**Углеродные нанотрубки: их свойства и применение**

Заметка знакомит читателя с удивительным миром нанотрубок - углеродных структур, открытых в 1991 году и активно исследуемых в наши дни. В настоящее время выдвинуты уже сотни различные идей применения нанотрубок в науке и промышленности. О некоторых из этих предложений мы рассказываем в заметке, стараясь при этом подчеркнуть, какие идеи можно реализовать уже сегодня, а какие остаются пока уделом будущего.

Многие из перспективных направлений в материаловедении, нанотехнологии, наноэлектронике, прикладной химии связываются в последнее время с фуллеренами, нанотрубками и другими похожими структурами, которые можно назвать общим термином углеродные каркасные структуры. Что же это такое?

Углеродные каркасные структуры - это большие (а иногда и гигантские!) молекулы, состоящие исключительно из атомов углерода. Можно даже говорить, что углеродные каркасные структуры - это новая аллотропная форма углерода (в дополнение к давно известным: алмазу и графиту). Главная особенность этих молекул - это их каркасная форма: они выглядят как замкнутые, пустые внутри "оболочки". Самая знаменитая из углеродных каркасных структур - это фуллерен C60 (Рис.1а), абсолютно неожиданное открытие которого в 1985 году вызвало целый бум исследований в этой области (Нобелевская премия по химии за 1996 год была присуждена именно первооткрывателям фуллеренов Роберту Керлу, Гарольду Крото и Ричарду Смалли). В конце 80-х, начале 90-х годов, после того как была разработана методика получения фуллеренов в макроскопических количествах, было обнаружено множество других, как более легких, так и более тяжелых фуллеренов: начиная от C20 (минимально возможного из фуллеренов) и до C70, C82, C96, и выше (некоторые из них показаны на Рис.1).

Однако разнообразие углеродных каркасных структур на этом не заканчивается. В 1991 году, опять-таки совершенно неожиданно, были обнаружены длинные, цилиндрические углеродные образования, получившие названия нанотрубок (Рис.2). Визуально, структуру таких нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и "склеиваем" ее в цилиндр (предостережение: такое сворачивание графитовой плоскости - это лишь способ представить себе структуру нанотрубки; реально нанотрубки растут совсем по-другому). Казалось бы, что проще - берешь графитовую плоскость и сворачиваешь в цилиндр! - однако до экспериментального открытия нанотрубок никто из теоретиков их не предсказывал! Так что ученым оставалось только изучать их - и удивляться!

А удивительного было много. Во-первых, разнообразие форм: нанотрубки могли быть большие и маленькие, однослойные и многослойные, прямые (Рис.2а, б) и спиральные (Рис.2в). Во-вторых, несмотря на кажущуюся хрупкость и даже ажурность, нанотрубки оказались на редкость прочным материалом, как на растяжение, так и на изгиб. Более того, под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки также ведут себя экстравагантно: они не "рвутся" и не "ломаются", а просто-напросто перестраиваются! Далее, нанотрубки демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств. Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости, нанотрубки могут быть и проводниками, и полупроводниками! Может ли какой-либо иной материал с таким простым химическим составом похвастаться хотя бы частью тех свойств, которыми обладают нанотрубки?!

Наконец, поражает разнообразие применений, которые уже придуманы для нанотрубок. Первое, что напрашивается само собой, это применение нанотрубок в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей. Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, модуль Юнга однослойной нанотрубки достигает величин порядка 1-5 ТПа, что на порядок больше, чем у стали! Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микронов - что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина нанотрубок, получаемых в лаборатории, постепенно увеличивается - сейчас ученые уже вплотную подошли к миллиметровому рубежу: см. работу [1], где описан синтез многослойной нанотрубки длиной в 2 мм. Поэтому есть все основания надеяться, что в скором будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в сантиметры и даже метры! Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: ведь "трос" толщиной с человеческий волос, способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет себе бесчисленное множество применений.

Нанотрубки могут выступать не только в роли исследуемого материала, но и как инструмент исследования. На основе нанотрубки можно, к примеру, создать микроскопические весы. Берем нанотрубку, определяем (спектроскопическими методами) частоту ее собственных колебаний, затем прикрепляем к ней исследуемый образец и определяем частоту колебаний нагруженной нанотрубки. Эта частота будет меньше частоты колебаний свободной нанотрубки: ведь масса системы увеличилась, а жесткость осталась прежней (вспомните формулу для частоты колебаний груза на пружинке). Например, в работе [2] было обнаружено, что груз уменьшает частоту колебаний с 3.28 МГц до 968 кГц, откуда была получена масса груза 22 +- 8 фг (фемтограмм, т.е. 10-15 грамм!)

Другой пример, когда нанотрубка является частью физического прибора - это "насаживание" ее на острие сканирующего туннельного или атомного силового микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Необычные электрические свойства нанотрубок сделают их одним из основных материалов наноэлектроники. Уже сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: прикладывая запирающее напряжение нескольких вольт, ученые научились изменять проводимость однослойных нанотрубок на 5 порядков!

Еще одно применение в наноэлектронике - создание полупроводниковых гетероструктур, т.е. структур типа металл/полупроводник или стык двух разных полупроводников. Теперь для изготовления такой гетероструктуры не надо будет выращивать отдельно два материала и затем "сваривать" их друг с другом. Все, что требуется, это в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником). Тогда одна часть нанотрубки будет металлической, а другая - полупроводником!

Разработано уже и несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Например, созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, с другого конца начинают испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. Получающееся при этом зерно изображения будет фантастически малым: порядка микрона!

С помощью того же атомного микроскопа можно производить запись и считывание информации с матрицы, состоящей из атомов титана, лежащих на a-Al2O3 подложке. Эта идея уже также реализована экспериментально: достигнутая плотность записи информации составляла 250 Гбит/см2. Однако в обоих этих примерах до массового применения пока далеко - слишком уж дорого обходятся такие наукоемкие новшества. Поэтому одна из самых главных задач здесь - разработать дешевую методику реализации этих идей.

Пустоты внутри нанотрубок (и углеродных каркасных структур вообще) также привлекали внимание ученых. В самом деле, а что будет, если внутрь фуллерена поместить атом какого-нибудь вещества? Эксперименты показали, что интеркаляция (т.е. внедрение) атомов различных металлов меняет электрические свойства фуллеренов и может даже превратить изолятор в сверхпроводник! А можно ли таким же образом изменить свойства нанотрубок? Оказывается, да. В работе [3] ученые смогли поместить внутрь нанотрубки целую цепочку из фуллеренов с уже внедренными в них атомами гадолиния! На Рис.3 схематично показана структура такой нанотрубки и приведен снимок, полученный исследователями с помощью электронной микроскопии. Электрические свойства такой необычной структуры сильно отличались как от свойств простой, полой нанотрубки, так и от свойств нанотрубки с пустыми фуллеренами внутри. Как, оказывается, много значит валентный электрон, отдаваемый атомом металла во всеобщее распоряжение! Кстати, интересно отметить, что для таких соединений разработаны специальные химические обозначения. Описанная выше структура записывается как Gd@C60@SWNT, что означает "Gd внутри C60 внутри однослойной нанотрубки (Single Wall NanoTube)".

В нанотрубки можно не только "загонять" атомы и молекулы поодиночке, но и буквально "вливать" вещество. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть она как бы втягивает в себя вещество. Таким образом, нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов. Попав внутрь нанотрубки, атомы или молекулы уже не могут выйти наружу: концы нанотрубок надежно "запаяны", а углеродное ароматическое кольцо слишком узкое для большинства атомов. В таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. Попав в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца (а операции "запаивания" и "распаивания" концов нанотрубок уже вполне под силу современной технологии) и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это - не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях мира. И не исключено, что через 10-20 лет на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с очень активными ферментами, эти нанотрубки собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и "вскрываются" в определенный момент времени. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы.

**Список литературы**

Z. Pan et al, "Very long carbon nanotubes", Nature 394 (1998) 631.

http://electra.physics.gatech.edu/group/labs/tubelab.html

K.Hirahara et al, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 5384 и http://focus.aps.org/v6/st25.html - эксперименты с фуллеренами внутри нанотрубок.

http://www.ee.buffalo.edu/~dshaw/ee550/fall1999/yang/report/ , http://www.rci.rutgers.edu/~rdebari/intro.html , http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/ - сайты, посвященные исследованию нанотрубок. Здесь можно найти множество дальнейших ссылок на оригинальные работы, на сайты лабораторий и т.д.

И.П.Иванов