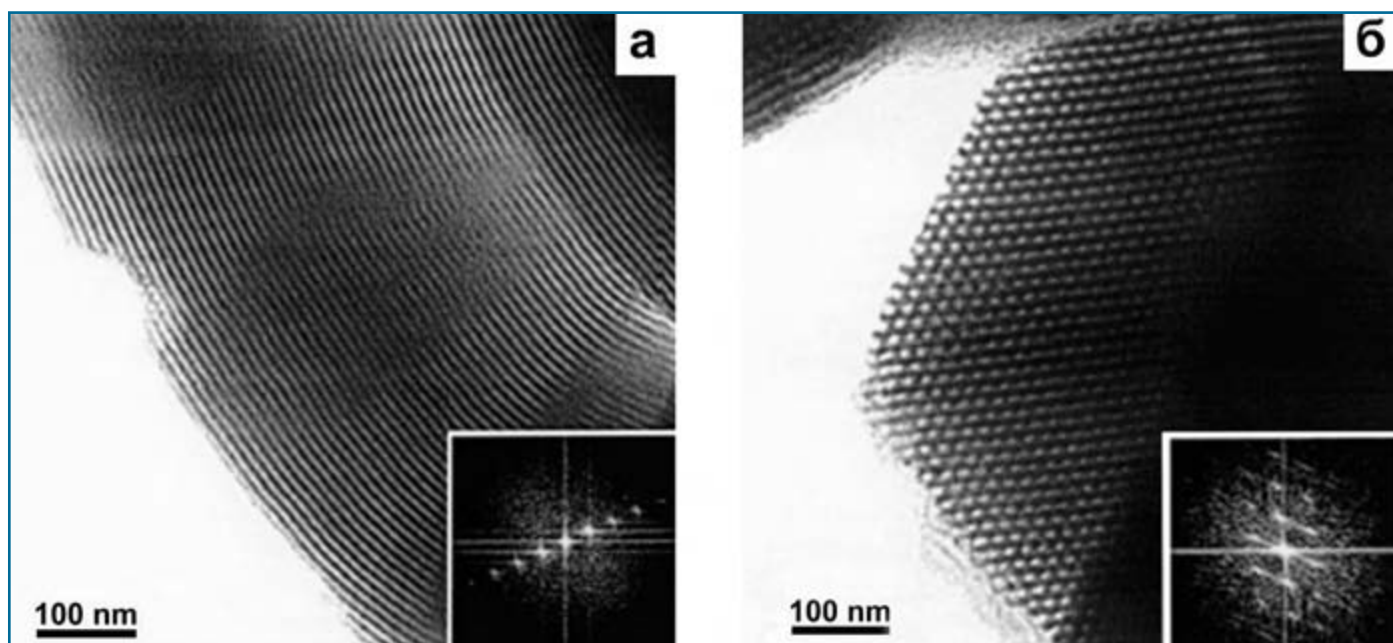





Рис. 1. Микрофотографии гексагональной фазы мезопористого диоксида кремния: а – перпендикулярно каналам пор; б – вдоль пор

Принятое обозначение фазы	Темплат	Структура пор		Диаметр пор, нм
MCM-41	$C_n H_{2n+1} N(CH_3)_3$ anion, $n = 6-22$ , anion=Hal, OH-	Гексагональная		2-10
MCM-48	$C_n H_{2n+1} N(CH_3)_3$ anion, $n = 6-22$ , anion=Hal, OH-	Кубическая		2-5
MCM-50	$C_n H_{2n+1} N(CH_3)_3$ anion, $n = 6-22$ , anion=Hal, OH-	Ламеллярная		4
SBA-15	триблоксополимеры	Гексагональная		5-30
MSU-n	$H_2N(CH_2)_{2(n)}NH_2$ $n=12-22$	Ламеллярная	иерархическая	4-6

#### Литература:

1. Sayari, Jaroniec M., Pinnavaia T.J. Nanoporous Materials II (Studies in Surface Science and Catalysis), Elsevier Science. 2000. P. 916.
2. Романовский Б.В., Макшина Е.В. Нанокompозиты как функциональные материалы // Соросовский образовательный журнал. 2004. № 2. С. 50–55.

## МЕТАМАТЕРИАЛЫ (Metamaterials)

*Так соборы кристаллов сверхжизненных  
Добросовестно луч-паучок  
Распуская на ребра, их сызнова  
Собирает в единый пучок...*  
О. Мандельштам



Согласно современной терминологии, Баба-Яга не ворожит, а синтезирует метаматериал

Детская задачка «Что тяжелее: килограмм ваты или килограмм железных опилок?» поставит в затруднение разве что несообразительного первоклассника. Гораздо интереснее рассуждать на тему: «Какими свойствами будет обладать материал, который мы получим, если тщательно смешаем мелко измельченную вату и железные опилки?» Интуитивно понятно: чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить свойства железа и ваты, после чего можно с уверенностью утверждать, что полученный материал наверняка будет, например, реагировать на присутствие магнита и воды. Однако всегда ли свойства многофазного материала определяются исключительно свойствами образующих его компонентов? Хочется ответить на этот вопрос положительно – сложно

представить себе, скажем, смесь диэлектриков, которая проводит электрический ток. «Такое бывает только в сказках!» – постарается реабилитироваться первоклассник, вспомнив многочисленных колдунов и волшебниц из детских сказок, которые, смешивая всевозможные мухоморы, лягушачьи лапки и крылья летучих мышей, получали магические порошки, волшебные свойства которых, строго говоря, мухоморам и лягушачьим лапкам несвойственны.

Впрочем, как это ни удивительно, современная наука знает примеры того, как совмещение вполне заурядных материалов позволяет создавать объекты, свойства которых не только не присущи используемым компонентам, но и в принципе не могут быть найдены в природе и, как может показаться на первый взгляд, запрещены законами физики.

«Это чудо!» – скажет первоклассник. «Нет, это метаматериалы!» – возразит современный ученый. И оба будут по-своему правы, потому что с точки зрения классической науки метаматериалы способны творить самые настоящие чудеса. Впрочем, сам процесс создания метаматериала тоже подобен волшебству, так как компоненты метаматериала недостаточно просто смешать, как это делали сказочные волшебники – их необходимо правильно структурировать.

Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько микроструктурой. Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демон-

стрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе.

Одним из наиболее горячо обсуждаемых в последнее время типов метаматериалов являются объекты с отрицательным показателем преломления. Из курса школьной физики хорошо известно, что показатель преломления среды ( $n$ ) является величиной, показывающей во сколько раз фазовая скорость электромагнитного излучения в среде ( $V$ ) меньше скорости света в вакууме ( $c$ ):  $n = c/V$ . Показатель преломления вакуума равен 1 (что, собственно, следует из определения), тогда как для большинства оптических сред он больше. Например, обычное силикатное стекло имеет показатель преломления 1,5, а значит, свет распространяется в нем со скоростью в 1,5 раза меньше, чем в вакууме.

На теоретическую возможность существования уникальных материалов с отрицательным показателем преломления указал советский физик Виктор Веселаго почти 40 лет назад. Дело в том, что коэффициент преломления связан с двумя фундаментальными характеристиками вещества, диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ , простым соотношением:  $n^2 = \epsilon\mu$ . Несмотря на то, что данному уравнению удовлетворяют как положительные, так и отрицательные значения  $n$ , ученые долго отказывались верить в физический смысл последних – до тех пор, пока Веселаго не показал, что  $n$  может быть меньше 0 в том случае, если одновременно  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ .

Природные материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью хорошо известны – это любой металл при частотах ниже плазменной частоты (при которой металл становится прозрачным). Гораздо сложнее создать материал с  $\mu < 0$  – в природе такие материалы не существуют. Именно по этой причине работы Веселаго долгое время не привлекали должного внимания научной общественности. Прошло 30 лет, прежде чем английский ученый Джон Пендри (John Pendry) в 1999 г. показал, что отрицательная магнитная проницаемость может быть получена для проводящего кольца с зазором. Если поместить такое кольцо в переменное магнитное поле, в кольцо возникнет электрический ток, а на месте зазора возникнет дуговой разряд.

Таким образом, возможны системы с отрицательным откликом как на электрическую, так и на магнитную компоненту электромагнитного излучения. Объединить обе системы в одном материале впервые удалось американским исследователям под руководством Дэвида Смита (David Smith) в 2000 г. Созданный метаматериал состоял из металлических стержней, ответственных за  $\epsilon < 0$ , и медных кольцевых резонаторов, благодаря которым удалось добиться  $\mu < 0$ . Несомненно, структуру, изображенную на рис. 1, сложно назвать материалом в традиционном смысле этого слова, поскольку она состоит из отдельных макроскопических объектов. Между тем, данная структура «оптимизирована» для микроволнового излучения, длина волны которого значительно больше отдельных структурных элементов метаматериала. Поэтому с точки зрения микроволн последний также однороден, как, например, коллоидный раствор для видимого света. Последовательно уменьшая размеры структурных элементов, можно создавать метаматериалы с отрицательным показателем преломления для терагерцевого и инфракрасного диапазонов спектра. Ученые ожидают, что, благодаря достижениям современных нанотехнологий, в самое ближайшее время будут созданы метаматериалы и для видимого диапазона спектра.

С точки зрения физики метаматериалы с отрицательным показателем преломления являются



**Рис. 1.** Фотография метаматериала с отрицательным показателем преломления для микроволнового излучения



антиподами обычных материалов. В случае отрицательного показателя преломления происходит обращение фазовой скорости электромагнитного излучения; доплеровский сдвиг происходит в противоположную сторону; черенковское излучение от движущейся заряженной частицы происходит не вперед, а назад; собирающие линзы становятся рассеивающими и наоборот... И все это – лишь небольшая часть тех удивительных явлений, которые возможны для метаматериалов с отрицательным показателем преломления.

Практическое использование таких материалов, в первую очередь, связано с возможностью создания на их основе терагерцевой оптики, что, в свою очередь, приведет к развитию метеорологии и океанографии, появлению радаров с новыми свойствами и средств всепогодной навигации, устройств дистанционной диагностики качества деталей и систем безопасности, позволяющих обнаружить под одеждой оружие, а также уникальных медицинских приборов.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Physical Review Letters. 2000. № 84. P. 4184.
2. Padilla W.J., Basov D.N., Smith D.R. Materials Today. 2006. Vol. 9, № 7–8. P. 28–35.

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (Microelectromechanical systems)

*Почему бы нам не сверлить отверстия, резать или спаивать, штамповать или формовать предметы на бесконечно малом уровне?*

*Ричард Фейнман.*

*«Там внизу много места». 1959 г.*



**Рис. 1.** Коллекция миниатюрных ружей и револьверов в Тульском музее оружия рядом с обычной зажигалкой

Если Вы загляните в Тульский музей оружия, то найдете в нем не только богатейшее собрание экспонатов на военную тему. Как известно, Тула – это родина не только самоваров, пряников и оружия. Здесь, если верить Н.С. Лескову, жил удивительный мастер Левша, сумевший подковать английскую блоху, здесь же сегодня живут мастера, создающие миниатюрные копии обычных и необычных предметов. Поэтому в музее Вас будет ждать сюрприз – коллекция действующего (!) микроскопического оружия, рассмотреть которую можно только под микроскопом. Вес самого маленького револьвера составляет всего 5,5 г. Поэтому кажется просто невероятным, что

его барабан способен вращаться, а сам револьвер вполне может стрелять крошечными пулями калибра 1,5 мм (рис. 1).

Но сегодня уже и эти экспонаты не удивят ученого: значительно более сложные микроразмерные механические устройства производятся в промышленных масштабах и окружают человека повсюду – мы просто не можем их увидеть! Причем особый интерес представляют не столько просто механические, сколь микроэлектро-механические системы или МЭМСы, способные на микроуровне преобразовывать механическую энергию в электрические или оптические сигналы и наоборот. Создание МЭМСов стало возможным только в последнее время, преимущественно благодаря стремительному развитию полупроводниковых технологий.

В конце 50-х годов прошлого XX в. известный физик Ричард Фейнман публично пообещал 1000 долларов (немалая по тем временам сумма) тому, кто создаст электрический мотор размером менее 1/64 дюйма (примерно 0,4 мм). Вызов принял молодой ученый Уильям Маклеллан, который вручную собрал требуемое устройство с помощью пинцета и оптического микроскопа. Сейчас микромотор Маклеллана можно увидеть в музее Калифорнийского технологического института. Интерес к микроэлектромеханическим системам постепенно охватывал все больше университетов и компаний, и уже к середине 80-х годов прошлого века успехи в области разработки МЭМС привели к созданию первых коммерческих продуктов на их основе.



**Рис. 2.** Почти невидимый невооруженным глазом клещ с удивлением взирает на микроскопические шестеренки, изготовленные в METU (Турция)

Как правило, к МЭМС относят механические устройства размером от миллиметра до микрометра (рис. 2). Важно отметить, что на таком масштабе обычные законы макромеханики не всегда применимы. Поскольку отношение поверхности к объему для МЭМС на порядки больше, чем для макроскопических механических устройств, особое значение приобретают поверхностные эффекты, связанные с трением, электростатикой и смачиваемостью.

Основным материалом для изготовления МЭМС является кремний, что связано с его хорошими механическими свойствами и воспроизводимой технологией структурирования методом литографии, разработанной для создания современных интегральных схем и изделий **нанозлектроники**. Все это позволяет интегрировать МЭМС с уже существующими электронными компонентами. В то же время, несмотря на массовое производство последних, монокристаллический кремний остается весьма дорогим материалом, поэтому МЭМС нередко изготавливают на основе полимеров. Иногда для производства МЭМС используют и металлы (золото, никель, алюминий, хром, титан, вольфрам и другие). Как правило, производство МЭМС оказывается дешевле традиционной сборочной технологии, применяемой при создании макроскопических механических устройств, поскольку при создании МЭМС расходуется меньше материала, а

промышленное производство МЭМС является параллельным процессом, при котором за один производственный цикл на одной кремниевой пластине можно произвести сразу сотни готовых устройств. Кроме того, при создании сложных устройств, состоящих из множества компонентов, МЭМС-технология позволяет повысить надежность (поскольку все компоненты интегрированы в одной плате) и эффективность (т.к. компоненты расходуют мало энергии вследствие своего микроскопического размера и близкого расположения элементов).

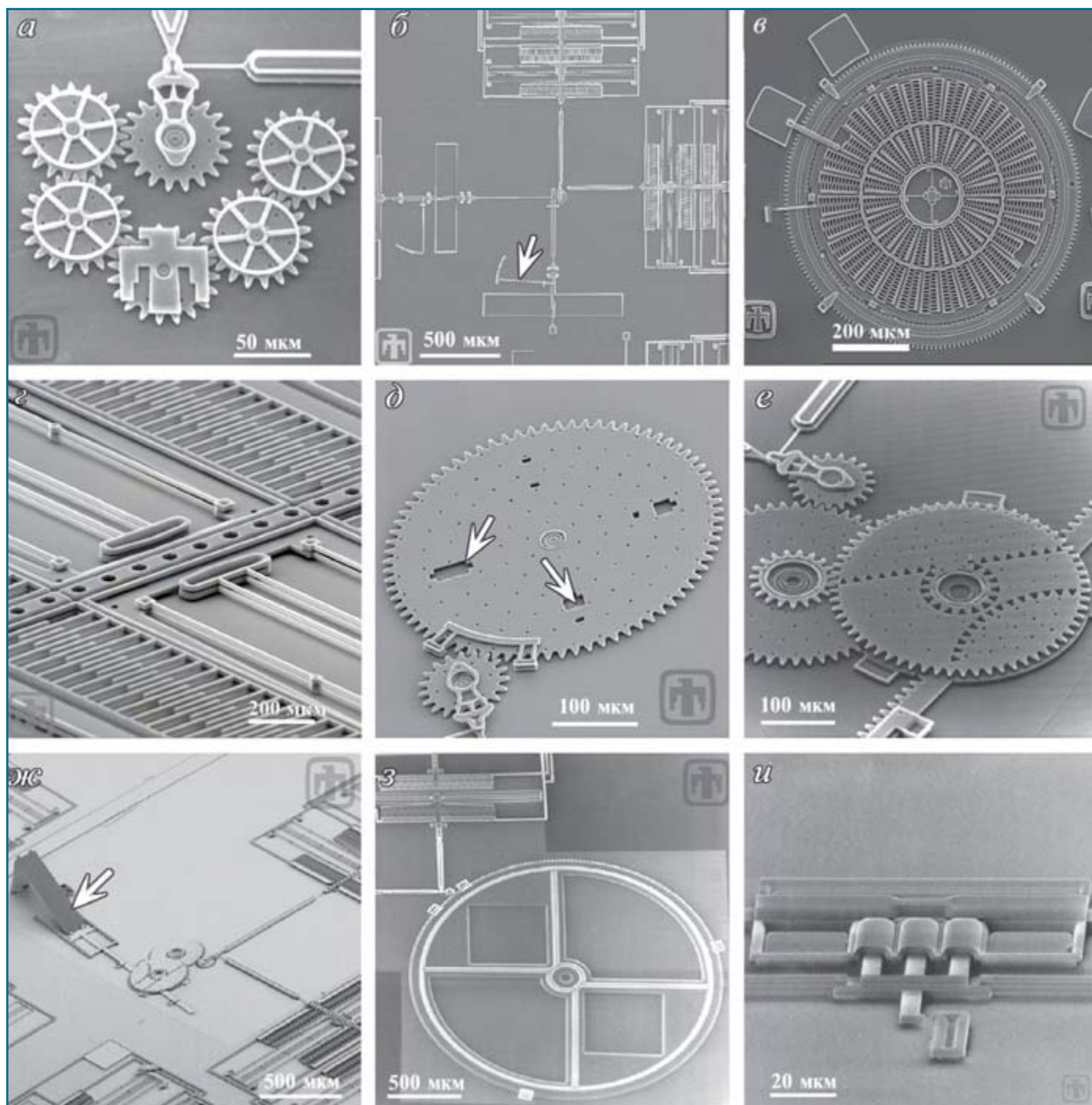
Чрезвычайно малый размер позволяет использовать МЭМС в различных миниатюрных устройствах, начиная от механических часов и заканчивая имплантатами для человека. Можно выделить несколько применений МЭМС, получивших наиболее широкое распространение.

**Акселерометры.** Пожалуй, наиболее коммерчески успешными устройствами на основе МЭМС в настоящее время являются миниатюрные устройства для измерения ускорений. В частности, их широко используют в устройствах, контролирующих раскрытие подушек безопасности в автомобилях при авариях.

**Микрозеркала.** Устройства, использующие системы подвижных зеркал шириной всего 10 мкм, предложила компания Texas Instruments. Угол наклона каждого зеркала независимо управляется МЭМС-устройством, благодаря чему можно либо отражать, либо блокировать свет. Подобные системы используются в проекторах для графических презентаций. В свою очередь, благодаря совмещению акселерометров на основе МЭМС для регистрации внешних вибраций с МЭМС-микрозеркалами для коррекции лазерного луча, компания Xerox создала лазерные принтеры с чрезвычайно высоким разрешением печати.

**Микрокапиллярные устройства.** Кремниевые чипы с микроскопическими каналами могут быть использованы для адресной *in vivo* доставки контролируемых количеств лекарственных препаратов. В частности, специально для больных сахарным диабетом было разработано интегрированное МЭМС-устройство, объединяющее сенсор на глюкозу и диспергатор инсулина. Микрокапиллярные устройства на основе МЭМС





**Рис. 3.** Устройства на основе МЭМС: а – подвижное соединение микрошестеренок; б – микродинамометр, позволяющий измерять как тангенциальные, так и нормальные силы, а также оценивать микротрение. Подвижный стержень и дуговая шкала отмечены стрелкой; в – микроактуатор; г – приводной микромеханизм; д – оптический переключатель. Зубчатый кремниевый диск может быть механически выставлен в 4 положения, условно соответствующих сигналам (0,0), (1,0), (0,1) и (1,1) (два положения отмечены стрелками); информация считывается неподвижным сфокусированным лазерным лучом; е – передаточное микроустройство, преобразующее вращательное движение в поступательное; ж – подвижное кремниевое микрозеркало (показано стрелкой), которое может изменять угол наклона за счет поступательного движения поршня, приводимого в движение передаточным устройством (е); з – оптический затвор; и – трехцилиндровый паровой двигатель: вода внутри каждого цилиндра нагревается электрическим током, и образовавшийся пар выталкивает поршень, при охлаждении жидкости поршень втягивается обратно в цилиндр под действием капиллярных сил. Адаптировано на основе микрофотографий с сайта Sandia National Laboratories (<http://www.mems.sandia.gov>)

могут использоваться в струйных принтерах для нанесения чернил на бумагу.

Биомедицинские имплантаты. Недавно были созданы кремниевые МЭМС-устройства, содержащие звуковой сенсор и микропроцессор, который раскладывает звуковые волны на Фурье-гармоники. Устройство имплантируется непосредственно в человеческое ухо, после чего полученные Фурье-компоненты напрямую передаются слуховому нерву, благодаря чему глухие люди обретают возможность слышать. В настоящее время разрабатываются аналогичные устройства для восстановления зрения. Как ожидается, рынок биомедицинских имплантатов на основе МЭМС в ближайшее время будет стремительно расти.

Помимо перечисленных устройств, на основе МЭМС созданы оптические переключатели и затворы, сенсоры напряжений и давления, гироскопы и даже вибросенситивные джойстики в новых игровых приставках NiNtendo. Размер МЭМС уменьшается от года к году, открывая новые перспективы для их использования, и лишь наше воображение способно подсказать нам, какие еще удивительные МЭМС-устройства появятся на свет в ближайшем будущем (рис. 3). Уже сегодня множество элементов конструкции МЭМС лежит в нанодиапазоне, открывая тем самым новую эру микросистемотехники – эру *на-  
ноэлектромеханических систем* и *наноактюа-  
торов*.

#### Литература:

1. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology Wiley-Interscience. 2003. P. 400.
2. <http://www.mems.sandia.gov>

## Мицеллы

### (Micelles)

*«Вот идет Еж по лесу, похрюкивает, ножками-коротышками по корешкам постукивает. Лис на него. Еж брык! – и стал шариком. Поди-ка, сунься к нему, – кругом колючки».*

*Виталий Бианки.*

*«Как Лис Ежа перехитрил»*



Наверняка вы видели в поле или в лесу живого ежика... или хотя бы на картинке – маленький, беззащитный – как, наверное, ему трудно жить среди опасных хищников! Конечно, при встрече с лисой еж не может вступить с ней в бой, нет у него страшных зубов, да и размеры не те. Но природа не зря подарила ему острые иголки – при приближении опасности ежик мгновенно сворачивается в клубок, и лисице ничего не остается, как колоть о них свой нос – вот же еж, близко, а не достанешь. Вы спросите, при чем здесь мицеллы? Дело в том, что поведение ежа в моменты опасности очень похоже на поведение мицелл в «недружественной» среде. Мицеллы – это ассоциаты **амфифильных молекул поверхностно-активных веществ** (ПАВ), обладающих полярной гидрофильной «головой» (амино-, карбоксильной, сульфозэфирной или сульфо-группой, «любящей» воду) и неполярным углеводородным «хвостом». Если такое вещество растворить в любой жидкой среде, моле-

кулы ПАВ будут заполнять ее поверхность (см. **Пленки Ленгмюра–Блоджетт**), до тех пор, пока их концентрация не достигнет некоторого предельного значения, называемого критической концентрацией мицеллообразования (ККМ). При этом молекулы ПАВ будут обращаться к жидкой фазе тем концом, который ближе по химической природе к молекулам растворителя. Выше же критической концентрации мицеллообразования молекулы начнут «сжеживаться», образуя замкнутые ассоциаты, гидрофильная или гидрофобная часть которых полностью замкнута в объеме мицеллы (рис. 1). Если мы растворяем ПАВ в полярной среде (например, в воде), то наружу будут обращены полярные части молекул, а мицеллы будут называться «прямыми». Если же молекулы ПАВ поместить не в воду, а, например, в неполярное масло, то они, словно ежик, свернутся в клубки, выставив, как иголки, наружу свои гидрофобные хвосты. Такие мицеллы носят название «обращенных». Движущей силой такого поведения молекул является уменьшение межфазного натяжения на границе мицелла–растворитель.

Вообще величина ККМ сильно зависит от природы ПАВ, длины углеводородного радикала, электролита и pH раствора. Чем длиннее углеводородный радикал и слабее полярная группа, тем ниже может быть концентрация ПАВ, вызывающая мицеллообразование. При увеличении концентрации ПАВ мицеллы могут деформироваться и приобретать несферическую форму. Так можно получить несферические типы мицелл: цилиндрические, гексагонально упакованные, ламеллярные и проч. Если взять растворитель сложного состава, смешав компоненты согласно диаграмме состояния «полярный растворитель –



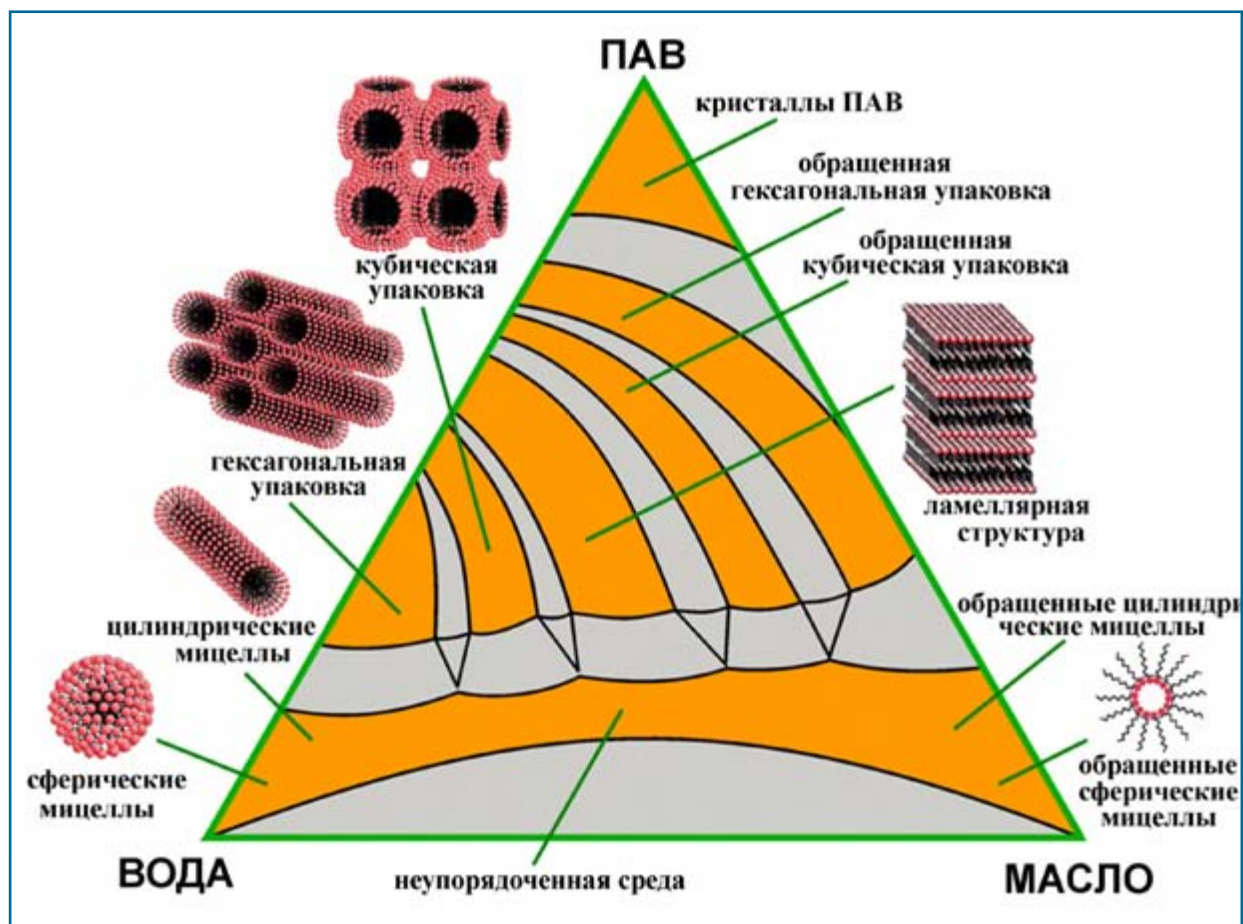


Рис. 1. Диаграмма состояния системы вода–масло–ПАВ

неполярный растворитель– ПАВ», то можно получить микрогетерогенные системы, полярная и неполярная фазы которых будут пространственно разделены мономолекулярной пленкой ПАВ в объеме кажущейся однородной жидкости.

Мицеллярные системы активно используют в процессах синтеза *наноструктур* и *наноматериалов*. Так, синтез в обращенных мицеллах является на сегодня самым распространенным

способом формирования однородных по размеру наночастиц, а прямые мицеллы применяют для темплатного синтеза *цеолитов*, *мезопористых молекулярных сит* и нанопористых соединений. В природе мицеллоподобные структуры образуются в крови, в межтканевой жидкости, в липосомах и рибосомах, а также служат основными компонентами при транспорте липидов и в процессах биоминерализации.

#### Литература:

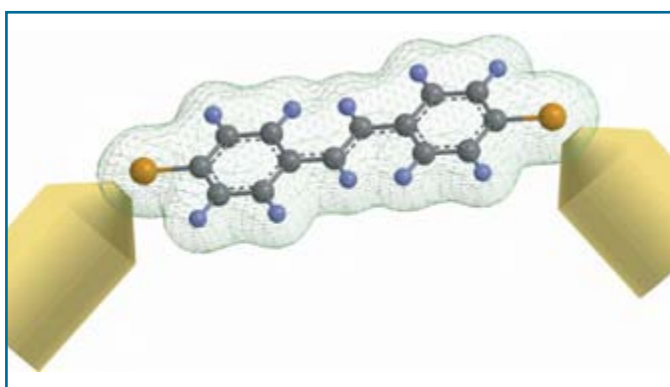
1. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия: Учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 2006. 444 с.

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (Molecular electronics)

«Электрон неисчерпаем как и атом».

В.И. Ленин.

«Империализм и эмпириокритицизм»



Давно ли Вы обращали внимание на электрическую схему материнской платы Вашего компьютера? А ведь каждый ее компонент представляет собой сложное электронное устройство с размерами элементов не толще человеческого волоса. Тем не менее, современная электроника требует все большего и большего уменьшения их размеров. Уже сегодня производятся 100-нанометровые транзисторы, опробованы **одноэлектронные транзисторы** на основе отдельных **углеродных нанотрубок**, разработаны первые алгоритмы вычислений для **квантовых компьютеров**.

Каков же минимальный размер электронного элемента и возможно ли собрать его из отдельных атомов? Именно эти вопросы ставит перед собой молекулярная электроника, рассматривающая электронные устройства на основе отдельных молекул. Уже более 50 лет назад в органической химии появились первые «проводящие полимеры» имеющие сопряженную систему орбиталей на всей длине макромолекулы. Такой полимер представляет собой простейший проводник и может быть использован в качестве провода в мо-

лекулярной электронике. Аналогично, алкильная цепь будет проявлять резистивные свойства, а из двух акцепторных групп можно создать простейший конденсатор. Если же в отдельной молекуле реализуется энергетический барьер, аналогичный р-п-переходу в полупроводнике, то такая молекула будет проводить ток лишь в одну сторону, то есть являться простейшим диодом. Для создания же элементов логики на основе отдельных диодов нужно лишь научиться объединять их в функциональные сети. Интересно, что многие важные принципы молекулярной электроники, например, сборка сложных устройств из модулей, заимствованы из сходных областей науки – ком-

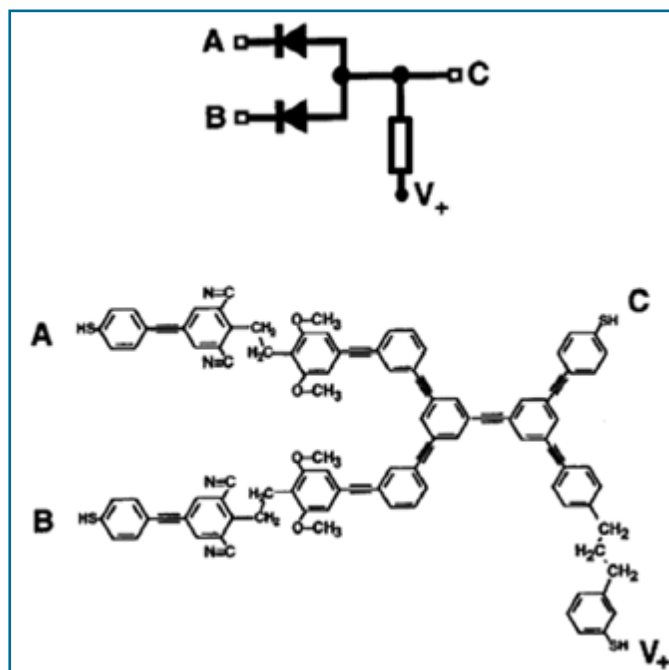


Рис. 2. Электрическая схема и молекулярный аналог логического элемента «И»

пьютерной архитектуры, полупроводниковых технологий и т.д. Так, на рис. 1 представлено схематическое изображение органической молекулы (теоретическая модель), которая может выступать в качестве логического элемента «И».

Изучение электрических свойств отдельных молекул связано с измерением их вольтамперных характеристик (ВАХ), которое и является одной из самых сложных задач на пути создания молекулярных электронных устройств. Наиболее просто проводить измерение *самособирающихся монослоев* на атомно-гладких поверхностях, а затем оценить ВАХ отдельной молекулы.

Однако, несмотря на огромные возможности и перспективы развития логических устройств на основе различных молекул безоблачное будущее

молекулярных компьютеров во многом омрачено рядом проблем, связанных как с необходимостью решения научных, так и чисто технологических проблем. К их числу относятся проблема комбинирования устройств на молекулярном уровне без изменения их индивидуальных электрических свойств, проблема синтеза сложных органических молекул, получение надежных токопроводящих контактов, рассеяние энергии электронов на колебательные и другие моды, приводящие к движению молекул, ну и конечно, проблема охлаждения молекулярных компьютеров.

Вопросы, требующие решения, отнюдь не ограничиваются этим списком. Появятся ли молекулярные компьютеры – время покажет.

#### Литература:

1. Aviram A., Ratner M.A. Molecular Rectifiers. Chem. Phys. Lett. 1974. Vol. 29. P. 277.
2. Ellenbogen J.C., Love J.Ch. Architectures for Molecular Electronic Computers: 1. Logic Structures and an Adder Designed from Molecular Electronic Diodes, Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88. №3. P. 386–426.



## МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ (Molecular Beam Epitaxy)

*«Кисть, рука и палитра нужны, чтобы рисовать,  
но картина создается вовсе не ими»*

*Жан Шарден*



Том Сойер создает простейшую многослойную структуру – красит забор (иллюстрация к книге «Приключения Тома Сойера»)

Жизнь современного человека трудно себе представить без микроэлектронной техники. В основе большинства микросхем, светоизлучающих диодов и других полупроводниковых систем лежат многослойные структуры из различных полупроводниковых материалов. Вынесенное в эпиграф изречение о живописи может быть в полной мере отнесено и к современной микроэлектронике: будучи очень важной, зада-

ча создания многослойных структур является одновременно и очень сложной: недостаточно уметь формировать «дорожки» металлов или полупроводников – необходимо еще и разработать дизайн всей схемы в целом. При этом элементы микроэлектроники, например, излучающий элемент даже самой обыкновенной лазерной указки, включают до 5–7 полупроводниковых слоев, а их толщина не превышает доли микрометра, что на два-три порядка меньше толщины человеческого волоса.

Самым передовым методом получения многослойных полупроводниковых систем, *гетероструктур* и *тонких пленок* с контролем толщины на атомном уровне является метод *молекулярно-лучевой эпитаксии* (МЛЭ). По сути МЛЭ представляет собой результат фантастического усовершенствования достаточно старого способа нанесения пленок путем испарения вещества в вакууме. В методе МЛЭ тонкие (толщиной от нескольких нанометров) упорядоченные слои формируются на нагретой монокристаллической подложке в сверхвысоком вакууме (до  $10^{-12}$  атм) (рис. 1). Высокая температура способствует быстрой миграции атомов по поверхности, в результате чего атомы занимают строго определенные положения, ориентированные относительно подложки – происходит эпитаксиальный рост кристаллической пленки.

Основным блоком системы МЛЭ является ростовая камера, в которой испарение материалов осуществляется из эффузионных ячеек – нагреваемых до высокой температуры полых цилиндров с крошечным отверстием в крышке (эффузия – медленное истечение газов через малые отверстия). В одной ростовой камере может

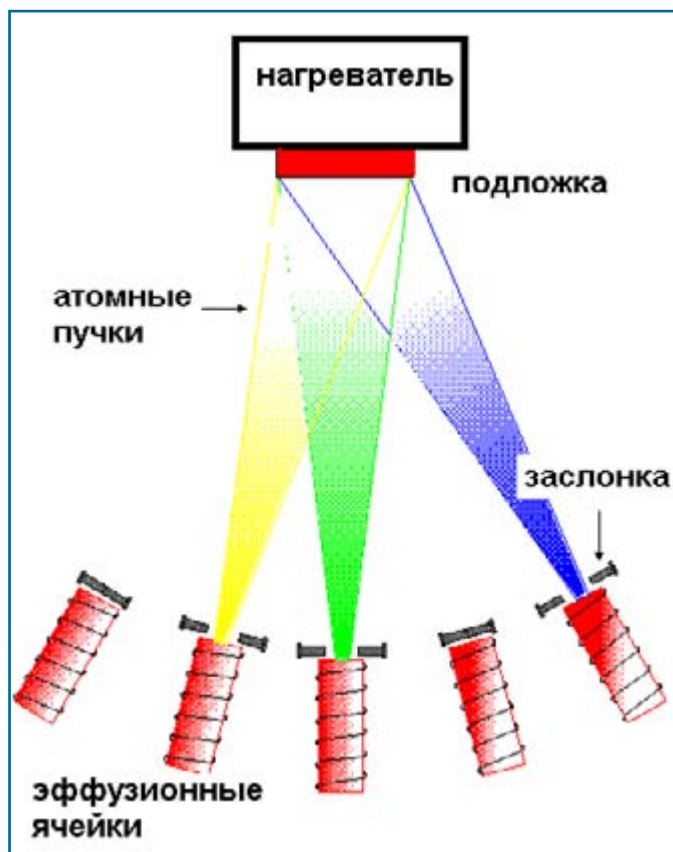


Рис. 1. Упрощенная схема ростовой камеры в системе МЛЭ

располагаться несколько испарителей, каждый из которых предназначен для нанесения одного вещества. Испаряемый материал осаждается на подложку, закрепленную на манипуляторе с нагревательным устройством. Помимо испарителей, в ростовой камере находятся системы анализа растущей пленки, например, масс-спектрометр для анализа состава остаточной атмосферы в камере или дифрактометр отраженных электро-

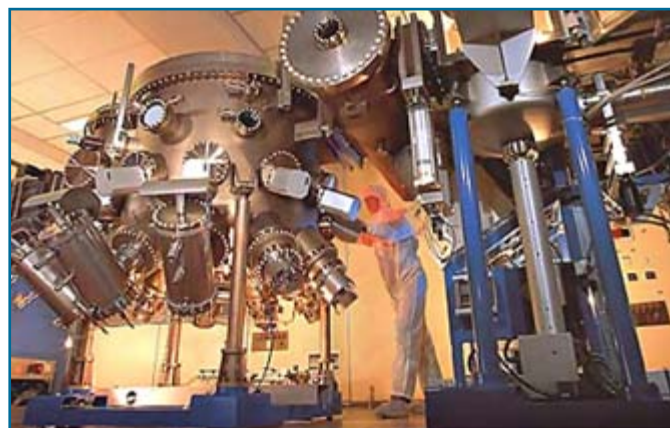


Рис. 2. Комплекс для молекулярно-лучевой эпитаксии фирмы RIBER

нов, контролирующей структуру формируемых пленок.

В настоящее время большинство установок для МЛЭ состоят из автоматизированных модулей (рис. 2), которые подразделяются на технологические и вспомогательные. Технологические модули предназначены для проведения определенного технологического процесса – очистки подложек, осаждения пленок, анализа формируемых структур и т.д.). Вспомогательными являются, например, модуль загрузки–выгрузки, модуль предварительной откачки и обезгаживания вакуумных камер и др. Входящие в состав комплекса МЛЭ модули соединяются между собой шлюзовыми устройствами и системой перемещения подложек и образцов из одного модуля в другой без нарушения вакуума.

Большие размеры, сложность конструкции, высокая стоимость (до десятков миллионов долларов) делает комплексы молекулярно-лучевой эпитаксии «пирамидами» века нанотехнологий.

#### Литература:

1. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Ред. Л. Ченг, К. Плог. М.: Мир, 1989. 580 с.

## НАНОАКТЮАТОРЫ (Nanoactuators)

*«...кратчайшее выражение смысла жизни может быть таким: мир движется и совершенствуется. Главная задача – внести вклад в то движение, подчиниться ему и сотрудничать с ним»*

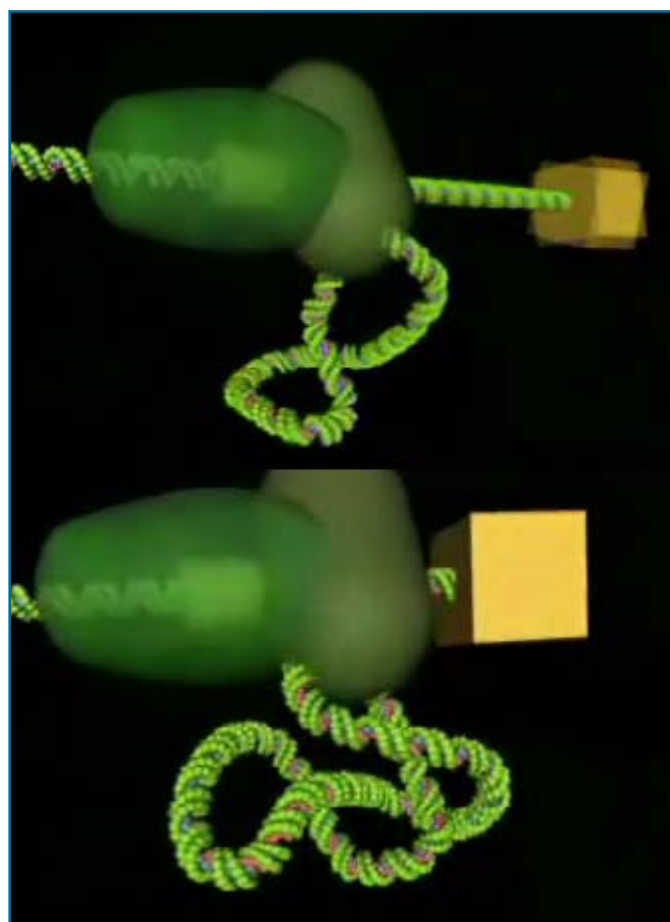
*Л.Н. Толстой*

Слово «наноактюатор» является калькой с английского nanoactuator – что-то очень маленькое, что может действовать (act в переводе означает «действовать»). Действовать можно, конечно, по-разному, но когда говорят о наноактюаторах, речь, как правило, идет о механическом действии – например, о линейном перемещении или вращении чего-либо. Наноактюаторы очень востребованы в различных наноустройствах. Например, **нано-машина** не смогла бы ездить без наноактюатора – своего молекулярного мотора, а **нанороботы** не могли бы делать шаги.

Очевидно, что для движения какого-либо объекта нужно подвести к нему и затратить некоторое количество энергии, точно так же как для человека необходима еда, чтобы двигаться и жить. На сегодняшний день известно много способов преобразования химической и электрической энергии в механическую. По сравнению с традиционно используемым в макроскопических масштабах электромагнитным методом, в нанотехнологии существует возможность применения и других принципов, которые в случае макротехнологии не имело смысла использовать по функциональным или ценовым характеристикам (см. табл. 1).

Очевидно, что выбор принципа активации следует проводить с учетом максимальной эффективности, мощности и быстродействия наноустройств. Кроме того, одной из наиболее важных характеристик принципа действия устройства является максимальная сила, развиваемая в процессе преобразования энергии  $F = \eta \frac{dW}{ds}$ , которая в общем случае зависит от масштаба системы.

Так как энергия однородной системы пропорциональна ее объему ( $R^3$ ), максимальная сила, развиваемая актюатором, пропорциональна  $R^2$ . В случае непотенциальных полей взаимодействие элементов системы может оказаться нелинейным, что приводит к отклонению показателя степени от 2 – то есть энергия будет теряться



**Рис. 1.** Биологический молекулярный мотор. На нижнем изображении шток, представляющий собой молекулу ДНК, полностью втянут, на верхнем изображении – частично вытолкнут



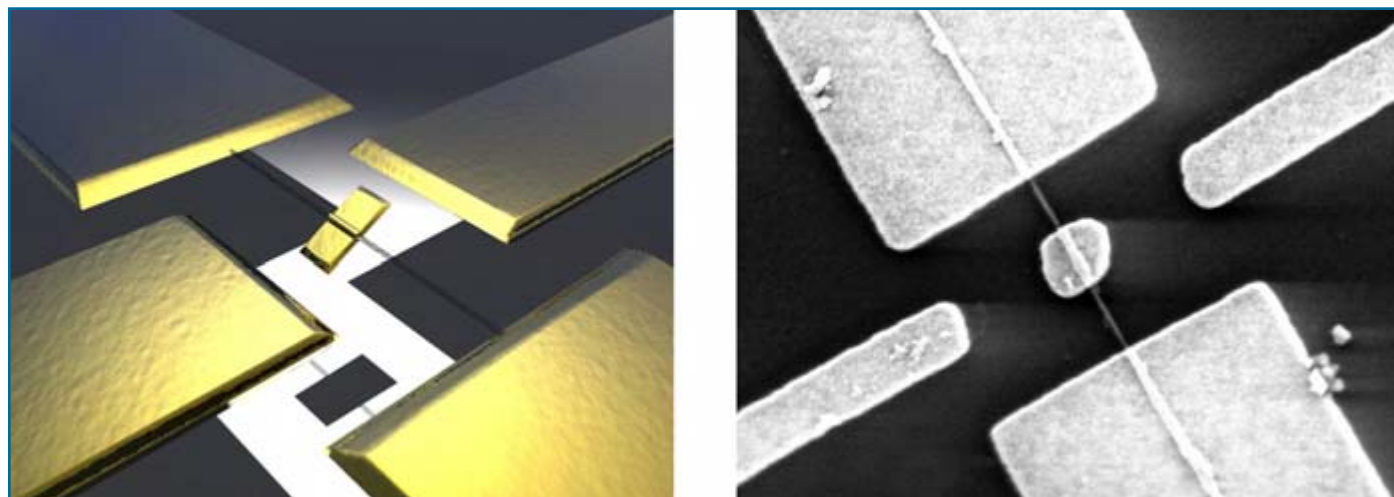
**Таблица 1.** Типичные значения плотности энергии, показатели степени зависимости силы от масштаба системы, времена отклика и коэффициенты полезного действия различных принципов преобразования энергии актюаторов.

Метод активации	Плотность энергии, Вт·с/м <sup>3</sup>	Показатель степени для $F \sim R^n$	Время отклика, $\tau$ [мс]	КПД, %
Электростатический	$10^4$	2	$\ll \tau_{\text{мех}}^*$	0,5
Электромагнитный	$10^5$	от 2 до 4	$\ll \tau_{\text{мех}}$	<0,01
Пьезоэлектрический	$2 \cdot 10^5$	2	$\ll \tau_{\text{мех}}$	0,3
Памяти формы	$3,5 \cdot 10^5$	2	<50	0,01
Термопневматический	$<5 \cdot 10^5$	2	10	0,1
Биметаллический	$10^6$	2	<50	$10^{-4}$
Молекулярный	$2 \cdot 10^7$	-	$\ll \tau_{\text{мех}}$	0,5
Биологическое преобразование энергии	$6 \cdot 10^7$	-	<50	0,6

\*  $\tau_{\text{мех}}$  – время механического отклика системы зависящее от вязкоупругих свойств материала (~1 мкс).

впустую. В общем случае взаимосвязь между силой и размером системы может быть описана соотношением  $F \sim R^n$ , где показатель степени  $n$  во многом определяет эффективность конкретного способа преобразования энергии, который может изменяться при переходе от макро- к микро- и нанодиапазону. Действительно в микро- и наносистемах вместо электромагнитного принципа преобразования энергии, используемого повсеместно в макроэлектронике, часто используют пьезоэлектрический или электростатический эффекты (табл. 1). Очевидно, что в зависимости от выбора принципа работы наноустройств подвод энергии к микро- или *нанoeлектромеханической системе* может осуществляться электрически, термически или химически.

Электрические наноактюаторы управляются наиболее просто – приложением внешней разности потенциалов или электромагнитного поля. Простейшие типы таких актюаторов включают *пьезодвигатели* и электростатические актюаторы на основе плоскопараллельных конденсаторов, однако возможны и более сложные и интересные решения. Исследователи из Беркли, США, например, создали электрический наноактюатор, очень похожий на обычный электромотор (рис. 2). Вращающаяся часть, называемая ротором, – крошечная золотая пластинка размером около 250 нм, которая закреплена на оси – *углеродной нанотрубке*. Вокруг ротора расположено три электрода – два по бокам и один снизу. Подавая на электроды переменное электрическое



**Рис. 2.** Наноактюатор-мотор. Слева приведена схема, а справа – изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

напряжение с амплитудой около 5 В, ученые заставляют наномотор вращаться.

Тепловые актюаторы обычно создают на эффектах теплового расширения или деформации контакта двух материалов (часто – пары металл–диэлектрик) за счет различия в коэффициентах теплового расширения. Разогрев элементов производят, пропуская через них электрический ток или нагревая окружающую среду. Такие актюаторы могут создавать достаточно большие силы, однако эффективность использования энергии оказывается весьма низкой. Увеличение разницы коэффициентов теплового расширения материалов позволяет несколько увеличить КПД, однако общая эффективность этих устройств обычно не превышает 0,1%.

Химическое управление наноактюаторами осуществляется при помощи изменения состава окружающей среды, ее кислотности и других факторов. Иногда (как например, в моторе наномашин) используют свет, который, воздействуя на химические молекулы, приводит актюатор в движение. К химическим наноактюаторам относятся и так называемые биологические молекулярные моторы. Примером такого мотора может быть EсoR124I – это крошечное устройство способно выталкивать и втягивать сделанный из молекулы ДНК стержень со скоростью почти 190 нм в секунду, а общее перемещение может достигать 3 мкм!!! Диаметр этого стержня – всего 2 нм. Вместо *нанобатарейки* такой молекулярный мотор использует молекулы АТФ – источник энергии, которым пользуются живые клетки (и наши клетки в том числе). Таким образом, чтобы включить мотор, нужно впрыснуть порцию молекул АТФ.

Другой молекулярный мотор – АТФ-синтетаза, предназначенный для синтеза или гидролиза молекул АТФ, а также для переноса протонов ( $H^+$ ) через мембрану клетки, работает в клеточных мембранах животных, обеспечивая стабильность внутриклеточного рН цитоплазмы. Он преобразует энергию, запасенную в протонном градиенте, в химическую энергию. За объяснения

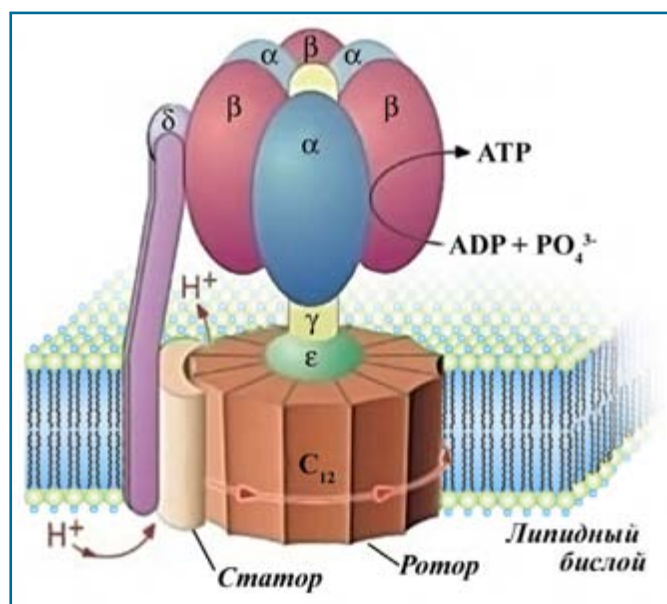


Рис. 3. АТФ-синтетаза

его функционирования внутри клетки Е. Скоу, П. Бойер и Дж. Уолкер (J.C. Skou, P. Boyer и J. Walker) получили Нобелевскую премию в 1997 году. Интересно, что при синтезе или гидролизе АТФ одна из частей энзима совершает вращательное движение по или против часовой стрелки, впуская протоны внутрь клетки или выпуская их наружу (рис. 3). По эффективности работы и развиваемой силе АТФ синтетаза существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы. Типичная сила, продуцируемая такой молекулярной турбиной, составляет около 1 пкН, а мощность – порядка 1 аВт ( $1 \cdot 10^{-18}$  Вт).

Существует множество других наноактюаторов, созданных на основе биологических молекул, полимеров, кремния и других материалов. И все они по-своему оригинальны и необходимы. Ведь если не будет наноактюаторов, то у нас не останется никаких возможностей внести свой вклад в движение наномира.

См. также: *Микроэлектромеханические системы*, *Наноэлектромеханические системы*.

### Литература:

1. Köhler M., Fritzsche W. Nanotechnology: An Introduction to Nanostructuring Techniques, Willey-VCH, 2004
2. Fennimore A.M. et al. Nature. 2003. Vol. 424, July. P. 408–410.

## НАНОБАТАРЕЙКИ (Nanobatteries)

*«Анод, катод, электролит –  
Набор чем этот знаменит?  
Мы голову ломать не стали  
И батареейкою назвали».*

*Е.А. Померанцева*



Наверное, все помнят футуристическую трилогию «Матрица», в которой искусственному разуму не хватало энергии, и роботы коварно использовали людей в качестве батареек. Сегодня энергетический голод еще не наступил, и люди сами пытаются делать химические источники тока для своих микронанотехнологических созданий. Действительно, как сейчас обойтись без батареек? В современный век массового производства и потребления электронных устройств, таких, как фото- и видеокамеры, портативные компьютеры, мобильные телефоны, кардиостимуляторы и т.д.

необходимо разрабатывать легкие химические источники тока с высокой запасенной энергией и выдаваемой мощностью.

Батарейки и аккумуляторы состоят из трех основных частей: положительного и отрицательного электродов (катода и анода соответственно) и электролита (рис. 1). В процессе разряда батарейки ионы переходят из анода в катод через электролит или мембрану, при этом по внешней цепи (обычным проводам) с включенным в цепь устройством движется ток электронов – электрический ток. Именно этот вид энергии человечество и научилось использовать для питания своих микронанотехнологических или механических созданий. Собственно, для того и затевался химический источник тока, чтобы непосредственно использовать в форме электрического тока энергию той или иной удобной химической реакции. Для ряда электрохимических систем этот процесс может быть обратимым, и поэтому выделяют два типа батареек: первичные, непозаряжаемые, действие которых заканчивается по окончании процесса разряда, и вторичные, перезаряжаемые, для которых циклы разряд-зарядка многократны.

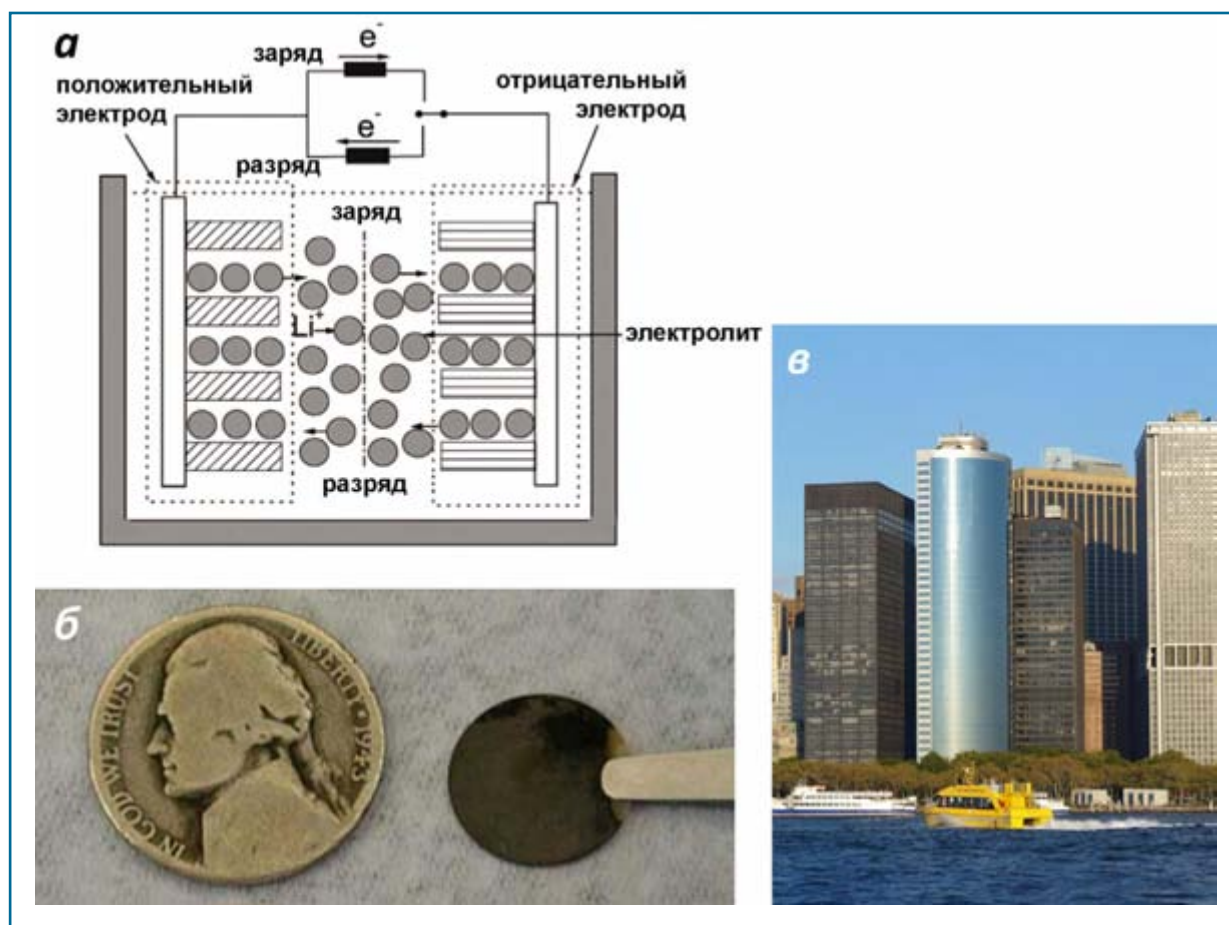
Последние достижения в области **биомиметики** и **молекулярной электроники** позволяют сегодня всерьез задуматься об энергетических нанобатареях (в буквальном смысле слова «нано»). Еще в 2003 году в университете Тулса (США) была создана батарейка толщиной около 500 нм, а в Национальной лаборатории Sandia (США) работают над созданием нанобатареи, предназначенной для снабжения энергией различных имплантируемых устройств, например, искусственной сетчатки глаза.



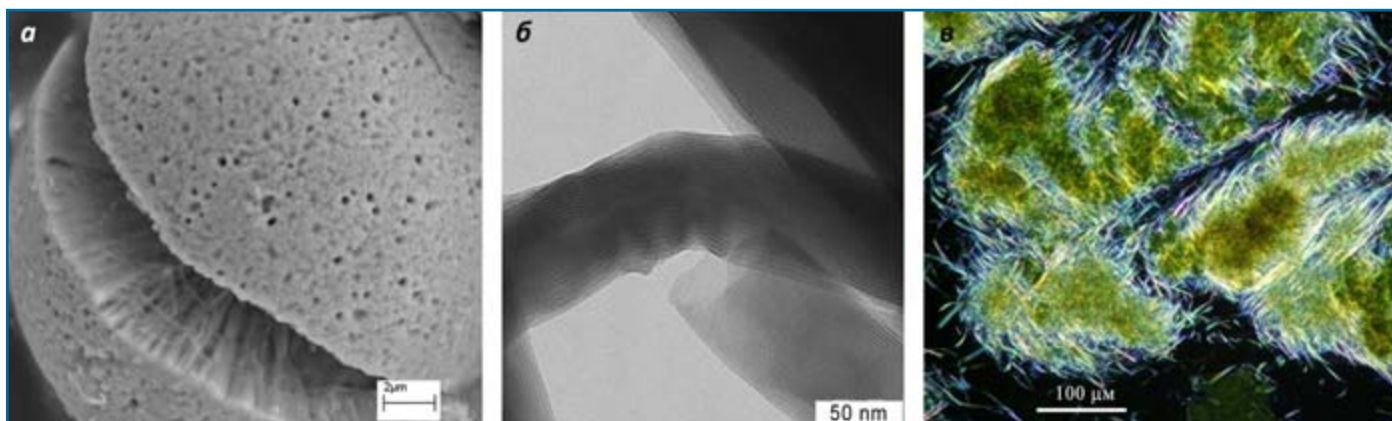
В перспективе батарейки нанометровых размеров смогут применяться для питания **наномашин**, **МЭМС**, умной пыли (см. **Умные материалы**), микропечатных интегрированных схем, активных элементов радиочастотных антенн-меток. Они, несомненно, найдут применение в микроэлектронике, медицине и других отраслях науки.

В то же время, когда говорят о нанобатареях, обычно имеют в виду не наноразмер самой батарейки, а тот факт, что при ее изготовлении использовали **нанотехнологии**. Сейчас этому разделу науки, который часто называют наноионикой, посвящены целые разделы конференций, организуются новые фирмы и компании. Это связано с тем, что все более востребованными становятся надежные, долговечные, безопасные и дешевые химические источники тока (ХИТ). Мировой рынок таких продуктов превысил в 2006 г. 50 млрд долларов и чрезвычайно перспективен с точки зрения привлечения инвестиций.

Типичный пример победы «батареечных нанотехнологий» – широко известный долговечный элемент питания «Дюрасел». Наверняка вы до сих пор помните навязчивую телерекламу с бодрым розовым зайчиком-барабанщиком, который шумит «в 10 раз дольше»?.. В этих батарейках самый дешевый и известный еще с 1867 г. марганец-цинковый,  $Zn-MnO_2$ , элемент француза Жоржа Лекланше обрел вторую, «наноматериальную», реинкарнацию за счет изменения дисперсности составляющих его компонент. В настоящее время по всему миру проводится огромное количество экспериментов, позволяющих получить известный всем диоксид марганца в виде наночастиц, нанопластин, наноусов и даже нанотрубок. Известно также, что такие материалы работают в батарейках дольше, быстрее перезаряжаются в аккумуляторах, если в них интеркалирован литий. Кроме диоксида марганца все еще распространены манганиты со структурой шпинели, слоистые кобальтиты лития, в по-



**Рис. 1.** Мир батареек: а – схематическое представление принципа работы литий-ионного аккумулятора, б – 25 000 параллельно соединенных нанобатарей, в – вид на архитектурный ансамбль «парк Батареек» в Нью-Йорке



**Рис. 2.** Потенциальные кандидаты для применения в химических источниках тока (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова). а – наноструктурированные порошинки диоксида титана после гидротермальной обработки, б – нанотрубки на основе оксида ванадия, в – «водоросли» из нановискеров так называемых «ванадиевых бронз»  $BaV_9O_x$

следнее время все чаще используются углеродные и неуглеродные нанотрубки, диоксид титана и т.д. (рис. 2). В последнее время все больше и больше систем становятся потенциальными кандидатами для использования в наноионике. К ним, например, относится материал  $LiFePO_4$  с каркасной структурой минерала оливина, срок службы аккумуляторов на основе которого, по прогнозам, увеличится по сравнению с предыдущими образцами в 10 раз, мощность возрастет в 5 раз, значительно уменьшится время заряда (более 90% емкости через 5 минут). Первые коммерческие образцы вторичных химических источников тока, агрессивно рекламируемые фирмами Toshiba, Nanosafe и др., способны заряжаться уже не за часы, а за минуты, теряют только проценты емкости после тысячи циклов заряда-разряда, могут работать при температурах до  $-40^\circ C$ .

При использовании материалов наноионики, конечно, возникают и новые камни преткновения. Например, из-за высокой реакционной способности наночастицы с удовольствием реагируют с электролитом и вообще со всем, с чем соприкасаются. В состоянии покоя батарейка теряет в среднем 7–10% запаса энергии, поскольку электрохимическая реакция идет и тогда, когда батарейка не подключена к потребителю электроэнергии. Поэтому в некоторых случаях, например, для

контроля радиоактивности или накопления токсичных веществ, в палатах интенсивной терапии и в операционных чрезвычайно важна разработка так называемых резервных батарей, в которых электролит отделен от электродов до тех пор, пока батарея не активирована. С использованием нанотехнологий, а именно, с изобретением «нанотравы» из супергидрофобных (несмачиваемых) столбиков кремния, способных изменять величину смачиваемости в зависимости от приложенного напряжения, появляется реальная возможность значительно миниатюризировать такие батареи (компания mPhase).

При создании микро- и нанобатареек не обязательно использовать наночастицы. Часто применяют другой подход, когда создают «пачку» двумерных, планарных *гетероструктур*. Чередующиеся слои состоят из  $LiCoO_2$  или  $LiMn_2O_4$  – катода, электролита-пленки в виде оксинитрида-фосфида лития и анода – оксинитрида олова-кремния. Геометрическая плотность энергии достигает  $0,28 \text{ мАч/см}^2$ . В концепции трехмерных (3D) батарей сэндвичевая структура формируется на любой неплоской (перфорированной) поверхности, содержащей до 20 000 отверстий-каналов на каждом квадратном сантиметре. Такие батареи в 10–100 раз эффективнее обычных.

#### Литература:

1. Иванов-Шниц А.К. Ионика твердого тела. Т. 1, 2.
2. Jiang C., Hosono E., Zhou H. Nanotoday. 2006. Vol. 1, №4. P. 28
3. Krupenkin T.N., Taylor J.A., Schneider T.M., Yang S. Langmuir. 2004. Vol. 20. P. 3824.

## НАНОБИЗНЕС (Nanobusiness)

–Ничего не будет, будет один только нанобизнес...  
А вот Вы вспомните мои слова через 20 лет.

(Ремейк реплики из кинофильма  
«Москва слезам не верит»)



В любом бизнесе чем большую прибыль Вы хотите получить, тем больше рискуете. Одно из главных заблуждений нанобизнеса – миф о быстрой прибыли с помощью «низко висящих яблок». Некоторые результаты исследований в области нанотехнологий, казалось бы, можно легко превратить в работоспособный и востребованный продукт, однако впоследствии возникают проблемы с маркетингом и реализацией. Поэтому в нанобизнесе не всегда можно получить прибыль, используя «ранние яблочки». Необходимо сначала провести ряд дополнительных исследований, как научных, так и маркетинговых.

По данным Исследовательской службы Конгресса США (Congressional Research Service) мировая промышленность использует нанотехнологии в процессе производства как минимум 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования. Функционируют свыше 16 тыс. нанотехнологических компаний (конец 2006 г.), число которых в последнее время удваивается каждые полтора года.

Объем мировых инвестиций в nanoиндустрию с 1996 по 2006 гг. вырос в 50 раз и составил к концу 2006 г. более 110 млрд. долларов. К сожалению, на Россию приходится только менее 0,5% всех мировых «наноинвестиций». К 2015 году, согласно прогнозам министерства торговли Великобритании, спрос на результаты деятельности в области нанотехнологий в этой стране составит не менее 1 трлн долларов в год, а численность специалистов, занятых в ней, возрастет до 2 млн человек (рис. 1). В этой связи следует ожидать появления спроса на выпускников вузов с дополнительным образованием в области нанотехнологий. В свою очередь, коммерциализация нанотехнологий позволит в будущем решить ряд наиболее значимых для человечества проблем, в частности, обеспечение мировых энергетических потребностей.

В последнее время активный интерес к нанобизнесу проявляет и венчурный капитал, в



**Рис. 1.** Основные секторы рынка продукции нанотехнологий к 2015 г. (млрд. долларов США в год, прогноз министерства торговли Великобритании)



частности, в 2006 г. его инвестиции в сектор нанотехнологий составили почти 10 млрд. долларов. Направленная поддержка малого бизнеса венчурными фондами позволит сделать резкий скачок как в ассортименте выпускаемой нанопродукции, так и в ее конкурентоспособности. Проблемы, касающиеся безопасности наноматериалов, могут умерить пыл инвесторов, но вряд ли остановят поток капиталов в такую многообещающую область, как нанобизнес.

Следует подчеркнуть, что доходы от инвестиций прямо пропорциональны качеству информации, которой Вы обладаете. В нанобизнесе только систематическое изучение всей мировой наноиндустрии в ее взаимосвязи и развитии мо-

жет быть основой принятия верных решений. Для этого надо уметь сопоставить множество аспектов проблемы – от фундаментальных научных основ до вопросов логистики. К сожалению, действующая сейчас система образования не в состоянии подготовить таких универсальных специалистов, поэтому научиться можно только самостоятельно.

Хотя нанотехнологии новы и революционны, нанобизнесу, как и любому другому, необходимо найти четкий путь к прибыльности. Можно сказать, что нужно создавать нанотехнологии, подходящие для бизнеса, а не строить бизнес, подходящий для нанотехнологий.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология. Простое объяснение очередной гениальной идеи. М.: Диалектика, 2005.
2. Cheetham A.K., Grubstein P.S.H. Materials Today. 2003. Vol. 6, №12 (suppl. 1). P. 16–19.

## НАНОВЕСЫ (Nanobalance)

*«Техника будущего – это, прежде всего, физика в ее приложениях».*

*А.Ф. Иоффе*



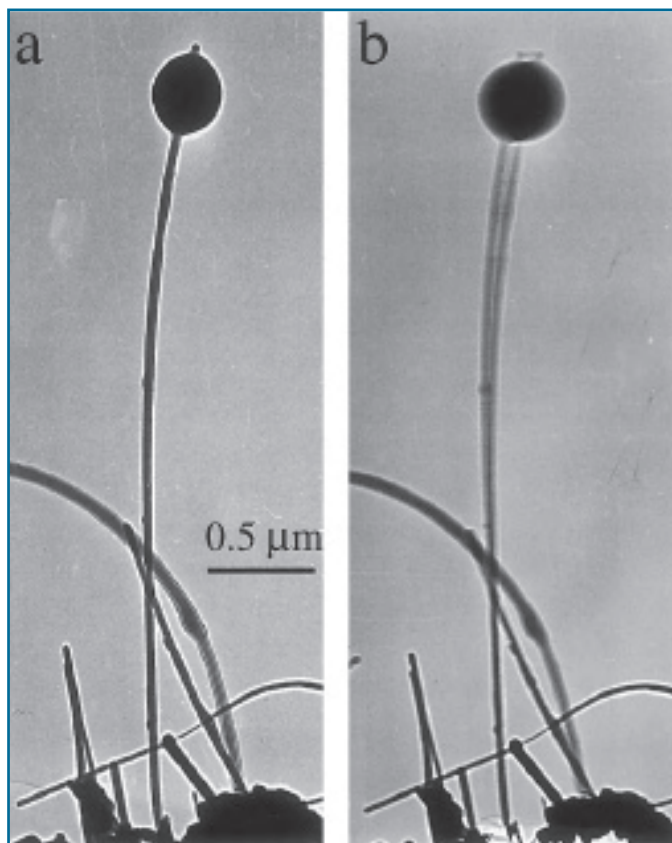
Вы когда-нибудь пробовали взвесить пылинку с помощью обычных весов? Наверное, нет, вряд ли такое бесперспективное занятие кому-то придет в голову – для всех очевидно, что частичка, масса которой намного меньше точности весов, останется незамеченной. Это и не страшно, скажете Вы, зачем вообще ее взвешивать! Давайте задумаемся, а как же быть с другими мелкими объектами, например, наночастицами? Хорошо известно, что свойства наноструктур во многом определяются их размером и формой, и в ходе синтеза практически невозможно получить набор абсолютно идентичных наночастиц. Поэтому, измеряя физические свойства наноструктурированных объектов, мы, как правило, получаем

среднюю характеристику объемного образца, практически ничего не говорящую о свойствах образующих его нанофрагментов. В связи с этим одной из ключевых задач нанонауки является изучение свойств индивидуальных наночастиц с заранее известной и четко выраженной атомной структурой.

Очевидно, что слишком маленький размер наночастиц, так же как и в случае с пылинкой, делает невозможным применение для этого традиционных измерительных методик. Даже самые современные приборы имеют точность порядка  $10^{-9}$  г, что на много порядков превышает массу единичных наночастиц. То есть в наномире нужны свои измерительные наноинструменты!

В создании таких инструментов в очередной раз, благодаря своим уникальным электронным и механическим свойствам, помогли **углеродные нанотрубки**, способные проводить электрический ток и обладающие высокой механической прочностью.

Если к углеродной нанотрубке, один конец которой прочно закреплен, а другой остается свободным, приложить внешнее напряжение, то индуцированный заряд преимущественно сосредоточивается на свободном конце, и за счет электростатических сил происходит отклонение нанотрубок от исходного положения. Приложение попеременно отрицательного и положительного напряжения позволяет осуществлять цикл нагрузка–разгрузка трубки. Если пойти дальше и менять частоту подаваемого напряжения, то можно добиться резонанса с частотой собственных колебаний нанотрубки, что позволит точно измерить данную характеристику. Резонансная



**Рис. 1.** Колебание углеродной нанотрубки, нагруженной наночастицей с массой порядка  $22 \cdot 10^{-15}$  г

частота колебаний углеродной нанотрубки определяется диаметром, длиной и прочностью на изгиб и является ее индивидуальной характеристикой.

В 2000 году американскими учеными из Georgia Institute of Technology было предложено использовать описанный принцип для создания самых маленьких и чувствительных весов в мире. Действительно, если определить частоту собственных колебаний отдельной нанотрубки, а затем прикрепить к ней исследуемый нанообразец, то оказывается, что резонансная частота колебаний уменьшается более чем на 40% по сравнению с ненагруженной трубкой. В результате с высокой точностью можно рассчитать массу образца вплоть до величин масс порядка  $10^{-15}$  г. Для этого необходимо только откалибровать углеродную нанотрубку, чтобы определить ее жесткость (рис. 1).

В перспективе такие весы могут быть использованы для измерения масс больших биомолекул и биомедицинских объектов, например, вирусов.

#### Литература:

1. Wang Z.L., Poncharal P., de Heer W.A. Journal of physics and chemistry of solids. 2000. Vol. 61. P. 1025.
2. <http://www.cnews.ru/news/top/index.shtml?2006/08/29/209650>.



## НАНОВОЛОКНА (Nanofibres)

*«Оглянулся Паучок, а в уголке  
только ниточка осталась на сучке.  
Стал жучков он, разных бабочек скликать,  
Через ниточку-веревочку скакать!  
Пригодилась паутинка для добра.  
Тут и сказочку кончать пришла пора».*  
Ю. Любимцева



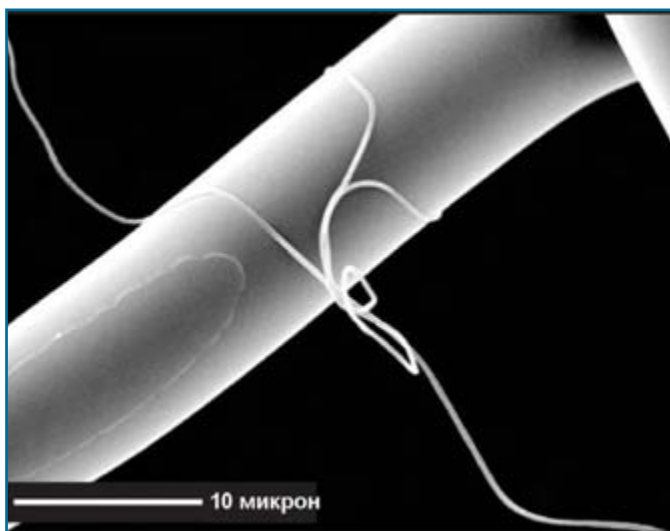
Есть один детский стишок, который начинается словами «Сплел однажды паутинку паучок». Так вот этот самый паучок и не подозревал, что создал чрезвычайно интересный нанообъект – нановолокно. Однако не только пауки умеют плести нановолокна. Это научились делать и люди, разработавшие так называемый метод электроспиннинга, использованный первоначально для получения ультратонких полимерных волокон, а в дальнейшем – для получения разнообразных неорганических и органо-неорганических гибридных нановолокон. Образование волокон в методе электроспиннинга осуществляется извержением электроразряженной струи из тонкого капилляра под действием высокого напряжения (рис. 1). Когда струя высыхает или затвердевает, остаются электрически заряженные волокна, которые часто образуют переплетенный слой. Морфология нановолокон зависит от условий получения, включая концентрацию раствора,

силу прикладываемого электрического поля и скорость поставки раствора прекурсора. Полученные таким способом нановолокна затем можно собирать в удобные геометрические формы, например, полотна.

Методом электроспиннинга можно получать волокна диаметром до нескольких десятков нанометров (рис. 2). Масса такой нанонити чрезвычайно мала. Например, если учесть, что расстояние между Землей и Луной составляет 380 тыс. км, то понадобится всего лишь  $\sim 3$  г нановолокна диаметром 100 нм и плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  для того,



Рис. 1. Схематическое представление процесса электроспиннинга



**Рис. 1.** Полипропиленовые волокна, полученные методом электроспиннинга и обычного вытягивания. Диаметр нанонити, полученной методом электроспиннинга, составляет ~300 нм

чтобы соединить нашу планету с ее единственным спутником. За счет малого диаметра нановолокна обладают большой удельной площадью поверхности, что чрезвычайно важно для биомедицинских и промышленных применений.

Нановолокна нашли применение в многочисленных областях современной жизни. Как и другие нитевидные материалы, нановолокна, полученные методом электроспиннинга, можно использовать в качестве армирующих волокон. Переплетенные нановолокна образуют пористую структуру, где размер пор находится на уровне или только чуть больше диаметра нанонитей, а

отношение объема материала к объему пор составляет ~1:3, что приводит к высокой пропускной способности, а значит, нановолокна являются отличным материалом для создания фильтров и защитной одежды. Наверное, самым распространенным является использование нановолокон в биомедицинских целях. Так, кость представляет собой композит, состоящий из нитей коллагена, на которых из раствора конденсируются кристаллиты гидроксиапатита, придающие кости необходимую прочность. Таким образом можно создать и искусственную кость. Кроме того, разрабатываются специфические полимерные нановолокна для восстановления нервной системы и кровеносных сосудов. Нановолокна неорганических материалов также находят широкое применение в практике. Так, полученные методом электроспиннинга и допированные оксидом эрбия(III) нановолокна  $\text{TiO}_2$  можно использовать в качестве высокоэффективных и селективных эмиттеров для термофотозлектрических применений. Большая площадь поверхности и хорошие транспортные свойства определяют возможность использования нановолокон в качестве сенсоров. Например, нановолокна  $\text{WO}_3$  хорошо реагируют на присутствие аммиака в различных концентрациях, а водород можно легко обнаружить с помощью нановолокон полианилина. Так что, учитывая все вышесказанное, можно смело сказать о нановолокнах: «Чрезвычайно тонкие и исключительно полезные!».

#### Литература:

1. Burger C., Hsiao B.S., Chu B. Annual Review of Materials Research. 2006. Vol. 36. P. 333–368.

## Наножидкости (Nanofluids)

*«Видеть случалось мне, что прыгают в медных сосудах Самофракийские кольца с опилками вместо железа, бурно бушующ, когда под сосудом камень магнитный ...»*

*Тит Лукреций Кар.  
«О природе вещей»*

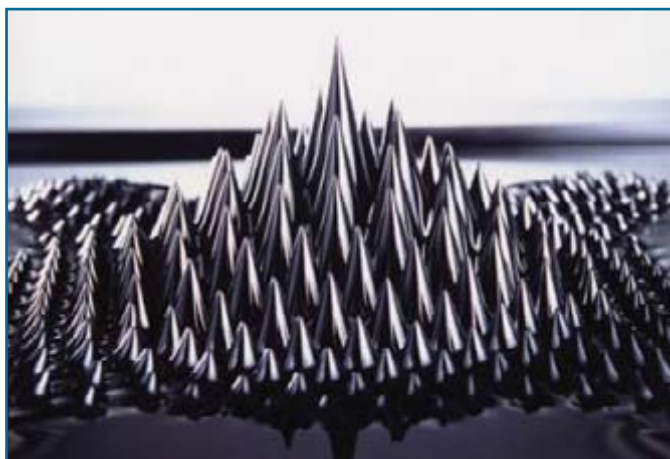


На первый взгляд понятие «наножидкость» кажется абсурдным, ведь и без того хорошо известно, что жидкости имеют молекулярную природу, а размер молекул редко превышает 1 нм. Но в действительности, когда ученые рассуждают о наножидкостях, речь идет о более сложных системах, чем простая вода. Наножидкости представляют собой частный случай ультрадисперсных систем с жидкой дисперсионной средой. Если в одной жидкости «растворены» капли другой, то в зависимости от размера капель она носит название микро- или **наноэмульсии**, если же в ней равномерно распределены твердые наночастицы, то такую систему называют золем или **коллоидным раствором наночастиц**. Ежедневно вы сталкиваетесь со многими примерами наножидкостей, возьмем хотя бы самый обычный чай или кофе, который вы, наверняка, пили сегодня за завтраком. Если в чашку чая посветить лазерной указкой, то можно увидеть, как через объем жидкости

проходит лазерный луч (эффект Тиндалля), повторив же эксперимент с отфильтрованной чистой водой, подобный эффект вы наблюдать не будете. Дело в том, что чай относится к коллоидным растворам, которые содержат взвешенные в объеме растворителя твердые наночастицы, в общем случае, размером от 1 до 100 нм, на которых в рассмотренном эксперименте, собственно, и происходит рассеяние луча лазера – потому-то его и хорошо видно. При получении таких наножидкостей используют высокодисперсные порошки стабильных металлов, их оксидов и др. В качестве жидкой фазы чаще всего выступают водные растворы, содержащие различные органические добавки и соли. Действие таких добавок во многом сходно с действием мыла или знаменитого «Fairy». Их роль заключается в предотвращении слипания частиц и их стабилизации во взвешенном состоянии, достигаемом за счет изменения физико-химических свойств поверхности при адсорбции органических молекул и высокозаряженных ионов. В противном же случае агрегация частиц приводит к быстрому выпадению их в осадок.

Наножидкости зачастую проявляют необычные свойства. Например, тепловые наножидкости способны эффективно переносить тепловую энергию с минимальными потерями. Известно, что добавление всего лишь 5 объемных % наночастиц оксида меди увеличивает эффективную теплопроводность воды на 20%, а небольшой процент углеродных нанотрубок в теплоносущей жидкости изменяет ее теплопроводность в несколько раз. Еще более широко известны так на-





**Рис. 1.** Фотография магнитной жидкости, помещенной в магнитное поле

зываются магнитные наножидкости, которые позволяют контролировать поведение жидкой фазы (рис. 1). Дисперсная фаза магнитных наножидкостей представляют собой однодоменные магниты, случайно распределенные в объеме дисперсионной среды. При наложении магнитного поля моменты отдельных частиц выстраиваются по направлению поля, и жидкость намагничивается. В сильных полях возможно даже движение магнитных частиц в магнитном поле, создающее поток жидкости в заданном направлении. Магнитоуправляемые наножидкости, удерживаемые магнитным полем, способны обеспечить абсолютную герметизацию вакуумных устройств. Поэтому их активно используют для герметизации вводов, обеспечивающих вращательное,

колебательное и другие виды движения в технологических процессах, требующих поддержания глубокого вакуума, а именно, в производстве полупроводников, при напылении металлов, вакуумной сушке, в электронных микроскопах, вакуумных печах, массспектрометрах и т.д.

Магнитные жидкости, содержащие наночастицы железа или его оксидов, используют в системах адресной доставки лекарственных препаратов в поврежденные органы (см. *Бионанотехнологии* и *Наномедицина*). Аналогичные наноматериалы применяют для борьбы со злокачественными опухолями методом гипертермии: попав в опухоль, магнитные наночастицы убивают раковые клетки за счет локального разогрева поврежденной области в переменном магнитном поле. Рентгеноконтрастные наножидкости на основе танталата иттрия, «видимые» в рентгеновских лучах, позволяют получать изображение внутренних органов.

Интересен тот факт, что даже природа использует магнитные жидкости. Ученые предполагают, что в носу форели находятся клетки, содержащие суспензии наночастиц магнетита, благодаря которым рыба способна ориентироваться в пространстве. Дело в том, что изменение ее положения относительно магнитного поля Земли приводит к изменению направления намагниченности ферромагнитной жидкости, которое обрабатывается мозгом форели и дает информацию о ее ориентации.

### Литература:

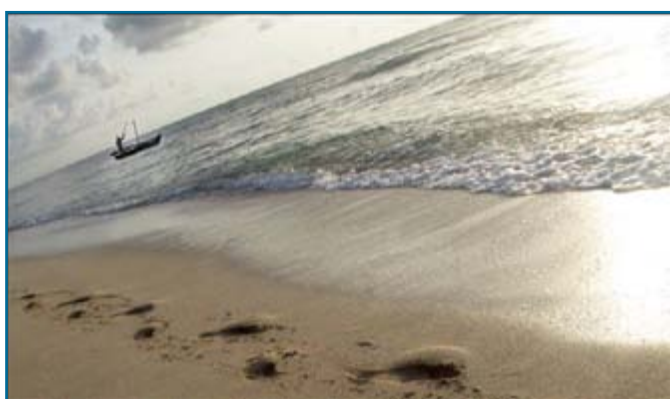
1. Ejjikel J.C.T., van den Berg A. Nanofluidics: what is it and what can we expect from it? // *Microfluid Nanofluid.* 2005. Vol. 1. P. 249–267.
2. Материалы по тепловым наножидкостям <http://www.energy.kth.se>

## НАНОИНДЕНТЕР (Nanoindenter)

*«На белом снеге оттиск лапок  
Медлительных гусиных стад».*

*С.А. Есенин.*

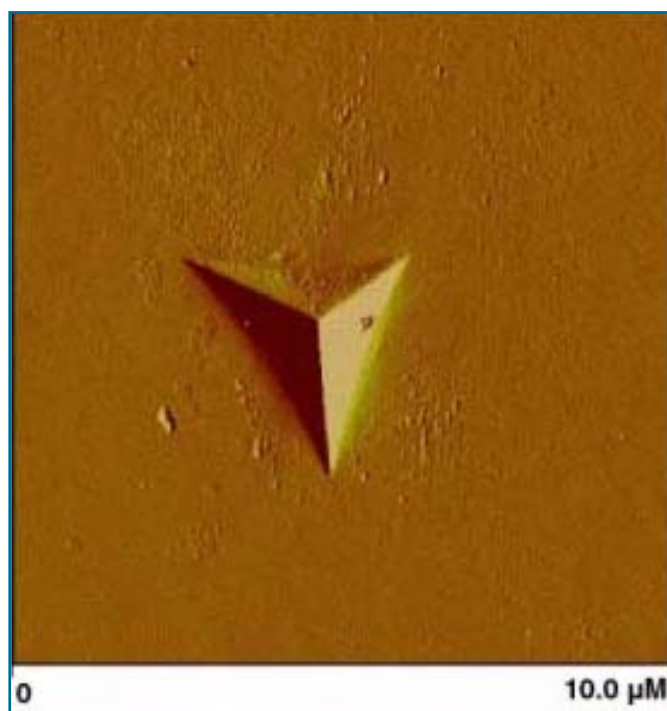
*«Ноябрь»*



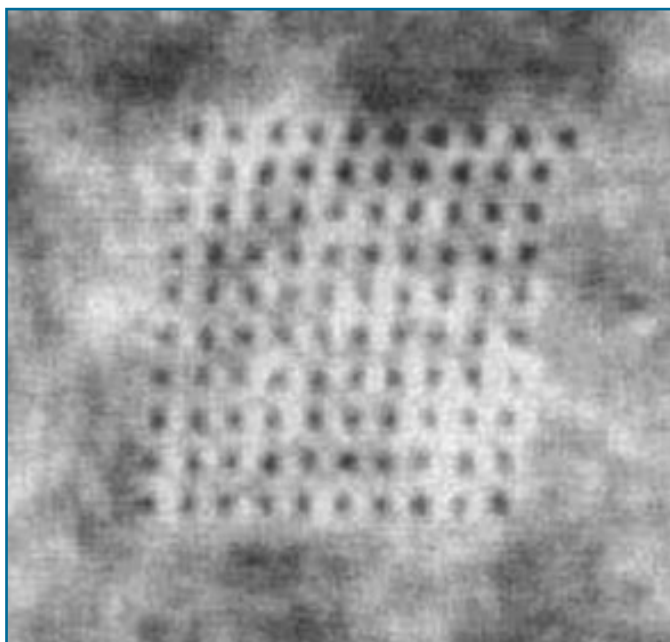
Представьте себе такую картину. Шел человек по асфальтированной дороге, потом свернул на песчаный пляж и зашел в водоем с глинистым дном. А теперь посмотрите на отпечатки его ног. На асфальте ничего не видно, на песке остались следы в форме стопы, а на глинистом дне видны только ямки. Как вы думаете, с чем это связано? Конечно, с различной твердостью и упругостью материала поверхности, по которой он двигался. А как определить эти характеристики? В данном случае для грубой оценки можно просто измерить глубину погружения стопы в песок или глину, используя ее, таким образом, в качестве анализатора поверхности, или индентера (от англ. *to indent* – выдалбливать; *indent* – лунка, углубление). Однако для измерения твердости на микроуровне, например, твердости минералов, нужны соответствующие микроанализаторы, в исследуемый материал погружают маленькую алмазную пирамидку и исследуют образовавшийся на поверхности отпечаток под оптическим микроскопом.

Аналогичные принципы работают и на наноуровне. Еще в 1960–70-х годах в Институте

металлургии АН СССР был разработан так называемый метод наноиндентирования, согласно которому наноиндентер перемещается относительно исследуемой поверхности образца, погружаясь в нее с высокой точностью (рис. 1). При этом прилагаемое к нему усилие непрерывно регистрируется. Как правило, в качестве наноиндентера используются трехгранная (индентер Берковича) или четырехгранная алмазная пирамиды (индентер Виккерса), сделанные из самого твердого природного материала – алмаза. Такие наноиндентеры позволяют получить информацию о твердости поверхностных слоев (вплоть



**Рис. 1.** Отпечаток наноиндентера Берковича на тонкой пленке GaN, нанесенной на сапфировую подложку



**Рис. 2.** Сетка с углублениями 20 нм, полученная методом наночеканки на полиметилметакрилате

до нескольких нанометров) в широком диапазоне исследуемых нагрузок (1 мН – 2 Н).

Для регистрации глубины погружения наноиндентера в исследуемый материал, т.е. для наблюдения оставленных им отпечатков на поверхности, используют высокоразрешающий метод *атомно-силовой микроскопии*. По результатам

измерений строят графики в координатах приложенная нагрузка–глубина погружения индентера, по которым можно определить твердость, пластичность, упругость и другие механические характеристики исследуемого образца. Если провести измерения сначала при нагружении, а затем при разгрузке индентера, то окажется, что полученные в этих двух режимах кривые не совпадают друг с другом из-за неэластичности исследуемых материалов.

Метод наноиндентирования широко применяется в электронике и других высокотехнологических областях для изучения механических свойств пленок, покрытий, а также поверхностных слоев. Помимо этого, специально выдавливая зондом атомно-силового микроскопа нанометровые углубления на какой-либо поверхности, можно получать микроизображения определенного рисунка (рис. 2). Такой процесс называется наночеканкой. Например, нанося на поверхность полимера высокоупорядоченные массивы нанометровых ямок, создают *устройства хранения информации* нового поколения, так называемую нанопамять.

#### Литература:

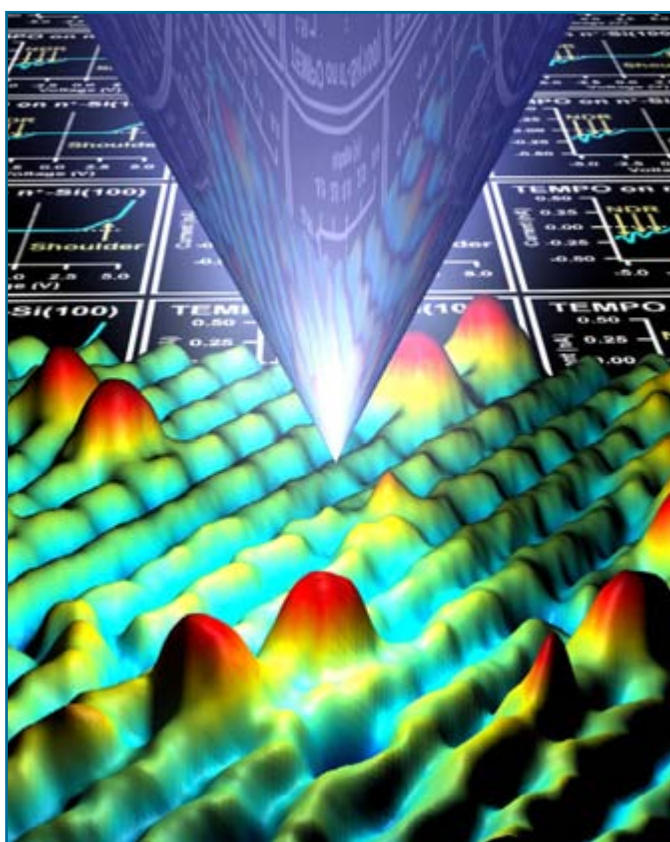
1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005. С. 186
2. Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей: Материалы X Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». М., 2004. С. 311.



## НАНОИНДУСТРИЯ (Nanoindustry)

*«Я планов наших люблю громадые,  
Размаха шаги саженьи...»*

*В.В. Маяковский*



Что такое наноиндустрия? Согласно определению, данному в Национальной нанотехнологической инициативе США: «Наноиндустрия – это технологическое, машиностроительное, производственное и научное обеспечение процессов, связанных с манипуляциями атомами и молекулами». Однако, это определение, вероятно, слишком узко – очень мало удовлетворяющих ему технологий вышли или близки к выходу на производственный (индустриальный) уровень. Альтернативное определение можно предложить, основываясь на определении наносистем. В этом случае к наноиндустрии можно отнести

те производства, продукция которых обладает свойствами, определяемыми наноразмерным уровнем организации соответствующих систем. Эти свойства могут иметь как квантовый характер, так и отражать вклад поверхностных атомов и быть как полезными для практического применения (например, повышая эффективность материалов катализаторов), так и мешающими достижению производственных задач (например, туннелирование электронов через наноразмерные диэлектрические слои в микроэлектронных устройствах или интерференция излучения в процессах литографии) (см. [Туннельный эффект](#), [Нанолитография](#)).

Решение проблем, возникающих при реализации таких технологий, в большинстве случаев требует проведения значительного объема научно исследовательских и, конечно, опытно-конструкторских разработок. Это приводит к сосредоточению наноиндустриальных производств либо в крупных корпорациях (такими, например, является большинство производителей микроэлектронных устройств), способных выделять значительные суммы на исследования (в том числе и достаточно рискованные), либо в относительно небольших фирмах, созданных под конкретное изобретение. Во многих технологически развитых странах поддержка наноиндустрии осуществляется на государственном уровне: первой такой страной стала Япония (1998 г.), затем – США (2001 г.), сейчас подобные программы действуют во многих странах, включая Россию (см. [Инвестиции в нанотехнологии](#)). Готовность государства и бизнеса поддерживать нанотехнологические разработки связана с высоким уровнем



**Рис. 1.** Основные направления развития наноиндустрии

ожидаемых от наноиндустрии результатов (см. *Рынок нанопродуктов*).

На рис. 1 приведены некоторые интенсивно развиваемые сейчас направления наноиндустрии. Индустрия наноразмерных композитов включает в себя проектирование, испытания и производство химически сложных материалов с улучшенными как механическими (например, традиционные материалы, армированные нанотрубками), так и различными функциональными (квантовые точки, сверхпроводники с высокими значениями критического тока, сенсоры, катализаторы, оптические материалы и т.д.) характеристиками. Индустрия нанокомпозитов тесно связана с

химическими производствами нанодисперсных материалов, *нанометрологией*, призванной обеспечить наноиндустрию эталонами и методиками измерения параметров *наноматериалов*, и производством технологического оборудования, позволяющего производить и диагностировать наноразмерные продукты в необходимых масштабах. Последнее связано с развитием соответствующих нанотехнологических процессов, включающих как нанохимические, так и планарные (*нанолитография*) технологии получения современных микроэлектронных компонентов, а также конструирование и сборку трехмерных наноструктур. Важным, интенсивно исследуемым, хотя пока и в меньшей степени доведенным до практического применения направлением является разработка и создание различных микро- и *нанoeлектромеханических устройств*, часто называемых (микро) *нанороботами*. Одним из основных будущих применений нанороботов станут, вероятно, нанобиология и *наномедицина*, включающие, помимо уже упомянутых нанороботов, разработку и создание биочипов, средств целевой доставки лекарств в организме и локального нагрева на основе магнитных жидкостей (см. *Нанолечение*), различные микрозональные установки и устройства и многое другое.

#### Литература:

1. <http://www.nanoindustry.org/>
2. <http://www.nanotech.ru/>

## НАНОКАПСУЛЫ (Nanocapsules)

*«Телушка за морем стоит полушку, да рубь перевоз».*

*Русская поговорка*



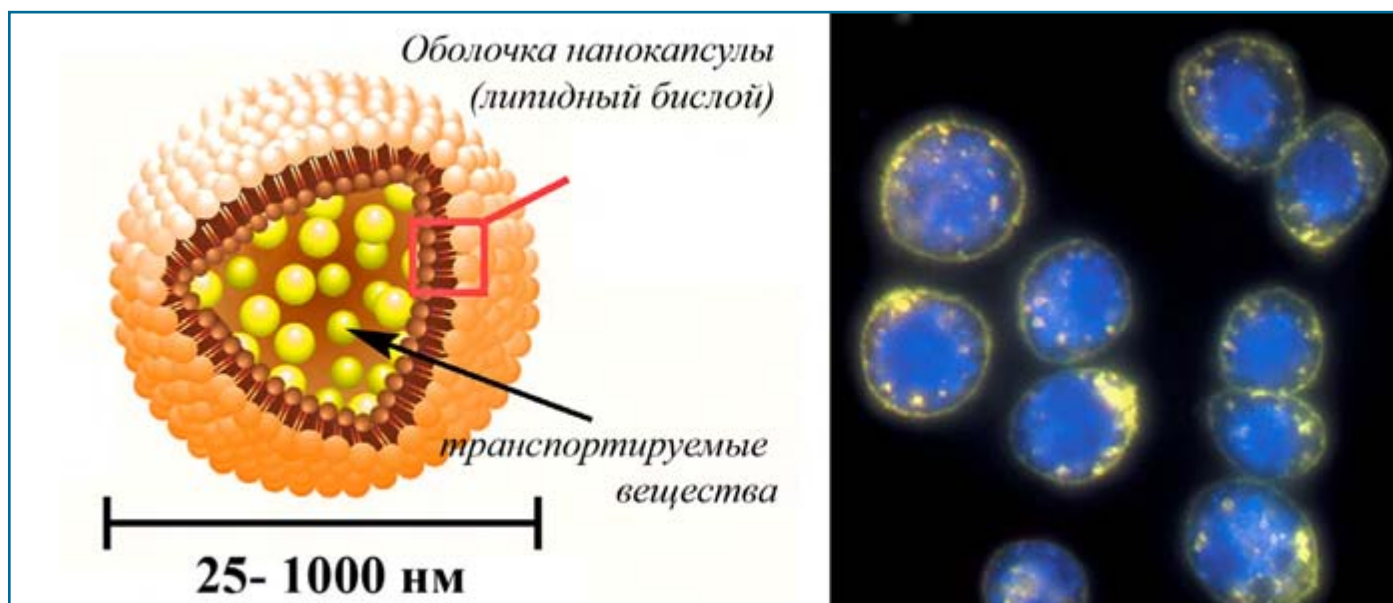
Иллюстрация к сказке «Маша и медведь»

Помните, как в русской народной сказке «Маша и медведь» сообразительная девочка Маша использовала берестяной кузов, чтобы добраться домой к бабушке и дедушке? В нем ничего не подозревающий медведь доставил девочку и испеченные ею пирожки из своей лесной избушки в деревню. Медведь не только перенес Машеньку, но и помог ей пройти через темный лес, избежав опасных встреч с другими его обитателями. Точно так же наши организмы «изолируют» инородные тела, маскируют частицы жира или

гормоны, заключая их в своеобразные наноконтейнеры или нанокапсулы. Впервые обнаружить такие капсулы в живых клетках позволило изобретение **электронного микроскопа**. Оболочка природных наноконтейнеров во многом сходна со стенкой клеточной мембраны и состоит из липидных бислоев, отделяющих содержимое капсулы от внешней среды. В то же время, такой состав стенок дает возможность легко осуществлять транспорт веществ в капсулу или из нее. Будучи сформированными **амфифильными веществами**, капсулы способны переносить как полярные (большинство аминокислот, ДНК, РНК, ферменты, сахара), так и неполярные вещества (липиды, жирные кислоты, стероиды). Характерный размер наноконтейнеров, составляющий от 25 нм до нескольких микрометров, позволяет им легко проходить сквозь клеточные мембраны, перенося в них свое содержимое. При этом нанокапсулы не атакуются иммунной системой и воспринимаются организмом в качестве «своих», что позволяет использовать их при разработки эффективных **нанолекарств**. При этом содержимое капсулы можно контролируемо «выгрузить» в нужном месте организма, например, там, где достигается определенное значение pH среды.

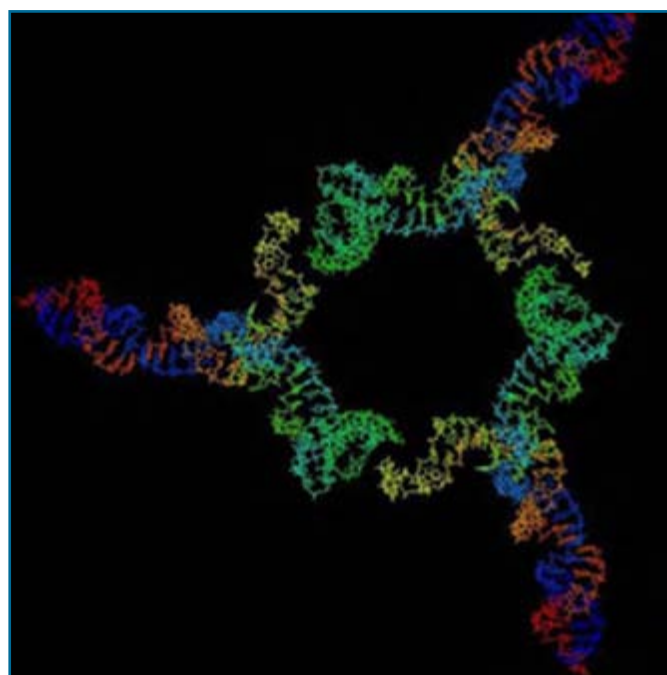
Недавно ученым удалось «приручить» наноконтейнеры, расшифровав последовательность из 100 аминокислот, которая, как ключом, открывает внешнюю оболочку нанокапсулы, образуя в ней «погрузочное отверстие». Успешным оказался и опыт внедрения в наноконтейнеры флуоресцентных наночастиц с привитыми молекулами белкового «ключа» (рис. 1). Первые эксперименты уже показали интересные результаты: после того как «наношаттлы» с флуоресцентными частицами были добавлены в культуру с живыми клетками, те тоже начали светиться – груз попал в цель!





**Рис. 1.** Структура наноконтейнера и микрофотография нанокapsул с захваченными люминесцентными частицами

Как водится, понаблюдав за природой, человек заимствовал идею транспортировки веществ в наноконтейнерах для реализации собственных планов и развития новых областей нанотехнологий. Сегодня к набору природных фосфолипидных капсул прибавились произведенные человеком, построенные из полимеров и молекул РНК, а также неорганические капсулы из диоксида кремния, диоксида титана и многие другие. Природные и искусственно синтезированные наноконтейнеры оказались отличными кандидатами для перемещения в организме медикаментов, позволяя увеличить их растворимость, понизить токсичность и эффективную дозу, а также ферментов и фрагментов ДНК; для создания биосенсоров, способных отображать состояние отдельной клетки; для детоксикации клеток и удаления из них вредных веществ. Так, нанокapsулы, состоящие из трех цепей РНК, соединенных друг с другом в структуру, напоминающую по форме треугольник (рис. 2), имеют подходящий размер, чтобы проникать внутрь клетки, а их строение позволяет поместить внутрь них молекулу РНК, отвечающую за остановку роста раковой клетки. Помимо чисто биологических применений, нанокapsулы весьма перспективны для разработки систем очистки окружающей среды от токсичных металлов и опасных биологических объектов, стабилизации неустойчивых химических соединений, наноча-



**Рис. 2.** РНК-капсула

стиц и т.д. Кроме того, активно ведутся исследования по созданию электронных нанопереклюателей на основе заключенных в наноконтейнеры металлов и полупроводников.

Дальнейшее изучение природных и искусственных наноконтейнеров наверняка позволит расширить этот список.

#### Литература:

1. Lecommandoux S., Sandre O., Chécot F., Perzynski R. Progress in Solid State Chemistry. 2006. Vol. 34. P. 171
2. Ruyschaert T., Germain M., Gomes J.F.P.D. et al. IEEE Trans. Nanobiosci. 2004. Vol. 3. P. 49.

## НАНОКЕРАМИКА (Nanoceramics)

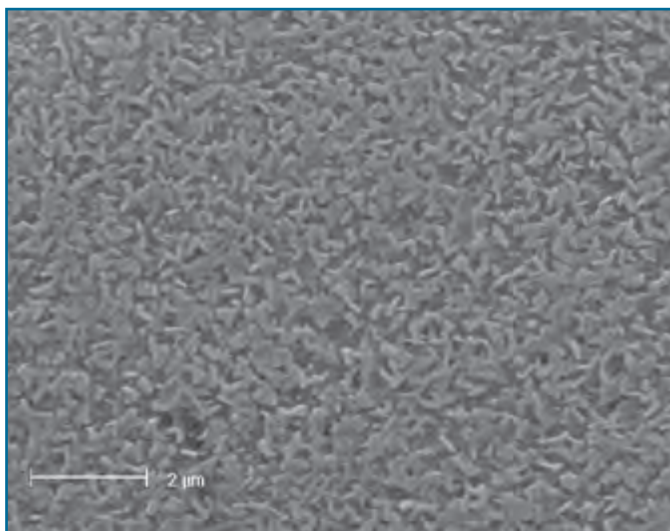
*«Не боги горшки обжигают...».*  
Пословица



Керамика – это неметаллические материалы и изделия, получаемые спеканием глин или порошков неорганических веществ. На греческом языке слово «керамика» означает гончарное искусство. Еще задолго до бронзового века люди научились изготавливать из глины посуду и кирпичи, однажды обнаружив, что высохшая и затвердевшая под солнцем глина может быть превращена в гораздо более прочный материал, если ее обжечь в огне. С тех пор керамическая технология шагнула далеко вперед, переходя на более высокие уровни сложности и захватывая все новые области применения. Сегодня классические керамические материалы широко используются и как конструкционные материалы – зачастую более твердые, легкие и жаропрочные, чем металлы и сплавы, и как разнообразные функциональные материалы: оптические, магнитные, полупроводниковые, сверхпроводниковые, каталитические, сенсорные, пьезоэлектрические. Керамика состоит из прочно связанных зерен-кристаллитов

неорганических фаз: оксидов, карбидов, нитридов и др. и может содержать пустоты (поры) и аморфные включения.

Нанокерамику можно определить как керамический материал, в котором кристаллиты имеют размеры менее 100 нм. Для ее изготовления требуются либо нанокристаллические порошки, либо аморфные материалы. (Для сравнения, в глинах размеры частиц составляют несколько микрон). При термической обработке исходного материала наряду с процессом спекания (уплотнения и образования прочных межкристаллитных контактов) протекает процесс роста зерен керамики. Из-за высокой химической активности нанокристаллических веществ размер зерен в конечном материале может во много раз превысить исходный, приводя к образованию обычной крупнокристаллической керамики. Чтобы эффективно затормозить рост кристаллитов и одновременно ускорить процесс спекания, используют специальные методы. Для эффективного уплотнения исходного нанопорошка применяют магнитоимпульсное или ультразвуковое прессование, в ряде случаев образец дополнительно нагревают. Последующую термическую обработку проводят при более низких температурах, чем для обычной керамики, и вводят добавки, ингибирующие рост зерен. Хорошие результаты дает воздействие мощного микроволнового излучения, в результате которого происходит быстрый и кратковременный нагрев всего объема образца. В качестве альтернативы используют исходно аморфный материал (стекло), в котором при нагревании начинается быстрая кристаллизация. При этом получается плотный нано- либо микрокристаллический материал, называемый ситаллом или стеклокера-



**Рис. 2.** Магнитная композиционная нанокерамика на основе гексаферрита стронция (светлые зерна), полученная кристаллизацией оксидного стекла (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

микой. Чем же так привлекает нас нанокерамикой? Оказывается, с уменьшением размера зерна до сотен–десятков нанометров увеличивается прочность керамики: изделие из нее становится не так легко разбить как, например, фарфоровую чашку, при этом возрастает и износостойкость. Может также появиться пластичность при повышенной или даже при комнатной температуре. Сам процесс спекания требует относительно невысоких температур, а применение бездефектных нанокристаллических порошков приводит к получению очень однородного материала как

на макро-, так и на микроуровне. В результате этого улучшаются диэлектрические, магнитные и оптические свойства. Плотная керамика становится прозрачной, как стекло, а нанопористая керамика оказывается лучшим теплоизолятором, чем микропористая. Наличие мелких однородных пор делает материал также полезным для селективного фильтрования и катализа. Из нанопористой керамики изготавливают, например, теплозащитные плитки для современных космических кораблей. И, наверно, многие из вас сами видели уже используемую в быту нанокерамику – прозрачную (обычно темнокрасного цвета), прочную, хорошо проводящую тепло и стойкую к резкому перепаду температур – на нагреваемой поверхности домашней электроплиты.

С улучшенными свойствами нанокерамики связаны новые перспективы в индустрии наноматериалов: производство прочных, легких и термостойких деталей – лопаток турбин, сопел, ракетных обтекателей, резцов; изготовление биосовместимых материалов с регулируемой пористостью для замены костной ткани и сердечного клапана; конструирование топливных элементов, сенсоров, солнечных батарей; создание материалов для магнитной записи (см. рис. 1), элементов микроэлектроники, оптоэлектроники и микромеханических систем.

### Л и т е р а т у р а :

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Seal S., Baraton M.-I. MRS Bulletin. 2004. January. P. 9–15.
3. Gogotsi Yu. Nanomaterials Handbook. CRC Press (Taylor and Francis Group), 2006. 790 p.



## НАНОКЛАСТЕРЫ (Nanoclusters)

*«Нас поражают большие деяния маленьких муравьев и пчел, чем громадные тела китов»*

*Св. Августин.*

*«Град Господен»*



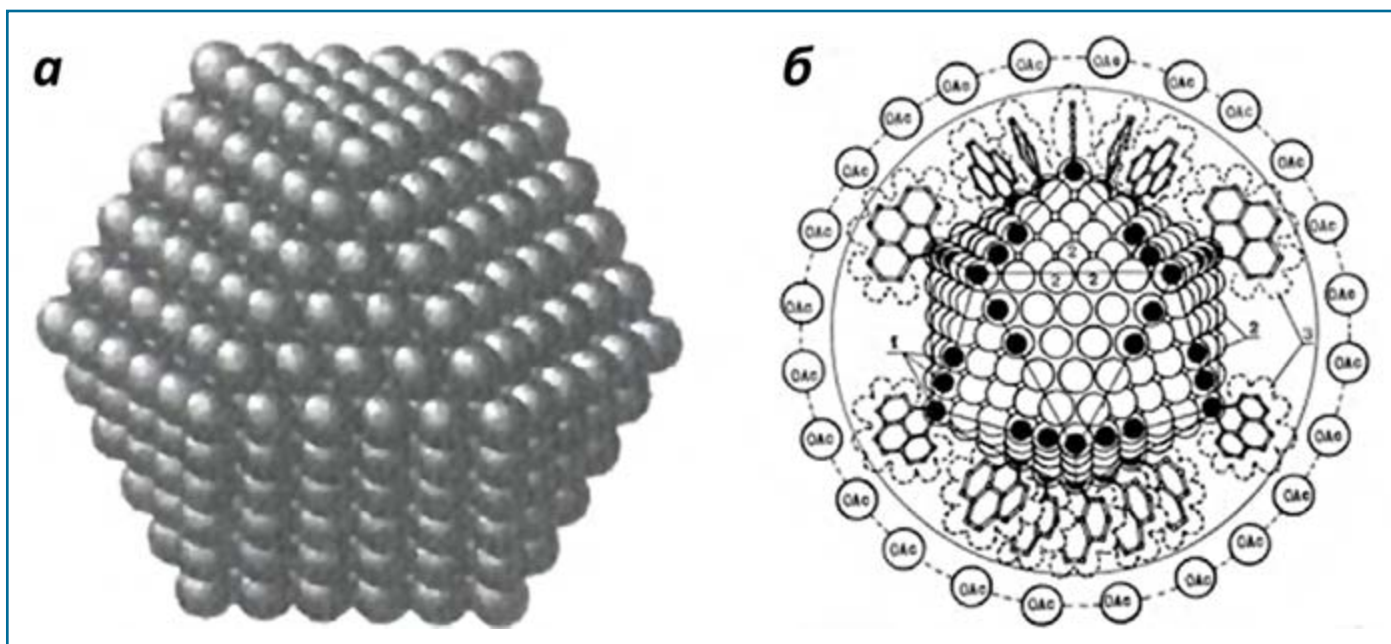
Вспомните, как часто вы слышали слово «кластер»? Многие из вас вспомнят информатику, где кластер рассматривается как блок данных на жестких дисках компьютеров, или уроки астрономии – звездный кластер (группа звезд, связанных друг с другом силами гравитации). Под понятием «кластер» (от англ. cluster – пучок, рой, скопление) понимают объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами.

Вы видели, как роятся пчелы? Сотни маленьких пчел объединяются в рой, действуя как единое целое. Так и атомы объединяются в «рой», образуя кластеры.

В химии термин «кластер» употребляется для обозначения группы близко расположенных и тесно связанных друг с другом атомов, молекул, ионов, а иногда и ультрадисперсных частиц. Впервые это понятие стало использоваться в 1964 году, когда профессор Ф. Коттон предложил называть кластерами химические соединения, в которых атомы металла образуют между собой химическую связь.

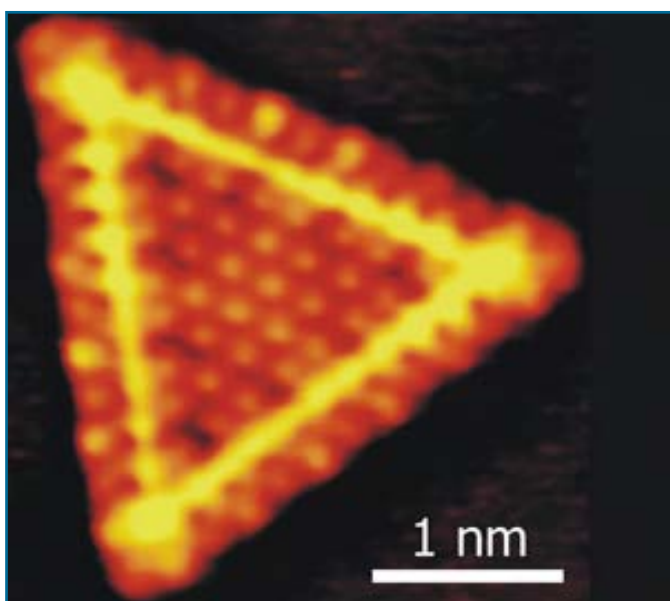
К кластерам также относят наночастицы упорядоченного строения, имеющие заданную упаковку атомов и правильную геометрическую форму (рис. 1а). Как показывают результаты исследований, в большинстве случаев формирование ядра кластера происходит в соответствии с концепцией плотной упаковки атомов. Число атомов в плотноупакованном кластере, построенном в виде правильного 12-вершинного многогранника, в зависимости от его размера составляет 13, 55, 147, 309, 561, 923, 1415, 2057, 2869 и т.д. Эти числа отвечают наиболее стабильным формам кластера, которые чаще всего и получают в процессе синтеза, и носят название «магических». Тенденция формирования магических кластеров хорошо прослеживается на примере металлических кластеров: синтезирован ряд соединений с Au, Rh, Pt, Pd и др., содержащих от 13 атомов металла (например,  $[\text{Au}_{13}(\text{diphos})_6](\text{NO}_3)_4$ ) до 2057 атомов (например,  $\text{Pd}_{561}\text{Phen}_{60}(\text{O}_2)_{160}(\text{OAc})_{180}$  (рис. 1б).

Кластерные соединения металлов с общей формулой  $\text{M}_m\text{L}_n$  классифицируют на малые ( $m/n < 1$ ), средние ( $m/n \sim 1$ ), большие ( $m/n > 1$ ) и гигантские ( $m \gg n$ ) кластеры. Малые кластеры содержат



**Рис. 1.** Структура наночастицы: а – с кубической плотнейшей упаковкой атомов металла, б – икосаэдрический кластер  $\text{Pd}_{561}\text{Phen}_{60}(\text{O}_2)_{160}(\text{OAc})_{180}$ , phen-фенантролин

обычно до 12 атомов металла, средние и большие – до 150, а гигантские (их диаметр достигает 2–10 нм) – свыше 150 атомов. Хотя термин «кластер» широко стал использоваться сравнительно недавно, само понятие небольшой группы атомов, ионов или молекул является естественным для химии, так как связано с образованием зародышей в процессе кристаллизации или ассоциатов в жидкости.



**Рис. 2.** Нанокластер  $\text{MoS}_2$  на поверхности (111) монокристалла золота

В последнее десятилетие двадцатого века, с развитием нанотехнологии и усовершенствованием методов синтеза, ученые стали пользоваться новым понятием «нанокластер», которое по сути дела является синонимом кластера. Это понятие объединяет: молекулярные кластеры, газовые безлигандные кластеры, коллоидные кластеры, матричные кластеры и твердотельные нанокластеры.

Молекулярные кластеры металлов – это многоядерные комплексные соединения, представляющие собой окруженный лигандами остов из атомов металлов. Примером подобных кластером могут служить кластеры палладия ( $\text{Pd}_{561}\text{phen}_{60}(\text{OAc})_{180}$ ) или кластерные анионы молибдена ( $\{\text{Mo}_{126}^{\text{VI}}\text{Mo}_{28}^{\text{V}}\text{O}_{462}\text{H}_{14}(\text{H}_2\text{O})_{70}\}^{14-}$ ).

Кластеры, не требующие стабилизации лигандами (безлигандные кластеры), бывают как металлические, так и неметаллические (рис. 2). Например, в природе можно найти метастабильные кластеры золота. В обычных условиях безлигандные металлические кластеры с диаметром менее 30 нм неустойчивы. Для повышения устойчивости их поверхность покрывают полимерами. К яркому представителю безлигандных неметаллических кластеров можно отнести и фуллерены ( $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{70}$ ). Фуллерены – это кластеры углерода с четным числом атомов, расположенных на поверхности многогранных полиэдров. На рисунке –

нанокластер  $\text{MoS}_2$  на поверхности (111) монокристалла золота.

Коллоидные кластеры образуются в результате химических реакций и по отношению к жидкой фазе их можно разделить на лиофильные (гидрофильные) и лиофобные (гидрофобные). Леофильные кластеры, в отличие от лиофобных, сорбируют на своей поверхности молекулы растворителя, образуя с ними прочные сольватные комплексы. Типичными представителями гидрофильных кластеров являются оксиды кремния, железа и других металлов.

Твердотельные нанокластеры образуются в результате различных превращений в твердой фазе. Множество твердофазных взаимодействий сопровождается образованием зародышей продукта реакции, которые растут при последующей термической обработке.

Матричные нанокластеры представляют собой изолированные друг от друга кластеры, заключенные в твердофазную матрицу, предотвращающую агрегацию.

Известна еще одна форма уникальных кластеров, которые носят название сверхкластеров. Это кластеры, в которых вместо отдельных атомов в узлах решетки находятся другие кластеры или наночастицы. Причем, как и в случае гигантских кластеров наиболее устойчивым конфигурациям будут отвечать сверхкластеры, имеющие форму правильного икосаэдра с завершенным числом слоев: то есть агрегатов, число наночастиц в которых соответствует «магическим числам».

Нанокластеры находят широкое применение в технике, например, в органическом синтезе используют высокую каталитическую активность нанокластеров переходных металлов. Необычные оптические и электронные свойства кластеров полупроводниковых материалов, распределенных в органической или силикатной матрице, привлекают внимание исследователей, работающих в области физики и химии низкоразмерных систем и нелинейной оптики.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Шпак М.С. Соросовский образовательный журнал. 1999. № 5. С. 54–59.
2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, структуры, технологии. М.: Физматлит, 2005.
4. [http://www.chemport.ru/chemical\\_encyclopedia\\_article\\_1670.html](http://www.chemport.ru/chemical_encyclopedia_article_1670.html)



## НАНОКЛЕЙ (Nanoglue)

*«Половинки пестрых радуг  
Склеим мы назло дождям».*

*Слова из песни «Лада»*



Если самым обычным клеем смазать, а затем соединить между собой две поверхности, то через некоторое время они слипнутся, и легко разъединить их вам уже не удастся. А есть ли такой клей, которым можно «склеивать – расклеить» детали много раз, не разрушая их? И можно ли создать клеевой состав, «сшивающий» поверхности гораздо крепче любого из используемых традиционных клеев? В очередной раз утвердительно ответить на оба вопроса возможно благодаря достижениям **нанотехнологий**, позволяющим улучшить адгезионные свойства канцелярского клея и даже создать принципиально новые способы склеивания.

Некоторые интересные решения ученым подсказала сама природа, например, при создании

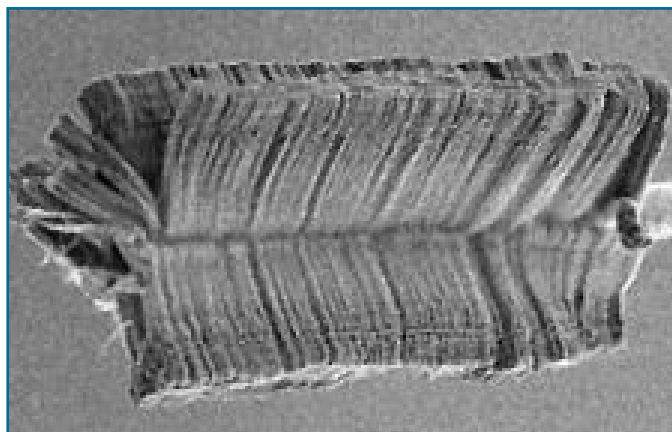
материалов на основе **углеродных нанотрубок**, имитирующих поверхность лапок геккона (рис. 1). Эта рептилия обладает удивительной способностью в буквальном смысле бегать по потолку или висеть вниз головой, прицепившись к ветке дерева всего лишь одним пальцем! Дело в том, что кончики ее пальцев покрыты миллионами микроскопических щеточек, состоящих из крошечных эластичных волосков, каждый из которых притягивается к поверхности за счет слабых Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий. Поскольку таких волосков очень много, это позволяет геккону свободно удерживаться и перемещаться по гладким вертикальным поверхностям.

Углеродные нанотрубки по форме и размерам похожи на волоски пальцев геккона и могут образовывать близкие по силе межмолекулярные связи. Ученым даже удалось создать робот, имитирующий перемещение ящерицы по вертикальным поверхностям. Лапы такого робота, как липучками, покрыты массивами углеродных нанотрубок, за счет большого числа которых достигается высокая прочность сцепления с поверхностью (до 10 Н/см<sup>2</sup>). Однако, как несложно догадаться, трубки не только прилипают к поверхности, но и слипаются между собой, причем гораздо охотнее. Для решения этой проблемы было предложено использовать нанотрубки «иерархической структуры», при которой толстые и длинные трубки завершаются разветвлениями на более тонкие (рис. 2) – это обеспечивает хороший контакт с поверхностью, в то же время предотвращая нанотрубки от слипания. Успехи первых



**Рис. 1.** Фельзума мадагаскарская – один из видов дневных гекконов

исследований уже будоражат фантазию ученых – совсем не за горами время, когда человек, подобно пауку или геккону, сможет взбираться по отвесным стенам не только на телевизионных экранах, но и в реальной жизни. Осталось лишь научиться синтезировать достаточно большие массивы ориентированных углеродных нанотрубок, чтобы сшить из них перчатки для человека-



**Рис. 2.** Структура из нанотрубок

паука и разработать технологию очистки их поверхности от налипающего мусора.

С помощью наночастиц даже самому обычному клею можно придать уникальные свойства. Так, введение относительно небольшого количества углеродных нанотрубок в эпоксидную смолу позволяет сильно увеличить ее твердость и теплопроводность, а добавление оксида железа в канцелярский клей – создать моментально затвердевающий, способный «расклеиваться» состав. В последнем случае, чтобы склеить поверхности между собой, их намазывают клеем и помещают в высокочастотное магнитное поле, в котором частицы оксида железа выстраиваются вдоль силовых линий, формируя упорядоченную структуру. Это приводит к резкому повышению вязкости и мгновенному затвердеванию клея. Для того чтобы разъединить склеенное, достаточно вновь поместить деталь в магнитное поле с той же частотой, но с несколько большей интенсивностью.

Но и это еще не все – кто бы мог подумать, но даже молекулы ДНК могут выступать в роли своеобразного клея, обратимо связывая наночастицы золота. А сколько еще новых клеящих составов и принципиально новых способов склеивания поверхности подарят нам нанотехнологии в будущем – остается только гадать!

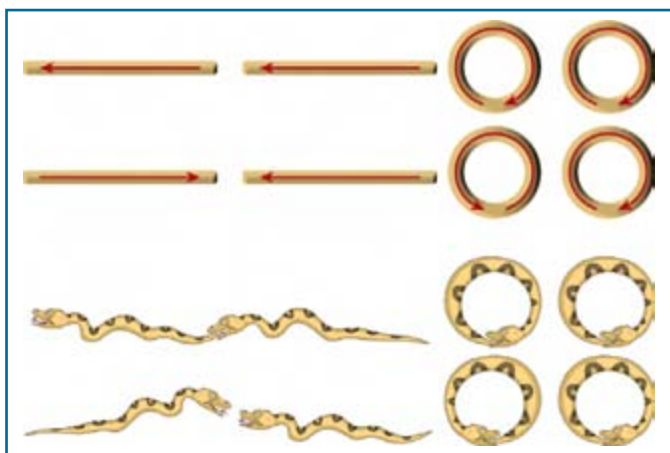
#### Литература:

1. Mei Zhang et al. Science. 2005. Vol. 309. P. 1215–1219.
2. Секрет фирмы. Деловой еженедельник. 2007. № 7 (190). С. 43.

## НАНОКОЛЬЦА (Nanorings)

*«Моя нанопрелесть, – сказал Наногорлум, надевая нанокольцо на нанопалец».*

*Дж.Р.Р. Нанотолкиен*



Сегодня известны самые разнообразные формы существования вещества в наносостоянии – от широко распространенных **нанотрубок** до экзотических нанокольцев, о которых и пойдет сейчас речь. Впервые термин «нанокольцо» появился в 2000 году, и с тех пор опубликовано около ста работ, посвященных нанокольцам. К настоящему моменту получены нанокольца из металлов, полупроводников и изоляторов, их диаметр составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров, и многие из них обладают интересными свойствами.

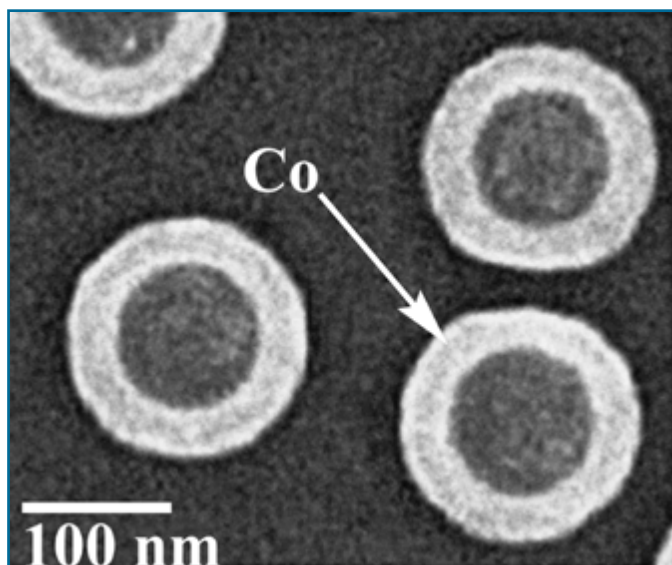
Существует два основных химических способа получения нанокольцев: самосборка и свертка. При самосборке наночастицы могут укладываться в плотные агрегаты, имеющие различную форму, и, естественно, для того, чтобы получать именно кольца, нужно искать подходящие условия синтеза. В случае свертки (а именно так получают нанокольца оксида цинка и углерода) нанокольцо образуется из анизотропной частицы

(например, **наностержня**, нанотрубки) путем «сворачивания» так, что ее торцы соединяются (это дает проигрыш в энергии из-за изгиба, но выигрыш в поверхностной энергии). Часто свертку **наноремешков** и нанотрубок проводят под воздействием ультразвука: при образовании и схлопывании кавитационных пузырьков возникают механические напряжения, которые и могут приводить к сворачиванию лент и образованию нанокольцев.

Нанокольца еще только ищут свою «экологическую нишу» среди прочих наноструктур, но уже сейчас на их основе создаются или проектируются различные функциональные материалы. В Технологическом институте штата Джорджия (США) созданы пьезоэлектрические нанокольца на основе оксида цинка, которые планируется использовать в качестве имплантируемых медицинских датчиков (пьезорезонаторов для определения одиночных биомолекул, датчиков давления крови в сосудах и пр.). Но, пожалуй, наибольший интерес вызывают магнитные нанокольца. Так, в университете Пурдью (США) были получены нанокольца металлического кобальта (рис. 1).

Магнитный момент в них направлен по окружности, сохраняется при температурах выше комнатной и может иметь два состояния: по и против часовой стрелки. Но важнее всего то, что в такой структуре магнитный поток является замкнутым, то есть все магнитное поле заключено внутри кольца, а поле снаружи равно нулю. Это означает, что даже расположенные рядом, эти кольца не влияют друг на друга и чрезвычайно





**Рис. 1.** Нанокольца для магнитной записи

устойчивы к помехам и наводкам извне, в отличие от существующих сейчас систем магнитной записи. На основе подобных материалов проектируются элементы энергонезависимой памяти нового типа (MRAM – Magnetic Random Access Memory). Но как говорится, новое – это хорошо

забытое старое. Системы хранения информации на магнитных кольцах известны с 50-х годов прошлого века, когда из ферритовых колец диаметром менее 1 мм собирались массивы памяти для ЭВМ. И даже сейчас подобные архаичные системы приходится использовать в критически важных устройствах (например, компьютерах зенитноракетных комплексов С-300), которые должны оставаться работоспособными даже в условиях аномально высоких электромагнитных полей, возникающих, например, при ядерных взрывах, когда полупроводниковая память современных компьютеров оказывается начисто стертой. Однако системы памяти нужного объема на классических ферритовых колечках весят сотни килограммов, тогда как создание устройств хранения информации на магнитных нанокольцах позволит снизить массу до 1 грамма без ущерба емкости и функциональных характеристик.

#### Л и т е р а т у р а:

1. Tripp S.L., Dunin-Borkowski R., Wei A. Angew. Chem. Int. Ed. 2003. Vol. 42. P. 5591.
2. Tripp S.L., Pusztay S.V., Ribbe A.E., Wei A. J. Am. Chem. Soc. 2002. Vol. 124. P. 7914.

## Наноккомпозиты (Nanocomposites)



Что такое композит? Исходя из английского «compose» – «составлять», легко предположить, что композит – это нечто, состоящее из нескольких частей. В материаловедении композитами называют материалы, состоящие из смеси или комбинации двух или больше микро- или макросоставляющих, которые различны по форме, химическому составу и нерастворимы в значительной степени друг в друге. Композитные материалы встречаются нам на каждом шагу: это бетонные и кирпичные сооружения, асфальт на дороге и детали корпусов большинства современных автомобилей. Даже такой древний строительный материал как дерево является природным композитом, состоящим из целлюлозных волокон, связанных вместе полимерной матрицей, представляющей собой в основном лигнин. Теперь совсем легко понять, что же такое наноккомпозит! Это композит, в котором раз-

*Схватил он Любовь колдовскою рукой,  
Схватил он Измену рукою другой  
И бросил в кувшин их, зеленый, как море,  
А следом туда же – и радость, и горе,  
И верность, и злость, доброту, и дурман,  
И чистую правду, и подлый обман.*

...  
*Когда переплавится все, перемучится,  
Какая же там чертовщина получится?  
Кувшин остывает. Опыт готов.  
По дну пробежала трещина,  
Затем он распался на сотню кусков,  
И появилась женщина.*

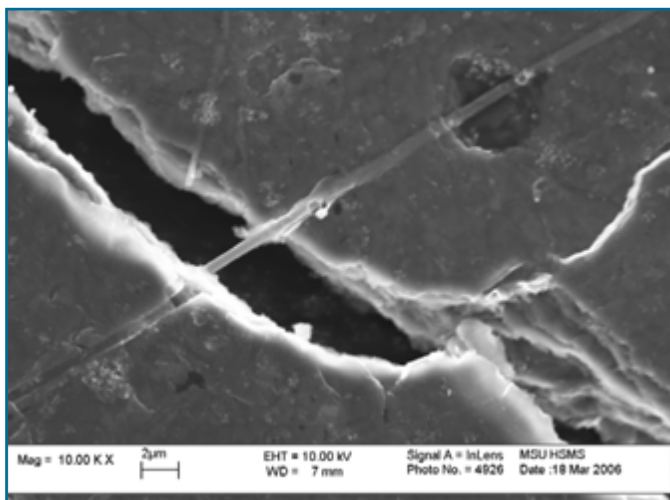
Э. Асадов. «Любовь, Измена и Колдун»

меры одной, нескольких или всех составляющих частей находятся в области наноразмеров.

Отличительной чертой композитов, обуславливающих их важность, является то, что два или более заметно различающихся материала при объединении образуют материал, который обладает значительно улучшенными свойствами по сравнению со свойствами его индивидуальных составляющих.

Наноккомпозиты широко изучаются в первую очередь из-за улучшенных механических свойств. **Закон Холла–Петча** гласит, что для большинства поликристаллических материалов твердость и предел упругости возрастают при уменьшении среднего размера кристаллитов, а это в свою очередь способствует уплотнению композитов за счет большой удельной площади поверхности и коротких путей диффузии.

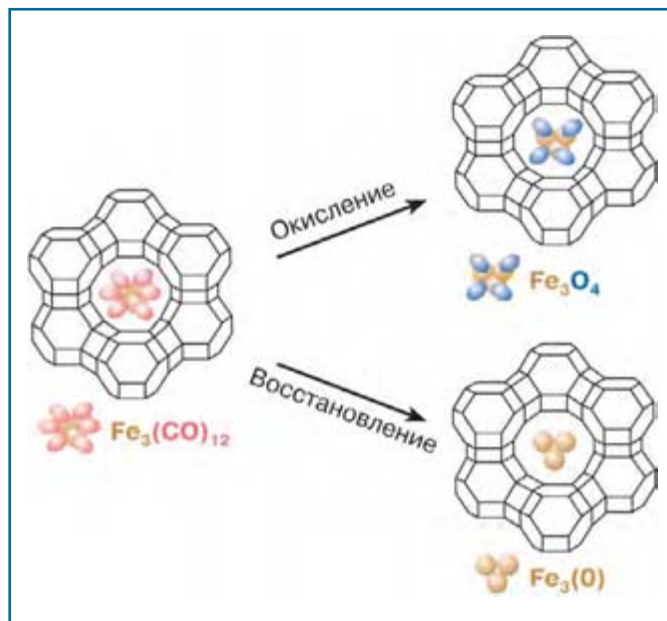
Широким классом композитных материалов являются армированные (упрочненные) нановолокнами пластика, металлы и керамика (рис. 1). Так, в промышленности широко производятся пластмассы, армированные стеклянными волокнами или **углеродными нанотрубками**. Разработка методов получения **нановолокон**, нанопроволок и **вискерев** также открыла возможность их



**Рис. 1.** Ксерогель  $V_2O_5$ , армированный вискерами  $Ba_6Mn_{24}O_{48}$ : разлом ксерогеля сдерживается вискерами (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

использования в качестве армирующих волокон. Примером могут служить вискеры карбида кремния, которые смешивают с порошком металлов, а затем подвергают горячему прессованию.

Другой класс нанокмпозитов составляют неорганo-органические «гибридные материалы», в которых органическая и неорганическая составляющие взаимопроникают друг в друга на нанометровом уровне (рис. 2). Среди них выделяют композитные гибридные материалы, состоящие из молекул органических соединений, олигомеров или полимеров с низкой молекулярной массой, помещенных в неорганическую матрицу, с которой они связаны слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами. Возможна и обратная ситуация, когда наночастицы неорганического материала размещаются в полимерной матрице. Так, например, металлполимерные нанокмпозиты с высоким содержанием ферромагнитных наночастиц размером около 5 нм, расположенных на расстоянии  $\sim 5$  нм, можно использовать для создания квазипериодических поверхностных структур с рекордной плотностью записи информации.



**Рис. 2.** Схема образования внутри полости цеолита наночастиц оксида железа или металлического железа. Молекула прекурсора проникает в полость через «окно» размером около 0,8 нм; свободный диаметр полости составляет 1,2 нм

В отдельную группу выделяются нанокмпозиты, которые представляют собой ансамбли металлических или оксидных наночастиц, изолированных в твердых телах – матрицах. В качестве таких матриц часто используют микро- и *мезопористые молекулярные сита, цеолиты*. При получении наночастиц оксида железа и металлического железа из карбонильного комплекса Fe в полостях микропористой цеолитной матрицы наночастицы практически полностью изолированы друг от друга, что исключает их взаимодействие. В этом случае наночастицы приобретают свойства *квантовых точек*, в которых поведение электронов описывается квантово-механической моделью. Такие квантовые точки, стабилизированные в инертных матрицах, могут использоваться в *устройствах хранения информации* и рассматриваются как перспективные материалы в оптоэлектронике.

### Литература:

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 410 с
2. Третьяков Ю.Д. Нанометр. 2006. № 3, 4.



## НАНОКРИСТАЛЛЫ (Nanocrystals)

*«Красота и блеск кристаллов*

*Всем и каждому понятны.*

*Беглый взгляд они чаруют*

*Формы их уму заняты...»*

*В.А. Слетов.*

*«Стихи о камнях»*



Самый большой в мире бриллиант  
«Звезда Африки» весом в 530 карат

Если Вы смотрели мюзикл «Мулен Руж», то, наверняка, помните песню «Бриллианты – лучшие друзья девушек». Драгоценные камни представляют собой ограненные ювелиром монокристаллы определенных химических соединений. К примеру, бриллианты – это алмазы, а изумруд – прозрачная разновидность берилла  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{SiO}_6$ , окрашенного в травянисто-зеленый цвет оксидом хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Покупая ювелирное изделие с драгоценными камнями, скорее всего, вы и не задумываетесь об их химическом составе. Вас больше волнуют такие характеристики, как чистота и размер камня, определяющие стоимость украшения. Самый большой в мире бриллиант «Звезда Африки» весит около 530 карат ( $10^6$  г).

А теперь представьте, что размеры этого камня уменьшатся в миллиарды миллиардов раз –

этакий кристалл в  $1 \cdot 10^{-18}$  карат или того меньше – будет ли он для кого-нибудь представлять ценность и можно ли его вообще после этого называть кристаллом? Оказывается, можно, только с приставкой нано – в соответствии с его размерами и формой. Вообще, под нанокристаллом подразумевают любую **наночастицу**, характеризующуюся упорядоченным строением и четко выраженной, как у макрокристаллов, огранкой.

Развитие методов коллоидной химии в последние годы позволило «выкристаллизовать» из раствора многие давно известные химические соединения, например, селенид кадмия  $\text{CdSe}$  в виде наностержней, удлинённых наносфер, нанотетраэдров, нанокубов и наношестиугольников (рис. 1). Кроме того, оказалось, что огранкой нанокристаллов можно управлять, варьируя концентрацию раствора соли. Так при достаточно

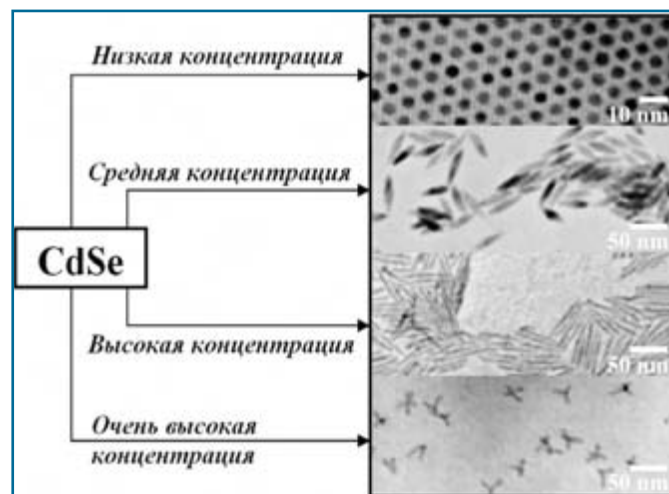
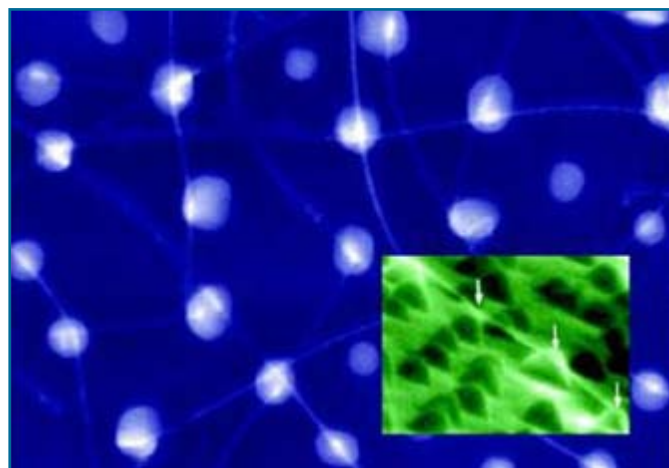


Рис. 1. Рост нанокристаллов  $\text{CdSe}$  различной формы

низких концентрациях селенида кадмия в растворе все нанокристаллы растут в форме, обеспечивающей минимальную свободную энергию – в виде сфер. Средняя концентрация позволяет получать только анизотропные сильно вытянутые эллипсоидальные частицы, высокая – палочки и другие протяженные наноструктуры. Если же концентрация очень высока, то раствор обеспечен существенным количеством «строительных блоков» для каждого направления роста кристалла, и в результате получаются кристаллиты в форме тетраподов.

Нанокристаллы находят самые разнообразные и неожиданные применения. Селенид кадмия и другие  $A^2B^6$ -наноструктуры перспективны в качестве активных элементов электролюминесцентных панелей, флуоресцирующих маркеров для разнообразных биологических объектов, в том числе в качестве *нанолекарств* для ранней диагностики и лечения раковых опухолей. С помощью нанокристаллов золота, способных разогреваться в высокочастотном электрическом поле, возможно, как ключом, «расстегивать» двойную спираль ДНК, вызывая ее временную денатурацию и превращение в одинарную. Изолированные нанокристаллы кремния можно использовать для выращивания необычных структур на основе *углеродных нанотрубок*, в которых висячие «ли-



**Рис. 2.** Нейронные сети на основе нанотрубок (на зеленой врезке изображение нанокристаллов кремния)

нии» из цепочек атомов углерода прямо по воздуху соединяют кремниевые «наноопоры», образуя своеобразные нано-ЛЭП (рис. 2). Формирование таких систем открывает широкие возможности для изучения нейронных сетей, аналогичных действующим в нашем мозге системам нервных клеток.

Представленные примеры лишь в очень малой степени иллюстрируют возможности применения нанокристаллов, так как нет, пожалуй, других объектов, свойства которых настолько разнообразны и непредсказуемы.

#### Литература:

1. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology. Publisher: Wiley-Interscience. May 30, 2003. 400 p.

## НАНОЛЕКАРСТВА (Nanodrugs)

*Medica mente, non medicaments.*  
Лечи умом, а не лекарствами (лат.).



С незапамятных времен в русском народном творчестве присутствовали образы чудодейственных лекарств: «живой воды», которая воскрешала погибших воинов или возвращала зрение ослепшим, «молодильных яблок», съев которые старики вновь становились молодыми. И это не удивительно – возможность излечения болезней во все времена является одной из самых актуальных проблем человечества. Наверняка каждый из Вас знает из книг, как в средние века в Европе страшные эпидемии косили целые села и горо-

да. И вот, стоило человечеству преодолеть чуму и холеру, как появились новые страшные заболевания – такие, как СПИД и рак, наводящие страх сегодня на население всей планеты.

Последние достижения в **нано-** и **бионанотехнологиях** затронули многие области здравоохранения: появлялись такие понятия как **наномедицина**, а также **нанофармакология**, занимающаяся разработкой нового поколения лекарственных препаратов – так называемых нанолекарств. Вместе с открытием новых супрамолекулярных наноструктур и механизмов их формирования это привело к смещению приоритетов фарминдустрии – с создания новых лекарств на повышение эффективности и локальности действия уже известных препаратов за счет разработки специфических способов их доставки к «заболевшим» органам.

Каким образом осуществляется такая доставка, по каким принципам действуют нанолекарства? Каким бы ни было нанолекарство, его ключевым элементом всегда являются те или иные **наночастицы** (рис. 1). Если на их поверхности путем химического взаимодействия функциональных групп закрепить антитела и полученную систему ввести в кровь, то антитела направленно «доставят» частицу в нужное место организма. В данном случае антитело выступает в качестве транспортного элемента такой системы. А если к наночастице привить активный белок, разрушающий клеточную мембрану, или **вирус** – то можно направленно поражать зараженные ткани. В то же время если лекарство начнет действовать по пути, могут пострадать здоровые ткани, поэтому высвобождение лечебной субстанции надо контролировать либо факторами внешней среды





Рис. 1. Модель частицы нанолечения

(температура, кислотность среды, специфические ферменты), либо продолжительностью воздействия.

Часто бывают случаи, когда одной лишь доставки лекарства недостаточно – необходимо точно определить, где же именно находятся пораженные клетки. Для этого к лекарственным препаратам прививают своеобразные «датчики положения», т.е. **наночастицы**, детектируемые по проявлению ими того или иного физического свойства. В настоящий момент в качестве таких датчиков используют **квантовые точки**, обладающие сильной флуоресценцией (рис. 2) или магнетоконтрастирующие агенты (наночастицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), чувствительность к магнитному полю которых лежит в основе метода магниторезонансной томографии.

Оказывается, нанообъекты могут выполнять роли всех перечисленных функциональных элементов нанолечений. Так, например, **фуллерены** обладают антисептическими свойствами, наночастицы биосовместимых апатитов используются для восстановления костной ткани, а наночастицы магнитных оксидов и металлов – для лечения раковых опухолей методом гипертермии. Белковые **наноканкулы**, **мицеллы**, **дендримеры**, полимерные и керамические наночастицы, оксидные и металлические наночастицы, **квантовые точки** зачастую являются транспортными агентами. При этом молекулы лекарственных препаратов

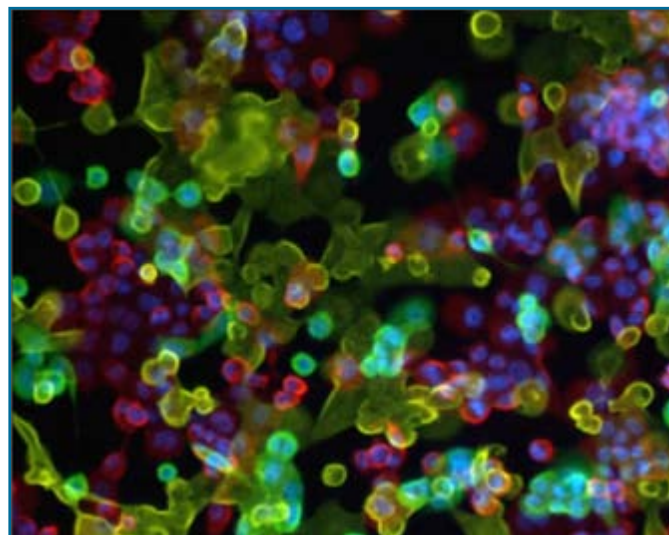


Рис. 2. Флуоресценция квантовых точек разного размера, сконцентрированных в фагоцитах

могут быть как инкапсулированы внутри нанополостей таких наносистем, так и закреплены на их внешних поверхностях в результате образования ковалентных или Ван-дер-Ваальсовых связей. К примеру, транспорт медикаментов с использованием магнитных **наножидкостей**, чувствительных к действию магнитного поля, может использоваться в глазной хирургии для физического воздействия на отслоившуюся сетчатку глаза во время операции. Следует отметить, что некоторые наночастицы совмещают в себе как функциональные свойства, обуславливающие их лечебные качества, так и транспортные – в первую очередь, это магнитные наночастицы.

Сегодня ученые уже научились модифицировать поверхность наночастиц, связывая их с различными «транспортными» элементами (антигенами и антителами) и создавая эффективные нанолечения, а также системы диагностики заболеваний на ранних стадиях. Как видите, в наши дни медицина сделала значительный шаг вперед на пути своего развития – теперь не колдовство, а **нанобиотехнологии** позволяют врачам создавать «волшебные» лекарства – лекарства нового поколения.

#### Литература:

1. Глик Б., Пастернак Дж. Молекулярная биотехнология. Принципы и применение. М.: Мир, 2002. 589 с.
2. Ranade V.V., Hollinger M.A. Drug Delivery Systems, Second Edition (Handbooks in Pharmacology and Toxicology). 2004, CRC Press LLC. 448 p.

## НАНОЛИТОГРАФИЯ (Nanolithography)

*«Филадельфийский сюр: разгар зимы,  
Дождь медлит, не решается стать снегом,  
Гуашью растекается под небом,  
Окрашивая утренние сны.  
И улица стихает... тормозит...  
Теряет цвет, объем под слоем мела,  
Лишь девочка в пальтишке черно-белом  
По зимней литографии скользит...»*  
Елена Максина



Портрет Мэрилин Монро, «написанный» методом литографического анодного окисления пленки аморфного титана с помощью ACM NTEGRA Prima

Литография (от греческих слов «lithos» – камень и «grapho» – пишу, рисую) была создана в 1798 году Алоизием Зенефельдером в Богемии.

Это была первая принципиально новая после изобретения гравюры техника печати. Однако в XX веке этот термин начали применять не только в книгопечатании, но и в производстве микроэлектроники. На данный момент под «литографией» понимают метод подготовки поверхности путем использования некоего шаблона, который определяет свойства конечного образца. Этот принцип оказался очень удобным при массовом производстве микросхем с отдельными элементами меньше 1 мкм.

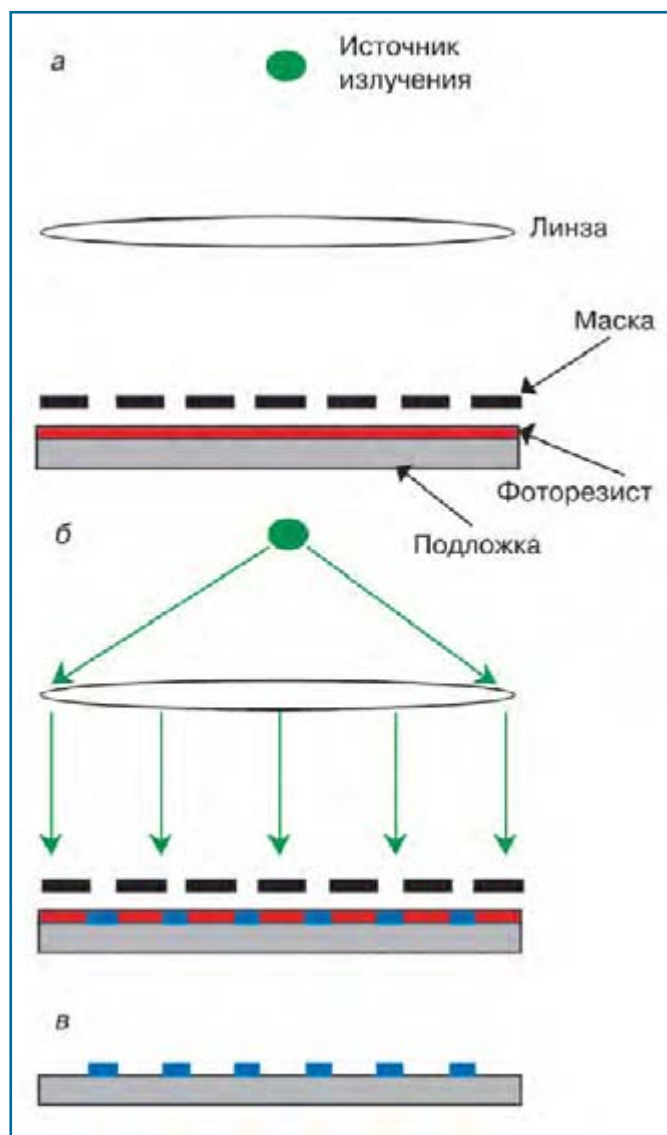
Развитие метода сегодня ориентировано на создание топологического рисунка на поверхности монокристаллических кремниевых пластин. Учитывая размеры современных транзисторов ( $\square 200$  нм), можно говорить о необходимости нанолитографии. Дальнейшее развитие микроэлектроники предполагает использовать литографические схемы для производства вычислительных машин вплоть до 2009 г., на который намечен выпуск процессора по 32-нанометровой технологии.

Наиболее простая методика создания наномикроструктур – оптическая литография – очень схожа с процессом печати фотографии. На подложку (например, кремниевую) наносится светочувствительное вещество – фоторезист, которое изменяет структуру под действием излучения (рис. 1а). На маску (пластинку с прорезями, служащую шаблоном и изготовленную из материала, не пропускающего излучение) пропускается пучок фотонов с длиной волны  $\lambda = 10 \div 1000$  нм,

попадающий на резист. В засвеченных областях резист меняет состав или структуру, а в затененных – остается без изменения (рис. 1б). Далее, часть резиста вытравливается (засвеченная в случае негативного фоторезиста, затененная в случае позитивного), при этом другая часть остается без изменения, создавая на подложке рельефный рисунок, соответствующий рисунку шаблона-маски (рис. 1в). Разрешающая способность метода оптической литографии в основном определяется длиной волны используемого излучения и размером элементов маски. Для обычных масок оптимальная разрешающая способность метода составляет  $\sim 1,5 \div 2\lambda$ , тогда как использование так называемых фазосдвигающих масок позволяет более четко разделить элементы микросхемы и повысить разрешение до  $\sim 0,5 \div 1\lambda$ . Сегодня фазосдвигающие маски используются для производства транзисторов по технологии MOSFET с 30-нанометровой длиной затвора.

Необходимость уменьшения размеров элементов микроэлектроники накладывает ограничения во-первых, на длину волны используемого излучения и, во-вторых, на линейные размеры прорезей шаблона. Так, еще недавно широко применяемые в производстве микросхем источники на основе ртутных ламп (436–254 нм), сегодня заменены ArF-лазерами ( $\lambda = 193$  нм) и даже рассматривается возможность использования синхротронного излучения для снижения длины волны вплоть до нескольких нанометров и, как следствие, повышения разрешающей способности литографической схемы. При уменьшении линейных размеров рисунка маски большую роль начинают играть эффекты рассеяния излучения на границах раздела фаз, которые приводят к размытию конечного рисунка на резисте. Например, для нанесения четкого отображения на резисте в форме квадрата (рис. 2а) на маске оказывается необходимым сформировать дополнительные прорезы в его вершинах (рис. 2б). Но даже в этом случае отображение оказывается несколько «размытым» (рис. 2в).

Более сложные схемы можно производить, если пучок излучения заменить на пучок электронов или ионов (электронно- или ионно-лучевая литография). Поскольку эти частицы имеют заряд, становится возможным не только засвечивать резист через маску, но также сфокусированным управляемым пучком писать на ре-

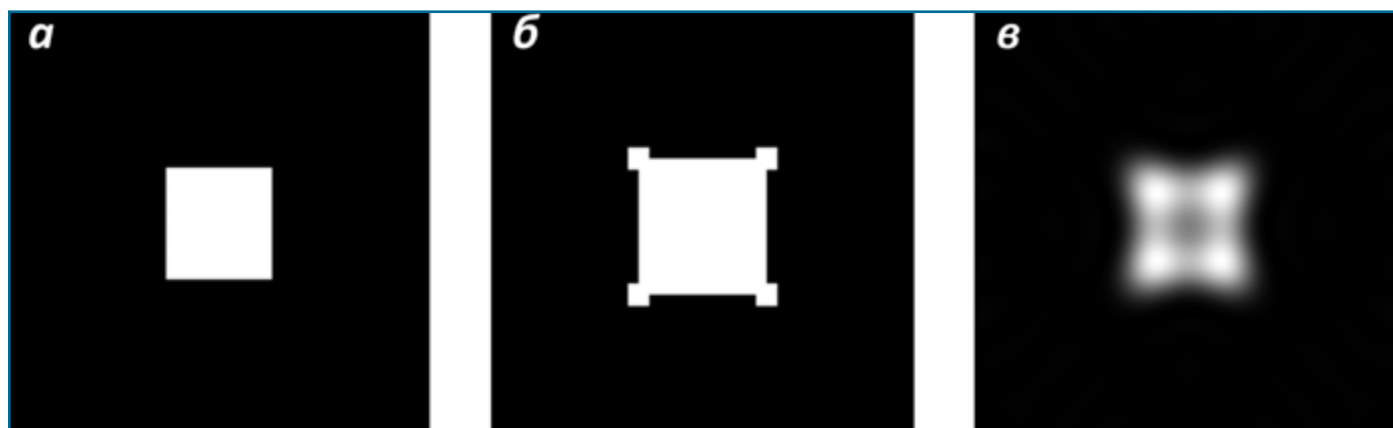


**Рис. 1.** Принципиальная схема литографии (а–в) с использованием источника, маски и позитивного фоторезиста

зисте как ручкой или карандашом по бумаге (см. **ФИП-наноитография**). В случае ионов тяжелых атомов можно как модифицировать резист, так и вытравливать саму подложку или, наоборот, наносить на нее слой атомов или легировать материал подложки. В данной литографической схеме можно добиться более высокой разрешающей способности ( $< 100$  нм), чем в оптической, однако значительная глубина проникновения электронов в облучаемый материал, процессы генерации вторичных электронов в объеме резиста приводят к значительному размытию экспонированных областей и разогреву маски, что отрицательно сказывается на качестве «рисунка».

Еще одним методом, причисляемым к литографическим, является «печатная» литография. В





**Рис. 2.** Форма требуемого изображения (а), используемой маски (б), получаемого изображения (в)

данном случае маска представляет собой рельефную пластину, которую прижимают к подложке с «мягким» резистом. Таким образом рисунок с маски на резист переносится механически – путем деформирования резиста, подобно тому, как рельефный рисунок переносится путем придавливания печати к нагретому сургучу.

После создания рельефного рисунка из резиста подложка может быть окислена или протравлена в областях, не защищенных фоторезистом, или, наоборот, в «канавки» этого рельефа может быть нанесено вещество, например проводник. Таким образом, литография позволяет направленно изменять свойства определенной части подложки, что в дальнейшем используется для создания более сложных схем с отдельными элементами размером от 10 нм.

Локальное механическое воздействие на поверхность подложки можно производить иглой *атомно-силового микроскопа* (АСМ) в двух режимах. В статическом режиме (наногравировка) зонд микроскопа перемещается по поверхности

подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (резисте) формируется рисунок в виде царапин. Динамический режим (наночеканка) подразумевает модификацию поверхности образца за счет формирования углублений колеблющимся зондом (прерывисто-контактный метод сканирования). Альтернативой непосредственному механическому воздействию иглой АСМ на подложку или нанесенный резист является модификация поверхности с помощью электрических импульсов. Это становится возможным благодаря приложению разности потенциалов между иглой микроскопа и проводящей подложкой. В результате такого воздействия, изменяя потенциал, можно направленно менять структуру и химический состав поверхности, создавая очень сложные и красивые рисунки. Например, портрет Мэрилин Монро «написан» методом литографического анодного окисления пленки аморфного титана с помощью АСМ NTEGRA Prima.

#### Литература:

1. Nanoelectronics and Information Technology. 2.9 – Technology and Analysis: Lithography / Ed. by R. Waser, Wiley-VCH, Germany. 2005.
2. Jay Jao L. Adv. Mater. 2007. Vol. 19. P. 495–518.

## НАНОМАТЕРИАЛЫ (Nanomaterials)

*«Если уж стальной кубик или кристаллик соли, сложенный из одинаковых атомов, может обнаруживать интересные свойства; если вода – простые капельки, неотличимые друг от друга и покрывающие милья за мильей поверхность Земли, – способна порождать волны и пену, гром прибоя и странные узоры на граните набережной; если все это, все богатство жизни вод – всего лишь свойство сгустков атомов, то сколько же еще в них скрыто возможностей?»*

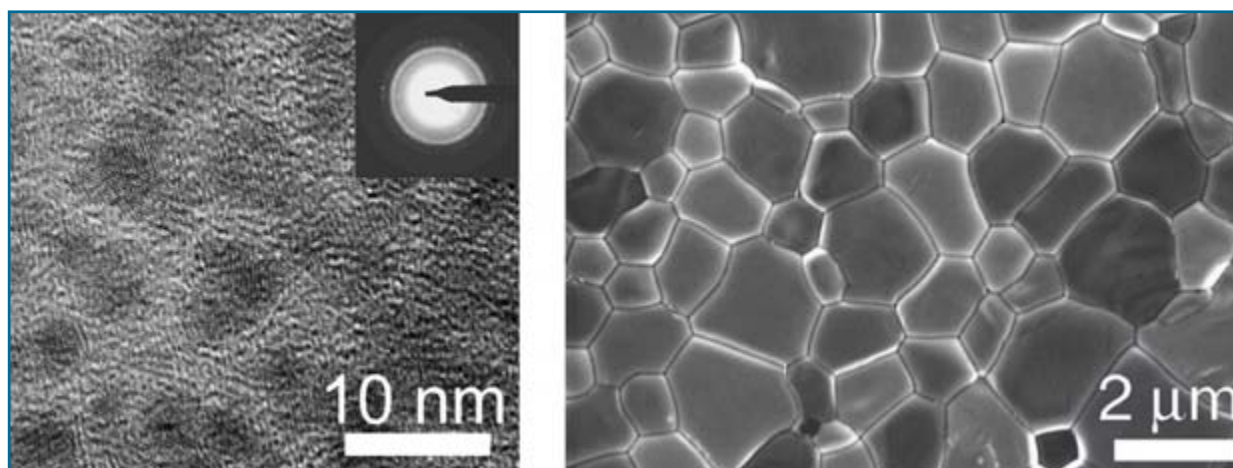
*Р.П. Фейнман*

Согласно толковому словарю русского языка материалы – это предметы, вещества, сырье, идущие на изготовление чего-либо, т.е. на производство изделий, полезных человеку. Соответственно, наноматериалами можно назвать практически любые объекты, вещества или их композиции, размеры структурных элементов которых лежат в «нанодиапазоне» (от 1 до 100 нм). Таким образом, наноматериалы – собирательный термин, объединяющий обширные классы веществ, применимых для изготовления полезных человеку изделий.

Внедрение наноматериалов в современной технологии означает качественный скачок в философии получения практически важных веществ – создание сложных устройств и систем,

размеры которых находится в диапазоне размеров надмолекулярных образований.

Наноматериалы состоят из очень мелких частиц, которые нельзя увидеть невооруженным глазом. В этом заключается первый плюс – возможность суперминиатюризации, приводящей к тому, что на единице площади можно разместить больше функциональных наноустройств, что жизненно важно, например, для нанoeлектроники или для достижения суперплотной магнитной записи информации вплоть до 10 Терабит на 1 квадратный сантиметр. Кроме того, ничтожный размер позволяет наноустройствам проникать в любые труднодоступные участки человеческого тела или части макромашин, в которые не проникнет ничто другое.



Нанокристаллический материал (а) ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) Поликристаллический материал (б) (шлиф плотной керамики  $\text{Sm}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ) (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

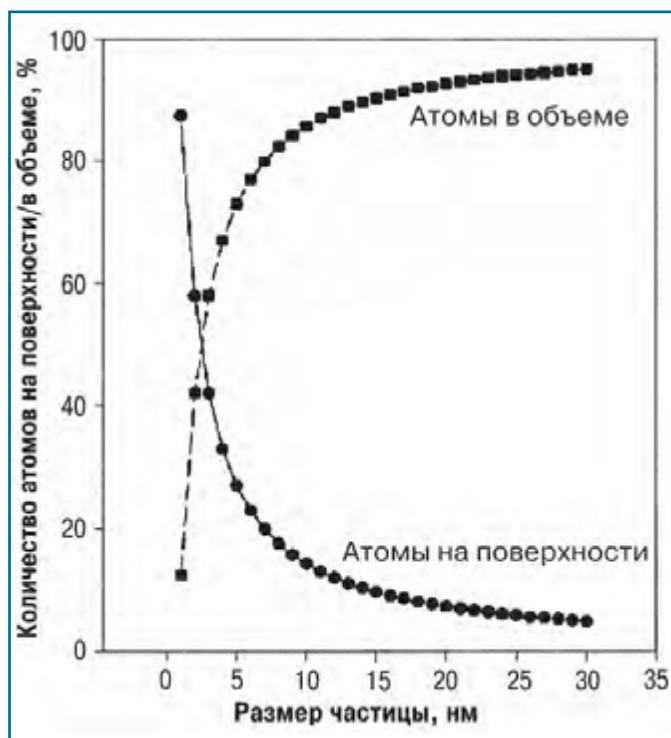


Рис. 1. Доля «поверхностных» и «объемных» атомов в наноматериалах

В отличие от обычных материалов, мельчайшие частицы которых содержат более  $10^8$  структурных единиц, частицы наноматериалов могут состоять всего из десятков атомов. Следовательно наносистемы имеют существенно большую долю атомов, находящихся на поверхности. Например, в поликристаллическом материале с размером зерна порядка 10 микрометров только  $10^{-4}$  часть атомов принадлежит границе зерна, тогда как при уменьшении размера зерна до 3–4 нанометров доли атомов, занимающих регулярные позиции в кристаллической решетке и находящихся на границе **нанокристалла**, становятся практически одинаковыми (рис. 1). Эта особенность наноструктурных материалов сильно влияет на их химические и физические свойства (транспортные, каталитические, механические, оптические и др.). Например, каталитически активные наноматериалы позволяют в десятки тысяч и даже миллионы раз ускорить химические или биохимические реакции.

Кроме того, проявление в наночастицах **квантово-размерных эффектов** приводит к

резкому изменению основных характеристик наноматериала и появлению новых, зачастую практически полезных свойств. Эти эффекты начинают особенно резко проявляться, когда размеры частиц становятся сопоставимы с корреляционным радиусом того или иного физического явления (например, с длиной свободного пробега электронов или фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы и др.). Характерной особенностью **наночастиц** является также отсутствие дефектов. Это делает, в частности, полупроводниковые наночастицы (**квантовые точки**) идеальными элементами совершенных энергосберегающих лазерных и светоизлучающих элементов. А индивидуальные **углеродные нанотрубки** обладают прочностью, в десятки раз превышающей прочность лучшей стали, при этом они во много раз выигрывают у стали и по своей удельной массе. Все эти признаки вполне объясняют тот факт, что даже грамм наноматериала может быть более эффективен, чем тонна обычного вещества, и что их производство – вопрос не количества тонно-километров, а качества человеческой мысли.

Исключительные свойства наноматериалов обуславливают перспективы их широкого применения в технологии. Особое место занимают применения наноматериалов в быстро развивающихся областях цифровой электроники, телекоммуникациях, технологиях преобразования и сохранения энергии, здравоохранении. Например, «пространственно-упорядоченные массивы наночастиц» весьма перспективны для создания устройств высокоточной записи информации и оптоэлектронных приборов. Наночастицы диоксида титана (основного компонента обычных титановых белил) способны разлагать воду на водород и кислород под действием обычного солнечного света. Нанопористые вещества способны отсеять бактерии или эффективно поглотить примеси или токсины. Наночастицы можно использовать для направленной доставки и концентрирования биомолекул, лечения раковых опухолей, в **нанофармакологии** и **наномедицине**.

#### Литература:

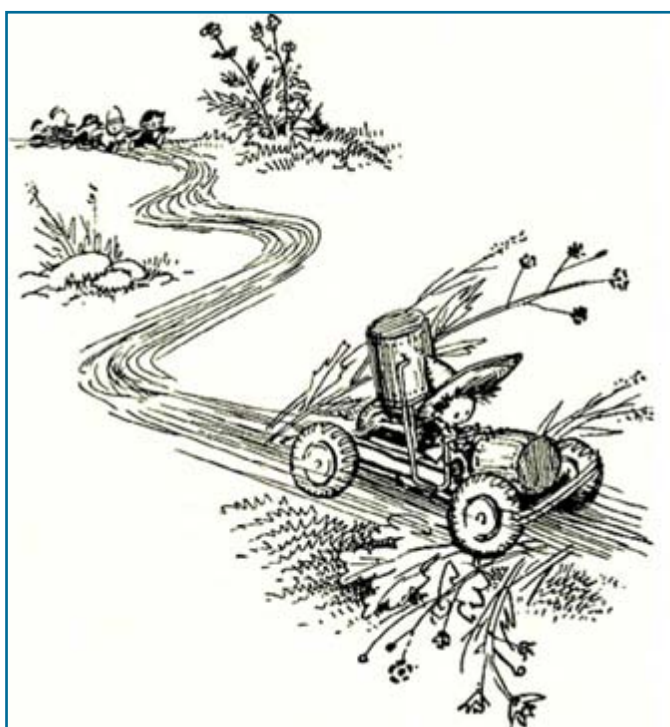
1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурированные материалы. М.: Академия, 2005. 192 с.
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.



## НАНОМАШИНЫ (Nanocars)

*Как мир меняется, и как я сам меняюсь –  
Лишь именем одним я называюсь.*

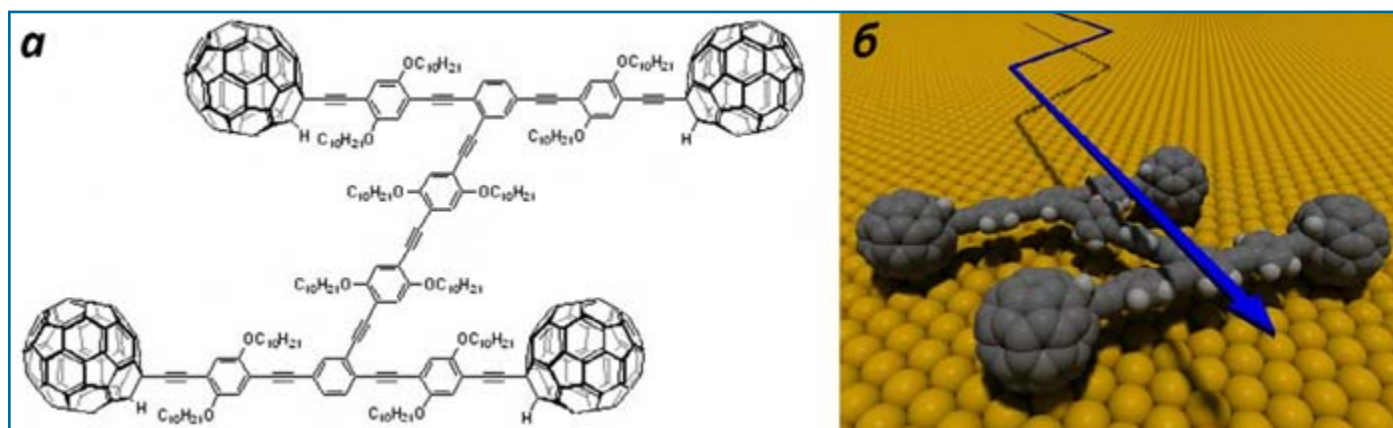
*М. Заболоцкий*



«Однажды Винтик и Шпунтик никому ничего не сказали, закрылись у себя в мастерской и стали что-то мастерить. Целый месяц они пилили, строгали, клепали, паяли и никому ничего не показывали, а когда месяц прошел, то оказалось, что они сделали автомобиль. Этот автомобиль работал на газированной воде с сиропом...» Так известный детский писатель Николай Носов описывал автомобиль Винтика и Шпунтика из сказки «Приключения Незнайки и его друзей». Еще недавно это было, пожалуй, самое маленькое четырехколесное средство передвижения, известное человечеству. Мог ли Н. Носов представить себе, что спустя полстолетия группа исследователей из американского университета

Райса (Rice University) под руководством профессора Джеймса Тура (James M. Tour) создаст автомобили, которые будут как минимум в 10 000 000 раз меньше машины Винтика и Шпунтика! Размер наноавтомобилей составляет всего 3–4 нанометра. Они настолько малы, что на площади размером всего  $1 \times 1$  мм можно устроить стоянку на 10 000 000 000 таких транспортных средств! В отличие от сказочного автомобиля Винтика и Шпунтика наномашины профессора Тура существуют на самом деле, передвигаются под действием температуры или света и не потребляют газированную воду с сиропом. Но если коротышки справились с созданием газированного автомобиля за месяц, то группа профессора Тура работала над проектом по созданию наномашин около десяти лет.

Работа по созданию наноавтомобиля, а точнее его составных частей – нанодвигателей, шестеренок, подшипников, переключателей и проч. (см. [Наноактюаторы](#) и [Наноэлектромеханические](#) системы) началась уже довольно давно. Однако в большинстве ранних работ речь шла об ансамблях органических молекул в растворе, за поведением которых ученые наблюдали спектроскопическими методами. Впрочем, в некоторых случаях исследуемые молекулы, такие как бензол, порфирины и др., удавалось перенести из раствора на твердую подложку и вручную подвигать по ней с помощью иглы сканирующего зондового микроскопа. В связи с этим огромным достижением группы из университета Райса стало создание наноавтомобиля, который действительно бы катился (не скользил, а именно ездил!)



**Рис. 1.** Химическая формула первого наноавтомобиля (а) и его графическое представление на поверхности золота (б)

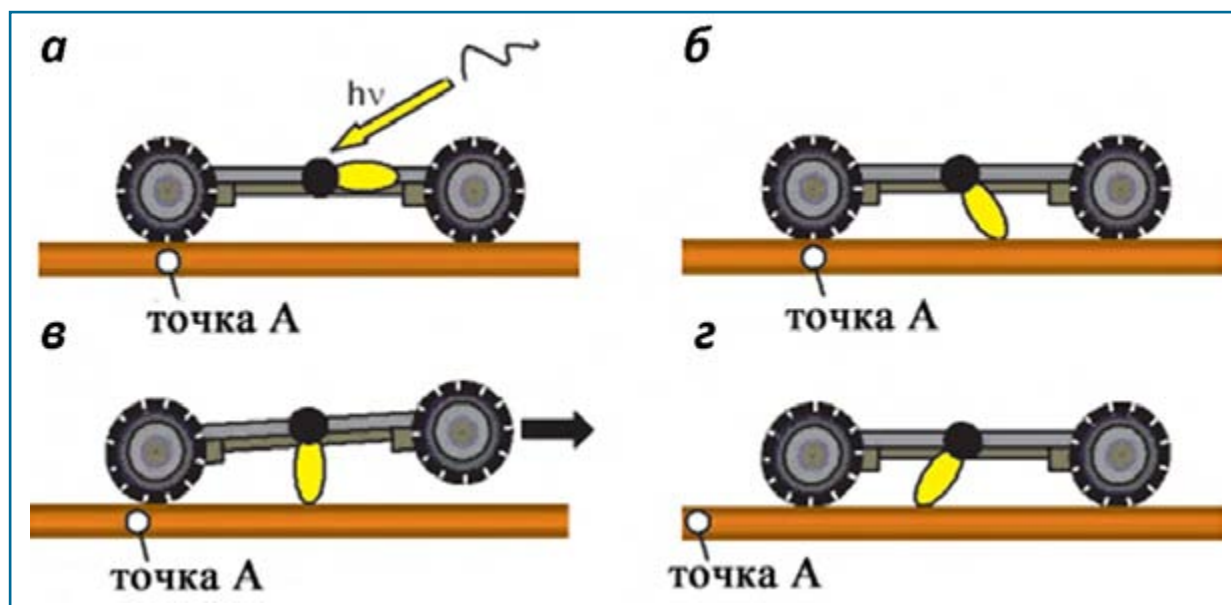
по поверхности так же, как катятся на колесах автомобиля.

Схема первого наноавтомобиля, способного ездить по поверхности золота, показана на рис. 1. Хорошо видно, что это большая органическая молекула, состоящая из почти 300 атомов трех видов – углерода, кислорода и водорода. В качестве колес использованы четыре молекулы **фуллерена**  $C_{60}$ , которые связаны химическими связями с каркасом машины. У первого наноавтомобиля именно уникальная сферическая формула молекул фуллерена позволила обеспечить настоящее вращение колес наноавтомобиля вокруг собственной оси.

Первоначально движение наномашин осуществлялось обычным нагреванием всей систе-

мы до 200 °С, что вызвало вращение фуллеренов на химических связях, соединяющих их с «рамой машины». От вращения четырех молекул наносистема пришла в движение и смогла катиться по плоской золотой поверхности. Однако таким автомобилем оказалось совсем нелегко управлять, на «автодроме» от нагрева ездил все машины, сталкиваясь и образуя «пробки». А ведь именно управление машиной необходимо при организации молекулярных конвейеров и транспортных линий, осуществляющих перемещение промежуточных продуктов на нанофабриках будущего.

Для решения этой проблемы ученые решили поставить на каждую машину «молекулярный мотор» – **наноактюатор**. Среди разнообразных конструкций молекулярных моторов выбор был



**Рис. 2.** Принцип работы молекулярного мотора

сделан в пользу модели, разработанной голландским инженером Беном Феринга (Ben L. Feringa). Принцип работы такого мотора изображен на рис. 2. Он представляет собой подвижную лопасть, установленную в центре рамы наноавтомобиля. Под действием излучения (использовался свет с длиной волны 365 нм) лопасть начинает вращаться и, отталкиваясь от золотой подложки, приводит наномашину в движение.

При установке молекулярного мотора возникли дополнительные сложности. В частности, выяснилось, что мотор Феринга не работает в присутствии фуллеренов. Поэтому колеса наноавтомобиля пришлось заменить на молекулы р-карборанов, содержащие атомы углерода, водорода и бора. В соответствии с этим конструкцию

рамы автомобиля также пришлось несколько видоизменить.

Эксперименты показали, что полученные таким образом наноавтомобили действительно могут ездить под действием света, что является огромным достижением нанотехнологии. Впрочем, созданные наномашинки все еще требуют усовершенствования. В частности, «лопастной нанодвигатель» может вращаться только в одну сторону, поэтому пока наномашинки умеют ездить только вперед.

В 2006 г. профессор Тур был назван «Исследователем года» по версии авторитетного издания *Small Times Magazine*, поскольку до этого момента никому не удавалось создать движущуюся наносистему такой сложности.

#### Литература:

1. Shirai Y., Osgood A.J., Zhao Y., Kelly K.F., Tour J.M. Directional control in thermally driven single-molecule nanocars. *Nano Letters*. 2005. Vol. 5(11). P. 2330–2334.
2. Morin J.F., Shirai Y., Tour J.M. En route to a motorized nanocar // *Organic Letters*. 2006. Vol. 8(8). P. 1713–1716.

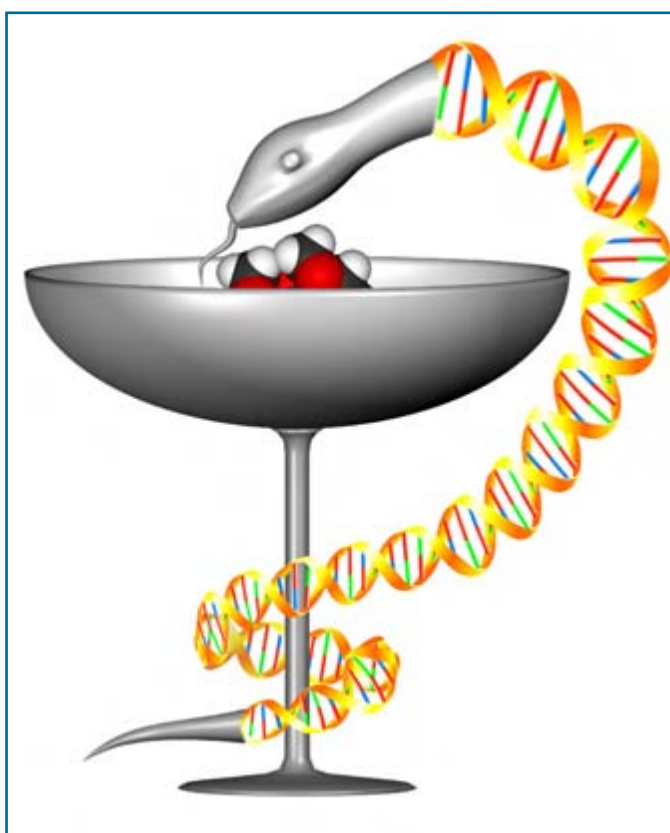


## НАНОМЕДИЦИНА (Nanomedicine)

*«Medicina fructosior ars nulla»*

*«Нет искусства более полезного, чем медицина»*

*Латинское выражение*



Всем известно, что традиционная медицина включает в себя профилактику, диагностику и лечение заболеваний. Однако не каждый задумывается о том, что человеческое тело, как и любой объект природы, представляет собой сложно организованную систему. В качестве «строительных блоков» всего организма можно выделить клетки размером от 5 до 20 мкм, а если смотреть еще глубже, то и отдельные молекулы. Все протекающие в организме процессы происходят на клеточном уровне, и их знание позволяет излечить многие, если не все, заболевания

с помощью соответствующих лекарств. Однако прежде чем достигнуть своей цели, любое лекарство проходит в человеческом организме долгий путь, значительно снижающий направленность и быстроту его воздействия. Поскольку в конечном итоге объектами медицины являются клетки, то и инструменты для эффективной работы с ними должны, в идеале, иметь соответствующие размеры, а это и есть масштабы, на которых работают **нанотехнологии**.

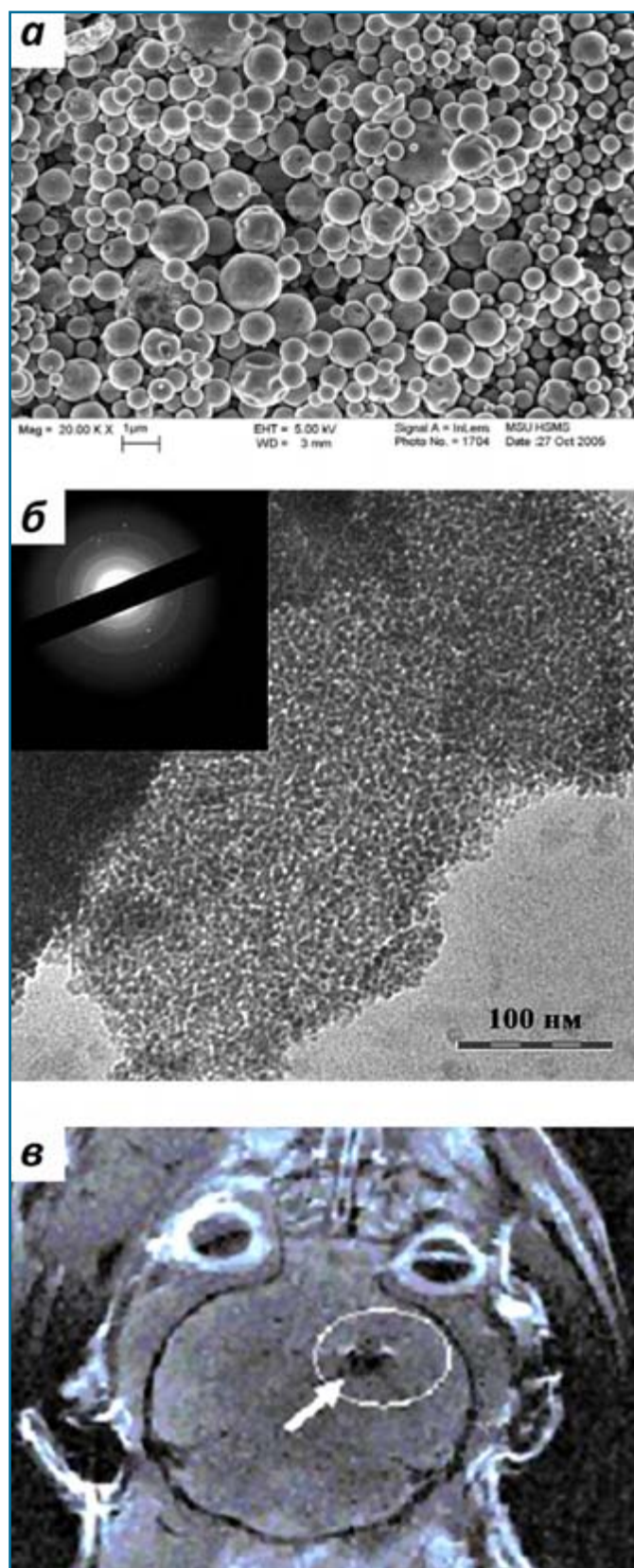
Именно поэтому в настоящий момент постепенно происходит интеграция современной медицины и нанотехнологии, что приводит к рождению новой области знаний и практических навыков – наномедицины. Последнюю можно определить как комплекс подходов, обеспечивающих применение нанотехнологических разработок в практической медицине и здравоохранении путем наблюдения и манипулирования биологическими системами на молекулярном уровне.

Современное развитие **бионанотехнологий** уже позволяет конструировать некоторые работоспособные медицинские наносистемы. Например, устройства, действие которых основано на методе полимеразной цепной реакции (так называемые «лаборатории на чипе»), позволяющие осуществлять экспрессный комплексный анализ крови, и, в частности, определять уровень глюкозы у диабетических больных. На основе наночастиц разрабатываются разнообразные бактерицидные и противовирусные препараты, способные залечивать раны, «умные» наносисте-

мы, препараты пролонгированного действия. Но все-таки основные достижения наномедицины XXI века, несомненно, будут связаны с возможностью осуществлять специфическую доставку нанолекарств непосредственно в клетки, разработкой которой занимается такая область медицины как **нанофармакология**.

Перед наночастицами-лекарями стоит несколько последовательных задач: найти в организме клетки-мишени, доставить к ним лекарство, проникнуть внутрь клетки и выгрузить содержимое, распасться на части и покинуть организм. Исходя из поставленных задач вырисовывается качественный «портрет» наноагентов: им необходимо иметь рецепторы для направленного движения к цели, обладать способностью проходить через клеточные мембраны, высвобождать содержимое точно в нужное время и в нужном месте и, наконец, быть нетоксичными. Мишени, на которые направлены наночастицы, это, к примеру, раковые клетки или клетки, зараженные вирусом, атеросклеротические бляшки и поврежденные органы и ткани.

Высокий уровень онкологических заболеваний остается одной из самых серьезных проблем нашего времени. К сожалению, до сих пор не найдено лекарства, способного эффективно «лечить» раковые клетки, поэтому все способы борьбы связаны с обнаружением и хирургическим удалением опухоли и метастаз в сочетании с химиотерапией или воздействием убивающих клетки излучений. Все эти меры чрезвычайно вредны даже для здорового организма и применяются только потому, что обычно раковые клетки гибнут при таких воздействиях быстрее, чем здоровые. Альтернативой хирургическим методам в будущем может стать метод внутритканевой гипертермии (рис. 1). В этом методе наночастицы «находят» в человеческом организме раковые клетки, концентрируются в них и убивают их за счет разогрева безопасными дозами магнитного или (гораздо реже) микроволнового поля выше температуры 42 °С, при которой начинается происходить денатурация белков. В настоящее время исследуется возможность использования в каче-



**Рис. 1.** Магнитные наночастицы внутри водорастворимых солевых капсул: а – внешний вид капсул, сканирующая электронная микроскопия, б – наночастицы после растворения в воде, просвечивающая электронная микроскопия, в – наночастицы в мозговой ткани мыши, магнитно-резонансная томография (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)



Нанолekarь будущего, блуждающий по кровеносной системе организма (художник Coneyl Jay)

стве таких систем биосовместимых магнитных наночастиц оксидов железа ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в оболочке золота), металлов ( $\text{Fe/Pt}$ ,  $\text{Fe/Co}$ ,  $\text{Au}$ ). Основные вопросы, на которые надо ответить исследователям – как добиться высокой степени концентрации наночастиц в опухоли (например, с помощью антител) и как снизить побочное воздействие перегрева на здоровые ткани и органы.

Наномедицина – это медицина будущего. Несмотря на стремительное развитие нанотехнологий в последнее десятилетие, пока еще не созданы умные нанороботы – ассемблеры, которые смогут, двигаясь по кровеносной или лимфатической системам человеческого организма, преодолевать все препятствия, находить больные клетки, осуществлять их диагностику и лечение наподобие команды лучших врачей, а потом покидать организм, не нанося ему никакого вреда. Однако теоретических препятствий для появления таких роботов нет, это только вопрос времени.

#### Литература:

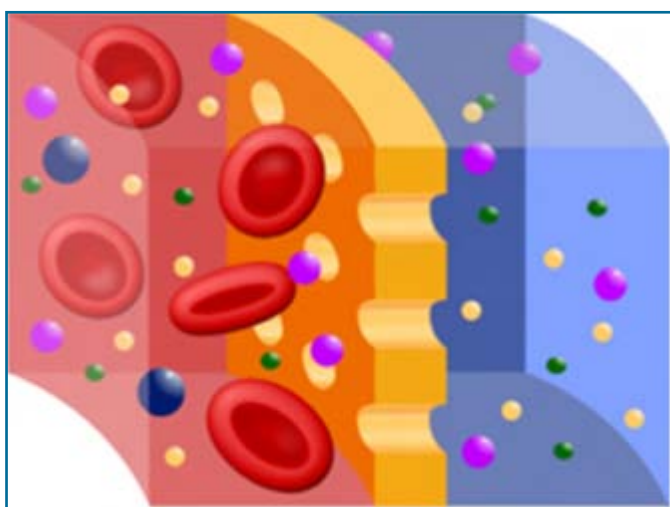
1. Could P. Materialstoday. February 2004, P. 36–43.
2. Hans M.L., Lowman A.M. Nanoparticles for drug delivery // Nanomaterials Handbook by Yury Gogotsi CRC publ., chapter 23. P. 637–664.



## НАНОМЕМБРАНЫ (Nanomembranes)

*«Всякий раз мы смотрим на вещи не только с другой стороны, но и другими глазами – поэтому и считаем, что они переменялись».*

*Блез Паскаль*



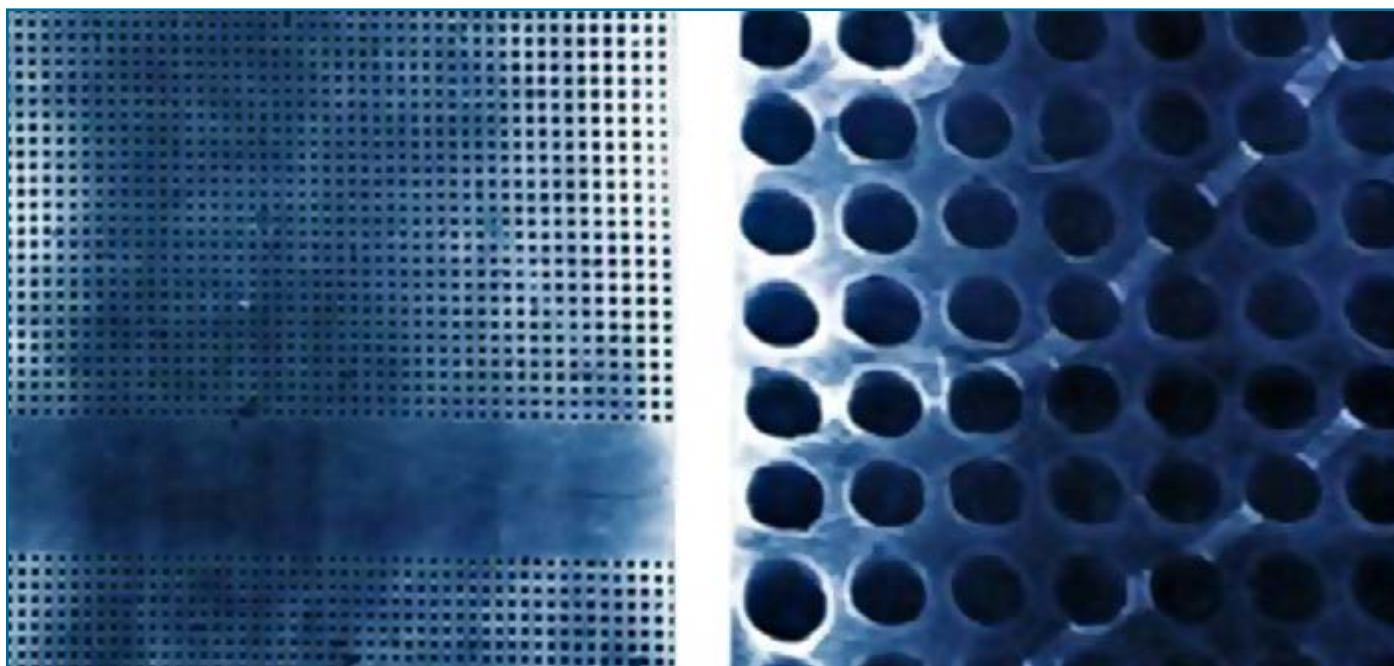
Под мембраной обычно подразумевают тонкую перегородку, разделяющую две среды и выполняющую определенную функцию. Наиболее известны мембраны, имеющие пористую структуру и способные пропускать одни вещества, задерживая другие. Это так называемое свойство полупроницаемости или селективной проницаемости. Впервые это свойство было обнаружено у обычного бычьего пузыря еще в XVI веке. Он способен пропускать молекулы воды, но оказывается непреодолимой преградой для растворенных в воде солей. Если взять стеклянную трубку, дно которой закрыто перегородкой из бычьего пузыря, заполнить ее концентрированным раствором соли и опустить нижним концом в стакан с водой, наблюдается очень интересный эффект: вода из стакана через мембрану проникает в трубку, так что столбик раствора в трубке поднимается высоко над уровнем воды в стакане – это явление носит название «осмоса». Оказывает-

ся, что и каждая клетка живого организма имеет оболочку, обладающую свойством избирательного пропускания веществ, поэтому ее называют клеточной мембраной.

Искусственные мембраны могут быть симметричными однослойными, пронизанными системой соединяющихся однородных пор, и асимметричными двух- или многослойными, представляющими собой крупнопористую высокопроницаемую подложку-перегородку, на которую нанесен тонкий мелкопористый слой (или несколько таких слоев). Мембраны изготавливают из стекла, металла, керамики, полимеров в виде пленок, пластин, трубок и полых нитей.

Отдельную группу составляют ионообменные мембраны. В их структуре содержатся прочно связанные анионные или катионные группы, а соответствующие небольшие по размеру противоионы могут свободно перемещаться сквозь мембрану. Такая перегородка селективно пропускает либо катионы, либо анионы (причем определенного типа) и, соответственно, проводит электрический ток. Ионообменные мембраны применяются в химических источниках тока и в электролизе – чтобы разделить продукты реакции. Например, при электролизе водного раствора поваренной соли с одной стороны мембраны образуется раствор щелочи, а с другой – выделяется хлор.

Наномембранами называют мембраны, которые содержат поры диаметром в доли микрона и менее. В частности, материалы, в которых размер пор строго контролируем и составляет от 2 до 50



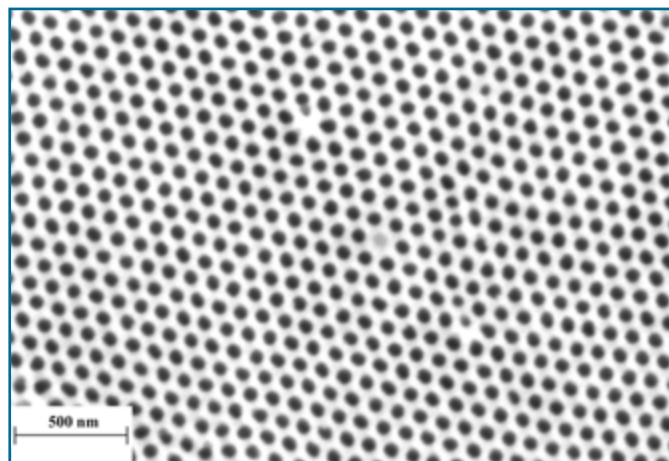
**Рис. 1.** Трековая лавсановая наномембрана с регулярной системой пор диаметром 300 нм. Увеличение 2000х (слева) и 20 000х (справа)

нм, называются *мезопористыми молекулярными ситами*. Мелкие поры способны задерживать очень малые твердые частицы, а также микробы, вирусы, отдельные клетки и даже молекулы. В настоящее время наномембраны эффективно используют для глубокой очистки воздуха и газов, питьевой воды и других жидкостей от твердых частиц и микроорганизмов. Особое применение наномембраны находят в медицине. С помощью них можно выделять вирусы и белки, проводить гемодиализ – разделять компоненты крови, стерилизовать растворы (путем отфильтровывания микроорганизмов), выполнять микробиологический анализ воды. Интересное потенциальное применение связано с биоимплантатами. Клеточную структуру имплантата можно изолировать от остального организма замкнутой наномембраной. Тогда обмен между имплантатом и организмом необходимыми веществами будет осуществляться через нанопоры, а антитела, разрушающие инородные клетки, не смогут проникнуть через мембранный барьер.

Современный способ получения высокоэффективных наномембран – облучение сплошных полимерных пленок ускоренными тяжелыми ионами или продуктами распада радиоактивных элементов. Это так называемые трековые нано-

мембраны (рис. 1). Высокоэнергетические частицы, пролетая через слой полимера, оставляют треки – сквозные каналы диаметром около 10 нм, заполненные продуктами разрушения (деполимеризации) материала. В результате последующей обработки растворителем (процесс травления) на месте каналов образуются поры, диаметр которых можно регулировать в широком интервале от 30 до 1000 нм.

Существует много других методов получения наномембран. Мембраны на основе оксида алюминия с упорядоченными нанопорами создают



**Рис. 2.** Анодированный алюминий – мембрана на основе оксида алюминия с высокоупорядоченными нанопорами (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

анодным окислением поверхности алюминиевой пластины (рис. 2). Нанопоры в пленке кремния образуются в результате кратковременной термической обработки сплошного слоя аморфного кремния. Наномембраны также формируют путем полимеризации органического соединения из раствора или в присутствии поверхностно-активного вещества. В результате ассоциации

молекул последнего образуются цилиндрические каналы диаметром в несколько нанометров, пронизывающие насквозь полученную пленку. Ионообменные мембраны получают из ионообменных полимеров (смол), а также из некоторых неорганических соединений, обладающих ионной проводимостью (диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, оксид висмута и др.).

#### Л и т е р а т у р а :

1. Трековые мембраны нового поколения. В мире науки. 2005. № 12. С. 35. (<http://www.sciam.ru/2005/12/Sciencerf1.shtml>).
2. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 1999. 514 с.



## НАНОМЕТР (Nanometer)

«А в попугаях-то я гораздо длиннее!»

Г. Остер.

«38 попугаев»



Нанометр (сокращенно нм) – это одна миллиардная часть метра. Приставка «нано» пришла к нам из древней Греции, в переводе на русский язык она означает гном или карлик. В латыни «нано» имеет значение маленький, крошечный. Один нанометр – это очень маленькая величина, и увидеть невооруженным глазом объекты такого размера невозможно. Для сравнения заметим, что волосы человека растут со скоростью 10 нм в секунду (и мы этого не замечаем!), а толщина одного волоска составляет  $\sim 10^4$  нм.

Наноразмерный масштаб используют для характеристики самых маленьких объектов, например, атомов и молекул. Размер атома кремния составляет 0,24 нм, а молекулы *фуллерена* C60

(«футбольного мяча», состоящего из шестидесяти атомов углерода) – 0,75 нм. К представителям наномира также можно отнести *нанокластеры*, способные содержать до нескольких сотен атомов, и различного рода *наноструктуры*, размер которых хотя бы в одном из измерений не превышает нескольких десятков нанометров.

Мир наноструктур чрезвычайно интересен, ведь они имеют физические свойства, которые

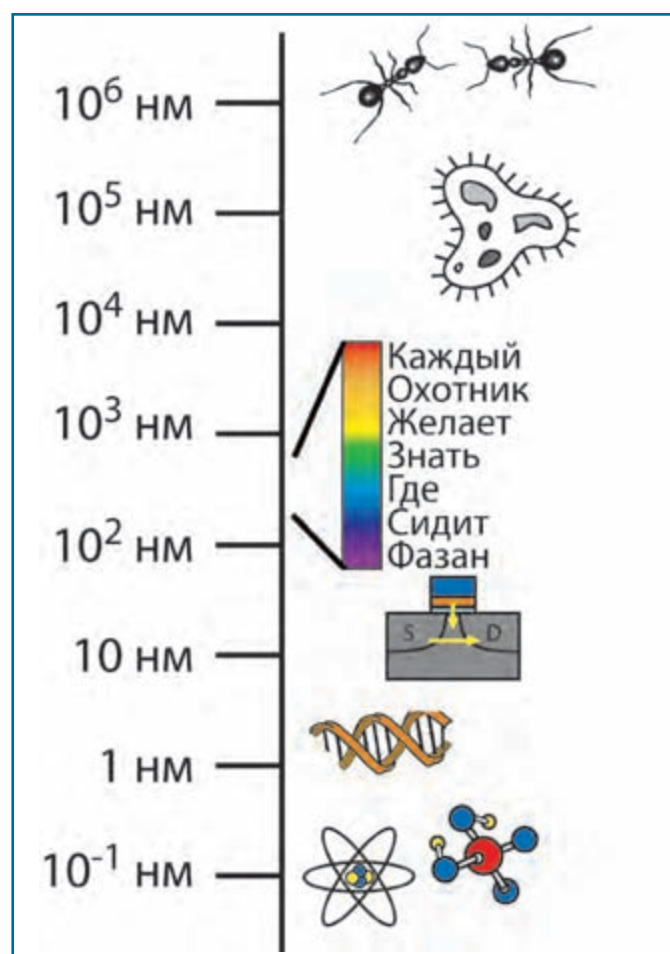


Рис. 1. Шкала размеров



Рис. 2. Журнал «Нанометр», выпускаемый ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова

существенно отличаются от свойств объемных материалов.

Нанометры являются привычными единицами для описания длины волн света. Например, видимый свет имеет длины волн в диапазоне от 400 до 700 нм.

В нанометрах измеряют также размеры микроорганизмов, клеток и их частей, биомолекул. Вот лишь некоторые примеры (рис. 1):

- диаметр спирали ДНК человека – 2 нм;
- длина одного витка ДНК – 3,4 нм;
- молекула гемоглобина – 6,4 нм;

- пиконановирусы – 20 нм;
- молекула гемоцианина – 50 нм;
- бактерии *Mycoplasma mycoides* 100–250 нм;
- мимовирусы – 500 нм;
- эритроциты человека – 8000 нм.

Название «Нанометр» носит и ежемесячный бюллетень факультета наук о материалах МГУ (его можно найти на сайте факультета наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова [www.fnm.msu.ru](http://www.fnm.msu.ru)) и информационный сайт [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru), посвященный нанотехнологиям.

### Литература:

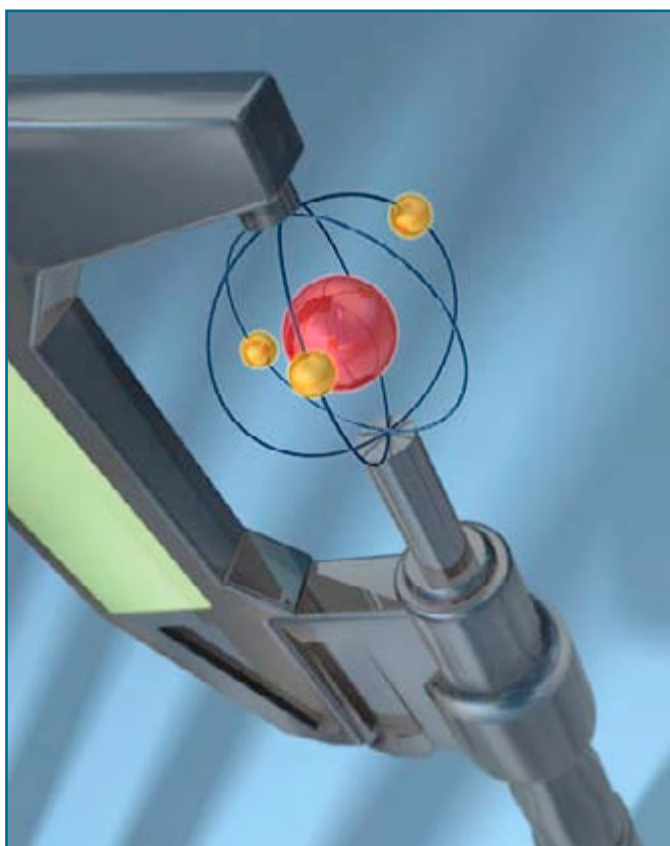
1. Пул Ч., Оуэнс М. Нанотехнологии. М.: Техносфера (серия «Мир материалов и технологий»), 2006. 336 с.
2. Суздаев И.П. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига (серия «Синергетика: от прошлого к будущему»), 2006. 592 с.

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ

### (Nanometrology)

---

«Мерка дело красит».  
Поговорка



Любой человек в повседневной жизни встречается с необходимостью измерения – чтобы приготовить вкусный обед, нужно смешать ингредиенты строго по рецепту, а чтобы расплатиться за потраченную электроэнергию или объем скопированной информации, нужно правильно определить их количество. Любая покупка в магазине, например, одежды подразумевает, что вы знаете ее размер, мяса – его массу, сока – его объем и платите вы соответственно. Часто человек даже не задумывается, что все эти измерения производятся с помощью устройств, которые созданы трудом ученых, занимающихся метро-

логией. Итак, метрология (от греч. *métron* – мера и *lógos* – учение) – это наука о том, с помощью каких методов и какими средствами надо проводить различные измерения, чтобы обеспечить их единство и добиться требуемой точности.

С древних времен человечество пытается принять однозначную систему **единиц измерения** – этим вопросом занимались правители и ученые в Древнем Китае, Греции, Персии, Риме, Англии, феодальной Европе и на Руси. В то время эталоны единиц измерения были нехитрые – размеры частей тела королей, любимых музыкальных инструментов императоров и пр. Развитие науки, торговли и мореплавания требовало постоянных пересчетов одних мер в другие – только в Европе в XVII в. использовалось около 100 различных фунтов и 50 различных миль. Привести к порядку единицы измерения первыми решились французы. В 1791 году Национальное собрание Франции приняло решение повсеместно перейти на метрическую систему, базирующуюся на метре и грамме, причем метр определили как одну десятиmillionную долю участка земного меридиана от Северного полюса до экватора. С помощью имеющихся на тот момент астрономических и механических приспособлений первый эталон метра («метр архива») был изготовлен французским мастером Ленуаром в виде платиновой линейки шириной около 25 мм, толщиной около 4 мм. В 1872 г. Международная метрическая комиссия решила отказаться от «естественного» (привязанного к длине меридиана) эталона длины и приняла «метр архива» в качестве исходной меры длины. По нему изготовили и распространили между странами 31 эталон в виде бруса специальной формы из сплава Pt (90%)–Ir (10%). Долгое время эти эталоны обеспечивали опреде-



ление метра с ошибкой  $\sim 0,2$  мкм и удовлетворяли нуждам науки и техники. Новое определение метра приняли лишь в 1960 г., приравняв его к  $1\,650\,763,73$  длины волны излучения атома криптона в вакууме. Старые, «архивные метры» стали экспонатами музеев, а новое определение метра позволило уменьшить ошибку при измерении метра с  $0,2$  мкм до  $30$  нм.

В России международные стандарты начал внедрять Д.И. Менделеев, который в 1893 году основал и возглавил Главную палату мер и весов, в дальнейшем преобразованную во Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии и стандартизации его имени (ВНИИМС). Этим институтом разрабатываются специальные документы – ГОСТы, призванные регламентировать все методики измерения, технологии производства и свойства измерительных инструментов. С 1960 года в России было принято решение о создании ГОСТов только в соответствии с системой СИ, в которой основными единицами измерения являются метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела и моль. Однако в повседневной жизни оказывается удобнее производить измерения в несистемных единицах – объем измерять в литрах, а не кубических метрах, а температуру в градусах Цельсия, а не Кельвина.

А вы знаете, что с метрологическими инструментами мы регулярно сталкиваемся в повседневной жизни – это линейки, угольники, весы, электро-, тепло- и газовые счетчики? Полезно знать, что обычные весы в магазине могут измерять вес с точностью до  $5$  г, если масса продукта превышает  $100$  г. Поэтому нельзя взвешивать на весах продукты меньшей массы, а чтобы измеренная масса совпадала с показанием «контрольных весов», надо все весы устанавливать согласно определенным правилам.

Каждой единице измерения соответствует свой эталон, для каждого случая создается свой измерительный элемент – согласитесь, никому и в голову не придет измерять ткань в магазине микрометром – для этого подойдет деревянная метровая линейка с точностью в  $1$  см, а вот для измерения диаметра подшипника придется воспользоваться специальным инструментом – штангенциркулем с ценой деления  $0,05$  мм. А как

же быть, если нужно определить размеры, скажем, «углеродной нанотрубки», длина которой несколько микрон, а толщина не превышает десятка нанометров? Ее «увидеть» не просто, не то что измерить – линейкой тут не обойдешься. Так в метрологии появился новый раздел, который получил название нанометрологии, изучающий способы измерения параметров объектов, линейные размеры которых лежат в интервале  $0,1$ – $100$  нм. Кстати, 1997 г. Консультативный комитет по длине рекомендовал принять за новый эталон измерения длины длину волны излучения стабилизированного He–Ne/J<sub>2</sub> лазера  $\lambda = 632,99139822$  нм. Такой эталон позволяет определить метр с ошибкой, не превышающей  $0,02$  нм, т.е. с точностью до одного атомного слоя.

Однако механически изготовленные приборы не позволяют измерять длину наноотрезков. Это делают с помощью сложных приборов – электронных и атомно-силовых микроскопов, однако для их применения нужно провести калибровку, то есть создать специальные «нанолинейки». Создавать «нанолинейки» с использованием интерферометров начали в начале 90-х годов прошлого века. Современный интерферометр позволяет измерять перемещение тел с точностью до долей диаметра атома, это достигается детектированием изменения картин интерференции 3-х световых потоков от одного источника лазерного излучения. Пожалуй, наибольшего успеха в области создания «нанолинеек» добились исследователи Массачусетского технологического института, которые методом растровой интерференционной литографии на пластине с фоторезитом диаметром  $300$  мм нанесли периодические насечки, создав таким образом своеобразную линейку с ошибкой измерения длины в  $1,1$  нм. Не отстает от мирового прогресса и Россия, где производятся аналогичные «линейки» для измерения длин наноотрезков с ошибкой от  $0,5$  до  $3$  нм. Поддалась измерению и масса наночастиц: с развитием масс-спектропии оказалось возможным зарегистрировать массы отдельных нанокластеров и макромолекул. На сегодня уже разработаны ГОСТы и технические условия, которым должны соответствовать коммерческие наноматериалы.

### Литература:

1. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 1–2. С. 61–69.

## НАНОМОДИФИКАТОРЫ (Nanomodifiers)

«Внешность обманчива».

*Крылатое выражение*

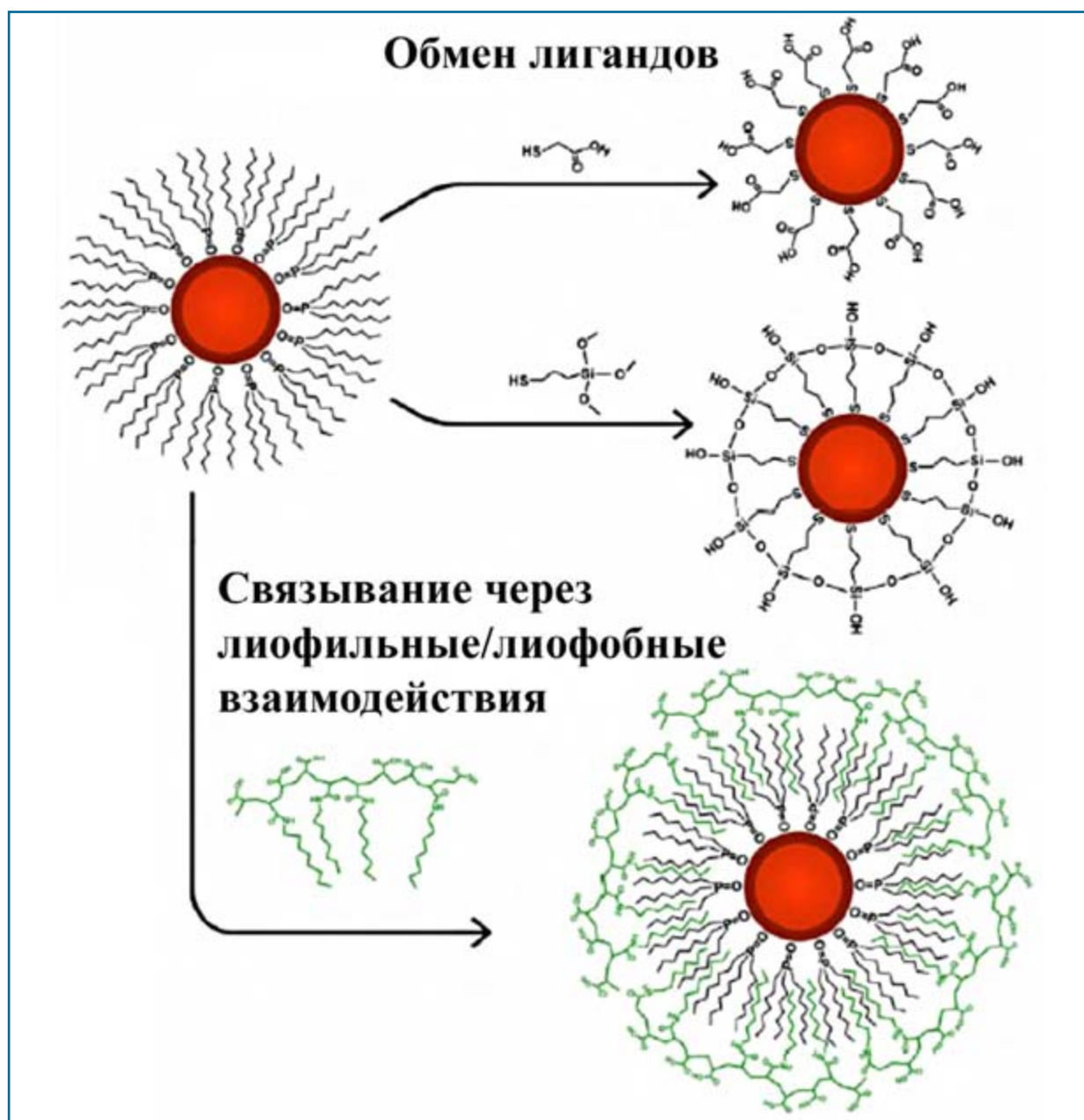


Все Вы, наверное, читали книги или смотрели фильмы про шпионов, про то, как они надевают форму противника и гримируются, выходя на задание. А возможно, и Вам самим приходилось подстраиваться под те или иные обстоятельства. Мимикрия присуща не только людям – многие животные используют собственную окраску, ста-

раясь выглядеть незаметно на фоне ландшафта, чтобы подкрасться поближе к жертве и внезапно напасть, или же, наоборот, спрятаться от хищника и стать незаметным во враждебной среде. Вспомните хотя бы хамелеона, изменяющего свой цвет во время охоты, рыб, практически незаметных на фоне камней, богомола, изображающего из себя веточку.

Однако среда может быть враждебной не только в осязаемом мире, но и на наноуровне. Любая частица, попавшая в живой организм, (например, в кровоток или межтканевые жидкости) может быть немедленно атакована клетками-стражами, распознающими опасность, – лимфо- и фагоцитами. Но как же тогда ввести лекарство и тем более доставить его к цели так, чтобы оно осталось незамеченным и, тем самым, неиспорченным защитными системами организма? Тем более, что большинство лекарственных препаратов воспринимаются организмом не иначе, как враждебные тела. Часто для достижения сохранности лекарства применяют **нанокансулы** – специальные «резервуары», в которых лекарство содержится в емкости, покрытой защитной оболочкой. Однако, возможен и другой подход – каждую частицу можно непосредственно покрыть биосовместимыми молекулами, например, полисахаридами или пептидами, так, чтобы мимикрировать поверхность своеобразным маскхалатом, который будет сигнализировать организму: «я – свой!».

Особенно остро проблема модификации поверхности стоит для применения различных типов магнитных и полупроводниковых **наноструктур** в **наномедицине**. В первую очередь это связано с особенностями синтеза таких наноструктур: для предотвращения агрегации на-



**Рис. 1.** Методы модификации поверхности наночастиц

наночастицы покрывают оболочкой **поверхностно-активного вещества**, причем на внешней поверхности частицы остаются гидрофобные углеводородные цепи ПАВ, торчащие наружу. Такие частицы не растворимы в воде и других полярных растворителях без дополнительной поверхностной модификации.

Поверхностную модификацию наночастиц и называют наномодификацией, а соответствующие агенты, биологические полимеры или поверхностно-активные вещества – наномодификаторами. Все методы, применяемые для наномодификации поверхности частиц, можно разделить на две большие группы (рис. 1):

1. Замену молекул ПАВ, сорбированных на поверхности частиц и имеющих гидрофобную и гидрофильную части, на бифункциональные молекулы;

2. «Обволакивание» частиц дополнительным слоем **амфифильных веществ**, связанным с первичным слоем ПАВ посредством Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий между лиофильными (лиофобными) частями молекул. Таким образом, получаемые наночастицы гидрофилизируются за счет полярных (аминных, гидроксильных, карбоксильных) функциональных групп на внешней поверхности дополнительного слоя ПАВ.



Процедуру наномодификации приходится проводить в любой ситуации, когда необходимо изменить сродство поверхности частицы к молекулам растворителя, то есть для перевода гидрофобных частиц в водные растворы или растворения гидрофильных частиц в органических растворителях. При этом обычно предпочтение отдают второму методу, поскольку получаемые частицы оказываются более стабильны, чем те, у которых «родная» оболочка была заменена. Затем возможна дальнейшая функционализация наночастиц, например, с помощью присоединения к поверхностным группам биомолекул – полисахаридов, ферментов или белков. Так, «одевая» наночастицы в «шубы» из органических, биосовместимых молекул и «пришивая» к шубам антитела, селективные к определенным типам клеток, ученые разрабатывают *нанолекарства* для целе-

вой доставки в пораженные органы и лечения на клеточном уровне.

Спектр практического использования приемов наномодификации поверхностей не ограничивается разработкой «нанолекаств». Модифицированные материалы используют в качестве биоматериалов (имплантатов, покрытий медицинских зондов), химических сенсоров и биосенсоров, носителей ферментов, защитных (в том числе и антикоррозионных) и самоочищающихся покрытий, катализаторов и т.д. При этом под защитной оболочкой из полимера может скрываться металлический нанопровод (см. *Нановолокна*), а под мягкой гидрофильной оболочкой *амфифильного вещества* – сверхпрочный наноалмаз, сильный наноманит или люминесцирующее стекло. Вот уж, действительно, внешность – обманчива!

#### Литература:

1. Bailey R.E., Smith A.M., Nie S. Physica E. 2004. Vol. 25. P. 1–12.
2. Neuberger T., Schoepf B., Hofmann H., Hofmann M., Rechenberg B. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. Vol. 293. P. 483–496.

## НАНОНИТИ/ВИСКЕРЫ (Nanowires/Whiskers)

*«Когти кошкины остры.  
Выдвигаются мгновенно—  
Только ноги уноси!..  
А на морде, как антенны,  
Установлены усы.»*

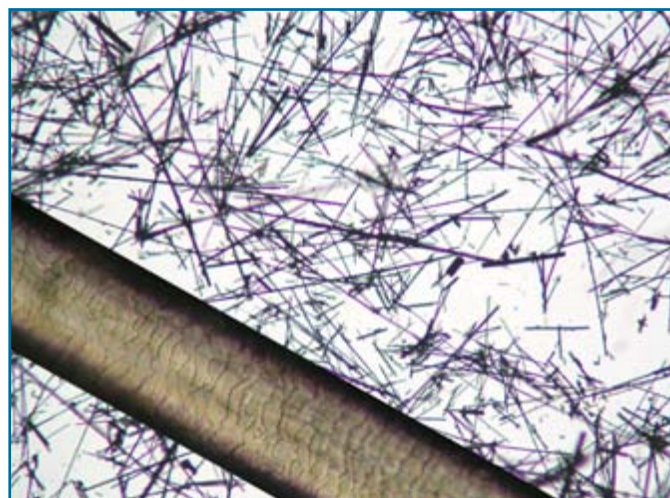
*Владимир Приходько*



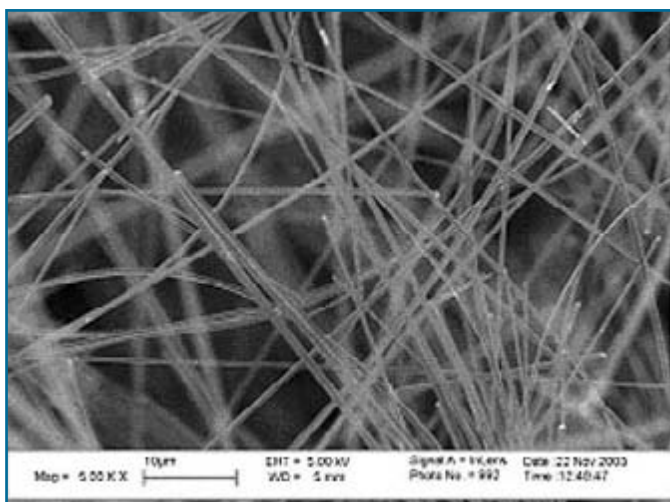
«Тоньше, чем волос!» – в обычной жизни эти слова можно услышать о чем-то очень тонком. Но в мире наноматериалов человеческий волос является просто гигантским объектом (рис. 1)! В наном мире есть свои «волосы», а точнее нанонити или вискеры (от англ. слова whisker – ус, волос) – нитевидные кристаллы с диаметром от нескольких нанометров до нескольких микрон и отношением длины к диаметру  $> 1000$ . Для получения таких сильно анизотропных структур разработано много методов, включая **темплатный синтез**, электроспиннинг, литографию и методы кристаллизации. Вискеры характеризуются малым содержанием микроструктурных дефектов, поэтому они обладают рекордно высокой плотностью и их часто используют в качестве упрочняющих волокон. Например, вискеры SiC оказались незаменимы для создания конструкционных композитных материалов с улучшенными механиче-

скими свойствами. Нанонити обладают большой площадью поверхности; кроме того, войлок, состоящий из переплетенных между собой нанонитей (рис. 2), представляет собой уникальный «пушистый» материал, не требующий носителя. Поэтому вискеры перспективны для использования в качестве катализаторов, сорбентов и фильтров. Большинство удивительных применений вискеро в основано на их уникальной прочности, гибкости и большой площади поверхности, что в свою очередь является следствием их сильной анизотропии и малого диаметра. «Тоньше, чем вискер!» – вот здесь действительно речь идет о чем-то чрезвычайно тонком!

Одним из наиболее захватывающих процессов образования вискеро в и нанонитей является их рост по механизму «пар – жидкость – кристалл» (ПЖК) (рис. 2), который был предложен

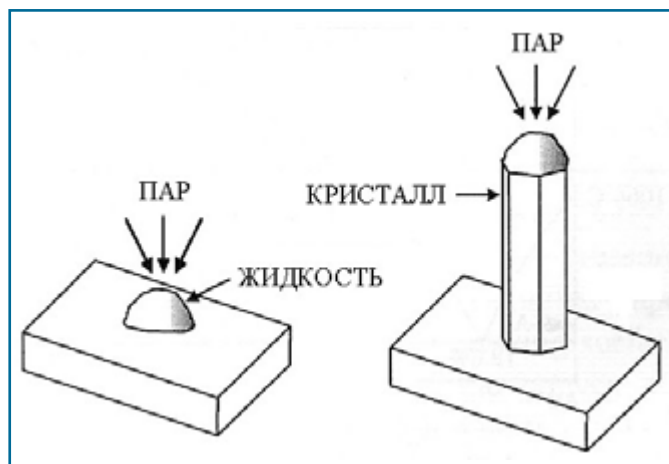


**Рис. 1.** Изображение человеческого волоса и вискеро в фазы  $Ba_6Mn_{24}O_{48}$ , полученное на оптическом микроскопе (увеличение 200х) (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)



**Рис. 2.** Изображение вискеро́в фазы  $\text{Ba}_6\text{Mn}_{24}\text{O}_{48}$ , полученное на сканирующем электронном микроскопе (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

в 1964 году Р. Вагнером для объяснения экспериментальных данных, полученных при росте вискеро́в кремния. При этом в систему намеренно вводят иницирующее вещество (иногда его называют катализатором, хотя это не совсем верно), которое способствует росту кристалла в одном направлении, ограничивая его в других, что придает кристаллу определенную ориентацию. Во время роста это вещество образует жидкую фазу в виде мельчайших капель. Сначала частицы растущего вещества испаряются, затем диффундируют и растворяются в капле жидкой фазы. При насыщении ростовые частицы в капле жидко-



**Рис. 3.** Схематическое представление основных этапов роста кристаллов по механизму «пар – жидкость – кристалл»: а – начальное зародышеобразование, б – продолжающийся рост

сти осаждаются на границе между подложкой и жидкостью. После осаждения происходит зародышеобразование и впоследствии начинается рост кристалла. Дальнейшее осаждение и рост приведут к разделению подложки и капли жидкой фазы таким образом, что капля окажется на вершине растущего кристалла, что в результате приводит к росту вискеро́в.

Аналогичный механизм роста справедлив и для процессов получения углеродных и неуглеродных «нанотрубок», только вместо капли роль инициатора играют наночастицы металла.

### Л и т е р а т у р а :

1. Гиваргизов Е.И. Кристаллические вискеры и наноострия // Природа. 2003. № 11.



## НАНООБРАЗОВАНИЕ (Nanoeducation)

*«Образование – великое творение человеческое, одно из немногих, что дают людям равные возможности ... Оно не просто обезоруживает ненависть бедного к богатому, оно делает большее – предотвращает саму бедность...».*

*Хорас Манн (основатель системы public schools в США). Из доклада Совету по образованию Массачусетса (1884 г.)*



Герои мультфильма, Нана и Ноно, помогают детям познакомиться с терминологией и основными понятиями нанонауки (продукт создан при поддержке Министерства образования Тайваня)

Образование в области наноматериалов и нанотехнологий, или «нанообразование» – неотъемлемая сторона познания наномира, альфа и омега междисциплинарности этих наук, мощное средство расширить объемы исследований за счет привлечения в нанонауку новых и новых адептов. По прогнозам в ближайшие 10–15 лет для обеспечения работ в области нанотехнологий потребуется не менее 7 миллионов новых исследователей и инженеров в дополнение к тем,

которые выпускаются ежегодно существующей системой образования. В ответ на этот вызов в 50 странах мира развернуты национальные программы в области подготовки специалистов для nanoиндустрии. Наиболее значимой является



**Рис. 1.** Нанотрейлер, школа на колесах, ожидает больших и маленьких гостей, равнодушных к наномиру (из флайера портала [www.nanotruck.net](http://www.nanotruck.net), проект Федерального министерства образования и науки Германии, BMBF)

Национальная нанотехнологическая инициатива в США ([www.nano.gov](http://www.nano.gov)). План действий в области нанотехнологий ЕЭС смотрите на сайте [www.cordis.lu/nanotechnology/actionplan.htm](http://www.cordis.lu/nanotechnology/actionplan.htm).

В рамках подобных инициатив словно цветы распускаются неформальные нанообразовательные проекты начального, среднего и среднего специального образования. «Дети любопытны по своей природе. Да и студенты не всегда имеют возможность удовлетворить любопытство, постигая науки в аудиториях, – говорит R.P.H. Chang, директор Национального центра по обучению в области нанонаук, США ([www.nclt.us](http://www.nclt.us)). – Сможет ли нанообразование зажечь интерес к науке в новом поколении ученых и инженеров?» К числу замечательных проектов относится созданный в Германии нанотрейлер (рис. 1) ([www.nanotruck.net](http://www.nanotruck.net)), путешествующий из города в город и гостеприимно распахивающий свои двери для желающих прикоснуться к чудесам наномира; равно как и серия комиксов и мультфильмов, подготовленных Министерством образования Тайваня ([www.taipei.com/News/feat/archives/2005/09/25/2003273200](http://www.taipei.com/News/feat/archives/2005/09/25/2003273200)). Но никакой ав-

томобиль не может сравниться в скорости и всеохватности с Интернетом, поэтому к серьезным достижениям нанообразования следует отнести множество общедоступных Интернет-сайтов, часть из которых упомянута в этой статье.

А что же Россия? Ситуация здесь напоминает затишье перед бурей. Известен опыт книги по нанотехнологиям для широкого круга читателей («Нанотехнологии для всех», автор М. Рыбалкина); или Интернет-портала «Нанометр» ([www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru), поддерживается Факультетом наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова). Значение последнего, по-видимому, будет только возрастать, и со временем он может стать центром кристаллизации проектов в области нанообразования в России. Ситуация быстро меняется в последние годы, и недалек тот день, когда наши дети пойдут в школу, где помимо привычных физико-математических, химических, гуманитарных специализированных классов появятся нанотехнологические классы. Думается, что такие классы не будут страдать от недостатка учащихся.

Таблица. Программа повышения квалификации дипломированных специалистов	
Наименования разделов, курсов	Объем аудиторной работы, час.
ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ	240
Введение в нанотехнологию	48
Основы физики конденсированного состояния вещества	48
Основы квантовой физики	48
Основы квантовой химии	48
Молекулярная динамика наносистем	48
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ	292
Нанотехнология (включая MEMS, NEMS, NOEMS и др.)	48
Методы математического моделирования нанотехнологических процессов и наноструктур	42
Технологические методы изготовления и свойства наноматериалов	46
Нанoeлектроника	28
Прикладная метрология наносистем	32
Нанотехнологический менеджмент	96
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ И АТТЕСТАЦИОННАЯ РАБОТА	108

Рис. 2. Наполнение двухсеместрового учебного плана специальности «Наноматериалы» (Наноцентр МЭИ (ТУ), по материалам [www.chip-news.ru](http://www.chip-news.ru))

Высшее (университетское) образование в отличие от среднего более готово к внедрению новых образовательных программ. В настоящее время существует три направления вузовских учебных планов в области наноматериалов и нанотехнологий:

1) создание отдельных специальных лекционных курсов (или их наборов) для студентов-дипломников и аспирантов (таким путем движется большинство университетов, в том числе и российских);

2) разработка магистерских программ (Лондонский Имперский колледж (Imperial College London), Кембриджский университет в Великобритании, Федеральная Высшая техническая школа (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) в Швейцарии);

3) создание отдельных образовательных программ, рассчитанных на 3 и более лет, где концепции нанонауки вводятся с первого года обуче-

ния (Drexel University, США; University of Leeds, Великобритания).

На примере Наноцентра Московского энергетического университета можно видеть типичный учебный план первого направления (рис. 2). Существуют и более длительные российские версии нанообразовательных программ. Упомянем здесь лишь необычный опыт Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (программа «Наносистемы в строительном материаловедении»).

По преданию, римский император Константин сумел в пригрезившемся ему образе креста увидеть знак времени и одержал не только военную, но и концептуальную победу над противником, обеспечив на века жизнеспособность своей империи. Рождающееся на наших глазах нанообразование тонко чувствует дух времени, его направленность в будущее – залог успехов нанотехнологий.

#### *Литература:*

1. Foley E.T., Hersam M.C. Nanotechnology Law&Buisines, Dec. 2006. P. 467–484.
2. Chang R.P.H. Nanotoday. 2006. Vol. 1, № 2. P. 6–7.
3. Роко М. Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI, № 5. С. 90–95.
4. План развития нанотехнологий стран ЕЭС: [www.cordis.lu/nanotechnology/actionplan.htm](http://www.cordis.lu/nanotechnology/actionplan.htm)



## НАНОПИНЦЕТ (Nanotweezer)

«...Стали все подходить и смотреть: блоха действительно была на все ноги подкована на настоящие подковы... – Если бы, – говорит (левша), – был лучше мелкоскоп, который в пять миллионов увеличивает, так вы изволили бы увидеть, что на каждой подковинке мастерово имя выставлено...»

– И твое имя тут есть? – спросил государь.

– Никак нет, – отвечает левша, – я мельче этих подковок работал: я гвоздики выковывал, которыми подковки забиты...»

Н.С. Лесков.

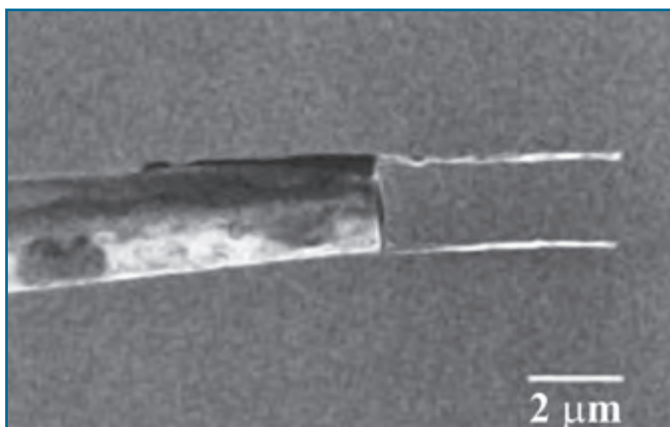
«Сказ о тульском косом Левше и о стальной блохе»



Иллюстрация к повести Н.С. Лескова «Сказ о тульском косом Левше и о стальной блохе» (художники Кукрыникисы, 1974 г.)

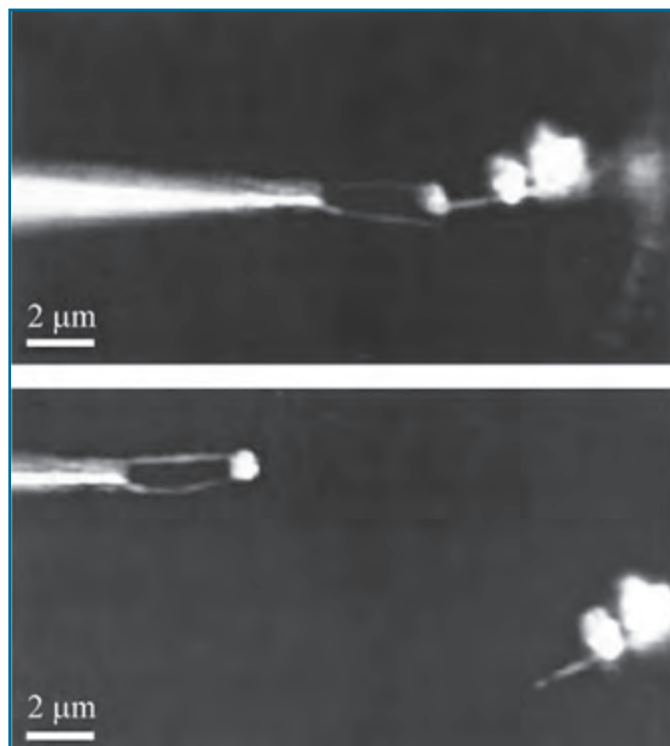
С появлением атомно-силовых микроскопов и электронных микроскопов высокого разрешения ученым удалось «рассмотреть» даже самые маленькие объекты окружающего мира – живые клетки, макромолекулы, отдельные атомы, а, увидев, захотелось научиться ими управлять. В повседневной жизни мы ежедневно манипулируем множеством различных объектов, но как только дело касается чрезвычайно малых пред-

метов (например, шестеренок часовых механизмов или деталей микросхем), мы сталкиваемся с рядом трудностей, связанных с точностью их перемещения и установки, и тут же обращаемся к мастерам соответствующей профессии. Достаточно вспомнить «Сказ о тульском косом Левше и о стальной блохе» и бытующее до сих пор выражение «подковать блоху». Но что нужно сделать, чтобы контролируемо переместить с места на место отдельный предмет, размеры которого не превышают несколько десятков или сотен нанометров? Исследователи из Гарвардского университета ответили на этот вопрос еще в 1999 году, сконструировав первый нанопинцет на основе углеродных нанотрубок (рис. 1) и переместив с его помощью полистироловые шарики размером всего 300 нм (рис. 2). Пинцет представлял собой напыленные на обе стороны конусоидальной стеклянной пипетки неконтактирующие золотые электроды, к которым прикреплены пучки многостенных **углеродных нанотрубок** диаметром порядка 50 нм. При подаче на электроды небольшого напряжения (до 8 В) концы трубок смыкались за счет электростатических сил и захватывали частицы кластеров, а при снятии на-



**Рис. 1.** Строение нанопинцета

пряжения происходило обратимое открытие пинцета. Варьирование размеров составных элементов, очевидно, позволяет добиться различного расстояния между концами нанопинцета, и, следовательно, открывает широкие перспективы в манипулировании объектами различного размера, в том числе клетками и внутриклеточными структурами, а также отдельными крупными молекулами. Кроме того, с помощью подобного нанопинцета можно конструировать новые классы наноточек и нанонитей, получение которых невозможно синтетическими методами. Другим потенциальным применением нанопинцета явля-



**Рис. 2.** Нанопинцет в действии: перемещение 300 нмполистироловых шариков, содержащих флуоресцентные метки

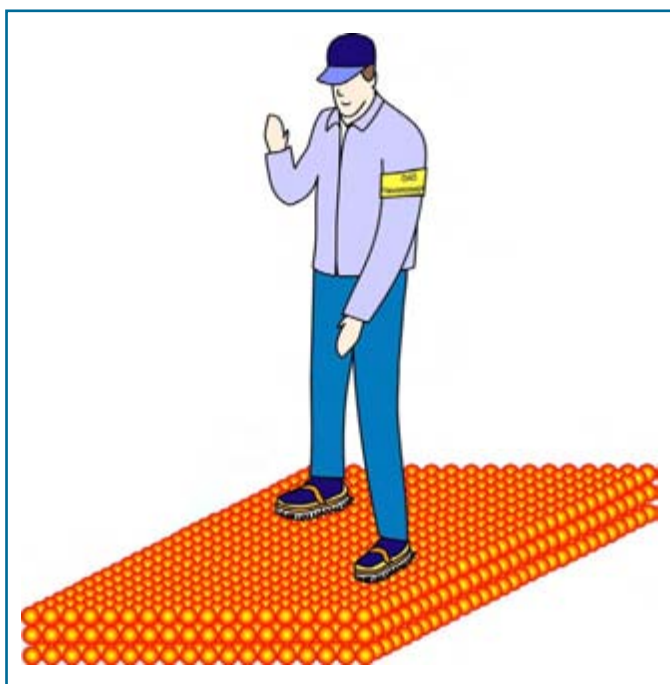
ется создание на его основе электромеханических сенсоров и двухигольчатых проводящих зондов, которые позволяют получать детальную информацию об электронных свойствах наноматериалов.

#### Литература:

1. Kim P., Lieber C. Nanotube nanotweezers // Science. 1999. Vol. 286. P. 2148.

## НАНОПОЛИРОВАНИЕ (Nanopolishing)

*«Не все то золото, что блестит».*  
Пословица



В **нанотехнологиях** весьма остро стоит вопрос подготовки предельно гладких поверхностей. И то, что в обычной жизни нам кажется идеально ровным и гладким (например, отполированная до зеркального блеска пряжка или CD-диск) на наноуровне может представлять собой в лучшем случае холмистую равнину, а в худшем – непреодолимый горный массив. Действительно, шероховатость отполированной до зеркального блеска поверхности составляет менее половины длины видимого излучения, то есть всего лишь около 200 нм. В то же время для большинства нанотехнологических применений (см. **Нанолитография, Сканирующая зондовая микроскопия, Нанoeлектроника, Наносенсоры, Устройства хранения информации**) нужна атомная глад-

кость поверхности или хотя бы шероховатость, не превышающая несколько атомных слоев. Для получения таких поверхностей используют нанополірование – обработку поверхности твердого тела до состояния, в котором остаточные шероховатости составляют не более нескольких нанометров.

Нанополірование может быть механическим (обработка поверхности объекта взвесью в жидкости наноразмерных частиц абразивного материала), химическим (электрохимическим) или комбинированным (химико-механическое полирование).

При механическом нанополіровании на поверхности обрабатываемого объекта одновременно происходят процессы измельчения (диспергирования) выступающих частей с последующим удалением и пластической деформацией. При этом к абразивному материалу одновременно предъявляются требования высокой твердости и нанометрового размера частиц. Эти требования удалось совместить в абразивах на основе нанокристаллического (2 – 50 нм) алмаза, получаемого детонационным синтезом (наноалмаз).

Действие химического или электрохимического полирования основано на преимущественном (по сравнению с плоскими участками поверхности) растворении в специально подобранных травящих жидкостях выступающих над поверхностью и обладающих повышенной химической активностью участков материала. Процесс можно контролировать путем изменения состава (и концентрации) раствора. Химическое (и химико-



механическое) полирование позволяет получать более гладкие поверхности, чем механическое.

Однако на практике последовательно применяют сначала механическое полирование грубым (от сотен до единиц микрометров) абразивом с последующим переходом к абразивам с меньшим размером зерна и уже потом к заключительному химическому или химико-механическому полированию.

Одна из важнейших областей применения нанополирования – подготовка материалов для производства микроэлектронных компонентов (полирование кремниевых пластин), однако поверхности с очень высокой степенью гладкости необходимы и во многих других случаях (оптика, сборка микро (нано) электромеханических устройств и т.д.).

#### Л и т е р а т у р а :

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005. 192 с.

## НАНОПОРОШКИ (Nanopowders)



В обычной жизни мы часто сталкиваемся с порошками: стиральный порошок, зубной порошок, мука, сахар, дорожная пыль и т.д. В химии порошками или порошкообразными материалами называют материалы, состоящие из множества индивидуальных частиц, размер которых не превышает нескольких сотен микрометров, и зачастую мы можем различить такие частицы даже невооруженным глазом. А нанопорошок состоит из частиц, размер которых не превышает  $\sim 100$  нм! Но отличие нанопорошка от обычного порошка состоит не только в размере составляющих его частиц. Они будут так же кардинально отличаться и по своим свойствам. Обращали ли вы внимание, как усиливается и насыщается аромат кофе при помоле? Так вот, если сравнить обычный порошок с кофе в зернах, а нанопорошок с молотым кофе, то можно сказать, что свойства нанопорошка отличаются от свойств порошка так же, как отличается запах молотого кофе от запаха кофе в зернах. Так, нанопорошок приобретает текучесть и его можно рассматривать как некое

*Шел по улице жучок  
В модном пиджачке  
На груди блестел значок,  
А на том значке  
Нарисован был жучок,  
тоже в пиджачке.  
И на нем висел значок,  
А на том значке  
Был еще один жучок...  
Но он был так мал,  
Что глядел я целый час  
И не разобрал:  
Был ли у жучка значок?  
Был ли на значке жучок?  
Андрей Усачев*

промежуточное состояние между порошком и жидкостью. Особенностью нанопорошков является огромная удельная поверхность, а значит и избыточная поверхностная энергия. Например, если говорят, что нанопорошок обладает удельной поверхностью порядка  $100 \text{ м}^2/\text{г}$  – это значит, что поверхность частиц такого порошка с массой 1 г можно сравнивать по площади с трехкомнатной квартирой. Представляете, какой простор? Атомы на поверхности частиц находятся в особом состоянии: они более активны и всегда готовы вступить в какое-нибудь взаимодействие, именно поэтому нанопорошки часто применяют в качестве катализаторов.

Кроме того, нанопорошки отличаются тем, что составляющие их **наночастицы** «слипаются» и формируют агрегаты, а агрегаты в свою очередь собираются в еще более крупные образования – агломераты (рис. 1). И уже агрегаты и агломераты ведут себя как отдельные частицы. Объединение (агрегация) наночастиц порошка происходит в результате стремления системы (порошка) уменьшить избыточную поверхностную энергию, которая присуща веществу в раздробленном, в том числе и в наноразмерном, состоянии.

Без использования специальных приемов нельзя предотвратить взаимодействие индивидуальных частиц в нанопорошках. Сохранение наноразмерных частиц в порошках возможно, например, при использовании их в виде суспензии с добавками, снижающими поверхностную энергию (ПАВ), или добавками веществ, препятствующих слипанию индивидуальных частиц. Можно также «замуровать» наночастицы в жесткие матрицы, но тогда это будут уже не нанопорошки, а нанокомпозиты.

Отличительным свойством порошков является возможность манипулирования с ними: нанопорошки можно сыпать, уплотнять, разрыхлять, склеивать и даже заставить течь. Отдельную наночастицу можно сравнивать с отдельной личностью, а нанопорошок – с толпой. Сама по себе частица – интересная, уникальная, особенная. Она характеризуется определенным химическим составом, твердостью, плотностью, электропроводностью, магнитными свойствами, гигроскопичностью и т.п. Наряду со свойствами вещества при описании частицы говорят о размере, форме, шероховатости поверхности, химическом составе поверхностного слоя, химическом составе слоев адсорбированных веществ, смачиваемости, диэлектрической проницаемости и растворимости поверхностного слоя. Свойства индивидуальной частицы определяют ее способность к взаимодействию с другими частицами из того же вещества, а также силу трения в местах контакта частиц. А порошок – это многомиллионный коллектив, и там действуют свои законы. Порошковый материал представляет собой совокупность множества частиц, которые могут принимать самую различную упаковку и тем самым менять прочностные и технологические свойства порошка. Одной из характеристик такого коллектива является распределение частиц по размерам, из которого можно определить самый большой, самый маленький и средний размеры частиц.

Чтобы получить порошок, нужно взять что-то тяжелое и прочное и раскрошить большой кусок на много маленьких кусочков. Однако такой способ не подходит для получения нанопорошков,

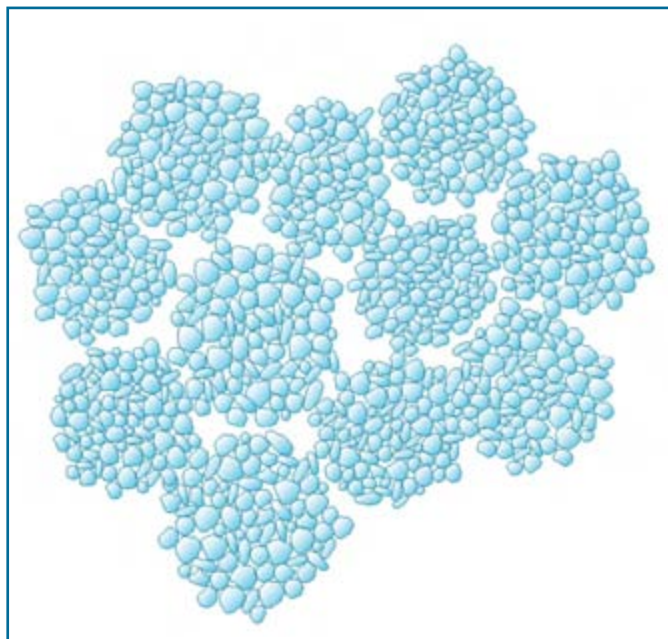


Рис. 1. Структура агломерата в нанопорошке

так как все попытки раздробить вещество ниже определенного предела по размеру претерпят неудачу – из-за высокой избыточной поверхностной энергии в нанокристаллическом состоянии частицы начнут слипаться и в системе установится равновесие. Нанопорошки обычно синтезируют химическими методами из растворов или из газовой фазы. Именно в таких условиях существует возможность создавать маленькие **наночастицы** из еще более мелких ионов и атомов.

Нанопорошки применяют в качестве исходных материалов для получения твердых сплавов, керамики различного назначения. Для получения керамики из нанопорошков применяются более низкие температуры спекания по сравнению с обычными порошками, что связано с повышенной поверхностной энергией системы, состоящей из наночастиц. Полученная таким образом нанокерамика обладает уникальными функциональными свойствами. Так, нанокерамика на основе частично стабилизированного диоксида циркония с размером зерен меньше 100 нм обладает прочностью на изгиб 2 ГПа, что в три раза превышает прочность такой же керамики с размером зерна ~1 мкм!

#### Литература:

1. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. 1982.



## НАНОРЕМЕШКИ (Nanobelts)

*«В этом сезоне актуальны ремни оригинальных цветов, декорированные пряжками...».*

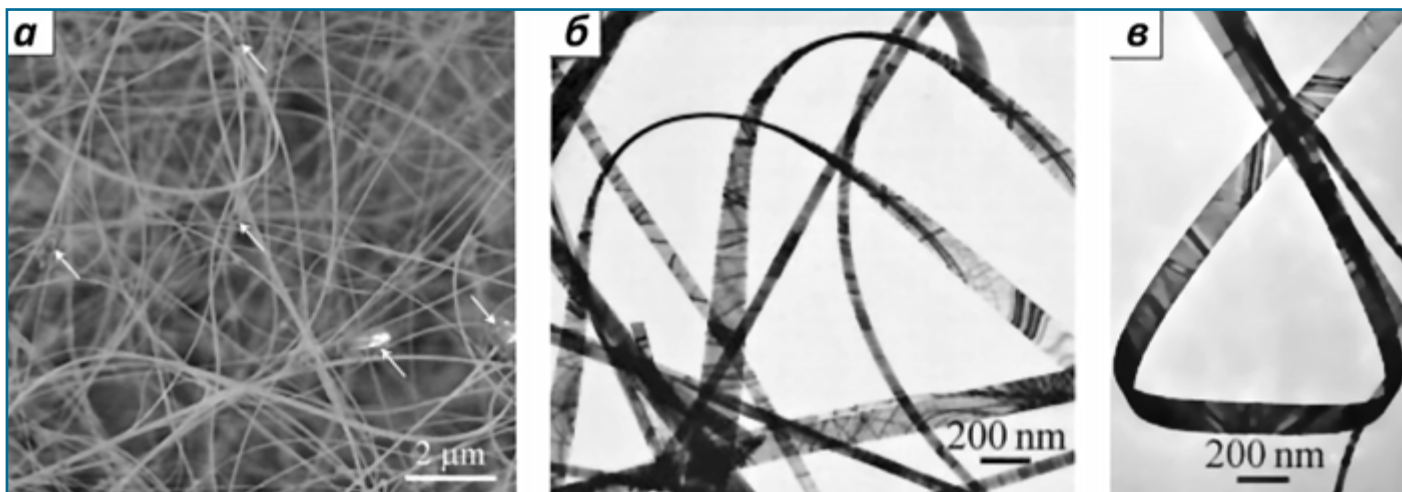
*Из модного журнала*



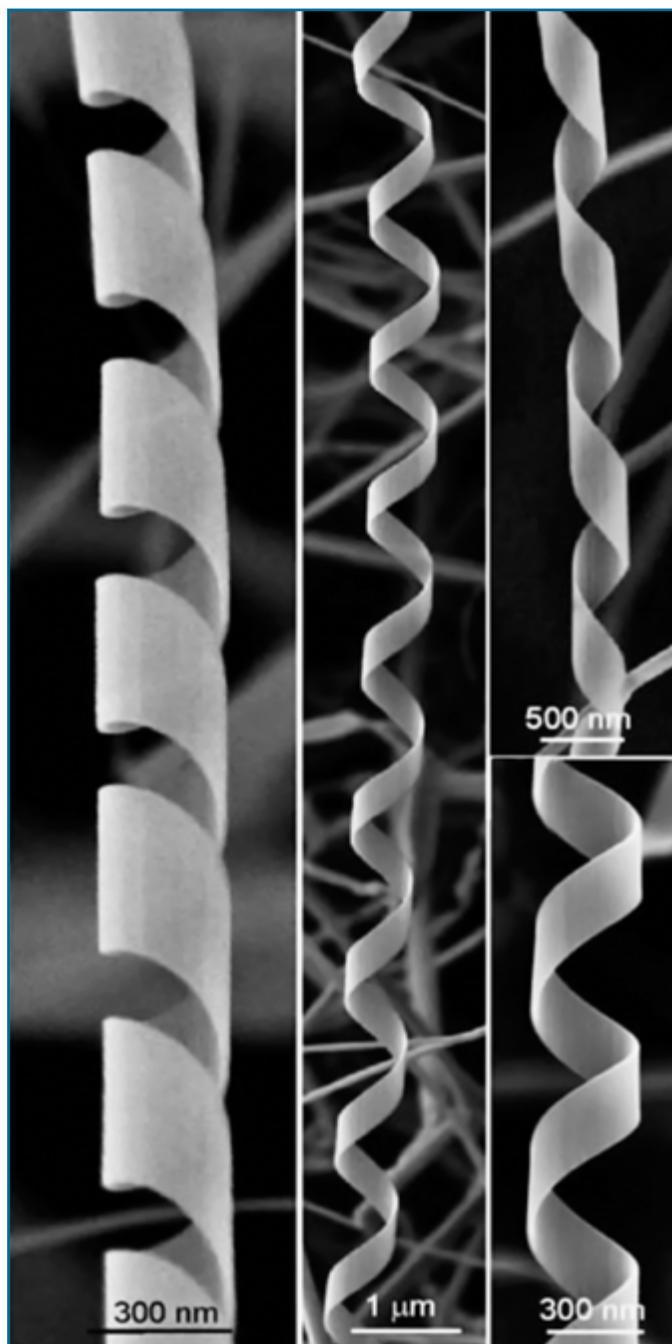
Чтобы примерить наноремешок, нужно обладать поистине тонкой талией! Наноремешки (их еще иногда называют нанопоясами или нанолентами) представляют собой чрезвычайно тонкие, плоские, прямоугольные в сечении одномерные структуры. Характерная толщина наноремешков составляет 5–20 нм, ширина – 10–100 нм, а длина – от сотен микрон до нескольких миллиметров (рис. 1). Полупроводниковые наноремешки

оксидов цинка, олова, индия, кадмия и галлия были впервые получены в 2001 году путем испарения соответствующих оксидов с последующим быстрым охлаждением. Многие исследователи считают, что наноремешки обладают рядом преимуществ по сравнению с **нанонитями** и **нанотрубками**: они химически чисты, структурно однородны и практически бездефектны. Кроме того, чистая поверхность наноремешков не требует защиты от окисления.

Наноремешки обладают множеством интересных свойств. Так, электропроводность наноремешков на основе оксидов цинка и олова сильно изменяется при соприкосновении их с газами и жидкостями, а наноремешки оксида олова, легированного фтором, изменяют сопротивление под действием инфракрасного излучения. А вот наноремешки оксида индия, легированного оловом, помимо высокой электропроводности еще и



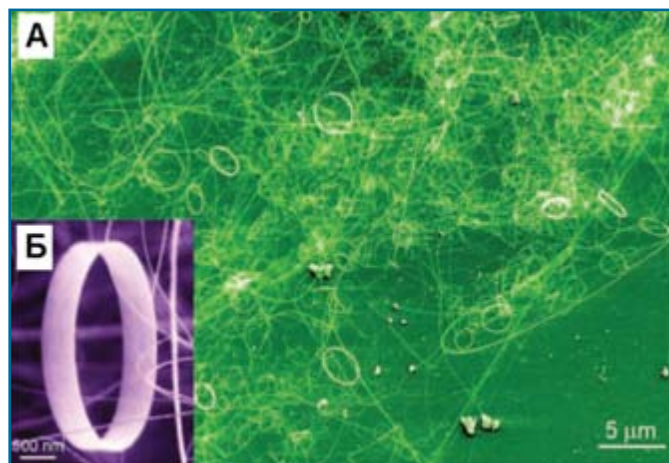
**Рис. 1.** Наноремешки (а)  $\text{SnO}_2$ , (б, в)  $\text{ZnO}$ . Показаны изогнутые наноремешки, демонстрирующие их уникальную гибкость



**Рис. 2.** Морфология право- и левовращающих наноспиралей ZnO

прозрачны, что делает их чрезвычайно привлекательными для создания индикаторных панелей.

Кроме того, наноремешки могут служить оптическими волноводами, позволяющими передавать свет по заданному пути, в том числе за счет переизлучения (фотолюминесценция). Таким образом, возможно, что через какое-то



**Рис. 3.** а – Общий вид нанокольца ZnO, б – морфология монокристаллического нанокольца ZnO с однородной идеальной геометрической формой

время мы будем работать за оптическими компьютерами и пользоваться ресурсами фотонного Интернета! Ученые уже сделали прототип логической фотонной схемы нанометрового масштаба, представляющий собой квадрат из четырех скрещивающихся наноремешков. Они показали, как нанолазеры, созданные с применением оксида цинка или нитрида галлия, можно соединить с оптическими нановолокнами из оксида олова и заставить свет бегать от узла к узлу, поворачиваться и ветвиться.

Наноремешки могут образовывать право- и левовращающие спиралевидные структуры (рис. 2), напоминающие молекулы ДНК. На первый взгляд они кажутся гибкими и хрупкими, однако на самом деле спиралевидные наноремешки являются чрезвычайно жесткими, слабо гнущимися конструкциями! Если вырезать из такой спирали небольшой сегмент, он сохранит свою кривизну. Спиралевидные наноремешки представляют собой сверхрешетки, состоящие из чередующихся кристаллических полос. Каждая полоса, ширина которой составляет порядка 3,5 нм, развернута относительно соседней полосы на  $\sim 5^\circ$ , что приводит к возникновению сил скручивания, сгибающих наноремешок наподобие спирали. Кроме того, были определены условия, при которых вместо наноспиралей образуются **нанокольца** (рис. 3).

#### Литература:

1. Pan Z.W., Dai Z.R., Wang Z.L. Science. 2001. Vol. 291. P. 1947–1949.
2. Gao P.X., Ding Y., Mai W., Hughes W.L., Lao C., Wang Z.L. Science. 2005. Vol. 309. P. 1700–1704.
3. Kong X.Y., Ding Y., Yang R., Wang Z.L. Science. 2004. Vol. 303. P. 1348–1351.

## НАНОРОБОТЫ (Nanorobots)

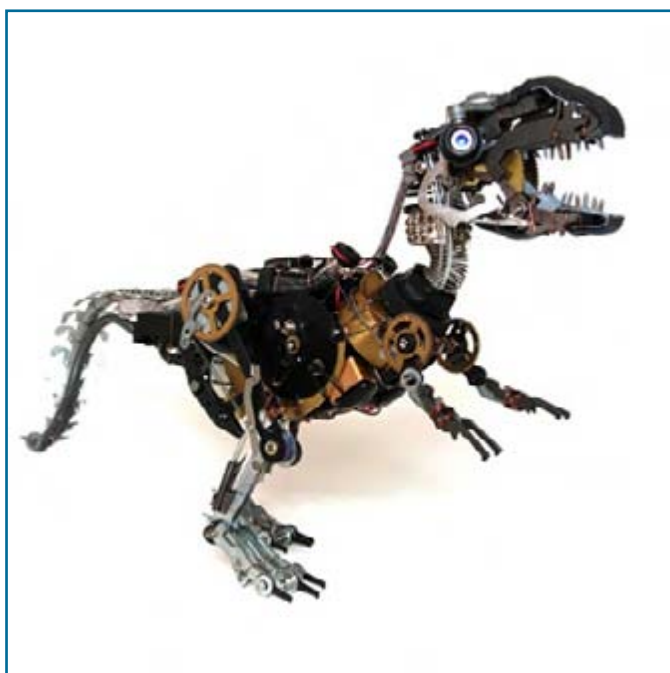
*«Робот не может причинить вреда человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред.*

*Робот должен выполнять приказы человека, кроме приказов, противоречащих Первому закону.*

*Робот должен заботиться о своей безопасности, если это не противоречит Первому и Второму законам.»*

Айзек Азимов

«Законы робототехники»

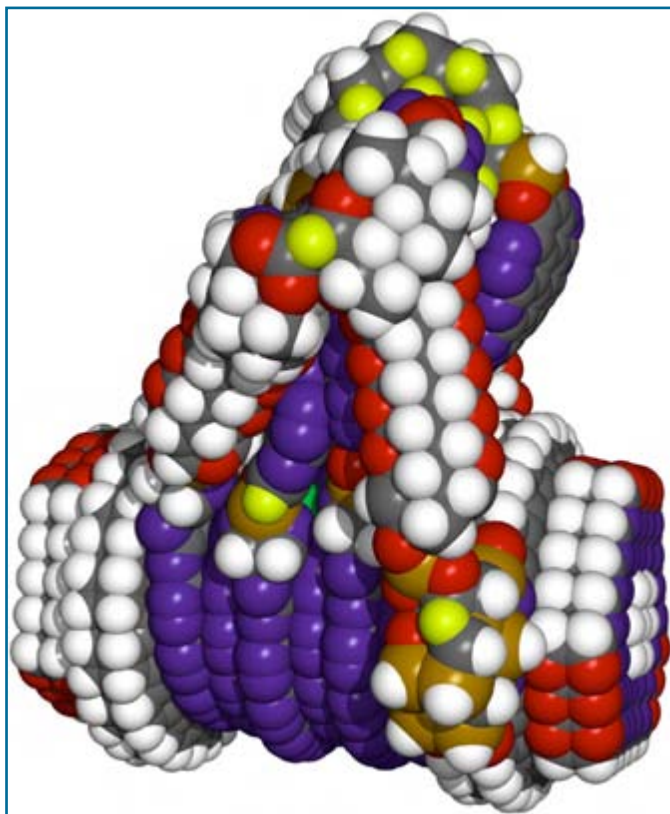


Человечество во все времена стремилось улучшить условия своего существования. Для этого в первобытном обществе люди использовали различные орудия труда, несколько позже они приручили диких животных, которые стали приносить пользу человеческому сообществу. Шли годы, менялся мир, менялись люди и их потребности. Теперь большинство из нас уже не может представить себе жизнь без современных благ цивилизации, достижений науки, техники, медицины. Следующим шагом в этом развитии, по мнению многих ученых, станет освоение **нанотехнологий**, а в частности систем очень малого

размера, способных выполнять команды людей. Таких послушных существ называют нанороботами. Кстати, автором слова «робот» является чешский драматург К. Чапек, который в 1920 г. назвал этим словом придуманное им человекоподобное существо (*робот* – немного измененное чешское *robota*, которое переводится как «принудительный труд»): «Роботы – это не люди... они механически совершеннее нас, они обладают невероятно сильным интеллектом, но у них нет души».

Впервые понятие наноробота или молекулярного ассемблера появилось в нашумевшей книге Эрика Дрекслера (Eric Drexler) из Массачусетского технологического института «Машины созидания: наступление эры нанотехнологий» (1986 г.). По мнению Дрекслера, будущее молекулярной технологии и нанотехнологии состоит в создании функциональных структур и устройств путем их поатомной сборки с помощью программируемых роботов (рис. 1), а также в разработке самих молекулярных роботов, способных «строить» из атомов различные объекты. Конструирование таких машин предполагалось осуществлять путем формирования химических связей за счет механического сближения электронных оболочек атомов. Наноманипулятор, описанный Дрекслером, состоял из  $4 \cdot 10^6$  атомов, а робот, снабженный молекулярным компьютером, вспомогательными механизмами и т.д., содержал  $\sim 1 \cdot 10^7$  атомов. Однако, возможности отдельного



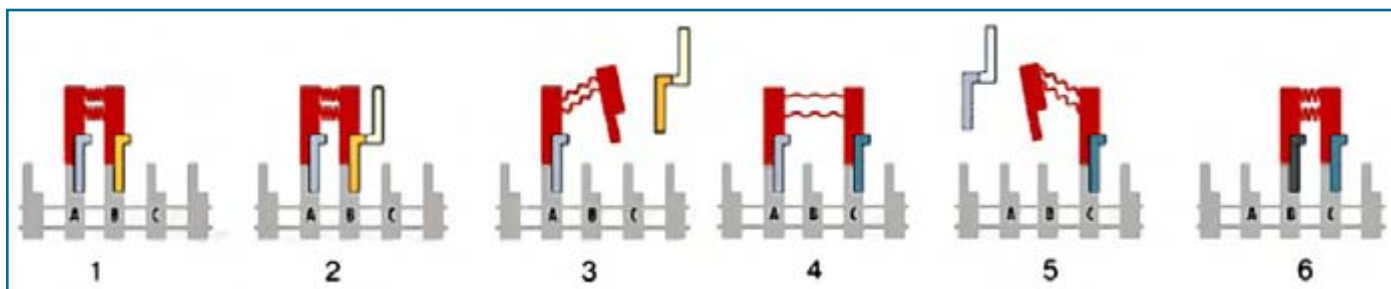


**Рис. 1.** Контроллер малых перемещений или «рука наноробота». Институт молекулярной сборки. США, © IMM, [www.imm.org](http://www.imm.org)

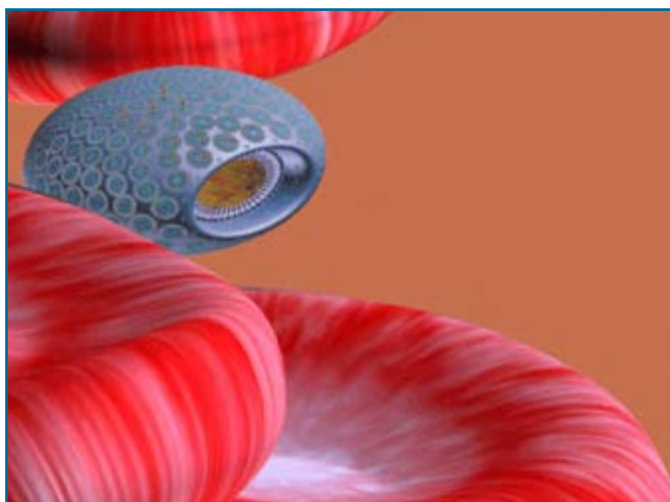
робота, оказываются весьма ограничены, в связи с его малыми размерами, что, по мнению Дрекслера, требует создания наномашин, способных к самовоспроизводству – то есть размножению или репликации. В основе идей о самореплицирующихся структурах лежит теория фон Неймана (1940 г.), согласно которой репликация является основой природных механизмов развития, а сам процесс репликации используется как в клеточной инженерии, так и при воспроизводстве живых организмов. Дрекслер сам же описал опасность создания таких систем: выход из-под контроля процесса репликации из-за возникновения ошибки в программе отдельного робота-

репликатора, может привести к техногенной катастрофе (см. *Серая слизь*). Идеи Дрекслера вызвали волну неприязни к нанотехнологиям со стороны населения. Впрочем, эти полуфантастические прогнозы оказались противоречащими законам термодинамики, а технологический прогресс продолжил движение вперед.

На сегодняшний день уже существует несколько прототипов нанороботов – устройств размером в десятки нанометров, которые могут самостоятельно манипулировать частицами атомных и молекулярных размеров. Одним из них является экземпляр, созданный химиками Нью-Йоркского университета, которые впервые в мире сконструировали прямоходящего двуногого наноробота. В качестве исходного материала Н. Симан и У. Шерман воспользовались мелкими фрагментами двухцепочечных и одноцепочечных молекул ДНК. Шагающий наноробот существует в миллионах копий, плавающих в буферном растворе. Внешне он напоминает щипцы для конфет – две двухцепочечные ДНК-вые ноги длиной в 10 нанометров, упруго соединенные на одном конце и свободные на противоположном (рис. 2). Каждая нога образована тридцатью шестью нуклеотидными парами, которые удерживаются водородными связями по обычной для ДНК схеме: аденин напротив тимина, а гуанин напротив цитозина. С их свободных концов свисают совсем уж коротенькие хвостики – кусочки одноцепочечной ДНК. Чтобы понять, как движется робот, посмотрим на схему. Он «ступает» по особым опорам, тоже изготовленным из ДНК, которые вытянуты вдоль ДНК-вой молекулы дорожки. В начальный момент обе ноги фиксируются на соседних опорах с помощью двух одноцепочечных спиралей ДНК, действующих подобно якорям. Этот молекулярный якорь с одного конца комплементарен «хвостовым придаткам» ноги, а с другого – вершине опоры, благодаря чему он и удерживает их



**Рис. 2.** Схема движения наноробота (комментарии к схеме в тексте)



**Рис. 3.** Искусственная клетка-наноробот охотится за патогенами в крови человека. Институт молекулярной сборки. США, © IMM, [www.imm.org](http://www.imm.org)

вместе. Такая позиция изображена на первом рисунке схемы (рис. 2). Надо отметить, что концевые участки ног не комплементарны опорам, и поэтому робот не может «устоять» без помощи якорей. Первый этап шага состоит в отделении правой ноги от опоры. Чтобы это произошло, свободно плавающая в буфере спираль ДНК (желтая полоска на втором рисунке схемы) вступает с правым якорем в химическую связь и отводит его в сторону. Незакрепленная нога перемещается вправо (третий рисунок) и зависает над следующей подставкой. Здесь к ней подсоединяется очередной молекулярный якорь, который притягивает ее к новой опоре, – и полшага сделано (четвертый рисунок). Когда то же самое происходит и с левой ногой (пятый и шестой рисунки), робот перемещается на одну позицию вправо. Интересно, что абсолютно аналогичный принцип используется при перемещении белка миозина по фибриллам в живых организмах.

Наиболее вероятно, что одной из первых областей, где найдут применения таланты нанороботов, станет «наномедицина». Наноробот, введенный в организм человека, сможет самостоятельно передвигаться по кровеносной, лимфатической и нервной системам, не нанося при перемещении вреда организму (рис. 3). На своем пути он сможет изменить характеристики тканей и клеток, уничтожить микробов и молодые раковые клетки. Так, в Монреальском университете под руководством профессора С. Мартеля был создан прототип системы управления и слежения за нанороботом в живом организме. В качестве модели робота они использовали железный шарик диаметром в полтора миллиметра, который испытывали в артерии живой свиньи. Для управления сферой канадцы разработали изящный способ: они заставили управлять «роботом» прибор, одновременно контролирующий передвижение сферы по телу животного, – обычный магниторезонансный томограф. Ученые аккуратно провели шарик по кровеносным сосудам со скоростью до 10 см/с.

Сегодня уже предложены или разрабатываются составные части нанороботов:

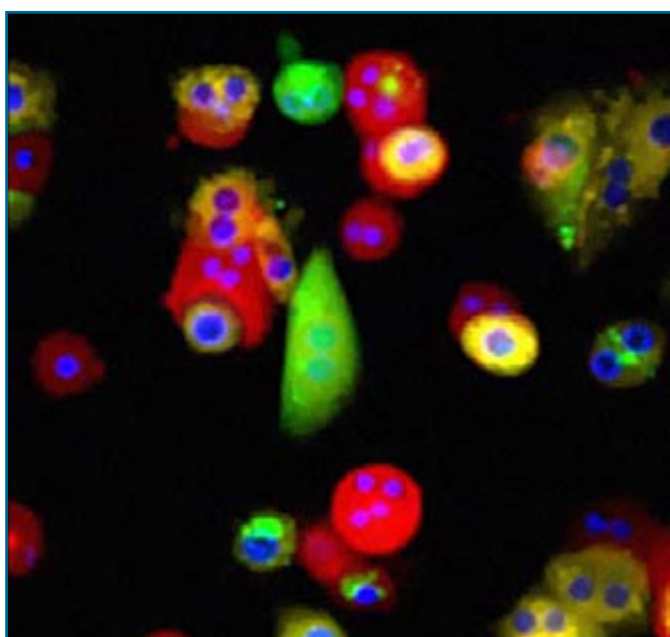
- навигационные системы (для определения местонахождения и определения маршрута передвижения);
- **наносенсоры** (для мониторинга окружающей среды, участия в навигации и коммуникации при работе с отдельными молекулами);
- наноманипуляторы (**наноактюаторы** для выполнения непосредственных действий с объектом);
- устройства приема и передачи информации. Осталось лишь собрать их вместе...

#### Литература:

1. <http://www.imm.org>
2. <http://www.inauka.ru>
3. <http://www.newscientist.com/home.ns>
4. <http://www.sciencedaily.com>

## НАНОСЕНСОРЫ (Nanosensors)

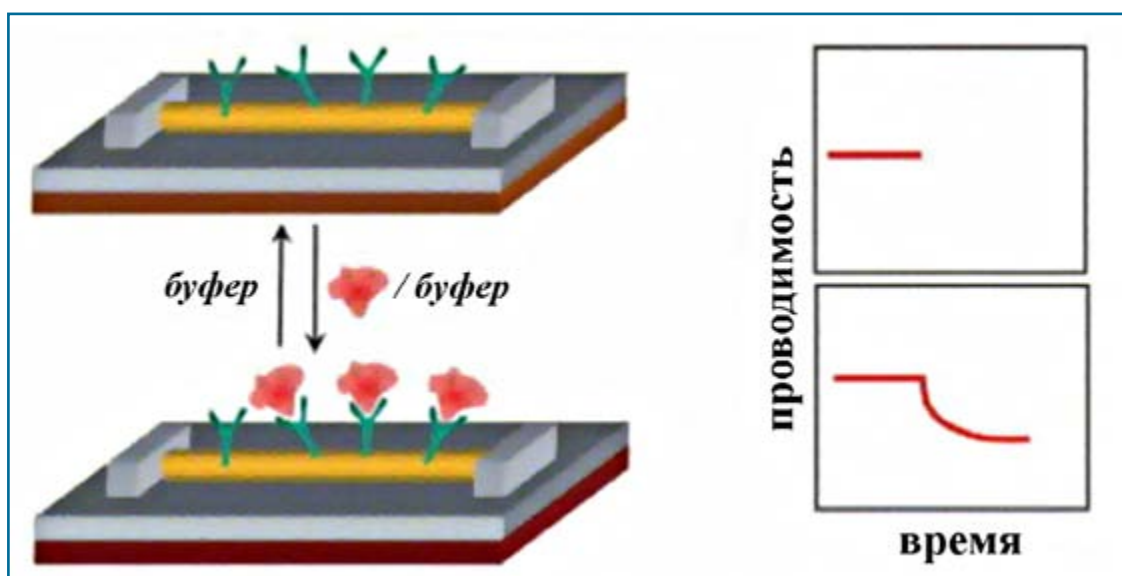
*«А нюх – как у собаки, а глаз – как у орла»  
Из мультфильма  
«Бременские музыканты»*



Флуоресцирующие наносенсоры

Наночастицы обладают необычным сочетанием свойств: помимо значительной площади поверхности на единицу объема, которая обуславливает высокую поверхностную реакционную способность, они имеют нанометровые размеры, обеспечивающие значительные скорости проникновения в любые макрообъекты. Эти свойства находят применения в сенсорных наноматериалах.

Давайте рассмотрим принцип работы наносенсора, который представляет собой ансамбль нанопроволок кремния диаметром 2–3 нм, обладающих проводимостью р-типа (рис. 1). Изначально поверхность таких мельчайших проволоочек покрыта тонким слоем оксида кремния. Затем эту поверхность модифицируют, выдерживая материал в специальном растворе, чтобы «пришить» на поверхность оксида кремния функциональные



**Рис. 1.** Схематичное изображение сенсорных нанопроволок кремния с привитыми на них антителами (зеленый цвет), которые связываются с определенными молекулами белка (красный цвет)



группы (например, аминокислоты), которые будут являться рецепторами на определенные макромолекулы (*вирусы* или белки). Когда наносенсор с привитым рецептором выдерживают в буфере, содержащем положительно заряженные макромолекулы белка, то химическое взаимодействие между рецептором и определяемым объектом приводит к росту поверхностного положительного заряда и уменьшению проводимости.

Одним из наиболее ярких примеров наносенсора является *электронный нос*, способный за считанные минуты осуществить химический анализ пробы. Важным является применение наносенсоров в ранней диагностике заболеваний, в частности, рака. В тело человека через пластырь

на коже, путем инъекции или вместе с пищей вживляют крошечные сферические резервуары из дендримеров, покрытых специальными химическими реактивами. При этом благодаря маленькому размеру (всего около 5 нм) на небольшом участке пространства можно разместить миллиарды подобных наносенсоров. Оказавшись внутри тела и проникнув в лимфоциты (белые кровяные клетки, обеспечивающие защитную реакцию организма против инфекции и других болезнетворных факторов), наносенсоры начинают флуоресцировать, когда структура клетки изменяется в результате иммунного ответа организма. Остается лишь зафиксировать это свечение особыми приборами – и диагноз поставлен.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Patolsky F., Lieber C.M. Materials today. 2005. Vol. 8. P. 20–28.
2. Lang H.P., Hegner M., Gerber C. Materials today. 2005. Vol. 8. P. 30–36.

## НАНОСТЕКЛО (Nanoglass)

*«...К восторгу и испугу некоторой части публики машины с тяжким грохотом врезались в тонкое наностекло...».*

*Игорь Розов.  
«Тени»*

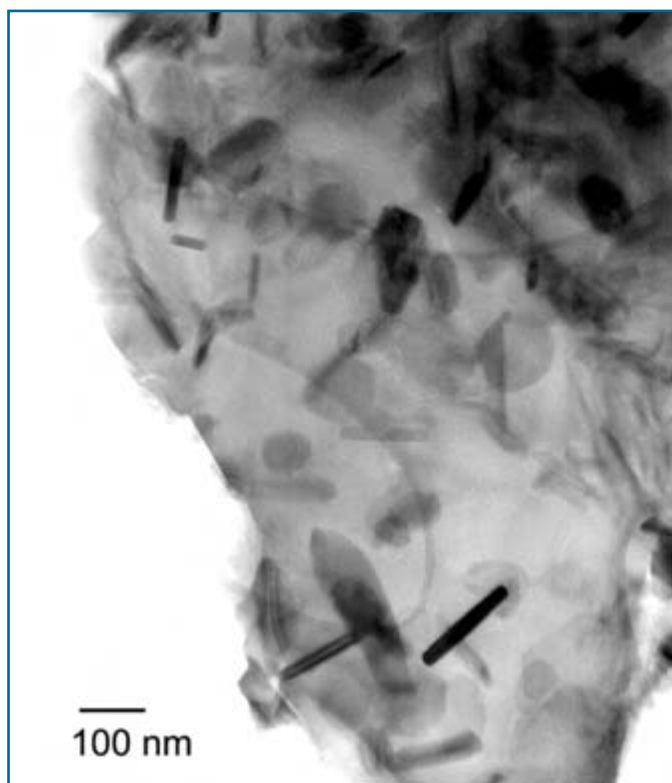


Иногда в научно-исследовательских лабораториях можно найти приборы, массивные части которых соединены фарфоровыми палочками, закрепленными винтами из нержавеющей стали. От постоянного термоциклирования такие винты, как правило, «залипают» и не поддаются откручиванию. Поэтому когда возникает необходимость разобрать такой прибор, чтобы, например, переместить в другое помещение или выкинуть, не остается ничего другого как разбивать фарфор молотком. Но не тут-то было – при этом разорвутся все стальные винты, но ни одна палочка не разрушится, и единственные следы, остающиеся на ней от такого воздействия – это серые полосы истертой стали молотка. В чем же причина необычной прочности чудо-фарфора? Вероятно, в особенностях его структуры – он представляет собой корундовый наноситалл – частично закристаллизованное наностекло.

Что представляет собой наностекло? Это группа разнообразных материалов, состоящих из сте-

клянной матрицы, в которой распределены **наночастицы**. При этом наночастицы могут быть как кристаллическими, так и аморфными, т.е. стеклянными, или вовсе отсутствовать – стекло с нанопорами тоже будет наностеклом. Сама же матрица не обязательно должна быть прозрачным силикатным стеклом, как оконное стекло, – она может состоять практически из любого материала и даже быть металлической.

Иногда свойства наностекол определяются только свойствами входящих в их состав наночастиц, но чаще всего – свойствами стеклянной матрицы и наночастиц одновременно. Наиболее ярким и всем известным примером наностекла являются рубиновые звезды на Кремлевских башнях. Матрица этих звезд состоит из бесцветного силикатного стекла, а красный цвет им придают небольшие количества равномерно распределенных наночастиц золота вследствие проявления **плазмонного резонанса**. Рубиновые звезды – это только частный случай, более широко явление плазмонного резонанса применяется при изготовлении оптических светофильтров на основе наностекол. К примеру, красные, оранжевые и желтые светофильтры содержат в своем составе наночастицы селенида кадмия и цвет стекла задается их размером. При этом, если желтое стекло нагреть до определенной температуры, то частицы в нем «подрастут», и оно покраснеет. В качестве другого примера можно привести наностекло с частицами гексаборида лантана диаметром 80 нм, способное поглощать тепловую составляющую солнечного света (в диапазоне от 750 до 1300 нм) и хорошо пропускать видимый свет.



**Рис. 1.** Стеклокерамический нанокомпозит, содержащий магнитные частицы в стеклообразной матрице (работа выполнена на ФНМ МГУ)

Тем не менее, гораздо чаще не только наночастицы, но и матрица определяет свойства наностекла, как в случае упомянутого вначале статьи наноситалла. Чем меньше размер частицы, тем труднее ее сломать (разумеется, в пересчете на единицу сечения). Однако сами по себе наночастицы – это всего лишь пыль, именно стеклянная матрица скрепляет их между собой, не давая им «разлетаться», а они, в свою очередь, не позволяют трещинам развиваться в стекле. Интересными свойствами обладают пленки, состоящие из плоских упорядоченных сот диаметром 13 нм, заполненных оксидом кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и разделенных 1 нм стеклянными перегородками. При освещении красным милливаттным лазером показатель преломления такого наностекла значительно изменяется, благодаря чему данный материал может использоваться для создания устройств сверхплотного хранения информации до 1 терабит/кв. дюйм. В качестве среды для магнитной записи информации также могут использовать-



**Рис. 2.** Поверхность кухонной плиты, изготовленная из наностекла

ся композиты на основе магнитных наночастиц гексаферрита стронция, находящихся в стеклообразной матрице, которые успешно получают термообработкой исходного стекла (рис. 1).

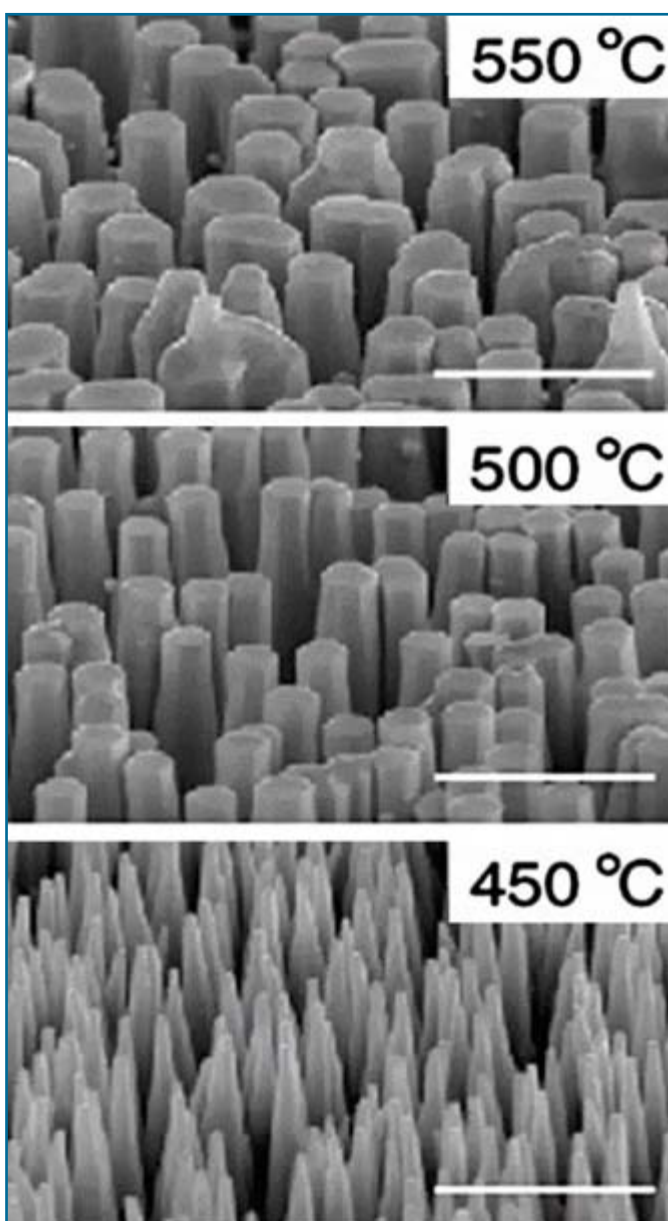
В настоящее время особое внимание привлекает кварцевое стекло, содержащее большое количество нанопор, поскольку оно имеет самую низкую диэлектрическую проницаемость среди всех известных твердых диэлектриков – от 2,5 до 1,3. Причем до величины проницаемости 1,8 стекло сохраняет механическую прочность, достаточную для использования его в качестве межслойной изоляции в кристаллах микросхем вместо традиционного диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . Это позволяет значительно сократить паразитную емкость и поднять тактовую частоту процессоров на 40%. Правильный подбор состава стеклянной матрицы и определенное распределение в ней наночастиц позволяет добиться очень низких значений коэффициента термического расширения таких материалов. Поэтому наностекла широко используют в бытовой технике, к примеру, для изготовления поверхности стеклокерамических плит, которые способны, не трескаясь, выдерживать неравномерный нагрев (рис. 2). Кстати, окрашено такое стекло опять-таки наночастицами, только не чистого золота, как Кремлевские звезды, а его селенида.

#### Литература:

1. Pannhorst W. Journal of Non-Crystalline Solids. 1997. Vol. 219. P. 198–204.
2. James P.F. Journal of Non-Crystalline Solids. 1995. Vol. 181. P. 1–15.



## НАНОСТЕРЖНИ (Nanorods)



**Рис. 1.** Контролируемый рост упорядоченных наностержней GaN: зависимость морфологии наностержней от температуры роста. Масштабная метка: 500 нм

*«...Отец приказал сыновьям, чтобы жили в согласии; они не слушались. Вот он велел принести веник и говорит:*

*– Сломайте! Сколько они ни бились, не могли сломать. Тогда отец развязал веник и велел ломать по одному пруту.*

*Они легко переломали прутья поодиночке. Отец и говорит:*

*– Так-то и вы: если в согласии жить будете, никто вас не одолеет; а если будете ссориться да все врозь – вас всякий легко погубит».*

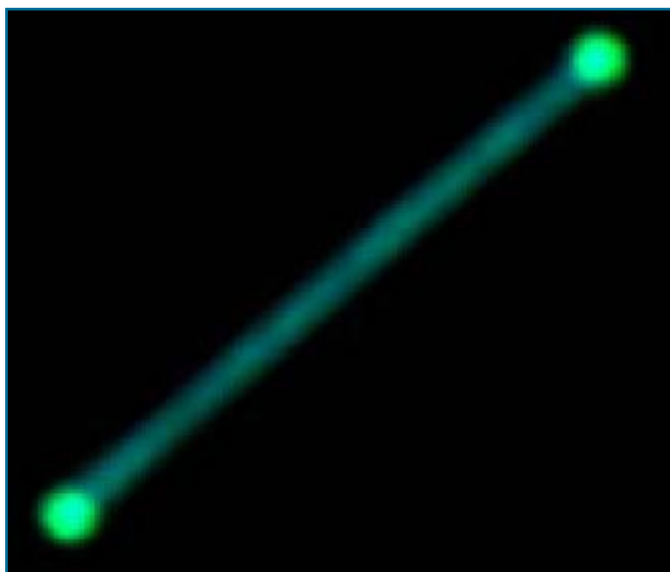
*Сказка*

Наномир богат широким спектром одномерных структур, и первыми в этом ряду, несомненно, являются наностержни. Почему именно они? Да хотя бы потому, что из всех одномерных наноструктур для наностержней характерно самое малое отношение длины к диаметру: порядка 10, при этом длина находится в интервале от 1 до 100 нм. В отличие от **нанонитей**, наностержни являются более жесткими, и в тоже время, более упругими нанообъектами. Кроме того, часто они имеют огранку подобно **нанокристаллам**. Наглядно наностержни отличаются от нанонитей так же, как карандаши от проволоки.

Для получения металлических (Au, Fe, Cu, Ag и т.д.) и полупроводниковых (ZnO, GaN, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> и т.д.) наностержней, как правило, используют те же приемы, что и для прочих одномерных наноструктур: **вискеров**, **нанонитей** и т.д. Наностержни обладают всеми свойствами объемного материала, вместе с тем, анизотропная форма, а также возможность получать упорядоченные, одинаково ориентированные массивы наностержней с контролируемой длиной, формой и диаметром сечения, а также плотностью расположения на подложках определенного типа (рис. 1) создает дополнительные преимущества для конструирования устройств на их основе.

Малое число атомов в наностержнях и геометрическая анизотропия приводит к появлению у них свойств, характерных для 1D систем (см. **Размерные эффекты**).

Области применения наностержней самые разнообразные. Так, в биомедицинской диагно-

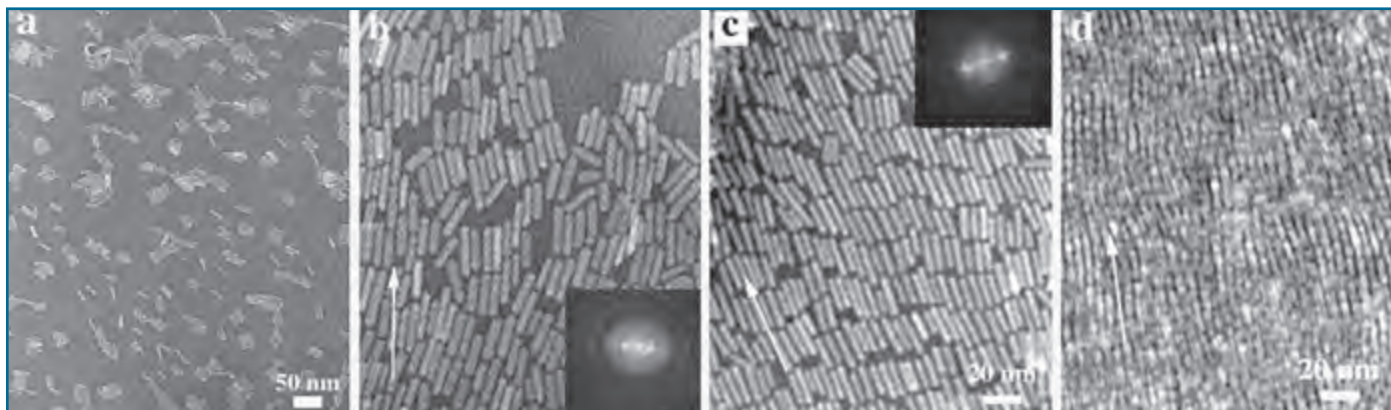


**Рис. 2.** Фотолюминесценция отдельного наностержня CdS

стике наностержни можно использовать в качестве маркеров. Например, при облучении лазером золотые наностержни светятся в 60 раз сильнее, чем флюоресцентные красители, используемые в стандартных методах визуализации. Наличие двух характеристических размеров (диаметра и длины стержня) приводит к появлению двух резонансных частот в спектрах поглощения металлических наностержней (см. *Плазмонный резонанс*) и спектрах испускания полупроводниковых наностержней, что может быть использовано в оптических переключателях и штрих-кодах. Кроме того, наностержни можно использовать для создания лазеров, фотодетекторов, преобразователей частот, волноводов и в солнечных элементах. Так, на основе наностержней CdS

были созданы солнечные батареи. Наностержни помещали в слой полимерного полупроводника, который, в свою очередь, находился между двумя электродами. Общая толщина такой системы составила 200 нм, что примерно на порядок меньше толщины традиционной кремниевой солнечной батареи. Еще одно необычное применение связано с анизотропными оптическими свойствами наностержней. Изменяя ориентацию наностержня по отношению к прикладываемому электрическому полю, можно регулировать отражательную способность стержня, что делает возможным производство дисплеев со значительно улучшенным качеством картинки. Каждый элемент изображения (пиксель) на таком дисплее состоит из остроконечного устройства нанометрового масштаба и характеризуется более ярким свечением (рис. 2).

Недавно стало известно о возможности использования золотых наностержней для усовершенствования жидкокристаллических дисплеев (ЖКД). Одно из неудобств ЖКД – искажение изображения и цвета при определенном угле обзора. Использование золотых наностержней позволяет создать ЖКД, поглощающие свет, тогда как традиционные ЖКД построены на принципе изменения фазы световой волны. Интересным является и тот факт, что при осаждении наностержней, в зависимости от их концентрации в растворе, могут образовываться как изотропные, так и упорядоченные структуры, подобные жидким кристаллам: двумерные нематические, двумерные смектические и трехмерные нематические (рис. 3), что может в значительной степени определять свойства такого упорядоченного материала. Поэтому, глядя на наностержни, так и хочется сказать: «Вместе они – сила!».



**Рис. 3.** Пространственно-упорядоченные массивы наностержней  $\text{BaCrO}_4$

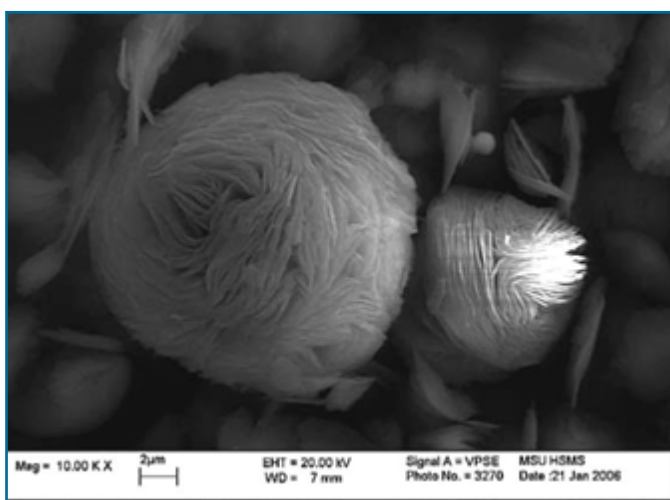
#### Литература:

1. Kim H.-M., Kang T.W., Chung K.S., Hong J.P., Choi W.B. Chem. Phys. Lett. 2003. Vol. 377. P. 491–494.

## НАНОСТРУКТУРЫ (Nanostructures)

*«...Не верь глазам своим».*

*К. Прутков*



«Нанороза» – лепесточки гидроксида магния, полученные гидротермальной обработкой (приз зрительских симпатий на конкурсе фотографии ФНМ в рамках 1-го Фестиваля науки МГУ)

Звезды, цветы, гвозди, ракушки, расчески... А знаете ли вы, что в наном мире также встречаются объекты, похожие на предметы нашего макром ира? Ученые научились с помощью современных методов получать наноструктуры самой разнообразной формы, размера и состава! Давайте же вместе посмотрим, чем можно было бы снабдить наночеловечков, если бы, конечно, они вообще существовали.

Например, нанол юди могли бы разгуливать по полю из наночветов диоксида кремния (рис. 1а), выращенных из SiC и C на кремниевой подложке.

В случае необходимости что-то построить наночеловечки могли бы воспользоваться наногвоздями из оксида цинка (рис. 1б), которые получают при осаждении паров оксида цинка в присутствии In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на графитовую или кремниевую подложку.

Эти замечательные наноснежинки и нанозвездочки (рис. 1в) – одна из разновидностей диоксида марганца (β-MnO<sub>2</sub>). Их получают в гидротермальных условиях из раствора Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

А на рис. 1г показаны самые настоящие нанодуванчики! Полые сферы имеют состав VOOH и «растут» в гидротермальных условиях. А эти наноструктуры в виде расчески (рис. 1д) удалось получить также из оксида цинка, но в смеси с угольным порошком. Нанорасчески «выросли» на подложке из кремния, легированного золотом.

Самую маленькую в мире метлу (рис. 1е), щетинки которой в тысячу раз тоньше человеческого волоса, получили, выращивая нанотрубки на нитях силицида углерода из горячего газа, насыщенного углеродом. При этом ручки щеток покрывались тончайшим слоем золота, что позволяло избежать появления на них щетинок

Наноструктуру «рыбья кость» (рис. 1ж) синтезировали при нагревании смеси порошков MgO и Co на кремниевой подложке.

Наноструктура MnO<sub>2</sub> необычной формы «морской наноеж» (рис. 1з), была получена гидротермальным методом из додецилсульфата натрия, а настоящий морской еж показан на вставке.

И даже фрукты есть в наном ире! Наноструктурированная пленка из диоксида марганца, полученная электрохимически, имеет внешний вид карамболы (рис. 1и).

Еще один вид наноструктур из диоксида марганца – наноракушки (рис. 1к). Их получали наращиванием коллоидных наночешуек MnO<sub>2</sub> на наносферах поливинилхлорида с последующим отжигом полученного композита. Органический темплат испаряется, и остаются неорганические очень тонкие полые наносферы



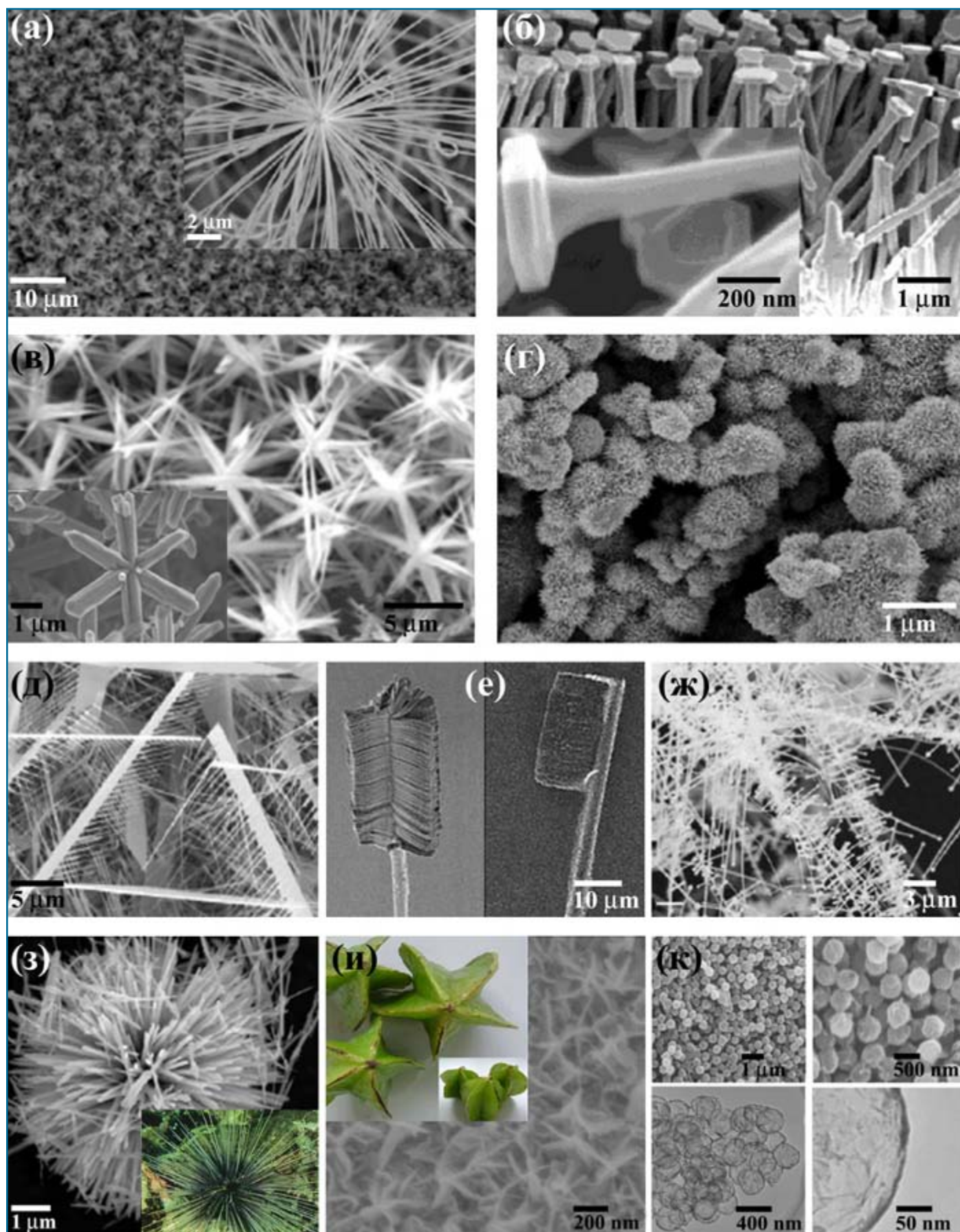


Рис. 1. Разнообразие морфологических форм наноструктур

Исследователи успешно получают все новые и новые наноразмерные объекты. Одни из них являются индивидуальными наночастицами, другие получаются в результате агрегации и имеют необычную причудливую форму. Поэтому исследователи используют термин «наноструктура» для обозначения нанообъектов, которые получены впервые, и еще не имеет в литературе аналогов. В этом случае определяют, на что из человеческого макромира похожа эта структура, добавляя приставку «нано-». Группа ученых, которая первая получила причудливый нанообъект, сначала очень осторожно дает ему длинное имя «наноструктура-имеющая-форму-...», и дальше следует название объекта. Например: «наноструктура, имеющая форму иглы». В дальнейшем, если подобный объект удастся получить в

других системах, то его называют более кратко: «наноигла».

В классификации наноструктур есть несколько подходов. Наиболее часто используемые – по составу, по размерности (протяженности) и по способу получения. Естественно, что способов классификации может быть очень много – по форме, размерам, области применения, кристалличности, количеству атомов и т.п. в зависимости от того, с какой целью производится классификация.

За последние десятилетия химики синтезировали несколько сот наноструктур самого различного уровня – одномерные, двумерные, трехмерные, фрактальные и всевозможные их комбинации. Сколько их еще будет?

#### Л и т е р а т у р а :

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М.: Изд-во МГУ, 2003. 288 с.

## НАНОСФЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ (*Nanospher Lithography*)

«Сфера – геометрическое место точек, расстояние которых от центра не превышает заданной величины».

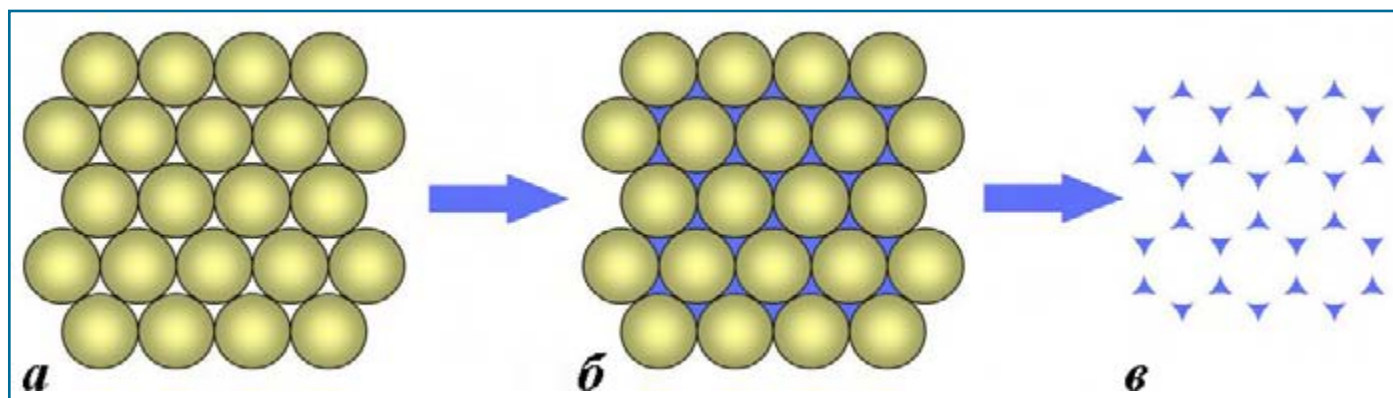
*Из школьного учебника*

Как известно, наноматериалы термодинамически нестабильны, поэтому их получение зачастую требует использования нестандартных синтетических приемов, особенно, когда речь идет о создании из наночастиц различных упорядоченных структур. Иногда можно использовать различные методы «ручной» сборки, в которых оператор с помощью некоторого устройства последовательно ловит наночастицы и переносит в заданные места (см. *Нанопинцет, Оптический пинцет, Сканирующая зондовая микроскопия*). Но что делать, если речь идет о тысяче и даже миллионе строго упорядоченных наночастиц? К сожалению, универсальных подходов к решению этой проблемы пока не существует, однако в некоторых случаях задача становится вполне выполнима, если воспользоваться методом известным как наносферная литография (НЛ).

Метод НЛ был предложен в 1981 г. Фишером (Fisher) и Цингсхаймом (Zingsheim) и первоначально его называли «естественной литографией» (natural lithography). Суть НЛ заключается в

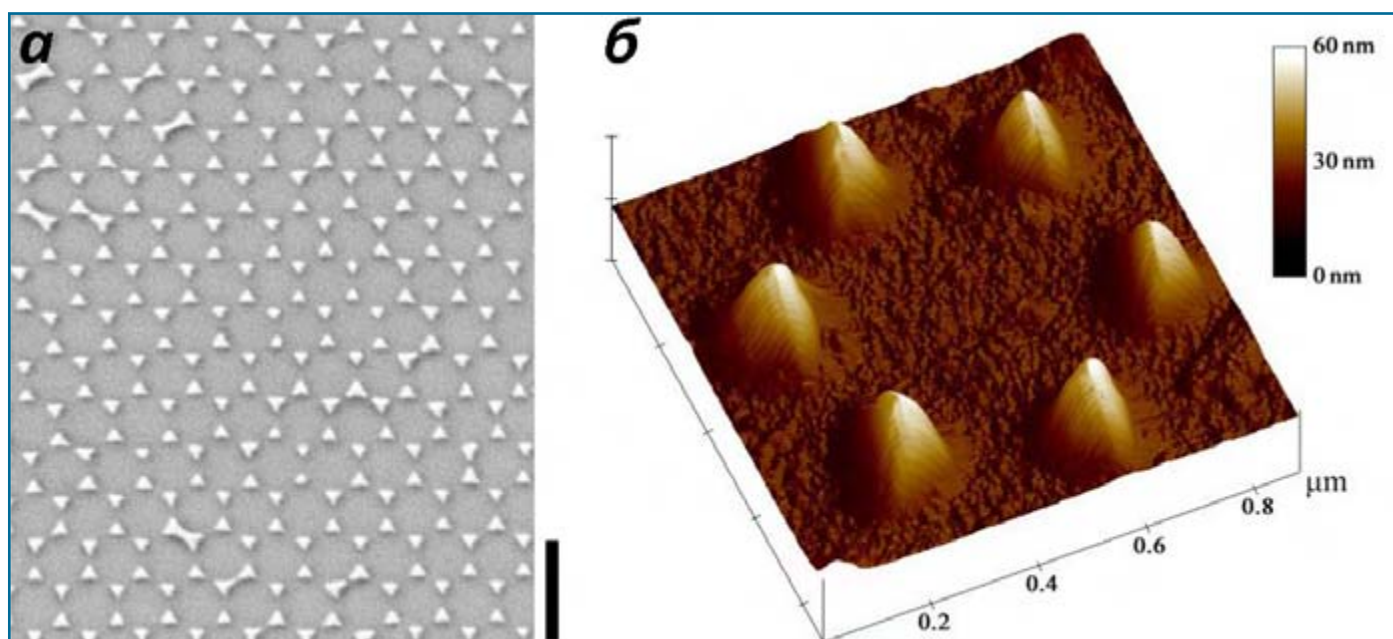
формировании массивов упорядоченных наночастиц при помощи структур, образованных значительно более крупными коллоидными частицами, которые упорядочить гораздо проще.

Схема метода НЛ приведена на рис. 1. На первом этапе близкие по размерам сферические коллоидные частицы (их средний размер может составлять от 200 нм до 1 мкм) «упаковывают» на требуемой подложке – как правило, на атомно-гладкой поверхности монокристаллического кремния – в виде плотноупакованного монослоя (см. *Самосборка*). Несмотря на то, что коллоидные сферы плотно прижаты одна к другой, монослой содержит систему эквидистантных пустот треугольной формы (рис. 1а). На втором этапе на монослой напыляют тонкий слой требуемого вещества, как правило, толщиной < 100 нм, которое не проникает в области, «затененные» коллоидными частицами, и достигает подложки только в открытых местах. В результате этой процедуры на подложке возникает система упорядоченных наночастиц требуемого вещества, разделенных



**Рис. 1.** Схема НЛ: а – монослой сферических коллоидных частиц, б – пустоты между частицами заполнены требуемым веществом, в – упорядоченный массив наночастиц требуемого вещества, полученный в результате удаления исходных коллоидных сфер



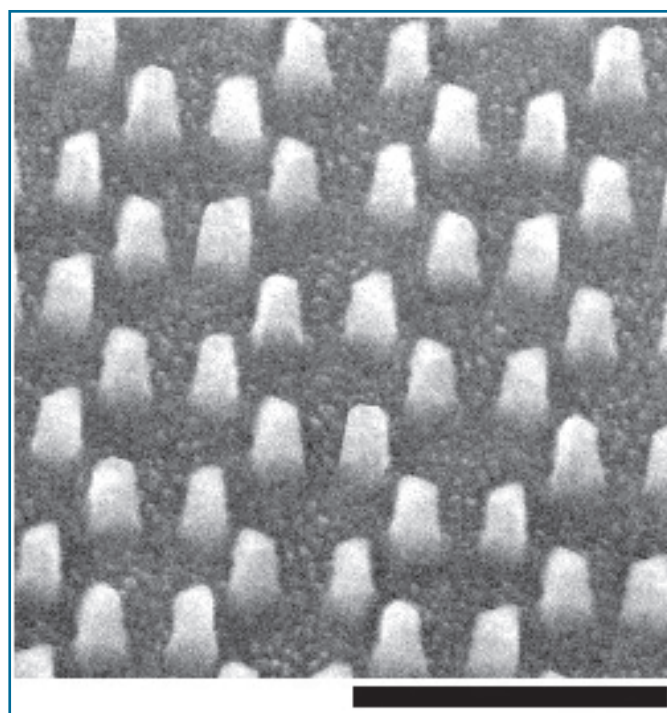


**Рис. 2.** Упорядоченные наночастицы хрома на поверхности кремния (сканирующая электронная микроскопия (а)– шкала 1 мкм и атомно-силовая микроскопия (б)) (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

коллоидными сферами (рис. 1б). На последнем этапе коллоидные частицы удаляют путем растворения в соответствующем растворителе (рис. 1в). В качестве примера на рис. 2 представлены микроскопические изображения наночастиц хрома, полученных методом НЛ.

К несомненным достоинствам НЛ относятся возможность получения структурированных наночастиц практически любых материалов, исходно создавая упорядоченные системы из значительно более крупных микрочастиц, работать с которыми проще; возможность покрытия наночастицами подложек любой площади. Оксидные наночастицы можно синтезировать окислением соответствующих металлических наночастиц в атмосфере кислорода. Впрочем, недостатки метода НЛ также очевидны – невозможно независимо варьировать размер наночастиц и расстояние между ними, создавать структуры отличной от гексагональной геометрии.

С использованием метода НЛ можно получать не только двумерные, но и трехмерные структуры. Действительно, если в методе НЛ система коллоидных сфер используется в качестве маски для напыления на подложку требуемого вещества, то почему бы не использовать систему полученных таким образом наночастиц в качестве маски для травления самой подложки? Например, если структуру, показанную на рис. 2 (наночасти-



**Рис. 3.** Упорядоченные Si нанокolonны, угол обзора– 45°, шкала– 1 мкм (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

цы хрома на поверхности кремния) поместить в агрессивную среду, то травление кремния начнет происходить только в областях, «незащищенных» наночастицами хрома, в результате чего можно будет сформировать систему упорядоченных кремниевых нанокolonн (рис. 3).

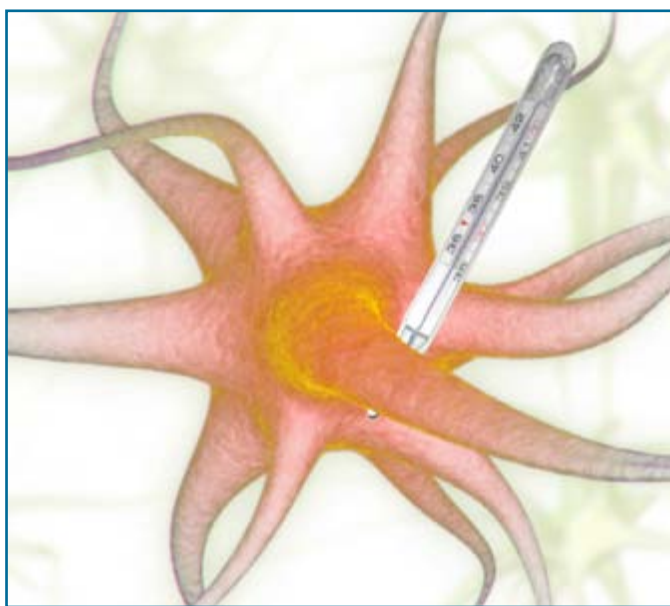
#### Литература:

1. Hulteen J.C., Van Duyne R.P. J. Vac. Sci. Technol. 1995. Vol. A 13(3). P. 1553–1558.

## НАНОТЕРМОМЕТР (Nanothermometer)

*«...множество мелких частиц, движущихся с той или иной скоростью, которые, встречаясь с нашим телом, проникают в него с величайшим проворством, их прикосновение ... и есть то воздействие, которое мы называем теплом (температурой)...».*

*Пробирных дел мастер, Галилео Галилей*



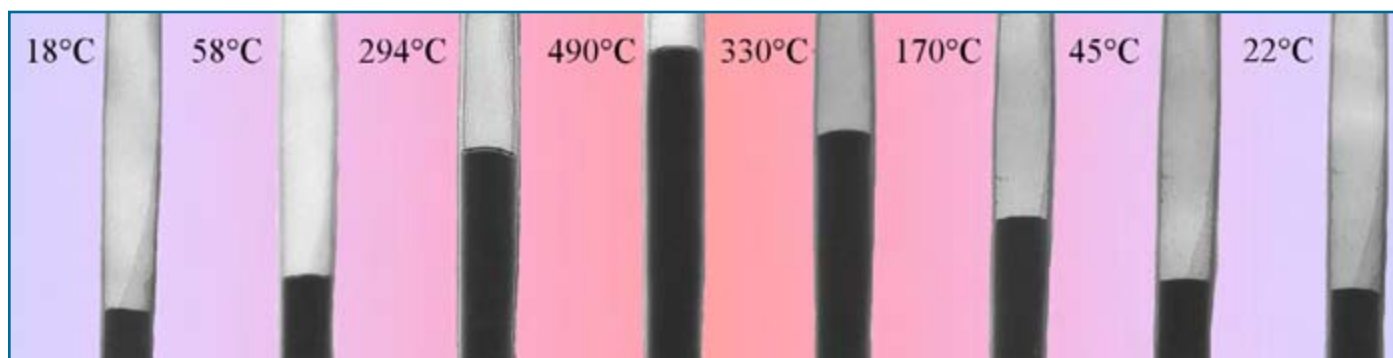
Одной из наиболее важных и часто измеряемых физических величин, с которыми мы сталкиваемся повсеместно, помимо длины, массы и времени, является температура – она характеризует любой живой или неживой объект, а также окружающую его среду. Температура отражает внутреннюю энергию любого тела, т.е. кинетическую энергию составляющих его атомов или молекул.

С момента, когда в 1593 году Галилео Галилей изобрел первый ртутный термометр с удобной для использования числовой шкалой, ни у кого не возникает вопроса – как определять температуру. Однако, не каждый, измеряя, к примеру, температуру собственного тела, задумывается о физическом процессе, лежащем в основе действия обычного медицинского термометра. Речь идет об одном из уникальных свойств некоторых материалов – высоком коэффициенте

термического расширения, который приводит к значительному изменению объема даже в результате небольшого, на десятую долю градуса, изменения температуры окружающей среды. Для измерения температуры можно использовать не только эффект изменения объема материала с температурой, но и любые другие температурно-чувствительные свойства веществ, а также диагностируя испускание телами электромагнитного излучения. Единственным требованием является строгая обратимость в режиме многократного нагревания–охлаждения. Так, созданы высокоточные электрические термометры, принцип работы которых основан на изменении сопротивления проводника, или изменении контактной разности потенциалов между проводниками с различной плотностью носителей заряда (термопара). Температурная чувствительность оптических свойств некоторых материалов (изменение оптического спектра) позволяет их использовать для создания оптических термометров. Именно так измеряют температуру недостижимых для нас звезд.

Итак, уже давно стало возможным, используя различные свойства веществ, создавать разнообразные макроскопические термометры. Но наука не стоит на месте – бурное развитие нано- и биотехнологий привело к разработке и миниатюризации новых высокоточных технологий измерения температуры применительно к объектам нанометровых масштабов, например, электронным или биологическим (отдельные клетки, интегральные схемы).

Традиционным стало использование биметаллических наносенсоров, полученных нанесением тонкого слоя одного металла на поверхность



**Рис. 1.** Нанотермометр на основе заполненной галлием углеродной нанотрубки

другого методами литографии или осаждения из газовой фазы. Такие наносистемы обладают очень высокой чувствительностью к изменению температуры, что позволяет с их помощью фиксировать даже очень слабые ее изменения (например, температурный коэффициент Pt/W наносенсора, равный 5,4 мВ/°С, в 130 раз превышает чувствительность традиционных термопар и способен зафиксировать изменение температуры в 0,001 °С). Биосовместимые квантовые точки и флуоресцентные наночастицы с модифицированной поверхностью успешно используются в качестве оптических нанотермометров для градуирования биологических систем.

Однако самым интересным из всех известных сегодня нанометровых термометров является созданное японскими инженерами устройство на основе многостенной **углеродной нанотрубки**, напоминающее по своей конструкции и принципу действия уменьшенный в миллиарды раз обычный ртутный термометр. Многостенная углеродная нанотрубка, представляющая собой ряд замкнутых с одного конца концентрических цилиндров, длиной порядка 10 мкм и диаметром около 75 нм, служит корпусом нанотермометра. В качестве температурно-чувствительного элемен-

та выступает металлический галлий, заполняющий часть внутреннего пространства нанотрубки (рис. 1). Прецизионные измерения показали, что в интервале 50–500 °С зависимость высоты столбика галлия от температуры строго линейна как при повышении, так и при понижении температуры (рис. 1). Кроме того, поскольку углеродная нанотрубка открыта с одного конца, то при нагревании нанотермометра на воздухе на поверхности столбика галлия образуется слой оксида, обладающего хорошей адгезией к поверхности трубки. В результате длина металлического столбика остается фиксированной «оксидным маркером» даже после охлаждения системы до комнатной температуры, что дает возможность считать данные спустя несколько часов после проведения измерений. Единственным недостатком нанотермометра является его миниатюрность: для считывания показаний и определения температуры необходим **электронный микроскоп**. В 2004 году изобретение японских инженеров было занесено в книгу рекордов Гиннеса как самый маленький в мире термометр.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Lee J., Kotov N.A. Nanotoday. 2007. Vol. 2. P. 48.

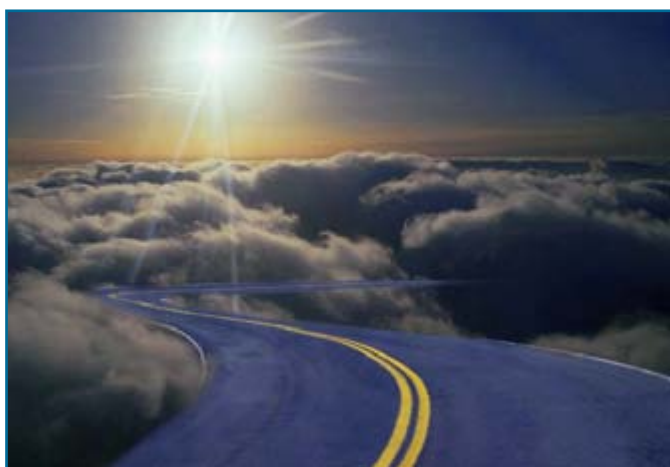


## НАНОТЕХНОЛОГИИ

### (Nanotechnology)

*«Нанотехнологии – это ворота, открывающиеся в совершенно новый мир».*

*Р. Колвелл*



Есть все основания полагать, что в недалеком будущем нанотехнологии займут в нашей жизни несравненно более важное место, чем мобильный телефон, Интернет или цифровая камера. Но это дело будущего, а пока далеко не каждый человек представляет себе, что такое нанотехнологии и чего следует ожидать с их приходом в повседневную жизнь.

Из книг или Интернет-сайтов можно почерпнуть, что среди ученых (и тем более не ученых) отсутствует единое представление о нанотехнологиях. Есть немало исследователей, которые называют нанотехнологиями процессы атомной и молекулярной сборки с образованием разнообразных нанопродуктов, обладающих уникальными свойствами. Принципиальная возможность регулировать и контролировать процессы создания структур на атомном уровне была высказана Р. Фейнманом в 1959 г., но потребовалось еще 17 лет, чтобы появился инструмент – **атомно-силовой микроскоп**, позволивший реально осуществить такие процессы, названные

технологией «снизу-вверх». Однако, наряду с ней существует и другой путь создания нанопродуктов и **наноструктур** – «сверху-вниз», который связан с осуществлением разнообразных процессов в объемных телах, включая их механическое диспергирование, интенсивные пластические деформации или распад твердых растворов на основе многокомпонентных сплавов и сталей.

Все это вместе взятое позволяет определить нанотехнологии как совокупность процессов, позволяющих создавать материалы, устройства и технические системы, функционирование которых определяется наноструктурой, т.е. ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм.

Как уже отмечалось ранее, нанотехнология является чрезвычайно сложной, междисциплинарной наукой, объединяющей воедино усилия физиков, химиков, математиков, биологов, специалистов в области медицины и вычислительной техники (см. **Междисциплинарность**). И в этом, пожалуй, одна из важнейших и нерешенных полностью проблем взаимопонимания исследователей и взаимопроникновения идей, имея в виду различия в фундаментальных подходах ученых с различным базовым образованием. Достаточно вспомнить дискуссию между Э. Дрекслером, автором знаменитой книги «Машины созидания: наступление нанотехнологической эры» и Р. Смолли, одним из первооткрывателей фуллерена, удостоенным Нобелевской премии. Эта дискуссия, опубликованная в форме обмена письмами 1 декабря 2003 г. в журнале «Chemical and Engineering News», отражала принципиально различные подходы к так называемой молекулярной инженерии. Если у Э. Дрекслера в основе нанотехнологии положено механическое мани-



Рис. 1. Рисунок из брошюры Европейской комиссии «Нанотехнологии. Новинки завтрашнего дня»

пулирование молекулярными объектами с образованием нанопродуктов или наносистем, то Р. Смолли, будучи химиком, считал, что определяющими факторами являются химические взаимодействия.

Можно спорить об истоках возникновения нанотехнологий, но нельзя отрицать, что именно в США впервые в мире была выработана государственная стратегия по отношению к развитию нанотехнологий. Речь идет, в частности, о знаменитой Национальной нанотехнологической инициативе (2000 г.), введению которой предшествовало следующее заявление американского президента Клинтона: «Я выделяю 500 миллионов долларов в текущем финансовом году на государственную нанотехнологическую инициативу, которая позволит нам в будущем создавать новые материалы (превосходящие по характеристикам существующие в тысячи раз), способные записать всю информацию Библиотеки Конгресса на крошечном устройстве, диагностировать раковые заболевания при появлении нескольких пораженных клеток и добиться других поразительных результатов. Предлагаемая инициатива рассчитана, по крайней мере, на двадцать лет и обещает привести к важным практическим результатам».

Ниже перечислены важнейшие цели, намеченные Национальной нанотехнологической инициативой США:

- создание крошечных по размеру запоминающих устройств с мультитерабитовым объемом памяти;
- развитие технологии обработки веществ и материалов на атомарном и молекулярном уровне;
- создание сверхпрочных материалов и разработка на их основе новых транспортных средств;
- создание сверхминиатюрных транзисторов и повышение быстродействия компьютеров в миллион раз. Разработка генетических и медицинских препаратов против раковых заболеваний;
- разработка новых материалов и процессов для защиты окружающей среды; новые методы очистки воды и воздуха;
- увеличение КПД солнечных батарей в два раза.

Программа развития нанотехнологий и nanoиндустрии в Российской Федерации, разработанная лишь в этом году, при всей масштабности поставленных целей, потребует невероятных усилий для их достижения. Однако, нет сомнений, что развитие нанотехнологий окажет огромное воздействие как на жизнь отдельных людей, так и на судьбу всего человеческого сообщества в целом.

## НАНОТОКСИЧНОСТЬ (Nanotoxicity)

*«Все в мире есть яд, и лишь только доза делает  
вещество безопасным».*

*Парацельс*



Способность безвредных веществ при сильном измельчении становиться опасными для здоровья человечеством было открыто давно, задолго до появления нанотехнологий. Еще в древние времена люди, занятые выплавкой цинка, страдали от цинковой лихорадки, вызванной вдыханием аэрозолей окиси цинка. Также всем известно канцерогенное действие асбестовой пыли, вызывающей рак легких и брюшины. Но все-таки самый масштабный ущерб здоровью наносит вдыхание наночастиц углерода, образующихся

при неполном сгорании органического топлива в двигателях автомобилей, на электростанциях, а в особенно больших количествах попадающих в легкие человека в процессе курения. Дело в том, что защитные механизмы легких совершенно не способны переработать или удалить углеродную нанопыль, и она остается там навсегда, вызывая рефлекторное сужение бронхиол и альвеол и снижая тем самым количество кислорода в крови.

Поэтому в эпоху нанотехнологической революции ученые, создавая и используя новые **наноматериалы**, должны чувствовать ответственность перед обществом, учиться прогнозировать влияние наночастиц на здоровье людей и экологию всей планеты. Для того чтобы предотвратить нанесение ущерба, необходимо знать токсикологию **наночастиц**.

Характерная особенность веществ в наносостоянии – это способность «проходить» через защитные системы организма. Например, частицы мельче нескольких сотен нанометров легко проникают во внутрилегочное пространство, а нанометровые частицы свободно поступают из легких в кровоток. Именно так попадает в организм человека вирус гриппа, являющийся сложной природной наночастицей.

Если проникновение наночастиц в легкие происходит, как правило, против нашего желания, то на кожу мы их наносим добровольно и с огромным удовольствием – наночастицы являются ключевой составляющей большинства всевозможных кремов, рекомендованных дерматологами и косметологами. Действительно, кремы для «омоложения» кожи содержат наноразмерные липосомы, а актуальные в период летних отпусков кремы «от загара» – высокоэффективные наночастицы оксидов титана  $\text{TiO}_2$  и цинка



ZnO, поглощающие УФ-часть солнечного спектра. Однако практически никто не задумывается о том, что наночастицы  $\text{TiO}_2$  проникает внутрь кожи и обнаруживаются в эпидермисе уже через 8 часов после нанесения крема. Не удивительно, что с момента начала массового применения таких кремов заболеваемость раком кожи, к примеру, в США увеличилась на 90%! В отличие от дыхательной системы и кожи поведение наночастиц в желудочно-кишечном тракте мало исследовано – известно лишь, что они быстро выводятся из организма.

Опираясь на накопленные к настоящему моменту знания о свойствах различных наночастиц, можно выделить три основные причины их вредного воздействия на здоровье человека.

Во-первых, токсичным может быть основное вещество наночастицы. Например, в водорастворимых наночастицах селенида кадмия,  $\text{CdSe}$ , именно  $\text{Cd}^{2+}$ , ядовитость которого велика как в нано-, так и в макросостоянии, обладает токсическим действием. При этом цитотоксичность  $\text{CdSe}$  коррелирует с количеством кадмия, выделившегося из них при окислении, и может быть многократно снижена при покрытии оболочкой из  $\text{ZnS}$  или  $\text{SiO}_2$ . В качестве другого примера можно привести ультрадисперсные частицы оксида бериллия, а также металлического бериллия и его соединений, вдыхание которых вызывает медленно развивающееся заболевание легких со смертельным исходом – бериллез. В то время как компактный  $\text{BeO}$  исключительно инертный и безвредный для здоровья материал, высокореакционные наночастицы этого оксида, попадая в клетки легких, дают растворимый фосфатный комплекс  $\text{Be}^{2+}$ , который ингибирует фосфатазу и вызывает гибель клеток.

Во-вторых, даже если попавшие в организм наночастицы сами по себе безвредны, некоторые из них могут выступать в роли катализаторов образования токсичных веществ. Так ведут себя рассмотренные выше наночастицы  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$ , катализируя фотоокисление, вирусы, наночастицы оксидов железа и некоторых других металлов, вызывающие металлическую (в частности, цинковую) лихорадку.

И, наконец, специфическое воздействие вещества на организм может быть обусловлено непосредственно тем, что оно находится в наносостоянии. Например, химически инертный и безопасный

полимер фторопласт, широко используемый для изготовления посуды, будучи распыленным в воздухе в виде наночастиц диаметром 26 нм в ничтожной концентрации ( $60 \text{ мкг/м}^3$ ), способен убить крысу за 30 минут, вызывая кровоизлияния в легких. В это сложно поверить, но фторопластовая нанопыль на порядок токсичнее, чем боевое отравляющее вещество VX! А вдыхание аэрозолей наночастиц диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  вызывает силикоз – хроническое разрушение легких, в то время как в макрокристаллическом состоянии он абсолютно безопасен – это самый обычный песок, которым покрыты пляжи и наполнены детские песочницы. По-видимому, специфика наночастиц состоит в большой роли поверхности, химия которой (оборванные связи, адсорбированные молекулы) радикально отличается от химии объемного материала – для одного и того же вещества мелкие наночастицы токсичнее крупных. Кроме того, проникнув в клетку, наночастицы способны прилипать к различным органеллам и деформировать ДНК, вызывая структурные разрушения и мутации.

Определенное значение в нанотоксичности имеет форма наночастиц. Анизотропные наночастицы (например, волокна асбеста) ассоциируются с увеличением риска фиброза и рака легких. Аэрозоль **углеродных нанотрубок** приводит к прорастанию волокон и утолщению соединительной ткани в легких мышей. А попадая в эпидермис, нанотрубки вызывают выделение клетками кожи цитокина, являющегося модулятором воспалительных процессов.

В заключение хотелось бы обратить внимание на приведенные в эпиграфе слова Парацельса. Даже такое полезнейшее вещество, как кислород, в больших дозах ядовито – через трое суток нахождения в атмосфере чистого кислорода человек погибает от отека легких. Для большинства же наночастиц токсичные дозы неизвестны, остается лишь надеяться, что в будущем они будут определены, а пока просто следует соблюдать элементарную осторожность при работе с такими объектами.

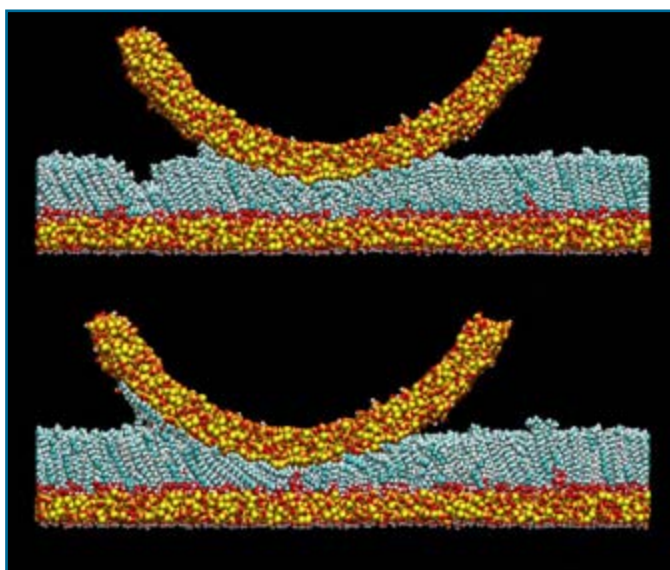
### *Литература:*

1. Зарубежная наука и техника Вып. 38. Нанотехнологии и здоровье человека.
2. Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J. Environmental Health Perspectives. 2005. Vol. 113. P. 823.
3. Hoet P., Bruske-Holfeld I., Salata O. Journal of Nanobiotechnology. 2004. Vol. 2. P. 12.

## Нанотрибология (Nanotribology)

*«Ты слишком долго не затачивал лезвия, — спокойно объяснил Эрнадо, снова щелкая кнопкой. — Твой меч успел затупиться от трения о воздух. Толщина клинка стала равняться трем-четырем атомам...».*

*С. Лукьяненко. «Принцесса стоит смерти»*



**Рис. 1.** Острие  $\text{SiO}_2$  с радиусом 10 нм в контакте с самособирающимся монослоем алкилсиланов на подложке  $\text{SiO}_2$ . Показаны деформация и разрушение слоя при контакте с острием. Источник: Chandross M., Lorenz C.D., Grest G.S., Stevens M.J., Webb E.B. Nanotribology of Anti-Friction Coatings in MEMS // J. Minerals, Metals, and Materials (JOM). 2005. Vol. 57. P. 55.

Известно, что на микро- и наноуровне поверхностные силы доминируют над объемными. Более того, ввиду малой массы микро- и наномеханические элементы различных систем обладают малой инерцией, что выражается в высоких динамических характеристиках (скорости отклика) и высокой рабочей частоте собственных колебаний. В связи с этим при разработке микромеханических устройств большое значение следует уделять трению и износу движущихся частей,

так как это приводит как к энергетическим потерям и снижению общего КПД, так и к уменьшению срока их службы. Задача нанотрибологии заключается в объяснении и моделировании трения в атомарном масштабе. В отличие от микротрибологии, использующей представления и терминологию теории сплошных сред, в данном случае на первый план выступают более фундаментальные понятия, основанные на взаимодействиях отдельных атомов.

Во многих моделях, описывающих процессы трения на микроуровне, рассматривают взаимодействие выступа с некоторой поверхностью. В связи с этим, основным экспериментальным методом микротрибологии стала сканирующая зондовая микроскопия (соответствующая методика носит название «метода латеральных сил»). Острие зонда позволяет «почувствовать» трение на чрезвычайно малой контактной площадке, состоящей из одного или нескольких атомов. Одной из основных особенностей нанотрибологии является эффект прилипания–скольжения, заключающийся в неравномерности движения одной поверхности относительно другой. В некоторый момент выступы поверхностей слипаются в результате адгезии или капиллярных сил, и для их последующего отрыва необходима преобладающая сила. Эффект прилипания–скольжения существенно зависит от скорости движения. Так, при достижении некоторой критической скорости скольжения эффект пропадает, и сила трения становится регулярной. При этом выяснилось, что физические процессы в трибоконтактах значительно богаче и разнообразнее, чем можно было бы предполагать, и включают множество принципиально новых явлений..

### Литература:

1. Дедков Г.В. Успехи физических наук. 2000. № 170. С. 585–618.
2. <http://www.pacificnano.com/nanotribology.html>

## НАНОФАРМАКОЛОГИЯ

### (Nanopharmacology)

---

*«К 2010 г. половина всех лекарств будет производиться с использованием нанотехнологий».*

*Национальный научный фонд США*



Разработка нового лекарства – очень длительный и дорогостоящий процесс: выпуск каждого медицинского препарата на рынок на текущий момент оценивается в среднем в 800 миллионов долларов. По статистике, проходит не менее 12 лет с момента лабораторных испытаний и патентования той или иной лекарственной формы до ее появления в аптеках, а из 5 тыс. предложенных новых лекарств лишь 5 доходят до стадии клинических испытаний, и только 1 из 5 в результате используется для широкого применения. И это в том случае, когда речь идет о традиционных лекарственных препаратах. Уже для многих очевидно, что будущее фармацевтики связано с применением высокотехнологических подходов, поэтому себестоимость исследований и риск неудачи будут только увеличиваться. Однако, как говорится, овчинка стоит выделки – создание новых препаратов, действующей основой которых являются наноструктурированные лекарственные формы, позволит добиться направленного действия лекарства, его лучшей растворимости и усвояемости организмом, а значит более быстро-

го терапевтического эффекта и уменьшения необходимой дозы таких **нанолекарств**, созданием которых занимается новая отрасль фарминдустрии – нанофармакология.

Тем не менее, в настоящий момент в традиционной медицине для устранения симптомов болезни по-прежнему применяют относительно высокие дозы лекарственных веществ, в результате чего зачастую возникают различные побочные эффекты, которые могут не только замедлить выздоровление, но и даже ухудшить состояние больного. Как же можно уменьшить дозировки препаратов и излечить заболевание нанограммовыми количествами лекарства? Дело в том, что лечить надо не организм в целом, а только больные клетки. Если научиться целенаправленно доставлять к ним лекарственные препараты, например, предварительно заключая их в инертную оболочку и только на месте позволяя ей «открыться», то даже малые дозы будут способны стимулировать процесс выздоровления. А оболочки такие уже найдены – это природные и искусственные полимерные **наноконтейнеры**. Важность доставки лекарства к очагу поражения легко понять на следующем примере. При лечении и профилактике повторного возникновения раковых опухолей применяют химиотерапию. При этом ввод противораковых препаратов осуществляют внутривенно и, следовательно, в дозах, значительно превышающих необходимые, нанося огромный вред здоровым тканям и клеткам – доставив же препарат непосредственно к скоплению раковых клеток, можно сохранить здоровье всего организма. Но как «научить» лекарства искать в организме нужные пути, распознавая больные клетки? Оказывается, об этом



природа уже отчасти позаботилась и создала некоторые ключевые элементы для умных лекарственных систем.

В природе существуют множество примеров того, как действуют крайне малые дозы веществ. Известно, что определенные виды мотыльков чувствуют запах ферромонов своего вида на расстоянии свыше двух километров, а акулы способны «уловить» один грамм крови, растворенный в 600 тысячах литров воды! То есть мотыльки и акулы (как и другие живые существа) развили сверхчувствительность к тому, что обеспечивает их выживание. Аналогичные принципы ученые пытаются использовать и в современной медицине.

Большинство читателей, наверное, слышали о гомеопатической медицине. Дозы химических веществ в гомеопатических лекарствах столь малы, что их специально приходится разбавлять в тысячи и даже десятки тысяч раз связывающими компонентами (крахмалом, например), чтобы пациент смог хотя бы увидеть таблетку. Тем не менее, если человек является сверхчувствительным к данному лекарственному препарату, то этого количества будет достаточно. Так вот, по сути, за «сверхчувствительностью» и скрывается реализация адресной доставки вводимого препарата. Ведь, как известно, появление в ор-

ганизме чужеродных молекул – антитигонов – вызывает моментальный ответ иммунной системы, который проявляется в вырабатывании антител – специфических белков, способных распознать и связать антиген. Поэтому антитела могут выступать в качестве ключевых элементов большинства нанолечений, своеобразными «ищейками» очагов болезни на клеточном уровне.

Итак, «Уменьшение дозировки» и «Направленность действия» – вот основные лозунги, под которыми нанофармакология должна уверенно шагать в будущее. Снижение дозировки применяемых лекарственных средств в некоторых случаях позволит использовать высокоэффективные препараты, применение которых для лечения некоторых больных ограничивается из-за большого количества противопоказаний. Кроме того, в ряде случаев можно значительно снизить стоимость лечения дорогостоящими (в том числе онкологическими) препаратами, сделав его более доступным.

Будем надеяться, что развитие *нанотехнологий* и *наномедицины* в ближайшем будущем даст нам дополнительные представления о воздействии на организм сверхмалых доз вещества и откроет новые перспективы для нанофармакологии.

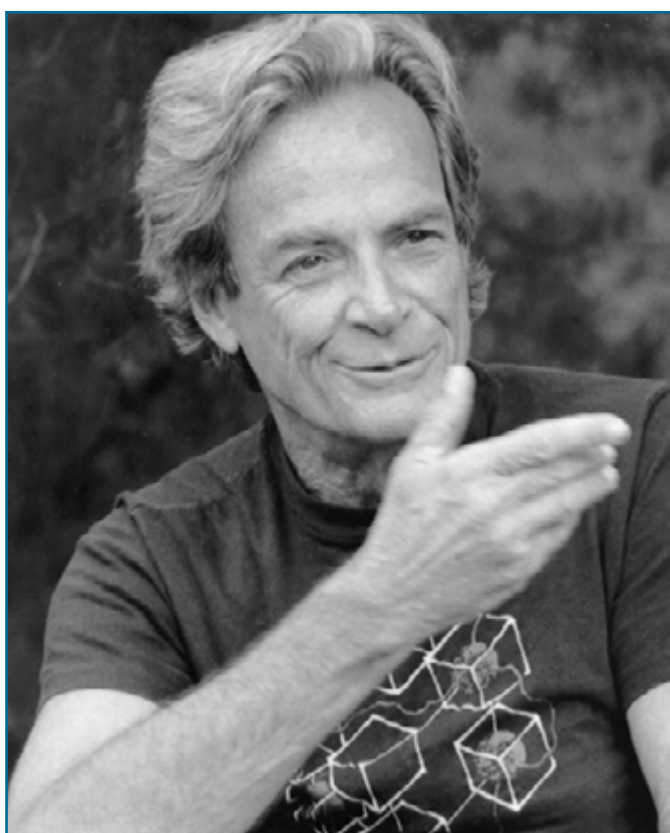
#### Литература:

1. <http://www.i-sis.org.uk/nanopharmacology.php>
2. <http://www.mednet.com/medeks/gom/teorya.htm>
3. <http://www.ipin.ru/>

## НАНОФИЗИКА (Nanophysics)

«Там, внизу, много места!»

Р. Фейнман



Ричард Филиппс Фейнман

29 декабря 1959 года на рождественском обеде Американского физического общества, проходившем в Калифорнийском технологическом институте, будущий нобелевский лауреат и создатель теории квантовой электродинамики Ричард Филиппс Фейнман прочитал лекцию «Там внизу много места: приглашение в новый мир физики».

«...Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма

важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений. Речь идет о проблеме контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. Внизу (т.е. «внизу или внутри пространства», если угодно) располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира...»

Тогда он предвосхитил возникновение целого ряда областей в науке и технике, которые стали неотъемлемой частью современного естествознания и получили название **нанотехнология**. Электронно-лучевая и ионно-лучевая обработка материалов, **молекулярно-лучевая эпитаксия**, **наноитография**, **электронная микроскопия**, манипуляция отдельными атомами с помощью **атомно-силовой микроскопии**, **нанoeлектро-механические системы**, спинтроника, квантовая электроника – лишь некоторые из них. Едва ли в этой яркой, динамично развивающейся науке имеет смысл выделять отдельные области физики, химии, механики или биологии. Ее характерной чертой является **междисциплинарность**, тесное переплетение фундаментальных и прикладных исследований, в которых физики объединяют свои усилия с химиками или биологами, а зачастую невозможно обойтись и без помощи механики. Тем не менее, принято считать, что нанофизика занимается исследованием свойств наноразмерных объектов, строит научные модели, а иногда даже пытается предсказать, какими физическими свойствами будет обладать вещество или материал, будь он в наноразмерном состоянии.

### Литература:

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Feynman>

## НАНОХИМИЯ (*Nanochemistry*)

*«Во всем этом нет ничего таинственного или магического. Это химия, и ничего больше».*

*Артур Конан-Дойл.*

*«Кольцо Тота»*



Химия как наука о веществах и их взаимных превращениях фактически с самого своего рождения сталкивалась с получением нанодисперсных систем. Уже более 1000 лет назад в Китае был известен способ получения нанодисперсного золота, которое использовали для окраски фарфоровых изделий. Однако только лишь относительно недавно (в последние 20–25 лет) химики получили возможность изучать наносистемы и даже непосредственно наблюдать частицы, размер которых составляет порядка 1 нм. Оказалось, что подобные **наночастицы** обладают весьма необычными химическими свойствами и, в частности, с ними возможно осуществление реакций, которые не идут с участием частиц макроскопического размера. Химические свойства и методы получения веществ в нанодисперсном состоянии стали предметом изучения новой области знания – нанохимии.

Нанохимия – это раздел химической науки, изучающий процессы, протекающие при формиро-

вании нанодисперсных систем, а также физико-химические свойства таких систем.

Поскольку наночастицы по своим размерам занимают промежуточное положение между молекулами и микроскопическими частицами, их синтез можно вести двумя различными способами. Первый основан на объединении атомов, молекул или кластеров в нанобъекты. Этот подход к синтезу может быть назван синтезом «снизу-вверх». Второй, синтез «сверху-вниз» основан на измельчении каким-либо способом крупных частиц вещества или дезинтеграции объемной структуры без механического разрушения

Основной проблемой, стоящей перед новой наукой, можно назвать установление влияния размера частиц (или, другими словами, числа составляющих их атомов) на их химическую активность. Переход от изучения привычных для химиков молекул или компактных тел к исследованию нанобъектов вынуждает их во многом пересматривать уже устоявшиеся теоретические представления о свойствах веществ, а также изобретать совершенно новые синтетические методики. Основная особенность нанохимии как науки – ее **междисциплинарность**. В ходе решения как конкретных прикладных, так и неотделимых от них фундаментальных задач тесно переплетаются подходы и методы, используемые в физике, химии, биологии, материаловедении. Успешное развитие различных направлений нанонауки в целом и нанохимии в частности немыслимо без тесного сотрудничества ученых различных специальностей и различных научных школ в рамках единой общей задачи или программы. Междисциплинарность нанохимии требует изменения и совершенствования методических подходов к обучению и подготовке специалистов, которые будут определять развитие естествознания в наступившем столетии.

### Литература:

1. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М.: Изд-во МГУ, 2003. 288 с.

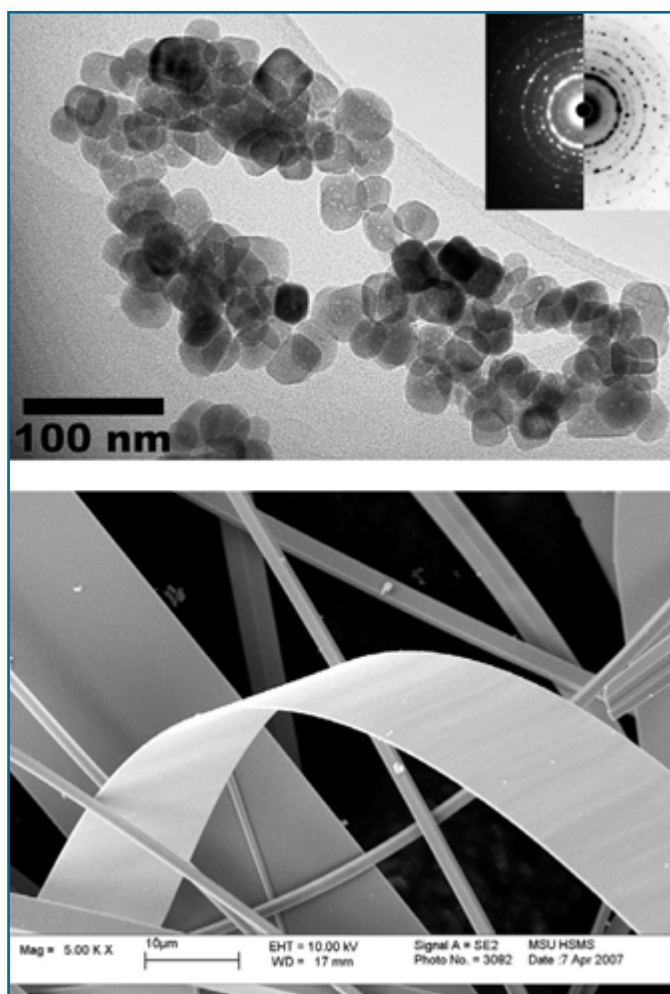


## НАНОЧАСТИЦЫ (Nanoparticles)

*Стеклом познали мы толики чудеса,  
Чем он наполнил понт, и воздух, и леса.  
Прибавив рост вещей, оно, коль нам потребно,  
Являет трав разбор и знание врачебно;  
Коль много Микроскоп нам тайностей открыл,  
Невидимых частиц и тонких в теле жил!*

*М.В. Ломоносов.*

*«Письмо о пользе стекла...»*



Такие разнообразные наночастицы: «нановосьмерка» из частиц  $\text{BaTiO}_3$  (вверху) и «тонкие» ленты  $\text{SnO}_2$  (внизу)

Термин «наночастица» или «наноразмерная частица» прочно вошел в научный лексикон около 20 лет назад, однако критерий наноразмерности до сих пор является предметом многих научных дискуссий. Согласно международной конвенции IUPAC, предельный (максимальный) размер на-

ночастиц соответствует 100 нм, хотя эта величина является чисто условной и необходима только для формальной классификации. Последнее время определение наночастиц связывают не с их размером, а с проявлением у них новых свойств, отличных от свойств объемной фазы. Действительно, при переходе вещества от макроразмеров к размерам, всего на один-два порядка больше молекулярных, резко меняются его свойства – с увеличением удельной поверхностной энергии изменяется его поверхностное натяжение, температура плавления и температуры структурных переходов, может измениться сама структура, его электронные характеристики, то есть весь спектр физико-химических свойств, становится иным, чем для веществ в макросостоянии. Поэтому критерием принадлежности частицы того или иного вещества к классу наночастиц правильнее считать сопоставление ее размера с корреляционным радиусом того или иного физического явления (например, с длиной свободного пробега электронов или фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы).

Различают два типа наночастиц: **нанокластеры**, или **нанокристаллы**, и собственно **наночастицы**. К первому типу относят частицы упорядоченного строения (часто centrosymmetric) размером 1–5 нм, содержащие до 1000 атомов, ко второму – собственно наночастицы размером 5–100 нм, состоящие из  $10^3$ – $10^8$  атомов. Нитевидные и пластинчатые частицы могут содержать гораздо большее количество атомов и

иметь один или даже два линейных размера, превышающих пороговое значение, но их свойства в определенном направлении остаются характерными для вещества в нанокристаллическом состоянии. Если наночастица имеет сложную форму и строение, то в качестве характеристического рассматривают не линейный размер частицы в целом, а размер ее структурного элемента. Такие частицы, как правило, называют **наноструктурами**, причем их линейные размеры могут значительно превышать 100 нм.

Различия в линейных размерах наночастиц делают целесообразным подразделять их на нуль-, одно-, двух- и трехмерные (соответственно, 0D-, 1D-, 2D- и 3D-наночастицы). К нульмерным наноструктурам относят свободные и стабилизированные кластеры, **фуллерены** и эндофуллерены и **квантовые точки**. Класс одномерных наноструктур представлен гораздо большим разнообразием нанообъектов: это **наностержни**, **нанонити** (вискеры), **нанотрубки** и наноленты. Среди двумерных наноструктур выделяют **тонкие пленки** толщиной до сотен нанометров, **гетероструктуры**, **пленки Лэнгмюра–Блоджетт**, нанопластины, адсорбционные и **самособирающиеся монослои**, а также двумерные массивы объектов, размеры которых лежат в нанометровом диапазоне. К классу трехмерных наноструктур следует

относить как сами наночастицы и наночастицы в оболочке, так и **нанокомпозиты** и трехмерные самоорганизованные массивы нанообъектов. При этом сами композиты могут включать нуль-, одно- и двумерные объекты, то есть представлять собой массивы квантовых точек, нитей, многослойные пленки или слоистые соединения, а также различные комбинации этих типов наноструктур. На наноуровне оказалось возможным и существование структур промежуточной размерности, т.н. **фракталов** и **дендримеров**, обладающих самоподобием и рассматривавшихся ранее лишь в качестве математических моделей.

В последние годы большие усилия исследователей направлены на получение наночастиц заранее заданных формы и размера, а следовательно, обладающих определенными физико-химическими свойствами – описано множество различных синтетических подходов, каждый из которых обладает своими преимуществами, но и не лишен определенных недостатков. Сегодня все методы получения **наноматериалов** разделяют на две большие группы по типу формирования наноструктур: методы «снизу-вверх» («Bottom-up») характеризуются ростом наночастиц или сборкой наночастиц из отдельных атомов; а методы «сверху-вниз» («Top-down») основаны на «дроблении» частиц до наноразмеров.

#### Литература:

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007.

## НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### (*Nanoelectromechanical systems*)

*«... кратчайшее выражение смысла жизни может быть таким: мир движется и совершенствуется. Главная задача – внести вклад в то движение, подчиниться ему и сотрудничать с ним».*

*Л.Н. Толстой*



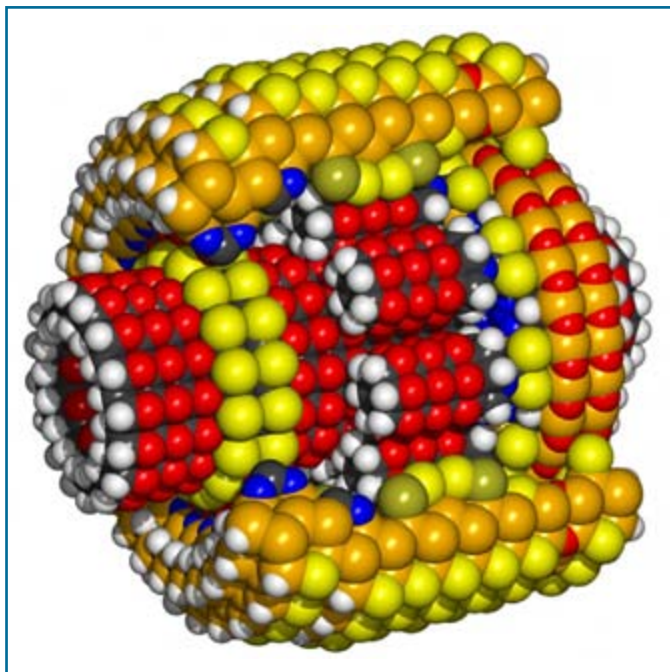
Предположим, что есть наноконструктор, состоящий из нескольких тысяч атомов разного вида. Что с его помощью можно собрать? На автомобиль или домик в деревне такого количества атомов, увы, не хватит. Зато можно с упоением собирать всевозможные молекулы различной формы: кольцеобразные (например, бензол), вытянутые (алканы) сферические (*фуллерены*)... Скучно. Особенно если хочется автомобиль. Впрочем, автомобили собирают из всевозможных дисков, шестеренок, цилиндров, поршней и прочих деталей, которых в нашем конструкторе, к сожалению, нет. Но если задуматься, почему бы нам не использовать вместо всех перечисленных деталей молекулы соответствующей формы и не собрать из них наноавтомобиль? Уже гораздо интереснее, не правда ли? Особенно если не за-

даваться вопросами относительно того, не развалится ли такой автомобиль, сможет ли он ездить и кого будет возить?

Проще сказать, чем сделать. Несмотря на все достижения *нанотехнологии*, любые работы на молекулярном уровне остаются чрезвычайно сложной задачей. Впрочем, современные ученые работают над созданием наносистем, которые являлись бы аналогами хорошо всем известных электромоторов. Эти объекты получили название «наноэлектромеханические системы» или НЭМС, поскольку они развивают наносилы под действием электрического поля или света, или, наоборот, при приложении внешней силы создают электромагнитный отклик.

В настоящее время одной из общих тенденций развития техники является миниатюризация функциональных устройств. В наиболее явном виде эта тенденция проявилась в процессе эволюции электронных компонентов. Если первые транзисторы были настолько велики, что их можно было взять пальцами, то теперь уже никого не удивляет, что процессор современного компьютера состоит из миллионов полевых нанотранзисторов. Вслед за электронными компонентами миниатюризация затронула и электромеханические устройства. Несмотря на то, что поведение однотипных механических устройств в макро- и микромире различно, усилия ученых и инженеров привели к созданию *микроэлектромеханических систем*, которые уже широко применяются даже в нашем быту. Однако сделать следующий шаг и осуществить перенос электромоторов в наномир оказалось еще сложнее. При уменьшении



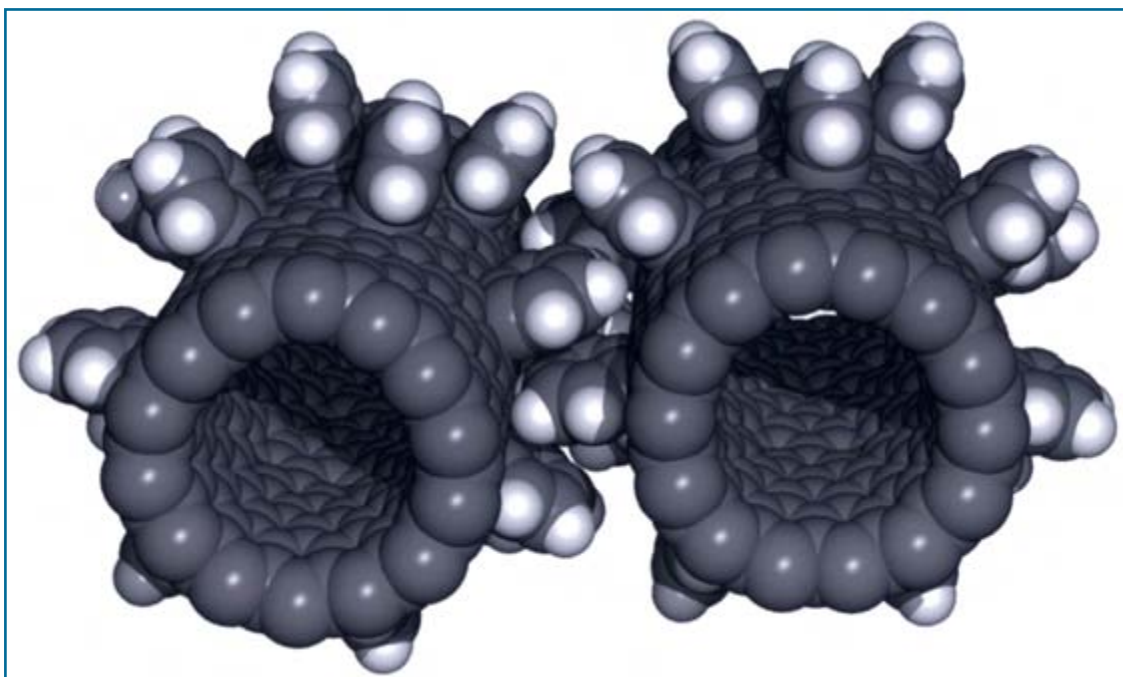


**Рис. 1.** Молекулярный редуктор. Институт молекулярной сборки. США, © IMM, [www.imm.org](http://www.imm.org)

размеров объектов отношение их площади поверхности к объему заметно возрастает, что приводит к значительному увеличению вклада сил трения в механическое поведение наносистем и к доминированию сил трения над силами инерции. Так, время, затраченное на гашение инерции после придания вращательного движения (с одинаковым моментом вращения) мячу, лежаще-

му на поверхности стола, и молекуле фуллерена на поверхности монокристалла кремния, будет различаться на несколько порядков. Однако даже если теоретически возможно описать механическое поведение нанoeлектромоторов, возникает основной вопрос – как их изготовить?

На сегодня можно выделить две основные тенденции в создании НЭМС: уменьшение размера существующих микроэлектромеханических систем и разработка принципиально новых молекулярных двигателей и молекулярных электро-механических устройств. Первый подход связан с очевидными сложностями, поскольку методы, используемые для создания МЭМС (электронная литография, ионное травление и др.) имеют ограниченное разрешение, и поэтому их проблематично использовать для создания нанообъектов. Впрочем, как уже отмечалось во Введении, размер нанoeлектромоторов настолько мал, что для их конструирования вполне можно использовать отдельные молекулы и функциональные группы (рис. 1). В частности, описана возможность передачи вращения с одной нанотрубки на другую (по аналогии с шестеренками – см. рис. 2), а также создание механического осциллятора из группы концентрических нанотрубок. Другим ярким примером НЭМС являются *наномашинны*,



**Рис. 2.** Соединение «наношестеренок» на основе углеродных нанотрубок.  
<http://www.ipt.arc.nasa.gov/carbonnano.html>

способные ездить под действием внешнего электрического поля или света.

Как ожидается, НЭМС произведут революцию в области метрологии, особенно при измерении чрезвычайно малых сил и смещений на молекулярном уровне. Как известно, механические системы колеблются с собственной частотой  $\omega_0 = (k_{\text{эфф}}/m_{\text{эфф}})^{1/2}$ , где  $k_{\text{эфф}}$  – эффективная жесткость, а  $m_{\text{эфф}}$  – эффективная масса системы. Если мы уменьшаем  $l$  – линейный размер устройства, сохраняя его форму, то  $\omega_0$  будет увеличиваться, поскольку  $k_{\text{эфф}} \sim l$ , тогда как  $m_{\text{эфф}} \sim l^3$ . При этом высокие значения величины  $\omega_0$  соответствуют высоким скоростям отклика системы на внешние силы, что позволяет создавать на основе НЭМС чрезвычайно чувствительные измерительные устройства. Уже в настоящее время на основе НЭМС созданы нанорезонаторы с фундаментальной частотой колебаний выше 10 ГГц ( $10^{10}$  Гц), что еще не так давно казалось недостижимым. Такие резонаторы уже нашли применение в качестве *кантилеверов сканирующей зондовой микроскопии*, *нановесов* и *наносенсоров* био-

логических молекул и ДНК. Другим очевидным преимуществом НЭМС является их чрезвычайно низкое энергопотребление.

Следует отметить, что если для ученых создание НЭМС является сложнейшей задачей, решение которой, по-видимому, станет делом ближайшего будущего, Природа уже на протяжении миллионов лет легко создает различные наномеханические устройства. Многие известные биологические системы – *вирусы*, бактерии, одноклеточные микроорганизмы и др. – имеют различные приспособления, позволяющие им перемещаться в зависимости от поведения окружающей среды, в том числе под действием электрических импульсов нейронов. Поэтому одним из актуальных направлений в области создания НЭМС является не разработка принципиально новых, а мимикрия уже известных природных молекулярных моторов (см. *Биомиметика*). Возможно, Природа в очередной раз поможет нам решить задачу, еще не так давно казавшуюся невыполнимой.

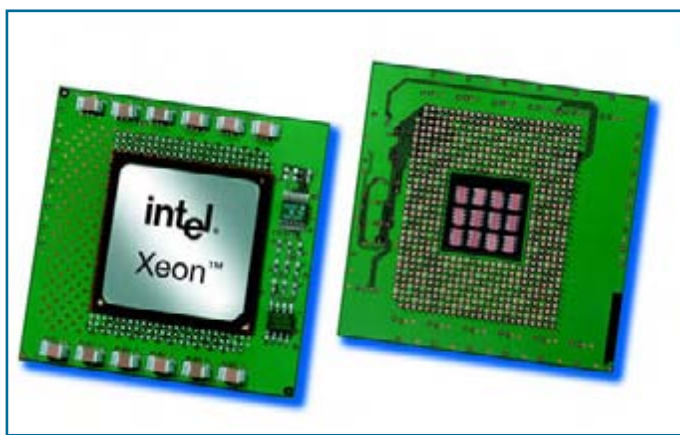
#### Л и т е р а т у р а :

1. Cornelius T. Leondes Mems/Nems: (1) Handbook Techniques and Applications Design Methods; (2) Fabrication Techniques; (3) Manufacturing Methods; (4) Sensors and Actuators; (5) Medical Applications. Springer, 2007. P. 1350.
2. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology Wiley-Interscience. 2003. P. 400.
3. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. М., 2005.
4. [www.imm.org](http://www.imm.org)

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА (Nanoelectronics)

*«Правда невероятнее вымысла, потому что вымысел обязан держаться в рамках правдоподобия, а правда – нет».*

*Марк Твен*



Современный процессор производства компании Intel. Размер элементов транзистора в таких процессорах менее 50 нм

Во второй половине прошлого века электроника прочно вошла в нашу повседневную жизнь (мобильные телефоны, персональные компьютеры, калькуляторы, системы управления двигателем автомобиля), и теперь сложно себе представить день, прожитый без электронных устройств. И даже день отдыха на природе вдали от цивилизации многие проводят с электронным спутниковым навигатором в кармане.

Все знают, что все эти электронные устройства содержат в себе интегральные электронные схемы – чипы, которые быстро обрабатывают электрические сигналы. Но не все догадываются, что чипы в современных приборах являются продуктом **нанотехнологий**. Нанoeлектроника – это формирующаяся сегодня на основе последних достижений нанотехнологии и электроники область техники, которая занимается разработкой физических и технологических основ создания

интегральных электронных схем с характерными размерами элементов менее 100 нм. Исследования в этой области направлены на создание нового поколения быстродействующих систем обработки информации. Расчеты ученых показывают, что **транзистор** (основной компонент электронных микросхем) должен сохранять свои переключательные и усилительные способности при уменьшении его размеров вплоть до 10 нм. Ожидается, что переход этого рубежа произойдет к 2020 году. Дальнейшее уменьшение размера транзистора приведет к качественному изменению его свойств, когда главную роль будут играть так называемые **квантово-размерные эффекты**. Тогда человечество вступит в эру квантовых чипов и **квантовых компьютеров**, а основной задачей исследователей станет не уменьшение элементов существующей технологии, а разработка новых переключающих, запоминающих и усиливающих элементы для сверхбыстрых универсальных суперкомпьютеров будущего.

Собственные нанoprogramмы – программы по исследованиям в области нанoeлектроники – развивают все ведущие разработчики электроники: IBM, Hewlett-Packard, Hitachi, Agilent, Lucent, Infineon, Mitsubishi, Motorola, NEC. В 2004 году на Международной конференции по электронным устройствам в Сан-Франциско компания IBM представила новую технологию, позволяющую втрое увеличить производительность транзисторов. Ускорить работу позволил слой напряженного германия, нанесенный на затвор транзистора. Новые чипы, изготавливаемые по



32-нанометровому процессу, компания планирует выпустить к 2013 году.

Немецкие специалисты из компании Infineon Technologies на той же конференции продемонстрировали электронный чип для **устройств хранения информации** размером всего 20 нм. Аналогичные по характеристикам широко применяемые элементы записи flash-памяти имеют почти в 5 раз большие размеры. Миниатюрный чип исследователям удалось создать благодаря трехмерному расположению слоев полупроводников, тогда как подобных размеров трудно добиться для традиционных «плоских» транзисторов.

Развитие нанoeлектроники сегодня идет семимильными шагами. Вот некоторые тому примеры. Специалисты Intel совместно с учеными университета Беркли продемонстрировали **одноэлектронный транзистор** на базе открытых нобелевскими лауреатами Ричардом Смолли, Робертом Карлом и Хэрольдом Крото **фуллеренов** (молекул углерода  $C_{60}$ ).

Исследователи из Калифорнийского университета в Сан-Диего и университета Клемсона изготовили транзистор на основе Y-образной **углеродной нанотрубки**, обладающий более высоким быстродействием. Если удастся разработать эффективный метод производства и контроля конфигурации целых сетей на основе нанотрубок, то тогда вполне возможно, что такая наноструктура сможет заменить чип компьютерного микропроцессора.

Нанoeлектроника сегодня – это электроника будущего: согласно **закону Мура** всего через 25–30 лет размер одного транзистора в коммерчески доступной микросхеме должен спуститься до размеров одиночной молекулы, а с другой стороны, внедрение технологии и коммерциализация производства – это достаточно долгий процесс, занимающий порой до 10–15 лет. То есть разрабатывать такие компоненты надо начинать уже сейчас! Что ж, следующий шаг за молекулярной электроникой...

#### Литература:

1. <http://www.research.ibm.com>
2. Ежовский Ю.К. Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 1. С. 56–63.

## Наноэмульсии (Nanoemulsions)

*«Одиночный всплеск цветных эмульсий  
В области сердца без ритма пульса.  
Это знак многоточья в начале фразы,  
Это то, что не видно, но чувствуешь сразу».*  
Е. Райзер



«Пейте, дети, молоко – будете здоровы!» – эта фраза из популярного детского мультфильма была призвана пробудить любовь к молоку, наверное, не у одного поколения малышей. Малыши выросли, но и в зрелом возрасте многие продолжают относиться к молоку, как к жидкости. Жидкость-то жидкость, но не совсем обычная!

Гомогенизированное молоко представляет собой наноэмульсию – мельчайшие капельки липидов (т.е. жиров), находящихся в подвешенном состоянии и равномерно распределенных в воде. Однако возможен и обратный случай – капельки воды, растворенные в липидах. Тем не менее, и в первом, и во втором случаях молекулы вещества, «не желая» однородно смешиваться с молекулами растворителя, упорядочиваются и формируют независимые структуры нанометрового размера – средний размер капель составляет от 50 до 100 нм.

В большинстве случаев эмульсии (рис. 1) содержат 10–20 масс.% дисперсной липидной фазы, стабилизированной 0,5–2% эмульгатора, например, лецитина, препятствующего объединению крохотных диспергированных капель.

Поскольку размер капель дисперсной фазы в наноэмульсиях весьма мал, для их приготовления требуются высокоэнергетические методы. Наибольшее распространение в промышленной и лабораторной практике получили методы гомогенизации под высоким давлением и микрофлюидизации, несколько реже применяются диспергирование при ультразвуковом воздействии и *in situ* эмульгация.

В случае гомогенизации под высоким давлением смесь липидной фазы и воды пропускается сквозь чрезвычайно узкое сопло форсунки под большим давлением (3–15 МПа), что приводит к формированию стабильной наноэмульсии с весьма узким распределением капель дисперсной фазы по размерам. Существенным недостатком данного метода являются большие энергозатраты.

На первом этапе метода микрофлюидизации две жидкости (липидная фаза и вода) смешивают в гомогенизаторе с образованием грубой эмульсии. Последняя поступает в специальный аппарат «микрофлюидизатор» (запатентован компанией Microfluidics), в котором, собственно, и формируется наноэмульсия. Пропускание смеси жидкостей через рабочую камеру аппарата можно проводить многократно вплоть до достижения требуемого размера капель дисперсной фазы.

К достоинствам наноэмульсий относятся:

- большая площадь удельной поверхности и поверхностная энергия, делающие наноэмульсии высокоэффективной транспортной системой;
- более высокая стабильность и стойкость к расслаиванию, флокуляции, коалесценции, седиментации по сравнению с макроэмульсиями;
- возможность изготовления на основе наноэмульсий кремов, пен, жидкостей и аэрозолей;
- низкая токсичность, что открывает возможность использования наноэмульсий в медицине и косметике.

Наноэмульсии используют в медицине и фармакологии, например, для парентерального питания, т.е. внутривенного введения питательных веществ или лекарственных препаратов. Применение наноэмульсий позволяет пролонгировать

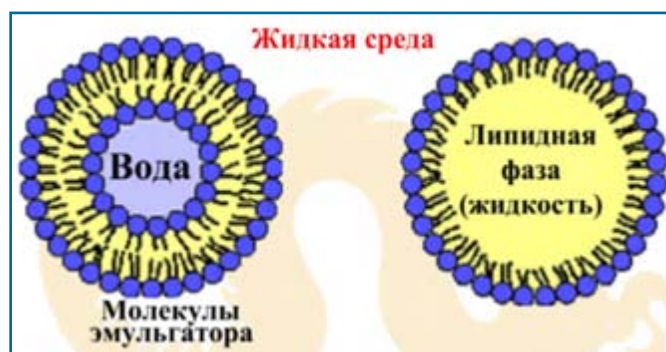


Рис. 1. Структура эмульсии

действие, повысить эффективность и снизить побочные эффекты, уменьшив дозу лекарственных препаратов, уменьшить реакцию (боль, воспаление) в месте введения, перевести в раствор нерастворимые лекарственные препараты. Среди препаратов, вводимых с использованием наноэмульсии, можно упомянуть нитроглицерин, таксол и диазепам.

Помимо медицины наноэмульсии достаточно активно используют в производстве косметики, для изготовления антибактериальных и дезинфицирующих препаратов (в частности, для проникновения в покрытые липидной защитой микроорганизмы) и микробиологии (для доставки плохо растворимых питательных компонентов в клетки).

#### Л и т е р а т у р а :

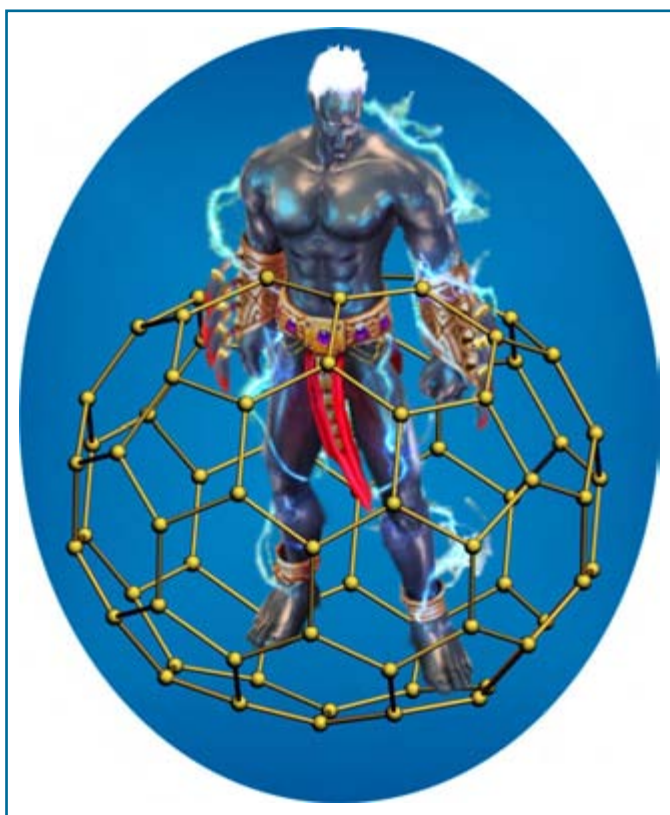
1. <http://www.microfluidicscorp.com>
2. <http://www.nanotech-now.org>



## НАНОЭНЕРГЕТИКА (*Nanoenergetics*)

*«Коммунизм – это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».*

*В.И. Ленин*



Сегодня мы все чаще сталкиваемся с ситуациями, когда привычные для нас электронные устройства постепенно становятся все более компактными – и речь теперь идет о **нанороботах**, **наномашинах** и пр. В связи с этим появляется новая обобщающая область знаний под названием наноэнергетика, которая рассматривает источники энергии соответствующих размеров, подходящие для подобных устройств.

Уже сейчас созданы различные **нанобатарейки**. Развитие этой новой области знаний о поведении наноразмерных систем с ионной и смешанной проводимостью – так называемой наноионики –

относится к важнейшим направлениям современных исследований. С фундаментальной точки зрения представляет значительный интерес создание новых и оптимизация существующих методов получения таких наноматериалов, а также исследование особенностей ионного и электронного транспорта в зависимости от типа наноматериала. Практическая разработка нового поколения нанобатареек с повышенной эффективностью, надежностью, безопасностью, в несколько раз меньших по размерам, с практически отсутствующим загрязнением окружающей среды позволит создать принципиально недостижимые в традиционном исполнении виды устройств, широко востребованные во всех областях современных науки и техники.

Что же изменится, если для создания электродов в обычной батарее использовать наноструктурированный материал? В этом случае в значительной степени увеличится площадь удельной поверхности материала электродов. В свою очередь это приведет к увеличению площади контакта между электродами и электролитом, в результате чего возрастут скорости разряда и заряда. Увеличение удельной площади поверхности частиц электродов приводит также к тому, что возрастает удельный вклад механизма сохранения заряда на поверхности, а это в свою очередь значительно увеличивает емкость электрода. Кроме того, за счет малого размера частиц материала электродов сокращаются расстояния, преодолеваемые ионами в процессе диффузии в глубь материала. В результате увеличивается количество энергии, которое можно сохранить в данной массе материала (рис. 1).

Разработка новых «умных» поколений химических источников тока основана и на том, что свойства ультрадисперсных частиц в существеннейшей степени изменяются по сравнению с объемным телом (рис. 1). И причина этого не только в доступности поверхности и облегчении диффузионных потоков, но и в изменении концентрации дефектов, а главное – в разнообразных *размерных эффектах*, которые связаны с тем, что размер частицы становится меньше некоторой критической величины, сопоставимой с так называемой корреляционной длиной или радиусом взаимодействия, характерным для того или иного физического явления. В результате возникают новые закономерности, что проявляется в уникальном физико-химическом и электрохимическом поведении таких наноматериалов. Еще одна важная черта *наночастиц* – они не «растрескиваются» и не изменяются в циклах заряда-разряда. Раньше считалось, что это явление серьезно ограничивает ресурс обычных химических источников тока, поскольку разрушается или даже химически изменяется электрод, при этом теряется «связность» между отдельными частями электрохимической цепи батарейки. При использовании пасты с тесно контактирующими наночастицами эти проблемы во многом снимаются.

Одними из наиболее известных соединений металлов, имеющих переменные степени окисления, обладающих к тому же широкой распространенностью, низкой стоимостью и малой токсичностью, являются системы марганец – кислород, титан – кислород, ванадий – кислород и др. Интересным является также тот факт, что даже ряд не являющихся электроактивными в объемном состоянии материалов начинает проявлять улучшенное электрохимическое поведение при переходе в наноразмерное состояние. Оксид титана со структурой рутила в обычном состоянии может интеркалировать только незначительное количество ионов лития при комнатной температуре. Однако при переходе в наносостояние ситуация изменяется кардинальным образом. При размере частиц  $\text{TiO}_2$  15 нм в его структуру можно внедрить больше 1 моля лития на 1 моль  $\text{TiO}_2$ , что является вполне приличным количеством и позволяет использовать наноструктурированный оксид титана в качестве отрицательного электрода в литий-ионных аккумуляторах!

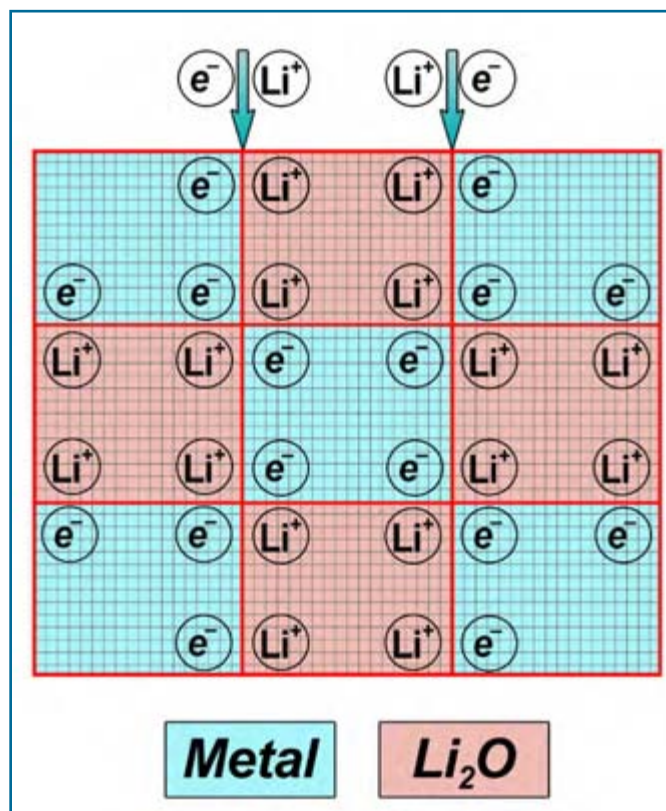


Рис. 1. Новые эффекты, возникающие в нанокompозитах: электростатические эффекты разделения зарядов в нанокompозитах «металл (рутений) – оксид ( $\text{Li}_2\text{O}$ )»

Очень перспективными источниками энергии для устройств с размерами порядка  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  м являются также водородные элементы. Так, предложен очень удобный метод хранения водорода, суть которого заключается в его связывании сложными комплексами углерода и титана на основе углеродных нанотрубок (рис. 2). Водород

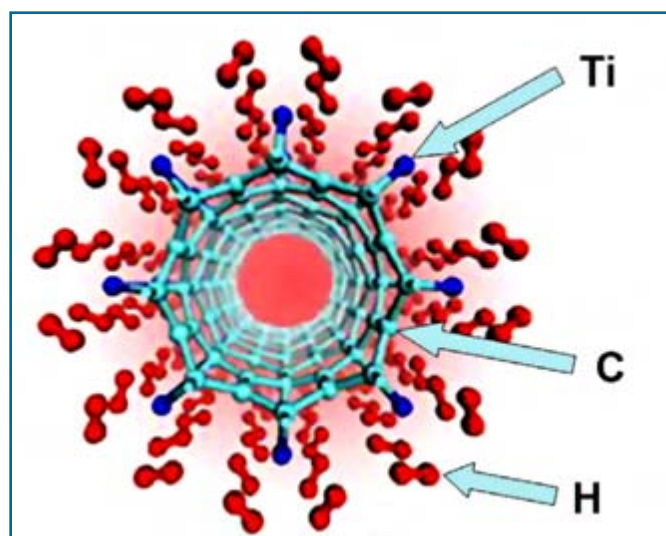
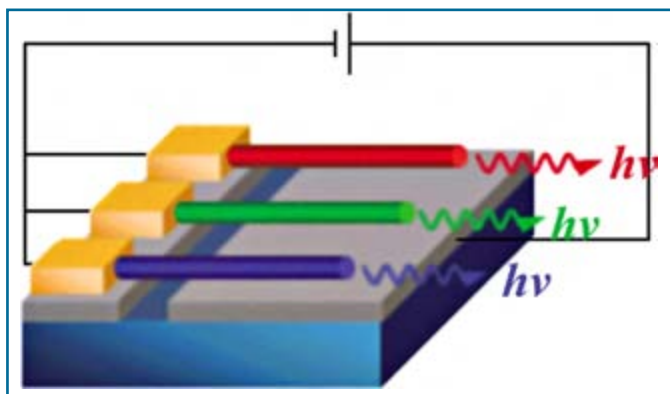


Рис. 2. Наноаккумулятор водорода на основе титан-углеродного ансамбля



**Рис. 3.** «Многоцветный» лазер, состоящий из ансамбля нанонитей различного состава

может обратимо присоединяться к таким интересным ансамблям в количестве до 8% от общей массы комплекса. При нагревании аккумулятора из нанотрубок до 500 °С происходит отщепление водорода.

Еще одной очень перспективной является идея создания источников квантов электромагнитного излучения с фиксированной длиной волны. В их

основе лежат композиционно-модулированные структуры на GaAs, GaP и CdS, а также проводящие нанонити на основе кремния и фосфида индия. Конструкция нанолазера чрезвычайно проста. Отдельные нанонити из сульфида кадмия расположены между кремниевой пластинкой (полупроводник *p*-типа) и металлическим электродом (рис. 3). Если вместо одинаковых нитей использовать ансамбль нитей разного состава, то можно получить излучение в широком диапазоне длин волн. Такие устройства можно использовать в различного рода сенсорах для диагностики состояния живых тканей (проникновение столь тонкой нити в отдельную живую клетку не приносит ей значительного ущерба). Возможно, направленные импульсные энергетические воздействия на клеточном уровне позволят решать множество актуальных проблем современной медицины. Кроме того, с помощью нанолазеров можно проводить литографию сверхвысокого разрешения на различных поверхностях.

#### Литература:

1. Kwan S. Kwok. Nanotoday. Desember 2003. P. 20.
2. Miziolek A.W. The AMPTIAC Newsletter. 2002. Vol. 6. № 1. P. 43
3. Maier J. Nature materials. 2005. Vol. 4.



## НЕУГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ (Nanotubes)

*«А вы ноктюрн сыграть могли бы  
На флейте водосточных труб?»  
В.В. Маяковский*



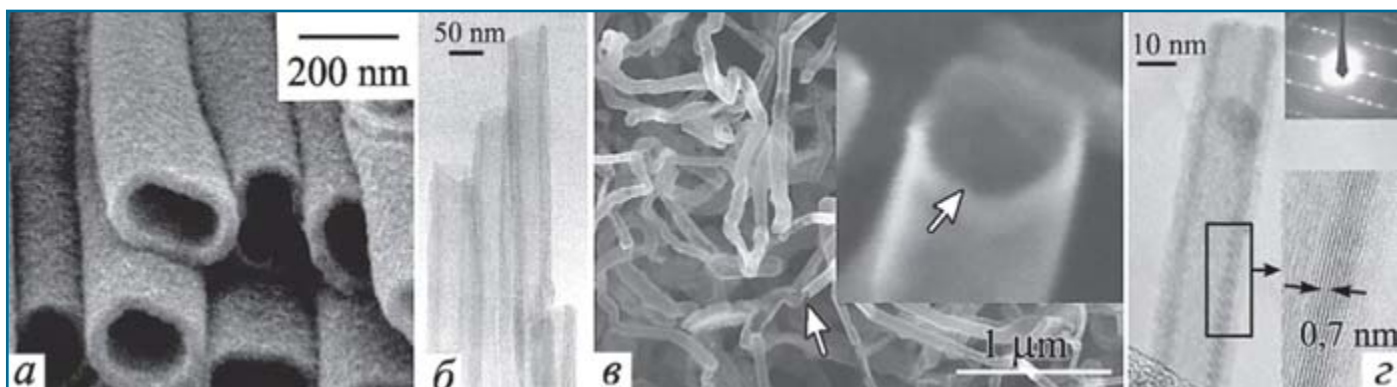
Те, кто хоть иногда интересуется новостями науки, не могли пропустить громкие сообщения о синтезе и свойствах **углеродных нанотрубок**. Значительно меньше известно о нанотрубках других неорганических соединений. А ведь они не менее интересны и перспективны! Одно только многообразие оксидных соединений, на основе которых образуются нанотрубки, заслуживает восхищения (рис. 1).

Первые неуглеродные нанотрубки ( $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ ) были синтезированы в 1992 г. израильским

ученым Р. Тенне. При химическом способе синтеза образование нанотрубок происходит в результате взаимодействия исходных веществ в водных или водно-органических средах, в твердой или газовой фазе, в результате термоллиза солей. **Темплатные методы** формирования нанотрубок заключаются в осаждении наночастиц на поверхности твердых веществ, задающих определенную форму и размер нанопродукта, при этом роль темплата могут играть молекулы органических веществ.

Например, модель образования нанотрубок  $\text{TiO}_2$  можно представить схемой  $3\text{D} \rightarrow 2\text{D} \rightarrow 1\text{D}$ . Трехмерный (3D) кристалл диоксида титана, реагируя с раствором щелочи  $\text{NaOH}$ , образует ламинарную двумерную (2D) структуру, которая изгибается, чтобы соединить ненасыщенные связи краевых атомов. При дальнейшем закручивании получается структура, представляющая собой либо нанотубулен (свиток), напоминающий рулон обоев, либо нанотрубку, образованную вставленными друг в друга концентрическими цилиндрами. Подобным же образом происходит формирование нанотрубок других оксидных соединений, например, оксида ванадия  $\text{V}_2\text{O}_5$  (рис. 2).

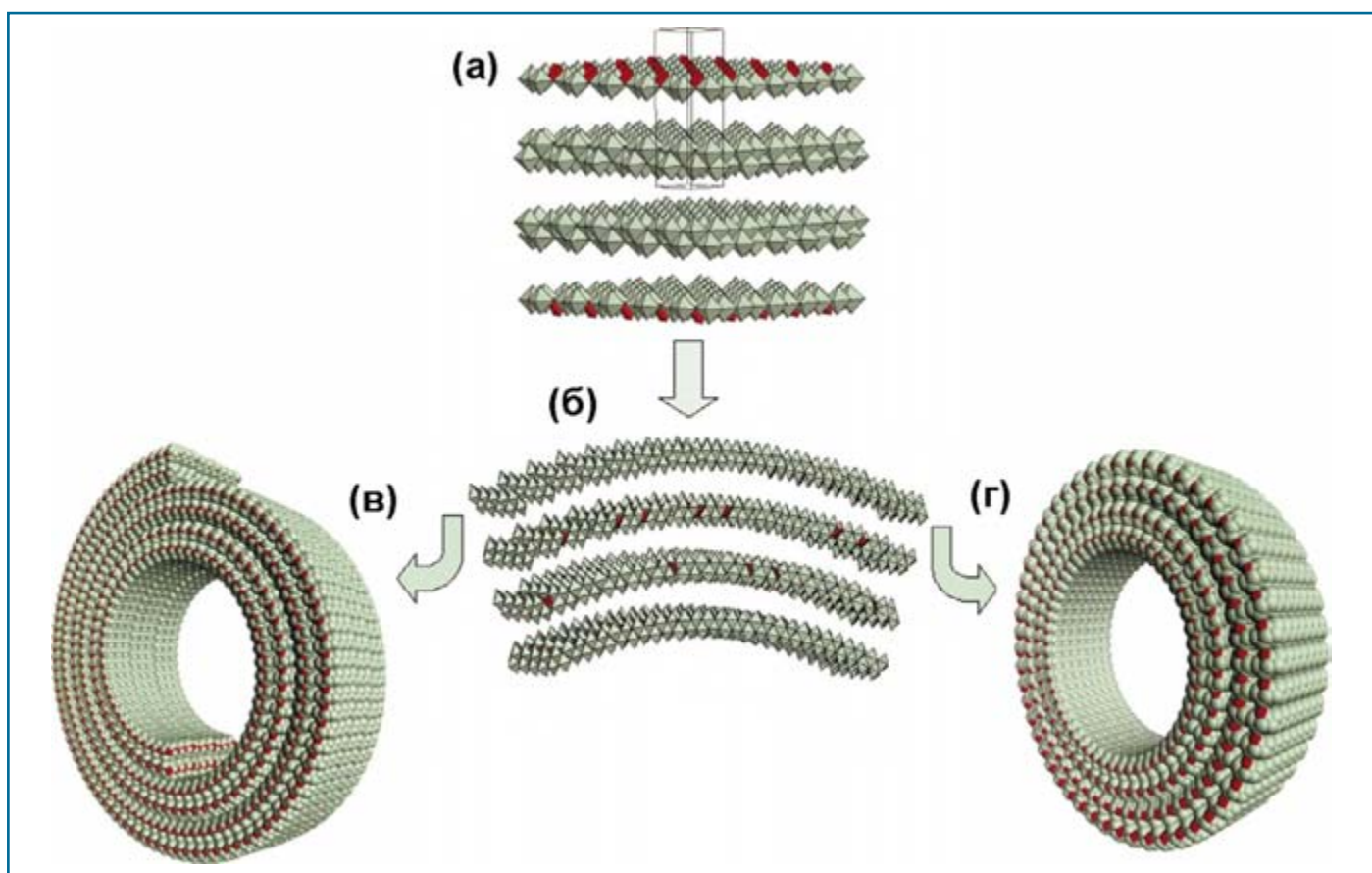
Многие функциональные свойства зависят от морфологии, удельной поверхности и особенностей кристаллического и электронного строения материалов. Так, применение в батарейках нанотрубок оксидов  $\text{VO}_x$ ,  $\text{MnO}_x$ ,  $\text{CoO}_x$  вместо объемного материала позволяет улучшить их катодные характеристики вследствие большей интеркаляционной емкости и химической активности. На-



**Рис. 1.** Разнообразие морфологических модификаций оксидных нанотрубок:  
а –  $\text{TiO}_2$ , б –  $\text{VO}_x$ , в –  $\text{ZnO}$ , г –  $\text{MnO}_2$

ноструктуры на основе  $\text{ZnO}$  перспективны для создания фото- и электро-люминофоров, световозбуждающихся и лазерных диодов, ультрабыстрых нанолазеров, в оптоэлектронных устройствах, солнечных батареях и т.д. Исследования

фотокаталитической активности  $\text{TiO}_2$  в виде пленки и нанотрубок в реакции окисления  $\text{NO}$  показали, что в случае использования нанотрубок она возрастает почти на порядок! (См. *Одностенные нанотрубки*).



**Рис. 2.** Схема образования нанотрубок  $\text{V}_2\text{O}_5$  на основе соединения  $\text{BaV}_7\text{O}_{16} \cdot n\text{H}_2\text{O}$   
(а): изгибающиеся слои (б) могут образовывать нанотубулены (в) или нанотрубки (г)

#### Литература:

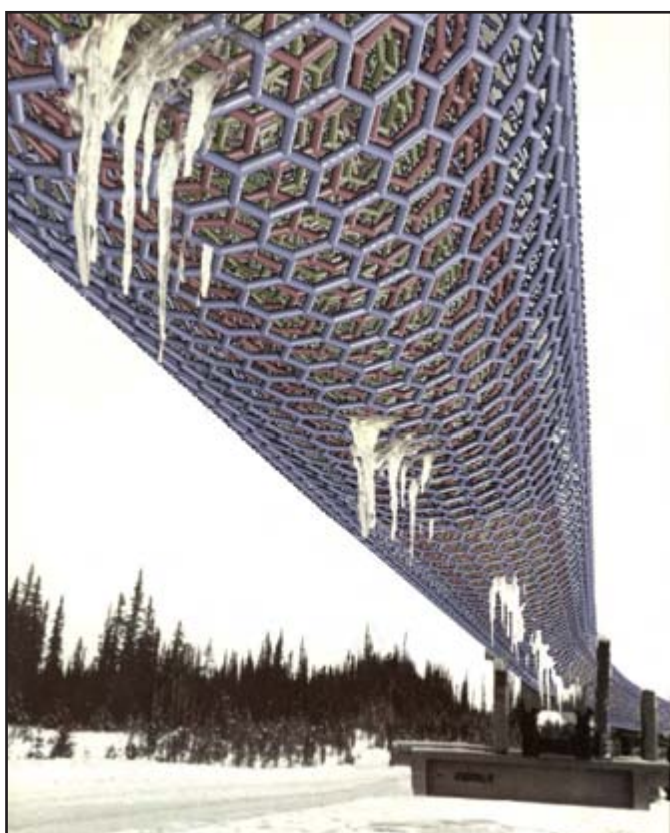
1. Захарова Г.С., Волков В.Л., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Нанотрубки и родственные наноструктуры оксидов металлов. Екатеринбург, 2005. 240 с.



## ОДНОСТЕННЫЕ НАНОТРУБКИ (ОСНТ) (Single Wall Nanotubes)

«Там, где наука встречается с искусством...»

Г. Гаузе



Представьте, как резко изменилась и какой странной стала бы наша жизнь, если бы исчезли все трубы – по ним вода попадает в краны и батареи наших домов, по ним транспортируют нефть и газ, без них сложно представить систему городской канализации. При постройке сборных зданий из металлоконструкций используют трубы вместо сплошных металлических прутков, т.к. известно, что у труб отношение прочности на изгиб к массе при одинаковом диаметре заметно выше... Все они такие разные и такие функциональные. А как Вы думаете, какого минимального диаметра может быть труба, чтобы оставаться полезной? В 1993 году ученые открыли самые

маленькие в мире одностенные **углеродные нанотрубки** диаметром от 1 нм. Поразительные свойства этих структур сделали их источником идей для сотен различных применений в науке и технике, в том числе в нанотехнологии и наноэлектронике, и вдохновили исследователей на поиск новых **неуглеродных нанотрубок** среди других классов неорганических соединений. Для этого был проведен ряд теоретических и экспериментальных работ, позволивших сначала предсказать, а затем и синтезировать одностенные нанотрубки изоэлектронных аналогов углерода – гексагональных  $\text{BN}$ ,  $\text{B}_x\text{C}_y\text{N}_x$ , а также наноструктур, полученных замещением атомов углерода в ОСНТ на атомы азота и бора ( $\text{BC}_x$ ,  $\text{CN}_x$ ). Следует отметить, что трубки, полученные сверткой изоструктурных аналогов графита, таких, как нитрид бора  $\text{BN}$ , более технологичны, чем сами углеродные нанотрубки и имеют узкое распределение по размеру от 0,5 нм до 3 нм (рис. 1). Они обладают интересными электронными характеристиками, являясь полупроводниками с шириной запрещенной зоны 4,5–5,5 эВ, независимо от диаметра трубки и ее **хиральности**. Экспериментально доказано, что  $\text{BN}$ -нанотрубки крепче и легче стали, а полимерные матрицы, содержащие такие нанотрубки, могут использоваться для

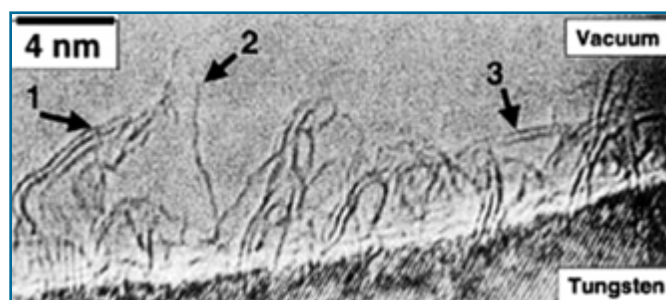
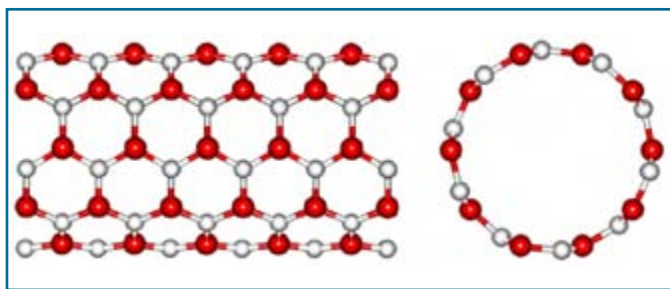


Рис. 1 Одностенные нанотрубки BN





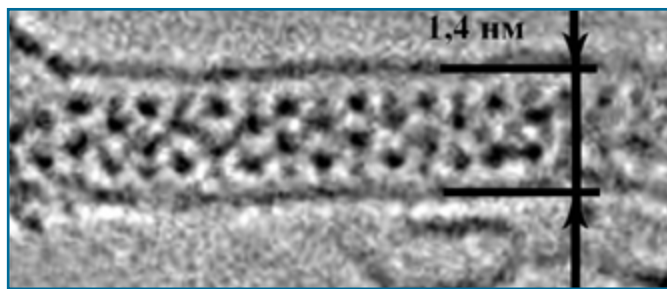
**Рис. 2.** Модель нанотрубки BeO (белые атомы — Be, красные — O)

упрочнения поверхности металлических изделий и для создания стойких к окислению покрытий.

Наиболее интересным представителем неорганических ОСНТ являются  $BC_2N$ -трубки, настолько близкие по своей структуре к углеродным нанотрубкам, что их можно получить частичным замещением атомов углерода в последних на атомы азота и бора. Благодаря сворачиванию карбонитрида бора в цилиндры по спирали в нанотрубках  $BC_2N$  возникают круговые токи, что позволяет рассматривать их как своеобразные наносоленоиды. Более того, в зависимости от диаметра и хиральности  $BC_2N$  нанотрубок происходит изменение металлического типа проводимости на полупроводниковый, открывая перспективы их использования в различных областях **нанозлектроники**.

Не так давно были открыты нанотрубки большой группы халькогенидов d-элементов  $MX_Y$  ( $M = Ti, Zn, Nb, Bi, Mo, Cd, W, Ag, Ta$ ;  $X = S, Se$ ) и выполнен теоретический прогноз нанотрубок новых составов  $SiC$ ,  $TiO_2$ , BeO (рис. 2).

Свойства углеродных и неуглеродных одностенных нанотрубок до конца еще не изучены, а исследователи уже придумали способ их расширить и значительно модифицировать. Для этого достаточно заполнить пустоту «цилиндра» каким-либо химическим соединением. В настоящий момент разработаны различные методики «вливания» простых и сложных соединений в виде раствора или расплава во внутренний канал трубок, например иодидов (рис. 3). Исследования показали, что в зависимости от параметров электронной и кристаллической структуры вводимого соединения значительно изменяются электронные и механические свойства образующегося композита трубка–вещество. Во вну-



**Рис. 3.** Нанокристалл CuI в канале одностенной углеродной нанотрубки (синтезирован М.В. Чернышевой и А.А. Елисеевым, ФНМ МГУ), изображение получено Н.А. Киселевым (ИК РАН) и J.L. Hutchison (University of Oxford)

**Рис. 4.** «Стручок» — молекулы фуллеренов  $C_{60}$  в одностенной углеродной нанотрубке



тренний канал ОСНТ удалось поместить даже цепочку из молекул фуллеренов, получив так называемые «стручки» (pea pods) (рис. 4), причем при  $1200^\circ C$  «горошины» срастаются с образованием еще одной нанотрубки!

Совсем недавно исследователи научились создавать «стручки» с неорганическими «горошинами» из фуллерено-подобных молекул — металлокарбоэдренов состава  $M_8C_{12}$  ( $M = Sc, Ti, V, Zr, Nb$ ). Изменяя химический состав «горошин», можно регулировать прочность связей, стабильность получаемых структур и их диэлектрические свойства. На сегодняшний день подобные «стручки» являются интереснейшим и перспективным материалом для микро- и нанозлектроники, который можно использовать для создания нанодiodов, **транзисторов**, элементов памяти и логических схем, а также аккумуляторов водорода и высокотемпературных сверхпроводников.

Как видите, несмотря на наноразмер, углеродные трубочки в полезности и перспективности для практического применения ничуть не уступают своим гигантским собратьям.

#### Литература:

1. Ивановский А.Л. Успехи химии. 2002. Т. 71, № 3. С. 203–224.
2. Chernysheva M.V., Eliseev A.A., Lukashin A.V. et al. Physica E. 2007. Vol. 37. P. 62–65.
3. Luzzi D.E., Smith B.W. Carbon. 2002. Vol. 38. P. 1751–1756.

## ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР

### (Single Electron Transistor)

*«Электрический ток переносится отдельными электрическими зарядами».*

*Учебник по физике для средней школы*



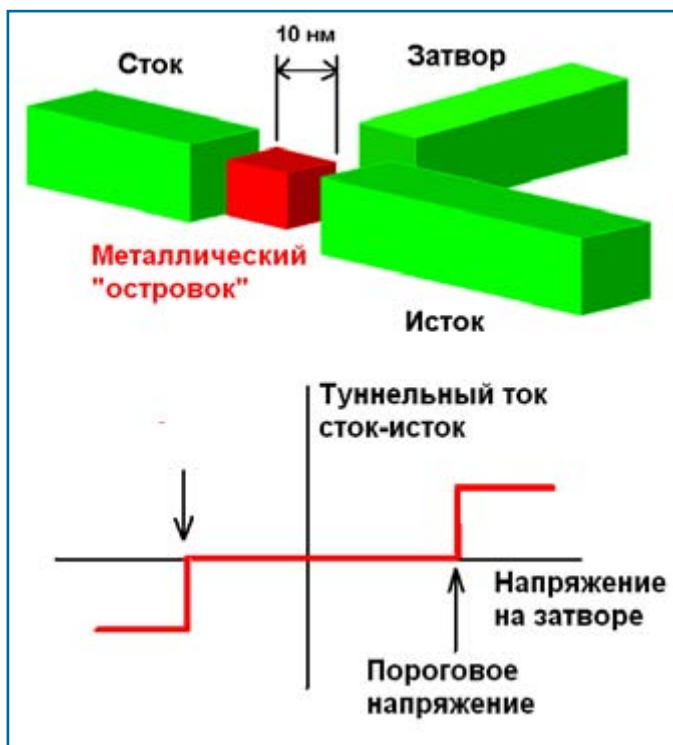
Песочные часы представляют систему с одночастичным транспортом — песчинки по одной падают через сужение

Управлять движением единичных макрообъектов для своей пользы человек научился очень давно. Возьмем, к примеру, всем известные песочные часы — символ непрерывно уходящего времени. Несмотря на кажущуюся непрерыв-

ность, в основе принципа работы таких часов лежат дискретно падающие через узкую горловину песчинки. А можно ли так же легко управлять объектами квантовой природы — отдельными атомами или даже электронами? Оказывается можно! Например, с помощью так называемого одноэлектронного транзистора, который представляет собой переключающее устройство, способное разъединять или соединять электрическую цепь за счет движения единичного электрона. Принципиальным отличием одноэлектронного транзистора от классического является то, что линейные размеры канала между стоком и истоком лежат в нанодиапазоне, обуславливая проявление **квантово-размерных эффектов**. Кроме того, одноэлектронный транзистор не усиливает текущий ток, а только управляет переходом электронов, поэтому правильнее было бы называть его переключателем.

Принцип работы одноэлектронного транзистора основан на эффекте так называемой «кулоновской блокады» — скачкообразном изменении потенциальной энергии достаточно малой системы при туннелировании одного электрона и блокировании движения всех остальных. При этом электрический ток в цепи протекает макроскопически регистрируемыми порциями, иначе говоря, в системе проявляется движение единичных зарядов.

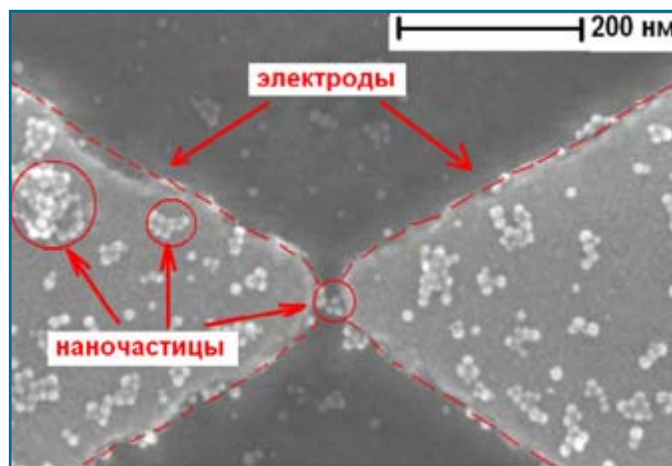
Давайте более подробно рассмотрим устройство одноэлектронного транзистора (рис. 1). Как и любой традиционный транзистор, он состоит из трех электродов, два из которых выполняют



**Рис. 1.** Схематическое устройство одноэлектронного транзистора и идеализированная зависимость тока от напряжения

роль стока и истока, а третий является управляющим (затвор). Только вот между электродами расположен металлический или полупроводниковый «наноостровок» — наночастица или кластер нанометровых размеров (рис. 2). При этом толщины «наноостровков» настолько малы, что электрон может туннелировать. Если приложить разность потенциалов между стоком и истоком, то, казалось бы, должен потечь туннельный ток. Однако пока потенциал на управляющем электроде будет меньше некоторого порогового значения, туннелирование не наблюдается. Электрон на наночастице остается изолированным, т.е. «заблокированным». При дальнейшем же увеличении напряжения выше порогового значения блокада электрона прорывается, и в цепи между стоком и истоком происходит перескок электрона — течет туннельный ток.

Таким образом, управляя потенциалом затвора, можно пропускать по цепи единичные элек-



**Рис. 2.** Наночастицы диаметром несколько нанометров между металлическими электродами ([www.nanotech-now.com](http://www.nanotech-now.com))

троны. Если пойти дальше и вместо наночастицы поместить между электродами молекулу или молекулярный комплекс, то движение единичных электронов будет осуществляться в результате прыжков по химическим связям — в работу вступят дискретные уровни энергии молекулы (см. *Молекулярная электроника*). Таким образом, одноэлектронный транзистор рассматривается как предельная степень миниатюризации классического *транзистора* — то, к чему стремятся все крупнейшие производители вычислительной техники. В настоящий момент работу одноэлектронных транзисторов можно наблюдать только в исследовательских лабораториях, но в будущем их использование в массовом производстве может привести к резкому снижению энергопотребления и тепловыделения электронными схемами, значительному увеличению быстродействия и плотности элементов микросхем. Развитие технологии одноэлектронных транзисторов позволит создать ячейки памяти с большим временем хранения, высокой плотностью записи информации и малой рассеиваемой мощностью, а также высокочувствительные химические/биохимические сенсоры.

#### Литература:

1. Лихарев К.К. Одноэлектроника // В мире науки. 1992. № 8. С. 42.
2. Klein D.L., Roth R., Lim A.K.L., Alivisatos A.P., McEuen P.L. Nature. 1997. Vol. 399. P. 699.



## ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ

### (Optical tweezers)

*«У меня живет козленок  
(Я клонировал козу).  
На палас его зеленый  
На пинцете отнесу.  
Если уроню в пути,  
То без лупы не найти!»*  
Ю. Черезов



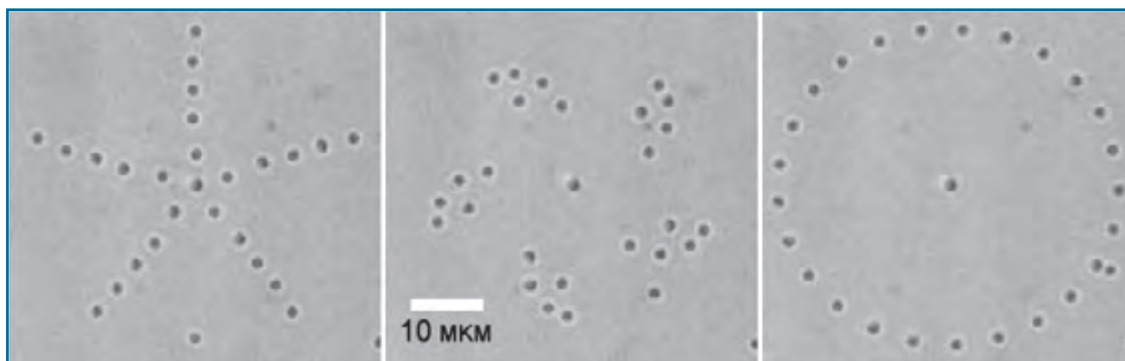
Ураган из сказки «Волшебник Изумрудного города», который перенес домик Элли в Волшебную страну, напоминает оптический пинцет, который втягивает и перемещает микроскопические частицы в заданном направлении. Впрочем, если ураган из сказки действовал неуправляемо и даже погубил породившую его волшебницу Гингему, то оптический пинцет — это, напротив, очень послушный инструмент в руках опытного ученого, позволяющий проникать в тайны микромира

Если рассмотреть в оптический микроскоп капельку прозрачной жидкости, то можно увидеть, как беспорядочно движутся мельчайшие частицы, и этот процесс продолжается бесконечно. Можно ли в буквальном смысле «поймать» одну частицу и заставить двигаться туда, куда нам хочется? На первый взгляд, задача кажется невыполнимой, поскольку речь идет о частице в десятки, сотни, а иногда и тысячи раз меньше макового зернышка, которое можно взять обычным пинцетом.

К счастью, далеко не каждый пинцет сделан из стали или пластика, и не каждый пинцет можно взять в руки, если этот пинцет... всего-навсего луч света! Речь идет о так называемом оптическом пинцете, использующем для передвижения микроскопических объектов сфокусированный лазерный пучок. Вблизи точки фокуса лазерный луч, подобно торнадо, втягивает внутрь все, что находится вокруг. Сила, с которой свет действует на окружающие объекты, невелика, но ее оказывается достаточно, чтобы «ловить» и контролируемо перемещать частицы размером от 10 нм до 10 мкм.



**Рис. 1.** «Захват» коллоидной частицы оптическим пинцетом



**Рис. 2.** Электронно-микроскопические изображения упорядоченных структур, собранных из коллоидных частиц оптическим пинцетом

Метод манипулирования коллоидными частицами под воздействием света был впервые предложен сотрудниками Bell Laboratories Артуром Ашкиным (*Arthur Ashkin*) и Стивеном Чу (*Steven Chu*) в 1986 г. Между тем, основополагающие эксперименты, продемонстрировавшие, что свет оказывает давление на макроскопические тела, частицы, а также отдельные молекулы и атомы, были проведены русским физиком П.Н. Лебедевым еще в период с 1899 по 1910 гг. Открытие давления света стало важным подтверждением электромагнитной теории Фарадея–Максвелла, а также позволило объяснить ряд экспериментально наблюдаемых физических явлений. Среди потенциальных применений давления света есть самые экзотические, вплоть до создания т.н. космических парусов, призванных разгонять в безвоздушном пространстве космические корабли за счет использования излучения Солнца и других звезд.

Если передвижение многотонных космических кораблей под действием давления света пока остается утопией, то перемещать лазером микроскопические коллоидные частицы с использованием оптического пинцета ученые умеют уже сейчас. Схема «захвата» частицы показана на рис. 1. При взаимодействии с электромагнитным полем, создаваемым светом, у коллоидной частицы возникает дипольный момент, благодаря чему под действием градиента поля частица затягивается в перетяжку лазерного пучка. Для стабильного «захвата» необходимо, чтобы градиент электромагнитного поля доминировал над давлением света, что достигается путем правильно сконфигурированной оптической схемы.

Оптический пинцет позволяет прилагать к частицам силы до 100 пН, что делает его идеальным инстру-

ментом для механического воздействия на различные биологические объекты и измерения их отклика. С помощью оптического пинцета были измерены вязкоупругие свойства единичных молекул ДНК, клеточных мембран, а также агрегированных волокон белков (например, актина), изучены силы, развиваемые молекулярными моторами (миозином, кинезином и т.д.). С его помощью удалось показать, что клетки используют механические силы не только для движения или сортировки хромосом во время воспроизведения, но также и для считывания генетической информации, дыхания, «общения» с другими клетками.

Считается, что уже в ближайшем будущем оптические пинцеты будут использованы не только для исследования клеток, но и для внутриклеточной хирургии, что позволит, в частности, модифицировать их хромосомный набор, а также проводить искусственное оплодотворение. Кроме того, с помощью оптического пинцета можно анализировать колонии микробов различных видов, «ловить» отдельные микробы и изучать их поведение.

Не менее эффективно оптический пинцет применяется для изучения объектов неживой природы, например, заряженных **коллоидных частиц** в растворах. Пожалуй, наиболее интересным среди его применений является возможность собирать различные упорядоченные структуры из коллоидных **наночастиц** (рис. 2). В настоящее время такие структуры создаются «вручную» и поэтому состоят из ограниченного числа частиц, однако если автоматизировать процесс сборки, оптический пинцет может стать мощнейшим инструментом для микро- и **нанoeлектроники**.

### Л и т е р а т у р а :

1. Curtis J.E., Koss B.A., Grier D.G. Opt. Commun. 2002. Vol. 207. P. 169–175.

## ПАТЕНТОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

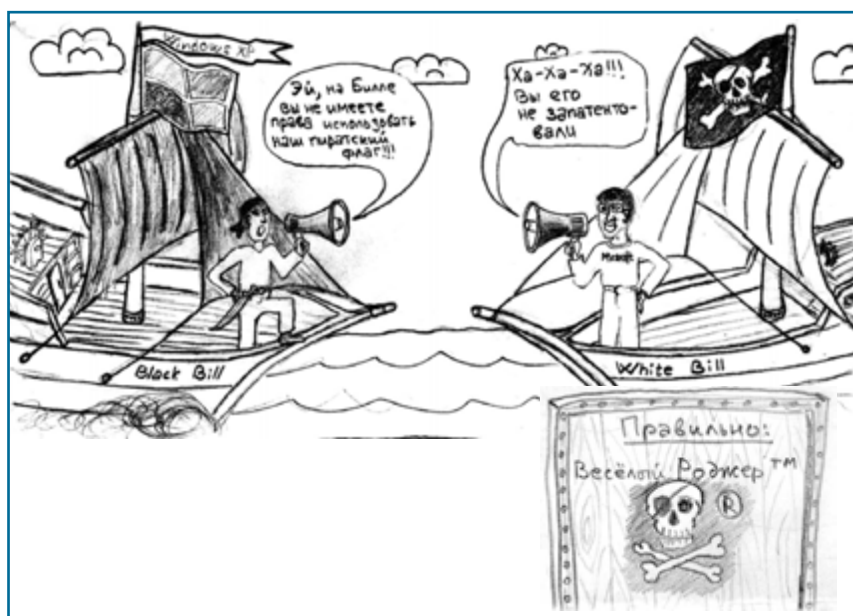
### (Patents In Nanotechnology)

«Мало что-то изобрести – нужно еще чтобы кто-нибудь оценил изобретение или, хотя бы, украл его».

Кароль Ижиковский

«Незаконное использование объектов авторского права и смежных прав, присвоение авторства ... наказываются штрафом ... либо обязательными работами на срок до двухсот сорока часов, либо лишением свободы на срок до двух лет».

Уголовный кодекс РФ, Статья 146



На рисунке изображена коллизия авторских и имущественных прав, а также возникающих в связи с этим отношений авторов и пользователей. Пираты с корабля «Черный Билл» под черными парусами недовольны тем, что «Белый Билл» вывесил на своем флагштоке пиратский флаг «Веселый Роджер». Они считают, что только им принадлежит эксклюзивное право на производство, использование и распространение флага «Веселый Роджер». Поэтому они предлагают «Белому Биллу» либо снять пиратский флаг, либо купить у них лицензию на его использование. «Белый Билл» учился в университете и поэтому обоснованно возражает, что пираты не зарегистрирова-

ли свои авторские права в патентном ведомстве и не получили патент на интеллектуальную собственность. Следовательно, закон разрешает использовать незарегистрированную символику кому угодно безо всяких лицензий. Напротив, это пираты обязаны удалить со своей мачты легко узнаваемый флаг известной операционной системы, либо купить у «Белого Билла» пользовательскую лицензию (поскольку Windows® XP является зарегистрированным продуктом, о чем свидетельствует значок ®).

Кстати, чтобы пираты могли претендовать на правовую поддержку государства, они должны были зарегистри-

стрировать в патентном ведомстве свой товарный знак (череп с костями) и торговую марку «Веселый Роджер™», как показано на рисунке справа. Значки ® (=Registered), ™ (=Торговая Марка, Trade Mark) и © (=Copyright) указывают на то, что продукты зарегистрированы, и соответствующие авторские права охраняются законом. Указание фамилии художника со значком © внизу под рисунком свидетельствует, что копирование и воспроизведение рисунка без разрешения автора/издателя запрещено.

«Белый Билл» угрожал пиратам подачей на них иска в Федеральный суд и неприятностями от разборки с судебными приставами. Однако среди



пиратов тоже нашлись выпускники университета, и они не менее резонно ответили «Белому Биллу», что поскольку пираты не являются гражданами ни одной из стран, то и не подпадают под их юрисдикцию. А поскольку патенты действуют лишь в оговоренных странах, то на пиратском острове они никакой юридической силы не имеют. «Белому Биллу» оставалось лишь скрипеть зубами от злости и что-то бормотать про борьбу с террористами.

Выражаясь современным языком, в описанной ситуации речь идет об упущенной выгоде, поскольку авторы и владельцы интеллектуальной собственности с обеих сторон (белой и черной) намеревались получить прибыль от реализации своих авторских прав, но не получили ее, т.к. в одном случае авторы не запатентовали свои произведения, а в другом случае потому, что пользователи по-пиратски ушли за пределы территории, на которую распространяется юрисдикция патентного права. Защитником же и гарантом авторских прав является государство, которое принимает соответствующие законы и с помощью государственного аппарата обеспечивает их исполнение на своей территории.

Какое отношение все это имеет к нанотехнологиям? Их разработчики, изобретатели и ученые, а также и бизнесмены должны знать свои права и возможности, чтобы защитить труды своей деятельности от конкурентов, недобросовестных пользователей, пиратов.

В Российской Федерации ежегодно поддерживается в силе около 125–130 тыс. патентов, из них 1/5 часть принадлежит иностранным патентообладателям, а 4/5 – российским. Иностранные компании патентуют в РФ в основном устройства и способы в области высоких технологий (перспективные устройства и способы передачи информации, обработка данных, управление промышленностью), фармацевтические средства, а также перспективные конструкционные материалы и вещества, используемые в современной промышленности. Существует опасность возникновения патентной монополии иностранных компаний на российском рынке high-tech-продуктов, которая может быть использована в конкурентной борьбе против российских производителей путем использования патентных прав. Особенно остро это касается рынка нанотехнологий и продуктов. Борьба за лидерство в области нанотех-



нологических исследований усиливается по обе стороны Атлантического океана по мере того как правительственные агентства вкладывают в исследования все большие суммы. Среди патентов в области нанотехнологий в 2002–2003 гг. доля США и Канады составляла 45%, доля Европы (15 государств + страны Европейской ассоциации свободной торговли – ЕФТА) составляла 39%, на Азию приходилось 13% всех патентов и на все другие страны – 3%. Это означает, что при неблагоприятном стечении обстоятельств регистрация иностранных патентов в российском патентном ведомстве может в существенной мере закрыть российский рынок для отечественных производителей. Поэтому массовое патентование отечественными учеными сектора нанотехнологий в РФ является в настоящее время одной из весьма актуальных задач на пути от инновации к коммерциализации научно-технологических разработок.

Патент и свидетельство – это охранные документы промышленной и интеллектуальной собственности

Наличие патента дает его обладателю право запрещать практически любое несанкционированное использование его интеллектуальной собственности другими лицами.

Право на легальное использование изобретений, полезных моделей и промышленных образцов может быть предоставлено другим лицам лишь при условии выплаты вознаграждения патентообладателю (на основе лицензионного договора или договора уступки патента). Исключительные права дают патентообладателю возможность не только окупить затраты на создание нового решения, но и получать прибыль на протяжении длительного времени за счет единоличного контроля определенной рыночной ниши. Патент на изобретение действует в течение двадцати лет от момента подачи заявки в Роспатент. Роспатент – это Российское государственное патентное ведомство, которое носит официальное название «Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ)». Оформлением промышленной собственности занимается Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) <http://www.fips.ru>.

Нарушением патентов являются: несанкционированное изготовление продукции, в которой использовано запатентованное изобретение; продажа такой продукции; ввоз такой продукции в страну с целью продажи; применение запатентованной технологии в коммерческих целях.

### *Л и т е р а т у р а :*

1. Интеллектуальная и промышленная собственность и ее защита от недобросовестной конкуренции. <http://www.businesspatent.ru/article/article.200.5.html>
2. Веб-сайты российского, американского и европейского патентных ведомств: <http://www.fips.ru>, <http://www.uspto.gov>, <http://www.uspto.org>, <http://www.epo.org>.

## ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС (Plasmon Resonance)

*Ты волна моя морская,  
Своенравная волна,  
Как, покоясь иль играя,  
Чудной жизни ты полна!*  
Ф.И. Тютчев



Коллективный прыжок «электронов»

Помните старый детский анекдот про китайцев: ученые подсчитали, что если все население Китая одновременно подпрыгнет вверх на один метр, то Земля сойдет с орбиты и упадет на Солнце? Не менее необычное явление произойдет с отраженным светом, если электроны на поверхности отражающего материала (металла) одновременно «подпрыгнут». В условиях полного внутреннего отражения (когда весь свет, падающий на поверхность, отражается от нее) интенсивность отраженного света резко уменьшится при определенном угле падения и длине волны падающего света, а электроны при этом совершат «коллективный прыжок» за счет поглощенной энергии (рис. 1). Коллективные колебания («прыжки») электронов относительно ионов металлов на поверхности называют поверхност-

ными плазмонами, а описанное выше явление специфического поглощения света – поверхностным плазмонным резонансом.

Явление поверхностного плазмонного резонанса круглосуточно могут наблюдать жители и гости нашей столицы, любящая рубиновой окраской звезд Кремля. Немногие знают, что «рубиновое» стекло звезд на самом деле является «золотым» и представляет собой наночастицы золота, растворенные в высококачественном стекле (см. [Наностекло](#)). Так что отчетливо различимый красноватый цвет кремлевских звезд при освещении их изнутри мощными лампами накаливания обусловлен плазмонным резонансом на поверхности наночастиц золота. Максимум поглощения для плазмонного резонанса наночастиц золота находится вблизи 520 нм (зеленый цвет), а прошедший от ламп накаливания свет, после «вычитания» зеленого, имеет красноватую окраску. Таким образом, изменив размер золотых наночастиц, можно было бы поменять цвет Кремлевских звезд (рис. 2).

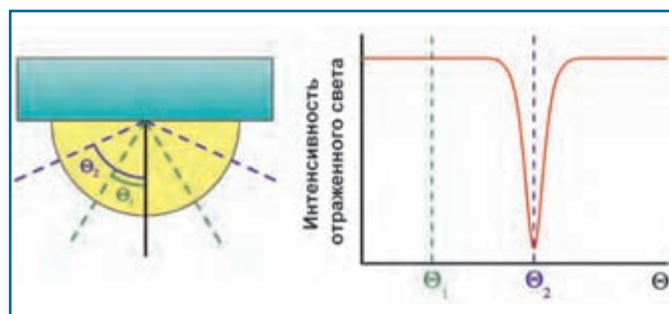
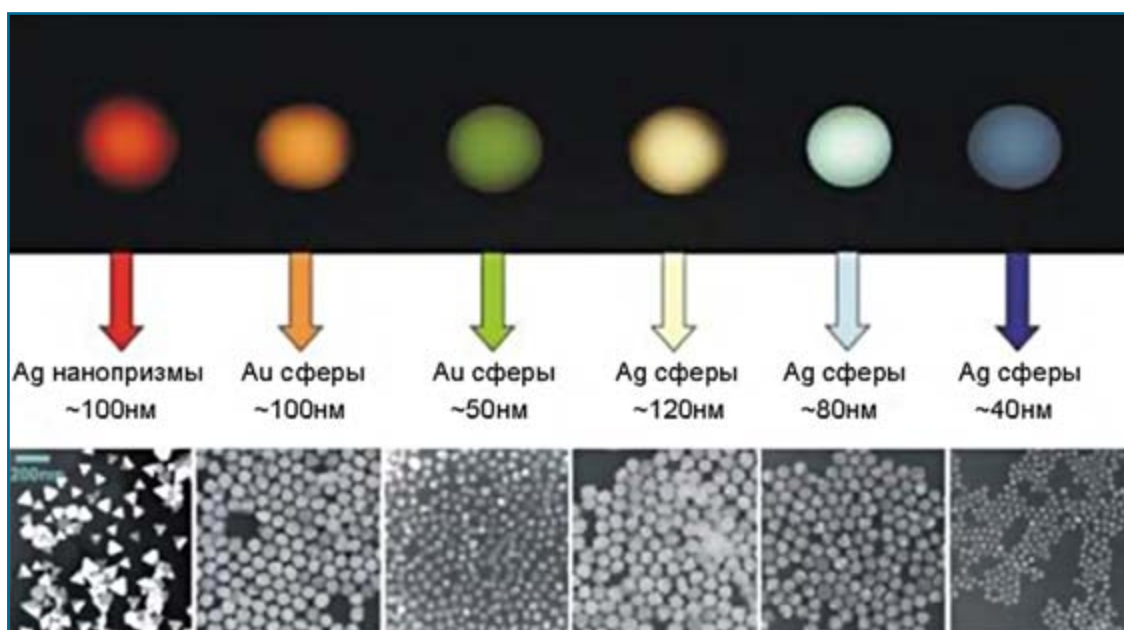


Рис. 1. Уменьшение интенсивности падающего света при поверхностном плазмонном резонансе

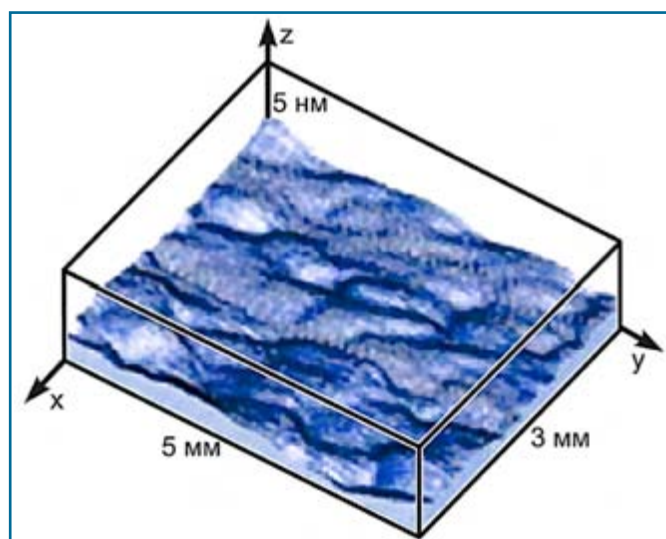




**Рис. 2.** Влияние природы, размера и формы нанокристаллов золота на их оптические (рэлеевское рассеяние света) свойства. Масштаб на всех снимках одинаков.

Условия резонансного возбуждения поверхностных плазмонов зависят не только от свойств металлической поверхности, на которой они возбуждаются, но и от диэлектрических свойств среды (воздух, адсорбированная пленка), с которой эта поверхность граничит. Любая тонкая пленка на поверхности металла сразу изменяет условия резонансного возбуждения в этом месте поверхностных плазмонов. Иначе говоря, резонансное поглощение будет наблюдаться при другом угле падения или другой длине волны падающего света.

Описанная выше зависимость лежит в основе конструкции поверхностно-плазмонного микроскопа, позволяющего с помощью видимого света наблюдать объекты ангстремной толщины! Если настроить микроскоп на угол, соответствующий оптимальному возбуждению поверхностных плазмонов для чистой металлической пленки, то в тех местах, где находится измеряемый объект, интенсивность отраженного света будет тем больше, чем толще этот фрагмент (рис. 3).



**Рис. 3.** Изображение диэлектрической пленки на поверхности серебряной пленки, полученной с помощью ППМ после компьютерной обработки сигнала с фотоматрицы

Следует отметить, что интенсивность «свечения» материала, связанная с плазмонным резонансом, достигает существенных величин только в случае наночастиц и не играет заметной роли для объемных тел.

#### Литература:

1. Валянский С.И. Соросовский образовательный журнал. 1999. № 8. С. 76–82.
2. Surface Plasmon Resonance Pages: <http://www.sprpages.nl/index.html>

## ПЛЕНКИ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ (Langmuir–Blodgett films)

«Коснешься зеленого – в зеленое и испачкаешься».

*Китайская пословица*



Познакомиться с технологией получения пленок Ленгмюра–Блоджетт Вы запросто можете в обыкновенном стакане с водопроводной водой: капните в стакан капельку подсолнечного масла, и, подождав, пока капля растечется по поверхности, опустите в получившийся «блин» палец. На пальце образуется тонкая пленка подсолнечного масла, в чем можно легко убедиться, прикоснувшись к ней и испачкавшись окончательно. Такое же явление наблюдается и в более крупных мас-

штабах при растекании маслянистых жидкостей по поверхности водоемов.

Пленка Ленгмюра–Блоджетт представляет собой монослой или последовательность монослоев вещества, нанесенных на подложку. Вместо стакана водопроводной воды, подсолнечного масла и пальца в 30-х годах прошлого столетия Ирвинг Ленгмюр и его ученица Катарина Блоджетт использовали так называемую ленгмюровскую ванну (она отличается от обычной меньшими размерами и наличием подвижных барьеров, позволяющих менять площадь ванны, рис. 1), трижды дистиллированную воду, **поверхностно-активное вещество** (ПАВ) в органическом растворителе (быстро испаряется) и твердую подложку.

Благодаря своей **амфифильной** природе молекулы ПАВ не «тонут» в воде и ориентируются

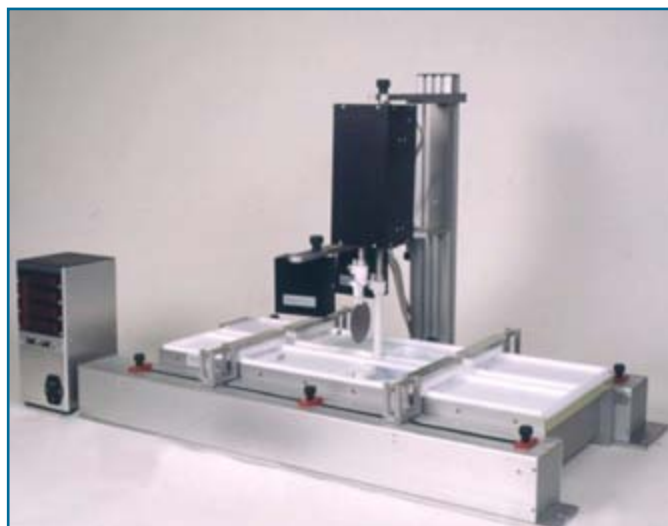
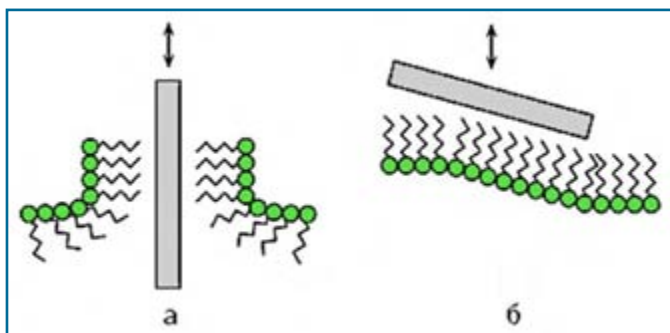


Рис. 1. Ванна Ленгмюра



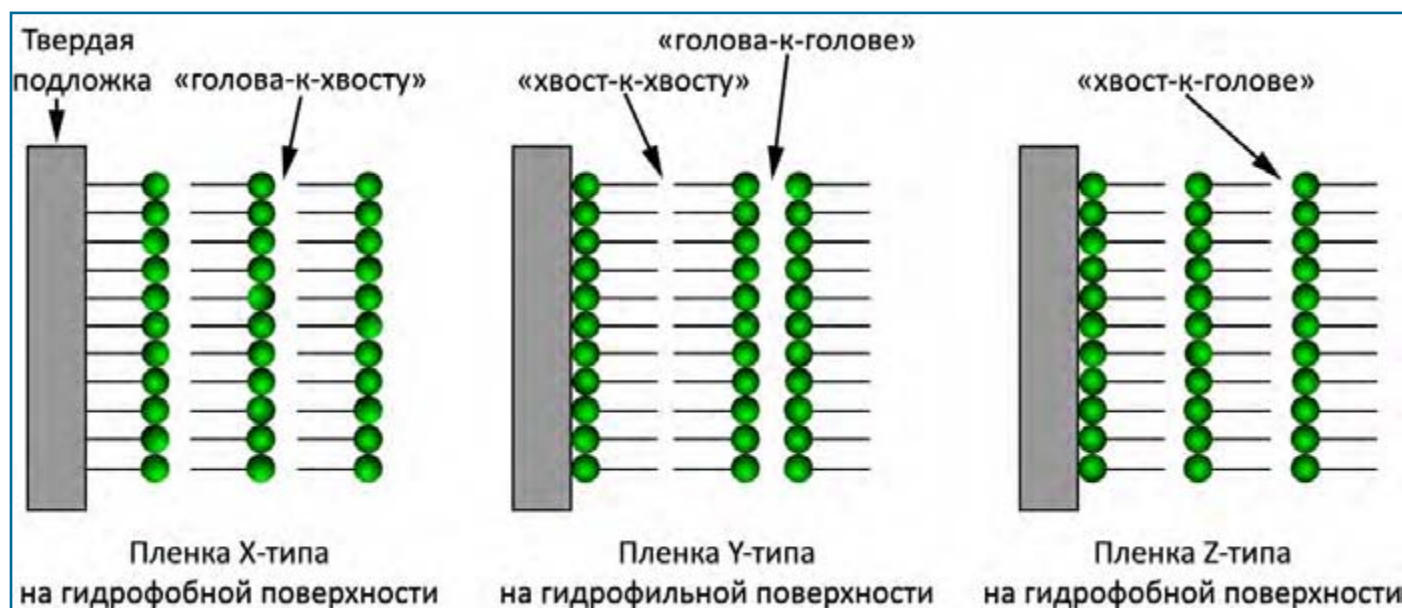
**Рис. 2.** Перенос монослоя на твердую подложку вертикальным (а) и горизонтальным (б) лифтом

единообразно относительно поверхности – «хвостами» вверх. Используя подвижные барьеры, можно уменьшать площадь водной поверхности ванны, сжимая молекулы на поверхности воды и создавая, таким образом, тонкую пленку **самособирающегося монослоя**. Для переноса плавающей мономолекулярной пленки на твердую подложку она вертикально погружается в воду через монослой и затем поднимается (метод Ленгмюра–Блоджетт, вертикальный лифт, рис. 2а) или горизонтально касается поверхности (метод Ленгмюра–Шеффера, горизонтальный лифт, рис. 2б).

Но не спешите откладывать в сторону молекулярный конструктор Ленгмюра–Блоджетт! Измените степень сжатия монослоя барьерами, и изменятся симметрия и параметры элементарных ячеек, взаимные наклоны цепочек в упорядочен-

ных доменах. Последовательным переносом монослоев можно приготовить многослойную наноразмерную пленку из мономолекулярных (по толщине) слоев, причем, изменяя способ переноса и тип подложки (гидрофильная или гидрофобная), Вы можете сформировать структуры с различной укладкой молекул в смежных слоях, так называемые X-, Y-, Z-структуры (рис. 3).

Вы можете готовить «коктейли» молекул в монослое, смешивая различные ПАВ в ванне Ленгмюра. А можете к работе в «строительстве» подключить воду – растворяйте в ней различные вещества (например, соли металлов) для проведения реакций взаимодействия монослоя с новыми ионами и молекулами. Операции с водой, содержащей ионы металлов, в итоге дают возможность получить в зависимости от валентности ионов слои металлов (по толщине в один и более атомов), внедренные в органическую матрицу (которая обычно бывает диэлектрической). Если Вы растворите соли редкоземельных элементов (например, гадолиния), получите прослойки с магнитным материалом и т.д. А можете использовать «воздушный десант»! Рассмотрим такой пример. На поверхности имеем монослой стеариновой кислоты, а в воде – ионы металла. Ограничим воздушный объем над ванной и создадим в нем определенную концентрацию паров  $H_2S$ . Часть молекул газа растворится в воде, та-



**Рис. 3.** Типы (X, Y, Z) формируемых слоистых структур при переносе нескольких монослоев на подложку (гидрофильную (Y) или гидрофобную (X, Z))



ким образом, вода обогатится анионами серы. Тогда между катионами металла и анионами серы будет протекать химическая реакция, в результате которой могут образоваться кристаллы сульфида.

Процесс применения структурированной органической матрицы для синтеза и выращивания неорганических кристаллов получил название *темплатного синтеза*. Материалы – органонеорганические нанокомпозиты, полученные таким способом, именуют *гибридными наноматериалами*.

Почему метод Ленгмюра–Блоджетт еще не внедрен повсеместно? Потому что на кажущемся таким очевидным пути встречаются подводные

камни. Техника Ленгмюра–Блоджетт внешне проста и дешева (не нужен сверхвысокий вакуум, высокие температуры и т.п.), однако первоначально требует значительных затрат для создания особо чистых помещений, так как любая пылинки, осевшая даже на одном из монослоев в *гетероструктуре*, это незалечиваемый дефект.

Тем не менее, Ленгмюровские пленки и нанокомпозиты на их основе уже нашли применение в качестве длинноволновых рентгеновских дифракционных решеток, резисторов, газовых сенсоров, наноразмерных диэлектрических полимерных покрытий и прослоек в различных устройствах и т.д.

#### Литература:

1. Левченко Е.Б., Львов Ю.М. Природа. 1990. № 3. С. 3–11.
2. Ковальчук М.В., Клечковская В.В., Фейгин Л.А. Природа. 2003. № 11. С. 11–19.

## ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА (ПАВ)

*(Surface active compounds)*

«Да здравствует мыло душистое!»

К.И. Чуковский.

«Мойдодыр»



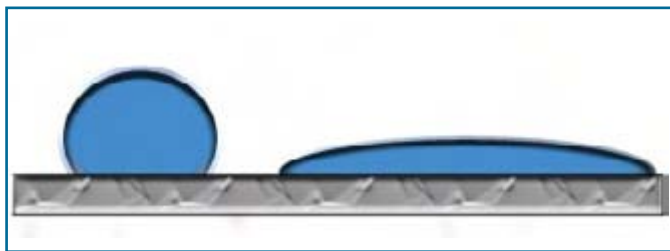
Многие из нас в детстве любили пускать мыльные пузыри, а когда мыли руки – наблюдать образование мыльной пены на границе воды и воздуха. Однако мало кто в юном возрасте знает, какие физико-химические процессы лежат в основе формирования этих мыльных сфер. Стенка обычного мыльного пузыря образована прослойкой воды, покрытой с обеих сторон тонкой пленкой поверхностно-активных веществ, обладающих *амфифильными свойствами*. Молекулы ПАВ стабилизируют границу пленки с воздухом и определяют отличие механических свойств такого раствора от чистой воды, увеличивая удельную площадь поверхности жидкости. Это и есть одно из проявлений активности ПАВ – изменения поверхностного натяжения жидкостей. Этот эффект можно увидеть и по-другому. Нанесенная на поверхность тефлоновой сковородки капля воды принимает форму шарика, стараясь уменьшить площадь контакта с поверхностью (рис. 1). Растеканию капли препятствуют

силы поверхностного натяжения. Но если вместо воды взять каплю раствора ПАВ, то она быстро растечется по поверхности тефлона, образуя тонкую пленку.

В общем случае поверхностно-активные вещества представляют собой органические молекулы, обладающие способностью самопроизвольно собираться (адсорбироваться) на границе раздела двух фаз, образуя мономолекулярную пленку (см. *Самособирающиеся монослои*) и изменяя при этом поверхностную энергию твердой фазы (или поверхностное натяжение жидкости). Наиболее часто встречающимся примером ПАВ являются соли жирных кислот (например, стеарат натрия  $C_{17}H_{35}COONa$ ), входящие в состав мыла. Чем сильнее вещество изменяет поверхностное натяжение, тем больше его поверхностная активность. Оценить поверхностную активность соединения можно без использования специального оборудования. Самый простой способ – по количеству образуемой при перемешивании пены и скорости ее оседания. Другими словами, чем лучше пенится стиральный порошок, тем больше количество или активность ПАВ, которые он содержит, и тем эффективнее ПАВ будет покрывать частицы грязи на Вашей одежде.

В концентрированных растворах молекулы ПАВ способны собираться в агрегаты, состоящие из десятков, сотен или даже тысяч молекул. Такие образования называют *мицеллами*, а при больших концентрациях амфифильные ПАВ переходят в *жидкие кристаллы*.

ПАВ активно применяют в горнодобывающей промышленности для разделения руд. Этот



**Рис. 1.** Капля воды (слева) и ПАВ (справа) на тефлоновой поверхности

процесс, называемый флотацией, основан на засыпании руды в пенный раствор. При этом одни компоненты руды смачиваются и тонут, а другие – не смачиваются и уносятся пеной, что позволяет избавиться от пустой породы. В быту мы чаще всего используем ПАВ в качестве моющих средств. Это мыло, стиральные порошки, средства для мытья посуды, пены для ванн, гели для душа и др. Моющее действие ПАВ объясняется способностью молекул разрушать кусочки загрязнений и растворять их в воде, образуя коллоидные растворы или золи. Большинство ПАВ,

входящих в состав моющих средств, в природе не встречаются, а синтезируются химически. Синтетические ПАВ обладают сильной поверхностной активностью и большой склонностью к адсорбции на различных поверхностях. Вот почему так важно после их использования тщательно промывать кухонную посуду водой. ПАВ широко применяют и для изменения свойств высокомолекулярных соединений – адсорбируясь на макромолекулах полимера или биомолекулы, ПАВ изменяют форму полимерной цепочки и влияют на свойства материала.

В *нанотехнологиях* ПАВ обычно используют как строительные блоки *мицелл*, *самособирающихся монослоев*, *пленок Ленгмюра–Блоджетт*, а также в качестве *наномодификаторов*. Без поверхностно-активных веществ невозможен синтез монодисперсных наночастиц и их стабилизация в растворах.

#### Литература:

1. Щукин Е.А., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. 3-е изд. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.
2. Зимон А.Д. Занимательная коллоидная химия. М.: Агар, 2002. 168 с.



## ПЬЕЗОДВИГАТЕЛИ (Piezomotors)

– И задом наперед, совсем наоборот, – подхватил Траляля.

– Если бы это было так, это бы еще ничего, а если бы ничего, оно бы так и было, но так как это не так, так оно и не этак! Такова логика вещей!

Л. Кэрролл. «Алиса в Зазеркалье»

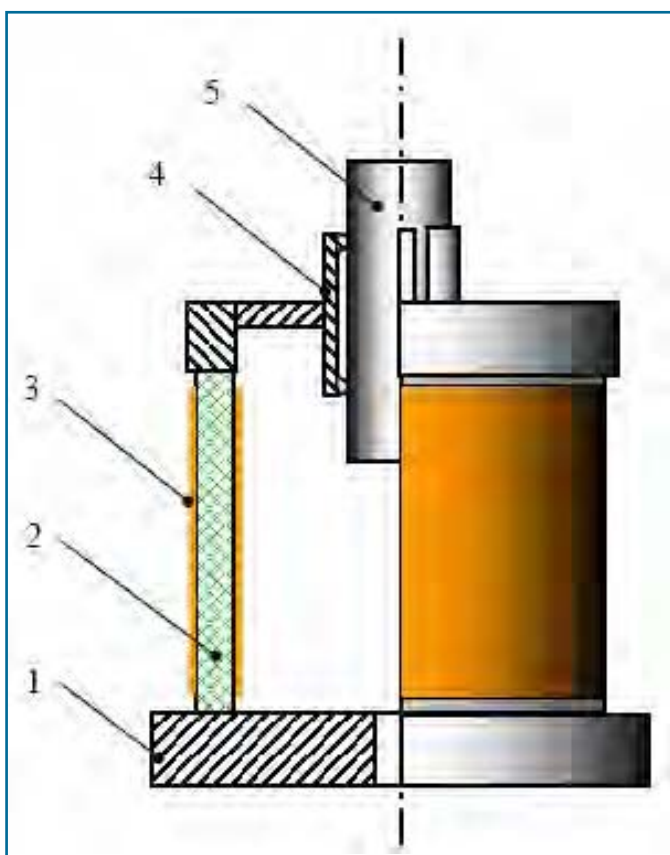


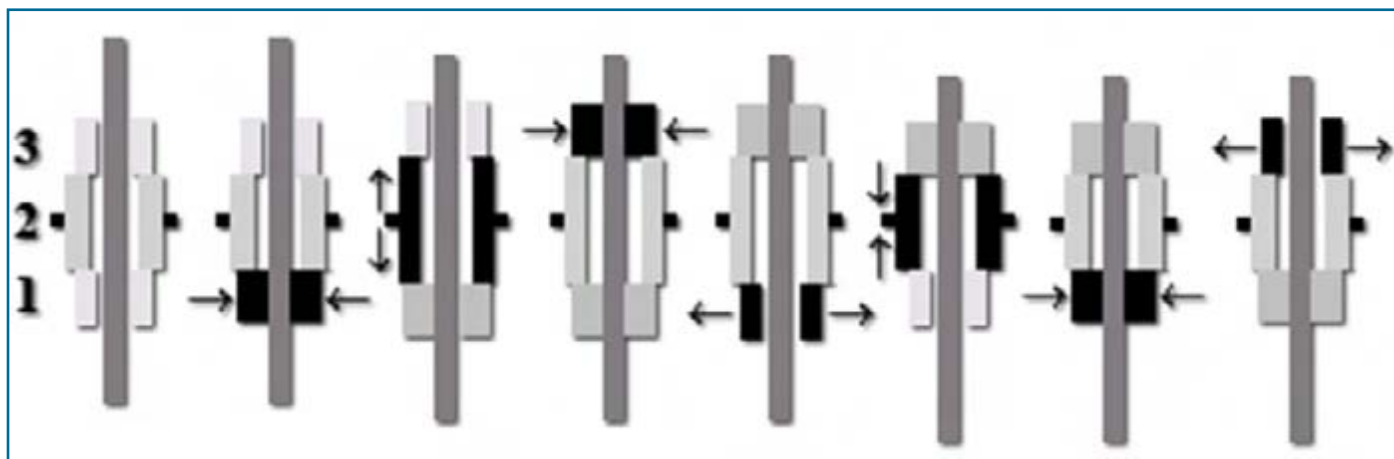
Схема шагового пьезодвигателя: 1 — основание; 2 — пьезоэлектрическая трубка; 3 — электроды; 4 — разрезная пружина; 5 — держатель объекта

Вслед за созданием интегральных схем конец XX века фактически подарил нам вторую научно-техническую революцию, связанную с развитием и внедрением **нанотехнологий**. Однако ни один нанообъект нельзя получить и тем более рассмотреть без специальных «наноинструментов». Основные проблемы оказываются связаны с трудностью манипулирования наноструктурами: для перемещения крайне малых

объектов надо уметь позиционировать их с заданной большей точностью, чем их собственные размеры — то есть передвигать объекты всего на доли ангстрем. В современном технологическом и исследовательском оборудовании для прецизионных перемещений используют специальные «системы нанопозиционирования», основой которых являются пьезодвигатели.

Пьезодвигателями называют такие системы, в которых механическое перемещение осуществляется за счет пьезоэлектрического или пьезомагнитного эффекта. Первый эффект заключается в изменении линейных размеров некоторых материалов в электрическом, а второй — во внешнем магнитном поле. Сами материалы, проявляющие такие свойства, относят к пьезоэлектрикам или к пьезомагнитным материалам. Впервые пьезоэлектрический эффект был обнаружен еще в 1880 году братьями Жаком и Пьером Кюри на кристаллах кварца. В дальнейшем аналогичные свойства были открыты более чем у 1500 веществ, из которых чаще всего используют сегнетову соль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ . Пьезомагнитные материалы представлены широким кругом магнетиков, таких как железо, никель, кобальт, их сплавы или оксиды.

Интересно, заметить, что оба пьезоэффекта полностью обратимы: при деформации пьезоэлемента на его концах появляется электрический заряд или магнитное поле (прямой пьезоэффект), а при приложении электрического или магнитного поля проявляется изменение его линейных размеров (обратный пьезоэффект). Очевидно, что пьезодвигатели работают на обратном пьезо-



**Рис. 1.** Схема работы шагового двигателя с червячной передачей

эффекте. Пьезодвигатель может быть выполнен как из пьезоэлектриков, так и из пьезомагнитных материалов, однако наибольшее распространение получили пьезоэлектрические двигатели.

В настоящее время известно более 50 различных конструкций таких двигателей. Как правило, устройство содержит основание, на котором закреплена пьезоэлектрическая трубка. Трубка имеет электроды на внешней и внутренней поверхностях, а на конце трубки укреплен разрезная пружина, представляющая собой цилиндр с отдельными пружинящими лепестками. В пружине установлен держатель объекта. Для перемещения держателя объекта к электродам пьезотрубки прикладывают импульсное напряжение: трубка плавно удлиняется или сжимается в зависимости от полярности напряжения, и ее конец вместе с пружинной и держателем объекта смещается на некоторое расстояние.

Шаговый двигатель с червячной передачей обладает более сложной конструкцией (рис. 1): передвижение вдоль балки происходит за счет последовательного изменения линейных размеров трех пьезоэлектриков в различных направлениях.

Именно на этом принципе основана работа пьезоэлектрического моторчика (4 мм длиной и 1,8 мм шириной), созданного группой ученых из



**Рис. 2.** Шаговый пьезодвигатель Кендзо Учино

университета штата Пенсильвания (США) под руководством Кендзо Учино (рис. 2). В первую очередь, такой моторчик должен найти применение в медицине, например, он мог бы управлять зеркальцем эндоскопа.

Применение пьезодвигателей отнюдь не ограничивается *системами нанопозиционирования* – пьезоэлектрические материалы и принципы их работы активно используются в микро- и *нанозлектромеханических системах, наноактюаторах, нановесах, наносенсорах и кантилеверах атомно-силовых микроскопов*.

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://elib.ispu.ru/library/lessons/shishkin/index.html>

## РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

### (Size Effects)

*«Кроме таких больших планет, как Земля, Юпитер, Марс, Венера существуют еще сотни других, которым даже имен не дали, и среди них такие маленькие, что и в телескоп трудно разглядеть...».*

*Антуан де Сент-Экзюпери  
«Маленький принц»*



Почти все жители огромной планеты Земля читали в детстве про Маленького Принца Антуана де Сент-Экзюпери, маленького мальчика, чья родная планета вся-то величиной с дом. На этой планете мы могли бы сделать много такого, о чем на нашей собственной планете нельзя и помыслить. Например, 43 раза в день посмотреть на закатное небо, просто передвигая стул, или разогреть себе завтрак на действующем вулкане, а аромат одного-единственного цветка наполнил бы благоуханием всю планету...

Однако и на Земле, когда размеры системы уменьшаются при переходе от макро- к наностоянию, известные «объемные» свойства материала существенно изменяются. Эти изменения связаны с проявлением размерных эффектов различной природы.

Так, например, структурные размерные эффекты проявляются в виде изменения межатомных расстояний, перестройки кристаллической структуры вплоть до перехода в аморфное состояние, а при химических размерных эффектах изменяется фазовый состав вещества и его реакционная способность. Это означает, что с наночастицами возможно осуществление реакций, не идущих с веществами в компактном состоянии (см. **Нанохимия**). Для большинства поликристаллических материалов характерно возрастание твердости и предела упругости при уменьшении среднего размера кристаллитов (см. **Закон Холла–Петча**) – это пример проявления механических размерных эффектов. Наиболее ярко наблюдаются некоторые физические размерные эффекты: уменьшение температуры плавления наноматериалов по сравнению с объемным состоянием в результате увеличения величины поверхностной энергии, резкое изменение электрофизических и магнитных свойств.

В последние годы интенсивно исследуют полупроводниковые наноструктуры, поскольку с их применением можно создавать новые электронные приборы, принципы работы которых основаны на размерных эффектах (например, изменение цвета люминесценции **квантовых точек** с изменением их размера вследствие проявления плазмонного резонанса или необычные электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур).

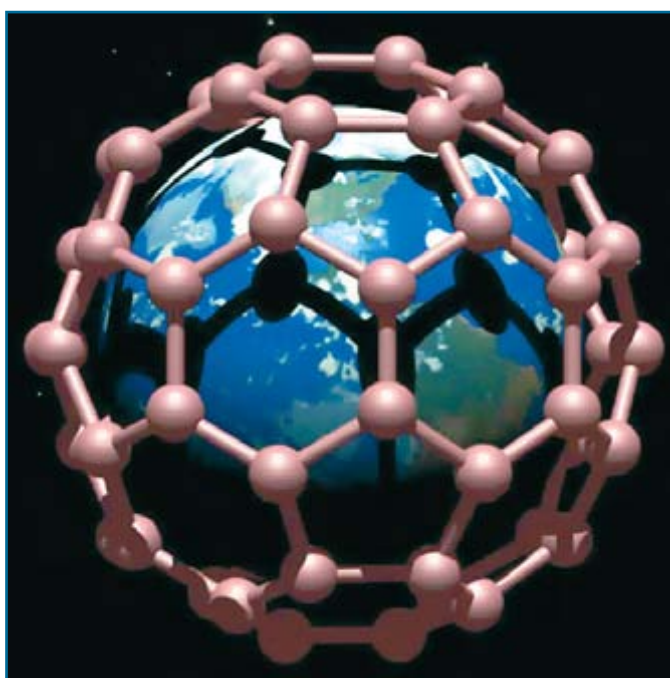
#### Литература:

1. Кульбачинский В.А. Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки // Изд. физфака МГУ, 1998. 164 с.



# *РОССИЙСКАЯ КОРПОРАЦИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ (ГК «РОСНАНОТЕХ») (Russian Corporation of Nanotechnologies, RCNT)*

---



Исследования последних 10–15 лет показали всем, насколько важную роль играют нанотехнологии в различных областях науки и техники (информационных технологиях, медицине, физике, химии, материаловедении, биологии, экологии и т.д.). Неожиданно для обычных людей, но как закономерный результат борьбы научных идей и новых технических решений, произошла тихая «революция», которая открывает путь в блистательный мир совершенства. Нанотехнологический подход – это целенаправленное регулирование свойств объектов на самом важном – молекулярном и надмолекулярном уровне, о чем можно было только мечтать еще несколько лет назад. Поэтому, управляя *наноструктурой*, можно (в определенных рамках) придавать мате-

риалам совершенно новые, практически важные свойства и смело идти вперед по пути научно-технического прогресса.

Сегодня для многих россиян будущие практические достижения, качественное улучшение их повседневной жизни, новые вехи в образовании их детей, успехи на международном рынке, да и сам термин «нанотехнологии» ассоциируются с «Российской корпорацией нанотехнологий». Впервые о необходимости создания такой корпорации как эффективной системы исследований и разработок в области нанотехнологий прозвучало в 2007 году в послании Президента В.В. Путина к Федеральному собранию. После этого органами исполнительной и законодательной власти был разработан Федеральный закон, устанавливающий правовое положение, принципы организации, цели создания и деятельности Российской корпорации нанотехнологий, который Президент подписал 19 июля 2007 г. 7 сентября 2007 г. Указом Президента Генеральным директором ГК «Роснанотех» был назначен Леонид Борисович Меламед.

Создание практически с нуля новой наукоемкой отрасли, развитие которой позволит России занять лидирующие позиции в области нанотехнологий, по силам действительно только крупной государственной корпорации, сопоставимой по масштабам с такими «монстрами», как DoE на Западе (Department of Energy, США) и NEDO на Востоке (New Energy and Industrial Technology Development Organization, Япония). Ключевые направления деятельности определены законом о ГК «Роснанотех». В первую очередь –

это организационная и финансовая поддержка инновационных научноисследовательских и опытно-конструкторских разработок; адресная поддержка наиболее выдающихся отечественных достижений в сфере нанотехнологий. Не менее важными являются коммерциализация результатов, получаемых в прикладной науке, или создание условий для их коммерциализации, внедрение нанотехнологий и производство продукции в

сфере наноиндустрии. Несомненно, внимание ГК «Роснано» будет уделено вопросам формирования нового образа Российской науки и техники в глазах общественности, а также финансированию образовательных проектов в сфере нанотехнологий, поскольку без правильно и всесторонне подготовленных специалистов невозможно обеспечить долговременный приоритет России на мировой арене.

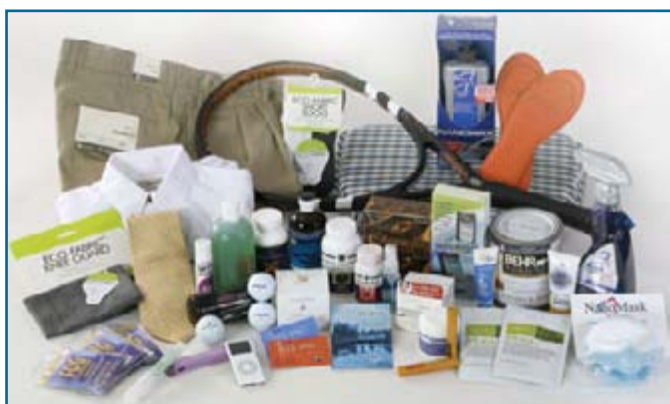
Интернет-ресурсы:

1. <http://www.rusnanotekh.ru>

## РЫНОК НАНОПРОДУКТОВ (Nanomarket)

*«Нанотехнологии способны радикально изменить баланс сил, в большей степени, чем даже ядерное оружие».*

*Объединенный Комитет  
Начальников Штабов США*



Любое изобретение, сколько-нибудь полезное для человечества, рано или поздно выходит на мировой рынок – не составляют исключения и нанотехнологии. Согласно общепринятой терминологии, продукт может называться «нанопродуктом», если при его создании, производстве, переработке или упаковке использовались наночастицы, нанотехнологические разработки или инструменты. В настоящий момент наноматериалы составляют не очень значительную долю мирового химического производства, однако с каждым месяцем она заметно возрастает. Уже сейчас в обороте находятся более 5 тысяч товаров – продуктов наноиндустрии. По версии известного финансового журнала Forbes, в десятку лучших нанопродуктов вошли расщепляющее жиры растительное масло, содержащая нанокристаллы шоколадная жевательная резинка, «фуллереновый» крем для лица, армированные **углеродными нанотрубками** бейсбольная бита и теннисная ракетка, водоотталкивающая повседневная одежда, самоочищающееся оконное стекло и устойчивые к влаге краски для ванных комнат. В

2007 году только в США рынок **наноматериалов** оценивается в более чем 20 млрд. долларов. По оценкам ведущих специалистов в области экономики, мировой рынок наноматериалов к 2012 году превысит 1 трлн. долларов. Такие высокие темпы развития рынка нанопродуктов вызывают оживленные дискуссии среди ведущих ученых в связи с тем, что до сих пор не существует единой системы стандартизации и сертификации товаров такого рода, не изучено влияние составляющих их компонентов на окружающую среду в целом и организм человека в частности. Как правило, вещество в виде наночастиц проявляет очень специфические, а зачастую – просто уникальные свойства. Хорошим примером в этом отношении является золото – относительно мало реакционноспособный металл в обычном состоянии, в виде наночастиц размером около 3 нм обладает ярко выраженными каталитическими свойствами. Попадание таких частиц в наш организм крайне нежелательно – никому точно не известно, насколько они токсичны и какие процессы могут вызвать (см. **Нанотоксичность**). Именно поэтому требуется тщательное изучение влияния продуктов нанотехнологий на живые организмы, контроль качества и чистоты выпускаемых на рынок товаров. Одним из лидеров в этом отношении является Китай, уже разработавший 8 стандартов для нанопродуктов. В США в августе 2004 года в составе Национального института стандартов (ANSI) создано специальное подразделение, которое следит за стандартизацией и сертификацией продуктов, связанных с **нанотех-**



*нологией*. В рамках сотрудничества между ANSI и Интернациональной организацией по стандартизации (ISO) в этой программе примут участие другие страны мира, среди которых Бельгия, Бразилия, Канада, Германия, Франция, Россия и другие. Благодаря активному участию этих стран в общем деле планируется решить проблему стандартизации нанопродуктов в ближайшие годы, что, безусловно, будет шагом вперед в развитии не только собственно рынка нанопродуктов, но и мировой экономики в целом.

Для того чтобы описать весь перечень перспективных нанопродуктов, готовых выйти на рынок в ближайшее время, не хватит, наверное, и многотомной энциклопедии. Проблемам их создания посвящены миллионы докладов на многочисленных конференциях по нанотехнологиям, а также регулярно публикуемые статьи в научных журналах и на различных тематических Интернет-сайтах. Ясно одно: продукты наноиндустрии – это неотъемлемая часть мировой экономики будущего.

#### Литература:

1. Gould P. Nanotoday. May 2006. P. 34–39.
2. Nanotechnology News Network, <http://old.nanonewsnet.ru>

## САМООРГАНИЗАЦИЯ (Self-Organization)

*«Скатерть-самобранка  
Усердно им дорогою служила,  
И был всегда готов им вкусный завтрак,  
Обед и ужин в надлежащий час».*

*В.А. Жуковский.*

*«Сказка об Иване-царевиче и Сером Волке»*

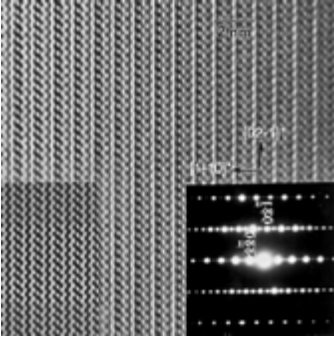
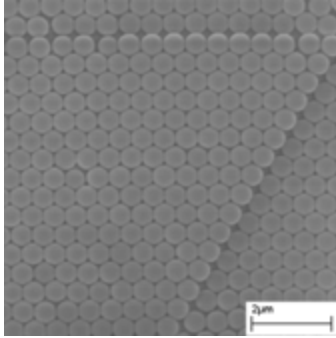
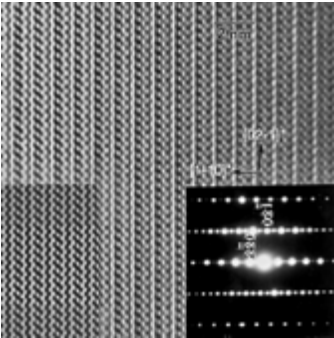
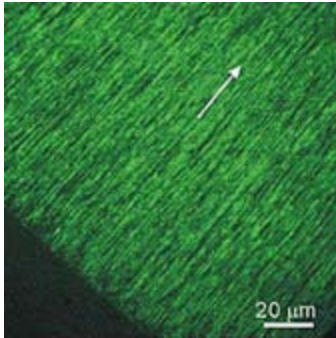
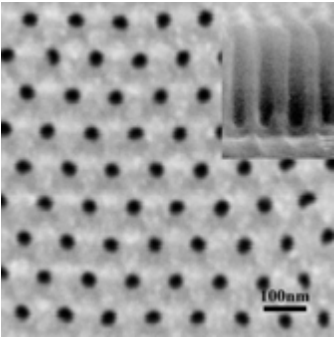
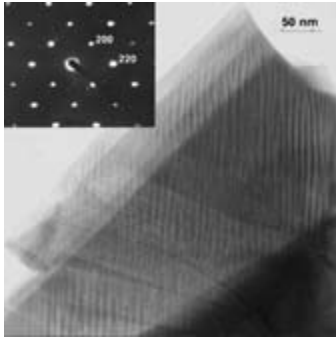
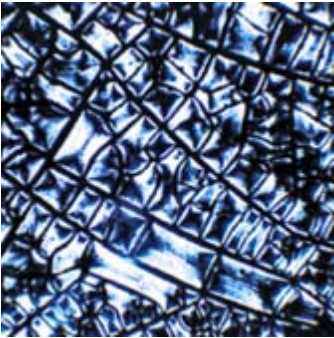
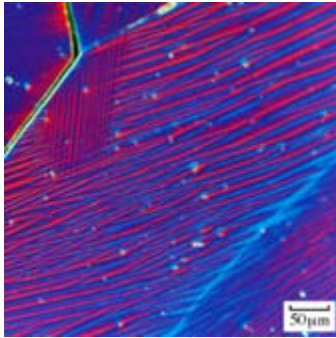


Наверное, каждый из нас сталкивался с ситуациями, когда вернувшись усталым домой, приходилось готовить ужин. Как наверное хотелось в этот момент разложить на столе скатерть-самобранку и не заботиться ни о чем. В сказках часто встречаются волшебные вещи, которые за секунду накроют Вам стол или построят дворец. Говорят, что во всяких сказаниях и легендах есть доля правды, и именно такой правдой является возможность самопроизвольной сборки определенных сложных структур из молекул или наночастиц – строительных блоков. Самоорганизация – это один из самых удивительных и загадочных эффектов, которые можно пронаблюдать в природе. Задумайтесь, например, как появились первые живые существа на Земле? И пусть этот вопрос до сих пор остается предметом споров, современная наука утверждает самопроизвольное зарождение жизни. Так, были проведены эксперименты, показавшие возможность получения простейших составных элементов белков – аминокислот – в первичной атмосфере Земли под воздействием грозных

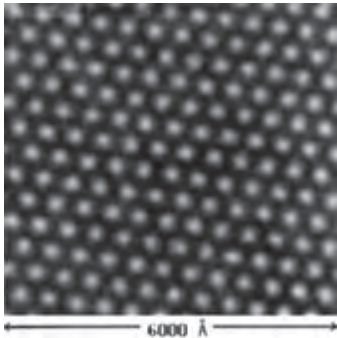
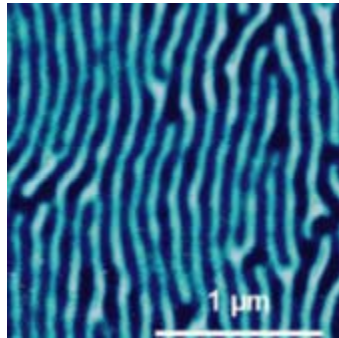
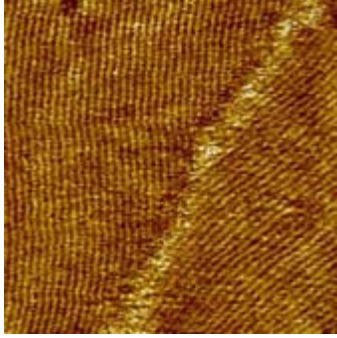
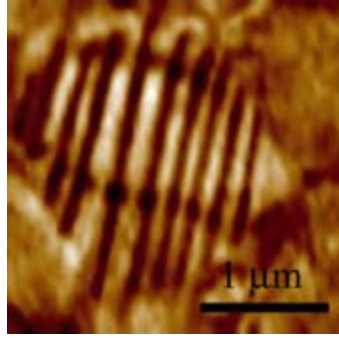
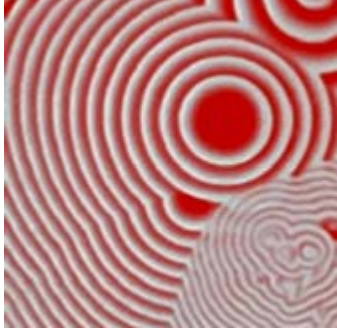
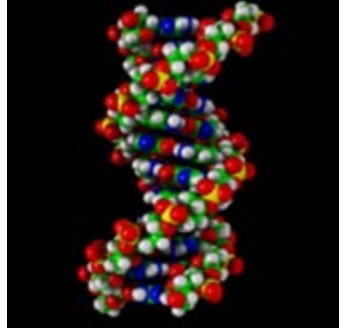
разрядов. А под воздействием ультрафиолета из обычной синильной кислоты получился аденин – одно из азотистых оснований ДНК и РНК. Чуть более поздний опыт показал образование микросфер белков из смеси аминокислот нагретой застывающей лавой. Такие микросферы во многом похожи на **нанокансулы**, которые и могли быть первыми прародителями жизни.

Термины «самоорганизация», «упорядочение», «самосборка» стали появляться на страницах научных журналов в 70-х годах XX столетия. В это время возникла новая область исследований, затрагивающая различные науки и посвященная процессам самоорганизации. Анализ самопроизвольных процессов упорядочения позволил разделить самоорганизованные системы на консервативные и диссипативные. Консервативная самоорганизация является результатом эволюции закрытых систем (обменивающихся с окружающей средой энергией, но не веществом) в направлении уменьшения энергии Гиббса с диссипацией избыточной энергии (с уменьшением температуры) и приближением системы к состоянию равновесия. К таким процессам следует относить самосборку **наноструктур** в упорядоченные массивы или коллоидные агрегаты с **фрактальными** свойствами, формирование кристаллических решеток в твердых телах или квазикристаллов в жидкостях, образование магнитных или сегнетоэлектрических доменов, образование двойной спирали ДНК и т.д. (см. табл. 1).

Таблица 1. Самоорганизованные системы

3D самоорганизованные системы	
<p><i>Кристаллические вещества</i></p>  <p>Равновесные длины химических связей между атомами, молекулами или ионами определяется противодействием кулоновских потенциалов притяжения и отталкивания</p>	<p><i>Упорядоченные массивы наноструктур, фотонные кристаллы</i></p>  <p>Плотнейшая упаковка соприкасающихся микросфер образуется под действием электростатических зарядов, силы тяжести, или в области движущегося мениска</p>
2D самоорганизованные системы	1D самоорганизованные системы
<p><i>Ячейки Бенара</i></p>  <p>Ячеистая структура в слое вязкой жидкости при неоднородном нагреве является следствием конкуренции теплопереноса по механизмам теплопередачи и конвекции</p>	<p><i>Микротрещины и «тяжи» в пленках полимеров</i></p>  <p>Оrientированное расположение дефектов в матрице возникает из-за механического «вытягивания» полимера</p>
<p><i>Пористый алюминий, пористый кремний</i></p>  <p>Ячеистая структура в слое вязкой жидкости при неоднородном нагреве является следствием конкуренции теплопереноса по механизмам теплопередачи и конвекции</p>	<p><i>Расслаивание твердых растворов или стекол</i></p>  <p>Оrientированное расположение дефектов в матрице возникает из-за механического «вытягивания» полимера</p>
<p><i>Ячеистая структура в кристаллах и стеклах</i></p>  <p>Упорядоченная сеть трещин или дефектов в материале возникает для минимизации механических напряжений при сокращении объема вещества в ходе кристаллизации</p>	<p><i>Фазовые переходы, мартенситная структура</i></p>  <p>Периодическая структура с ориентированным расположением монокристаллических областей является следствием минимизации напряжений между зёрнами в ходе роста</p>



<p><i>Смешанное состояние сверхпроводника II рода</i></p>	<p><i>Доменная структура магнитных материалов</i></p>
 <p>Упорядоченное расположение вихрей Абрикосова в сверхпроводнике в магнитном поле определяется конкуренцией процессов выталкивания и проникновения поля в образец</p>	 <p>Упорядоченное расположение областей с взаимноориентированным направлением магнитных моментов является результатом конкуренции обменной энергии и энергии размагничивания</p>
<p><i>Жидкокристаллические фазы (то же для 1D систем)</i></p>	<p><i>Доменная структура сегнетоэлектриков</i></p>
 <p>Упорядочение молекулярных ассоциатов или мицелл под воздействием слабых лиофильных/лиофобных или электростатических Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий</p>	 <p>Упорядоченное расположение областей с ориентированным вектором искажения структуры возникает вследствие электростатических взаимодействий и разности потенциалов на гранях кристаллита</p>
<p><b>4D или пространственно-временная самоорганизация</b></p>	<p><i>Самосборка двойной спирали и репликация ДНК</i></p>
 <p>Расширяющиеся кольца в реакции Белоусова-Жаботинского являются следствием взаимосвязи эффектов автоколебательной реакции и диффузии</p>	 <p>Селективное связывание пуриновых и пиримидиновых оснований: аденина и тимина (или урацила), гуанина и цитозина двух молекул ДНК при образовании двойной спирали</p>

Аналогично, в случае интенсивного притока энергии извне оказывается возможным образование организованных **диссипативных структур** являющихся следствием эволюции системы в сильно неравновесных условиях (диссипативная самоорганизация). В данном случае движущей силой организации является стремление к увеличению беспорядка или, более научно, энтропии системы. К числу диссипативных самоорганизованных структур относят пространственно-периодические конвективные системы, системы с хаотическим поведением, некоторые типы динамических фрактальных струк-

тур, периодические пространственно-временные структуры – автоколебания и автоволны (табл. 1).

Изучение процессов самоорганизации и **самосборки** позволили установить, что для формирования устойчивых упорядоченных структур необходимо наличие локального минимума потенциальной энергии, среди возможных других состояний системы, иными словами, формирование упорядоченных структур оказывается невозможным при наличии только притягивающего или только отталкивающего потенциала между простейшими элементами. При этом самоорганизация является строго неравновесным процессом, во многом определяемым кинетическими

факторами. Так, агрегация **нанокластеров**, является гораздо более быстрым процессом, чем рекристаллизация с образованием более крупных частиц. Следовательно, формирование массивов **наноструктур** следует относить исключительно к неравновесным явлениям. В равновесных же условиях самоорганизация оказывается невозможна по причине стремления системы в целом к увеличению энтропии (то есть гомогенному «смешиванию» атомов). Это означает, что любые процессы организации можно рассматривать как накопление системой потенциальной энергии. При этом формирующиеся структуры обладают самоподобием – как кристаллические вещества состоят из отдельных атомов, так и агрегаты **наночастиц** состоят из отдельных **нанокристаллов**. Интересно отметить, что большую часть живой природы представляют системы, обладающие самоподобием по функциям или по структуре (например, цепочка клеточное ядро → клетка → организм → биосфера), что можно расцени-

вать как стремление живой природы к увеличению собственной внутренней энергии.

За работы по термодинамике необратимых процессов, особенно за теорию диссипативных структур» в 1977 году И.Р. Пригожину была присуждена Нобелевская премия по химии. Сегодня подходы самоорганизации уже используют в различных технологических процессах (оптические удвоители частоты, конструкционные композиционные материалы), при этом основной упор в высокотехнологичных областях науки и техники ставится на применение процессов **самосборки**. Так корпорация IBM уже выпустила первые интегральные чипы с применением самосборки составных узлов, а один из мировых лидеров в производстве носителей информации – компания Seagate использует самоупорядочение магнитных частиц для создания сред хранения информации со сверхвысокой плотностью записи (среды SOMA – self-ordered magnetic arrays).

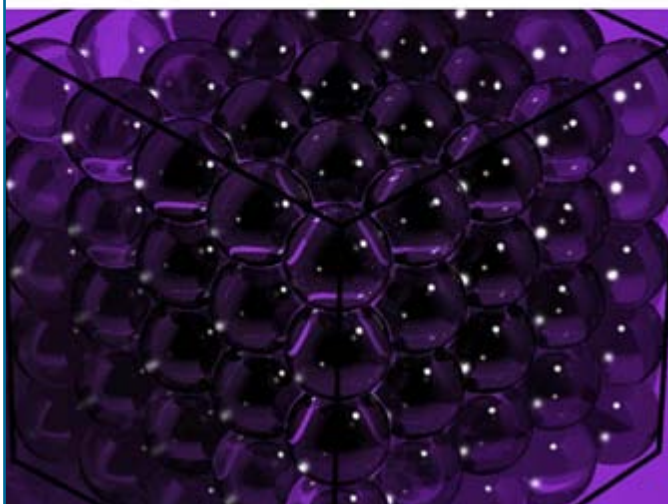
Посмотрим, далеко ли до воплощения скатерти-самобранки в жизнь...

#### Литература:

1. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. 5-е изд. 2005. 296 с.
2. Третьяков Ю.Д. Успехи химии. 2003. Т. 72, № 8. С. 731–763.

## САМООРГАНИЗОВАННЫЕ МАССИВЫ (Superlattices)

*«Мы кирпич за кирпичом  
Всей бригадой строим дом...»  
Е.А. Гудилин*



Читатели, знакомые с технологиями получения упорядоченных массивов **наночастиц**, согласятся с тем, что эту статью следует начать с аналогии поведения сферических наночастиц с обычными шариками. Многие из вас, наверное, помнят игру в бильярд и укладку шаров в «пира-

миду» – в замкнутом объеме шары сами образуют равносторонний треугольник, причем исключительно одним способом. Если же их «насыпать» в большой ящик и немного потрясти, то они самопроизвольно образуют практически идеально упорядоченную структуру. В некоторых случаях атомы одного сорта также можно рассматривать в виде однородных по размеру шаров, которые аналогичным образом упорядочиваются в ограниченном объеме. В химии и кристаллографии даже существует термин «плотнейшая шаровая упаковка».

Подобно атомарным ансамблям и макросферам сферические наночастицы способны спонтанно собираться в упорядоченные агрегаты (сверхрешетки). Основными причинами такого «слипания» наночастиц являются различные слабые силы (электростатические и капиллярные взаимодействия, поверхностное натяжение), которые, в целом, стремятся уменьшить общую

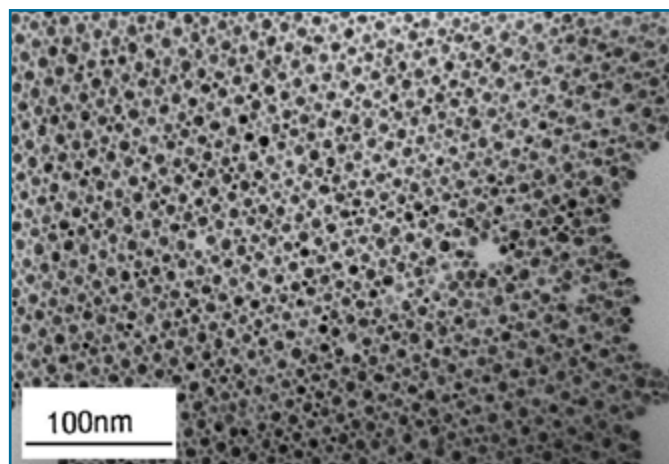
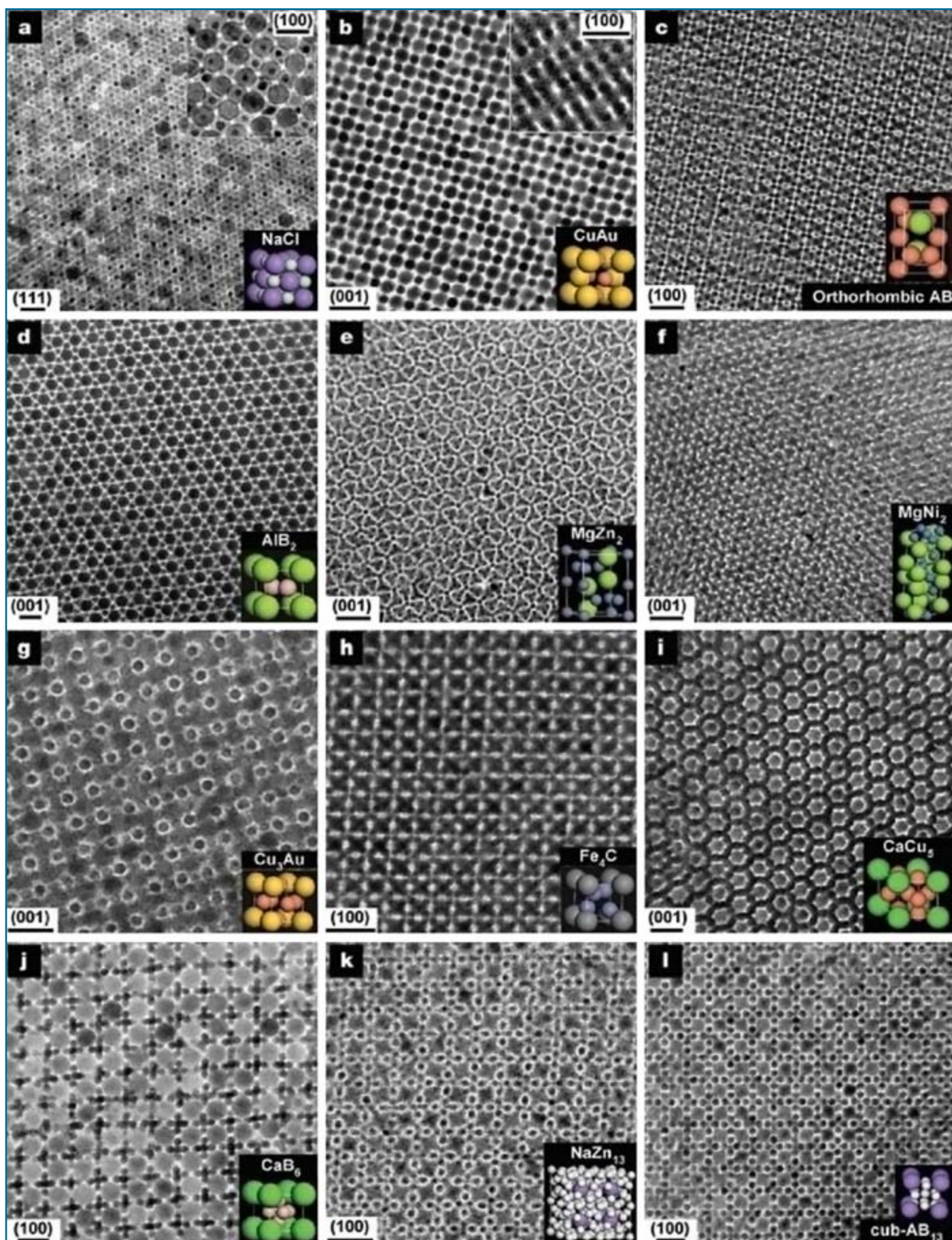


Рис. 1. Упорядоченный массив наночастиц золота





**Рис. 2.** Микрофотографии характерных проекций бинарных сверхрешеток, образованных различными наночастицами, и модельные элементарные ячейки соответствующих трехмерных структур

площадь поверхности наночастиц и, следовательно, их поверхностную энергию. Впервые упорядоченные массивы наночастиц золота диаметром ~4 нм в оболочке алкилтиолов были получены в 1995 г. медленным упариванием растворителя, а двумя месяцами позже удалось «уложить» монодисперсные пятинанометровые частицы селенида кадмия. Чем однороднее были исходные наночастицы, тем «правильнее» становилась их упаковка в массиве.

На сегодняшний день синтезированы два тримерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, FePt, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CoO, CdS, CdSe, CdTe, PbSe, сплавов Fe–Pt, Au–Ag, наноструктур «ядро в оболочке» CdS/CdSe, CdSe/CdTe, Pt/Fe, Pd/Ni и других, стабилизированных *поверхностно-активными веществами* (рис. 1, 2). Кроме того, для анизотропных наночастиц удалось добиться формирования ориентационно-упорядоченных массивов. Однородные по размеру наночастицы можно «собрать» в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные «нити», двумерные плотно упакованные слои, трехмерные массивы или «малые» кластеры. Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы поверхностно-активного вещества и даже от дисперсионной среды.

Однако давайте вернемся к плотнейшим упаковкам: если в ящик «насыпать» два типа шаров с определенным соотношением размеров, можно получить сложные, организованные структуры,

подобные атомным решеткам кристаллических соединений, типа NaCl, AlB<sub>2</sub> и т.д. Для формирования аналогичных структур на наноуровне используют коллоидные растворы с бимодальным распределением наночастиц. При этом варьирование размеров *нанокристаллов*, концентрации, природы растворителя, температуры и скорости осаждения позволяет подобрать оптимальные условия для образования трехмерных ансамблей нанокристаллов, изоструктурных известным интерметаллическим соединениям (рис. 2). Возможность управления процессом организации наночастиц в пространственно-упорядоченные сверхрешетки во многом определяется стабильностью золь наночастиц в процессе испарения растворителя. Подбор растворителя для обеспечения медленной дестабилизации позволяет получать трехмерные сверхрешетки нанокристаллов с дальним порядком (до 100 мкм).

Сегодня пространственно-упорядоченные массивы еще не нашли широкого использования в технике, однако уже рассматриваются вопросы их применения для *устройств хранения информации* со сверхвысокой скоростью записи, оптических позиционно-чувствительных *на-носенсоров* и люминесцентных панелей. К тому же, согласно даже самым скромным оценкам развитие подходов самосборки и технологическое применение самоорганизованных массивов наноструктур позволит выйти на качественно новый уровень в развитии *наноиндустрии* и информационных технологий.

#### Литература:

1. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology. Wiley-Interscience, 2003. P. 400
2. Rotello V. Nanoparticles: Building Blocks for Nanotechnology (Nanostructure Science and Technology), Springer, 2003. P. 300.
3. D.Talapin C.Murray // Science, 2005, 310, 86-89



## САМОСБОРКА (Self-Assembly)

*«Кай возился с плоскими остроконечными льдинами, укладывая их на всевозможные лады... Он складывал из льдин и целые слова, но никак не мог сложить того, что ему особенно хотелось, – слово “вечность”. Снежная королева сказала ему: “Если ты сложишь это слово, ты будешь сам себе господин, и я подарю тебе весь свет и пару новых коньков”. Но он никак не мог его сложить».*

*Г.-Х. Андерсен.*

*«Снежная королева»*



**Рис. 1.** Кай так и не смог собрать из льдинок слово «вечность» (Г.-Х. Андерсен «Снежная королева», иллюстрация В. Ерко). Современные нанотехнологи стремятся создать такие условия, чтобы требуемые структуры собирались сами

Наверное, Кай был бы не против, если бы после часов его бесплодных усилий льдинки сжались и сами сложились в требуемое слово. Интересно, задумывались ли Вы когда-нибудь, почему буквы сами не складываются в слова, разбросанные по комнате вещи не хотят сами

раскладываться по ящикам, а на уборку уходит масса времени, которого и так всегда не хватает. На самом деле, стремление к беспорядку является одним из фундаментальных законов термодинамики, согласно которому энтропия (мера беспорядка) любой изолированной системы стремится увеличиться. Иначе говоря, согласно этому закону, вещи «просто мечтают» самопроизвольно оказаться разбросанными по комнате, и разложатся по ящикам лишь в том случае, если комната перестанет быть изолированной, и в нее начнется приток энергии извне в виде вашей кропотливой работы.

Этих законов никто не отменял и в наном мире. Если вы хотите упорядоченно «разложить» молекулы или наночастицы, последние наверняка не будут разделять ваше желание. О некоторых способах упорядочения нанообъектов, связанных с кропотливой работой нанотехнолога (см. *Сканирующая зондовая микроскопия*, *Нанопинцет*, *Оптический пинцет* и др.), Вы можете прочитать в этой книге. Впрочем, бывают ситуации, когда при определенных условиях микро- или нанообъекты вдруг начинают сами выстраиваться в виде упорядоченных структур. Например, одинаковые по размеру шарики в стакане сами складываются в плотнейшую шаровую упаковку. Противоречия с фундаментальными законами природы здесь нет – система в данном случае оказывается не изолированной, и на нанообъекты



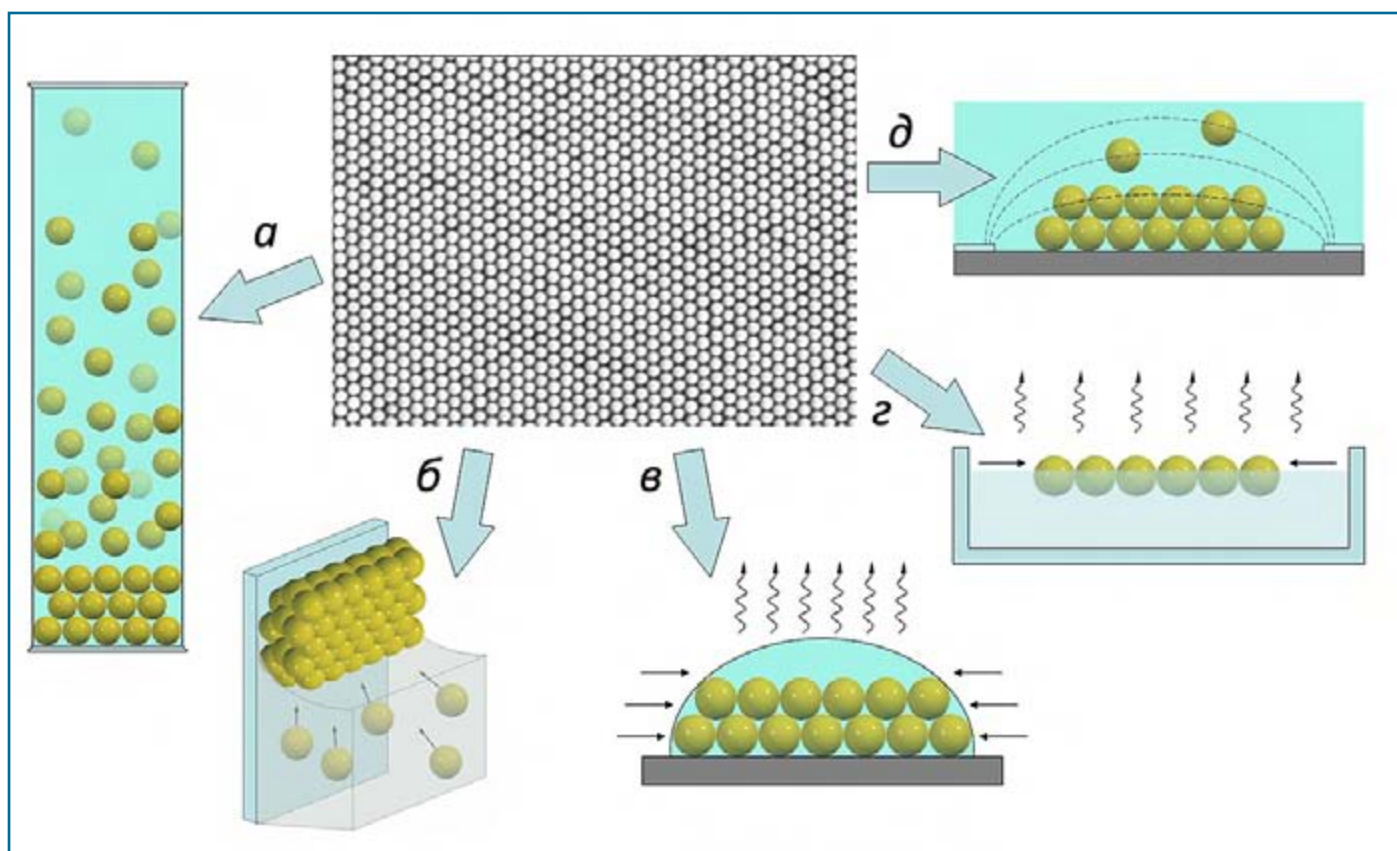
оказывается какое-то внешнее воздействие. Однако в отличие от поэтапных методов организации системы, данное воздействие направлено не на конкретную частицу, а на все сразу. Вам не нужно выстраивать требуемую структуру вручную, помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим – создаваемые условия таковы, что нанообъекты делают это сами и одновременно. Процессы, использующие создание таких особых условий, называются процессами самосборки, и уже сейчас они играют важнейшую роль во многих областях науки и техники.

В настоящее время известны примеры того, как с помощью различных методов самосборки удавалось получать упорядоченные структуры как из молекул, так и из более крупных образований – нано- и даже микрочастиц. Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поля, капиллярные силы, игра на

смачиваемости–несмачиваемости компонентов системы и другие приемы.

Рассмотрим простую систему, наглядно иллюстрирующую различные подходы, используемые для самосборки. Предположим, у нас есть закрытый сосуд с водой, в которой диспергированы коллоидные сферические частицы на основе полистирола, и мы хотим, чтобы частицы образовали упорядоченную структуру, как показано на рис. 2. Если сосуд изолирован от внешних воздействий (например, парит в открытом космосе), то этого никогда не произойдет, поскольку частицы полистирола несут одноименный электрический заряд и поэтому отталкиваются друг от друга.

Какие же условия необходимо создать для самосборки? Вариантов несколько. Самое простое решение – вернуть сосуд на Землю. На полистирольные микросферы начнет действовать сила тяжести, под действием которой частицы начнут оседать на дно сосуда, образуя упорядоченную структуру (рис. 2а).



**Рис. 2.** Самосборка полистирольных микросфер под действием (а) гравитационного поля, (б) капиллярных сил, (в, г) сил поверхностного натяжения и (д) электрического поля. В центре — электронно-микроскопическое изображение упорядоченных полистирольных микросфер. Образец синтезирован на Факультете наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова

Другой способ осуществить самосборку – открыть сосуд и вертикально поместить в него стеклянную подложку (рис. 2б). В области границы раздела «подложка–вода–воздух» образуется мениск, в который частицы будут втягиваться под действием капиллярных сил. По мере испарения воды мениск будет сползать вниз по подложке, оставляя за собой пленку из упорядоченных полистирольных микросфер. Самосборка под действием капиллярных сил – это очень распространенный способ синтеза структурированных микро- и **наноматериалов**.

Еще один несложный способ добиться упорядочения полистирольных частиц – поместить каплю суспензии из нашего сосуда на гидрофильную поверхность (рис. 2в). По мере высыхания капли частицы будут собираться вместе, и в данном случае самосборка будет происходить под действием силы поверхностного натяжения. В случае полистирольных микросфер поверхность, на которой происходит самосборка, не обязательно должна быть твердой. Дело в том, что плотность полистирольных частиц очень близка к плотности воды, поэтому полимерные шарики, оказавшиеся на поверхности воды, не тонут. Таким образом, при нагревании суспензии

полистирольных микросфер на поверхности быстро образуется белая пленка (практически как пенка на молоке), которая также состоит из упорядоченных частиц (рис. 2г).

Наконец, как уже отмечалось, полистирольные микросферы заряжены, поэтому для их самосборки можно использовать электрическое поле (рис. 2д).

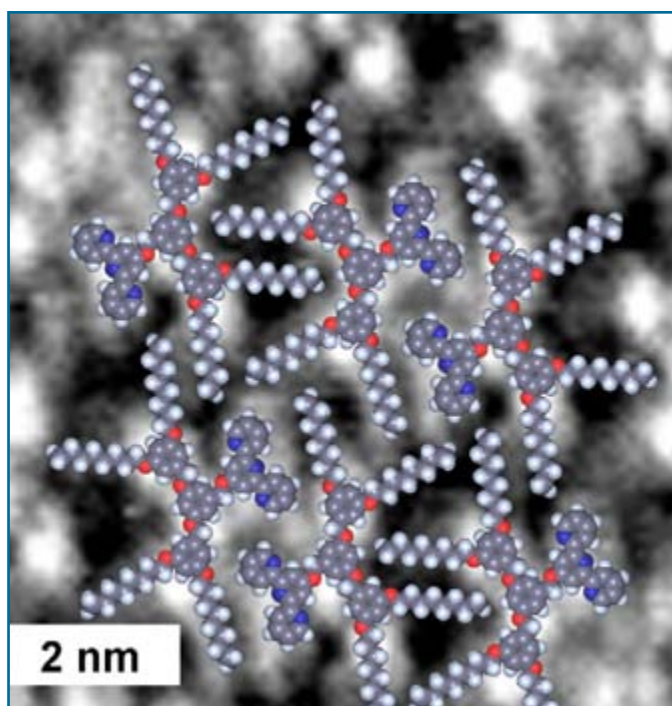
Система полистирольных микросфер в воде достаточно проста, и далеко не все из рассмотренных способов самосборки можно применить для получения упорядоченных структур на основе более сложных объектов. Впрочем, многообразие микро- и наноструктурированных материалов, полученных методами самосборки велико – это и **самособирающиеся монослои**, и различные мезопористые структуры, и **фотонные кристаллы**... Огромное значение процессы самосборки имеют и в живой (рост кораллов, ракушек, зубной эмали...), и в неживой природе (снежинки, опалы...). В настоящее время процессы самосборки начинают активно использоваться и в производстве. В частности, известная компания IBM внедряет процессы самосборки для создания компьютерных чипов нового поколения.

#### Литература:

1. Третьяков Ю.Д. Успехи химии. 2003. Т. 72, № 8. С. 731–763.

## САМОСОБИРАЮЩИЕСЯ МОНОСЛОИ (Self-Assembled Monolayers)

«Я сделал это SAM»



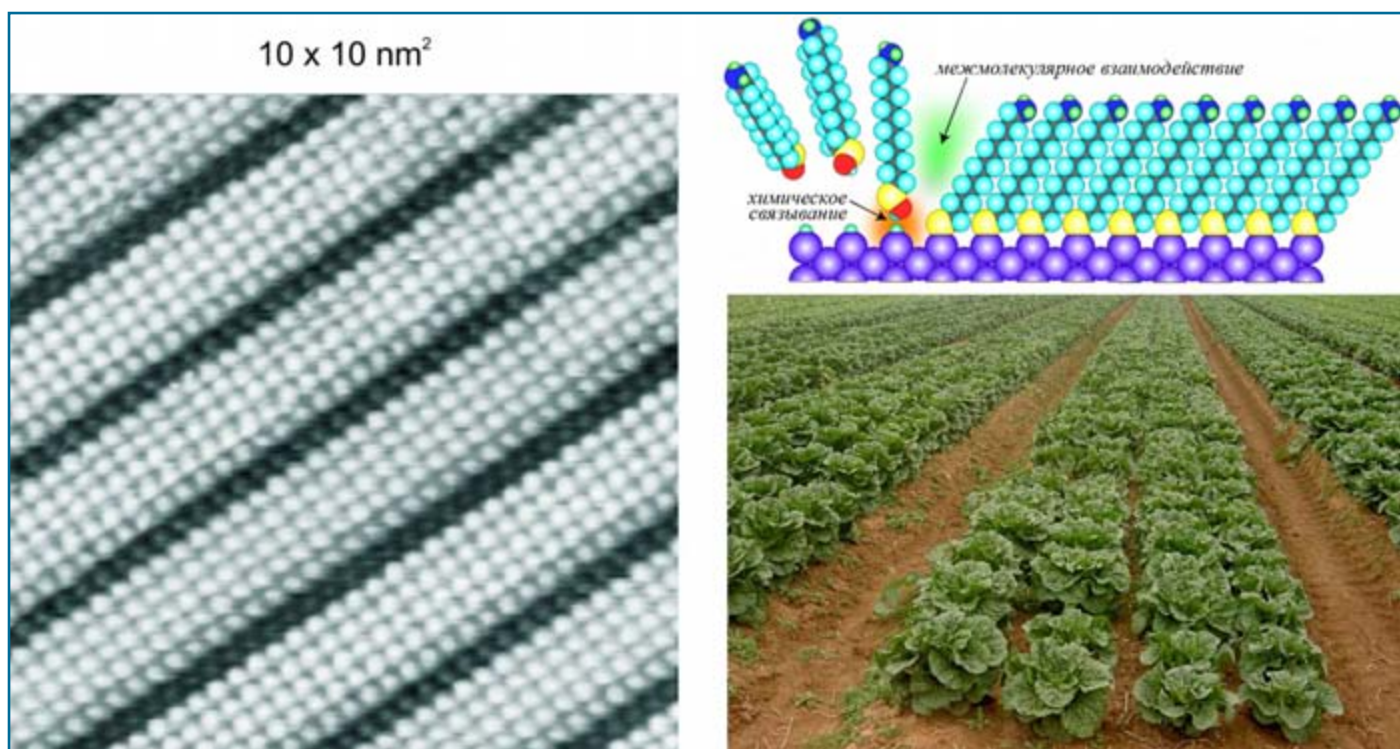
Чтобы представить себе структуру и сам процесс формирования самособирающихся монослоев, необходимо в первую очередь рассмотреть атомно-гладкую поверхность какого-либо кристаллического материала. Скол монокристалла обычно происходит по определенным граням, образуя срез с периодическим расположением атомов на поверхности. Попробуйте расколоть большие кристаллы льда — они ломаются по идеально ровным и очень гладким плоскостям. Для простейшего кубического кристалла поверхность скола будет представлять собой сетку с квадратной ячейкой, в узлах которой находятся

атомы вещества, а рельеф поверхности будет напоминать огромное поле с лунками для посадки картофеля или капусты.

Если такую поверхность погрузить в раствор *поверхностно-активного вещества* (ПАВ), то молекулы ПАВ смогут взаимодействовать с поверхностными атомами, а упорядоченность расположения последних приведет к упорядоченности самих молекул. Именно так происходит формирование самособирающихся монослоев, и теперь понятно, в чем заключается «самосборка» молекул. Периодичность в упаковке присоединенных молекул, очевидно, зависит от соотношения межатомных расстояний на поверхности подложки и размеров молекулы ПАВ. В зависимости от природы молекул и структуры поверхности кристалла, можно получать самые разнообразные структуры монослоев, напоминающие бесконечное поле пшеницы или грядки картофеля и капусты (рис. 1). Для увеличения однородности и степени организации монослоев пленки часто готовят с использованием *метода Ленгмюра–Блоджетт*.

В настоящее время самособирающиеся монослои уже активно используют для получения самоочищающихся и водоотталкивающих покрытий. Однако, наибольшие перспективы их применения открываются в разработке проводящих цепей и устройств *молекулярной электроники*.





**Рис. 1.** СТМ-изображение монослоя молекул этантиола на поверхности золота (100) и схема формирования монослоя

Литература:

1. Reed M.A., Zhou C., Muller C.J., Burgin C.J., Tour J.M. Science. 1997, 278. P. 252–254
2. Reed M.A. MRS Bulletin. 2001, 2. P. 113. Ф

## СЕРАЯ СЛИЗЬ (Grey Goo)

*«О, дивный новый мир».*

*О. Хаксли*



Каких только вариантов возможного конца света не придумало человечество за свою долгую историю! Достаточно вспомнить скандинавский Рагнарёк и выжигающего землю огненного великана Сурта, библейский Армагеддон, в котором будут участвовать «цари всей земли обитаемой», или трубу Суур в канун Яум альКыйама. Эти сценарии гибели существующего человеческого

рода предусматривают вмешательство неких божественных сил и уничтожение всего живого, но при этом всегда вслед за Последним Днем происходит переход в «светлое будущее», и наступает своеобразный Золотой век.

Менее романтическая современность, отказывая себе в наступлении Золотого века, предлагает иные варианты конца света. Правда, его причиной становится вовсе не фатум, а человеческая деятельность, которая может привести как к социальному (пример тому можно найти хотя бы в антиутопии Д. Оруэлла «1984»), так и к техногенному (И. Ефремов «Туманность Андромеды») концу.

Один из наиболее популярных сюжетов конца света сводится к тому, что некая разумная раса конструирует машину, впоследствии уничтожающую своих создателей. Первым литературным воплощением этой идеи, по-видимому, стал «Хозяин Моксона» Бирса. Затем идею подхватили многочисленные фантасты и развили ее во всех возможных направлениях. Хрестоматийный бунт машин из фильма «Терминатор» и идеальное государство индиотов, которое посетил Ийон Тихий в своем 24-м путешествии – это только два из многочисленных примеров, демонстрирующих проявление подсознательного страха человека перед чуждой ему, не знающей чувств, машиной.

Стремительное развитие высоких технологий и успехи в области создания микроминиатюрных устройств сделали принципиально возможным создание машин нового типа, способных представлять угрозу для современной цивилизации.

Такие конструкции были описаны в книге Эрика Дрекслера «Машины созидания» (Engines of Creation, 1986), который, кстати, является достаточно известным ученым и почетным председателем американского Института предвидения (Foresight Institute). В своей книге автор описывает мощную систему нанопроизводства, основанную на крошечных роботах-сборщиках, способных укладывать в нужные места отдельные молекулы. Такая молекулярная сборка была бы в высшей степени продуктивна, поскольку на микроскопических расстояниях роботы движутся очень быстро, а молекулярные масштабы обеспечивают высочайшую точность и прочность сборки. Но наряду с привлекательностью этой идеи Дрекслер также разглядел и описал очевидные опасности возможного сценария дальнейших событий. Естественно, удобнее всего, когда нанороботов конструируют сами **нанороботы**. Но коль скоро робота-сборщика в принципе можно запрограммировать на самовоспроизводство, появляется и вероятность выхода процесса саморепликации из-под контроля. Тогда роботы-репликаны, число которых экспоненциально возрастает (быстрее, чем число кроликов Фибоначчи), начнут перерабатывать для самовоспроизведения всю доступную им материю и биомассу, стремительно превращая окружающий мир в «серую слизь» (grey goo), как вскоре эта напасть и была названа... Благодарить за широкое распространение идеи нанотехнологического конца

света следует опять-таки некоторых писателей-фантастов и сценаристов фильмов-катастроф. В результате «серая слизь» прочно стала ассоциироваться в сознании людей со словом **нанотехнологии**. Разумеется, для нарождающегося нанотехнологического бизнеса подобная ситуация крайне дискомфортна.

И вот, Эрик Дрекслер в соавторстве с Крисом Фениксом (Nanotechnology. 2004. Vol. 15, №8. P. 869) выступили со своеобразным опровержением сценария «grey goo», утверждая, что саморепликация на самом деле не является единственным способом создания эффективных систем молекулярного нанотехнологического производства. Вместо построения множества самодостаточных, свободно перемещающихся роботов для изготовления продуктов практичнее использовать более простые руки-манипуляторы – вроде нынешних сборочных конвейеров на больших производствах. Ключевым моментом является то, что такой манипулятор, удаленный с конвейера, будет столь же бездеятельным и безвредным, как электролампочка, вывернутая из своего патрона.

Даже по этому краткому описанию можно заметить, что на самом же деле Дрекслер вовсе не разрушает миф о «серой слизи», а просто очерчивает возможный его сценарий – тот, который своей контролируемостью больше нравится обществу... Другой вопрос, что вариант «grey goo» слишком примитивен для конца света, чтобы его можно было бы воспринимать всерьез...

#### Л и т е р а т у р а :

1. Дрекслер К.Э. Машины созидания: грядущая эра нанотехнологии / Пер. М. Свердлова. Anchor Books, 1986.
2. Берд К. Нановойны, серая слизь и вопросы без ответов // Компьютерра. 2004. 20 июля.



## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (Synchrotron Radiation)

*Три кольца премудрым эльфам – для добра их гордого,  
Семь колец пеицерным гномам – для труда их горного,  
Девять – людям Средиземья – для служенья черного  
И бесстрашия в сраженьях смертоносно твердого,  
А Одно – всеильное – Властелину Мордора...*

*Дж. Р.Р. Толкиен. «Властелин Колец»*



**Рис. 1.** Кольцо Курчатовского центра синхротронного излучения

12,12 секунды. Ровно столько времени понадобилось бы ямайскому бегуну Асафе Пауэллу, мировому рекордсмену в беге на 100 метров, чтобы пробежать по 124-метровому кольцу Курчатовского центра синхротронного излучения «магнитормозного» (рис. 1). Малютке электрону, «бегущему» со скоростью близкой к скорости света, требуется немногим более 400 наносекунд для преодоления того же расстояния в располо-

женной в туннеле вакуумной трубки диаметром несколько сантиметров. Подобно каплям пота, с «разгоряченного» бегом электрона срываются потоки фотонов в широком диапазоне энергий (от инфракрасного до жесткого рентгеновского) с интенсивностью в 1 млн раз ярче интенсивности излучения солнца.

124-метровое кольцо с вакуумной трубкой внутри – сердце синхротрона Курчатовского центра синхротронного излучения (рис. 1), ускорителя электронов, описанные «капельки» – синхротронное излучение. В настоящее время в мире работает более 60 источников синхротронного излучения и ведется строительство более 10 новых источников. Энергии электронов в ускорителях различной конструкции могут изменяться от сотен мегаэлектронвольт до нескольких



**Рис. 1.** В.В. Путин, С.Б. Иванов и М.В. Ковальчук (директор центра) во время визита в Курчатовский центр синхротронного излучения

гигаэлектронвольт. Помимо Курчатовского центра синхротронного излучения в России с конца 1970-х годов постоянно действует Сибирский центр синхротронного излучения (СЦСИ) в Новосибирске.

К достоинствам центров синхротронного излучения следует отнести широкий диапазон энергий фотонов, высокую интенсивность излучения, экологическую безопасность. Кроме того, работа на оборудовании с использованием синхротронного излучения не требует от исследователей специальных предосторожностей, помимо соблюдения обычных мер техники безопасности и санитарных норм.

Области использования синхротронного излучения очень разнообразны. Прежде всего, это научные исследования в различных отраслях

знания от ядерной физики до молекулярной биологии и наноматериалов – в современных синхротронных центрах представлены все основные методы, использующие электромагнитное излучение. Синхротронное излучение широко применяется в медицине для ранней диагностики и радиотерапии различных заболеваний с существенным снижением необходимых для этого доз облучения. Растет популярность синхротронных методов в исследованиях, связанных с охраной окружающей среды: детектировании следовых количеств тяжелых металлов в промышленных отходах, почвах, а также биологических объектах – растениях, живых тканях и др. В то же время, синхротронное излучение является незаменимым методом исследования вещества в нанокристаллическом состоянии.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л. Успехи химии. 2001. Т. 70, № 5. С. 429–463.
2. Европейский синхротронный центр: <http://www.esrf.eu>
3. Факты и цифры о BESSY II: <http://www.bessy.de/cms.php?idcat=190&changelang=5>

## СИСТЕМЫ НАНОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ (Nanopositioning systems)

«Точность – вежливость королей».  
Крылатое выражение

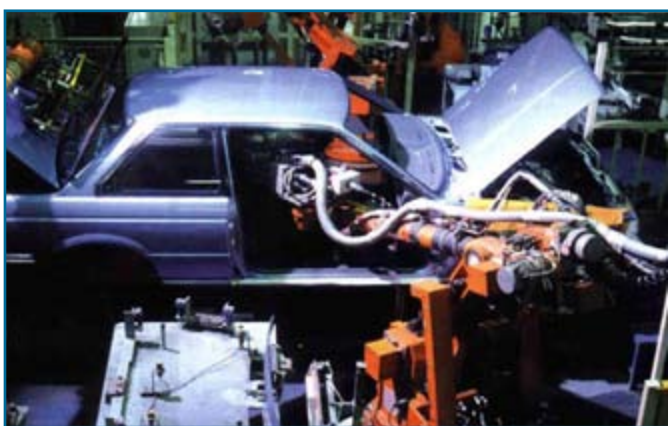


Рис. 1. Сборка автомобиля на заводе

Многие знают, как на заводах роботы собирают современные автомобили (рис. 1). Железные «руки» берут одни детали с конвейера, соединяют их с другими, прикручивают гайки, подсоединяют шланги. Но это уже отработанное промышленное производство, а в лабораториях в то же время ученые активно работают над созданием автомобилей наноразмера – **наномашин** – составленных всего из нескольких десятков или сотен атомов. Как собрать такой автомобиль и как автоматизировать процедуру его создания?

Эту и многие другие проблемы решает нанопозиционирование – процесс перемещения объектов с нанометровой точностью! Пока серийное производство наноавтомобилей еще не начато, а первую наномашину собирают вручную, нанопозиционирование находит широкое применение в исследовательских лабораториях и, в частности, в **сканирующих зондовых микроскопах**. Существующие устройства нанопозиционирования

очень многообразны, но практически все они используют в своей конструкции специальные **пьезодвигатели**, способные создавать крайне малые (всего в сотые доли нанометра!) перемещения под действием электрического напряжения.

Одной из наиболее распространенных систем нанопозиционирования является пьезосканер – внешне он выглядит как металлический цилиндр, на котором установлена небольшая двигающаяся платформа (рис. 2). Внутри такого устройства размещена трубочка, сделанная из пьезоэлектрического материала. Подавая напряжение между различными частями трубки, можно заставить ее сжиматься и удлиняться, а также изгибаться в различных направлениях. Некоторые пьезосканеры устроены иначе – в основе своей конструк-

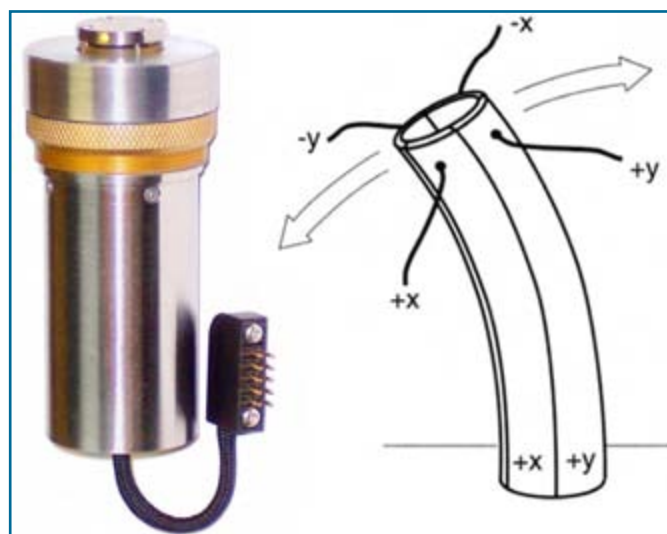


Рис. 2. Пьезосканер производства фирмы Quesant (слева) и схематическое изображение пьезотрубки (справа)





**Рис. 3.** Гексапод производства Physical Instruments

ции они содержат три отдельных пьезодвигателя, каждый из которых перемещает платформу в своем направлении.

Еще более сложное устройство – гексапод – представляет собой платформу, закрепленную с помощью шарниров на шести подвижных ножках изменяемой длины (рис. 3). Гексаподы, называемые также платформами Стюарта, известны уже давно – их активно применяют в робототехнике и в медицине, для управления положением спутниковых антенн и даже в тренажерах для летчиков, так как они дают возможность перемещения с шестью степенями свободы. С разработкой пьезодвигателей гексаподы стали использоваться и в нанопозиционировании: изменение длины ножек гексапода, с точностью до долей ангстрема, производится не с помощью электромоторов и гидравлики, а с помощью пьезоэлектриков.

#### Л и т е р а т у р а :

1. <http://www.physikinstrumente.com>
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Мир, 2004.

# СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ (СЗМ)

*(Scanning Probe Microscopy)*

*«Бытие – это реальность, данная нам в ощущениях».*

*Классика марксизма-ленинизма*



Лиса Алиса и слепой Кот Базилио

Для того чтобы увидеть атом, существует, как считается, громоздкий и дорогой электронный микроскоп. Однако, несмотря на известную поговорку, не всегда лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. В ряде случаев можно получить больше информации, если атом... ощупать, в буквальном смысле. Для этого и существует сканирующая зондовая микроскопия. Зонд – это микроскопический, чрезвычайно чувствительный щуп, который пробегает, сканирует шероховатости поверхности атомарного размера. Более того, в ряде случаев зонд физически может двигать атомы.

В основе сканирования или «ощупывания» лежит достаточно простой принцип – атомы острия щупа «чувствуют» атомы, находящиеся на поверхности, тем сильнее, чем ближе они находятся друг к другу. Это похоже на то, как отталкиваются два сухих воздушных шарика, наэлектризованные о шерстяной свитер или волосы. В случае СЗМ возникающие силы межатомного взаимодействия чуть-чуть изменяют положение щупа, и это можно обнаружить за счет чувствительных детекторов. Подобным образом мы ощущаем приближающийся наэлектризованный воздушный шарик, который еще даже не коснулся наших волос. Другой известным всем пример – мошенник кот Базилио из сказки «Золотой ключик», который шел и «вслепую» ощупывал дорогу впереди себя специальной палочкой. Зонды СЗМ, как правило, именно «вслепую», но



**Рис. 1.** Аллегорическое представление персонажей наномира во время сеанса сканирующей зондовой микроскопии (компания Micromasch)

без всякого мошенничества, ощупывают поверхность (рис. 1).

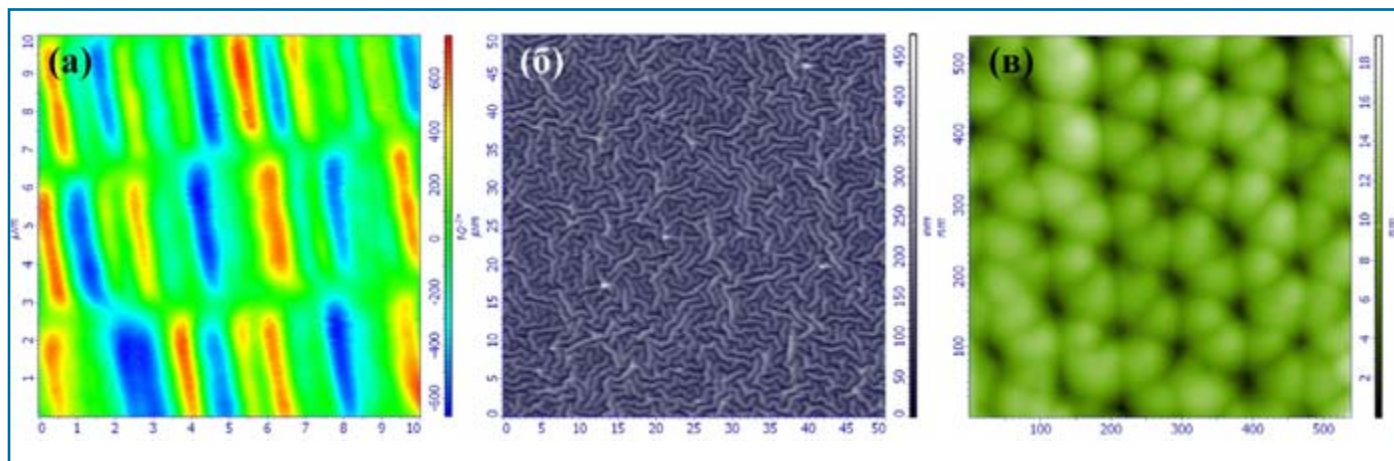
Первый сканирующий зондовый микроскоп был придуман на кончике пера и затем создан в 1981 году Г. Биннигом и Г. Рорером из Цюрихского отделения фирмы IBM. Этот микроскоп, правда, регистрировал не изменение положения острого щупа, но изменение так называемого туннельного тока, возникающего за счет туннелирования электронов между поверхностью материала и зондом (сверхтонкой иглой), как только он приближается к поверхности на расстояние, сравнимое с межатомным. Движение зонда над поверхностью образца осуществлялось с помощью специальных *пьезодвигателей*, способных создавать запрограммированные компьютером перемещения с шагом в сто миллиардные доли метра (0,01 нм или 0,1 Å). Столь необычный и чрезвычайно эффективный способ исследования поверхности очень быстро был оценен научной общественностью и в 1986 году Бинниг и Рорер получили Нобелевскую премию за разработку *сканирующего туннельного микроскопа* (СТМ). Всего через год (1982 г.) Д.В. Пол, основываясь на аналогичных принципах, создал сканирующий оптический микроскоп ближнего поля, где в качестве зонда использовал остро заточенное оптоволокно, через которое регистрировал оптические свойства образца: отражение и пропускание света, люминесценцию, спектральные характеристики излучения. С появлением СТМ, СБОМ, а впоследствии *атомно-силового микро-*

*скопа* (АСМ, 1986 г.) стало возможным сделать новый шаг в изучении окружающего нас мира.

Современные методы зондовой микроскопии позволяют изучать рельеф, состав и структуру с разрешением в доли ангстрем, «видеть» и перемещать единичные атомы и молекулы. За последнее десятилетие применение зондовой микроскопии позволило значительно расширить познания в различных областях физики, химии и биологии (рис. 2).

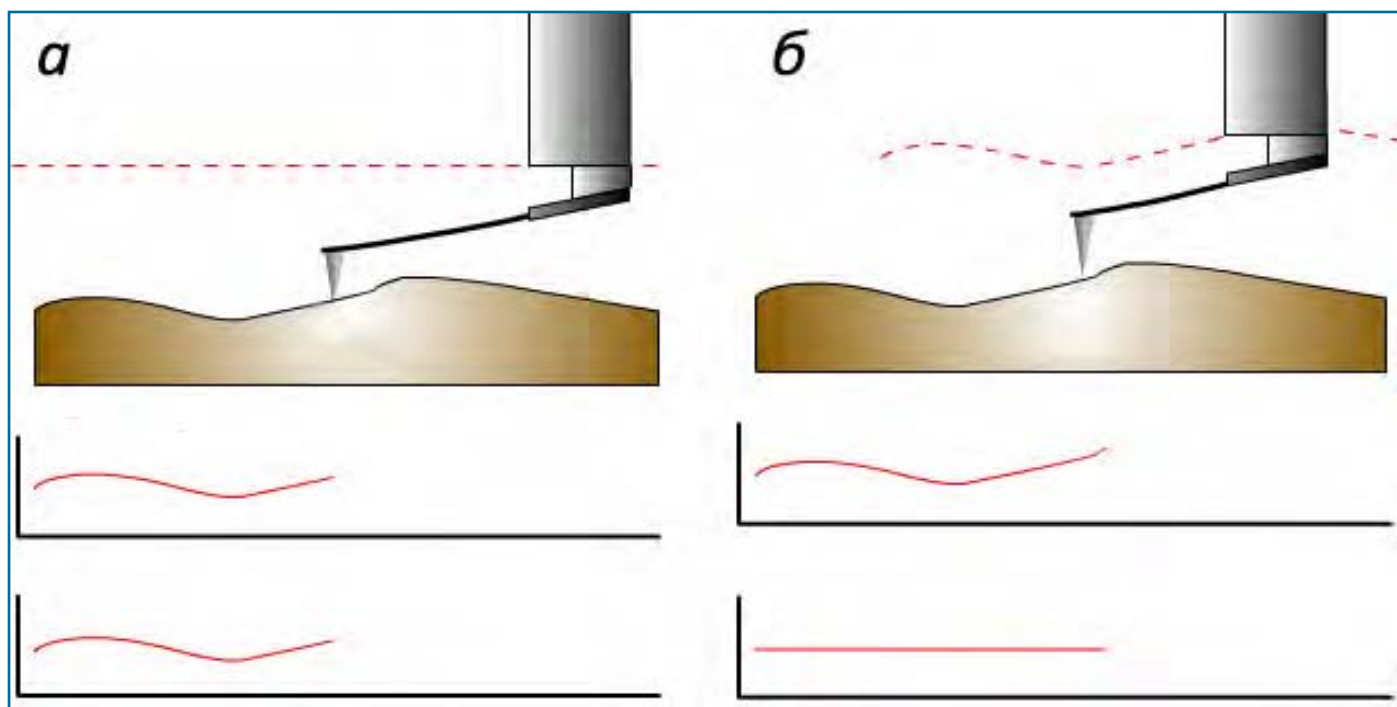
Основой всех типов сканирующей зондовой микроскопии является, как уже отмечалось, взаимодействие зонда с исследуемой поверхностью за счет механических, электрических или магнитных сил. Так, для сканирующей туннельной микроскопии откликом системы является туннельный ток, протекающий между зондом и сканируемой поверхностью, для атомно-силовой микроскопии – Ван-дер-Ваальсовы силы отталкивания зонда от поверхности, в случае магнитно-силовой микроскопии зонд реагирует на изменение магнитного поля над образцом, в ближнепольной микроскопии оптические свойства образца детектируются через диафрагму, находящуюся в ближней зоне исследуемой поверхности и т.д. Природа взаимодействия и определяет принадлежность прибора к тому или иному члену семейства зондовых микроскопов.

Процесс сканирования осуществляется путем линейной (построчной) развертки прямоугольного или квадратного участка поверхности по координатам X и Y, тогда как измеряемый сигнал



**Рис. 2.** Магнитные домены на поверхности компьютерного жесткого диска (а, магнитно-силовая микроскопия), люминесцентное покрытие бензоата тербия на проводящем стекле (б), поверхность анодированного оксида алюминия (в). Изображения получены на ФНМ МГУ, СЗМ NT-MDT Integra Aura





**Рис. 3.** Разновидности контактной АСМ: а — метод постоянной высоты, б — метод постоянного взаимодействия ([www.ntmdt.ru](http://www.ntmdt.ru))

коррелирует с положением зонда над образцом по координате  $Z$ . В зависимости от принципа измерения сигнала различают два способа исследования поверхности методом СЗМ (рис. 3).

*Метод постоянной высоты* заключается в точном измерении величины взаимодействия зонда и поверхности в процессе сканирования при постоянном расстоянии между зондом и поверхностью образца. В результате получают зависимость интенсивности регистрируемого сигнала от положения зонда над образцом.

*Метод постоянного взаимодействия* заключается в измерении координаты зонда  $Z$  над образцом в процессе сканирования при постоянной

интенсивности рабочего взаимодействия, которое задается путем обратной связи. В результате получают зависимость расстояния между зондом и поверхностью образца  $Z|_{I=\text{const}}(X, Y)$  при постоянной интенсивности сигнала от положения зонда над образцом. Однако полученный этим методом массив данных не отображает реальной картины топографии поверхности. Метод постоянного взаимодействия обычно используется для исследования корреляции топографического контраста с другими типами рабочих взаимодействий (как, например, ориентации магнитных доменов, напряженности электростатического поля над образцом и т.д.).

#### Литература:

1. [www.ntmdt.ru](http://www.ntmdt.ru)
2. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications Ed. Dawn Bonnell Wiley-VCH; 2 edition, 2000.

# СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ (СТМ)

## (Scanning Tunnel Microscopy)

«Мы искренне верим, что красота атомных структур послужит стимулом к применению данного метода к решению тех задач, где он сможет принести наибольшую пользу человечеству».

Г. Бинниг, Г. Рорер 1986 г.

царский ученый Г. Рорер и немецкий ученый Г. Бинниг были удостоены Нобелевской премии по физике.

В сканирующем туннельном микроскопе **пьезодвигатели** с высокой точностью (до 0,1 Å) приближают атомно-острую металлическую иглу к поверхности образца, который, естественно, не должен являться изолятором для возможности регистрации туннельного тока. Между иглой и поверхностью прикладывается напряжение от десятых долей до единиц вольт. На расстоянии порядка 10 ангстрем между атомами иглы и образца начинает протекать туннельный ток. Туннельный ток имеет квантовую природу, а его величина существенно зависит от расстояния между иглой и поверхностью образца: так, при напряжении между иглой и образцом около 1 В и сближении зонда с поверхностью с 15 до 8 ангстрем (примерно в 2 раза) ток изменяется

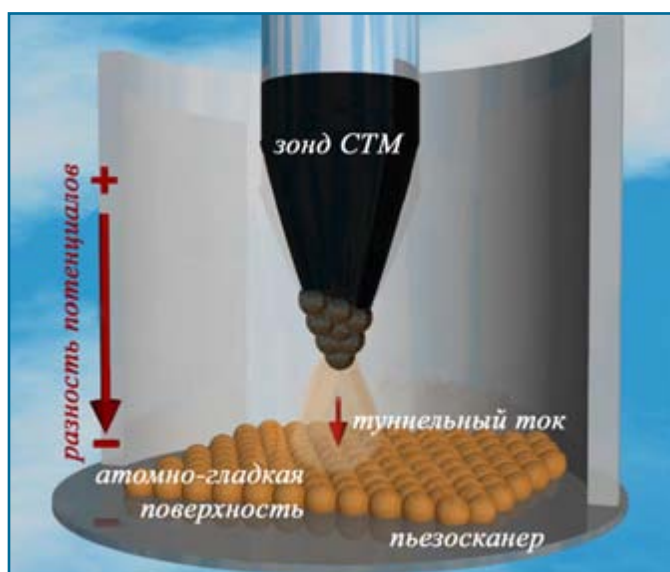


Схема метода сканирующей туннельной микроскопии

Как ни странно, несмотря на всю новизну тематики **нанотехнологий**, основы метода сканирующей туннельной микроскопии, являющейся на сегодня одним из основных методов исследования **наноструктур** и пленочных материалов, были заложены еще в тридцатых годах XX века. Именно тогда Г.А. Гамовым было решено **уравнение Шредингера**, описывающее возможность преодоления частицей энергетического барьера даже в случае, когда ее энергия много меньше высоты самого барьера. Через полвека, в 1981-м году, это явление, названное **туннельным эффектом**, позволило создать уникальный прибор для исследования проводящих поверхностей с практически недостижимым для других методов разрешением и буквально ощупать атомную структуру поверхности. В 1986 г. за разработку сканирующего туннельного микроскопа швей-

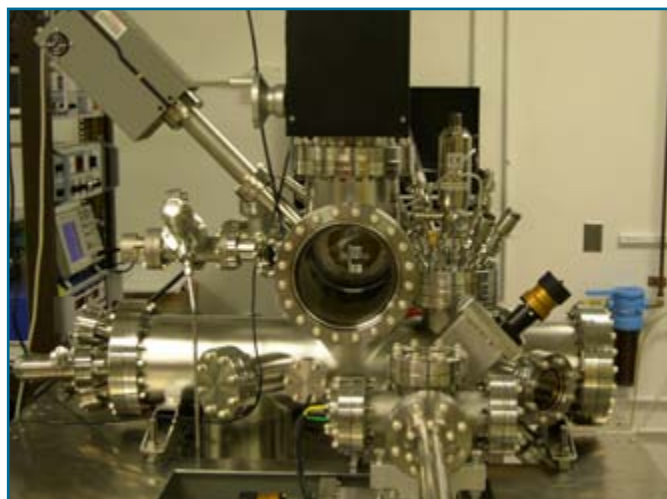
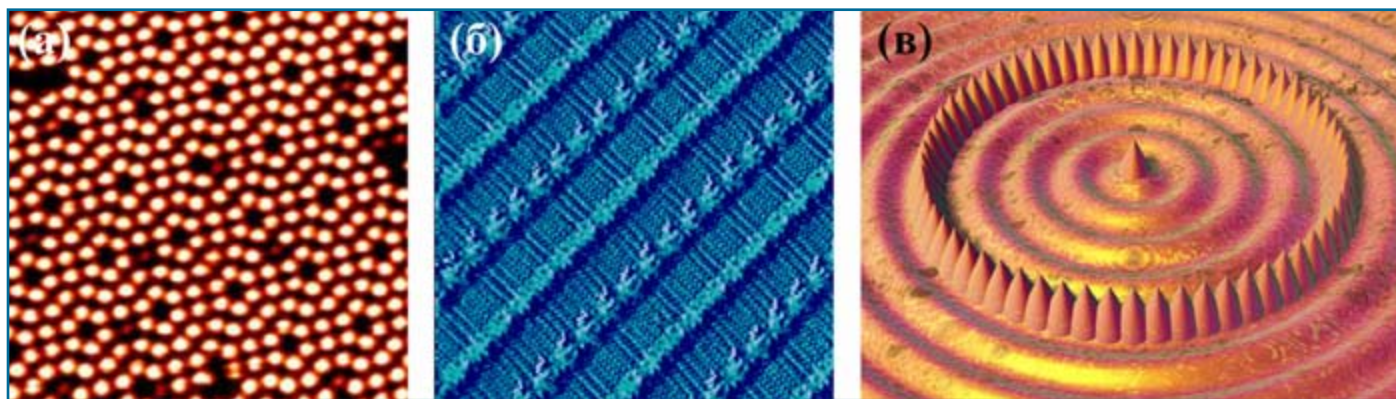


Рис. 1. Сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп



**Рис. 2.** СТМ-изображение поверхности Si (111)  $7 \times 7$  (а, Omicron); монослоя 1,3-динонадекан-бензена (б, K. Kim, A. Matzger, Veeco); квантового коралла из 48 атомов Fe на поверхности Cu (111) (в, IBM Almaden Research Center)

от единиц пикоампер до десятков наноампер (в  $10^4$  раз).

Для устранения возможного контакта иглы с поверхностью образца или ее ухода из области протекания туннельного тока используют систему обратной связи. Эта система постоянно регистрирует туннельный ток, корректируя высоту зависания зонда над образцом в соответствии с заданной величиной туннельного тока в каждой точке сканирования. При этом зонд остается на одном и том же расстоянии от поверхности, что позволяет определить распределение электронной плотности над образцом, а траектория зонда отражает рельеф поверхности образца. Таким образом, сканируя поверхность образца, можно получить распределение атомного потенциала, а также информацию о расположении атомов в структуре с атомным разрешением.

Прецизионность метода, возможность наблюдать атомную структуру и даже распределение потенциала в пределах единичного атома предъявляют массу требований к технике самого метода сканирующей туннельной микроскопии и к чистоте поверхности образца. Сегодня СТМ микроскопы обычно помещены в сверхвысоко-

вакуумные камеры, чтобы избежать адсорбции молекул воды,  $\text{CO}_2$ , кислорода или азота из воздуха (рис. 1).

Развитие метода вакуумного СТМ позволило приоткрыть завесу неизвестности над атомной структурой поверхности монокристаллов, мономолекулярных *пленок Ленгмюра–Блоджетт, самособирающихся монослоев* (рис. 2), а спинполяризованная туннельная микроскопия позволила отследить направления магнитных моментов отдельных атомов. Сегодня метод СТМ широко используется для изучения *тонких пленок, квантовых точек, квантовых нитей и углеродных нанотрубок*. С помощью туннельного микроскопа удастся перемещать отдельные атомы и даже выстраивать сложные квантовые структуры. На основе туннельных микроскопов создаются сложные комплексы для формирования первых элементов «молекулярной электроники». Как и предсказывали первооткрыватели метода СТМ, красота атомных структур уже приносит пользу человечеству.

См. также: *Сканирующая зондовая микроскопия, Атомно-силовая микроскопия*

#### Литература:

1. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. М.: Бином, 2005.
2. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications Ed. Dawn Bonnell Wiley-VCH; 2 edition, 2000.
3. [www.ntmdt.ru](http://www.ntmdt.ru)



## СУПЕРПАРАМАГНЕТИЗМ

### (Superparamagnetism)

*«Аквечеру ветерок закрепчал, начался настоящий шторм – баллов десять. Море бушует. Как поднимет нашу «Беду», как швырнет вниз!.. Снасти стонут, мачта скрипит. Белки в трюме укачались с непривычки, а я радуюсь: «Беда» моя держится молодцом, на пять с плюсом сдает штормовой экзамен».*

*А.С. Некрасов.*

*«Приключения капитана Врунгеля»*

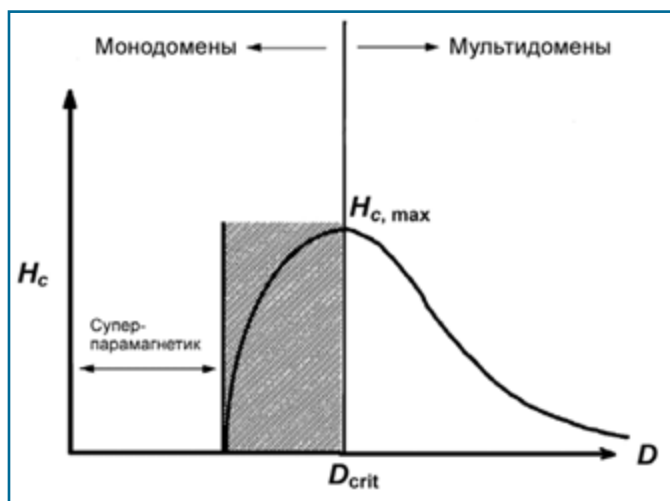


«Шторм в ночи», Иван Айвазовский

Несмотря на всеобщее стремление к миниатюризации электронных устройств, когда речь заходит о создании постоянных магнитов или устройств магнитной записи, то обычно рассматривают магнитные частицы размерами не меньше нескольких десятков, а то и сотен нанометров – согласитесь, по сравнению с общим масштабом наномира такие частицы сложно назвать маленькими.

Что же будет происходить с магнитными свойствами, если частицу уменьшить до нанометровых размеров? Вначале ничего особенного, некоторые характеристики материала даже улучшаются. Однако при преодолении определенного

барьера происходит, казалось бы, нечто странное – состоящий из таких частиц изначально магнитный материал перестает быть таковым, как если бы стрелка компаса перестала показывать направление на север. Почему? Чтобы понять это, давайте рассмотрим так называемую магнитную структуру, которую можно представить состоящей из множества стрелок компасов, каждая из которых прикреплена к одному из атомов. Если вещество ферромагнитное, все стрелочки указывают в одном направлении, независимо от размеров частицы, а чтобы повернуть их в другое направление, не меняя ориентацию частицы, нужно затратить определенную энергию (энергию перемагничивания). Так вот, оказалось, что эта энергия сильно зависит от размера частиц – чем меньше размер, тем меньшую силу (в данном случае, имеется в виду коэрцитивная сила  $H_c$ , характеризующая напряженность магнитного поля) нужно приложить, чтобы повернуть все магнитные моменты атомов частицы (рис. 1). При этом максимум коэрцитивной силы  $H_{c, \max}$  наблюдается, когда частица достигает некоторого критического размера  $D_{\text{crit}}$ , соответствующего однодоменному состоянию (домен – это область с одинаковой ориентацией магнитных моментов атомов). А что произойдет, если в результате уменьшения размеров энергия перемагничивания станет настолько малой, что не будет превышать тепловую энергию? В данном случае можно привести пример кораблика на волнах: чем меньше кораблик, тем ощутимее его качает на



**Рис. 1.** Зависимость коэрцитивной силы от размера частиц

волнах, в то время как большой корабль может оставаться на воде практически неподвижным. Так же и большая частица способна сохранять направление магнитного момента, в то время как в маленькой частице «стрелки» направления магнитного момента синхронно колеблются. Чем меньше частица, тем выше амплитуда этих колебаний – возможно даже изменение направления намагниченности на обратное, как если бы кораблик был бы настолько мал, что его постоянно переворачивало волнами. Именно такое состояние, когда направление магнитного момента частиц непрерывно меняется и не может быть зафиксировано, называется суперпарамагнитным. Тем не менее, магнитные моменты всех атомов еще направлены в одну сторону – кораблик еще цел, а не плавает в виде досок и щепок, но у него уже нет постоянного курса. Например, для сфе-

рических частиц Fe, Co и Ni величина  $D_{crit}$  составляет 14 нм, 70 нм и 50 нм соответственно, а для  $Fe_3O_4$  и  $\gamma-Fe_2O_3$  – 128 и 166 нм.

Как видите, суперпарамагнитные частицы, несмотря на их малый размер и ферромагнитное упорядочение в структуре, могут оказаться абсолютно бесполезными и даже вредными. Если частицы в устройстве записи станут суперпарамагнитными, то вся сохраненная информация будет утеряна в результате постоянного хаотического изменения бита информации. Каким же образом можно, уменьшая частицу, избежать перехода в суперпарамагнитное состояние? Самый очевидный способ – это уменьшать размеры только до определенного предела, не пересекая ту границу, после которой ферромагнетизм сменяется суперпарамагнетизмом (строить корабли размером не ниже зафиксированного ГОСТом). Второй способ – охлаждать материал, уменьшая тепловую энергию, и, как следствие, отодвигая границу перехода в суперпарамагнитное состояние (не использовать кораблики при высоких волнах). При температуре абсолютного нуля магнитный момент частицы будет неподвижен при любых ее размерах, как постоянно направление кораблика, замороженного в лед или севшего на мель. Третий и наиболее перспективный метод – изменять состав, микроструктуру и геометрическую форму частиц, добиваясь дополнительной фиксации магнитного момента (разработка конструкций кораблей, способных выдерживать волнения на море и даже шторм).

#### Литература:

1. Sun L., Hao Y., Chien C.-L., Searson P.C. IBM J. Res. & Dev. 2005. Vol. 49, N 1. P. 79–102.

## СУПРАМОЛЕКУЛЯРНАЯ ХИМИЯ

### (Supramolecular Chemistry)

*«Партитуру химии надо не просто исполнить, ее надо сочинить!»*

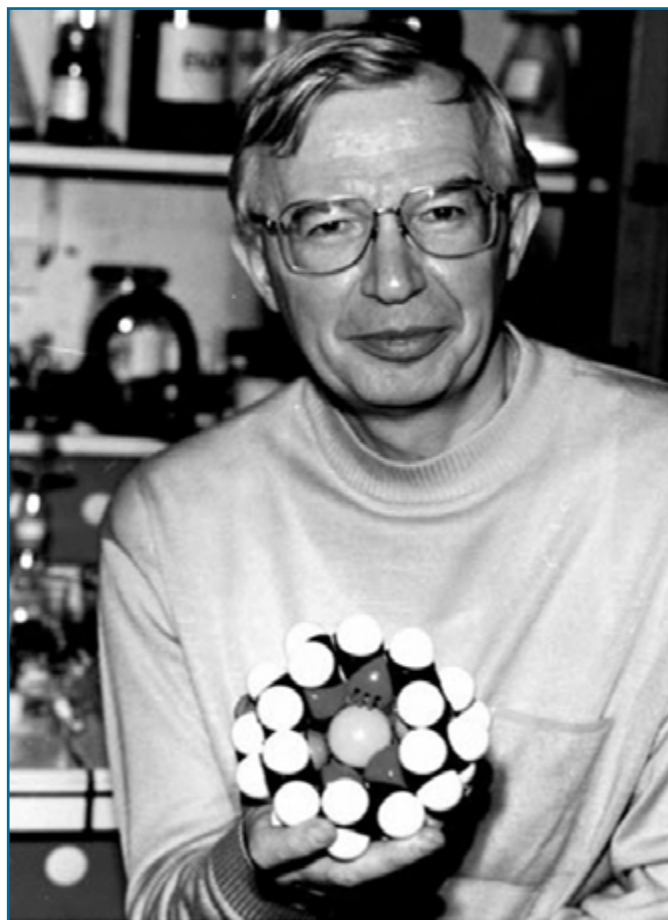
*Жан-Мари Лен*



«Ключ-замок» — основной принцип супрамолекулярной химии

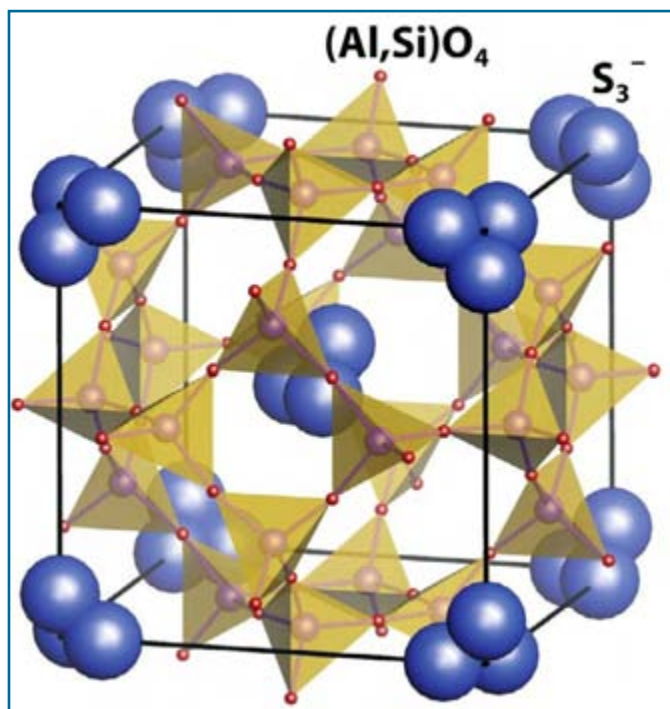
Сколько вы обычно носите в сумке или в кармане ключей? Наверняка, у вас есть ключ от внешней и внутренней дверей квартиры, скорее всего, от почтового ящика, ну а у тех, кто работает или водит машину, еще, как минимум, найдется пара ключей. Но сколько бы их ни было, каждый ключ подходит только к строго определенному замку — в этом-то и заключается его смысл. Оказывается, на аналогичном принципе «ключ-замок» основана способность биологических молекул к самоорганизации и селективному взаимодействию с другими частицами, называемая молекулярным распознаванием. Только благодаря ей возможно, например, образование двойных спиралей ДНК или возникновение — в ответ на попадание чуже-

родного тела в организм— иммунных реакций, заключающихся в синтезе специальных белков для нейтрализации «непрощенных гостей». Стремление исследователей реализовать такие процессы в синтетических системах было настолько велико, что привело к формированию на рубеже 80–90-х годов отдельной области химии, названной французским ученым Ж.-М. Леном супрамолекулярной химией (рис. 1).



**Рис. 1.** Нобелевский лауреат Жан-Мари Лен





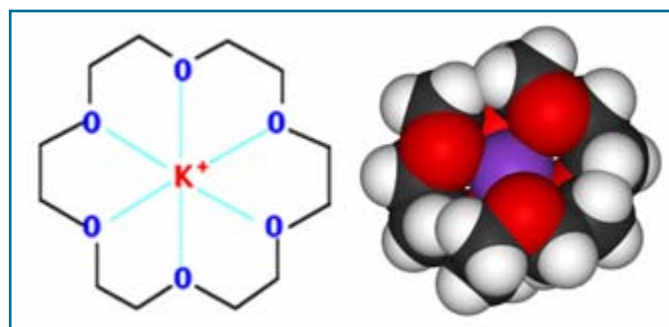
**Рис. 2** Кристаллическая структура синего пигмента ультрамарина — объемные «гостевые» полисульфидные анионы  $S_3^-$  — находятся в пустотах «хозяйского» алюмосиликатного каркаса

Современная супрамолекулярная химия изучает процессы молекулярного распознавания и селективного связывания молекул в так называемые супрамолекулы и супрамолекулярные ансамбли. Супрамолекулы представляют собой отдельные крупные образования, состоящие из большого, но обязательно конечного числа молекулярных олигомеров. В то же время супрамолекулярные ансамбли, к которым относятся мембраны, везикулы, *мицеллы*, *дендримеры*, блоксополимеры, клатраты, являются полимолекулярными системами, возникающими в результате спонтанной ассоциации неопределенного числа компонентов и обладающие пространственной организацией, с которой часто связаны уникальные физико-химические свойства.

Для супрамолекулярных систем важнейшим является принцип комплементарности: геометрическое, топологическое и зарядовое соответствие гостя («субстрата») и хозяина («рецептора») (рис. 2). Размер полости хозяина определяет размер «желанного» гостя; чем точнее соответствие, тем выше устойчивость ансамбля. Во всех супрамолекулярных системах рецептор содержит молекулярные центры (точно так же, как

замок — замочную скважину), нацеленные на селективное связывание определенного субстрата-«ключа». Как и в обычной химии, для связывания молекул между ними должны возникнуть определенные взаимодействия, за счет которых произойдет упорядочение в пространстве молекулярных блоков и сформируется супрамолекулярная архитектура.

Однако, в отличие от привычных нам молекул, в которых атомы объединены ковалентными или ионными связями, в супрамолекулах удерживание отдельных фрагментов происходит за счет невалентных межмолекулярных взаимодействий, к которым относятся водородные связи, электростатические силы и лиофильные–лиофобные взаимодействия. Почему же супрамолекулярные системы не распадаются на составные части, спросите вы — ведь энергия таких взаимодействий в 10–100 раз ниже энергии валентных связей? Конечно, если подвесить тяжелый предмет на тонкой ниточке, то она обязательно порвется, однако если таких нитей будет много, нагрузка распределится между ними равномерно — получится прочный канат. Так же и в случае слабых связей в ансамблях — когда их в системе становится много, это приводит к образованию устойчивых и вместе с тем гибко изменяющих свою структуру ассоциатов. Такое сочетание прочности и способности быстро и обратимо реагировать на внешние воздействия является характерной чертой всех биологических молекулярных систем — нуклеиновых кислот, ферментов, белков. Однако супрамолекулярная химия не ограничивается биологическими системами — аналогичные принципы действуют при образовании, к примеру, краун-эфиров (рис. 3) — наличие кисло-

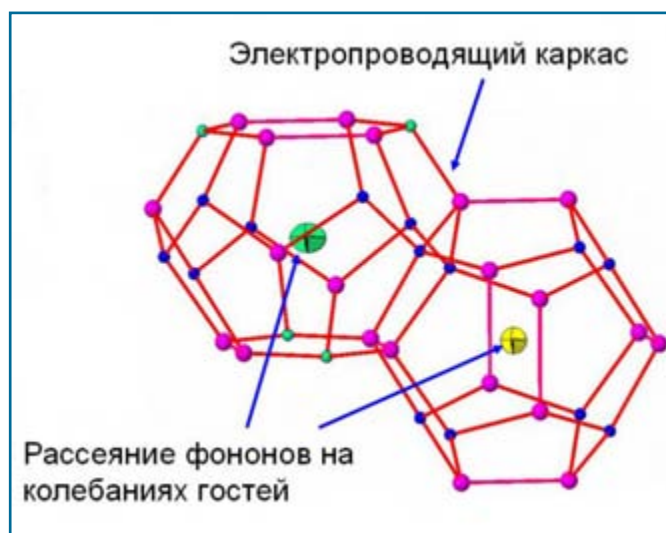


**Рис. 3.** Молекула калиевого комплекса краун-эфира

родных центров делает возможным образование устойчивых комплексов с ионами металлов, селективность к которым строго определяется соотношением размера атома металла объему внутренней полости цикла.

В настоящее время активно развивается химия клатратов и соединений внедрения, внося огромный вклад как в фундаментальные знания, так и в практические разработки новых материалов. Это обусловлено тем, что уже сегодня супрамолекулярные системы находят широкое применение в сорбции и селективном катализе, рассматриваются в качестве наиболее перспективных кандидатов для захоронения радиоактивных отходов и разработки лекарственных препаратов нового поколения. Так, если помимо центров распознавания и связывания рецептор содержит другие функциональные группы, то после образования супрамолекулярной системы он может выступать в роли носителя, осуществляя направленный транспорт связанного с ним субстрата в определенные области организма.

Одной из более «прагматичных» областей применения супрамолекулярных соединений являются термоэлектрические материалы, которые могут быть созданы на основе полупроводниковых клатратов и которые уже сейчас можно поддерживать в руках (рис. 4). В них молекулы хозяина представляют собой решетку, построенную из прочных ковалентных связей. В ее пустотах



**Рис. 4.** Термоэлектрические супрамолекулярные материалы (Химфак МГУ)

располагаются подвижные атомы или молекулы гостя, способные колебаться внутри предназначенного для них объема. Их быстрое движение рассеивает фононы, которые служат проводниками тепла, тем самым снижая теплопроводность кристаллического материала до уровня стекла. В результате возникает новая область техники – супрамолекулярная электроника. Полупроводники нового поколения смогут охлаждать активный элемент настолько, чтобы в ход шли сверхпроводники – а значит, скорости, с которыми работают современные компьютеры и устройства микроэлектроники, могут возрасти во много раз.

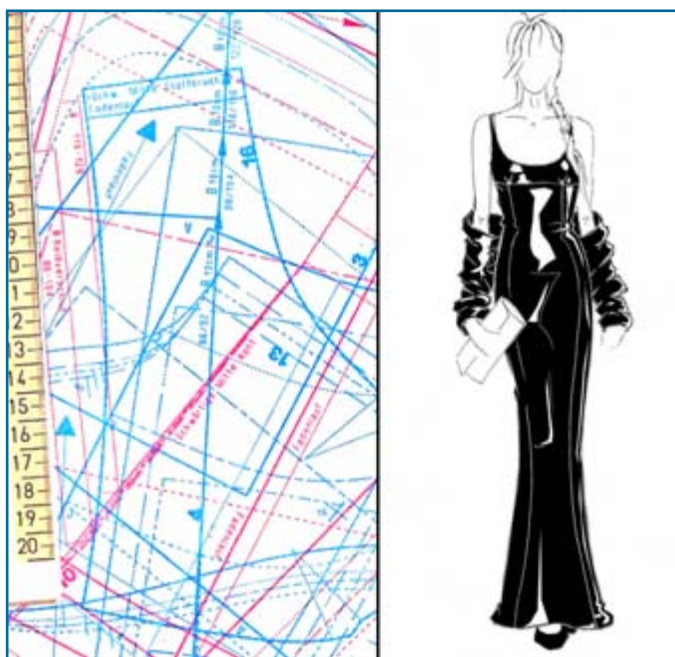
#### Литература:

1. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы / Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с/
2. Стойков И.И. Начала супрамолекулярной химии. Казань: ООО «Регентъ», 2001. 140 с.

## ТЕМПЛАТНЫЙ МЕТОД (*Template Synthesis*)

*«Все оставляет свой след...»*

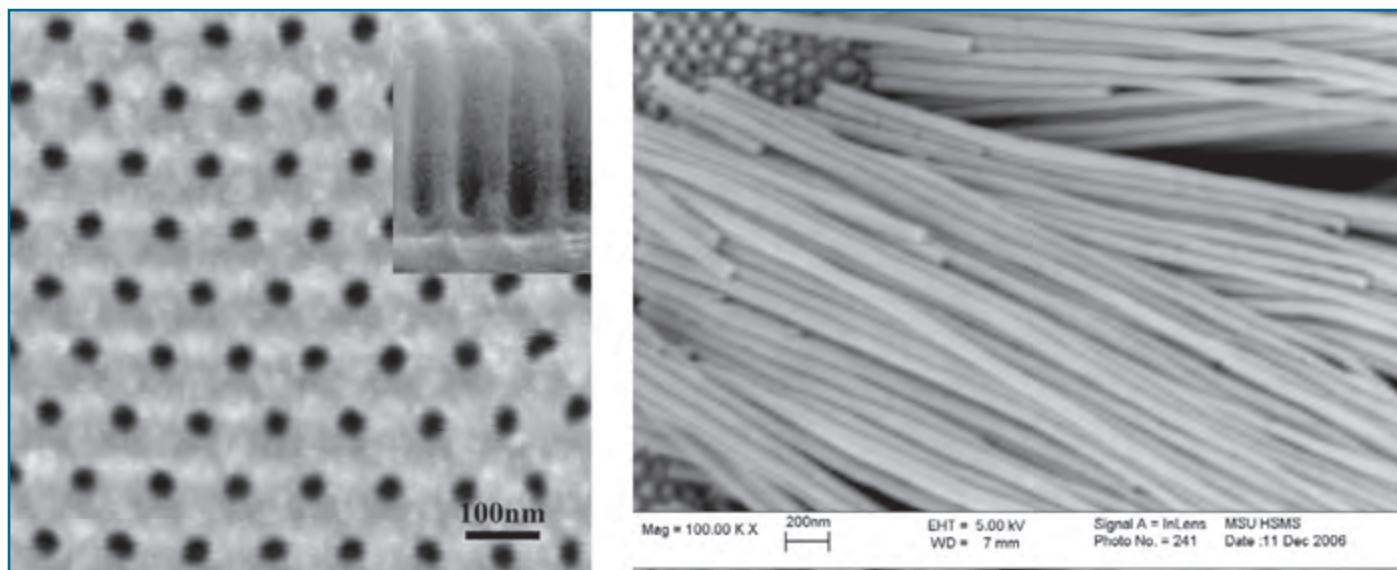
*Древняя восточная мудрость*



Термин «темплат» произошел от английского слова «template», означающего «шаблон», «образец», «модель», а соответствующее понятие «темплатный метод» описывает создание чего-либо по строго заданному шаблону.

Наверное, лучше всего этот метод знаком прекрасной половине человечества – достаточно вспомнить уроки труда в школе, на которых девушек учат кроить и шить одежду. Выкройки являются простейшим шаблоном для вырезания элементов будущего платья или костюма из отреза ткани. Точно так же, по шаблонам, кроют и штампуют листы металла в металлообрабатывающей промышленности и автомобилестроении.

Сегодня, наверное, ни одна технологическая отрасль не обходится без использования шаблонов. Они применяются при литье, формовании



**Рис. 1.** Пленка пористого оксида алюминия (шаблон) и выращенные в его порах нити платины (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)



металлов, керамики или пластика, изготовлении печатных плат и микросхем, светоизлучающих матриц дисплеев и т.д., то есть практически везде, где необходимо быстрое воспроизведение формы для массового производства изделий. В нанотехнологиях использование шаблонов наиболее распространено в процессах **нанолитографии** и нанопечати. Например, с применением специальных теневых шаблонов (масок) производится большинство микросхем и процессоров современных компьютеров, микро- и **нанозлектронических систем** (рис. 1). Активно разрабатываемый в настоящее время метод наноимпринта использует штамп с наноструктурированной поверхностью для создания периодического рельефа.

В химической нанотехнологии темплаты используют для наследования формы кристаллитов или мицелл одних химических соединений другими. Так, например, можно создать неорганическую матрицу, повторяющую форму органических мицелл, белков или спиралей ДНК.

Темплат в этом случае является центром, вокруг которого организуются основные структурные единицы требуемого вещества (молекулы или атомы). Первая документальная демонстрация темплатного синтеза относится еще к 1949 году: образованные в присутствии метилоранжа частицы силикагеля впоследствии селективно сорбировали его из смесей с другими красителями. С тех пор этот довольно простой и элегантный с химической точки зрения метод широко применялся для синтеза большого числа органических и неорганических материалов. В современной химии темплаты используются для синтеза **цеолитов** и мезопористых соединений: в этом случае каркас матрицы формируется вокруг **мицелл** поверхностно-активных веществ, а удаление шаблона приводит к формированию упорядоченной пористой структуры. Интересно, что и сами пористые структуры можно использовать в качестве шаблона для синтеза в них наночастиц.

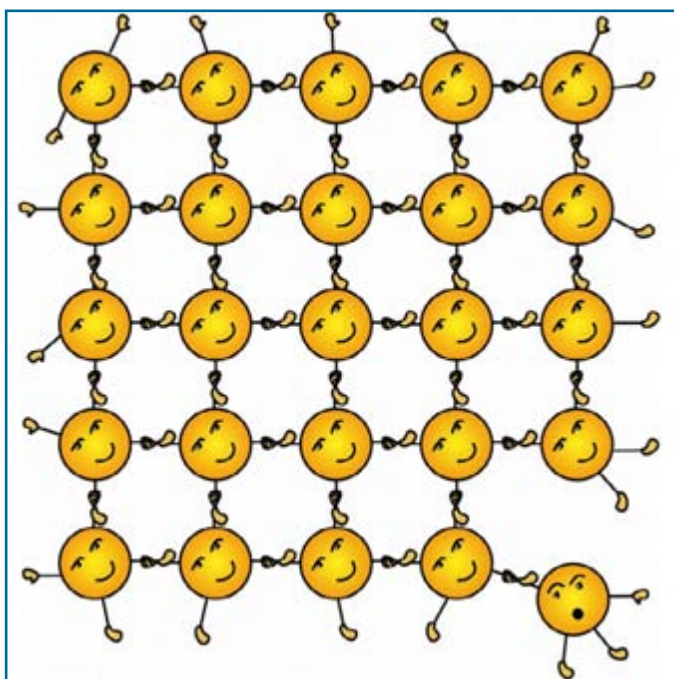
#### Литература:

1. Михайлов О.В. Что такое темплатный синтез // СОЖ. 1999. № 10. С. 42–50.
2. Schalley C.A., Vögtle F., Dötz K.H. Templates in Chemistry II (Topics in Current Chemistry, V. 248). Berlin: Springer, 2005.

## ТЕОРИЯ ОБОРВАННЫХ СВЯЗЕЙ (Surface Bond Contraction)

*«Если бы бога не было, то его стоило бы выдумать!»*

*Вольтер*



Давайте представим, что атомы, например, золота – это маленькие липкие шарики. Возьмем в руки несколько сотен таких золотых шариков и сожмем их вместе – так мы получим **наночастицу** золота. В тех местах, где шарики боками соприкасаются друг с другом, они слипнутся, образуя химические связи. При этом какое-то количество шариков будет находиться внутри частицы, со всех сторон плотно окруженное соседями – это координационно-насыщенные атомы, а какое-то количество расположится на поверхности, оставаясь с одного бока свободными. Поскольку таких координационно-ненасыщенных поверхностных атомов много, то снаружи наночастица будет липкой, т.е. реакционноспособной. Она будет липнуть к рукам, прилипать к

поверхности стола, на который вы ее положите, притягивать к себе всякий мелкий мусор. Легко заметить, что чем выше доля таких поверхностных шариков, тем реакционноспособнее частица и тем больше «мусора» она сможет на себя собрать. А можно ли количественно оценить степень липкости нашей вымышленной частицы, иначе говоря, вклад поверхностных атомов в ее реакционную способность?

Для этого разработан подход, называемый теорией оборванных связей. Это метод описания и предсказания специфических свойств веществ в нанодисперсном состоянии, основанный на сравнении степени химической связанности атомов или молекул на поверхности и в объеме твердого тела.

Меньшее число химически связанных соседей у поверхностного или приповерхностного атома приводит к его меньшей связанности с объемом. При этом оставшиеся связи несколько упрочняются, поскольку уменьшение координационного числа такого атома приводит к уменьшению его радиуса. Однако по мере удаления от поверхности различие в прочности связи атомов быстро убывает.

Вклад поверхностных атомов в свойства частицы определяется не только соотношением энергий взаимодействия атомов на поверхности и в объеме, но и долей  $\gamma_i$  поверхностных атомов, которая увеличивается с уменьшением размера частицы. Доля атомов на  $i$ -м от поверхности атомном слое сферической частицы может быть рассчитана из геометрических соображений (заинтересованный читатель легко в это убедится

самостоятельно). Экстенсивные свойства наночастицы, т.е. пропорционально зависящие от количества вещества, определяются соотношением в ней поверхностных атомов и атомов в объеме, причем свойства первых меняются по мере удаления от поверхности частицы, приближаясь к свойствам вторых. Вклад атомов разного типа в удельную величину некоторого свойства  $q$  (рассчитанную на один атом), определяется уравнением:

$$q(D) = q_0 + \sum_{i=1}^s \gamma_i \cdot (q_i - q_0),$$

в котором  $D$  соответствует размеру частицы,  $s$  — числу слоев,  $q_0$  — величине свойства внешнего слоя. Понятно, что количество слоев  $s$  определяется размером частицы  $D$ .

Этот простой подход позволяет удовлетворительно описать изменение многих свойств с уменьшением размера частиц. Так, если в качестве величины  $q$  рассматривать температуру плавления наночастиц, то можно построить зависимость их теплоты плавления от размера, необходимую при формировании **нанокерамики** из **нанопорошков**. Знание зависимости энергии оптических переходов от размера нанокристалла дает возможность аккуратно подбирать условия синтеза наночастиц, светящихся в красной, синей или зеленой областях соответственно. Аналогичные зависимости можно вывести для изменения магнитного момента, диэлектрической проницаемости, микротвердости, реакционной способности и многих других свойств наночастиц.

#### Литература:

1. Zhong W.H., Sun C.Q., Tay B.K. J. of Physics-Condensed Matter. 2002, 14(23). P. 399–405.



## ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

### (Thin films)

*Чем тоньше лед, тем больше хочется всем  
убедиться, выдержит ли он.*

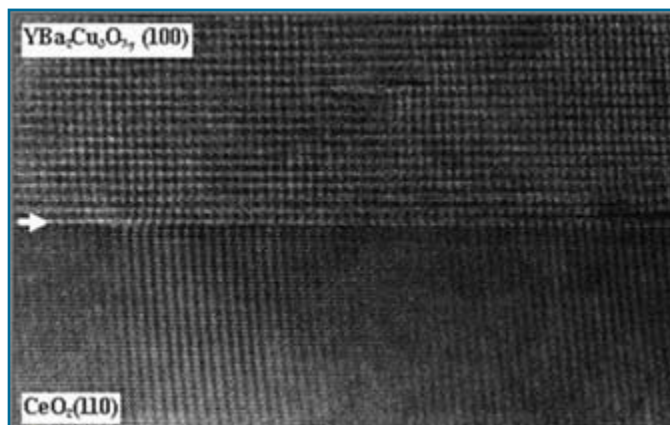
*Генри Шоу*



Тонкие пленки, с точки зрения физики, представляют собой покрытия, имеющие малую толщину и большое отношение площадей поверхности к объему. Тонкопленочные материалы проявляют свойства двумерных систем. Тонкие пленки, толщина которых порядка нескольких десятков нанометров (их также называют нанопленками), существенно отличаются по свойствам от массивных образцов. Одним из общеизвестных примеров таких пленок являются мономолекулярные пленки моющих средств (*поверхностно-активных веществ*), остающихся на поверхности помытой посуды, а также пленки, позволяющие наблюдать образование мыльных пузырей. Покрытие материала пленкой толщиной всего в одну молекулу или несколько атомных слоев дает возможность радикально изменить его поверхностные свойства – увеличить стабильность, поверхностное натяжение, улучшить механические, адсорбционные или адгезионные свойства.

Высокая адгезионная способность нанопленок к различным материалам часто используется для создания покрытий, химически защищающих материал, обеспечивающих хорошее скольжение, предотвращающих слипание мелких частиц в коллоидном растворе (стабилизации эмульсии или золя) и т.д. К защитным нанопленкам могут быть отнесены и оксидные пленки на поверхности металлов, предотвращающие их дальнейшее окисление, причем в ряде случаев такие пленки образуются самопроизвольно (оксидная пленка на поверхности алюминия), а в ряде случаев их образование требует специальной обработки изделия (пассивирование железа). Тонкие пленки формируют как на основе органических поверхностно-активных веществ (см. *Самособирающиеся монослои, Пленки Ленгмюра–Блоджетт*), так и нанося тонкие слои кристаллических неорганических материалов.

Нанесение тонкой пленки кристаллического вещества на монокристаллическую подложку, кристаллическая структура которой близка структуре наносимого вещества, позволяет наблюдать явление т. н. эпитаксии – ориентирования кристаллитов наносимой пленки в соответствии с ориентацией монокристалла подложки (рис. 1). При увеличении толщины пленки из-за накопления различных протяженных дефектов (прежде всего, дислокаций) эпитаксия пропадает, а в тонкой (нано) пленке она обуславливает ряд интересных и полезных особенностей. Так, взаимодействие протекающего через сверхпроводящую нанопленку тока с поверхностью раз-



**Рис. 1.** Эпитаксиальная тонкая пленка сверхпроводника на монокристаллической подложке

дела пленка/ подложка (так называемый пиннинг магнитных вихрей) позволяет получать на тонких пленках критические токи, недостижимые ни на монокристаллах, ни на керамических образцах. Для ряда соединений в эпитаксиальных пленках могут реализовываться кристаллические структуры, не существующие в объемной форме.

Неорганические тонкие пленки и покрытия получают различными методами, которые можно разделить на две большие группы: химические – химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD – Metal

Organic Chemical Vapor Deposition, получение пленок *Ленгмюра–Блоджетт* и т.д.) и физические – методы термического напыления, импульсного лазерного напыления (PLD – Pulsed Laser Deposition), электронно-лучевого испарения (Electron Beam Evaporation), магнетронного напыления (Magnetron Sputtering), *молекулярно-лучевой эпитаксии* и др. Как правило, для осаждения пленок физическими методами необходим высокий вакуум.

Сегодня нанопленки находят исключительно широкое практическое применение в передовых технологиях производства материалов и покрытий, в первую очередь в электронике (*гетероструктуры, транзисторы, микроэлектромеханические системы и нанозлектромеханические системы*, устройства гигантского магнетосопротивления и многие другие), химических сенсорах (*наносенсоры*), оптических материалах, а также для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, улучшения магнитных и электрических характеристик материалов, используемых в авиационной и космической технике, машиностроении и медицине.

#### Литература:

1. Хенней Н. Химия твердого тела. М.: Мир, 1971.
2. Кнотько А.В., Пресняков И.А., Третьяков Ю.Д. Химия твердого тела. М.: Академия, 2006.

## ТРАНЗИСТОР (Transistor)

*«...Незнайкин.— Одним словом, транзистор представляет собой своеобразный бутерброд из двух толстых кусков хлеба, между которыми положен тоненький кусочек ветчины.*

*Любознайкин. — Да, если хочешь, это так».*

*Е. Айсберг.*

*«Транзистор?.. Это очень просто!»*

Термин «транзистор» (от англ. *transfer* – переносить и *resistor* – сопротивление) означает трехэлектродный полупроводниковый электронный прибор, в котором ток в цепи двух электродов управляется третьим. Действие транзистора можно сравнить с действием плотины, которая, перегораживая реку (постоянный источник), создает перепад уровней воды. Затрачивая очень небольшую энергию на вертикальное перемещение затвора, мы можем управлять потоком воды огромной мощности, т.е. энергией мощного постоянного источника.

Первый действующий транзистор был создан группой ученых лаборатории Bell Labs (У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн) в 1947 г. и официально представлен ими 23 декабря того же года. С тех пор именно этот день считается днем открытия транзистора, но лишь в 1956 году его разработчикам была присуждена Нобелевская премия по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Интересно, что Дж. Бардин вскоре был удостоен Нобелевской премии во второй раз за создание теории сверхпроводимости. Следует отметить, что параллельно с США к созданию транзисторов в то время вплотную приблизились очень многие страны, поэтому с полной уверенностью можно говорить, что «транзистор – дитя многих родителей».

В структуре любого транзистора есть три вывода – это база (затвор), эмиттер (исток) и коллектор (сток) (рис. 1). Управление током в выходной цепи осуществляется либо за счет изменения



Плотина Гувера (Невада, штат Аризона)



входного тока, либо входного напряжения. При этом даже небольшое варьирование входных величин может приводить к существенному изменению выходного напряжения и тока. Принцип работы транзистора во многом похож на принцип действия такого известного всем устройства, как рупор. Достаточно произнести что-нибудь перед его узким отверстием, направив широкое в сторону другого человека, стоящего в нескольких десятках метров, и голос, усиленный рупором, будет хорошо слышен вдалеке. Вот так и в случае транзистора – если пропустить через участок «база – эмиттер» слабый ток, он будет усилен транзистором в десятки и даже сотни раз, а усиленный ток потечет через участок «коллектор – эмиттер». Это явление связано с тем, что внешние электрические поля и токи могут изменять плотность носителей заряда в полупроводнике и оказывать существенное влияние на его электропроводность.

Усиливающая способность транзисторов используется в аналоговой технике, например в аналоговом телевидении и радио. Другим важнейшим применением является цифровая техника (память, процессоры, компьютеры, цифровая связь и т.п.), где транзисторы выполняют роль переключателей, заменив вакуумные лампы в большинстве электронных устройств и совершив революцию в создании интегральных схем и компьютеров. В настоящий момент вся современная цифровая техника основана на так называемых МОП – транзисторах, изготовленных на основе слоев металл – оксид – полупроводник. При этом транзистор может работать как единственный (дискретный) прибор и являться элементом интегральной схемы (рис. 1). Последние изготавливаются в рамках планарной интегральной технологии на одном кремниевом кристалле, который называется чипом, и составляют элементарный «кирпичик» для построения памяти, процессора и т.п. На одном чипе, обычно размером 1–2 см<sup>2</sup>, размещаются десятки миллионов МОП-транзисторов, размеры каждого из которых не превышают 45–60 нанометров (это размер базовой части транзистора). На протяжении последних десятков лет происходит стремительная миниатюризация МОП (т.е. уменьшение их размеров) и увеличение степени их интеграции (т.е.

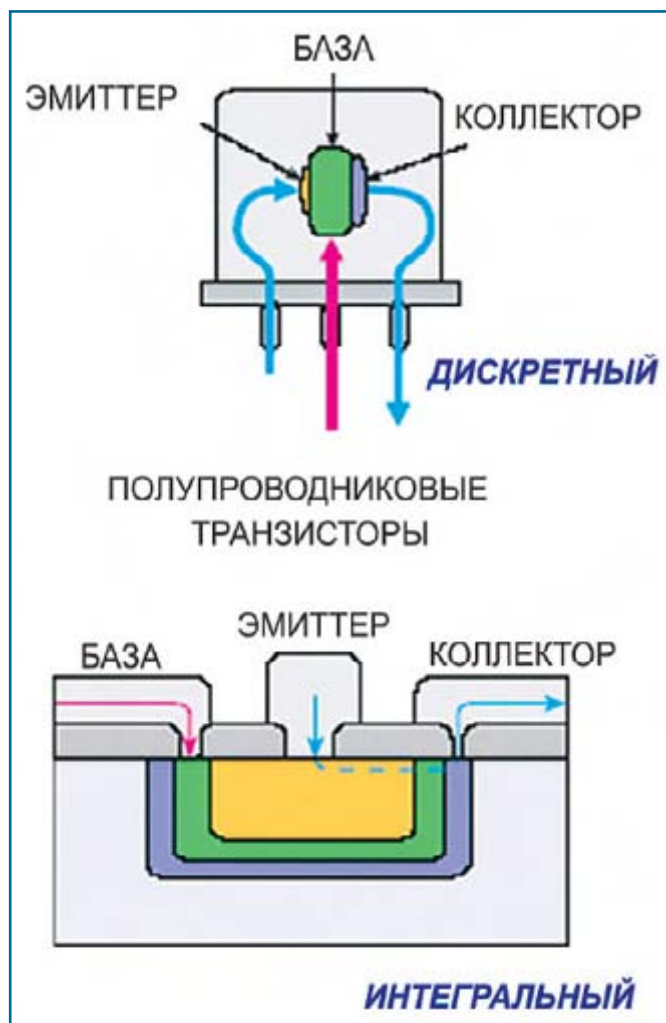
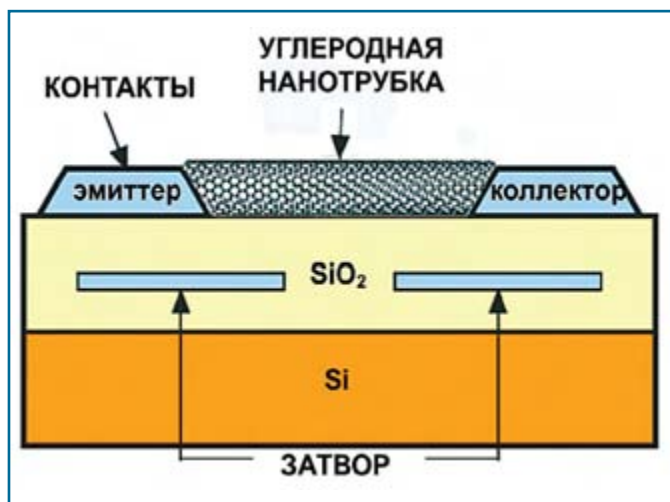


Рис. 1. Устройство дискретного и интегрального транзисторов

количества на одном чипе), причем в ближайшие годы ожидается увеличение степени интеграции вплоть до миллиарда транзисторов на одном чипе (см. *Нанoeлектроника*). Однако полупроводниковая кремниевая электроника фактически подошла к пределу своих возможностей, связанному с фундаментальными физическими ограничениями, не позволяющими в дальнейшем на ее основе создавать все более производительные и миниатюрные устройства. Традиционный затвор с диэлектриком из двуокиси кремния (SiO<sub>2</sub>) имеет толщину всего в несколько атомных слоев (~1,2 нм). Дальнейшее уменьшение его толщины приводит к значительным утечкам за счет туннельного тока (проявление квантовых эффектов) и, как следствие, к увеличению потребления энергии и тепловыделения транзистора.

Поэтому качественным выходом из сложившегося «тупика» может быть только переход к



**Рис. 2.** Транзистор на основе углеродных нанотрубок

электронным приборам и схемам, построенным на совершенно иных принципах (см. *Нанoeлектроника, Молекулярная электроника, Квантовые компьютеры*). Уже сегодня разработка новых функциональных наноматериалов позволяет шагнуть далеко за пределы традиционной полупроводниковой технологии изготовления транзисторов. Все современные жидкокристаллические панели (см. *Жидкие кристаллы*) построены по так называемой схеме TFT (Thin Film Transistor – тонкопленочный транзистор), когда каждый пиксель управляется индивидуальным полевым транзистором, затвор которого соединен с тон-

копленочным конденсатором. Перспективным материалом, который позволит разрабатывать «гибкие дисплеи», являются полупроводниковые полимеры. Большие надежды возлагают на использование в качестве канала транзистора полупроводниковых нанопроволок, поскольку современные технологии приготовления нанопроволок уже допускают их интеграцию со стандартной кремниевой технологией. Главным конкурентом таких полупроводниковых структур являются *углеродные нанотрубки*, обладающие уникальными электронными свойствами (рис. 2). Однако нанотрубки страдают одним, но очень большим недостатком – в зависимости от диаметра и хиральности они могут обладать как металлическими, так и полупроводниковыми свойствами, а контролируемый синтез трубок одного типа все еще остается достаточно трудной технологической задачей. Следует отметить, что помимо разновидностей полупроводниковых транзисторов ведутся разработки объектов совершенно иной категории – одноэлектронных транзисторов, работающих на одной единственной молекуле, а также оптических транзисторов как основного элемента для *фотоники*, в которых в качестве передающего звена выступают не электроны, а фотоны.

### Литература:

1. Айсберг Е. Транзистор?.. Это очень просто! / Пер. с франц. М.;Л.: Энергия, 1963. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 480).
2. Эймишен Ж.-П. Электроника?.. Нет ничего проще! / Пер. с франц. М.: Энергия, 1970. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 733).

## ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

### (*Tunneling Effect*)

«— Теперь все ясно, — сказал Кролик, — ты застрял.  
— Все из-за того, — сердито сказал Пух, — что выход слишком узкий!

— Нет, все из-за того, что кто-то слишком много ест! — строго сказал Кролик».

А.А. Милн.

«Винни-Пух и все-все-все»



Да, в довольно неприятную ситуацию попал медвежонок Винни-Пух, застряв в узком проходе. Говоря языком физики, он оказался в потенциальной яме — не может сдвинуться ни вперед, ни назад. А вот если б мишка был квантовой частицей, у него появился бы шанс очутиться на свободе без вынужденного недельного голодания. Все дело в том, что в квантовом мире происходит множество удивительных явлений, одним из которых является туннельный эффект.

Туннельным эффектом называют преодоление частицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия (остающаяся при этом неизменной) меньше высоты барьера. Это явление имеет квантовую природу, так как подразумевает собой прохождение частицы сквозь область пространства, пребывание в которой запрещено классической механикой, например перескок электрона сквозь тонкий слой диэлектрика, разделяющий два проводника.

В классической физике частица не может оказаться в области такого барьера и тем более

пройти сквозь него, так как это нарушает закон сохранения энергии. Однако в квантовой физике ситуация принципиально другая. Квантовая частица не движется по какой-либо определенной траектории. Состояние частицы (ее координата и импульс) описывается соответствующей волновой функцией  $\Psi$ , физический смысл которой определяется следующим образом: вероятность нахождения частицы в элементарном объеме  $\Delta V$  равна  $|\Psi|^2 \Delta V$ . Чтобы вычислить вероятность нахождения частицы за потенциальным барьером, необходимо решить уравнение Шрёдингера с учетом непрерывности волновой функции на стенках барьера (рис. 1). С увеличением высоты и ширины барьера, а также массы частицы вероятность туннельного эффекта экспоненциально спадает, т.е. чем больше квантовый медвежонок Винни-Пух ест, тем меньше у него шансов куда-либо туннелировать.

Для качественного понимания туннельного эффекта достаточно лишь вспомнить один из основополагающих законов квантовой физики — принцип неопределенности Гейзенберга, который гласит, что невозможно точно определить положение и импульс частицы одновременно. Таким образом, малая неопределенность координаты частицы (с точностью до толщины барьера) приводит к неопределенности ее импульса, а следовательно, и кинетической энергии. Соответственно, появляется некоторая вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер.

Туннельный эффект широко встречается в природе, а также успешно используется в со-



временных технологиях. Например, при альфа-распаде радиоактивных ядер тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. Частице при отрыве от ядра приходится преодолевать барьер внутриядерных связей. Происходит туннелирование, и мы наблюдаем спонтанное альфа-излучение. Другой важный пример туннельного эффекта – процесс термоядерного синтеза, питающий энергией звезды. Сильное кулоновское отталкивание препятствует сближению ядер атомов, однако под воздействием высоких температур и давлений возникает вероятность их туннелирования, в результате чего происходит термоядерный синтез.

В последнее время человек научился использовать туннелирование частиц в своих целях: на основе туннелирования работают туннельные диоды, некоторые *одноэлектронные транзисторы*, переключатели на основе колоссального магнетосопротивления, устройства спинтроники, интерференционные SQUID-магнетометры и т.д.

Наконец, нельзя не упомянуть *сканирующий туннельный микроскоп*. Принцип его работы основан на измерении туннельного тока, который возникает между поверхностью исследуе-



**Рис. 1.** Схематическое представление классической и квантовой физической ситуаций при возникновении барьера на пути частицы

мого образца и тонкой иглой, расположенной на сверхмалом расстоянии. Когда игла находится непосредственно над атомом, сила туннельного тока возрастает. Таким образом, при помощи туннельного микроскопа удастся буквально ощупывать образцы и исследовать атомную структуру поверхности.

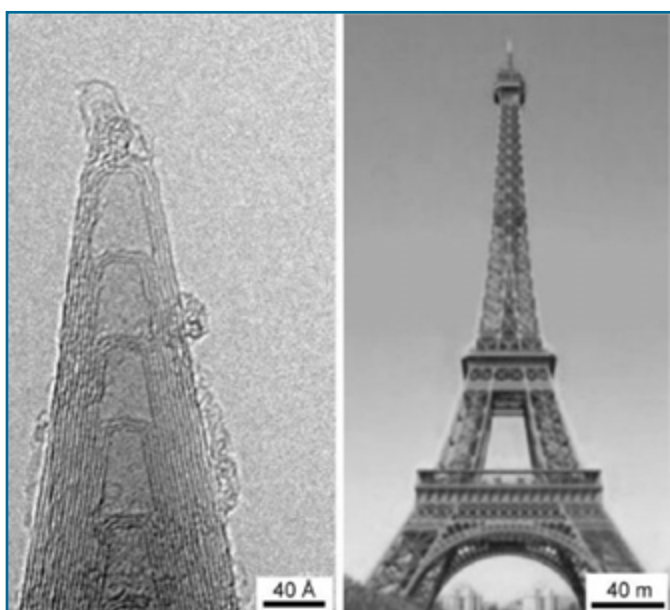
#### Литература:

1. Делоне Н.Б. Туннельный эффект // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, №1
2. Трейман С. Этот странный квантовый мир. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Ижевск, 2002.

## УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ (Carbon Nanotubes)

«...Каприз чертежника,  
Тонко-ажурная,  
Как сетчатый чулок...»

Прохожий. «Эйфелева башня»



Сравнение размеров углеродной нанотрубки и Эйфелевой башни

Великие шедевры архитектуры можно встретить не только в Париже, но и в наномире – замечательным аналогом всем известной Эйфелевой башни являются углеродные нанотрубки, которые в  $10^{10}$  раз меньше своего оригинала. Впервые углеродные нанотрубки были получены в 1991 году в лабораториях компании NEC (Япония) при распылении графита в электрической дуге. Позднее исследователи разработали различные способы их синтеза из графита и углеводородов – путем химического осаждения из паровой фазы в присутствии катализаторов, методом *лазерной абляции*, с использованием *темплатов*. В зависимости от условий синтеза возможно получить как *одностенные углеродные нанотрубки*, похожие на очень тонкий и длинный цилиндр, «склеен-

ный» из гексагональной углеродной сетки (рис. 1), так и многостенные нанотрубки. Последние представляют собой либо сверток, аналогичный бумажному свитку, либо набор одностенных труб, вставленных друг в друга наподобие матрешки (рис. 2). В зависимости от того, как именно из графитовой плоскости «вырезать полоску» и как ее свернуть, диаметр трубки может варьироваться в широких пределах от 0,4 до 100 нм, а длина – от 1 до 100 мкм.

Углеродные нанотрубки обладают очень разнообразными свойствами, демонстрируя, несмотря на свою кажущуюся хрупкость и ажурность, высокую прочность на растяжение и изгиб, способность перестраиваться под действием механических напряжений, высокую проводимость, необычные магнитные и оптические свойства (см. табл. 1). Но поистине удивительная особенность таких структур заключается в зависимости свойств от структуры самой нанотрубки. Так, например, вектор свертки графитовой плоскости

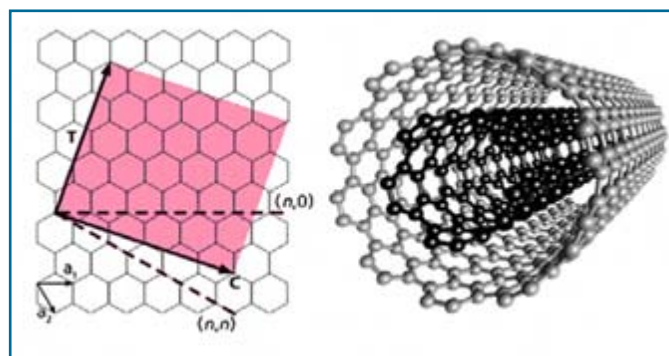


Рис. 1. Графитовая плоскость и многостенная углеродная нанотрубка

Таблица 1. Основные свойства углеродных нанотрубок

Свойства	Характеристики нанотрубок	Возможные применения
Механические	в 100 раз прочнее и в 6 раз легче стали	сверхпрочные нити, создание композитных материалов, «космический лифт»
	высокая гибкость	наноактюаторы
	высокая эластичность	острия для «атомно-силовой микроскопии»
Электронные	вариация электронных свойств в зависимости от диаметра трубок (переходы металл-полупроводник)	компоненты наноэлектроники (диоды, транзисторы и т.п.)
	высокая проводимость металлических трубок	прозрачные проводящие пластики, острия зондовых микроскопов
	высокая полевая эмиссия	электронная пушка, дисплеи, лампы, рентгеновские трубки
Физико-химические	высокая уд. поверхность (100-1000 м <sup>2</sup> /г)	носители для катализаторов
	высокая пористость и объем, форма каналов	капсулы для активных молекул, защита инкапсулированных материалов, хранение водорода, металлов и газов, нанобатареи, нанопипетки

определяет электронную структуру нанотрубки: будет ли она металлом или полупроводником.

Поражает воображение разнообразие применений нанотрубок, одни из которых только придуманы «на бумаге», а другие – реализованы в действительности. Нанотрубки могут использоваться в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей: согласно результатам численного моделирования модуль Юнга однослойной нанотрубки достигает величин порядка  $10^3$  ГПа, что на порядок выше, чем у стали. Не даром реализация одного из грандиозных проектов будущего, строительства *космического лифта*, основывается на уникальной механической прочности трубок: к настоящему моменту экспериментально подтверждено, что «микротрос»

из нанотрубок толщиной с человеческий волос способен удерживать грузы в сотни килограмм! Необычные электрические свойства нанотрубок делают их наиболее перспективным материалом наноэлектроники: уже сейчас на их основе созданы опытные образцы полевых *транзисторов* и полупроводниковых *гетероструктур*, в которых переход металл/полупроводник реализуется в пределах единичной нанотрубки путем контролируемого создания дефектов в ее структуре.

Однако нанотрубки могут выступать не только в роли исследуемого материала, но и как инструмент исследования. На их основе можно, к примеру, создать микроскопические *нановесы*, *нанотермометры* и другие наноинструменты, а

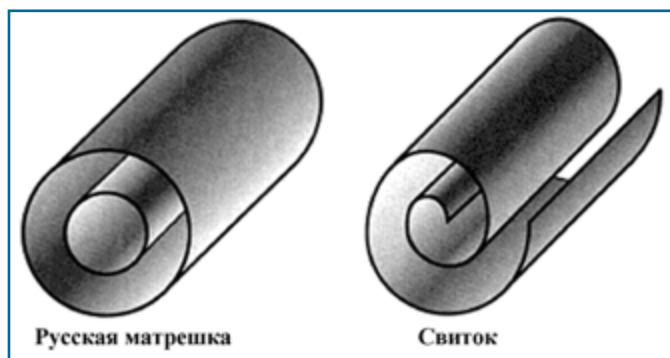


Рис. 2. Возможные модели многостенных углеродных нанотрубок

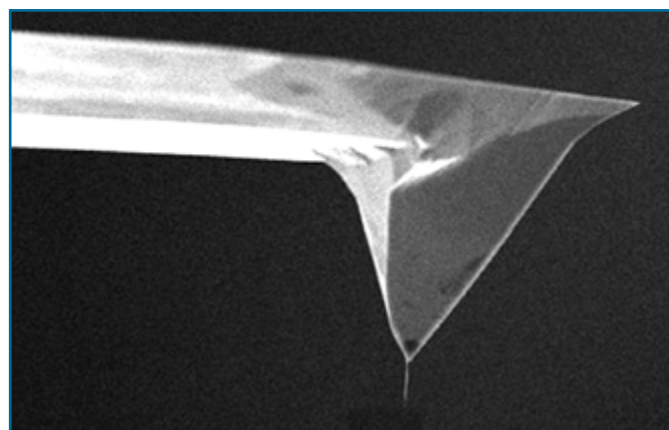
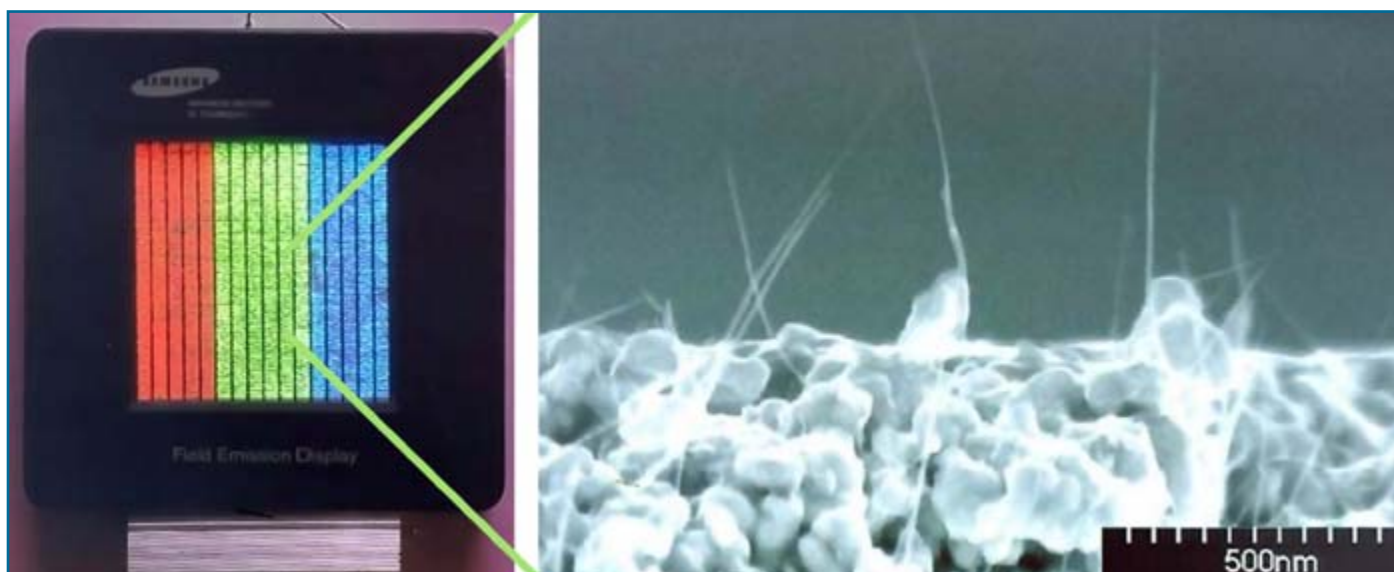


Рис. 3. Острие АСМ с прикрепленной к нему нанотрубкой





**Рис. 4.** Прототип плоского дисплея с катодом с полевой эмиссией на основе углеродных нанотрубок (Samsung) и микрофотография покрытия используемого в качестве холодного катода

если трубку «насадить» на острие *сканирующего туннельного* или *атомного силового микроскопа*, то получится идеальный микрозонд диаметром всего в нескольких атомов (рис. 3). Прикладывая определенное напряжение, с помощью такой иглы можно захватывать атомы или целые молекулы и как пинцетом перемещать их с места на место, а можно даже с высокой точностью производить запись и считывание информации с матрицы вплоть до плотности записи 250 Гбит/см<sup>2</sup>.

Безусловно, компьютерная индустрия не обошла своим вниманием углеродные нанотрубки, создав и успешно протестировав прототипы первых плоских дисплеев, работающих на нанотрубчатой матрице (рис. 4). В таком дисплее под

действием прикладываемого к одному из концов трубки напряжения с другого ее конца испускаются электроны, которые, попадая на фосфоресцирующий экран, вызывают свечение пикселя. В результате зерно изображения фактически определяется диаметром нанотрубки, а следовательно, обладает фантастически малыми размерами – не более одного микрона.

Каких только углеродных нанотрубок не синтезировали на протяжении последних 15 лет: Х- и Y-образные, расширяющиеся от одного конца к другому, покрытые «шубой» аморфного углерода или фуллереновыми «почками», а сколько новых углеродных архитектур еще будет построено в будущем!

#### Литература:

1. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 293 с
2. Mei Zhang, Atkinson K.R., Baughman R.H. Science. 2004. Vol. 306. P. 1358–1361.

## УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (Smart Materials)

*«Успехи науки – дело времени и смелости ума».*  
Вольтер



«Умная» жидкость

Развитие нанотехнологий ведет к все более широкому распространению так называемых «умных материалов» – материалов, реагирующих на изменения окружающей среды и изменяющих свои свойства в зависимости от условий. Самым простым примером природного «умного материала» является наша кожа – благодаря миллиардам связанных с головным мозгом нанодатчиков, которыми покрыто наше тело, человек с закрытыми глазами может узнавать предметы, рефлекторно отдергивать руку, чтобы не обжечься, а также переносить высокие и низкие температуры.

К числу вещей, искусственно созданных из «умных материалов», в первую очередь, следует отнести одежду из «умной ткани», реагирующей на изменение температуры (пропускающей воздух, когда жарко, и уплотняющейся, когда холодно) или способной убивать бактерии, разлагать грязь и пот и легко пропускать влагу наружу,

отталкивая внешнюю воду. Такая ткань используется для пошива спортивной одежды, постельного белья в госпиталях и одежды для медиков. Однако **нанотехнологии** позволяют не только создавать ткани с «улучшенными» свойствами, но и реализовывать некоторые, казалось бы, фантастические проекты. Помните фильм «Человек-невидимка»? Так вот, уже сегодня продемонстрированы первые образцы костюма-невидимки, принцип работы которого заключается в системе встроенных миниатюрных видеодатчиков и светоизлучающих элементов (рис. 1).

На основе «умных жидкостей», содержащих **наночастицы** и способных изменять свою вязкость под действием электрического (электрореологические жидкости) или магнитного (магнито-реологические жидкости) полей, создается ткань для нового поколения бронежилетов. Представьте, что на вас надет костюм, в котором циркулирует «умная жидкость». Увидев, что в вас целятся, нажимаете на кнопку, включающую поле, и



Рис. 1. Демонстрация костюма-невидимки

жидкость в костюме мгновенно затвердевает до пуленепробиваемости.

Но не подумайте, что «умные материалы» — это исключительно ткани. Ведущая фирма по производству магнитореологических жидкостей американская «Лорд корпорейшн» еще в 1997 году добилась первого серьезного успеха, применив «умную жидкость» в подвесках автомобилей. В таких подвесках чуткие сенсоры (на радарах) «щупают» профиль лежащей перед автомашиной дороги, непрерывно передавая эту информацию на демпфер. Электромагнитный виток внутри демпфера воспринимает ее и создает необходимой величины магнитное поле, которое, в свою очередь, меняет вязкость «умной жидкости» до нужной величины, то есть так, чтобы упругость подвески соответствовала сиюминутной потребности.

И даже пыль бывает «умной». Правда, пока она еще не совсем пыль, поскольку ее размеры близки к размерам рисовых зерен. Тем не менее в каждой такой «пылинке» имеется микропроцессор (чип), поглощающий направленную на него радиоволну и под ее воздействием испускающий соответствующий сигнал, например идентификационный номер. Такая «умная пыль» уже используется в магазинах торговой компании «Вол-Март» для слежения за своими товарами, а фирма «Бритиш петролеум» применяет чипы в своих бензовозах, чтобы отслеживать маршруты водителей. В перспективе она может быть полезной для отслеживания миграции птиц и животных, мониторинга кровообращения и давления человека (см. *Военные нанотехнологии, Наноклей*).

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://www.smart-material.com>

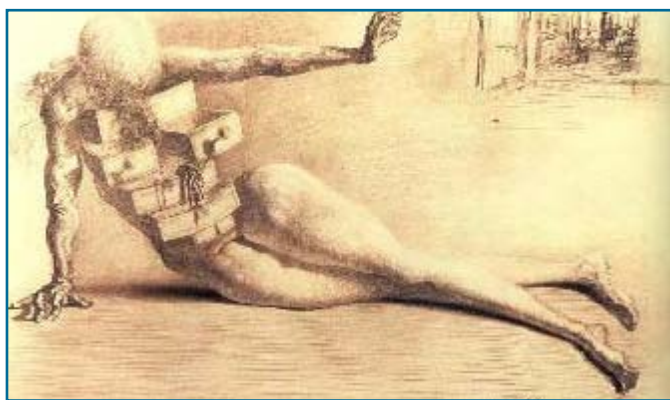


## УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ (Information Storage Devices)

*«Рукописи не горят!»*

*М.А. Булгаков.*

*«Мастер и Маргарита»*



Картина Сальвадора Дали «Город ящиков» — тайны памяти и подсознания

Современному человеку нравится быть мобильным и иметь при себе различные высокотехнологичные устройства, облегчающие жизнь, да и что там скрывать, делающие ее более насыщенной и интересной. И появились-то они — миниатюрные, удобные, цифровые — всего за последние 10–15 лет благодаря интенсивному развитию информационных технологий. Однако, как и следует из самого названия, технологические решения подразумевают наличие систем обработки информации, а саму ее надо где-то хранить. Проблема хранения информации встала перед человечеством еще несколько тысячелетий назад — вспомните хотя бы наскальную живопись, древние иконы или письменность.

По аналогии с обычной письменностью первые устройства хранения информации использовали бумажные или картонные носители — так называемые перфокарты и перфоленты. Запись информации в них осуществлялась с помощью перфоратора, пробивавшего дырки в определен-

ных местах, а считывалась информация специальным оптическим устройством для обработки. Однако увеличение производительности компьютеров в скором времени потребовало увеличения объемов данных, а расход бумаги одной ЭВМ повысился до полутонны в день. Все это потребовало разработки новых носителей информации, обладающих большей плотностью записи и скоростью доступа (рис. 1).

В декабре 1952 года корпорация IBM показала миру первые устройства хранения информации на магнитной ленте. Магнитные ленты, знакомые многим по аудио- и видеомagnetofонным кассетам, хранят данные в виде непрерывно изменяющихся аналоговых сигналов. Это сравнительно дешевый, но довольно медленный носитель. Тем не менее в мощных компьютерах для хранения больших объемов данных часто используют высокоскоростные многодорожечные магнитные ленты, удобные для резервного копирования всей информации с дисков компьютерных систем.

С развитием вычислительной техники потребовался унифицированный цифровой формат хранения данных, в качестве которого был выбран двоичный код, а минимальная ячейка информации была названа битом. Этот формат приобрел всемирную популярность, практически полностью вытеснив аналоговую запись. Кодирование символа (букв алфавита, знаков препинания и т.д.) сегодня осуществляется 8 битами или байтом: один байт хранит в себе один из 256 возможных символов. Большинство современных цифровых носителей информации



Рис. 1. Эволюция устройств записи информации

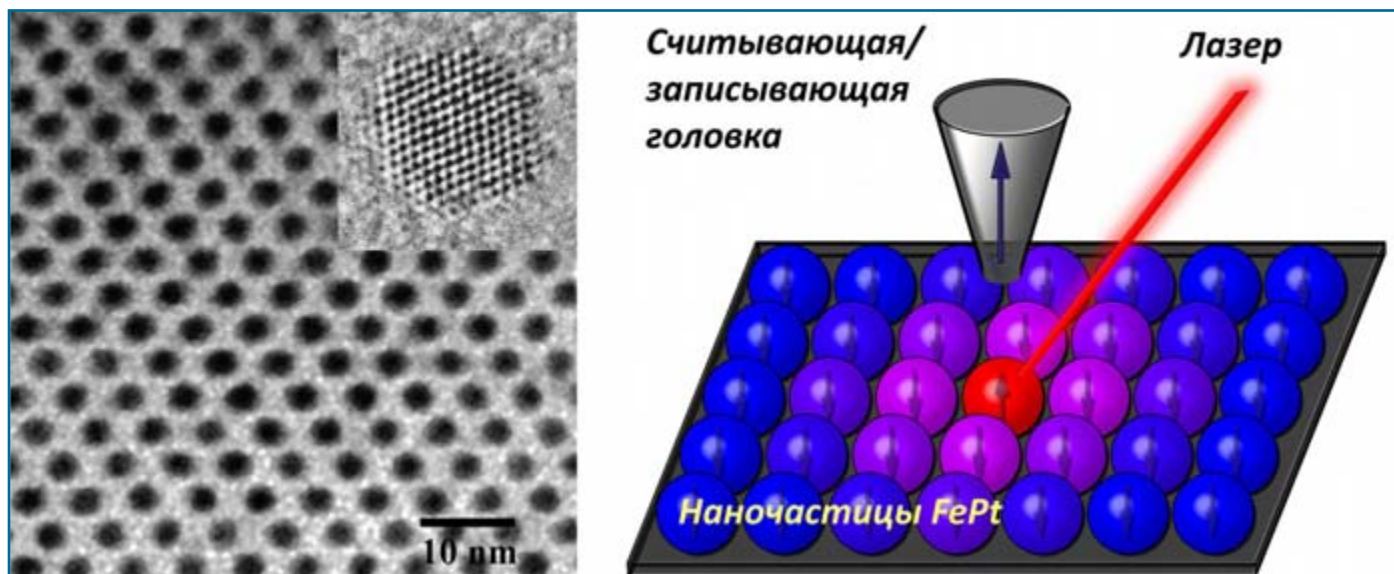
основывается на схемах магнитной, оптической, электронной и комбинированной (магнито-оптической, магнито-резистивной и т.д.) записи информации.

Первым цифровым носителем информации стал магнитный дисковый накопитель (IBM RAMAC, 1956 г.), являвшийся компромиссным решением между магнитной лентой и граммофонной пластинкой. Даже чтение магнитных дисков во многом аналогично считыванию сигнала с грампластинки, с той лишь разницей, что в качестве считывающего устройства в магнитном накопителе используется магниторезистивный сенсор, а не игла фонографа.

Для увеличения емкости магнитного накопителя он содержит не один, а сразу несколько дисков. Как правило, пластины изготавливают из алюминия, стекла или керамики и наносят на них слои высококачественного ферромагнетика. Для считывания информации головка перемещается на некотором расстоянии от поверхности пластины (около 10 нм), которая вращается с постоянной скоростью (до 15 тыс. оборотов в минуту), преобразуя магнитное поле в электрический ток. Чем меньше это расстояние, тем больше точность считывания и тем выше может быть плотность записи информации. Магнитное покрытие диска разбито на множество мельчайших областей спонтанной намагниченности (битов), собственные магнитные моменты которых ориентируются в соответствии с направлением прикладываемого магнитного поля и «замораживаются» в таком положении после прекращения действия внешнего поля, сохраняя записанную на диск информацию. Сама среда записи уже давно является наноструктурированной — она состоит из магнитных частиц сплава CoPtCrB

размером 10–15 нм. К сожалению, разработчикам магнитных дисков пока не удалось достичь воспроизведения записи на отдельных частицах, и в современных устройствах на один бит информации отводятся весьма значительные площади: ширина магнитной «дорожки» составляет порядка 1 мкм, а длина области, соответствующей одному биту — 50–70 нм. Тем не менее достигнутая на сегодня плотность записи просто поражает воображение:  $10^{10}$  бит содержатся всего в одном квадратном сантиметре поверхности диска! При этом стоимость 1 гигабайта на магнитном носителе составляет менее 0,5 доллара США! Сегодня уже находится в разработке новое поколение магнитных дисков — устройств температурно-контролируемой записи. В этих системах запись информации будет производиться на пространственно-упорядоченные частицы FePt размером всего 5 нм с помощью локального разогрева отдельных частиц фокусированным лазерным пучком в магнитном поле (рис. 2). Эта технология была предложена компанией Seagate и на сегодняшний день является «вершиной» нанотехнологического прогресса в области магнитных материалов.

Основная борьба за дальнейшее усовершенствование устройств магнитной записи состоит в преодолении так называемого «суперпарамагнитного предела». Казалось бы, чем меньше магнитные частицы, тем плотнее они могут быть упакованы и тем выше будет плотность записи. Однако, начиная с какого-то размера, частицы становятся настолько маленькими, что не могут поддерживать длительный эффект намагничивания ввиду возрастания тепловых колебаний магнитного момента (см. *Суперпарамагнетизм*). Но не стоит расстраиваться — магнитные систе-

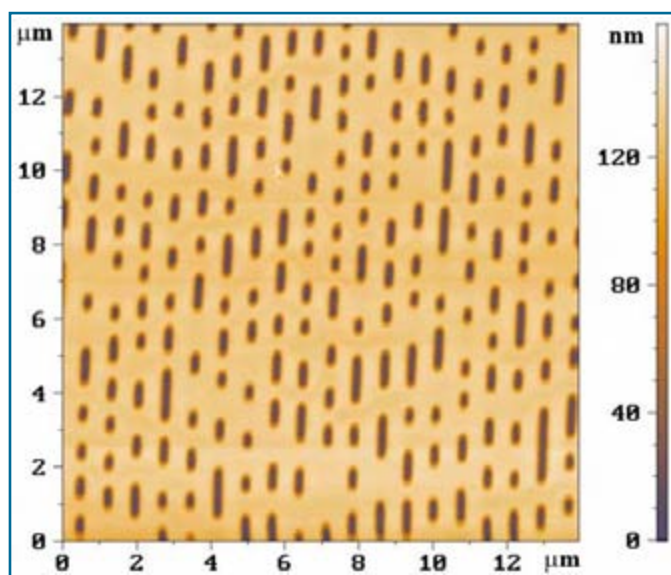


**Рис. 2.** Пространственно-упорядоченные массивы наночастиц FePt и принцип температурно-контролируемой записи информации

мы хранения информации еще не скоро достигнут своего предела, установленного природой и открывающего новую – голографическую – главу в истории устройств записи и хранения данных.

Основным конкурентом устройств магнитной записи на рынке являются оптические диски. В 1982 году фирмы Sony и Philips завершили работу над форматом CD-аудио (*Compact Disk*), открыв тем самым эру цифровых носителей на компакт-дисках. Трудно сейчас найти человека, у которого не было бы нескольких CD с музы-

кой или компьютерными играми. Чтение и запись информации в этом случае осуществляется лазером с длиной волны от 780 нм для CD и 650 нм для DVD до 405 нм для новых *Blu-ray* дисков. В оптической записи данные кодируются в виде последовательности отражающих и неотражающих участков, которые интерпретируются как единица и ноль соответственно (рис. 3). Максимальный объем информации для оптических дисков составляет от 720 Мбайт (CD) до 17 Гбайт (DVD) при массе всего лишь 14–33 грамм, а также 26 Гбайт для *Blue-Ray*. Основным недостатком оптической записи все еще остается низкая скорость чтения/записи информации, составляющая менее 100 Мбайт/с для *Blue-ray* дисков (по сравнению с 1,5 Гб/с в магнитных накопителях). Однако недавно были анонсированы принципы создания первых голографических HVD (*Holographic Versatile Discs*) дисков емкостью до 4 Тбайт, практически не уступающих по скорости доступа магнитным HDD.



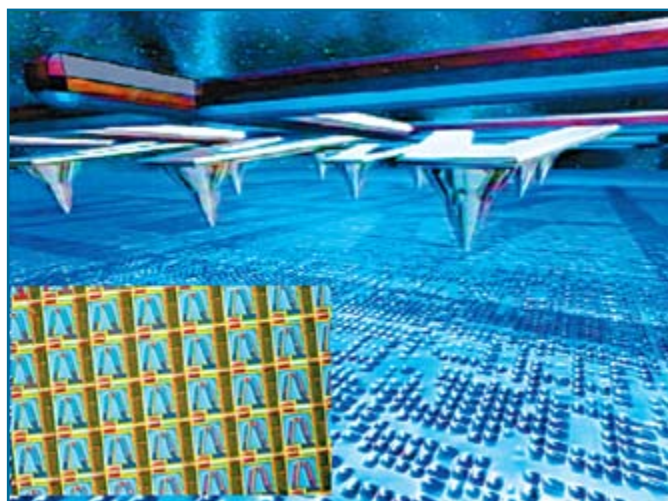
**Рис. 3.** АСМ изображение DVD диска (интервал между витками — 1,6 мкм, ширина углубления — 0,5 мкм, глубина — 0,125 мкм, минимальная длина — 0,83 мкм)

Сравнительно недавно (в 1988 году) компания Intel разработала еще один способ хранения данных на основе микросхем Flash-памяти, напоминающая ячейка которой представляет собой транзистор с двумя изолированными затворами: управляющим и плавающим, способным удерживать электроны, то есть заряд. При программировании микросхемы между коллектором и эмиттером создается канал – поток электронов,



некоторые из которых – высокоэнергетические – преодолевают слой изолятора и попадают на плавающий затвор, где могут храниться в течение нескольких лет. Низкий заряд на плавающем затворе соответствует логической единице, а высокий – нулю. При чтении эти состояния распознаются путем измерения порогового напряжения транзистора. Когда вы стираете с флэшки какой-либо файл, на управляющий затвор подается высокое отрицательное напряжение и электроны с плавающего затвора переходят (туннелируют) на исток. Флеш-память имеет массу преимуществ, включая высокую скорость доступа и отсутствие задержек на механическое движение диска и считывающего устройства, однако стоимость 1 Гб электронного носителя более чем в 50 раз превосходит аналогичную величину для магнитной записи, и составляет более 25 долларов США.

Наконец, совсем недавно создатель сканирующего туннельного микроскопа и сотрудник исследовательского института IBM, Нобелевский лауреат Герд Биннинг предложил вернуться к механическому принципу хранения информации, разработав технологию *Millipede* (с англ. «многоножка») (рис. 4). Биннинг обратил внимание на возможность формирования наноразмерных «ямок» с помощью «наноиндентации» поверхности полимера зондом атомно-силового микроскопа. Наличие или отсутствие такой «ямки» в определенной точке поверхности можно трактовать как единичное значение бита памяти. Для ускорения работы устройства «наноиндентация» (запись) и сканирование поверхности полимера (считывание) может производиться не одним «кантилевером», а целой матрицей зондов для АСМ. В марте 2005 года на выставке CeBit в Ганновере IBM представила работающий чип с плотностью хранения информации 153 Гбайт на площади в квадратный дюйм (1 дюйм = 2,54 см). Следующие поколения устройств *Millipede*, как обещают исследователи IBM, будут иметь в 100 раз большую емкость, что позволит хранить



**Рис. 4.** Изображение устройства записи *Millipede*. Чтение информации производится «ощупыванием» поверхности большим набором зондов

огромное количество информации на крошечных чипах. По прогнозам IBM это новое устройство хранения данных должно вытеснить с рынка чипы *flash*-памяти. Единственным недостатком такого устройства является сложность стирания или перезаписи информации, в связи с чем технология *Millipede* пока находится в стадии разработки.

В настоящее время рассматриваются и другие технологии создания постоянных электронных запоминающих устройств. Промышленные гиганты многих стран мира пытаются использовать магнитные, туннельные, ферро- и пьезоэлектрические эффекты, а также фазовые превращения для создания электронных устройств, сохраняющих информацию при отключении устройства от источника тока.

Естественно, каждый из существующих способов хранения информации обладает своими преимуществами и недостатками. И все же технологии не стоят на месте, и каждый год в согласии с законом Мура средняя плотность записи всех типов устройств возрастает в ~1,5 раза. Какая же из технологий является оптимальной и будет доминировать на рынке через 10 лет? Время покажет...

#### Интернет-ресурсы:

1. Магнитные ленты [http://www.imation.ru/about\\_imation/newsroom/2003\\_50yearstape](http://www.imation.ru/about_imation/newsroom/2003_50yearstape)
2. Flash-накопители [http://q-lab.ru/ru\\_flash.shtml](http://q-lab.ru/ru_flash.shtml)
3. Жесткие диски <http://www.citforum.ru/hardware/bookide/bookide1.shtml>

## ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА (Federal Target Program)

*«Цель оправдывает средства».  
Народная поговорка*



Во всем мире принято два основных способа финансирования науки. Первый способ, соответствующий схеме «снизу вверх», реализуется в результате конкурса проектов, цели и планы выполнения которых предлагают сами исследователи. А государство финансирует только проекты высочайшего класса, самого высокого мирового уровня. В России на этом поле работают Государственные фонды (РФФИ и РГНФ), которые расходуют ежегодно 7% от всего бюджета на науку, что соответствует примерно 4,0 млрд рублей/год. Для сравнения: в США на этом поле работает Национальный научный фонд (NSF – National Science Foundation) с бюджетом 5,3 млрд долл. Кстати, это тоже около 7% от всего госбюджета, выделяемого на исследования и разработки. По такой схеме финансируются практически все фундаментальные научные исследования.

Второй подход к финансированию исследований – «сверху вниз», как правило, применяется

для поддержки прикладных исследований и разработок. В отличие от первого подхода, в этом случае не только исполнители, но сама цель исследования определяются от имени государства тем или иным ведомством. Государство определяет задачи, назвав приоритетные направления и критические технологии, и выбор этих областей и направлений осуществляется путем экспертной оценки потенциальных потребителей (см. *Критические технологии РФ*). Это те области научно-технического развития, которые востребованы обществом и государством, и их выбирает, как правило, общество, исходя из стратегических целей. Все это делается на основании экспертных оценок специалистов из разных сфер деятельности, а не только ученых.

Программно-целевой способ реализации государственной политики известен давно и не уникален. Правительства всех стран, озабоченных глобальным соревнованием за ресурсы развития, пытаются выделить стратегически важные, наиболее конкурентоспособные направления и сделать в них что-то полезное за счет средств, собираемых в виде налогов и сборов. Например, в США около 50% от всех расходов госказны приходится на программно-целевые проекты, в странах ЕС еще больше, в частности во Франции эта доля составляет 80%.

С начала 2007 г. в России действует Федеральная целевая программа (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы», которая охватывает 5 из 8 приоритетных направлений развития науки, техноло-

гий и техники (исключены лишь приоритетные направления «Безопасность и противодействие терроризму», «Перспективные вооружения, военная и специальная техника» и «Транспортные, авиационные и космические системы», которые вынесены в отдельные ФЦП) и все 34 **критические технологии Российской Федерации**. На выполнение ФЦП, действующей в период с 2007 года по 2012 год, в соответствии с постановлением правительства предусматривается 195 млрд рублей, в том числе за счет средств федерального бюджета 133,8 млрд рублей. Основное внимание в Программе уделяется поддержке развития нанотехнологий и наноматериалов, на которые отводится более 50% общего финансирования.

Структурообразующими функциональными элементами Программы являются следующие блоки мероприятий:

- блок «Генерация знаний»;
- блок «Разработка технологий»;
- блок «Коммерциализация технологий»;
- блок «Институциональная база исследований и разработок»;
- блок «Инфраструктура инновационной системы».

В ФЦП финансирование получают не научные коллективы, а научно-исследовательские проекты с конкретными целями. Коллективы авторов подают предложения, обосновывая важность решаемых прикладных научных задач для российской экономики. Поступившие предложения рассматриваются рабочими группами, сформированными по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ. В состав

рабочих групп входят эксперты как со стороны научного сообщества, так и со стороны бизнеса, которые оценивают не только научную значимость предложений, но и коммерциализуемость разработок, экономический эффект от их внедрения и др. Затем прошедшие такой отбор предложения попадают в научно-координационный совет программы при Роснауке. Наиболее интересные предложения принимаются, и на их основании формируются лоты, которые и выносятся на конкурс, заявку на участие в котором может подать любая организация России независимо от формы собственности или даже частное лицо. Вся информация об объявленных конкурсах публикуется на официальном сайте Роснауки – [www.fasi.gov.ru](http://www.fasi.gov.ru). Поданные на конкурс заявки проходят независимую экспертную оценку, в результате которой заявки ранжируются в соответствии с набранными баллами. Организации, заявки которых получили наивысшие оценки, признаются победителями конкурса (в зависимости от типа конкурса победителей может быть один или несколько), и с ними заключается государственный контракт на выполнение работы. Контроль над реализацией Программы возложен на Государственную дирекцию ФЦП.

Кроме вышеуказанной федеральной целевой программы, поддержку научных исследований в области нанотехнологий осуществляет также другая ФЦП – «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы, в рамках которой предусматривается финансирование 99,5 млрд рублей, в том числе за счет средств федерального бюджета – 49,5 млрд рублей.

#### Литература:

1. Распоряжение Правительства РФ от 06.07.2006 г. № 977-р «Об утверждении концепции федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития нанотехнологического комплекса России на 2007–2012 годы”».
2. Постановление Правительства РФ от 17.10.2006 г. № 613 «О федеральной целевой программе “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы”».
3. Постановление Правительства РФ от 29.01.2007 г. № 54 «О федеральной целевой программе “Национальная технологическая база” на 2007–2011 годы».

#### Интернет-ресурсы:

1. Государственная дирекция ФЦП – <http://www.fcntp.ru>
2. Федеральное агентство по науке и инновациям – <http://www.fasi.gov.ru>

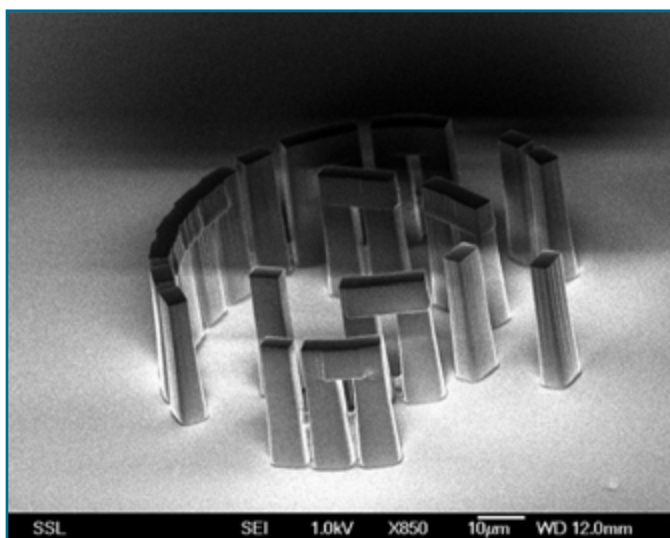


## ФИП Нанолитография (FIB Nanolithography)

*«Харитон – художник. Он для вас картинки  
Хорошо умеет кистью рисовать.  
Цезарь вам картинки вытравит на цинке,  
Цинковые доски передаст в печать».*

*С.Я. Маршак.*

*«Живые буквы»*



Уменьшенная копия Стоунхенджа, полученная учеными из Сингапура протонной литографией

Понять технологию процесса нанолитографии фокусированным ионным пучком (ФИП-нанолитографии) можно, представив себя художником, работающим над созданием картины. Только в качестве мольберта у вас манипулятор образцов; кремниевая пластинка или электронный чип заменяют вам холст, а фокусированный ионный пучок (поток ускоренных ионов – чаще всего галлиевых) – кисти диаметром всего 6–10 нм. Химические реагенты выступают в роли красок, которые, попадая под прямой пучок ускоренных ионов, способны превращаться в тонкий слой проводников или изоляторов. Когда вы рисуете обычную картину, то водите кистью по холсту. В данном же случае перемещается не кисть – она жестко закреплена, а мольберт, причем он перемещается с очень высокой точностью и на малые величины (меньше размеров атома). Что-

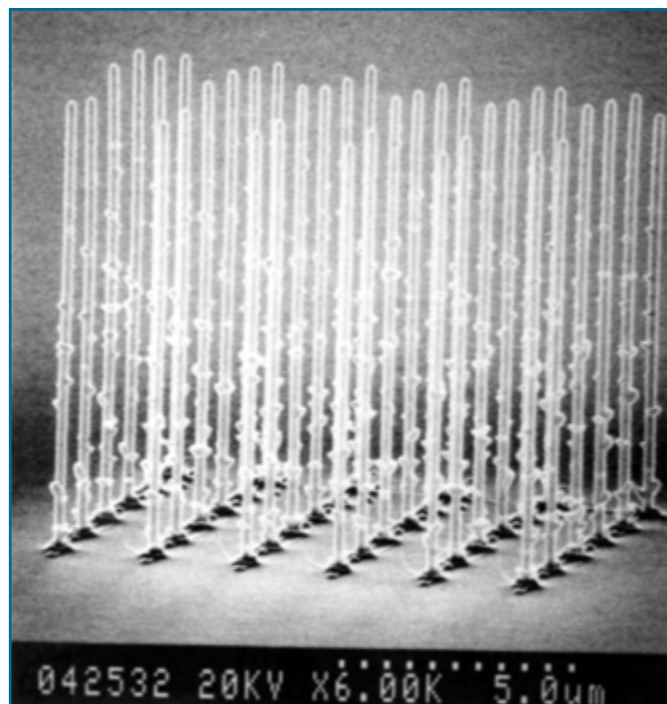
бы нажать на кисть, вам достаточно увеличить интенсивность потока ионов.

Ну что ж, начинаем рисовать? Подаем краски на холст по специальным трубочкам, и чем дольше задерживаем образец в одном месте, тем толще слой – так можно получить золотые структуры, показанные на рис. 1. В данном случае краски представляют собой легколетучие соединения золота, которые разлагаются на подложке под воздействием ионного пучка. Если нанесли лишний слой – не беда, его как шпателем можно удалить чистой кистью, поскольку поток ускоренных ионов обладает свойством выбивать атомы из вещества и таким образом последовательно стравливать и «резать» любые материалы, даже такие твердые, как алмаз.

Можно осуществить немного другой способ создания картин, если предварительно на холст равномерно нанести специальные вещества (резисты), в которых под локальным воздействием пучка ионов могут проходить химические реакции. После того, как нужный рисунок задан, не изменившийся резист просто удаляют растворителем, и картина готова. С помощью высокоэнергетичных фокусированных пучков протонов (до 2 МэВ), которые в отличие от тяжелых ионов металлов проникают вглубь резиста, практически не рассеиваясь, по этой методике можно даже «вырезать» трехмерные объекты (скульптуры). Для этого надо лишь варьировать глубину проникновения пучка протонов в вещество, меняя его энергию и время экспозиции. Именно так исследователи из Сингапура создали в миллиарды раз уменьшенную копию Стоунхенджа. Экспери-

ментально установлено, что методом протонной ФИП-технологии с использованием негативного резиста можно получить трехмерные детали с толщиной стенок 60 нм и высотой 10 мкм! Для сравнения, используя галлиевые источники в многослойном образце  $\text{AlF}_3/\text{GaAs}$ , можно сделать углубление шириной 8 нм и глубиной 50 нм, а в алмазе шириной 20 нм и глубиной 400 нм.

Как вы, наверное, уже поняли, основное отличие ФИП-литографии от фотолитографии в том, что ФИП-технология – это последовательный процесс, а с помощью литографии можно нанести все детали чипа одновременно. В последнее десятилетие компьютеры значительно облегчили использование ФИП – мольберт теперь может передвигаться по заданным в программе координатам, и художнику-оператору не надо часами сидеть за прибором. Все же, несмотря на колоссальные достижения в технологии получения фокусированных ионных пучков и автоматизации высокоточных манипуляторов, системы ФИП не смогли заменить процесс фотолитографии в производстве микросхем. ФИП-технологии стали незаменимым инструментом в производстве ма-



**Рис. 1.** Структура, полученная осаждением золота фокусированным ионным пучком  $\text{Ga}^+$  энергией 100 кЭв (Matsui S. et al., 1991)

сок для фотолитографии, исправления контактов на дефектных чипах, а также в процессах отладки экспериментальных микросхем.

#### Литература:

1. Watt F., Breese M.B.H., Bettiol A.A., van Kan J.A. Materialstoday. 2007. Vol. 10, N 6. P. 20–29.
2. Watt F., Bettiol A.A., van Kan J.A., Teo E.J., Breese M.B.H. International Journal of Nanoscience. 2005. Vol. 4, N 3. P. 269–286.

## ФОТОНИКА (Photonics)

*«Луч, подобный изумруду,  
золотого счастья ключ...»*

*Николай Заболоцкий*



Несмотря на то, что бурное развитие фотоники началось относительно недавно, люди уже давно понимали, что фотоны — это быстрый и удобный способ передачи информации. На рисунке доктор Ватсон наблюдает, как дворецкий Бэрримор подает с помощью пламени свечи сигнал беглому каторжнику Селдену, скрывающемуся на болотах (Артур Конан Дойл. «Собака Баскервиль»)

Не секрет, что основным двигателем прогресса является информация. Поэтому на протяжении всей своей истории человечество непрерывно искало новые способы формирования, передачи и обработки информационных потоков: шумерская клинопись, египетские иероглифы, финикийский алфавит, азбука Морзе, двоичная система исчисления и компьютерные кодировки — все это важнейшие индикаторы, однозначно определяющие степень развития человеческой цивилизации на определенных исторических этапах. Совершенствовались и носители информации: глиняные таблички, папирус, пергамент, бумага, электрические и радиосигналы... Впрочем, даже на заре

цивилизации человек осознавал, что самым быстрым носителем информации является свет. Зажженный в ночи факел подаст сигнал удаленному объекту быстрее, чем самый быстрый гонец или почтовый голубь. Активное использование света в информационных технологиях началось только в последнее время, когда благодаря достижениям науки возникли новые источники света, способы передачи световых сигналов на тысячи километров и устройства обработки полученной информации. Ввиду своей огромной значимости и невероятных перспектив развития, область науки и техники, связанная с созданием способов генерации, передачи и обработки световых сигналов, а также с изучением протекающих при этом процессов, получила специальное название — фотоника.

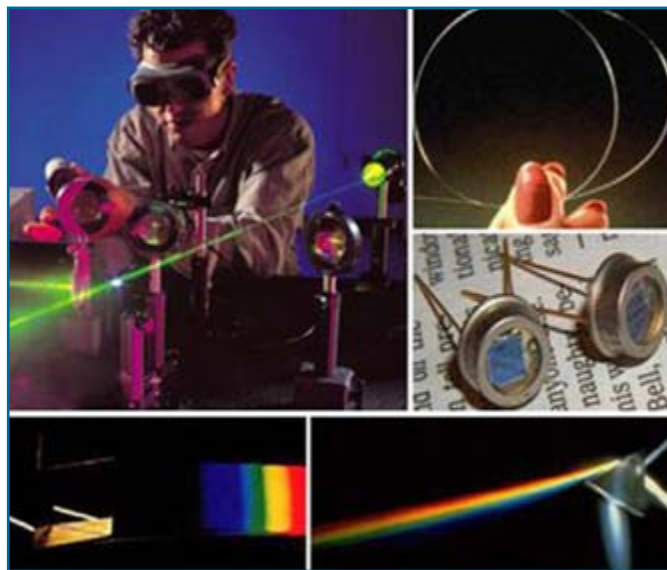
Рассказ о фотонике уместно вести, проводя параллели с другой чрезвычайно важной областью современной науки и техники — электроникой, в основе которой лежат процессы, протекающие с элементарными носителями заряда — электронами. Различные эффекты, связанные с электричеством (молнии, притяжение натертым кусочком янтаря мелких предметов и др.), были известны человеку с незапамятных времен. Однако создание и повсеместное использование всевозможных электронных устройств стало возможно лишь тогда, когда возникли источники, средства передачи и средства обработки электрических сигналов. Причем во всех трех случаях решающую роль сыграло материаловедение (в частности, создание современной базы электронных компонентов стало возможным, в первую оче-



редь, благодаря разработке технологий глубокой очистки полупроводников и их легирования).

По аналогичному пути идет и развитие фотоники (рис. 1). О перспективах фотоники как альтернативы электронике стало возможно думать после разработки в 50-х гг. советскими физиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым принципов работы мощных узконаправленных и удобных источников когерентного излучения – лазеров. Вслед за этим ученые обратили внимание на средства передачи фотонов. Передавать световые сигналы по воздуху, несмотря на его «прозрачность», неэффективно – в атмосфере содержится огромное количество пыли и капель воды, которые сильно рассеивают свет. Поэтому для передачи фотонов было придумано оптическое волокно, состоящее из сверхчистого стекла. Что касается средств управления фотонами, некоторые из них – линзы, призмы, дифракционные решетки и др. – известны уже достаточно давно. Впрочем, подобно тому, как прорыв в электронике произвела разработка технологий глубокой очистки полупроводников, революция в фотонике должна произойти вслед за созданием особых оптических материалов, свойства которых по отношению к фотонам напоминали бы свойства полупроводников по отношению к электронам – как ожидается, это произойдет в самом ближайшем будущем.

Современные нанотехнологии играют решающую роль в развитии фотоники. Например, недавно появившиеся наноструктурированные волноводы по многим характеристикам значительно превосходят обычное стеклянное оптоволокно. Полупроводниковые наночастицы (см. *Квантовые точки*) могут совершить революцию в области источников света благодаря мощной люминесценции и возможности, синтезируя наночастицы заданного размера, управлять длиной волны излучаемого света. Наконец, материалы с упорядоченной микроструктурой (см. *Фотон-*



**Рис. 1.** Некоторые элементы фотоники: лазер, стеклянное оптоволокно, фотодиоды, призма и дифракционная решетка

*ные кристаллы*) могут решить проблему «полупроводников для света».

В последнее время нередко выделяют особую область науки, изучающую оптические явления на наноуровне – нанофотонику. С одной стороны, развитие фотоники и создание новых оптических устройств, как и в случае электроники, неизбежно приведет к необходимости миниатюризации функциональных компонентов. С другой стороны, достижения нанофотоники уже сейчас позволяют решать многие прикладные задачи. В качестве примера представим, что мы хотим увидеть в оптический микроскоп ДНК. Нити ДНК могут быть достаточно длинными, однако они настолько тонкие, что увидеть их даже с использованием самой лучшей оптики не представляется возможным. Впрочем, проблему можно решить, если прицепить к цепочке ДНК квантовые точки. В этом случае при облучении образца ультрафиолетовым светом нить ДНК начинает светиться, и ее уже можно будет увидеть в окуляр микроскопа.

#### Литература:

1. Ларкин А.И. Когерентная фотоника. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 319 с.
2. Астапенко В.А. Физические основы фотоники. М.: МФТИ, 2005. 104 с.

## ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

### (Photonic Crystals)

*«Ах ты, радуга-дуга,  
Ты высока и туга!  
Не дай дождичка,  
Дай нам ведрышко...»*  
Русский фольклор

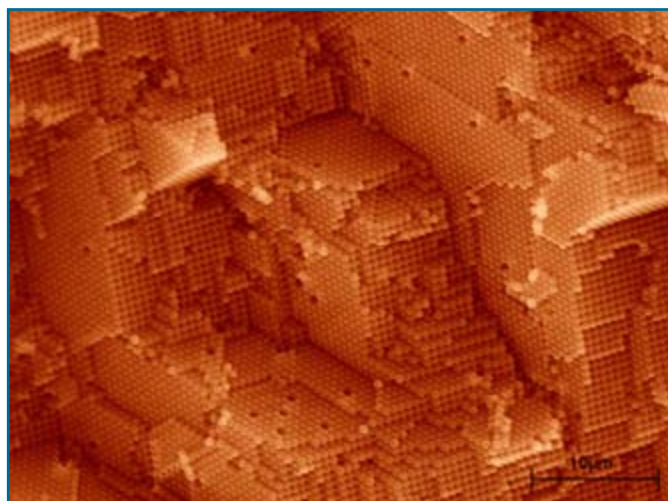


Все эти объекты широко известны благодаря необычной игре света

Что общего между пером павлина, крылом экзотической бабочки и драгоценным камнем опалом? Правильно, все они необычно переливаются на свету, давая возможность наблюдать причудливые краски и удивительные цветовые переходы. Впрочем, сходство между этими предметами гораздо более глубокое, чем это может показаться на первый взгляд. Если мы посмотрим на каждый из них при большом увеличении, то увидим, что их поверхность имеет строго упорядоченную структуру. Таким образом, необычная игра света имеет дифракционную природу, а перечисленные предметы являются ни чем иным, как «собратьями» известной каждому со школьной скамьи дифракционной решетки. Впрочем, в последнее время подобные объекты начинают привлекать внимание ученых не только с эстетической точки зрения. Упорядоченные структуры, период которых сопоставим с длинами волн света видимого

или ближнего инфракрасного диапазонов, даже получили от физиков особое название – фотонные кристаллы (рис. 1).

Термин «фотонный кристалл» может поставить неподготовленного читателя в тупик. Действительно, все знают, что атомные кристаллы состоят из атомов, ионные кристаллы – из ионов, молекулярные – из молекул... Быть может, фотонные кристаллы образованы остановленными и упакованными в периодическую структуру фотонами? Но это невозможно, ведь фотоны не имеют массы покоя, стоит «остановить» фотон, и он исчезнет! На самом деле, фотонные кристаллы создают вовсе не из фотонов, а из вполне привычных материалов – полимеров, оксидов, полупроводников, металлов и др., а само название указывает лишь на то, что поведение фотонов в таких средах весьма необычно.



**Рис. 1.** Фотонный кристалл, аналогичный природному опалу, – образец состоит из упорядоченных сферических частиц размером около 650 нм (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

Итак, фотонный кристалл – это оптическая среда, в которой происходит периодическое изменение коэффициента преломления на масштабе, сопоставимом с длиной волны света видимого или ближнего инфракрасного диапазонов. При этом различают одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы в зависимости от того, наблюдается ли указанная периодичность в одном, двух или трех измерениях соответственно. Согласно этому определению, в качестве одномерного фотонного кристалла вполне можно рассматривать уже упомянутую дифракционную решетку. Напомним, обычная дифракционная решетка – это полированная металлическая пластина, на которой нарезаны параллельные эквидистантные канавки. Хорошо известно, что одномерная периодичность дифракционной решетки позволяет ей эффективно отражать свет некоторой длины волны, падающий на решетку под определенным углом. Если же мы создадим фотонный кристалл с трехмерной периодической структурой, то возможна ситуация, при которой свет некоторой длины волны отражался бы от такого объекта при любом угле падения. Таким образом, мы получаем некоторую оптическую среду, в которую фотон не может попасть извне. Впрочем, еще более интересно представить ситуацию, когда фотон той же длины волны каким-либо образом «родился» внутри фотонного кристалла. В этом случае, по причине дифракции, фотон не может покинуть фотонный кристалл и оказывается... «заморожен»! Так значит, исходная мысль об остановленных фотонах все-таки имеет под собой основание, если речь идет о фотонных кристаллах, неслучайно их иногда называют «ловушками для света»!

На самом деле фотонные кристаллы – это не просто необычные оптические среды, представляющие сугубо научный интерес. Напротив, исследователи полагают, что уникальное поведение фотонов в фотонных кристаллах позволит создать на основе последних самые разнообразные оптические устройства, которые произведут настоящую революцию в оптоэлектронике. Уже сейчас предложены пути использования фотонных кристаллов для создания высокоэффективных светодиодов и лазеров, новых оптоволокон-

ных волноводов, оптических переключателей и фильтров, а в перспективе – сверхбыстрых фотонных компьютеров, в которых все логические операции будут производиться не с электронами, а фотонами (см. *Квантовые компьютеры*). Создание большинства из упомянутых устройств упирается в технологию формирования фотонных кристаллов, ведь в отличие от простейших одномерных дифракционных решеток, синтезировать структуры с двух- и тем более трехмерной периодичностью непросто.

Один из возможных подходов к созданию фотонных кристаллов ученые «подсмотрели» у природы. Так, уже упомянутые природные минералы опалы образуются в недрах Земли из субмикронных (диаметр  $< 1000$  нм), близких по размеру сферических частиц оксида кремния. Именно упорядоченное расположение таких микрошариков приводит к существованию в структуре опала периодичности во всех направлениях, и как следствие – необычной игре света вследствие дифракции. В последнее время химики научились синтезировать фотонные кристаллы, аналогичные природным опалам, в лабораторных условиях. Синтетические опалы характеризуются даже более высоким качеством структуры по сравнению с природными аналогами и успешно используются во многих физических экспериментах.

Если пустоты, существующие в *самоорганизованном массиве* сферических коллоидных частиц, заполнить металлом, оксидом или другим материалом, а сами сферы потом удалить (см. *Наносферная литография*), то получится так называемый обращенный фотонный кристалл, представляющий собой пористый материал с высокоупорядоченной системой микропор. При этом размер контактирующих наночастиц, образующих такой каркас, примерно в три раза меньше размера исходных микросфер, т.е. принадлежит нанодиапазону.

Активная работа по синтезу фотонных кристаллов (не только идентичных опалам) проводится по всему миру, и универсальная технология их производства, по-видимому, станет делом ближайшего будущего.

#### *Литература:*

1. Inoue K., Ohtaka K. Photonic Crystals: Physics, fabrication and applications, Springer Series in Optical Sciences, 2004. 320 p.
2. Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals. Princeton University Press, 1995.

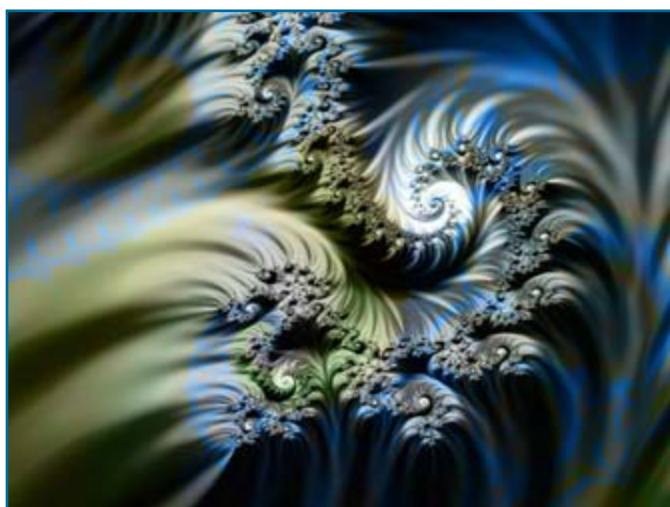


## ФРАКТАЛЫ

### (Fractals)

*«Под микроскопом он открыл, что на блохе  
Живет блоху кусающая блошка;  
На блошке той блошинка-крошка,  
В блошинку же вонзает зуб сердито  
Блошиночка, и так ad infinitum».*

*Д. Свифт*



Нравится ли вам разглядывать морозные узоры на окне или, может, вы любите ловить так непохожие друг на друга снежинки и рассматривать их неповторимую форму? Если да, то вам несомненно понравятся фрактальные структуры!

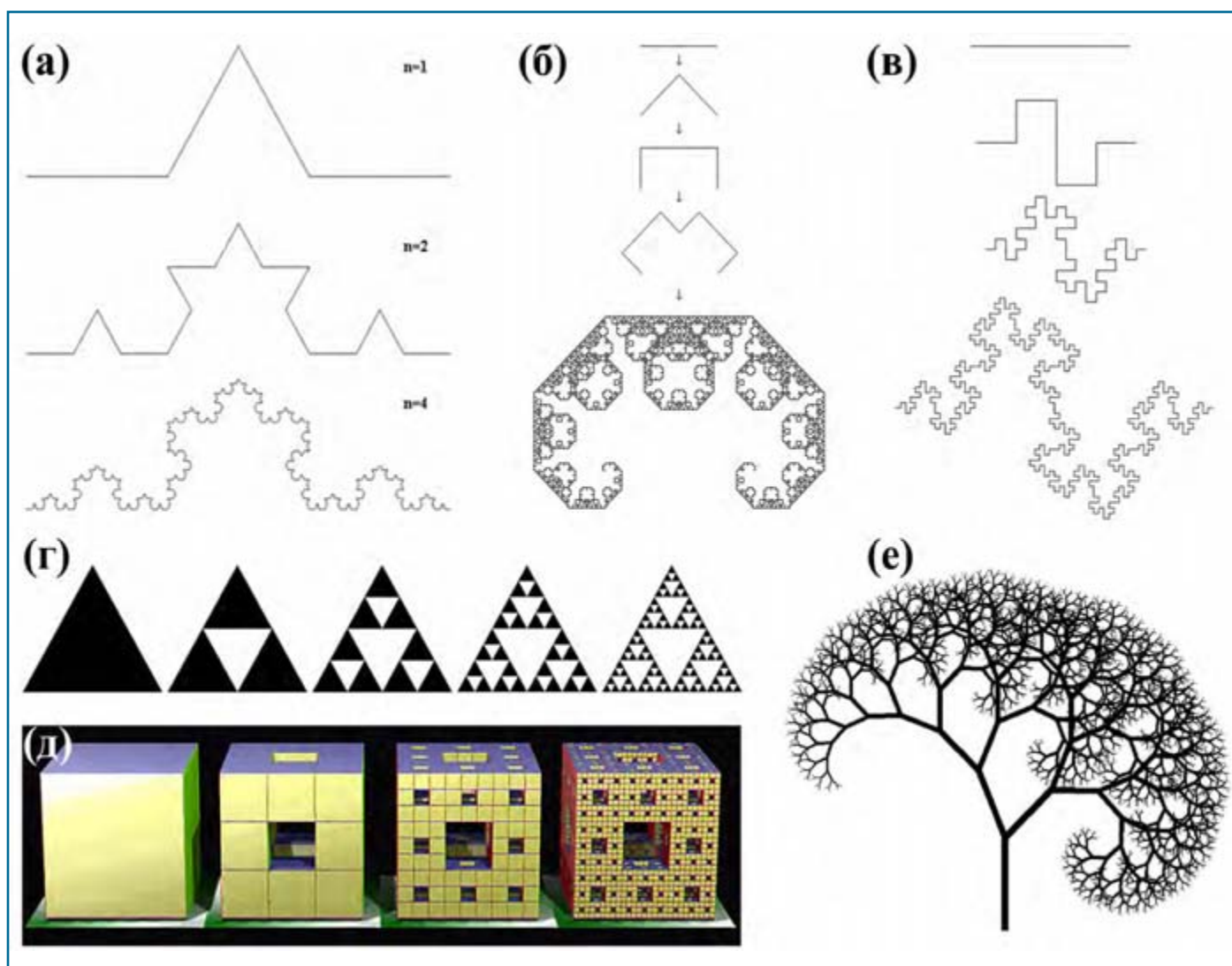
Фракталами называют самоподобные фигуры, каждый фрагмент которых повторяется при уменьшении масштаба. Разветвления трубочек трахей, нейроны, сосудистая система человека, извилины берегов морей и озер, контуры деревьев – это все фракталы. Как видно, фракталы можно найти в объектах таких малых, как клеточная мембрана, и таких огромных, как звездные галактики. Можно сказать, что фракталы – это уникальные объекты, порожденные непредсказуемыми движениями хаотического мира.

Термин «фрактал» был введен Бенуа Мандельбротом в 1975 году, но до сих пор нет его однозначного определения. Согласно Мандельброту, фракталом (от лат. *fractus* – дробленный, ломанный, разбитый) называется структура, состоящая

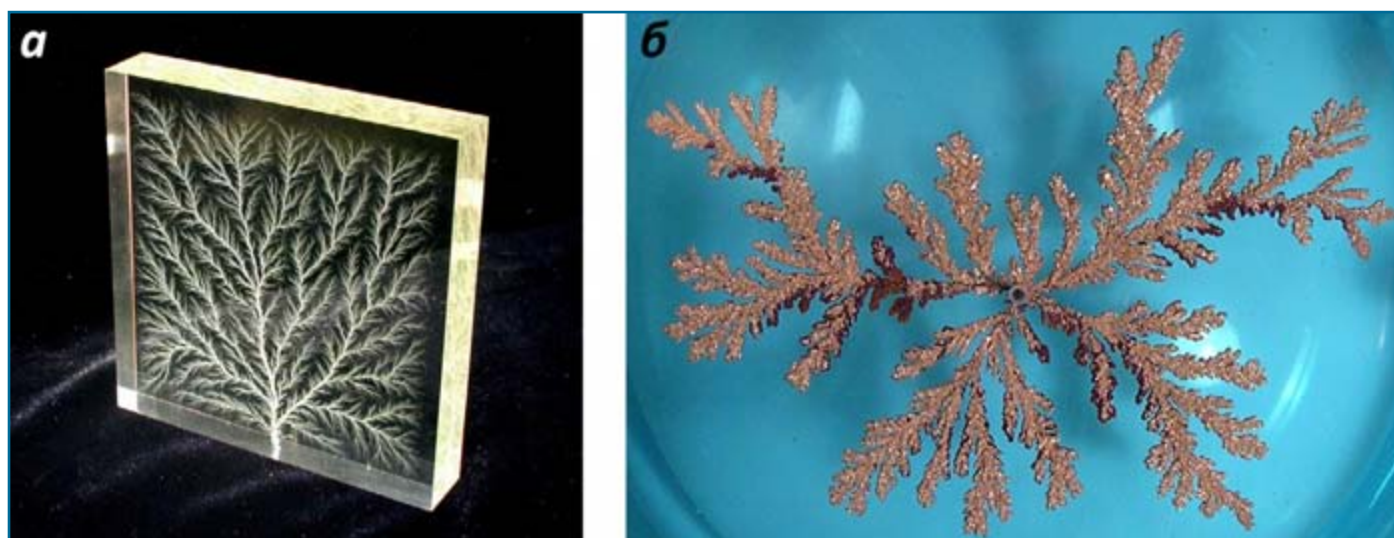
из частей, подобных целому. Свойство самоподобия резко отличает фракталы от объектов классической геометрии. Термин «самоподобие» означает наличие тонкой повторяющейся структуры как на самых малых масштабах объекта, так и в макромасштабе.

История фракталов началась с геометрических фракталов, которые исследовались математиками в XIX веке. Фракталы этого класса – самые наглядные, потому что в них сразу видно самоподобие. Примерами таких фракталов служат: кривые Коха, Леви, Минковского, треугольник Серпинского, губка Менгера, дерево Пифагора (рис. 1) и др. С математической точки зрения фрактал – это, прежде всего, множество с дробной (промежуточной, не целой) размерностью. В то время как гладкая евклидова линия заполняет в точности одномерное пространство, фрактальная кривая выходит за пределы одномерного пространства, вторгается в двумерное пространство. Таким образом, фрактальная размерность кривой Коха будет находиться между 1 и 2. Это, прежде всего, означает, что у фрактального объекта невозможно точно измерить его длину!

Существует множество классификаций, делящих фракталы на группы. Принято различать регулярные и нерегулярные фракталы, из которых первые являются плодом воображения (математическая абстракция), подобным снежинке Коха, треугольнику Серпинского, а вторые – продуктом природы или деятельности человека. Нерегулярные фракталы (рис. 2) в отличие от регулярных сохраняют способность к самоподобию в ограниченных пределах, определяемых реальными



**Рис. 1.** Примеры геометрических фракталов: а — кривая Коха, б — кривая Леви, в — кривая Минковского, г — треугольник Серпинского, д — губка Менгера, е — дерево Пифагора



**Рис. 2.** Примеры нерегулярных фракталов: а — лихтенберговский рисунок в пластине акрила, вызванный ветвлением электрического разряда-пробоя, б — дендритный фрактал, полученный электроосаждением меди из раствора сульфата меди

размерами системы. Ярким примером химических фрактальных систем являются молекулы *дендримеров* (рис. 2б).

Фракталы находят все большее и большее применение в науке и технике. Основная причина этого заключается в том, что они описывают реальный мир иногда даже лучше, чем традиционная физика или математика. Можно до бесконечности приводить примеры фрактальных объектов в природе – это и облака, хлопья снега, горы, вспышка молнии и, наконец, цветная капуста. Фрактал как природный объект – это вечное непрерывное движение, новое становление и развитие, не застывшие во времени, постоянно изменяющиеся под действием ветра и воды кромка облаков и профиль гор.

Кроме того, фракталы находят применение в децентрализованных компьютерных сетях и «фрактальных антеннах». Весьма интересны и перспективны для моделирования различных стохастических (не детерминированных) случайных процессов так называемые «броуновские фракталы».

В нанотехнологиях фракталы тоже играют важную роль, поскольку многие наносистемы обладают нецелочисленной размерностью, то есть являются по своей геометрической, физико-химической или функциональной природе фракталами. Кроме того, принцип фрактальности отражает иерархичность строения и поэтому является более общим и универсальным, чем стандартные подходы к описанию строения и свойств наносистем.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Третьяков Ю.Д. Дендриты, фракталы и материалы // Соросовский образовательный журнал. 1998. №11. С. 96–102.
2. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. С. 254.

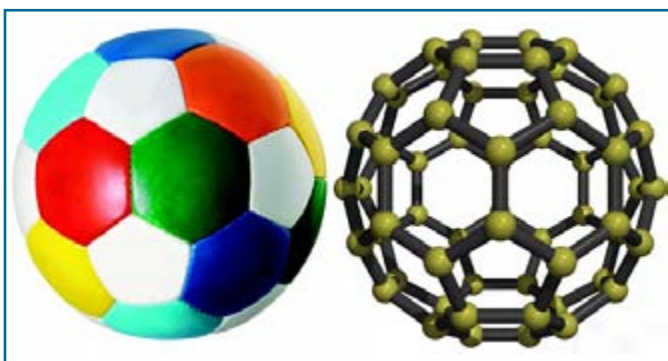


## ФУЛЛЕРЕНЫ

### (Fullerenes, Bucky-Balls)

*«...Теперь наноРеал в наноМадриде Играет  
фуллереновым мячом».*

*Неизвестный*



Если развитие нанотехнологий дойдет до такого уровня, что появятся невидимые человеческим глазом нанороботы, то выяснится, что природа в некоторой степени уже позаботилась об их досуге, создав нанометровые мячики – молекулы фуллерена. Действительно, размер молекулы самого известного фуллерена  $C_{60}$  составляет всего 1 нм, а сама молекула состоит из связанных ковалентными взаимодействиями 60 атомов углерода, образующих полую структуру в форме футбольного мяча. Термин «фуллерен» происходит от имени Ричарда Букминстера Фуллера, сконструировавшего оригинальный купол павильона США на выставке EXPO-67 в Монреале в форме сочлененных пентагонов и гексагонов (рис. 1).

С химической точки зрения фуллерен представляет собой аллотропную модификацию углерода, уникальную своей молекулярной структурой – практически идеальные шарики удерживаются вместе только слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами. Очень необычна история открытия фуллеренов, которые сначала были предсказаны теоретически и лишь через 20 лет обнаружены экспериментально (рис. 2), вызвав настоящий

«фуллереновый бум» в научном мире. Уже сейчас опубликованы тысячи научных статей, книг, брошюр, посвященных данной теме, обсуждается возможность самых необычных применений этого соединения в нанoeлектронике, медицине, технике (например, в качестве основы для синтеза искусственных алмазов, элементов квантовых компьютеров, для создания новых электронных приборов, для защиты тканей от радиации, а также в составе лекарств и смазочных веществ).

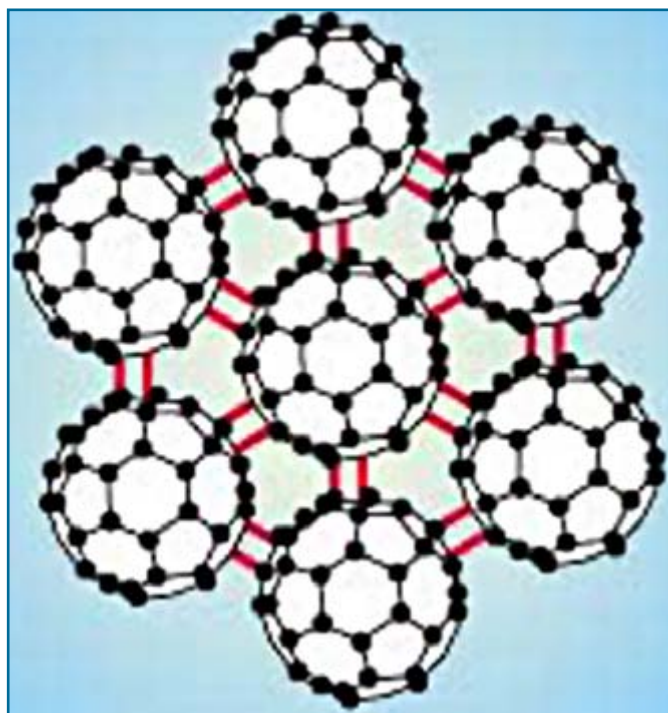
Следует отметить, что  $C_{60}$  – это далеко не единственный представитель фуллеренов. Известны и другие углеродные молекулы в форме выпуклых многогранников, образующиеся при испарении графита в атмосфере гелия. Давайте разберемся, сколько атомов углерода может содержать молекула фуллерена? Во-первых, оказывается, что только четное количество. Дело в том, что молекула  $C_{60}$  построена из атомов С, находящихся в состоянии  $sp^2$ -гибридизации, в ре-



**Рис. 1.** Купол павильона США на выставке EXPO-67 в Монреале



**Рис. 2.** Ключевые этапы открытия фуллеренов



**Рис. 3.** Полимеризованная фаза фуллерена, способная проявлять ферромагнитные свойства

зультате чего каждый атом имеет по три соседа, связанных с ним  $\sigma$ -связями. Но, как всем известно, валентность углерода равна четырем, поэтому оставшиеся валентные электроны образуют  $\pi$ -систему молекулы из делокализованных двойных связей «углерод-углерод». С помощью математических расчетов показано (теорема Эйлера), что существуют только многогранники, удовлетворяющие соотношению  $B + G - P = 2$  ( $B$  – число вершин,  $G$  – число граней, а  $P$  – число ребер). Поэтому невозможно сверткой идеально ровного графитового листа, который является наиболее энергетически выгодной углеродной структурой из  $sp^2$ -гибридизованных атомов, получить замкнутый многогранник, состоящий только из шестичленных циклов. Следовательно, поверхность фуллерена должна также включать другие грани с меньшим числом вершин – пентагоны, причем если число шестиугольных граней может быть произвольным, то пятиугольных должно быть ровно 12. Конечно, это только необходимое, но недостаточное условие существования фуллерена – простейший, согласно расчетам, его представитель  $C_{20}$  до сих пор экспериментально не получен – при синтезе преимущественно

образуются молекулы  $C_{60}$  и  $C_{70}$ , а также высшие фуллерены, вероятно, из-за стабильности таких каркасов. А в чем же причина отсутствия малых фуллеренов? Скорее всего, в том, что с уменьшением размера структура становится более напряженной и склонной к полимеризации. Сам по себе фуллерен плохо растворим в воде и не проводит электрический ток, однако модификация поверхности фуллеренового «шара» или заполнение

его внутреннего пространства атомами металлов приводит к заметному изменению физических свойств, например переходу в сверхпроводящее состояние или проявлению магнетизма (рис. 3). Будут ли открыты новые свойства и реализуются ли уже предложенные способы применения фуллеренов, мы узнаем в самом скором времени – темпы развития современной науки необычайно высоки.

#### Литература:

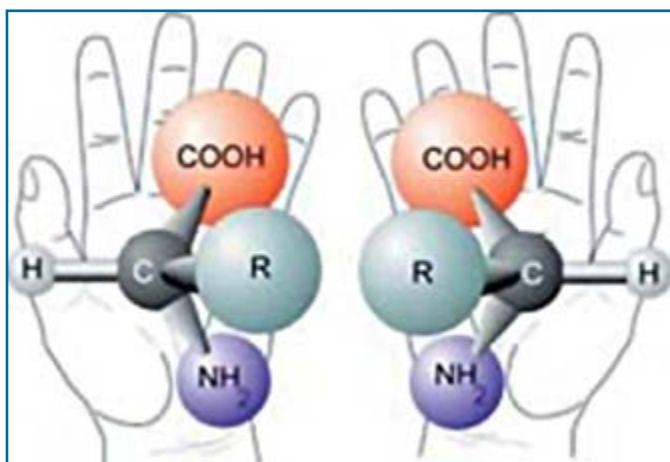
1. Сидоров Л. Н., Юровская М. А., Борщевский А. Я. и др. Фуллерены: Учебное пособие. М.: Экзамен, 2005. 688 с.



## ХИРАЛЬНОСТЬ (Chirality)

*«Я называю геометрическую фигуру хиральной, если ее отражение в зеркале не совпадает с ней при наложении (подобно рукам человека)».*

*Лорд Кельвин (1893)*



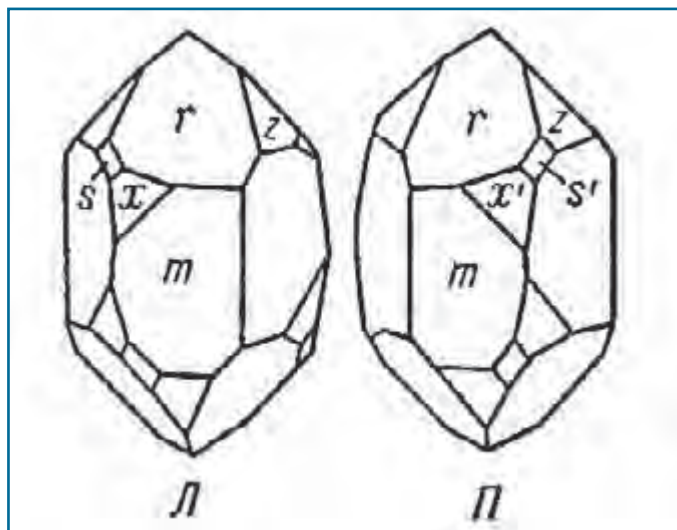
Давайте подойдем к зеркалу и приложим к нему правую руку. На что похоже ее отражение? На левую руку. Причем совместить левую руку с правой вам не удастся никакими поворотами. Правая рука не совпадает со своим отражением так же, как и страница с текстом, надписи на которой в зеркале всегда смотрят «в другую сторону». А вот, например, карандаш вполне совмещается со своим зеркальным близнецом – надо только повернуть его вокруг оси графитового стержня. Любая геометрическая фигура, которая не может быть совмещена со своим отражением, называется хиральной.

Хиральность может возникать как на молекулярном уровне (хиральными бывают отдельные молекулы, например, природной винной кислоты  $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$ ), так и на этапе образования кристаллической структуры. К примеру, кристаллическая структура природного кварца (диоксида кремния) хиральна (рис. 1), в то время как локальное окружение ато-

мов кислорода и кремния в структуре кварца вполне симметрично. Кристаллы, образованные только из «правых» и «левых» молекул, представляют собой зеркальные антиподы, как правая и левая руки.

Хиральные молекулы составляют основу живой природы, а также многих функциональных материалов. Например, все аминокислоты, входящие в состав белков, хиральны (за исключением простейшей – глицина). В полной мере это относится и к сахарам – строительным звеньям углеводов и нуклеиновых кислот. Соответственно, хиральны и образованные из них макромолекулы – типичные нанообъекты: белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и т.д.

Существенное значение хиральность имеет при синтезе сложных соединений, обладающих лекарственными свойствами, регулярных поли-



**Рис. 1.** «Правый» и «левый» кристаллы кварца

меров, жидких кристаллов; отсутствие центра симметрии является ключевым условием при получении материалов для нелинейной оптики, сегнето-, пьезоэлектриков и т.д. Следует отметить, что большинство природных ядов – полипептидов и алкалоидов – также хиральны, а их «антиподы» практически безвредны для организма человека. С другой стороны, «антиподы» природных аминокислот и сахаров живыми организмами просто не усваиваются и даже не распознаются. Иногда антиподы лекарственных веществ могут быть очень опасны, поэтому при производстве лекарств для очистки получаемых веществ используются различные хиральные агенты, в том числе и коллоидные системы с хиральными молекулами, «привитыми» к поверхности.

В очень редких случаях оба «антипода» встречаются в природе, но тогда они обладают совершенно разными свойствами. Например, одна форма молекулы лимонена отвечает за запах эфирного масла лимона, а вторая – за запах эфирного масла апельсина. Очень показательное влияние хиральности на свойства *одностенных углеродных нанотрубок*, поскольку в зависимости от хиральности, нанотрубка может обладать совершенно разными свойствами – от металла до полупроводника (рис. 2).

Среди более сложных хиральных нанообъектов большой интерес представляют *фотонные*

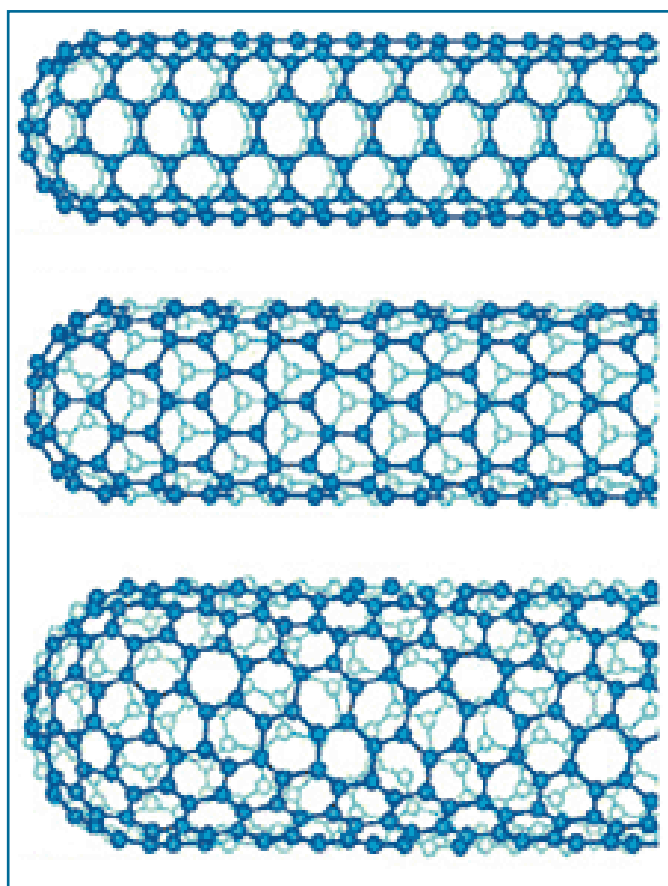


Рис. 2. Нижняя нанотрубка, в отличие от верхних, обладает хиральностью

*кристаллы*, которые от обычных отличаются тем, что построены из хиральных объектов. В зависимости от того, совпадает ли знак круговой поляризации падающего света с хиральностью самого кристалла, свет может претерпевать или не претерпевать дифракцию.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Бакстон Ш., Робертс С. Введение в стереохимию органических соединений. М.: Мир, 2005.
2. Волькенштейн М.В. Молекулы и их строение. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955.

## ЦЕНТРЫ ПРЕВОСХОДСТВА (Centers of excellence)

---

*«Превосходство не может быть дешевой...»*

*Э.М. Ремарк*

*«Тени в раю»*



Ни для кого не секрет, что для нашей страны существует острая необходимость развития своего научно-технического и экономического потенциала. Острота этой проблемы, в том числе, связана с тем, что темпы роста и структура сектора исследований и разработок не в полной мере отвечают потребностям системы обеспечения национальной безопасности. В последнее время государство действительно предпринимает определенные шаги для решения этой проблемы. В частности, широко известно, что уже несколько лет функционируют Федеральные целевые программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» и «Научно-технологическая база России» (см. ста-

тью ФЦНТП), а в 2006 г. обнародована «Стратегия развития науки и инноваций в РФ» на период до 2015 г. Основной целью данной стратегии является формирование сектора исследований и разработок и эффективной инновационной системы, обеспечивающих технологическую модернизацию экономики и повышение ее конкурентоспособности на основе передовых технологий, а также превращение научного потенциала в один из основных ресурсов устойчивого экономического роста. В числе основных мер, которые будут приниматься для решения упомянутых задач, значится совершенствование системы Государственных научных центров Российской Федерации и стимулирование процессов формирования и развития «Centers of excellence». Финансирование системы «Centers of excellence», которое предполагается с 2007 г. проводить целиком из федерального бюджета, составит к 2010 г. от 2 до 10 млрд руб. в год и, постоянно увеличиваясь, в перспективе (к 2015 г.) составит порядка 20 млрд руб. в год.

Что же такое «Centers of excellence»? Это конкурентоспособные научно-исследовательские организации, обладающие, в частности, приборно-технологической базой мирового уровня и высококвалифицированным персоналом, которые могут обеспечить приоритет Российской Федерации по отдельным критическим технологиям. Центром превосходства может стать институт РАН, университет или отраслевой институт. При этом данное понятие ни в коей мере не связывают с каким-либо специальным статусом для организаций.



Откуда взялось такое название? Оказывается термин «Центры превосходства» является калькой с англоязычного выражения «Centre of excellence» и не вполне точно отражает его содержание. Более правильно было бы назвать его «Ведущим центром», «Центром передового опыта» или «Центром выдающегося мастерства». Но, как это часто бывает, далеко не всегда название соответствует сущности... Да и не это, в конце концов, самое главное.

Многие страны уже давно включились в соревнование за создание лучших инновационных систем и систем, способствующих развитию образования и науки. Это – официальная политика. Например, во Франции определены «Центры превосходства» национального уровня, в том числе аэрокосмический концерн Airbus. Государство активно поддерживает тех, кто участвует в его софинансировании, предоставляет кредиты и различные льготы. Создана система стимулирующих мер, направленных на развитие аэрокосмической отрасли. Зачем? Затем, что это дает Франции конкурентное преимущество в экономике.

Аналогичные мероприятия проводятся также в Финляндии, Эстонии и других странах. В 1995 г. Академия наук Финляндии запустила первые «Центры превосходства», представляющие со-

бой партнерские объединения самых сильных и успешных лабораторий страны, которые отбираются по итогам строгого конкурса. Статус «Центра превосходства» дается на 5 лет и считается в Финляндии очень престижным. Кроме того, научным структурам, которые его удостоены, предоставляется дополнительное финансирование. На эти деньги, как правило, запускаются самые неожиданные и рискованные проекты. На программу «Центров превосходства» Академия тратит около 15% своего бюджета. Сейчас в стране 44 таких центра, специализирующихся в самых разных областях – от физики низких температур до теологии.

Так что, как видите, идея отнюдь не нова и реализуется во многих странах. Подобный подход позволяет выбрать наиболее перспективные научные центры и в рамках их совместной работы при активной поддержке государства реализовывать различные исследовательские программы, в том числе работы по развитию нанотехнологий. Для России в рамках создания центров превосходства должна появиться своеобразная альтернатива небезызвестной Программы нанотехнологической инициативы США, которая была предложена еще в 2000 г. и находится с тех пор под патронажем президента.

#### *Интернет-ресурсы:*

1. [http://www.fips.ru/ruptoru/str\\_rf.htm](http://www.fips.ru/ruptoru/str_rf.htm) (стратегия развития науки и инноваций в РФ на период до 2015).
2. [http://www.airbus.com/en/corporate/people/centres\\_of\\_excellence/](http://www.airbus.com/en/corporate/people/centres_of_excellence/)

## ЦЕОЛИТЫ (Zeolites)

*«Чем больше дыр – тем лучше сыр».  
Крылатое выражение*



Как сделать материал пористым? Конечно, в нем можно просверлить или вырезать отверстия, но если их диаметр должен составлять менее 100 нм, приходится использовать специальные подходы, как это делается при получении нанопористых материалов или *мезопористых молекулярных сит*. Однако в некоторых структурах, к которым, в частности, относятся цеолиты, полости и поры появляются самопроизвольно в процессе их образования в природе или в пробирке химика – подобно тому, как образуются дырки в сыре.

В переводе с греческого «цеолит» означает «кипящий камень» – очень необычное сочета-

ние слов, не правда ли? Если Вы возьмете кусок цеолитного минерала и нагреете его, то заметите выделяющиеся пары воды, как будто твердое вещество закипает. Откуда же в нем берется вода? Ответ на этот вопрос кроется в специфической особенности тех самых пор цеолита – способности поглощать (адсорбировать) и удерживать молекулы различных веществ.

Цеолиты представляют собой алюмосиликаты – производные от диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , в котором часть атомов кремния замещена на алюминий. При этом каждый атом Si и Al окружен четырьмя атомами кислорода, образуя тетраэдры, соединяющиеся друг с другом вершинами и формирующие упорядоченную структуру с полостями и каналами. Подобно картинке в калейдоскопе, в зависимости от способа соеди-

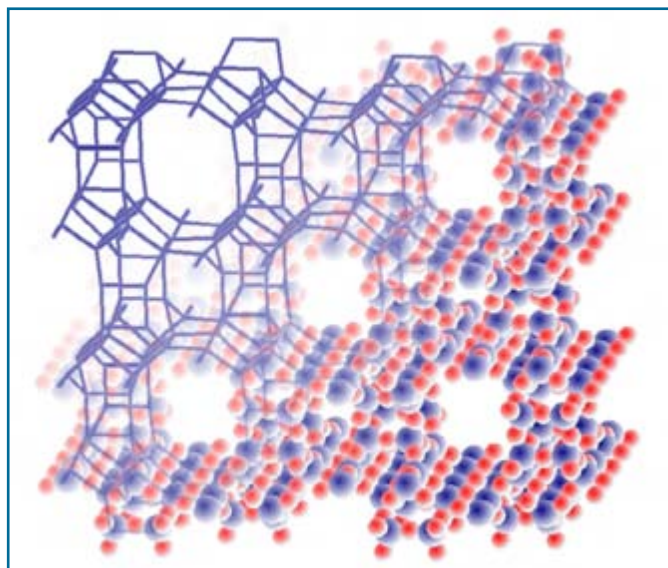


Рис. 1. Структура цеолита

нения тетраэдров возможно образование огромного количества разнообразных упорядоченных структур – на настоящий момент количество классифицированных цеолитов превышает полторы сотни. В целом алюмосиликатная матрица обладает высокой кристалличностью. Поэтому все каналы цеолитов упорядочены и одинаковы по размерам (рис. 1), чего нельзя сказать о дырках в сыре. При этом каналы имеют крайне маленькие размеры (порядка одного нанометра), определяющиеся структурным типом цеолита. Поскольку замещение четырехвалентных атомов кремния на трехвалентные атомы алюминия создает в структуре избыточный отрицательный заряд, он должен компенсироваться положительно заряженными ионами – в целом-то кристалл нейтрален. И действительно, в полостях цеолита, располагаются катионы металлов в количестве, необходимом для компенсации заряда (рис. 2).

Поры занимают значительную часть от общего объема структуры, поэтому цеолиты активно используются в качестве адсорбентов, например для очистки жидкостей и газов. Однако широкое распространение «кипящие камни» получили вовсе не из-за адсорбционных свойств, а потому, что обладая чрезвычайно большой удельной поверхностью (вплоть до нескольких сотен квадратных метров на грамм минерала), оказались очень удобными для применения в катализе. Судите сами: все поры цеолита одинаковы, а это позволяет входить в них лишь частицам строго определенного размера, препятствуя попаданию в поры больших или разветвленных молекул. Таким образом, катализатор на основе цеолита способен избирательно (селективно) действовать на молекулы в смеси. Другой особенностью цеолитов является наличие в них так называемых каталитически активных центров, находящихся, по большей части, на внутренних

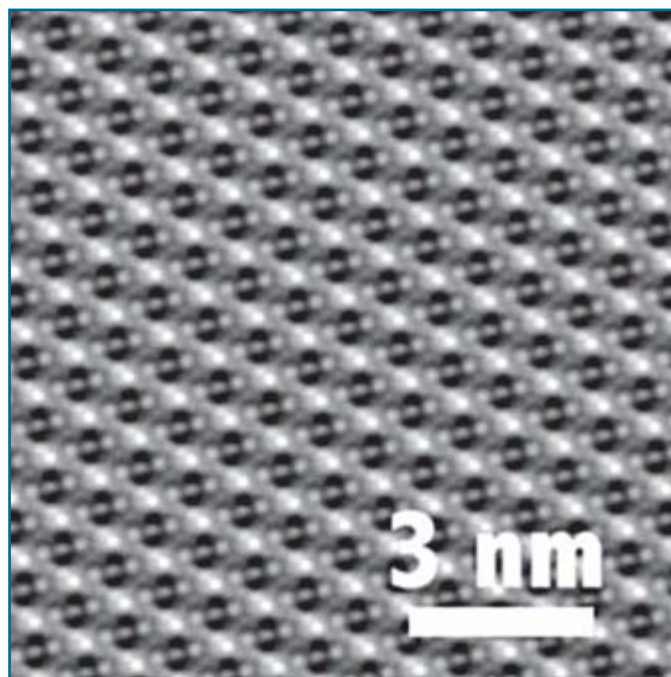


Рис. 2. Микрофотография цеолита NaY вдоль направления [110]

стенках пор и способных взаимодействовать с поглощаемыми молекулами, но только с теми, размеры которых позволили оказаться в порах. При этом количество и активность центров легко задаются изменением состава соединения и типа его структуры. Вы думаете, на этом достоинства цеолитов-катализаторов и ограничиваются? Оказывается, нет, поскольку в их порах, путем химической модификации собственных катионов или сорбированных молекул, можно синтезировать наночастицы, тем самым увеличивая каталитическую активность композита по сравнению с «пустой структурой».

Свойства и структуры цеолитов чрезвычайно разнообразны, поэтому они еще долго будут оставаться для исследователей непрочитанной книгой – кто знает, какие еще структурные типы будут открыты и какие уникальные применения цеолитов будут найдены в будущем.

#### Литература:

1. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М.: Мир, 1976.
2. Adsorbents: Fundamentals and Applications, 7. Zeolites and Molecular Sieves / Edited by Ralph T. Yang, «John Wiley & Sons» Inc., 2003.

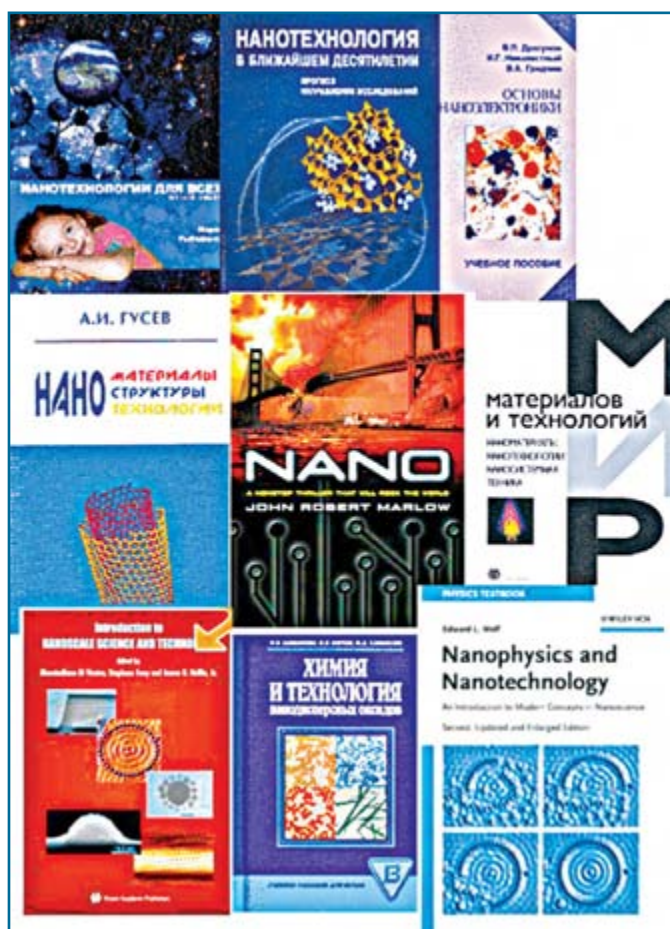


## Что читать про нанотехнологии (To Study Nanotechnology: Books)

«Felix, qui potuit rerum cognoscere causas».

«Счастлив тот, кто мог познать причины вещей».

Вергилий



К настоящему моменту вышло уже много книг о нанотехнологии, как иностранных, так и отечественных авторов. Они отличаются и по стилю, и по содержанию, адресованы как специалистам, так и широкому кругу читателей. Перечисленные ниже монографии охватывают широкий круг свойств и методов получения наноматериалов и могут быть рекомендованы в качестве учебной и учебно-научной литературы: И.П. Суздалев «Физико-химия нанокластеров,

наноструктур и наноматериалов» (М.: КомКнига, 2006), М.К. Роко «Нанотехнология в ближайшем десятилетии» (М.: Мир, 2002), А.И. Гусев «Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии» (М.: Физматлит, 2005), П.П. Мальцев «Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника» (М.: Техносфера, 2006), Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля «Наноструктурированные материалы» (М.: Академия, 2005), В.П. Драгунов «Основы нанoeлектроники» (НГТУ, 2006). Следует упомянуть ряд книг, выпущенных издательством «Техносфера», Москва (перевод с англ.): Ч. Пул, Ф. Оуэнс «Нанотехнологии» (2004), Ю. Альтман «Военные нанотехнологии» (2006) (с последними новинками издательства можно ознакомиться на сайте [www.technosphaera.ru/materia.html](http://www.technosphaera.ru/materia.html)).

Обычно авторы этих книг обобщают опыт и знания своих научных групп, сопоставляют его с достижениями других научных коллективов, пытаются выдвигать обобщающие идеи, гипотезы и теории. Материал излагается максимально широко, в доступной, но строгой форме. Все эти труды имеют общее понимание того, что без проникновения в тайны наноуровня структуры вещества уже невозможно создавать принципиально новые материалы с передовыми функциональными и конструкционными свойствами. Только глубокое понимание внутренних процессов на наноуровне позволит сделать революционный рывок вперед в данном направлении. В то же время надо отметить, что такого рода книги пишутся специалистами для тех, кто уже имеет базовые знания в нанотехнологии.

Книг самого начального уровня пока что относительно немного. Можно выделить две из них – это полноценное издание с цветными иллюстрациями молодого автора Марии Рыбалкиной «Нанотехнология для всех» (Эдиториал УРСС, 2005). Из англоязычной литературы по доступности и ясности изложения основ нанотехнологии для самого неподготовленного читателя безусловный лидер – это книга R. Booker, E. Boysen «Nanotechnology for dummies» («Нанотехнология для “чайников”») (2005, Wiley, John & Sons, Incorporated) (сайт книги: [www.nanotechnologyfordummies.com](http://www.nanotechnologyfordummies.com)). На данный момент существует острая проблема в создании как учебника для студентов младших курсов технических и классических университетов, так и университетского курса по нанотехнологиям. В последнее время, к сожалению, модное слово «нано» входит в название книг и предметных курсов, непосредственно не имеющих к ним прямого отношения.

Огромный сегодняшний интерес ученых к нанотематике был предвосхищен великими фантастами А. Азимовым, Р. Бредбери и др. Они затронули глубокие социально-философские

проблемы, которые возникнут тогда, когда человек сможет управлять свойствами материи по своему усмотрению, когда человек будет творцом, а продвижение в нанотехнологии позволит вплотную приблизиться к этому. Из отечественных авторов подобные проблемы поднимались в научно-фантастической повести А. Лазаревича «Сеть НаноТех», которая вышла в 1997 году.

Не вызывает сомнения тот факт, что ученые, которые работают в стремительно меняющейся области нанотехнологий, должны быть знакомы с новейшими достижениями в этой области. Необходим быстрый обмен информацией между научными группами, это должно делаться без отрыва от «научного поиска». Современные средства связи, интернет прежде всего, это позволяют. Существует несколько десятков русскоязычных общенаучных новостных сайтов, на которых можно ознакомиться с последними новостями развития нанотехнологий. Большинство научных рецензируемых журналов (см. *Журналы по нанотематике*) по нанотематике в дополнение к бумажным имеет он-лайн версии.

### *Л и т е р а т у р а :*

1. Сайты научной тематики (последние новости, популярные публикации, обсуждения): <http://www.nanorf.ru>; <http://www.nanometer.ru>; <http://www.nanonewsnet.ru>
2. Познавательные он-лайн флеш игры по нанотематике: <http://www.degussa.com>
3. Сайт американского правительства, посвященный нанотехнологиям: <http://www.nano.gov>
4. Словарь нано-терминов: <http://www.nanotechnology.bessmertie.ru/nano-termin.shtml>
5. Поиск нанотерминов в научных новостях и публикациях <http://www.azonano.com>
6. Электронные ресурсы Московского Университета:  
<http://www.chem.msu.ru/rus/elibrary/> электронная библиотека по химии.  
<http://www.fnm.msu.ru/main.php?topic=10> электронная библиотека Факультета наук о материалах.
7. Научно-фантастическая повесть о социальных последствиях нанотехнологий:  
<http://www.lib.ru/LAZAREWICH/nanoteh.txt> (А. Лазаревич. «Сеть Нанотех»);  
[http://www.webcenter.ru/~lazarevicha/k2f/ntn\\_novel.htm](http://www.webcenter.ru/~lazarevicha/k2f/ntn_novel.htm) (технические и философские идеи, которые легли в основу повести «Сеть Нанотех»)

## ШРЕДИНГЕРА УРАВНЕНИЕ (Schroedinger Equation)

*«Я смело могу сказать, что квантовую механику никто не понимает».*

*Р. Фейнман*

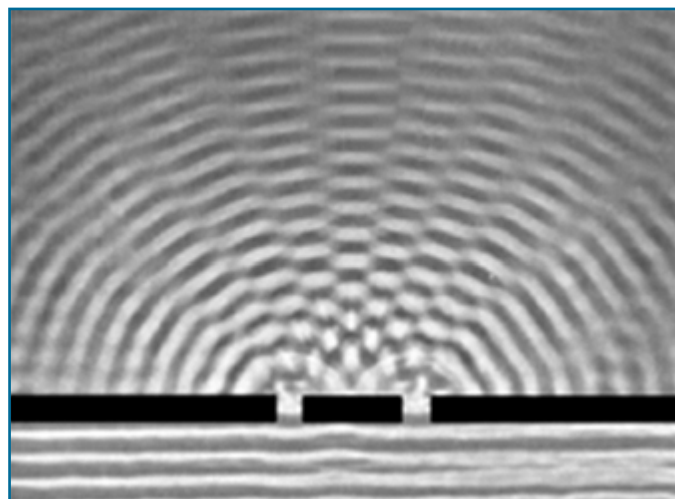


В нашем мире мы привыкли, что какая-нибудь вещь – ну, например, шар для боулинга – либо существует, либо нет. Если шар есть, то мы можем точно сказать, где он находится. Более того, возможно измерить его скорость и направление движения. Играя в боулинг, мы понимаем, что если отправить шар в правильном направлении и с подходящей скоростью, то он точно прокатится по дорожке и собьет все кегли.

А вот если бы «нанолюди» решили сыграть в боулинг электронами, протонами или другими элементарными частицами, то у них бы ничего не получилось. Дело в том, что эти частицы не подчиняются классическим представлениям физики – нельзя однозначно определить их местонахождение в данный момент времени. Дело в том, что в мире квантовых частиц можно говорить только о вероятности нахождения частицы в определенном месте пространства. Как же тогда описывать поведение таких частиц?

По мере накопления экспериментальных данных в начале XX века стало очевидно, что для описания ряда физических явлений необходимо допустить двойственную природу материальных объектов, т.е. корпускулярно-волновой дуализм. В 1923 году французский физик Луи де Бройль выдвинул гипотезу, что электрон, наряду с корпускулярными свойствами (свойствами обычной частицы), проявляет также и волновые свойства. В 1927 году были проведены первые эксперименты по дифракции электронов, в которых поток электронов направлялся на экран с маленькими отверстиями. И что вы думаете? За экраном исследователи с помощью детекторов электронов наблюдали картину, подобную той, что можно видеть своими глазами на воде (рис. 1).

Это полностью подтвердило предположение де Бройля о волновой природе электрона. Позднее дифракция была обнаружена и для пучков



**Рис. 1.** Прохождение волн на воде через стенку с отверстиями



атомов, молекул, протонов и нейтронов, и это позволило с уверенностью заключить, что волновые свойства присущи всем объектам микромира. Итак, согласно де Бройлю волновые свойства электрона можно описать некой функцией, которая удовлетворяет простому волновому уравнению. В 1926 году Эрвин Шрёдингер предложил уравнение, описывающее такую волну. Электрону он сопоставил гипотетическую волновую функцию  $\Psi$  (читается «пси»).

Вид уравнения Шрёдингера очень простой:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi.$$

Здесь  $\Psi$  – волновая функция, символ  $\hat{H}$  обозначает оператор Гамильтона, который подразумевает совершение целого ряда сложных математических операций дифференциального исчисления над волновой функцией, а  $E$  – это так называемые собственные значения, которые определяют энергию частицы. Несмотря на такой простой вид уравнения, понять его смысл совсем не просто. Еще сложнее понять, что же значит эта самая  $\Psi$ . Немецкий физик Эрик Хюкель даже написал эпиграмму:

*Erwin kann mit seinem Psi  
kalkulieren wie noch nie.  
Doch wird jeder gleich einsehn:  
Psi lässt sich nicht recht verstehn*

*Эрвин с Пси хоть среди ночи  
Может рассчитать, что хочешь!  
Но поди-ка раскуси,  
Состоит в чем смысл Пси!*

Физический смысл волнового уравнения Шрёдингера действительно не очевиден. Наиболее распространенной на данный момент является так называемая «копенгагенская интерпретация» квантовой механики, авторами которой были Н. Бор, В. Гейзенберг, М. Борн. Согласно их подходу, физический смысл имеет квадрат амплитуды волновой функции, которую можно найти из уравнения Шрёдингера. Квадрат амплитуды про-

порционален вероятности нахождения частицы в данном месте в данное время.

В квантовой механике уравнение Шрёдингера играет такую же фундаментальную роль, как уравнение движения Ньютона в классической механике. Уравнение Шрёдингера позволяет объяснить и предсказать большое число явлений атомной физики, а также вычислить основные характеристики атомных систем, наблюдаемые на опыте, например уровни энергии атомов, изменение спектров атомов под влиянием электрического и магнитного полей, формы атомных орбиталей. С помощью этого уравнения удалось также понять и количественно описать широкий круг явлений ядерной физики, например закономерности  $\alpha$ -распада,  $\gamma$ -излучение ядер, рассеяние нейтронов на ядрах.

Для наносистем уравнение Шрёдингера позволяет описать ряд новых свойств, отличных от макросостояния вещества. Возьмем, к примеру, **квантовые точки**. Если решить уравнение Шрёдингера для электрона и дырки (**экситона**) в потенциальной яме – «квантовой точке», задав граничные условия, можно получить атомоподобный спектр поглощения и люминесценции **нанокристалла**. Структура спектра, к тому же, будет зависеть от размеров объекта: будет проявляться так называемый **квантоворазмерный эффект**. Здесь надо отметить одно важное обстоятельство. Если уравнение Шрёдингера применяется к электрону в твердом теле, то рассматривается не свободный электрон, а некая квазичастица, возникающая как результат обобществления свойств многих атомов. На языке физики твердого тела электрон становится «легче» – имеет меньшую эффективную массу. Это приводит к проявлению квантовых свойств у объектов, линейные размеры которых вообще-то гораздо больше, чем у единичного атома. Это справедливо для многих систем, в том числе полупроводниковых наночастиц и сверхрешеток.

#### Литература:

1. Шрёдингер Э. Новые пути в физике. Статьи и речи. М., 1971.
2. Грин Б. Элегантная вселенная. Едиториал УРСС. М., 2004.
3. Трейман С. Этот странный квантовый мир. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002

# ЩЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ (ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА) *Band gap (Band theory of solids)*

*«Открывайте все двери, всюду ходите, но входить в эту маленькую дверь в комнату я Вам запрещаю, и запрещаю так строго, что, если Вам случится открыть туда дверь, Вы можете всего ждать от моего гнева».*

*Шарль Перро. «Синяя борода»*



Вид Колизея изнутри. Туристические группы похожи на атомы с экскурсоводом-ядром в центре, а отдельно гуляющие люди – на свободные электроны в твердом теле

Давайте задумаемся о том, как устроены твердые тела. Например, что представляет собой кусок металла? Конечно, Вы знаете, что он образован из упорядоченных в пространстве атомов этого металла, которые в целом нейтральны и состоят из положительно заряженных атомных ядер и отрицательно заряженных электронов. В изолированных друг от друга атомах электроны занимают вокруг ядра строго определенные энергетические уровни, между которыми они перемещаются, поглощая или излучая энергию и обуславливая тем самым дискретный энергетический спектр атома. А что произойдет со спектром, если атомы сблизить и образовать из них некоторую структуру – будут ли электроны помнить, к какому ядру они раньше относились?

Представьте себе, что Вы экскурсовод и во время экскурсии оказались с большой группой туристов на людной и шумной площади перед

очень популярным памятником архитектуры. Вы находитесь среди огромного числа других экскурсионных групп и спешащих куда-то прохожих – в общем, среди большой толпы народа. Чем дальше от Вас стоят туристы Вашей группы, тем сложнее Вам следить за тем, чтобы они не отставали, и тем больше вероятность того, что это все-таки произойдет. Если кто-то из них упустит Вас из виду, увлекшись фотографированием очередного памятника, то потом, перепутав, может примкнуть к другой экскурсионной группе, а обнаружив ошибку, будет блуждать от одной группы к другой. Вот так происходит и с электронами в твердом теле – чем дальше в атоме электрон располагается от ядра, тем слабее он с ним связан электростатическими взаимодействиями. Поэтому при образовании упорядоченной структуры твердого тела часть наиболее удаленных от ядра электронов может при определенных условиях обобществляться. В металлах это происходит уже в невозбужденном состоянии электронов, в результате чего металлическую решетку часто рассматривают как положительно заряженный остов, в узлах которого находятся окруженные внутренними электронами ядра (это скопившиеся на площади туристические группы из рассмотренного выше примера), а междоузлия заполнены свободным электронным газом (блуждающие потерявшие туристов).

В общем случае твердое тело представляет собой ансамбль отдельных атомов, химическая связь между которыми объединяет их в кристаллическую решетку. Если твердое тело состоит из  $N$  одинаковых атомов, то на одно и то же «энергетическое место» претендует сразу  $N$  энергетических уровней (по одному от каждого атома) –



**Рис. 1.** Модель зонной структуры твердого тела

такая ситуация получила название N-кратного вырождения. Избавиться от подобной «толчеи» помогает электрическое поле ядер или остовов атомов, снимающее это вырождение. Дискретные моноэнергетические уровни атомов, составляющие твердое тело, расщепляются в энергетические зоны — некоторые интервалы энергии, которым соответствуют разрешенные электронные состояния (рис. 1). Разрешенные энергетические зоны разделяются запрещенными зонами (энергетическими щелями), т.е. областями энергий, где нет разрешенных состояний электронов. Наиболее важна запрещенная зона, отделяющая валентную зону (высшая заполненная электронами зона) от зоны проводимости (низшая незаполненная зона), т.к. ее ширина ( $E_g$ ) определяет электрические и оптические свойства материалов. Вещества с  $E_g > 3$  эВ принято относить к диэлектрикам, с  $E_g < 3$  эВ к полупроводникам. Если же валентная зона и зона проводимости перекрываются, то свободные электроны даже в невозбужденном состоянии могут находиться в зоне проводимости. Такая ситуация реализуется в металлах, имеющих высокую электропроводность. В случае непроводников, находящихся в невозбужденном стационарном состоянии (при  $T = 0$  К), все электроны строго локализованы вокруг определенных ядер, поэтому зона проводи-

мости остается пустой. Однако если валентные электроны получают избыток энергии (например, при облучении вещества светом), они могут «перепрыгнуть» через запрещенную зону и оказаться в зоне проводимости, став свободными, но оставив за собой в валентной зоне вакантное место — дырку — с положительным элементарным зарядом.

Тем не менее, часто возникает ситуация, когда электрон поглотил квант света, но его энергии оказалось недостаточно, чтобы перейти в зону проводимости. Если же в полупроводнике или диэлектрике есть какое-то количество атомов примеси, они обеспечивают дополнительные уровни энергии (рис. 1), за которые электрон может зацепиться и остаться в запрещенной зоне, причем положение этих уровней определяется природой примеси: электрон-донорные примеси создают дополнительные уровни под «дном» зоны проводимости, а электрон-акцепторные — над «потолком» валентной зоны. Кроме того, в полупроводниках может реализоваться состояние, связанное с образованием электрондырочной пары (**экситона**). В объемном веществе экситонные состояния оказываются менее устойчивыми, чем в нанокристаллах полупроводников, где они во многом определяют оптические свойства материала.

Электронная структура нанокристаллических материалов представляет собой промежуточное состояние между зонной структурой твердого тела и энергетическими уровнями отдельного атома (см. **Квантово-размерный эффект**). При уменьшении размера частицы происходит смещение и квантование энергетических зон ввиду пространственного ограничения электронной плотности поверхностью частицы, что приводит к значительному изменению оптических характеристик материала, а оптическими свойствами оказывается возможно управлять, просто изменяя размер частицы. Наличие же фиксированной энергетической щели предопределяет оптические, электрические и, в ряде случаев, магнитные свойства наноматериалов.

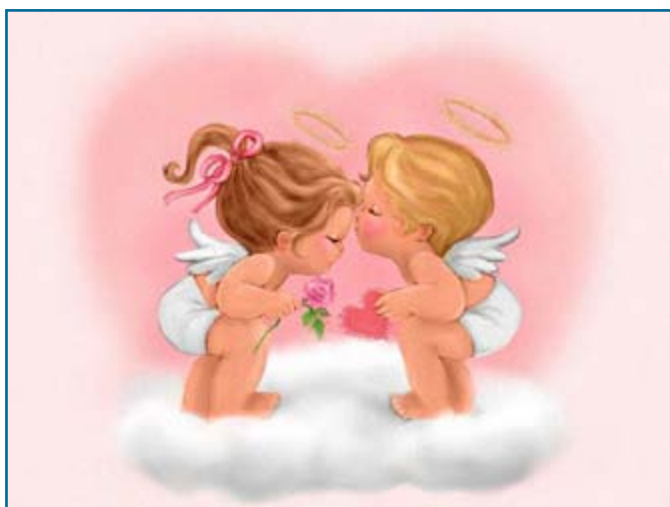
#### Литература:

1. Вест А. Химия твердого тела: Теория и приложения. М.: Мир, 1988. Т. 2. С. 61–68.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука. С. 88–124.



## ЭКСИТОН (Exciton)

*«Мы с Тamarой ходим парой».*  
*Агния Барто*



Представьте себе влюбленную пару. Они всюду ходят вместе и практически никогда не разлучаются. Судьба даже может развести их на большое расстояние, но они все равно помнят друг о друге и когда-нибудь обязательно встретятся. Радость от встречи после долгой разлуки только сильнее – пара будет светиться от счастья, излучая радость и веселье (или энергию на обычном физическом языке). Однако если кому-то из них придется навсегда оставить свою половинку и уехать в другую страну, со временем они забудут друг о друге и найдут себе новых возлюбленных.

Точно так же происходит и с электронами в полупроводнике. Если электрон поглотил квант света, но его энергии оказалось недостаточно, чтобы преодолеть «энергетическую щель» и перейти в зону проводимости (навсегда уехать от любимого человека), он окажется на некотором промежуточном энергетическом уровне, не ухо-

дя от образовавшейся в валентной зоне дырки и взаимодействуя с ней посредством электростатических сил. Этот электрон, хотя и «потерял» свою пару под воздействием обстоятельств, будет находиться в непосредственной близости от нее, помнить о ней и иметь возможность ее найти. Такое связанное состояние электрон–дырка называется экситоном (от лат. *excito* — возбуждаю). У электрон-дырочной пары есть возможность снова объединиться (аннигилировать), испустив квант света, и вернуться в свое исходное состояние (экситонный переход). При этом соседний атом может поглотить выделяющийся квант энергии, в результате чего возникнет новая экситонная пара, которая затем тоже исчезнет, а электронное возбуждение будет передаваться дальше от атома к атому, мигрируя по кристаллу. Но есть у экситона и другая возможность – поглотив дополнительную энергию, электрон может стать свободным, допрыгнув до зоны проводимости и обеспечив вклад в плотность свободных носителей заряда в данном материале.

Таким образом, экситон в твердом теле можно считать элементарной квазичастицей в тех случаях, когда он выступает как целое образование, не подвергаясь воздействиям, способным его разрушить. Энергия связи дырки и электрона определяет радиус экситона, который является характеристической величиной для каждого вещества. Как показывает практика, в полупроводниках энергия связи экситона мала (не превышает 10 мэВ), а наибольшим боровским радиусом экситона обладают полупроводники типа  $A^{IV}B^{VI}$ .

Например, для сульфида и селенида свинца эта величина составляет 2 и 4,6 нм соответственно, а для сульфида кадмия – не превышает 0,6 нм.

С образованием и уничтожением экситонов связывают особенности оптических спектров *наноструктур*, в которых резкие линейчатые компоненты, нехарактерные для макроскопических тел, наблюдаются вплоть до комнатных температур. Наиболее интересная ситуация возникает в *наноматериалах*, когда размер *нанокристалла* становится меньше радиуса свободного экситона

(боровского радиуса) – электрон-дырочная пара оказывается как бы зажатая в потенциальной яме. В этом случае говорят о *квантово-размерном эффекте*, а энергетический спектр такой частицы рассчитывают с использованием *уравнения Шрёдингера*. Оказывается, что величина энергии связи экситона зависит от размера частицы, поэтому, получая монодисперсные *наночастицы* различных размеров, можно управлять энергиями экситонных переходов в широком диапазоне оптического спектра.

#### Литература:

1. Белявский В.И. Экситоны в низкоразмерных системах // СОЖ. 1997. № 5. С. 93–99.
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000.

## ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

### (Electron Microscopy)

*«...Коль много микроскоп нам тайностей  
открыл,*

*Невидимых частиц и тонких в теле жил!..»*

*М.В. Ломоносов*

*«Письмо о пользе стекла»*



Сотрудники ФНМ МГУ за электронным микроскопом

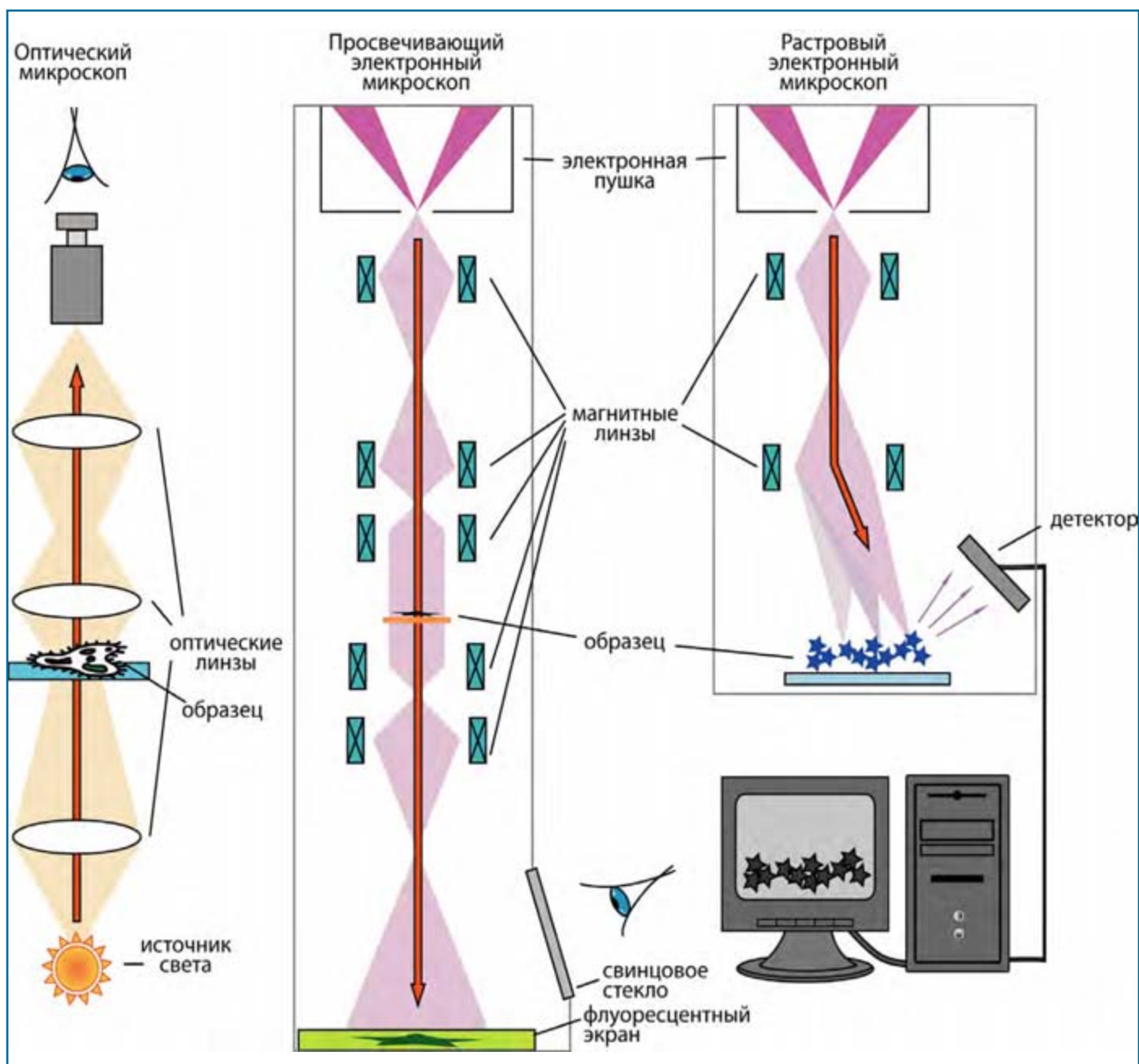
Каждый из нас в обычной жизни не раз сталкивался с линзами – отполированными округлыми дисками прозрачного материала, позволяющими получать увеличенное или уменьшенное изображение. Если взять несколько увеличивающих линз и правильно подобрать расстояние между ними, то можно получить устройство, которое позволяет разглядеть далекие объекты (например, бинокль, подзорная труба, телескоп) или изучать строение очень маленьких объектов, таких, как живые клетки (микроскоп). Вы спросите: а можно ли, взяв очень много оптических линз самого лучшего качества, создать микроскоп, с помощью которого можно было бы разглядеть совсем маленькие частицы – атомы, из которых состоят все вещества и живые организмы? Оказывается, нет, нельзя. Это связано с существованием так называемого дифракционного предела, не позволяющего разглядеть отдельно

друг от друга два объекта, если они находятся на расстоянии ближе, чем  $d = 0,61\lambda/n$  ( $\lambda$  – длина волны излучения,  $n$  – показатель преломления среды). Как известно, длина видимого света, который может воспринимать глаз человека, составляет 400–700 нм. Обычно размер клеток варьируется от нескольких сотен до нескольких тысяч нанометров, поэтому их можно разглядеть в оптический микроскоп. А вот атомы и молекулы, размер которых, как правило, меньше 1 нм, в оптический микроскоп разглядеть невозможно.

Чтобы преодолеть эту трудность, необходимо использовать излучение с меньшей длиной волны. Выход был найден в 30-х годах прошлого века, когда немецкие ученые Эрнст Кнолл и Макс Руска создали микроскоп, в котором вместо света использовали поток электронов. В основе электронного микроскопа лежит утверждение Луи де Бройля о дуализме элементарных частиц, согласно которому движущийся электрон одновременно является и частицей, и электромагнитной волной.

Устройство оптического и электронного микроскопов имеет много общего (рис. 1). Прежде всего в микроскопе любого типа необходима система фокусировки, которая позволяет исследователю сфокусировать поток излучения на образце. В случае оптического микроскопа свет фокусируется путем изменения расстояния между стеклянными линзами. В электронном микроскопе электроны сначала ускоряются в электрическом поле между катодом и анодом, имеющим форму кольца. Длина волны ускоренных таким образом электронов может составлять несколько сотых долей ангстрема (т.е. быть порядка  $10^{-12}$  м).





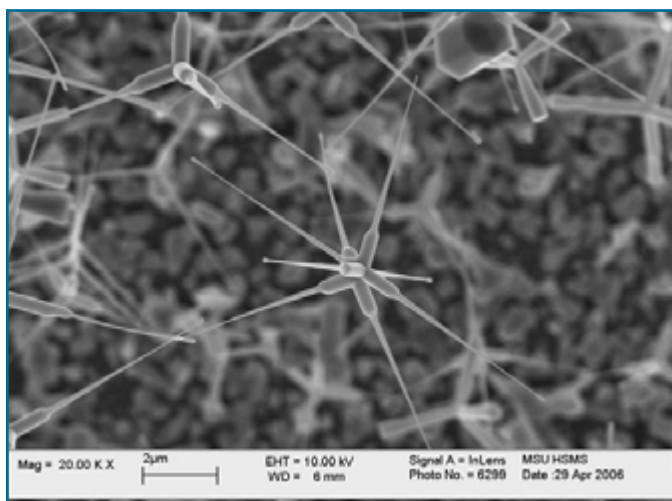
**Рис. 1.** Примеры геометрических фракталов: а — кривая Коха, б — кривая Леви, в — кривая Минковского, г — треугольник Серпинского, д — губка Менгера, е — дерево Пифагора

Затем электроны попадают в колонну микроскопа, где движутся в магнитном поле, создаваемом катушками индуктивности. Изменяя силу тока в катушках, можно управлять магнитными полями, а значит, изменять траектории электронов и очень точно фокусировать их поток. Таким образом, катушки выступают в роли своеобразных магнитных линз. Для того, чтобы избежать рассеяния электронов на молекулах газа, внутри электронного микроскопа поддерживается высокий вакуум. Благодаря малой длине волны электронов, а также постоянно совершенствую-

щимся системам магнитных линз, современные электронные микроскопы обладают субнанометровым (меньше  $10^{-9}$  м) и даже субангстремным (меньше  $10^{-10}$  м) разрешением. В электронной микроскопии выделяют два основных метода исследования.

Растровая электронная микроскопия — метод анализа поверхности образцов при сканировании выделенного участка сфокусированным потоком ускоренных электронов. В результате взаимодействия пучка с образцом, электроны попадают на детектор и изображение считывается

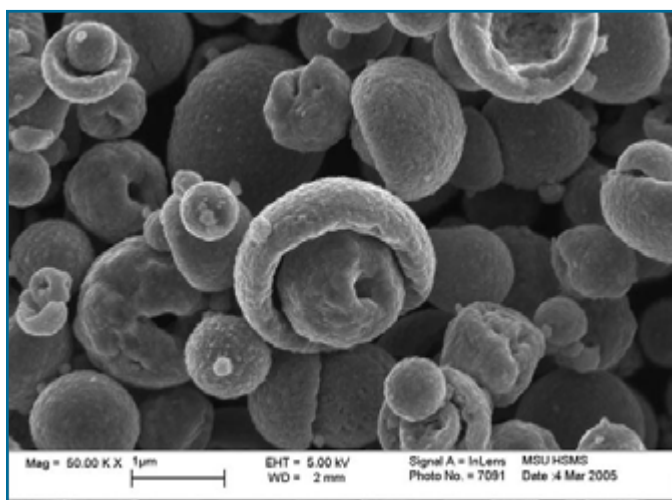
Примеры микрофотографий структур различных неорганических соединений, синтезированных студентами и аспирантами ФНМ. Фотографии получены на сканирующем электронном микроскопе Leo Supra VP 50 сотрудниками лаборатории неорганического материаловедения химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.



«Снежинки» — тетраподы ZnO, выросшие в газовой фазе над Si подложкой (Ляпина О.)



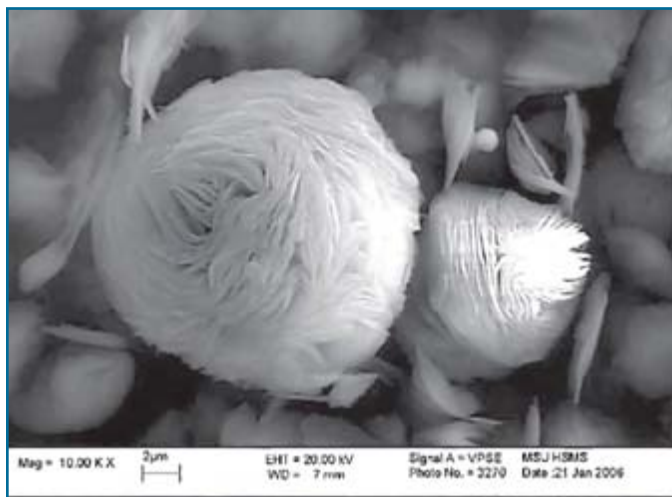
«Чужие» — аморфный кремний, осажденный на подложку методом PVD (Синицкий А.)



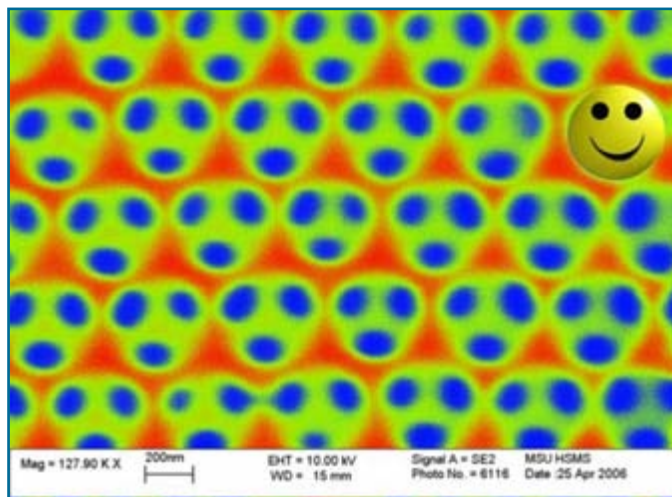
«Аэрозольные грибочки» — продукт пиролиза УЗ-аэрозоля ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) (Чеканова А.)



«Искусственный разум» — агломерат частиц порошка  $\text{Al}(\text{OH})_3$  — гиббсита (Кузнецов А.)



«Розы» — структуры гидроксида магния (сольво-термальный синтез) (Гаврилов А.)



«Смайлик» — упорядоченная магнитная структура никеля (Напольский К.)

с поверхности образца «строка за строкой», а затем выводится на монитор компьютера. Этим методом можно получить информацию не только о рельефе поверхности и размере частиц, но и о химическом составе образца и кристаллических фазах, находящихся на поверхности. Современные растровые микроскопы позволяют получать изображения поверхности образца с разрешением до 1 нм.

Просвечивающая электронная микроскопия – метод анализа внутренней микроструктуры и размера ультратонких – прозрачных для ускоренных электронов – образцов (тоньше 100 нм), который осуществляется облучением исследуемой области потоком ускоренных электронов. Изображение, полученное таким образом, является как бы «тенью» образца, увеличенная копия которой проецируется на флуоресцентный экран или фотопленку. По этому изображению можно судить о форме и размерах частиц, из которых состоит образец. Благодаря тому, что ускоренные электроны взаимодействуют с электронными оболочками атомов изучаемого вещества, с помощью электронного микроскопа получают дифракционную картину от упорядоченной структуры атомов, из которой можно извлечь информацию о кристаллических фазах. Современные электронные микроскопы высокого разрешения, обладающие

очень точной системой фокусировки, позволяют визуализировать картину распределения электронной плотности в образце, то есть практически «увидеть» отдельные атомы!

Следует отметить, что электронная микроскопия как динамично развивающаяся отрасль современной науки и технологии включает в себя не только анализ веществ, материалов и биологических объектов. Значительные усилия ученых направлены на изучение механизмов формирования изображения при взаимодействии образца с электронами, разработку и усовершенствование электронных и других корпускулярных микроскопов (например, протонного) и приставок к ним, методов пробоподготовки, способов сбора и обработки информации, которую можно получить с помощью микроскопа. В 1986 году ученые Эрнст Руска, создавший первый просвечивающий электронный микроскоп, Герд Биннинг и Генрих Рорер, которые сконструировали первый растровый микроскоп, получили Нобелевскую премию по физике. Их вклад в науку трудно переоценить: несмотря на дороговизну приборов (стоимость ультрасовременного микроскопа высокого разрешения достигает 4 млн евро), практически любое современное исследование в области физики, химии, биологии, материаловедения и особенно нанотехнологий нуждается в данных, полученных методом электронной микроскопии.

#### Литература:

1. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения. М.: Мир, 2006. 256 с.
2. Брандон Дж., Каплан У. Микроструктура материалов: Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.

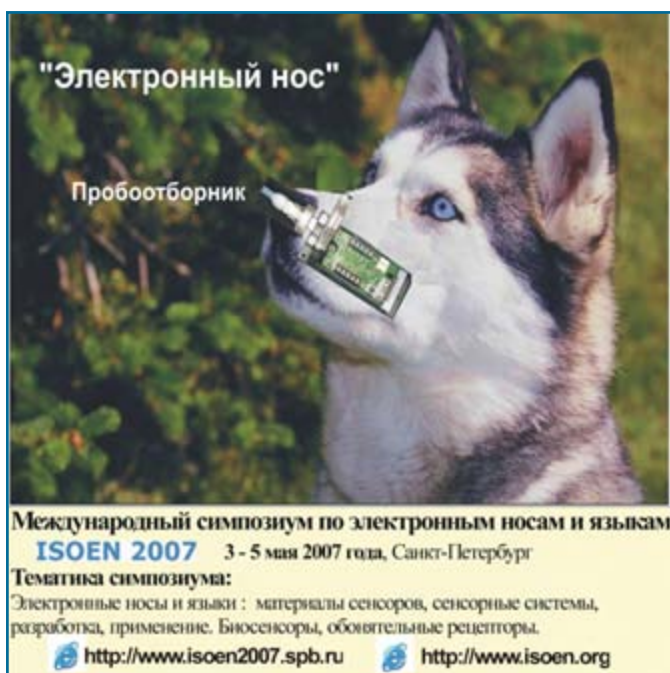


## ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС (E-nose)

*«Помню большой, весь золотой подсохший и поредевший сад, помню кленовые аллеи, тонкий аромат опавшей листвы и — запах антоновских яблок, запах меда и осенней свежести...»*

*И.А. Бунин*

*«Антоновские яблоки»*



Через запахи человек воспринимает окружающий мир, однако всем хорошо известно, что, к примеру, собачий нос гораздо чувствительнее к запахам, чем человеческий. Поэтому в ситуациях, когда требуется идти по следу преступника или искать пострадавшего под развалинами разрушенных землетрясением домов, проверять наличие взрывного устройства или искать спрятанные наркотики, приглашают кинолога с собакой. Однако натренировать собаку – это долгое и дорогостоящее мероприятие. К тому же потребности в определении огромного множества запахов превышают возможности обучения собак. Вероятным решением этой проблемы является разработка учеными так называемого электронного носа – искусственного органа обоняния или

портативной лаборатории, которая позволяет качественно и количественно анализировать газы, предоставляя нужную информацию в считанные минуты.

В разработку электронного носа активно включилось множество научных коллективов во многих странах мира, вследствие чего этот термин стал собирательным понятием: одновременно разрабатывается множество разных концепций и принципов функционирования таких аппаратов. Они могут быть основаны на быстрой газовой хроматографии для разделения сложных по составу газовых смесей и последующем детектировании отдельных компонентов, например мультисенсорными полупроводниковыми матрицами, устройствами на поверхностных акустических волнах; на способе массспектрометрического анализа; на принципе детектирования молекул с использованием углеродных нанотрубок; на получении аналитического отклика за счет оптического эффекта многократного полного внутреннего отражения в плосковолноводной оптической ячейке и проч. Тем не менее, общими для всех вариантов «электронного носа» являются следующие принципы: высокая чувствительность (нижний предел обнаружения составляет десятки пикограмм вещества), быстрота анализа, распознавание огромного множества разных запахов и уникальная миниатюрность (например, тонкая кремниевая пластина – чип с площадью порядка 2 мм<sup>2</sup>, содержащий ряд наносенсоров для распознавания молекул и интегрированный с микропроцессором или компьютером).



**Рис. 1.** Чип-пластина «электронного носа» из 2200 ячеек-анализаторов Sensation, университет Беркли, США (слева). Быстрый газовый хроматограф GC/SAW лабораторного типа (справа)

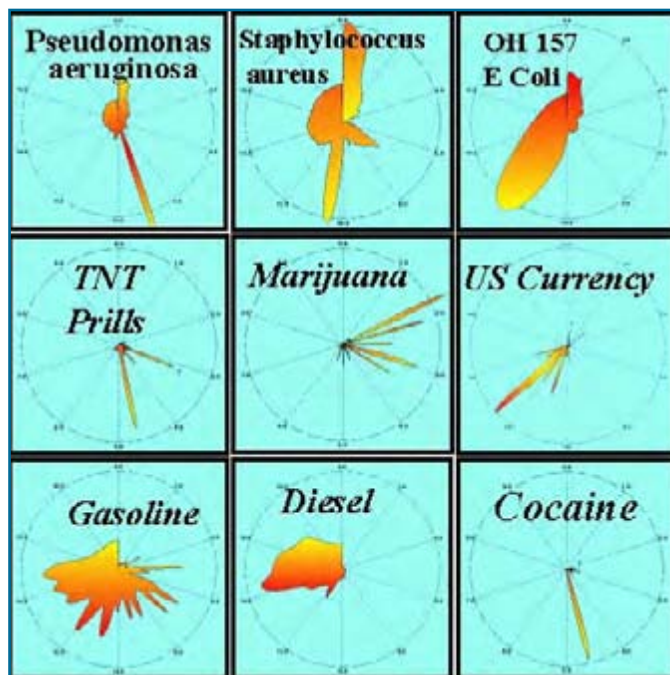
Еще в 1998 году Ральф Меркле и Эрик Дрекслер предложили принцип определения различных молекул с помощью модифицированных *углеродных нанотрубок*, в том числе позволяющих идентифицировать возбудителей заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. В настоящий момент теоретически предсказанные ими наносенсоры выходят на рынок. Для работы чипа Sensation (рис. 1) требуется только одна обычная пальчиковая батарейка. Готовое медицинское устройство индикации уровня углекислоты, по оценкам специалистов, будет стоить не более 20 долларов.

После первых успехов сразу открылось множество потенциальных областей применения газовых наносенсоров – в первую очередь в области медицины и контроля безопасности. Вполне вероятно, что уже в недалеком будущем врачи смогут определять болезнь по запаху. Например, анализируя запахи, содержащиеся в выдыхаемом человеком воздухе, можно будет диагностировать рак легких, туберкулез, диабет или цирроз печени. При этом поставить диагноз будет возможно даже на самых ранних стадиях болезни. И хотя пока еще о внедрении данной разработки в медицинскую практику речи не идет, учитывая нынешние темпы развития высоких технологий, можно предположить, что очень скоро она сможет найти своё реальное применение.

Электронный нос, несомненно, пригодится для определения свежести продуктов питания, качества молока на молочных фермах, в производствах пива, вина и сыра, в системах экологического контроля для выявления степени загрязненности воздуха. Устройство можно будет использовать в качестве сенсора, включенного в систему противопожарной безопасности, или для предсказания землетрясений. Были разработаны и прошли длительные испытания в аэропортах новые системы досмотра пассажиров – газоанализаторы, способные находить по запаху спрятанные взрывчатку и наркотики. Электронный нос может уловить слабый запах нитроглицерина, тринитротолуола и других взрывчатых веществ на руках или одежде человеке, а также выделить его из множества других запахов. Наркотические вещества, такие как метамфетамин, кокаин, героин, марихуана, экстази и т.д., даже будучи тщательно упакованными в плотные целлофановые пакеты, могут быть обнаружены и идентифицированы. Подобные аппараты сейчас внедряются во всех крупных аэропортах США и Японии, а также в московских аэропортах Шереметьево и Домодедово.

Электронный нос работает как универсальный детектор, способный количественно определять любые типы запахов. Как это достигается? Был предложен изящный подход – применение сенсорных матриц, т.е. одновременное исполь-

зование нескольких разнородных сенсоров, не обладающих селективным откликом, но проявляющих разные функции отклика на одно и то же воздействие. Последовательный опрос показаний каждого из них дает в результате гистограмму величин откликов детекторов. Новые возможности по улучшению распознавания отдельных компонентов открываются в результате применения скоростной газовой хроматографии. При этом время удерживания изображается в виде круговой диаграммы сигнала детектора и дает графический образ, специфический для каждого вещества. Иными словами, прибор превращает запах в картинку, которую нужно распознать, и для этого применяются компьютерные алгоритмы распознавания графических образов под названием «VaporPrint™», позволяющие определять количество анализируемого вещества (рис. 2).



**Рис. 2.** Визуальные образы VaporPrint™ для болезнетворных микроорганизмов, взрывчатых веществ, наркотиков и горючих жидкостей

#### Л и т е р а т у р а :

1. Casalnuovo I.A., Di Pierro D., Bruno E., Di Francesco P., Coletta M. Letters in Applied Microbiology. 2005 42 (2006). P. 24–29.
2. [http://zhdanov.ru/classified-catalogue/e-companies/electronic\\_sensor\\_technology/est\\_e-nose\\_rus.htm](http://zhdanov.ru/classified-catalogue/e-companies/electronic_sensor_technology/est_e-nose_rus.htm)
3. <http://www.znose.com>



## ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК (E-tongue)

*«Нет, это не рыба! Не заливная рыба!.. Хрена к ней не хватает».*

*«Ирония судьбы, или С легким паром!»*



Дегустация вин — очень «тонкий» процесс, требующий обостренного обоняния и восприятия вкуса (рисунок из коллекции MicroSoft)

Вы были когда-нибудь на дегустации различных сортов вин, кофе или чая? Десятки бокалов и чашек, наполненных очень похожими друг на друга напитками — сможете ли Вы отличить, скажем, вина из винограда одного и того же сорта, выращенного в разных винодельческих районах, или, например, Шардоне урожая 85 и 87 годов, или выделить вкусовые составляющие букета редкого сорта вина? Скорее всего, нет, если только Вы не являетесь профессиональным дегуста-

тором. Недаром дегустатор — достаточно редкая и уважаемая профессия, не так уж много людей обладает сверхчувствительным обонянием и восприятием вкуса.

До некоторого момента только аналитическая химия могла составить конкуренцию дегустаторам, позволяя точно определять, что и в каком количестве содержится в той или иной жидкости. Но вот парадокс: если Вы возьмете две бутылки минеральной воды, основной химический состав которых, по мнению аналитиков, одинаков, то они могут оказаться разными на вкус. В чем же дело? А дело в нюансах, тончайших оттенках, из которых складывается такая интегральная характеристика напитка, как вкус. Увы, эти тонкости пока недоступны аналитикам, и только язык дегустатора может их почувствовать.

Тем не менее, в ближайшие годы многие дегустаторы могут остаться без работы, поскольку не так давно ученым из Санкт-Петербургского университета Юрию Власову и Андрею Легину совместно с итальянскими коллегами из Римского университета «Tor Vergata» удалось создать им электронного конкурента, так называемый электронный язык — прибор, способный распознавать и различать по вкусу пищевые продукты сложного состава.

Электронный язык состоит из четырех различных химических сенсоров, реагирующих на тот или иной вкус. Технически это реализовано с помощью специального микрочипа с миллионами мельчайших каналов, предназначенных для отбора молекул строго определенного размера. В этом чипе молекулы хроматографически разделяются на «сладкие», «кислые», «горькие» и «соленые» и подаются на соответствующие на-

**носенсоры**, которые изменяют свое электрическое сопротивление в зависимости от количества подошедших молекул. Комбинация сигналов наносенсоров составляет электронный «отпечаток» вкуса, который для удобства классификации представляет собой область точек на графике. Присутствие сладкой компоненты смещает точку к верхней левой области диаграммы, кислой – к верхней правой, горькой и соленой – вниз графика. Такую диаграмму можно записать на жесткий диск компьютера и сравнивать с другими при последующих анализах.

Возможности распознавания вкуса с помощью электронного языка ученые показали на примере минеральной воды, соков, кофе и растительного масла. Электронный дегустатор успешно различил около 30 видов различных грузинских и итальянских минеральных вод, более 30 типов соков и 15 сортов кофе коммерческих марок, отличил идентичные по химическому составу природную минеральную воду от ее подделки. Удалось решить и более сложную задачу – распознать три разных сорта растительного масла; на очереди твердые пищевые продукты – фрукты, мясо, рыба.

Результаты анализа, выполненного с помощью электронного языка, сравнили с органолеп-

тическими оценками, сделанными дегустаторами. «Настоящие» и «электронные» дегустаторы пробовали разные сорта кофе, виноградных вин и пепси-колу. Во всех случаях мнения живых и электронных дегустаторов совпали. Но у электронного дегустатора есть одно преимущество – его невозможно подкупить, он не подвластен субъективному влиянию обстановки, самочувствия, настроения.

Существует проект электронного языка, основанный на ином принципе действия. Британские исследователи из University of Warwick разработали устройство, способное распознавать четыре основных вкуса: кислый, сладкий, соленый и горький. В отличие от других подобных приборов, новый язык не имеет химических мембран и вообще никакого подобия вкусовых рецепторов человека – в нем использованы физические, а не электрические или химические особенности веществ, язык создает звуковые волны, пересекающие поверхность крошечного кристалла, и слушает «ответ» жидкости. При этом жидкости с разными вкусами имеют характерную звуковую «подпись».

Так что же, будет ли искусство дегустаторов востребовано через пару десятков лет – каковы ваши прогнозы?!

#### Л и т е р а т у р а :

1. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. Изд.: Nanotechnology News Network, 2005. 444 с.
2. Нано- и микросистемная техника. 2006. № 3. РАН, Новые технологии.

## ЮНГА МОДУЛЬ

### (Young's Modulus)

*«Модуль упругости любого вещества есть столб этого вещества, способный производить давление на свое основание, которое так относится к весу, вызывающему определенную степень сжатия, как длина вещества к уменьшению этой длины».*

*Томас Юнг, 1807 г.*



*Thomas Young M.D.  
Sec. B.S.*

Модуль Юнга (модуль упругости) – величина, равная отношению растягивающего напряжения к вызванной им относительной упругой деформации (коэффициент сопротивления материала упругой деформации) при осевом растяжении–сжатии материала. Деформацию считают упругой там, где выполняется закон

Гука (1675 г.), т.е. в той области, где деформация линейно зависит от напряжения.

Упругие константы являются важными характеристиками материалов, которые в настоящее время применяют для расчетов механических свойств отдельных деталей и конструкций. Наиболее простой способ определения модуля Юнга изложен в любом школьном учебнике физики: вертикально закрепленную проволоку нагружают образцами с известной массой и строят зависимость относительного растяжения от напряжения, затем производят линейную аппроксимацию зависимости и находят модуль Юнга (рис. 1). С первого взгляда ничего сложного в этом эксперименте нет, но Юнг в публикации 1807 года так сформулировал определение термина модуля упругости, что даже в адмиралтействе не смогли разобраться в его пользе: «Хотя их светлости весьма уважают науку и очень ценят Вашу статью, она слишком учена..., говоря короче, она непонятна». В 1822 году в доступной форме работу Юнга изложил Огюст Коши, он математически обосновал понятие упругости материала в точке, связав его с понятиями напряжения и деформации. Инженерам стало ясно, что, зная модуль упругости материала, можно рассчитать механические свойства не только отдельных частей, но и всей конструкции, не пользуясь странными ухищрениями и спорными приближениями при описании форм деталей.

Для измерения упругих свойств материалов изготавливают специальные детали с участком постоянного сечения и утолщенными концами. Испытательные машины могут сильно различаться размерами и конструкцией, но все они – механические приспособления для приложения нагрузки, которую можно точно измерять. Еще



в начале прошлого века было разработано много методов и конструкций испытательных машин для определения модуля Юнга сжатием, изгибом и регистрацией колебаний закрепленной и свободной продольной балки. Модуль упругости кристаллов определяют также, измеряя скорость прохождения в них звуковых волн (длина таких волн не превышает  $10^{-8}$  м). Для этих измерений используют кристаллы, линейные размеры которых не превышают нескольких десятков миллиметров. Следует отметить, что упругие свойства кристаллов в разных направлениях различны.

Универсальность закона Гука, модуля упругости для материалов и математического описания упругости материала позволяет перенести методики экспериментального определения упругих констант с объемных тел на наноматериалы. Главное – научиться изготавливать испытательные машины необходимого размера. В этом направлении сделано уже немало: в качестве устройства для приложения нагрузки используют *кантилевер атомно-силового микроскопа* или специальные механизмы, а удлинение, частоты колебаний или радиус изгиба нанолент и нанопроволок измеряют с помощью *электронных микроскопов*.

Известно, что механические свойства, в первую очередь прочность, пластичность, «усталостные» свойства материалов определяются наличием различных дефектов, их концентрацией и распределением. Так, теоретическая прочность бездефектного кристалла на разрыв, определяемая как сумма энергий связи атомов или молекул, располагающихся на единичной площади сечения, значительно (на несколько порядков) превосходит экспериментальные значения. При уменьшении размеров реальной системы возможно создание такой ситуации, при которой образование дефекта в отдельно взятой частице будет крайне маловероятным. Кроме того, при малых размерах частиц дефекты могут активно взаимодействовать с поверхностью частицы, например вытесняться из объема наночастицы на ее поверхность. В связи с этим прочность наночастиц

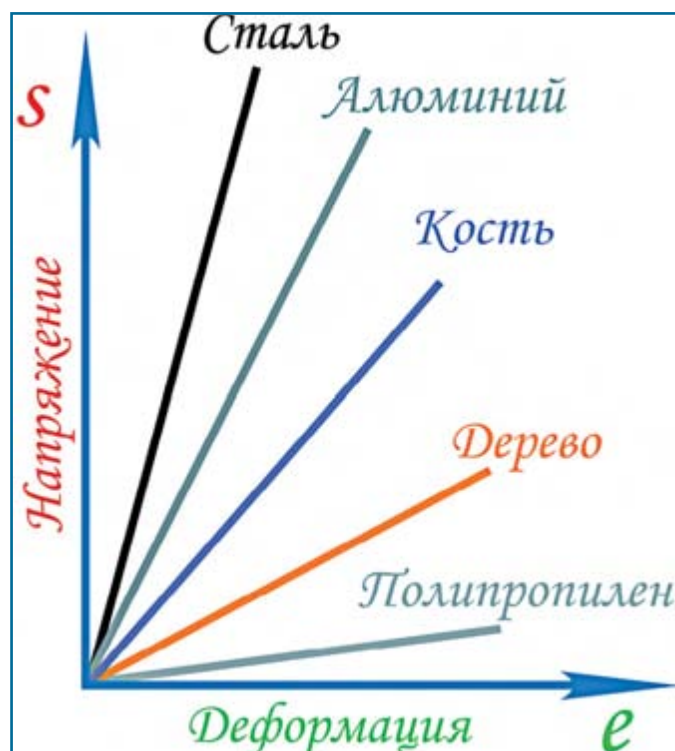


Рис. 1. Линейные части кривых деформирования материалов. Тангенс угла наклона — модуль упругости (модуль Юнга), обычно обозначается символом  $E$

будет существенно выше прочности объемного материала, состоящего из того же вещества.

Экспериментально уже определены модули упругости *одностенных углеродных нанотрубок*, вискоз различных материалов, нанопроволок  $\text{SiO}_2$ , армированных  $\text{SiC}$ . В последнем случае модуль Юнга удалось увеличить с  $\sim 30$  ГПа (аморфный диоксид кремния) до 80 ГПа (композит). Следует отметить, что полученные экспериментальные данные об упругих свойствах *наноматериалов* согласуются с теоретически рассчитанными, исходя из упругих свойств индивидуальной химической связи. Например, теоретически рассчитанный модуль Юнга для одностенных углеродных нанотрубок может изменяться в пределах от 1 до 2,4 ТПа (в зависимости от их диаметра), а многостенной углеродной нанотрубки — около 30 ГПа, что близко к величине модуля Юнга для одного из направлений в кристалле графита.

#### Литература:

1. Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи. М.: Мир, 1980. 206 с.
2. Китель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. С. 149–168.
3. Zhong L. Wang, Rui Ping Gao, Zheng Wei Pan, Zu Rong Dai. Advanced Engineering Materials. 2001. Vol. 3, N 9. P. 657.

## ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС (Nuclear Magnetic Resonance)

*«При нахождении на мосту сбить шаг в строю  
во избежание обрушения конструкции».*

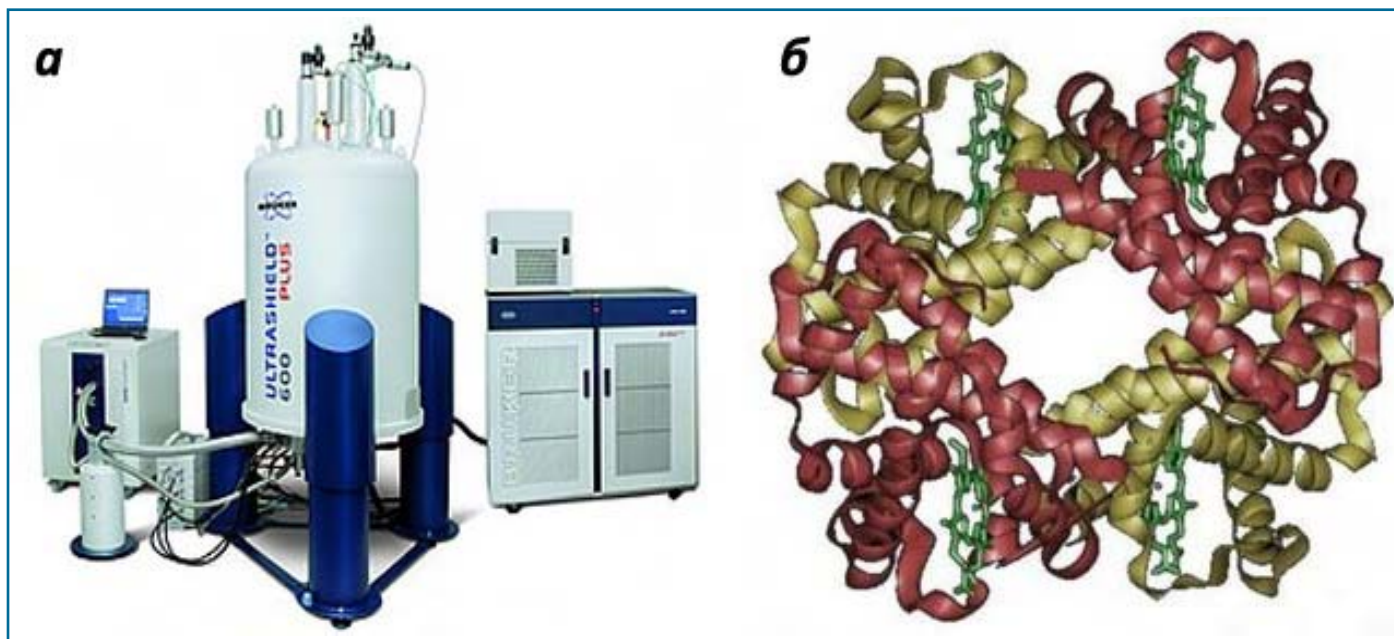
*Военная мудрость*



Представьте, что Вы можете залезть в органическую молекулу, стать ее любым атомом водорода и со своего «водородного» места оглядеть всех своих ближайших соседей, увидеть их расположение и проследить динамику. Именно это позволяет сделать метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) важным инструментом, который часто используют для изучения структуры в дополнение или вместо метода рентгеновской дифракции. В настоящее время выделяют две разновидности ЯМР: жидкостной и твердотельный. Первый крайне важен для определения структур белков, нуклеиновых кислот, олигосахаридов и других молекул органических веществ, которые крайне трудно или вообще невозможно закри-

сталлизовать. Метод твердотельного ЯМР, напротив, эффективен для изучения структуры стекол, аморфных веществ, полимеров и гетерогенных систем, т.е. таких объектов, для которых трудно использовать методы рентгеновской дифракции. Кроме того, методом ЯМР можно изучать взаимодействие молекул в растворе и обменные процессы в твердых телах. В последнее время твердотельный ЯМР стали использовать также для изучения наноструктурированных материалов.

Ядерный магнитный резонанс основывается на квантово-механических магнитных свойствах ядра атома. Методом ЯМР можно получить информацию о локальной структуре твердых тел в объеме и на поверхности. Однако не всегда ядро может сообщить информацию о своем окружении. Спиновое квантовое число как протонов, так и нейтронов равно  $1/2$ , и в зависимости от того, спарены в ядре спины этих частиц или нет, ядро может характеризоваться нулевым или ненулевым результирующим ядерным спиновым числом  $I$ . Если спины всех частиц спарены, результирующего спина у ядра нет и  $I = 0$  (например, ядра  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{32}\text{S}$ ), такие ядра являются «слепыми» и не могут ничего сказать о своем окружении. «Зрячими» же являются ядра, у которых  $I \neq 0$  (например,  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^{51}\text{V}$  и т.д.). При помещении ядер с ненулевым спином в сильное магнитное поле магнитные энергетические уровни ядер расщепляются на две группы в зависимости от того, как ориентированы ядерные спины (параллельно или антипараллельно) по отношению к внешнему магнитному полю. Различие между энергиями параллельно и анти-



**Рис. 1.** ЯМР-спектрометр фирмы Bruker (а) и структура белка гемоглобина (б), определенная методом ЯМР.

параллельно ориентированных состояний спина мало и соответствует области радиочастот в электромагнитном спектре. Таким образом, ЯМР-спектрометр с рабочей частотой 500 МГц может вызывать переходы ядерных спинов. Величина изменения энергии и соответствующая частота поглощения зависят от элемента и его химического окружения. Так, атомы водорода, связанные с различными типами атомов углерода или различными функциональными группами можно отличить друг от друга, т.к. они поглощают энергию различной частоты. Для ориентирования спина ядра используются магнитные поля величиной до нескольких Тесла, а отклонение достигается с помощью возмущения электромагнитными волнами с радиочастотой. Сильные магнитные поля, используемые в методе ЯМР, достигаются с помощью сверхпроводящих магнитов (рис. 1).

ЯМР спектры твердых тел характеризуются широкими пиками, из которых нельзя извлечь структурную информацию. Однако недавно разработанная методика вращения под магическим углом, при которой образец очень быстро враща-

ют под углом  $54,74^\circ$  по отношению к внешнему магнитному полю, позволяет получать спектры с узкими пиками, дающими ценную структурную информацию.

Значимость метода ЯМР была неоднократно по заслугам оценена Нобелевским комитетом. Само физическое явление ядерного магнитного резонанса было описано независимо Феликсом Блохом и Эдвардом Миллсом Перселом в 1946 году, а шестью годами позже авторы этого открытия получили Нобелевскую премию. Следующим лауреатом Нобелевской премии в этой области стал Ричард Эрнст за разработку метода ЯМР с Фурье-преобразованием, что позволило значительно сократить время съемки спектров и открыло новые возможности использования метода. Наконец, в 2002 году Нобелевская премия была вручена Курту Вютриху за исследование трехмерной структуры белка с помощью метода ЯМР.

Для исследования наноматериалов используются ЯМР-спектрометры с рабочей частотой  $\sim 1$  ГГц. Так что если Вам загадают однажды загадку: «Гига для нано. Что это?», смело отвечайте: «Ядерный магнитный резонанс!»

#### Литература:

1. Derome A.E. Modern NMR Techniques for Chemistry Research. Pergamon, 1987.
2. Драго Р. Физические методы в химии. М.: Мир, 1981. С. 332–416.



## СОДЕРЖАНИЕ

Об авторах	2	Критические технологии РФ	106
Обращение ректора		Кто есть кто в нанонауке	108
МГУ им. М.В. Ломоносова	6	Лазерная абляция	111
Предисловие	8	Междисциплинарность	113
главного редактора	8	Мезопористые молекулярные сита	116
Введение	11	Метаматериалы	118
Амфифильные соединения	28	Микроэлектромеханические системы	121
Атомно-силовая микроскопия (АСМ)	30	Мицеллы	125
Биоматериалы	33	Молекулярная электроника	127
Биомиметика	35	Молекулярно-лучевая эпитаксия	129
Бионанотехнологии	38	Наноактюаторы	131
Блок-сополимеры	40	Нанобатареи	134
Вирусы	43	Нанобизнес	137
Военные нанотехнологии	45	Нановесы	139
Гетероструктуры	48	Нановолокна	141
Гибридные наноматериалы	50	Наножидкости	143
Графен	52	Наноиндентер	145
Демон Максвелла	55	Наноиндустрия	147
Дендримеры	58	Нанокapsулы	149
Диссипативные структуры	61	Нанокерамика	151
Единицы измерения	64	Нанокластеры	153
Жидкие кристаллы	66	Наноклей	156
Журналы по нанотехнологиям	70	Нанокольца	158
Закон Мура	72	Нанокomпозиты	160
Закон Холла–Петча. Наномеханика	74	Нанокристаллы	162
Золь-гель технология	76	Нанолeкарства	164
Инвестиции в нанотехнологии	78	Нанолитография	166
Инструменты нанотехнологий	80	Наноматериалы	169
Интернет-сайты о нанотехнологиях	82	Наномашины	171
Интернет-олимпиада		Наномедицина	174
«нанотехнологии – шаг в будущее!»	84	Наномембраны	177
Кантилевер	86	Нанометр	180
Катализ	88	Нанометрология	182
Квантово-размерные эффекты	91	Наномодификаторы	184
Квантовые компьютеры	94	Нанонити/Вискеры	187
Квантовые нити	96	Нанообразование	189
Квантовые точки	98	Нанопинцет	192
Коллоидные частицы	101	Нанополирование	194
Космический лифт	104	Нанопорошки	196

Наноремешки	198	Синхротронное излучение	276
Нанороботы	200	Системы нанопозиционирования	278
Наносенсоры	203	Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ)	280
Наностекло	205	Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)	283
Наностержни	207	Суперпарамагнетизм	285
Наноструктуры	209	Супрамолекулярная химия	287
Наносферная литография	212	Темплатный метод	290
Нанотермометр	214	Теория оборванных связей	292
Нанотехнологии	216	Тонкие пленки	294
Нанотоксичность	218	Транзистор	296
Нанотрибология	220	Туннельный эффект	299
Нанофармакология	221	Углеродные нанотрубки	301
Нанофизика	223	Умные материалы	304
Нанохимия	224	Устройства хранения информации	306
Наночастицы	225	Федеральная целевая программа	310
Наноэлектромеханические системы	227	ФИП Нанолитография	312
Наноэлектроника	230	Фотоника	314
Наноэмульсии	232	Фотонные кристаллы	316
Наноэнергетика	234	Фракталы	318
Неуглеродные нанотрубки	237	Фуллерены	321
Одностенные нанотрубки (ОСНТ)	239	Хиральность	324
Одноэлектронный транзистор	241	Центры превосходства	326
Оптический пинцет	243	Цеолиты	328
Патентование нанотехнологий	245	Что читать про нанотехнологии	330
Плазмонный резонанс	248	Шредингера уравнение	332
Пленки ленгмюра–блджетт	250	Щель энергетическая (Зонная теория твердого тела)	334
Поверхностно-активные вещества (ПАВ)	253	Экситон	336
Пьезодвигатели	255	Электронная микроскопия	338
Размерные эффекты	257	Электронный нос	342
Российская корпорация нанотехнологий (ГК «Роснанотех»)	258	Электронный язык	345
Рынок нанопродуктов	260	Юнга модуль	347
Самоорганизация	262	Ядерный магнитный резонанс	349
Самоорганизованные массивы	266	Содержание	351
Самосборка	269		
Самособирающиеся монослои	272		
Серая слизь	274		















