

## Углеродные нанотрубки

В последние годы углеродные нанотрубки стали главной знаменитостью в мире материаловедения. Приставка «нано-» происходит от греческого слова «*nanos*», которое переводится как «карлик» и означает одну миллиардную часть чего-либо. Таким образом, слово нанотрубки можно перевести как карликовые трубки. Фактические же нанотрубки это своеобразные цилиндрические молекулы диаметром примерно от половины нанометра и длиной до нескольких микрометров. Нанотрубки – можно рассматривать как частный случай наноматериалов, под которыми понимают объекты с размерами порядка  $10^{-9}$  м хотя бы вдоль одной координаты. В случае нанотрубок их диаметр отвечает этому требованию.

Несколько упрощая историю открытия нанотрубок, можно сказать, что эти полимерные системы были обнаружены в Ииджимой 1991 году как побочные продукты синтеза фуллеренов. Углеродные нанотрубки были открыты при исследовании продуктов, образующиеся при разряде вольтовой дуги в атмосфере гелия. Работа по тому времени рутинная. Угольные электроды в инертной атмосфере выделяют в процессе дугового разряда огромное количество сажи. Ради этой сажи, содержащей молекулы  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  и других фуллеренов, и проводилось множество экспериментов такого рода. Ииджима, однако, заинтересовался “бесполезным” отходом реакции, вырастающим на катоде. Электронная микроскопия показала на катоде наличие протяженных полых объектов диаметром несколько десятков ангстрем, это и были первые наблюдавшиеся нанотрубки.

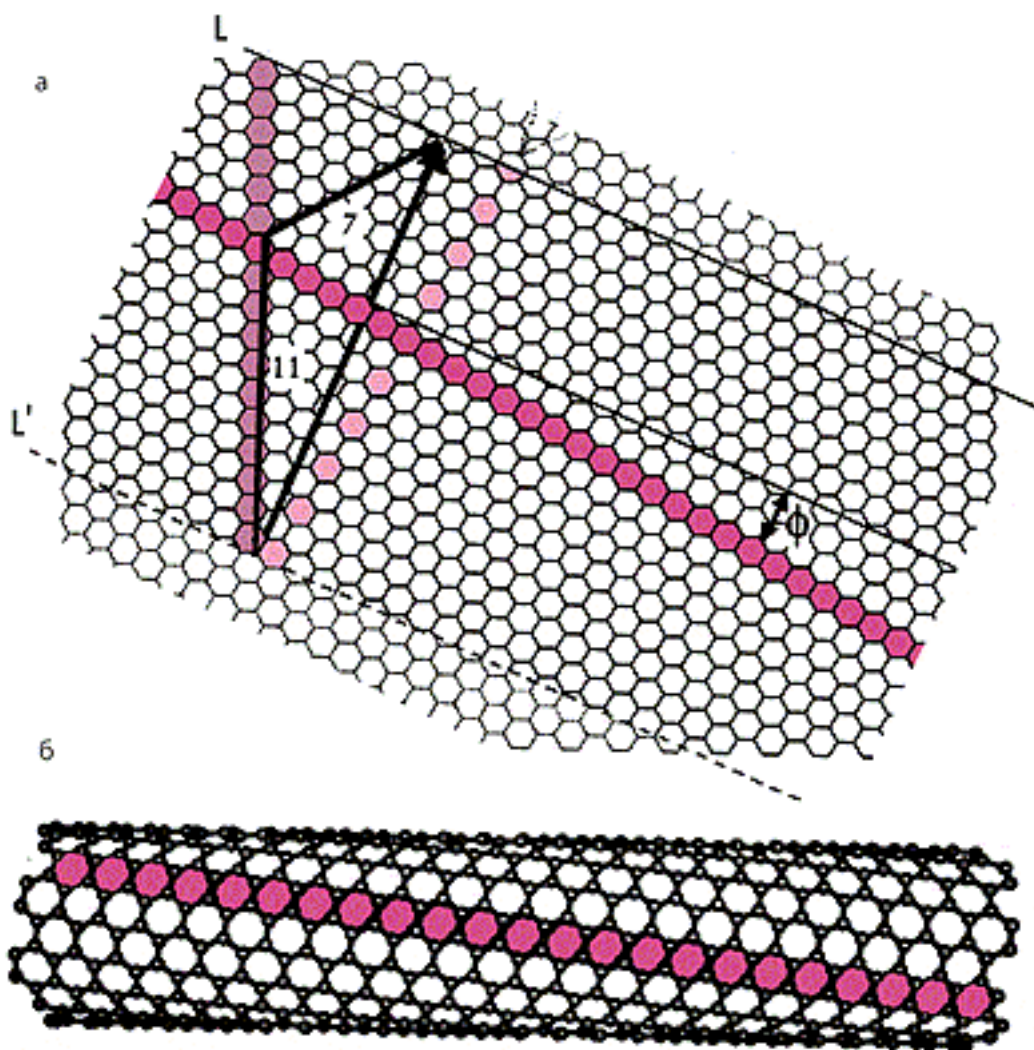


Рис. 1. Построение структурной модели нанотрубки: а) графитовый слой и лента (11,7); б) нанотрубка (11,7). Кроме индексов  $(n,m)$ , геометрию нанотрубки можно охарактеризовать длиной окружности цилиндра  $C$  и углом хиральности  $\Phi$ . Если вектор  $C$  совпадает с вертикальной или наклонной «разреженной» линией шестиугольников, получаются нехиральные трубки  $(n, 0)$  и  $(n, n)$ .

Визуально структуру таких нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и «склеиваем» из нее цилиндр (рис. 1). Чтобы представить пространственное расположение атомов в идеальной однослойной нанотрубке, отложим на графитовом слое вектор  $C = (na_1, ma_2)$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – базисные векторы, а  $n$  и  $m$  – целые числа. Через точки начала и конца этого вектора проведем перпендикулярно ему две

прямые –  $L$  и  $L'$  и вырежем из слоя бесконечную ленту вдоль этих линий. Свернем ленту в цилиндр так, чтобы прямые  $L$  и  $L'$  совместились. У этого цилиндра  $L$  будет образующей, а длина окружности равна модулю вектора  $C$ . Так мы получим структурную модель нанотрубки  $(n, m)$ . Такая трубка не образует швов при сворачивании. В общем случае нанотрубки обладают винтовой осью симметрии (тогда они хиральны). Нехиральными оказываются нанотрубки  $(n, 0)$  и  $(n, n)$ , в которых углеродные шестиугольники ориентированы параллельно и перпендикулярно оси цилиндра, соответственно. По внешнему виду поперечного среза, нанотрубки  $(n, 0)$  называют нанотрубками типа «зигзаг», а нанотрубки  $(n, n)$  нанотрубками типа «кресло» (рис. 2).

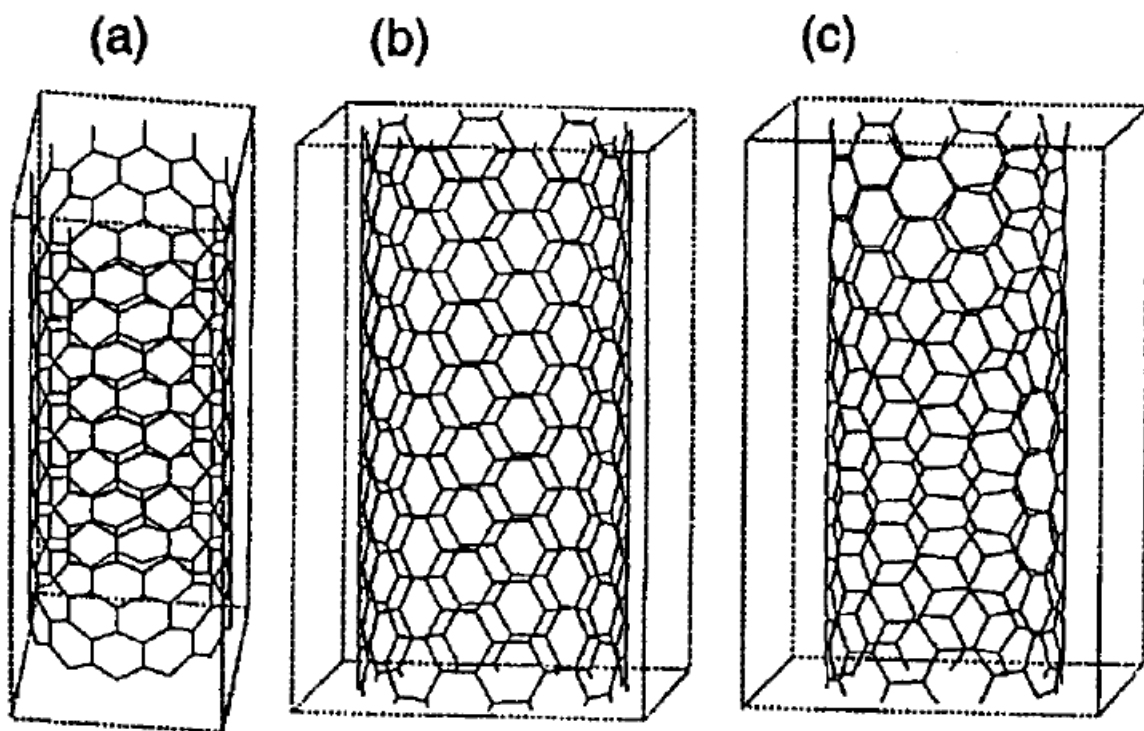


Рис. 2. Примеры нанотрубок типа зигзаг (а) кресло (b) и хиральной нанотрубки (с).

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 полуметаллами, и полупроводниками. В них наблюдается и сверхпроводимость. Как известно, проводимость обычного

провода обратно пропорциональна его длине и прямо пропорциональна поперечному сечению, а проводимость проводящей нанотрубки не зависит ни от ее длины, ни от ее толщины. Она равна так называемому кванту проводимости – предельному значению проводимости, отвечающему свободному переносу электронов по всей длине проводника. При этом наблюдаемое при обычной температуре значение плотности тока в проводящей нанотрубке на два порядка превосходит достигнутую сейчас плотность тока в объемных сверхпроводниках.

Несмотря на кажущуюся хрупкость и даже ажурность, нанотрубки оказались на редкость прочным материалом как на растяжение, так и на изгиб. Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, модуль Юнга однослойной нанотрубки на порядок больше, чем у стали. Более того, под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки также ведут себя экстравагантно: они не рвутся и не ломаются, а перестраивают свою структуру.

Еще в 1992–1993 годах определились основные потенциальные области их применения. Сейчас уже говорят о грядущей революции в материаловедении и электронике. Необычные электрические свойства нанотрубок делают их одним из основных материалов наноэлектроники. На основе углеродных нанотрубок создают электронные устройства нанометрового (молекулярного) размера. Ожидается, что в обозримом будущем они заменят элементы аналогичного назначения в электронных схемах различных приборов, в том числе современных компьютеров. В результате, будет достигнут теоретический предел плотности записи информации (порядка одного бита на молекулу), и вычислительные машины обретут практически неограниченную память и быстроедействие, лимитируемое только временем прохождения сигнала через прибор. Уже сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе нанотрубок: прикладывая запирающее напряжение в несколько Вольт,

можно изменять проводимость однослойных нанотрубок на 5 порядков. Еще одно применение в нанoeлектронике – создание гетероструктур, т.е. структур типа металл/полупроводник на стыке двух разных нанотрубок. Все, что требуется, это – в процессе роста нанотрубки создать в ней структурные дефекты, например, заменить некоторые из углеродных шестиугольников на пятиугольники и семиугольники. Тогда одна часть нанотрубки может быть металлической, а другая – полупроводником.

Созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, с другого конца испускают электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают его свечение. Получающееся при этом зерно изображения может быть фантастически малым: порядка микрона.

Нанотрубка может использоваться как 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. С помощью нанотрубок, прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Целый класс возможных применений нанотрубок связан с заполнением их внутренних полостей теми или иными веществами. Известен ряд исследований по применению нанотрубок в качестве пористого материала в фильтрах, в аппаратах химической технологии и т. п. В нанотрубки можно 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. Концы нанотрубок могут быть надежно запаяны, и в таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. В месте назначения нанотрубки раскрывают с одного конца и выпускают их содержимое в строго определенных дозах. Не исключено, что на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с биологически активными веществами, 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.

Наконец, возможно применение нанотрубок в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей. Есть основания надеяться, что в будущем научатся выращивать нанотрубки длиной в сантиметры и более. Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: трос тоньше человеческого волоса, но способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет бесчисленное множество применений.

Профессор, доктор химических наук

П.Н.Дьячков

1. S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature (London) 354, 56 (1991).
2. П.Н. Дьячков. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. Москва, Издательство Бином, Лаборатория знаний, 2006, 293 с.