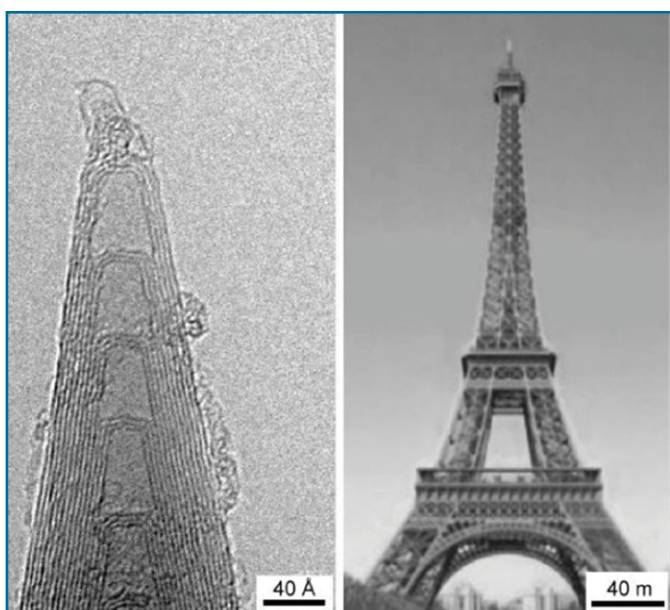


## УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ (Carbon Nanotubes)

«...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

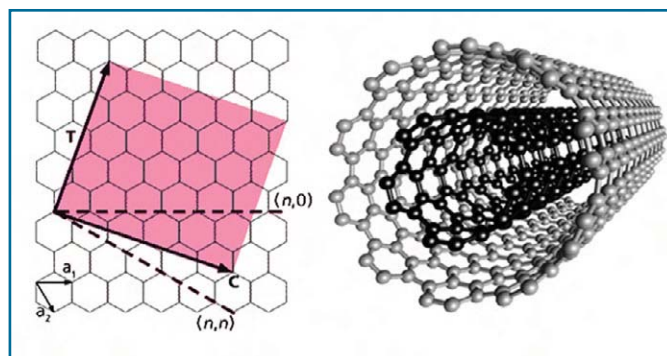


Рис. 1. Графитовая плоскость и многостенная углеродная нанотрубка

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. Недаром 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

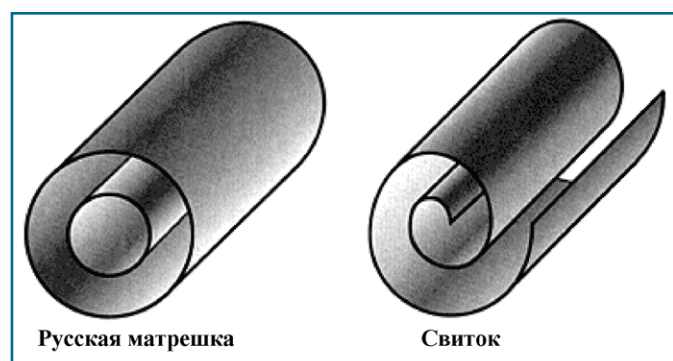


Рис. 2. Возможные модели многостенных углеродных нанотрубок

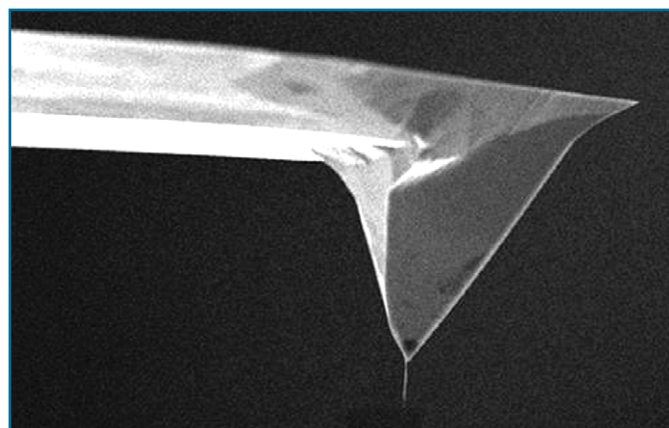


Рис. 3. Острие АСМ с прикрепленной к нему нанотрубкой



**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: X- 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., Vaughman R.H. Science. 2004. Vol. 306. P. 1358–1361.