

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ФИЗИКЕ

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ТИПОВ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОТРУБОК**

Составители: Битюцкая Л.А.
Машкина Е.С.
Бормонтов Е.Н.

ВОРОНЕЖ
2006

Утверждено Научно-методическим советом физического факультета
от 05.07.2006 г., протокол № 5

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов 3 и 4 курса дневного отделения физического факультета. Для специальностей 010803 (014100) – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 210601 (202100) - Нанотехнология в электронике.

СОДЕРЖАНИЕ

1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	5
2. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	7
3. СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	9
4. ЗОННАЯ СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	17
4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	18
5. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ В НАНОТЕХНОЛОГИИ.....	24
ЗАДАНИЕ.....	31
Пример 1.	32
Пример 2.	33
Пример 3.	34
ЛИТЕРАТУРА.....	36
ВОПРОСЫ.....	37

Проблема создания наноструктур с заданными свойствами и контролируемыми размерами входит в число важнейших проблем XXI века. Такие новые структуры необходимы для электроники, материаловедения, физики, химии, биологии и медицины.

Крупным событием в науке стало открытие фуллеренов - новой аллотропной формы углерода, отличной от алмаза или графита. Фуллерены представляют собой замкнутые оболочки из атомов углерода. Наиболее известным и изученным является молекула C_{60} , в которой атомы располагаются в вершинах усеченного икосаэдра. Существование фуллерена C_{60} предсказали российские ученые Д.А.Бочвар и Е.Г.Гальперн еще в 1974 году гораздо раньше их экспериментального обнаружения. Экспериментально же существование фуллеренов было доказано лишь спустя 10 лет в работах Ролфинга, Кокса и Кэлдора. Впервые получены и экспериментально исследованы углеродные кластеры были в 1985 году американской группой Смолли-Керл и англичанами под руководством Крото. В 1996 году Смолли, Керлу и Крото за открытие фуллеренов была присуждена Нобелевская премия по химии.

Углеродные нанотрубки (CNT – carbon nanotubes) были открыты в 1991 году Сумио Ииджимой, сотрудником японской корпорации NEC. Первые углеродные нанотрубки были обнаружены в саже, которая образуется при распылении графитового электрода в электрической дуге. Измерения, выполненные с помощью электронного микроскопа, показали, что диаметр таких нитей не превышает нескольких нанометров, а длина от одного до нескольких микрон.

В отличие от фуллеренов с их сферической или сфероидальной формой, углеродные нанотрубки представляют собой сильно вытянутые молекулы, которые вначале называли тубулярными фуллеренами или тубеленами. Со временем выяснилось, что класс этих «вытянутых фуллеренов» очень широк, а по уникальности своих свойств и, соответственно, по перспективам использования нанотрубки значительно превосходят фуллерены.

Исследование углеродных нанотрубок представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес. Фундаментальный интерес обусловлен необычной структурой нанотрубок и широким изменением их физико-химических свойств. До конца еще не решены вопросы о механизмах роста углеродных нанотрубок в различных экспериментальных условиях, о природе их свойств и др. Решение проблемы прикладного использования углеродных нанотрубок зависит от стоимости их производства. Тем не менее такие свойства нанотрубок, как сверхминиатюрные размеры, полупроводниковые и металлические свойства, хорошая электропроводность, высокие эмиссионные характеристики, капиллярность, высокая химическая стабильность и способность присоединять к себе химические радикалы, позволяют надеяться на эффективное применение нанотрубок в измерительной технике, электронике и наноэлектронике, химической технологии, биологии и медицине.

1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Первые нанотрубки производились в дуговом разряде. На сегодняшний день широко используется так называемые CVD-методы (Chemical Vapor Deposition), в частности, каталитический пиролиз углеродсодержащих материалов и другие способы. Большой проблемой в процессе получения нанотрубок является управление процессом их роста. Обычно при синтезе образуются одно- и многослойные нанотрубки и аморфный углерод. Причем нанотрубки, как правило, собраны в пучки. Очень важной задачей поэтому является разделение и очистка нанотрубок. В последних работах по синтезу нанотрубок разрабатываются методы по получению чистых однослойных нанотрубок, без примесей многослойных нанотрубок или аморфного углерода. Актуальной становится решение проблемы по управляемому росту нанотрубок с заданными параметрами.

1.1. Электродуговой метод

В настоящее время наиболее распространённым является метод термического распыления графитовых электродов высокой чистоты в плазме дугового разряда. Процесс образования нанотрубок осуществляется в камере, заполненной гелием под давлением около 500 торр (рис. 1). При горении плазмы гелия происходит интенсивное термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором присутствуют нанотрубки углерода.

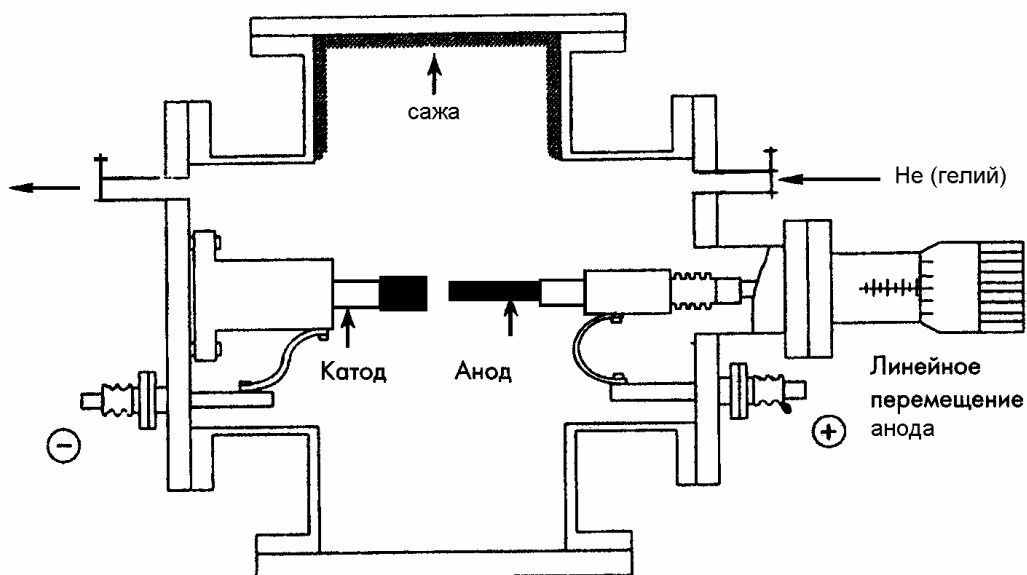


Рис. 1. Установка электродугового испарения для получения углеродных нанотрубок.

Анод представляет собой графитовый стержень диаметром ~ 6 мм, диаметр графитового катода ~ 9 мм. Т.к. в процессе электродугового испарения происходит распыление анода, то анод длиннее катода. В дуговом разряде между анодом катодом поддерживается напряжение 20-25 В, постоянный ток дуги обычно выбирается в диапазоне 50-100 А. При расстоянии между катодом и анодом 1 мм загорается электрическая дуга с образованием плазмы гелия в межэлектродной области. Температура плазмы гелия достигает ~ 4000 К. В результате происходит распыление анодного графитового стержня со скоростью несколько миллиметров в секунду. Продукты распыления осаждаются на катоде и на стенках камеры в виде фуллереновой сажи с нанотрубками. Как показывают наблюдения, выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа, образующиеся многослойные нанотрубки длиной до 40 мкм осаждаются на катоде перпендикулярно его плоской поверхности и собраны в цилиндрические пучки и нити диаметром ~ 50 мкм. Эти пучки и нити регулярным образом покрывают поверхность катода, образуя сотовую структуру, пространство между пучками заполнено смесью неупорядоченных наночастиц, также содержащей нанотрубки. В оптимальных условиях выход нанотрубок из прикатодной сажи достигает 60 %.

1.2. Каталитический метод (CVD – chemical vapor deposition)

Каталитический метод основан на использовании процесса разложения углеводородов (ацетилена, метана и др.) в присутствии катализаторов. Катализатор, представляющий собой мелкодисперсный металлический порошок (Ni, Co, Cu, Fe), заполняет керамический тигель, заключенный в кварцевую трубку длиной 60 см, внутренним диаметром 4 мм (рис. 2). Кварцевая трубка помещается в печь, в которой поддерживается температура 700-1000 °С.



Рис. 2. Установка для получения углеродных нанотрубок методом CVD.

Смесь ацетилена C_2H_2 и азота N_2 в соотношении 1:10 прокачивается через трубку в течение нескольких часов. В результате каталитического распада ацетилена получается несколько типов углеродных структур: аморфный слой углерода на поверхности катализатора; нити аморфного углерода; металлические частицы, заключенные в оболочку из графитовых слоев и нанотрубки. Выход нанотрубок зависит от типа катализатора. Например, при использовании Co он значительно выше, чем при использовании Fe.

Отличительной особенностью данного метода синтеза является широкое разнообразие модификаций и высокое качество получаемых нанотрубок. Кроме однослойных и многослойных трубок различного диаметра наблюдались многослойные нанотрубки, имеющие от 8 до 10 графитовых слоев, с внутренним диаметром 3-10 нм, внешним диаметром 15-25 нм и длиной до 30 мкм. Наряду с прямыми нанотрубками присутствует около 10 % спиральных трубок различного радиуса и шага спирали. Наименьший радиус спирали составляет ~ 8 нм.

1.3. Другие методы получения углеродных нанотрубок

Конденсационный метод

Метод основан на термическом распылении графита в вакууме 10^{-8} торр. Высокая температура распыления (до 3000 °С) достигается в результате резистивного нагрева при пропускании тока через графитовую ленту. Сажа с нанотрубками конденсируется на охлаждаемую водой подложку из высокоупорядоченного пиролитического графита.

Метод лазерного испарения

Метод основан на распылении графита под воздействием импульсного лазерного излучения в потоке инертного (He или Ar) газа. Сажа с нанотрубками осаждается на охлаждаемой водой медную подложку.

Пиролитический метод

Основан на пиролизе (разложении) бензола в потоке водорода. Пиролиз бензола происходит при 1000°С. Сажа с нанотрубками осаждается на графитовом стержне.

2. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В настоящее время исследование нанотрубок осуществляется методами, в основе которых лежат подходы, используемые для исследования структуры нанометровых объектов: высокоразрешающая трансмиссионная электронная микроскопия, рентгеновская и электронная дифракция, сканирующая зондовая микроскопия.

Высокоразрешающая трансмиссионная электронная микроскопия (ТЭМ) позволяет исследовать не только внешнюю, но и внутреннюю структуру нанотрубок.

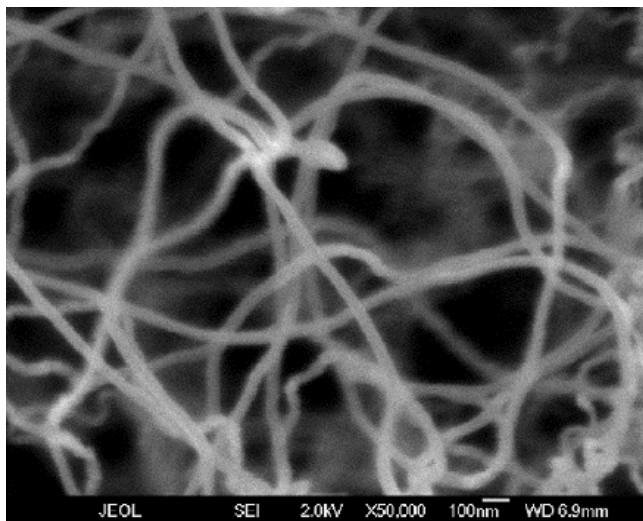


Рис. 3. ТЭМ-изображение углеродных нанотрубок, полученных CVD-методом.

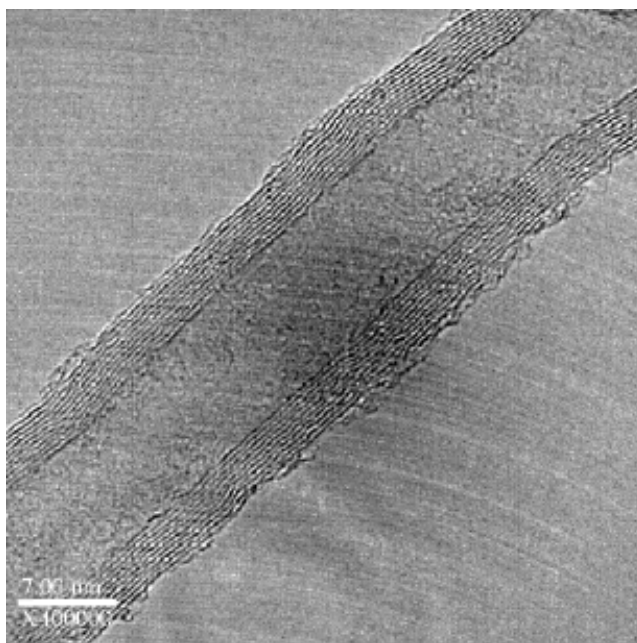


Рис. 4. ТЭМ-изображение многослойной углеродной нанотрубки (9 слоев, внутренний диаметр трубки 10 нм).

Электронная дифракция дополняет результаты ТЭМ-микроскопии и позволяет получить информацию о структуре нанотрубок: межслоевое расстояние, количество слоев, распределение слоев. Однако существуют определенные сложности в интерпретации дифрактограмм, особенно в случае многослойных нанотрубок.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) позволяет получать атомно-разрешенные СТМ (сканирующая туннельная микроскопия) и АСМ (атомно-силовая микроскопия) изображения (рис. 5).

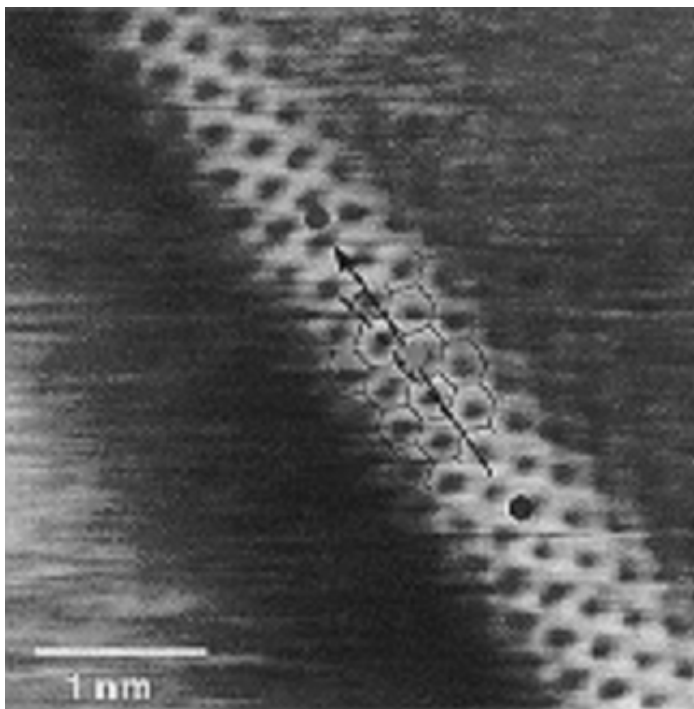


Рис. 5. СТМ-изображение однослойной углеродной нанотрубки.

Получать атомно-разрешенные изображения высокого качества для углеродных нанотрубок является сложной задачей из-за трудности прикрепления нанотрубки к подложке. Первоначально в качестве подложек использовался высокоориентированный пиролитический графит. В настоящее время для исследования нанотрубок методом СЗМ в качестве подложки используются монокристаллы золота.

3. СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Идеальная углеродная нанотрубка – это бесшовный цилиндр, полученный при свертывании плоской гексагональной сетки графита. Структурные параметры углеродной нанотрубки определяются структурой графита.

Графит представляет собой аллотропную форму углерода, имеющую гексагональную кристаллическую структуру, пространственная группа $R\bar{3}m$. Кристаллическая решетка графита состоит из параллельных слоев базисных плоскостей, образованных правильными шестиугольниками из атомов углерода (рис.6). Атомы углерода каждого слоя расположены против центров шестиугольников, находящихся в соседних слоях. Положение слоев повторяется через один (АВАВ), а каждый слой сдвинут относительно другого в горизонтальном направлении на 0.142 нм, межслоевое расстояние составляет ~ 0.334 нм. Такая модель структуры графита была предложена Джоном Берналом в 1924 г.

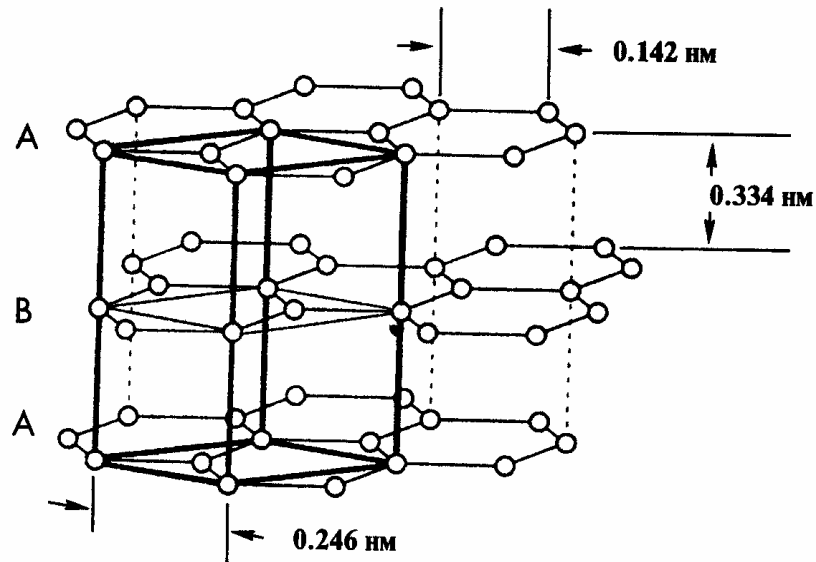


Рис. 6. Структура гексагонального графита с элементарной ячейкой.

Атом углерода в свободном состоянии имеет электронную структуру $(1s)^2(2s)^2(2p)^2$. Для образования ковалентных связей один из $2s$ электронов сопрягается с уровнем $2p$, и потом орбитали гибридизуются одним из трех возможных способов. В графите один из $2s$ электронов гибридизуется с двумя $2p$ электронами, образуя в плоскости три sp^2 орбитали под углом 120° друг к другу. Оставшаяся орбиталь, имеющая p_z конфигурацию, направлена под углом 90° к этой плоскости. Сильные s -связи между атомами углерода формируются sp^2 орбиталями, тогда как p_z или π орбитали обеспечивают слабые связи Ван-дер-Ваальса между плоскостями. Перекрывание p орбиталей соседних атомов в данной плоскости образует сеть электронных связей, благодаря чему графит имеет относительно высокую электрическую проводимость.

3.1. Структурные типы однослойных углеродных нанотрубок

Однослойная углеродная нанотрубка – нанотрубка со стенкой в один атомарный слой. Диаметр однослойной трубки составляет 0.6-1.8 нм (1.4 нм – типичный).

Структурные параметры углеродной нанотрубки определяются структурой базисных плоскостей графита, симметрией кристаллического графенового слоя относительно оси трубки. Сворачивать графеновый слой можно в разных направлениях: вдоль грани шестиугольника — трубки “armchair” (кресельные), перпендикулярно грани — трубки “zigzag” (зигзажные) и во всех промежуточных – “chiral” (хиральные) (рис.7).

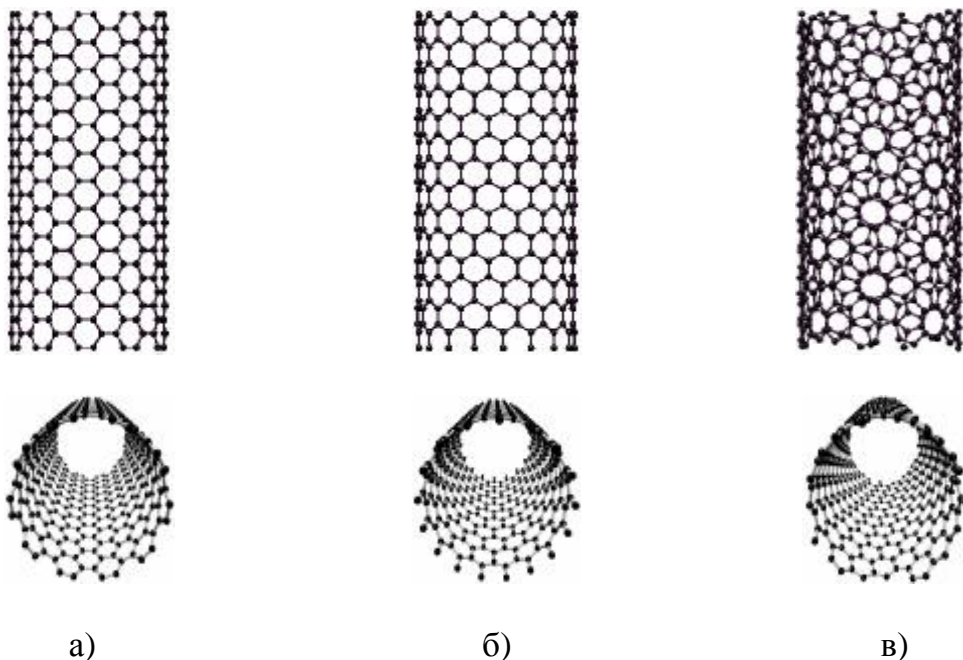
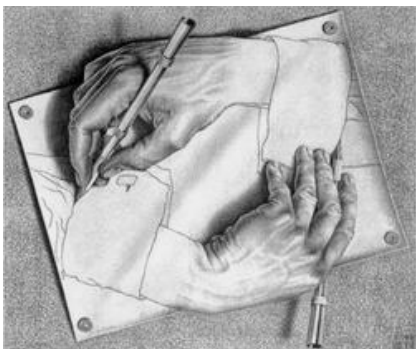


Рис. 7. Структура однослойных нанотрубок:
а) кресельная; б) зигзагная; в) хиральная.

Кресельные и зигзагные нанотрубки имеют высокосимметричную структуру, так кресельные нанотрубки переходят в себя при зеркальном отражении, а зигзагные нанотрубки переходят в себя с точностью до поворота. Хиральные нанотрубки составляют большую часть нанотрубок и не обладают столь высокосимметричной формой. В хиральных нанотрубках гексагоны закручиваются по спирали вокруг оси трубки. При зеркальном отражении хиральная нанотрубка (n,m) переходит в нанотрубку (m,n) . Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет очень важную структурную характеристику нанотрубки – хиральность.

3.2. Структурные параметры углеродных нанотрубок



М.Эшер. «Рисующие руки».

Хиральность (от греч. *hiros* — рука) — тип зеркальной симметрии, при котором левый и правый варианты фигуры не могут быть совмещены друг с другом (подобно симметрии кистей рук).

Рассмотрим подробно как из графитового листа получают нанотрубки (рис.8). Вектора \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 являются базисными векторами элементарной ячейки графитового листа. Вектор \mathbf{C} является линейной комбинацией векторов \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 и соединяет две эквивалентные точки на первичном графитовом листе:

$$\mathbf{C} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2,$$

где n, m – целые числа ($n \geq m$), называемые индексами хиральности.

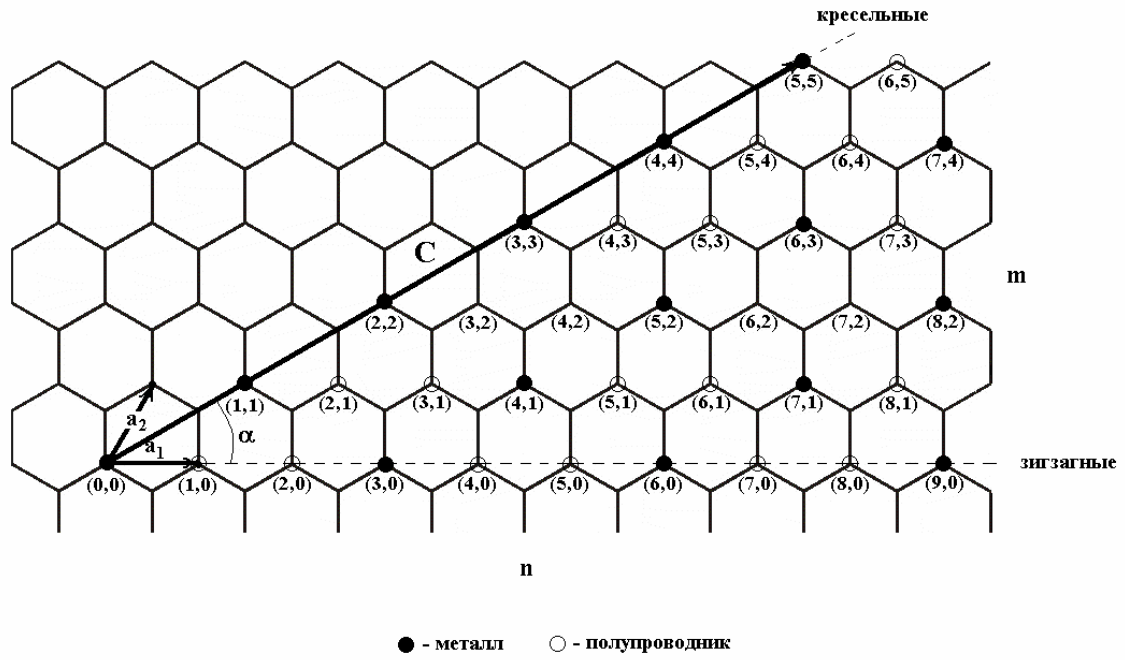


Рис. 8. Графитовый лист с атомами, обозначенными с помощью индексов хиральности (n,m) .

Цилиндр получается при сворачивании графитового листа таким образом, чтобы две конечные точки вектора \mathbf{C} совмещались. Вследствие симметрии решетки пчелиных сот множество полученных таким образом цилиндров будут эквивалентными. Однако существует «неприводимый клин», содержащий одну двенадцатую графеновой решетки, с помощью которого определяются элементарные структуры нанотрубок.

Каждая пара чисел (n,m) представляет возможную структуру нанотрубки. Кресельные нанотрубки получаются при $n=m$, зигзажные – при $m=0$, все остальные нанотрубки являются хиральными.

Индексы хиральности однослойной нанотрубки определяют ее диаметр D и хиральный угол α - угол между гранью и направлением сворачивания. Так как $|a_1|=|a_2|=|a|=d_0\sqrt{3}$, где $d_0=0.142$ нм – расстояние между атомами углерода в гексагональной сетке графита, получим величину вектора \mathbf{C} в нанометрах равную $0.246\sqrt{(n^2 + nm + m^2)}$.

Диаметр нанотрубки определяется как:

$$D = \frac{|\mathbf{C}|}{\pi}$$

или

$$D = \sqrt{(n^2 + nm + m^2)} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot d_0}{\pi} = 0.246\sqrt{(n^2 + nm + m^2)}/\pi$$

Хиральный угол:

$$\cos \alpha = \frac{(2n + m)}{2\sqrt{n^2 + nm + m^2}}$$

Хиральный угол лежит в пределах $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$. Среди различных возможных направлений сворачивания нанотрубок выделяются направления, для которых совмещение шестиугольника (n,m) с началом координат не требует искажения в его структуре. Этим направлениям соответствуют углы $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$. Указанные конфигурации отвечают хиральностям $(n,0)$ и (n,n) соответственно.

Если мы полагаем, что нанотрубка является одномерным кристаллом, то можно определить трансляционную элементарную ячейку вдоль оси трубки. Для всех нанотрубок элементарная ячейка трансляции имеет форму цилиндра.

Для кресельной нанотрубки ширина ячейки равна величине элементарного вектора \mathbf{a} графитовой сетки (рис. 9).

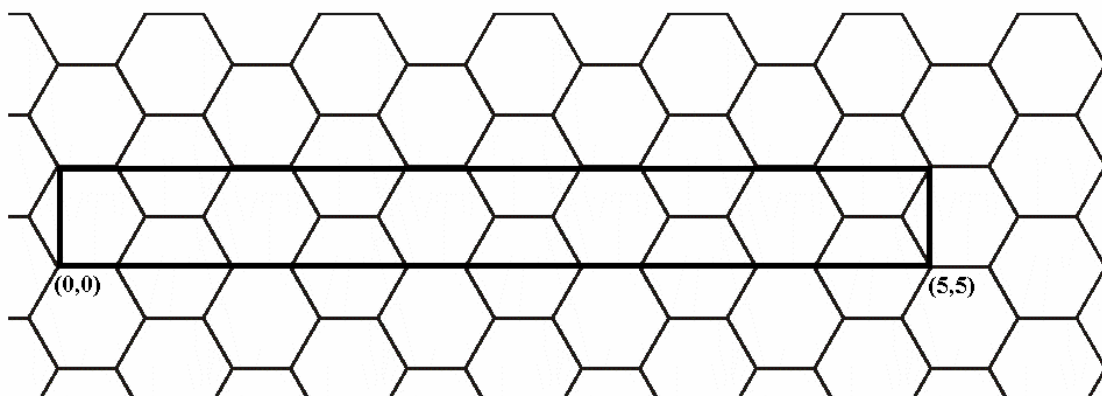


Рис. 9. Элементарная ячейка для кресельной нанотрубки (5,5).

Для зигзажной нанотрубки ширина ячейки составляет $a\sqrt{3}$ (рис. 10). Кресельные и зигзажные нанотрубки с большим диаметром имеют элементарные ячейки, которые являются просто уширенной версией трубок $(5,5)$ и $(9,0)$ соответственно.

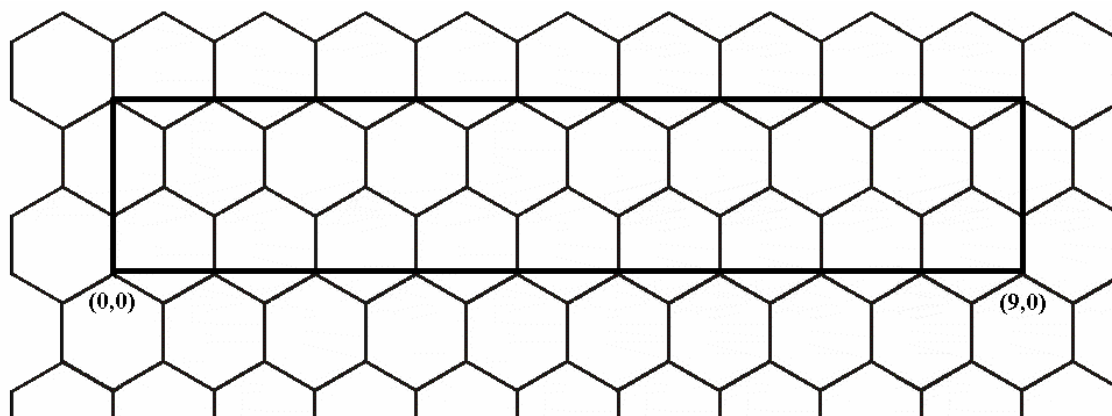


Рис. 10. Элементарная ячейка для зигзажной нанотрубки (9,0).

Для хиральных нанотрубок более низкая симметрия приводит к увеличению элементарной ячейки. Рассмотрим метод построения элементарной ячейки для хиральных нанотрубок. Этот метод заключается в построении прямой линии, проходящей через начало неприводимого клина (0,0) нормально к вектору \mathbf{C} (рис.11). Длина элементарной ячейки в направлении оси нанотрубки равна величине вектора \mathbf{T} . Выражение для \mathbf{T} может быть получено с помощью длины вектора \mathbf{C} и наибольшего делителя для хиральных индексов n и m , который обозначается d_H .

Если $n - m \neq 3rd_H$, где r – некоторое целое число, то

$$\mathbf{T} = \frac{\sqrt{3} \cdot \mathbf{C}}{d_H}.$$

Если $n - m = 3rd_H$, то

$$\mathbf{T} = \frac{\sqrt{3} \cdot \mathbf{C}}{3d_H}$$

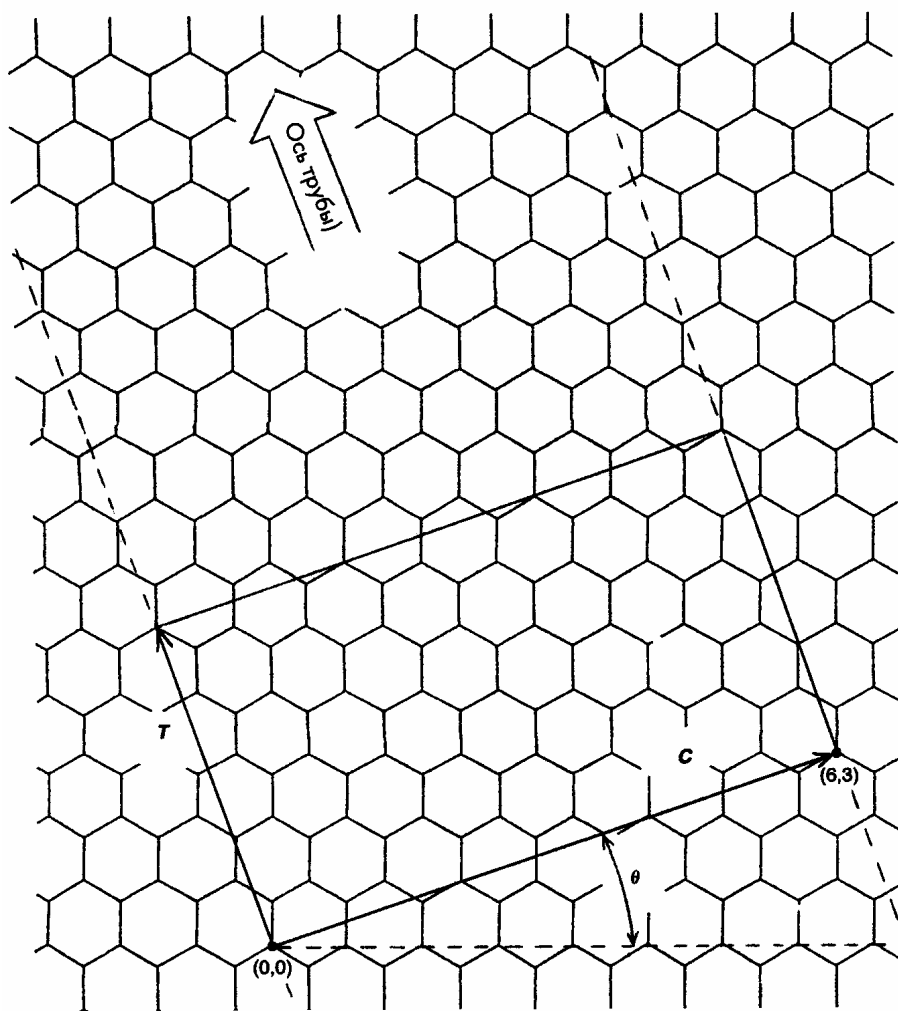


Рис. 11. Элементарная ячейка для хиральной нанотрубки (6,3).

От хиральности зависят свойства нанотрубок (рис. 8). Все кресельные нанотрубки являются металлическими, зигзажные и хиральные нанотрубки в зависимости от индексов хиральности могут обладать как металлическими, так и полупроводниковыми свойствами.

Металлическими свойствами обладает $1/3$ зигзажных нанотрубок. В этом случае n должно быть кратно 3. Остальные $2/3$ зигзажных нанотрубок являются полупроводниковыми.

$1/3$ хиральных нанотрубок является металлическими, если выполняется условие $n-m=3q$, где q – целое число. Остальные $2/3$ хиральных нанотрубок, так же как и зигзажные, обладают полупроводниковыми свойствами.

3.3. Особенности многослойных углеродных нанотрубок

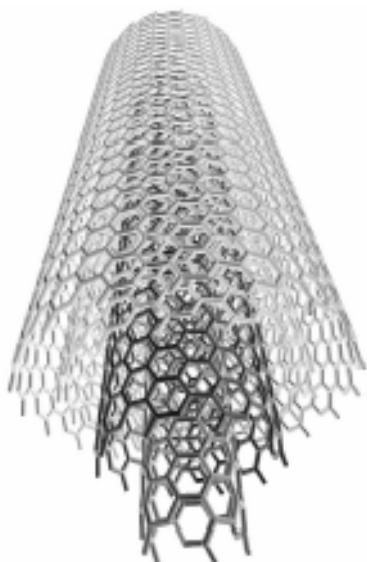
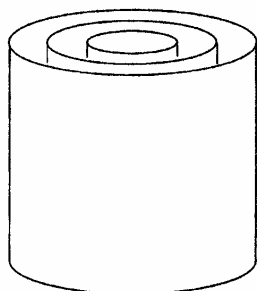


Рис. 12. Модель многослойной углеродной нанотрубки.

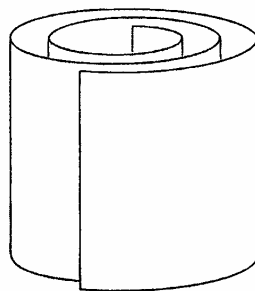
Многослойная углеродная нанотрубка представляет собой вложенные друг в друга нанотрубки, образованные атомарными графитовыми слоями, расстояние между которыми составляет ~ 0.34 нм (рис. 12). Диаметр многослойной трубки составляет 20-50 нм. В многослойной нанотрубке между трубками действует слабая связь Ван-дер-Ваальса, поэтому трубки могут двигаться друг относительно друга.

Многослойные углеродные нанотрубки отличаются от однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и поперечном направлении. Наиболее

распространенными разновидностями поперечной структуры являются матрешка (коаксиально вложенные друг в друга однослойные нанотрубки) и свиток (рис. 13).



а)



б)

Рис. 13. Схематические модели поперечной структуры многослойной нанотрубки: а) матрешка; б) свиток.

Реализация той или иной структуры многослойной нанотрубки зависит от условий синтеза.

3.4. Шапки углеродных нанотрубок

Почти все углеродные нанотрубки закрыты с обоих концов шапками, содержащими, как правило, пентагональные углеродные кольца, но могут быть и других модификаций (гептагональные кольца наряду с пентагональными).

Все замкнутые нанотрубки должны удовлетворять правилу Эйлера, согласно которому гексагональная решетка любого размера и формы может образовать замкнутую структуру только путем включения в нее 12 пентагонов. Любая шапка для нанотрубки должна содержать 6 пентагонов (пренебрегая в данный момент шапками, содержащими гептагоны). Самыми маленькими трубками, которые могут быть замкнуты изолированными пентагонами, являются кресельная нанотрубка (5,5) и зигзагная (9,0) (рис. 14). Для каждой из них существует единственно возможная шапка, соответствующая молекуле C_{60} , разделенной двумя способами: пополам в направлении, перпендикулярном одной из осей пятого порядка для кресельных нанотрубок и перпендикулярном одной из осей третьего порядка для зигзагных.

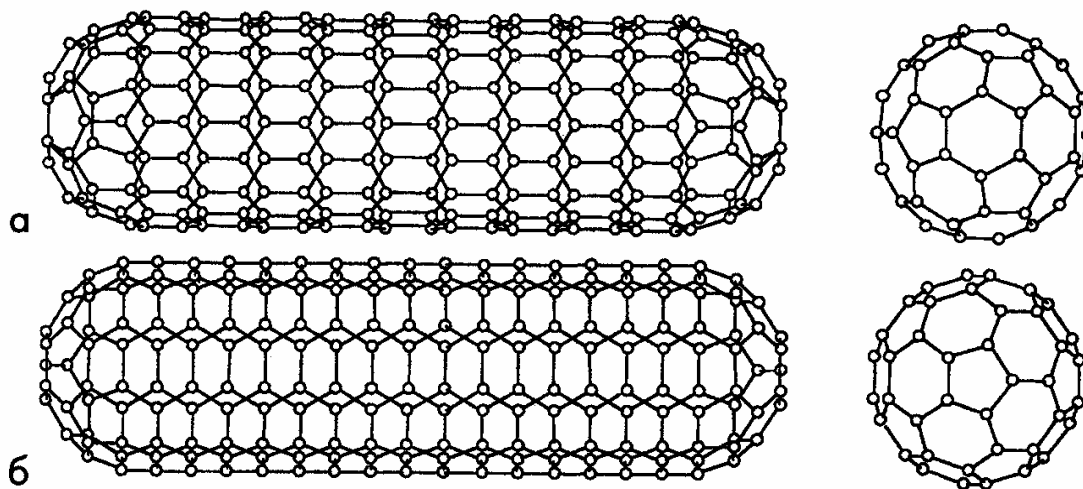


Рис. 14. Углеродные нанотрубки, закрытые половиной молекулы C_{60} : а) зигзагная (9,0); б) кресельная (5,5).

Экспериментальные исследования шапок нанотрубок показывают, что шапки могут иметь также коническую форму.

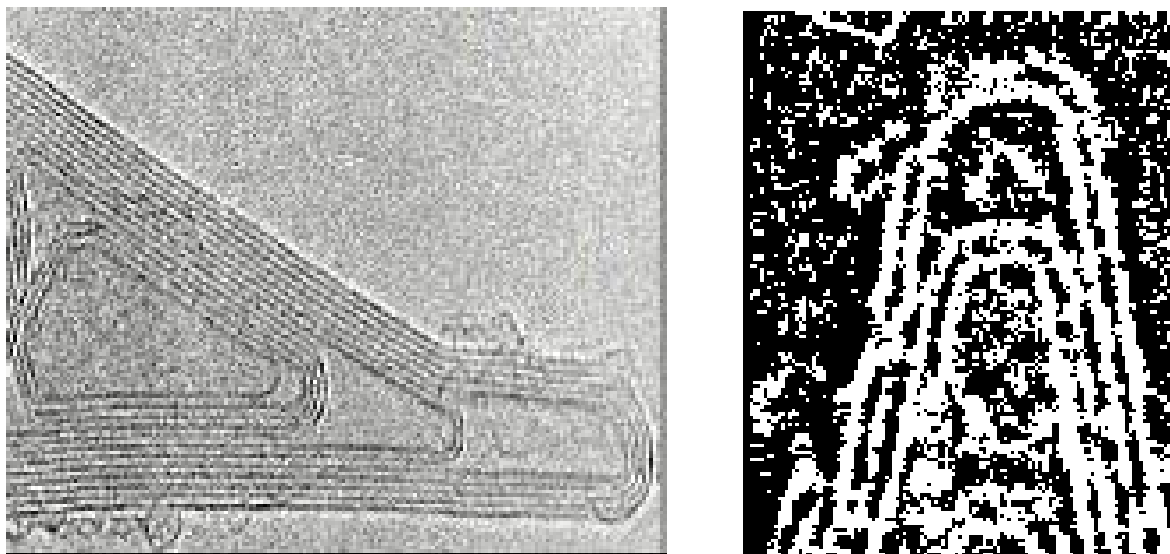


Рис. 15. ТЭМ-изображения типичных шапок многослойных нанотрубок.

4. ЗОННАЯ СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

При определении зонной структуры графита предполагается, что графеновые плоскости бесконечны в двух направлениях. Для углеродных нанотрубок структура имеет макроскопические масштабы вдоль оси трубки, а окружность – атомные размеры. Поэтому число разрешенных электронных состояний по окружности будет ограниченным, а в направлении оси велико.

Для кресельных нанотрубок разрешенные значения волнового вектора (k) по круговому направлению можно записать в следующем виде:

$$k_x^v = \frac{v}{N_x} \frac{2\pi}{\sqrt{3}a},$$

где $a=0.246$ нм – постоянная решетки графита, $v = 1, \dots, N_x$. Для архитипичной кресельной нанотрубки (5,5) число v равно 1, ..., 5.

Энергетическое дисперсионное соотношение для кресельной нанотрубки (5,5) показано на рис. 16 а. Валентная ветвь и ветвь зоны проводимости касаются в месте, составляющем $2/3$ расстояния от $k=0$ до границы зоны $k=\pi/a$. Все кресельные нанотрубки имеют подобную зонную структуру и являются металлами.

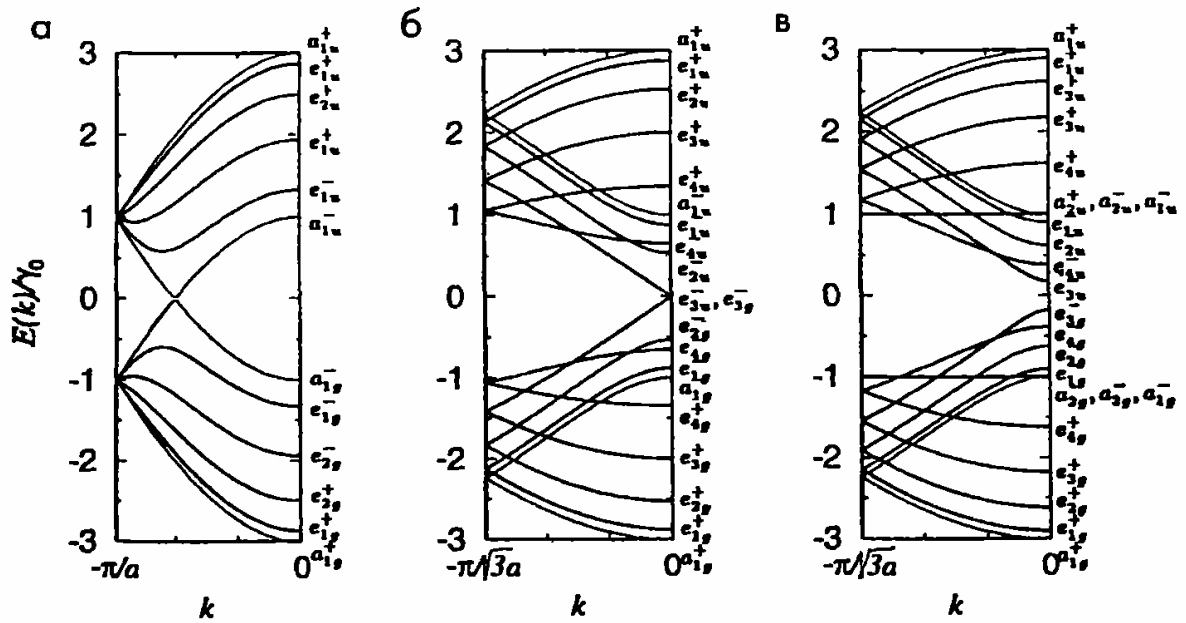


Рис. 16. Дисперсионные соотношения: а) для кресельной нанотрубки (5,5); б) для зигзажной нанотрубки (9,0); в) для зигзажной нанотрубки (10,0).

Для зигзажных нанотрубок разрешенные значения волнового вектора будут:

$$k_y^v = \frac{v}{N_y} \frac{2\pi}{a},$$

для $v = 1, \dots, N_y$.

Энергетическое дисперсионное соотношение для зигзажной нанотрубки (9,0) показано на рис. 16 б. Валентная ветвь и ветвь зоны проводимости касаются в точке $k=0$. Это имеет место не для всех зигзажных нанотрубок $(n,0)$, а только когда n кратно 3. В этом случае зигзажная нанотрубка является металлом. Если n не кратно 3, например для зигзажной нанотрубки (10,0), то существует энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости (рис. 16 в) и такая зигзажная нанотрубка является полупроводником.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Благодаря своим уникальным свойствам углеродные нанотрубки являются привлекательным объектом фундаментальной науки с одной стороны, а с другой – широкими перспективами прикладного использования.

4.1. Механические свойства нанотрубок

Нанотрубки обладают аномально высокой прочностью на растяжение, изгиб и кручение.

Механическое напряжение S в трубке определяется как отношение нагрузки W к поперечному сечению трубки A : $s = W/A$. Относительная

деформация ε определяется как отношение удлинения ΔL трубки к ее длине L перед нагружением: $\varepsilon = \Delta L / L$. Согласно закону Гука напряжение σ пропорционально относительной деформации: $\sigma = E\varepsilon$. Коэффициент пропорциональности $E = LW / A\Delta L$ называется модулем Юнга и является свойством конкретного материала, характеризующим его упругость. Чем больше значение модуля Юнга, тем более материал податлив. Модуль Юнга углеродных нанотрубок составляет от 1.28 до 1.8 ТПа, в то время как модуль Юнга стали почти в 10 раз меньше (0.21 ТПа). Это подразумевает, что углеродная нанотрубка очень жесткая и трудногибкая. Однако это не так из-за того, что нанотрубки очень тонкие. Отклонение пустого цилиндрического стержня длиной L , внутренним радиусом r_i и внешним радиусом r_0 под действием силы F , приложенной к его концу нормально оси, дается выражением: $D = FL^3 / 3EI$, где $I = \pi(r_0^4 - r_i^4) / 4$ – момент инерции сечения стержня. Так как толщина стенки однослойной нанотрубки составляет ~ 0.34 нм, значение $r_0^4 - r_i^4$ очень мало, что компенсирует большое значение модуля Юнга.

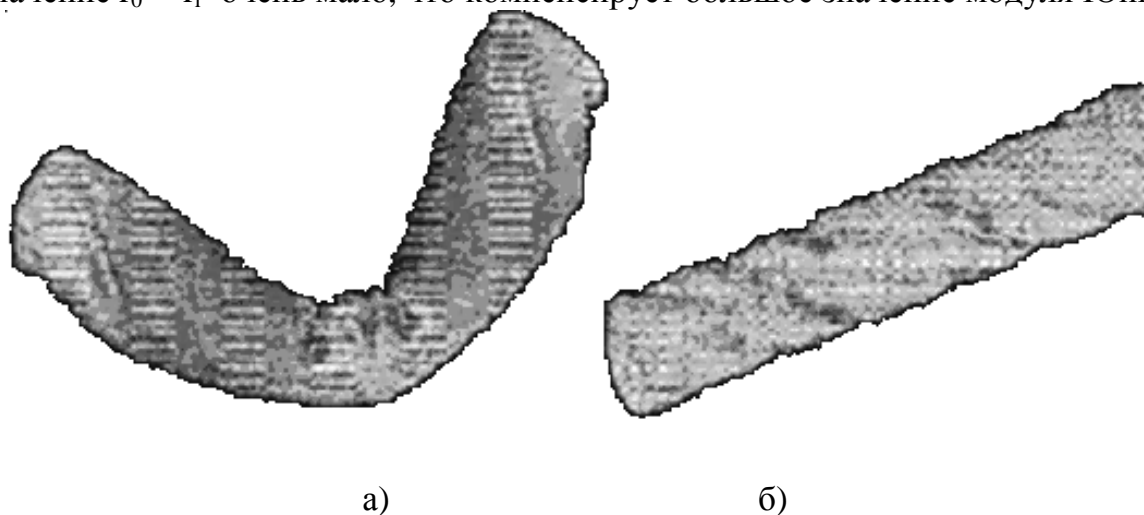


Рис. 17. Деформация однослойной нанотрубки: а) изгиб; б) кручение.

Углеродные нанотрубки очень упруги при изгибе. Они не ломаются и могут распрямиться без повреждений, т.к. имеют мало структурных дефектов (дислокаций, границ зерен). Кроме того, углеродные кольца стенок в виде правильных шестиугольников при изгибе меняют свою структуру. Это является следствием того факта, что углерод-углеродные связи sp^2 -гибридизованы и могут перегибридизоваться при изгибе.

Предел прочности характеризует необходимое для разрыва напряжение. Предел прочности однослойной углеродной нанотрубки составляет 45 ГПа, в то время как для стали он составляет 2 ГПа. Многослойные нанотрубки тоже имеют лучшие, чем у стали, механические свойства, но они меньше, чем у однослойных нанотрубок. Например, многослойная нанотрубка диаметром 200 нм имеет предел прочности 7 ГПа и модуль Юнга 0.6 ТПа.

В Таблице 1 приведены основные механические характеристики однослойных углеродных нанотрубок в сравнении с известными материалами.

Таблица 1.

Материал	Модули упругости, ГПа	Сопротивление на разрыв, ГПа	Плотность, г/см ³
Однослойная углеродная нанотрубка	1210	65.0	1.4
Графитовый стержень	152	2.1	1.6
Титан	103	0.9	4.5
Алюминий	69	0.5	2.7
Сталь	207	0.8	7.8

4.2. Проводимость углеродных нанотрубок

Измерение проводимости индивидуальных нанотрубок представляет собой довольно трудную задачу. Приходится применять атомно-силовой микроскоп, и оказывается, что сопротивление металлических нанотрубок составляет ~ 1–10 кОм. Это сопротивление соответствует баллистическому механизму переноса заряда, при котором электрон преодолевает кусок трубки примерно в 1 мкм без рассеивания, так как это происходит в вакууме. Проводимость нанотрубок зависит не только от хиральности, но и от дефектов структуры и наличия присоединённых радикалов (ОН, СО и др.).

Кроме того, проводимость нанотрубки чрезвычайно чувствительна к степени ее изгиба. Например, проводимость прямолинейного участка однослойной нанотрубки, не испытывающей внешней нагрузки, при комнатной температуре составляет ~100 мкСм, что соответствует сопротивлению 10 кОм. По порядку величины это значение сравнимо с величиной единичного кванта проводимости $4e^2/h=154$ мкСм, который соответствует баллистическому механизму переноса заряда (электроны преодолевают длину нанотрубки без рассеяния). В результате изгиба нанотрубки на угол 105° ее проводимость уменьшается в 100 раз, достигая значения ~ 1 мкСм. Изучение температурной зависимости проводимости изогнутого участка нанотрубки позволило установить, что через место изгиба электрон туннелирует (рис. 18). Поэтому, изгибая трубку, можно создать в ней туннельный переход и приборы на его основе.

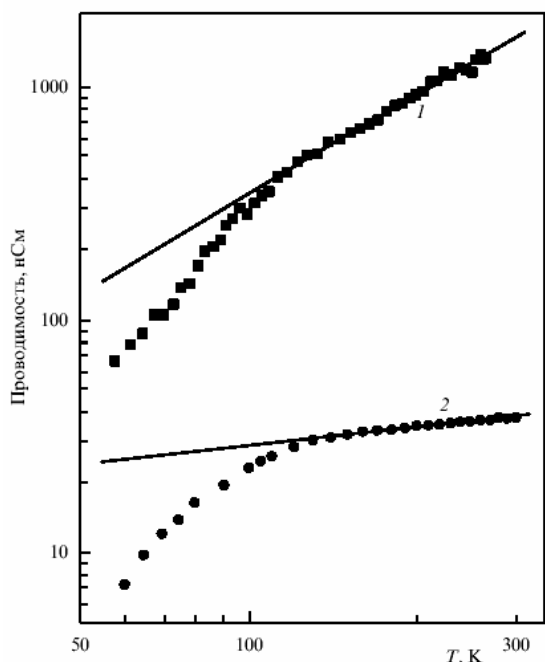


Рис. 18. Температурная зависимость проводимости однослойной металлической нанотрубки, измеренная четырехзондовым (1) и двухзондовым (2) методами.

Если нанотрубка обладает полупроводниковыми свойствами, то ее сопротивление составляет десятки МОм, и оно не распределено равномерно по длине, как у нормального проводника, а сосредоточено в «барьерах», расположенных примерно через каждые 100 нм вдоль длины нанотрубки.

Согласно полученным экспериментальным данным сопротивление многослойной нанотрубки с хорошей точностью описывается соотношением:

$$R = \frac{\rho L}{\pi D},$$

где: $\rho \approx 700$ Ом/см – удельное сопротивление нанотрубки; L – длина нанотрубки; D – диаметр нанотрубки.

Такое поведение сопротивления указывает на небаллистический характер переноса заряда. Поэтому многослойная нанотрубка представляет собой двумерный проводник длиной L и толщиной D .

В зависимости от хирального угла нанотрубка может обладать либо металлическими, либо полупроводниковыми свойствами. При этом такая важная характеристика электронных свойств полупроводящей нанотрубки, как ширина запрещенной зоны ϵ_g , определяется ее геометрическими параметрами: индексами хиральности и диаметром (рис. 19).

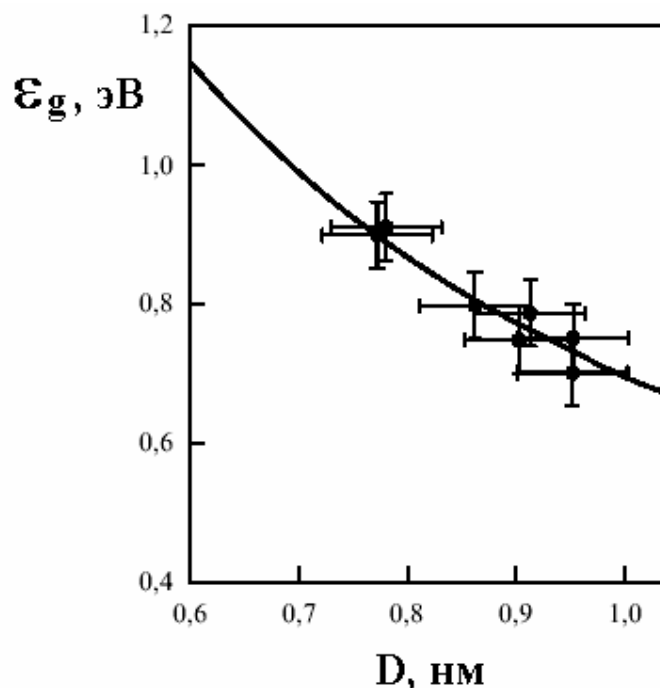


Рис. 19. Зависимость ширины запрещенной зоны полупроводниковой нанотрубки от диаметра.

4.3. Автоэлектронная эмиссия

Явление автоэлектронной эмиссии возникает при воздействии на проводник внешнего электрического поля. В результате такого воздействия электроны проводимости, первоначально находящиеся в прямоугольной потенциальной яме, получают возможность выхода за пределы проводника вследствие квантового туннелирования.

Традиционно считается, что источником автоэлектронной эмиссии служит вершина нанотрубки, в окрестности которой напряженность поля максимальна. Однако последние исследования показали, что и боковая поверхность нанотрубок служит хорошим источником автоэлектронной эмиссии. При определенных ориентациях нанотрубки относительно направления электрического поля вклад эмиссии с боковой поверхности в полный ток автоэлектронной эмиссии может оказаться определяющим, т.к. площадь боковой поверхности заметно превышает площадь поверхности вершины. Работа выхода электронов для однослойных нанотрубок составляет $\sim 4-5$ эВ, для многослойных $\sim 0.2-7$ эВ.

На рис. 20 приведены вольт-амперные характеристики эмиттеров, полученные при различных ориентациях нанотрубок относительно подложки.

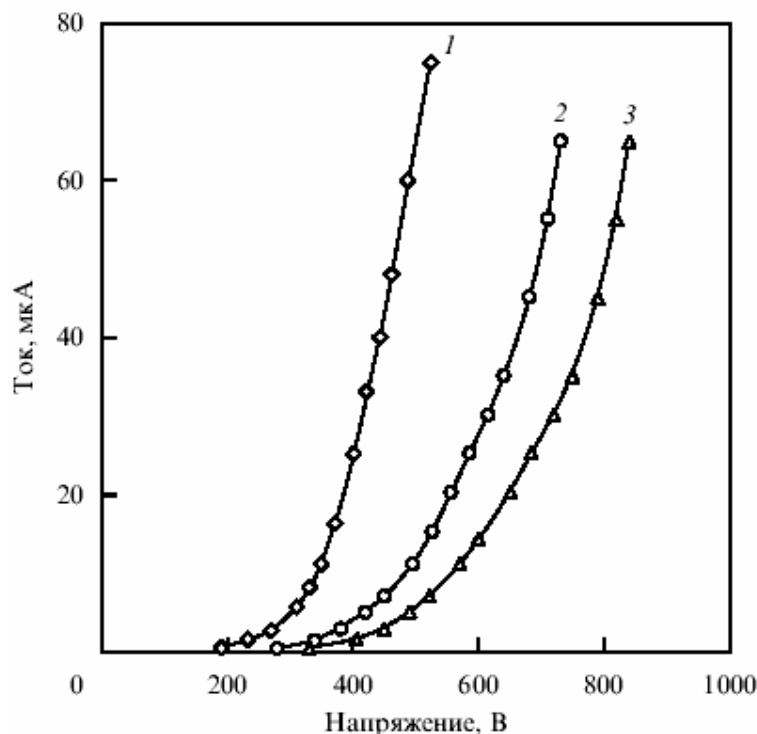


Рис. 20. Вольт-амперные автоэмиссионные характеристики многослойных нанотрубок: 1- ориентация параллельно плоскости подложки; 2- ориентация под углом 45° к плоскости подложки; 3- ориентация перпендикулярно плоскости подложки.

Пороговое значение напряженности электрического поля, определяемое по минимальному эмиссионному току 0.5 мкА , составляет 2 В/мкм (ориентация параллельно плоскости подложки), 3.5 В/мкм (ориентация под углом 45°) и 4 В/мкм (ориентация перпендикулярно плоскости подложки). Значение плотности эмиссионного тока в 1 мА/см^{-2} , необходимое для работы плоских дисплеев, достигается при напряженностях электрического поля 4.2 , 6 и 6.8 В/см для трех ориентаций соответственно.

4.4. Капиллярные явления в углеродных нанотрубках

Нанотрубка является поверхностной структурой, и вся ее масса заключена в поверхности слоев. Поэтому нанотрубки имеют аномально высокую удельную поверхность, что определяет особенности их сорбционных и электрохимических характеристик. Расстояния между слоями в многослойной углеродной нанотрубке (3.4 нм) достаточно, чтобы внутри трубки разместилось некоторое количество вещества. Таким образом, нанотрубку можно рассматривать как емкость для хранения газообразных, жидких или твердых веществ.

Вещество проникает внутрь нанотрубки под действием внешнего давления, либо в результате капиллярного эффекта и удерживается внутри нее благодаря сорбционным силам. Графитовая оболочка обеспечивает хорошую защиту находящегося в ней материала от внешнего воздействия.

5. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

5.1. Наномеханизмы и наномашины

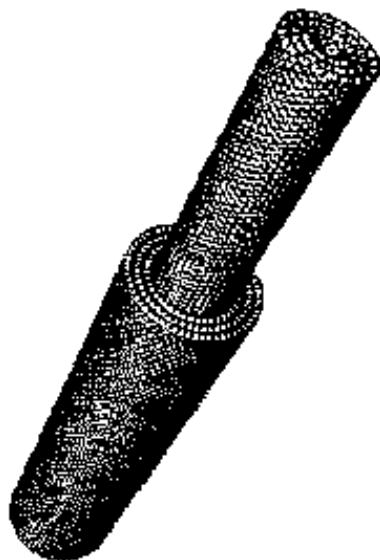


Рис. 21. Нанопоршень из многослойной нанотрубки.

Если вытянуть внутреннюю часть концентрического набора углеродных нанотрубок и отпустить, то такой "поршень" начнет колебаться назад и вперед на гигагерцовых частотах - быстрее, чем любой другой механический осциллятор.

Если вытянуть внутреннюю часть концентрического набора углеродных нанотрубок и отпустить, то такой "поршень" начнет колебаться назад и вперед на гигагерцовых частотах - быстрее, чем любой другой механический осциллятор.

После срезания нескольких слоев с одного из концов многослойной CNT, внутренние нанотрубки могут скользить назад и вперед с очень малым трением. Именно это требуется для механических частей наноразмерных механизмов. Эксперименты также продемонстрировали, что силы Ван-дер-Ваальса, которые притягивают все нейтральные атомы друг к другу, заставляют внутренние нанотрубки втягиваться назад, внутрь оболочки (рис. 21). Теоретически показано, что после того, как внутренние трубки («сердечник») будут вытянуты и отпущены, они втянутся внутрь, и, пройдя сквозь оболочку из внешних трубок, выступят с другой стороны. Низкое трение между трубками - сила притяжения составляет не более 10^{-10} Н, позволяет частоте колебаний, возникающих как следствие, достигать частот, соизмеримых с тактовой частотой процессора Pentium 4.

Зубчатая передача представляет собой углеродную нанотрубку диаметром

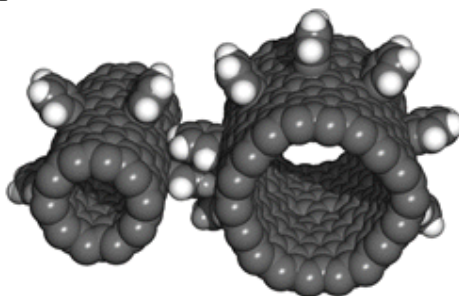


Рис. 22. Углеродные шестерни на нанотрубках с бензольными зубцами.

Теоретические исследования структуры и условий функционирования наномашин показывают, что зубчатые передачи на основе углеродных

нанотрубок очень прочные и могут функционировать даже при проскальзывании, т.е. в условиях, когда обычная зубчатая передача не работает.

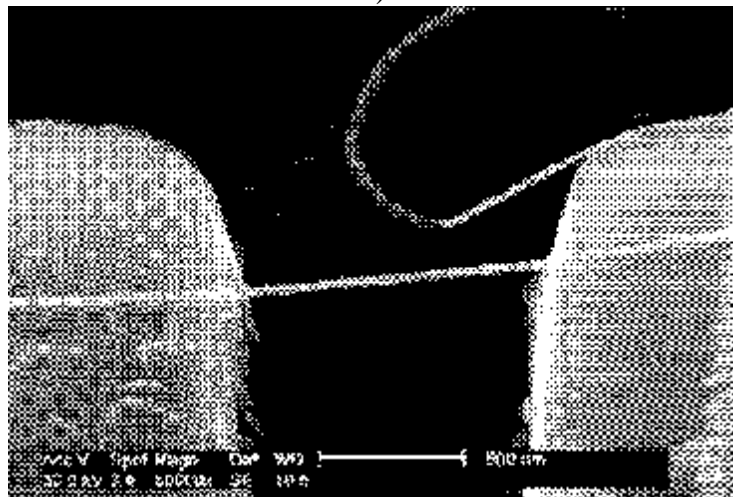
На основании результатов компьютерного моделирования ученые пришли к выводу, что нанопередатчик или другие наномашинки в будущем могут быть использованы для контроля мощности лазерного излучения или контроля внешних электрических полей.

5.2. Углеродные нанотрубки в электронике

Межсоединения. Сегодня электрические соединения внутри чипов обеспечиваются тончайшими медными контактами. Производство микросхем подошло к пределу дальнейшего уменьшения электрических проводников, соединяющих различные компоненты одного кремниевого чипа. В настоящее время электронно-лучевая литография позволяет создавать линии шириной 50 нм и несколько нм толщиной. Из-за уменьшения размеров транзисторов и увеличения их числа возникают проблемы с высокой плотностью электрического тока, который должен проходить через все более тонкие проводники. Поэтому однослойные нанотрубки диаметром 0.6 – 1.8 нм (1.4 нм типичный), выращиваемые на кремниевой подложке, могут послужить в качестве соединительных проводников в микросхемах (рис. 23).



а)



б)

Рис. 23. Углеродная нанотрубка между двумя металлическими проводниками:
а) модельное представление; б) ТЕМ-изображение.

Кроме миниатюрных размеров углеродные нанотрубки более термостойчивы - до 2800 °С в вакууме и до 750 °С на воздухе, чем

металлические провода в микросхемах, которые плавятся при 600 – 1000 °С. Теплопроводность нанотрубок составляет до 6000 Вт/м·К, что превышает теплопроводность алмаза (3320 Вт/м·К).

Электронные устройства на нанотрубках. Рекорд подвижности электронов в углеродных нанотрубках при комнатной температуре составляет 100000 см²/В·с. Это значение подвижности на 23% превышает значение подвижности в InSb (77000 см²/В·с); в 70 раз выше, чем в кремнии (1500 см²/В·с). Углеродные нанотрубки с такой высокой подвижностью можно использовать для изготовления более быстродействующих транзисторов (рис. 24) и более чувствительных химических сенсоров.

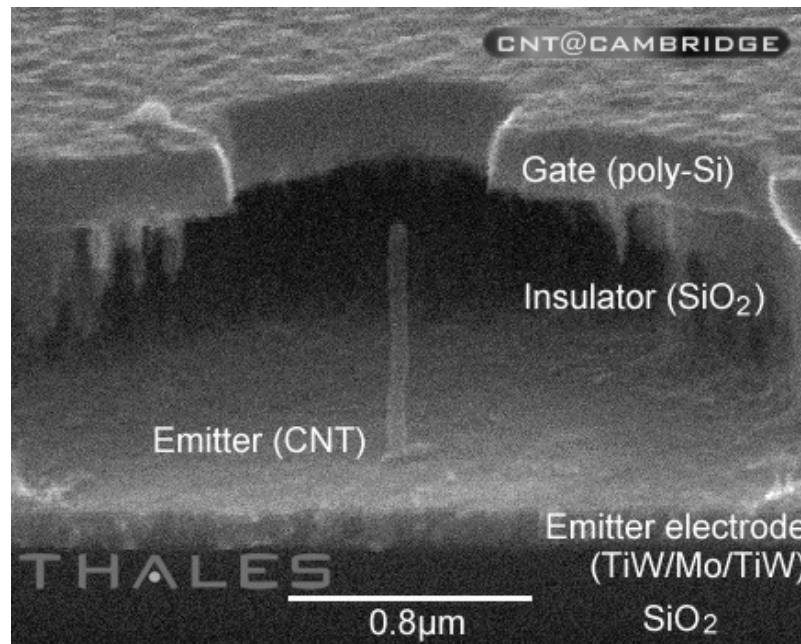


Рис. 24. Полевой транзистор на основе углеродных нанотрубок.

В настоящее время созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: при приложении запирающего напряжения в несколько вольт проводимость однослойных нанотрубок изменяется на 5 порядков.

Ширина запрещенной зоны полупроводниковых нанотрубок зависит от диаметра нанотрубки и варьируется в пределах 0.7-1.1 эВ.

При создании светодиода на основе нанотрубок реализована трехконтактная конфигурация полевого транзистора с использованием SiO₂ подложки в качестве базы (рис. 25).

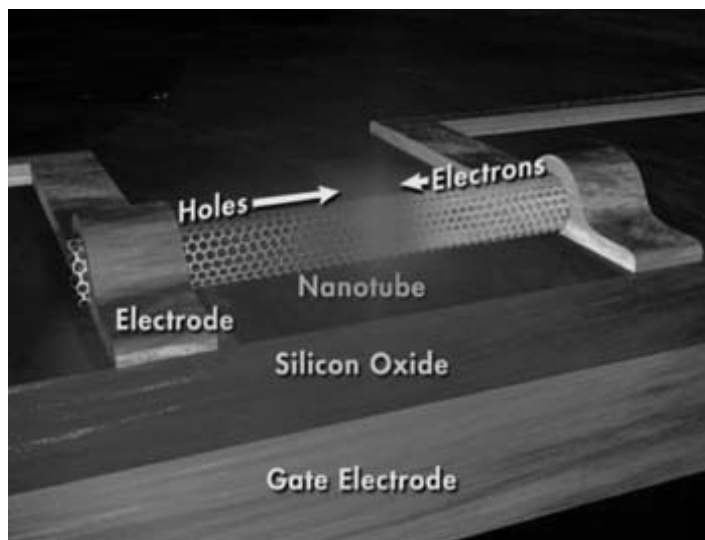


Рис. 25. ИК-светодиод из нанотрубки.

Испускание фотона происходит при рекомбинации носителей тока с разноименными зарядами: электронов и дырок. Электроны и дырки инжектируются в нанотрубку в области контакта с металлическим проводником эмиттера и коллектора за счет создания барьера Шоттки и, следовательно, контактной разности потенциалов соответствующего знака.

CNT-литография. Углеродные нанотрубки могут быть использованы как зонды для атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 26). Такие зонды для АСМ могут применяться для создания наншаблонов для нанолитографии или для травления поверхности в производстве полупроводниковых чипов. Т.о., CNT-зонд используется как нанопинцет для удаления атомов с поверхности.

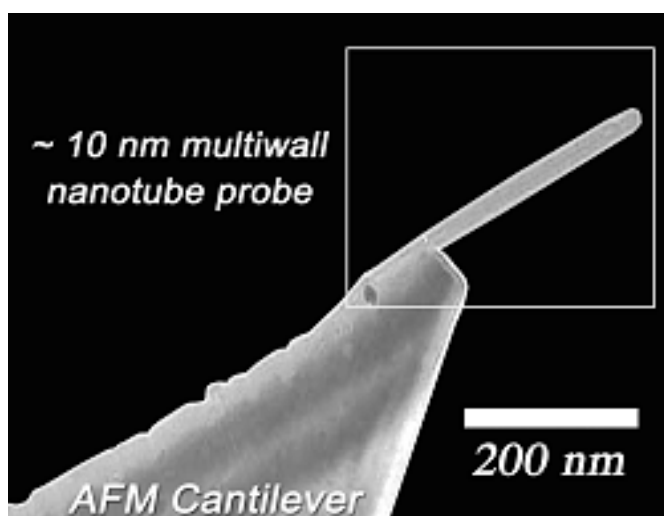


Рис. 26. Кантелефер для АСМ-микроскопии с наконечником из многослойной углеродной нанотрубки.

В режиме травления нанозонд слегка касается поверхности и селективно удаляет атомы с поверхности. В режиме идентифицирования CNT-зонд надавливает на поверхность, чтобы сделать нанодырку.

Y-соединения нанотрубок. Разветвленные сетки в биологических дендритных нейронных деревьях обеспечивают переключение сигнала и процессы в точках ветвления. Аналогичная концепция может быть предложена для создания разветвлений аналогично дендритоподобным нейронам, но сделанных из однослойных или многослойных углеродных нанотрубок.

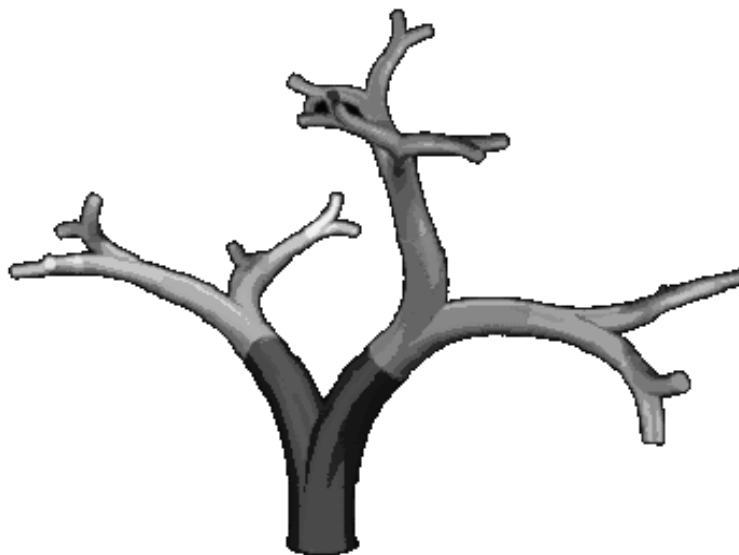


Рис. 27. Модель нейронного дерева на основе Y-соединения нанотрубок.

На рис. 27 рассмотрена модель 4-х уровневое нейронного дерева, сделанного из 14 углеродных нанотрубок, связанных Y-соединением. На каждом уровне ветвления Y-соединение показаны одним цветом.

5.3. Холодные катоды на углеродных нанотрубках

видимый свет

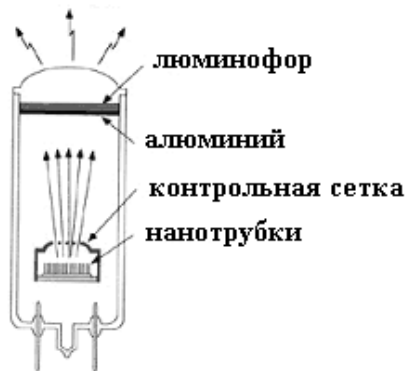


Рис. 28.

Катодолуминесцентная лампа на нанотрубках.

Автоэлектронные катоды на нанотрубках имеют очевидные достоинства - ничтожный разброс по высоте (10 нм), равномерность токосъема по поверхности, высокая плотность тока эмиссии (до 1 А/см²), возможность варьировать геометрию катода, рекордно низкую работу выхода (~1 эВ). Потребляемая мощность с рабочими характеристиками, сравнимыми с аналогичными характеристиками лампы накаливания мощностью 100 Вт, составит всего лишь 25 Вт. Металлические нанотрубки активируют люминофор при 1-3 В/мкм, в то время как молибденовые нити при 50-100 В/мкм.

5.4. Топливные элементы на основе

углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки могут быть использованы в изготовлении элементов питания. Литий, являющийся носителем заряда в некоторых элементах питания, можно помещать внутрь нанотрубок. По оценкам, можно разместить один атом лития на каждые шесть атомов углерода. Другим возможным применением нанотрубок является хранение в них водорода, что может быть использовано при конструировании топливных элементов как источников электрической энергии. Топливный элемент состоит из двух электродов и специального электролита, пропускающего ионы водорода между ними, но не пропускающего электроны. Водород направляется на анод, где он ионизируется. Свободные электроны движутся к катоду по внешней цепи, а ионы водорода диффундируют к катоду через электролит, где из ионов, электронов и кислорода образуются молекулы воды.

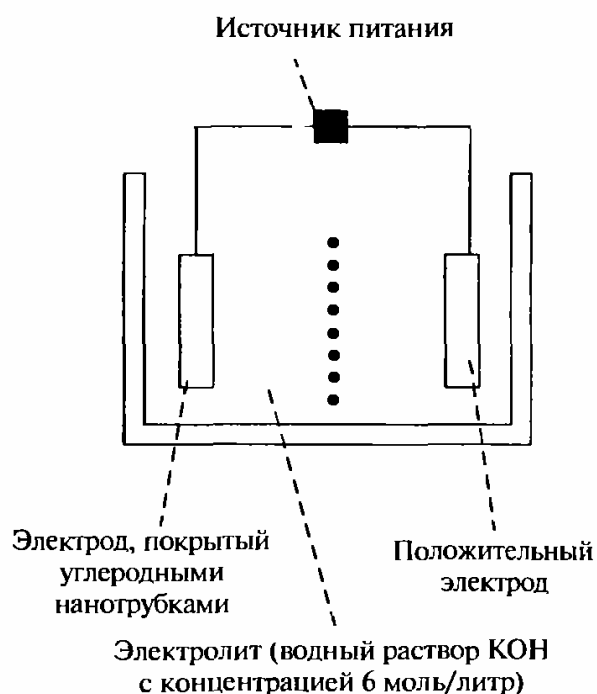


Рис. 29. Электрохимическая ячейка, используемая для введения водорода в углеродные нанотрубки.

Метод заполнения углеродных нанотрубок водородом состоит в использовании электрохимической ячейки (рис. 29). Однослойные нанотрубки в форме листа бумаги составляют отрицательный электрод в растворе электролита КОН. Другой электрод состоит из $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Вода электролита разлагается с образованием ионов водорода (H^+), движущихся к отрицательному электроду из нанотрубок. Наличие связанного в нанотрубках водорода определяется по падению интенсивности рамановского рассеяния. Для работы такого топливного элемента углеродная нанотрубка должна поглощать 6.5 % водорода по весу. В настоящее время в нанотрубку удалось поместить только 4 % водорода по весу.

5.5. Биосенсоры из углеродных нанотрубок

Биосенсоры позволяют быстро и с высокой селективностью проводить автоматизированный анализ сложных по составу объектов, определяя глюкозу, холестерин, мочевины, аминокислоты и другие вещества, содержание которых может изменяться от 0.05мкг/л до 1мг/л.

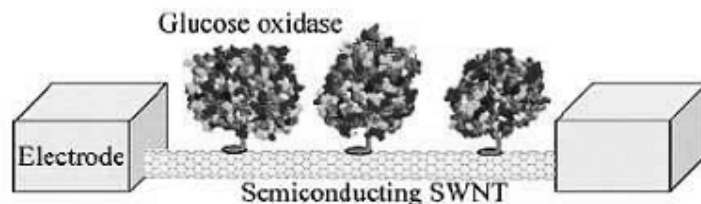


Рис. 30. Имобилизация фермента глюкозооксидазы GO_x на единичной однослойной CNT полупроводникового типа, выращенной методом CVD на Si/SiO_2 подложке.

Биосенсор на индивидуальной однослойной углеродной нанотрубке позволяет контролировать pH среды до 0.1 (рис. 30). Имобилизация GO_x существенно уменьшила проводимость однослойной CNT. CNT, покрытые GO_x , в отличие от исходных, оказались очень чувствительными к pH среды в диапазоне 4 - 5.5. При pH=5.5 их проводимость значительно повышается, причем изменения проводимости обратимы. Также выяснилось, что покрытые GO_x полупроводниковые CNT чувствительны к b-D-глюкозе - при ее добавлении в раствор их проводимость увеличивается (для исходных нанотрубок без GO_x такой эффект отсутствует).

Задание

Построить структурную модель углеродной нанотрубки с металлическими и полупроводниковыми свойствами с заданными индексами хиральности (n,m).

Вариант	(n,m)
1	(9,0); (7,3)
2	(5,5); (8,1)
3	(11,0); (7,4)
4	(7,7); (6,4)
5	(12,0); (8,2)
6	(8,8); (5,4)
7	(13,0); (7,1)
8	(9,9); (7,2)
9	(14,0); (5,3)
10	(10,10); (6,2)
11	(15,0); (7,5)
12	(12,12); (6,3)
13	(16,0); (7,4)
14	(11,11); (8,5)
15	(17,0); (6,1)
16	(13,13); (6,5)
17	(10,1); (12,0)
18	(9,2); (7,7)
19	(8,4); (18,0)
20	(9,2); (8,8)

Порядок выполнения работы:

- 1) Рассчитать угол хиральности углеродных нанотрубок.
- 2) Рассчитать диаметр углеродных нанотрубок.
- 3) Определить структурный тип углеродных нанотрубок.
- 4) Рассчитать элементарную ячейку данной нанотрубки
- 5) Определить какими свойствами обладает данная нанотрубка.
- 6) На основе полученных результатов изготовить модель углеродной нанотрубки, используя бумажную модель графенового слоя.

Пример 1.**Модель кресельной нанотрубки**

Индексы хиральности нанотрубки (6,6).

1) Угол хиральности рассчитываем по формуле:

$$\cos \alpha = \frac{(2n + m)}{2\sqrt{n^2 + nm + m^2}} = \frac{(2 \cdot 6 + 6)}{2\sqrt{6^2 + 6 \cdot 6 + 6^2}} = 0.86$$

$$\alpha = 30^\circ$$

2) Диаметр нанотрубки (6,6) рассчитываем по формуле:

$$D = 0.246 \sqrt{(n^2 + nm + m^2)} / \pi = 0.246 \sqrt{6^2 + 6 \cdot 6 + 6^2} / 3.14 = 0.81 \text{ нм}.$$

3) Данная нанотрубка имеет индексы хиральности (6,6), т.е. $n=m$, следовательно, она относится к кресельным.

4) Для кресельных нанотрубок ширина ячейки (рис. 1.1) равна величине элементарного вектора \mathbf{a} графитовой сетки - $|\mathbf{a}|=0.246$ нм. Величина вектора \mathbf{C} равна:

$$|\mathbf{C}| = 0.246 \sqrt{n^2 + n \cdot m + m^2} = 0.246 \sqrt{6^2 + 6 \cdot 6 + 6^2} = 2.56 \text{ нм}.$$

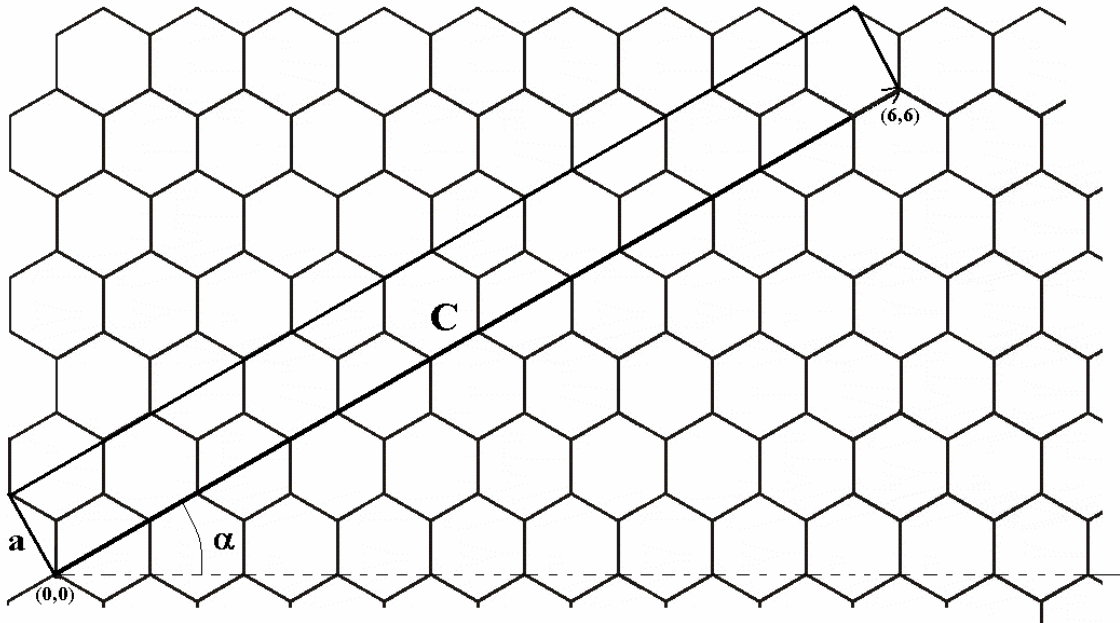


Рис. 1.1. Графеновый слой с элементарной ячейкой для кресельной трубки (6,6).

5) Все кресельные нанотрубки обладают металлическими свойствами.

Пример 2.

Модель зигзажной нанотрубки

Индексы хиральности нанотрубки (10,0).

1) Угол хиральности рассчитываем по формуле:

$$\cos \alpha = \frac{(2n + m)}{2\sqrt{n^2 + nm + m^2}} = \frac{(2 \cdot 10)}{2\sqrt{10^2}} = 1$$

$$\alpha = 0^\circ$$

2) Диаметр нанотрубки (10,0) рассчитаем по формуле:

$$D = 0.246\sqrt{(n^2 + nm + m^2)}/\pi = 0.246\sqrt{10^2}/3.14 = 0.78 \text{ нм}.$$

3) Данная нанотрубка имеет индексы хиральности (10,0), т.е. $m=0$, следовательно, она относится к зигзажным.

4) Для зигзажных нанотрубок ширина ячейки (рис. 1.2) равна $a\sqrt{3} = 0.246\sqrt{3} = 0.43 \text{ нм}$. Величина вектора \mathbf{C} равна:

$$|\mathbf{C}| = 0.246\sqrt{n^2 + n \cdot m + m^2} = 0.246\sqrt{10^2} = 2.46 \text{ нм}.$$

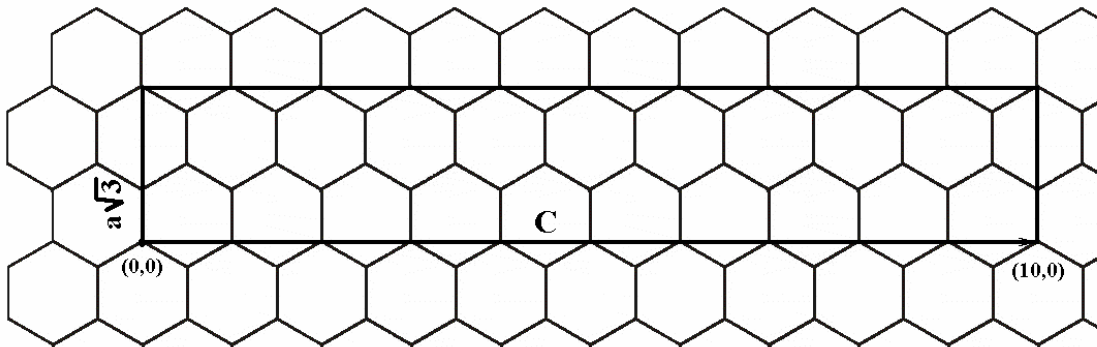


Рис. 1.2. Графеновый слой с элементарной ячейкой для зигзажной трубки (10,0).

5) Индекс хиральности $n=10$ не кратен 3, следовательно, данная нанотрубка обладает полупроводниковыми свойствами.

Пример 3.

Модель хиральной нанотрубки

Индексы хиральности нанотрубки (5,1).

1) Угол хиральности рассчитываем по формуле:

$$\cos \alpha = \frac{(2n + m)}{2\sqrt{n^2 + nm + m^2}} = \frac{(2 \cdot 5 + 1)}{2\sqrt{5^2 + 5 \cdot 1 + 1^2}} = 0.99$$

$$\alpha = 8^\circ$$

2) Диаметр нанотрубки (5,1) рассчитываем по формуле:

$$D = 0.246 \sqrt{(n^2 + nm + m^2)} / \pi = 0.246 \sqrt{5^2 + 5 \cdot 1 + 1^2} / 3.14 = 0.44 \text{ нм}.$$

3) Данная нанотрубка имеет индексы хиральности (5,1), следовательно, она относится к хиральным.

4) Для хиральной нанотрубки (5,1) ширина ячейки (рис. 1.3) определяется следующим образом: $n-m \neq 3d_H$, где d_H наибольший делитель для индексов n и m . В нашем случае $5-1 \neq 3$ (наибольший делитель для 5 и 1 будет 1). Ширина ячейки:

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot C}{d_H} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0.246 \sqrt{5^2 + 5 \cdot 1 + 1^2}}{1} = 2.37 \text{ нм}$$

Величина вектора C равна:

$$|C| = 0.246 \sqrt{n^2 + n \cdot m + m^2} = 0.246 \sqrt{5^2 + 5 \cdot 1 + 1^2} = 1.37 \text{ нм}$$

5) Разность индексов хиральности $n-m = 5-1 = 4$ не кратна 3, следовательно, данная нанотрубка обладает полупроводниковыми свойствами.

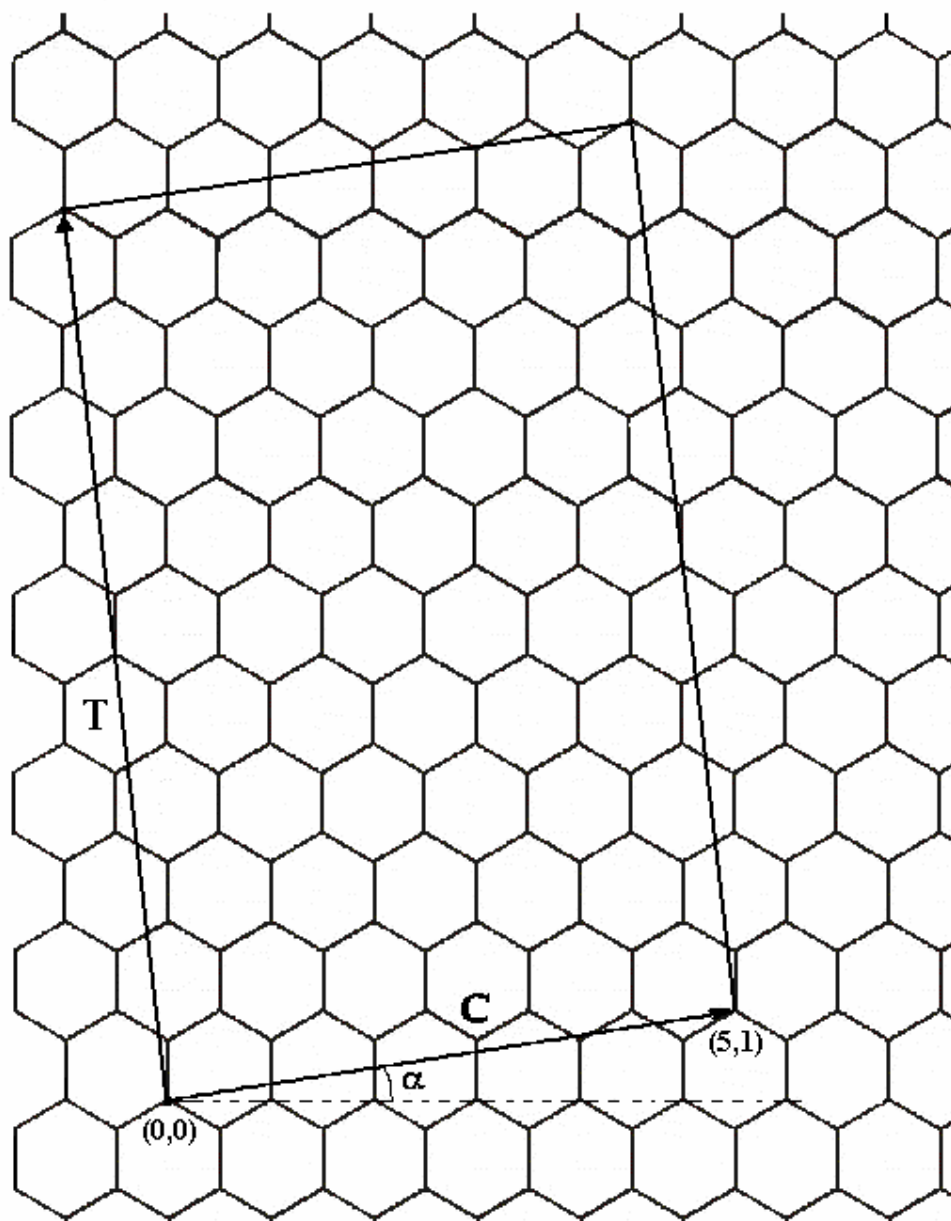


Рис. 1.3. Графеновый слой с элементарной ячейкой для хиральной трубки (5,1).

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис. – М. : Техносфера, 2003. – 366 с.
2. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М. : Техносфера, 2004. – 328 с.

Дополнительная литература

1. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / А.В. Елецкий // УФН. – 2002. – Т. 172, № 4. – С. 401-438.
2. Хатуль Л. Электроны и углеродные трубы / Л. Хатуль // Химия и жизнь. – 2004. – № 6. – С. 22-25.
3. Дьячков П.Н. Материалы для компьютеров XXI века / П.Н. Дьячков // Природа. – 2000. – № 11. – С. 12-22.
4. Odom T.W. Structure and Electronic Properties of Carbon Nanotubes / T.W. Odom [и др.] // J. Phys. Chem. B. – 2000. – V. 104, N 13. – P.2794 -2809.

ВОПРОСЫ

1. В каком году и кем были открыты углеродные нанотрубки?
2. Каким методом получены первые углеродные нанотрубки?
3. Какие существуют другие методы получения углеродных нанотрубок?
4. Перечислите методы наблюдения нанотрубок.
5. Дайте определение однослойной нанотрубки?
6. Каковы характерные размеры однослойных нанотрубок?
7. Что такое хиральность?
8. Какими параметрами характеризуется хиральность нанотрубок?
9. Каковы индексы хиральности кресельных нанотрубок?
10. Каковы индексы хиральности зигзажных нанотрубок?
11. Каковы индексы хиральности хиральных нанотрубок?
12. Какова структура нанотрубок с металлической проводимостью?
13. Какова структура полупроводниковых нанотрубок?
14. Дайте определение многослойной углеродной нанотрубки?
15. Каков характерный диаметр многослойных нанотрубок?
16. Какая связь осуществляется между слоями в многослойной нанотрубке?
17. Какие существуют типы многослойных нанотрубок?
18. До каких температур нанотрубки устойчивы в вакууме и на воздухе?
19. Сравните модули Юнга углеродных нанотрубок и стали?
20. Какова теплопроводность нанотрубок?
21. Каково значение электропроводности для кресельных нанотрубок?
22. Каким параметром управляется ширина запрещенной зоны в полупроводниковых нанотрубках?
23. Каковы особенности механических свойств нанотрубок?
24. Назовите области применения металлических углеродных нанотрубок.
25. Назовите области применения полупроводниковых углеродных нанотрубок.
26. Назовите области применения эмиссионных свойств углеродных нанотрубок.
27. Назовите области применения капиллярности углеродных нанотрубок.
28. Где могут быть применены Y-соединения углеродных нанотрубок?
29. Какие наномеханизмы можно создать из углеродных нанотрубок?

Учебное издание
НАНОТЕХНОЛОГИИ В ФИЗИКЕ
Учебно-методическое пособие для вузов

Составители: Битюцкая Лариса Александровна,
Машкина Екатерина Сергеевна,
Бормонтов Евгений Николаевич

Редактор Воронина А.П.

Подписано в печать 31.07.2006. Формат 60x84/16. Усл. п. л. 2,5. Тираж 50. Заказ 599.

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ком.43, тел.208-853.
Отпечатано в лаборатории оперативной печати ИПЦ ВГУ.