

Скальвающие напряжения  $\sigma_{xy}$  так же, как и напряжения  $\sigma_{yy}$ , знакопеременны по отношению к параметрам  $d$  и  $h$ . Однако, в этом случае при  $d < 2$  мкм напряжения  $\sigma_{xy}$  положительны, а при  $d > 2$  – отрицательны.

Напряжения  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{xz}$  в зависимости от параметров  $d$  и  $h$  имеют схожий вид. Отличие наблюдается в численных значениях изолиний в одинаковых областях зависимостей от  $d$  и  $h$ . При малых значениях этих параметров напряжения больше по величине, чем при больших значениях  $d$  и  $h$ . Знак напряжения  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{xz}$  в рассматриваемом интервале значений  $d$  и  $h$  не меняют.

Конфигурация напряжений такая же, как и у напряжений  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{xz}$ , но в отличие от них контуры изолиний напряжений  $\sigma_{yz}$  замыкаются на оси  $d$ , в то время как у напряжений  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{xz}$  - на оси  $h$ .

Таким образом, на основании дислокационной мезоскопической модели исследовано напряженное состояние у вершины клиновидного двойника. Показано, что напряжения существенно зависят от баланса плотностей двойникоующих дислокаций на противоположных двойниковых границах. Знак напряжения у вершины двойника меняют не только с изменением баланса плотностей дислокаций на границах, но и при определенном соотношении между параметрами  $d$  и  $h$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. - М.: АН СССР, 1960. - 262 с. 2. Остриков О.М. Использование полипараксилиленовых тонких пленок при исследовании пластической деформации монокристаллов висмута // Прикладная механика и техническая физика. - 2006. - Т. 47, № 4. - С. 162 - 166.

УДК 539.1

Колешко В.М., Дейнак Д.А.

## НАНОУГЛЕРОД: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Нанотехнология – наука об изготовлении и свойствах элементов техники на атомном и молекулярном уровне. Важнейшим элементом этой науки является углерод, а именно его аллотропные формы – нанотрубки и фуллерены. Углеродные нанотрубки являются уникальным материалом, позволяющим проверять теории квантовых явлений, и обладающим уникальными и неповторимыми свойствами. Именно эти свойства привлекают внимание ученых всего мира, с целью создания приборов и машин на наноуровне.

Углерод – имеет несколько аллотропных форм, некоторые из них известны с древних времен (алмаз, графит), а некоторые открыты только 10-20 лет назад (графины, фуллерены, нанотрубки) (рис. 1) [1-10]. Аллотропия, от греч. *allos* - иной, *trpos* - поворот, свойство, существование одного и того же элемента в виде различных по свойствам и строению структур.

Основным состоянием атома углерода является состояние с максимальным числом неспаренных электронов. Образованию химической связи между атомами углерода предшествует переход в возбужденное состояние с максимальным числом неспаренных электронов по схеме  $2s^2 2p^2 \rightarrow 2s^1 2p^1 2p^1 2p^1$ . Атомы углерода, соединяясь, образуют ковалентные связи, в результате чего возможна  $sp$ -,  $sp^2$ -,  $sp^3$ -гибридизация.

При  $sp^3$ -ции валентных электронов образуются четыре равноценные  $\sigma$ -связи, направленные к вершинам правильного тетраэдра. Так связаны атомы в алмазе и лонсдейлите.

При  $sp^2$ -гибридизации каждый атом углерода образует три  $\sigma$ -связи в одной плоскости и, кроме того, дополнительно имеет по одному  $p$ -электрону. С такой связью существуют атомы углерода в графите. Возможна также  $sp$ -гибридизация атомов углерода, при которой образуются две  $\sigma$ -связи (Существуют аморфные и частично кристаллические переходные формы углерода (сажа, кокс, стеклоуглерод и др.) [6], в которых сочетаются различные типы связей (рис. 3).

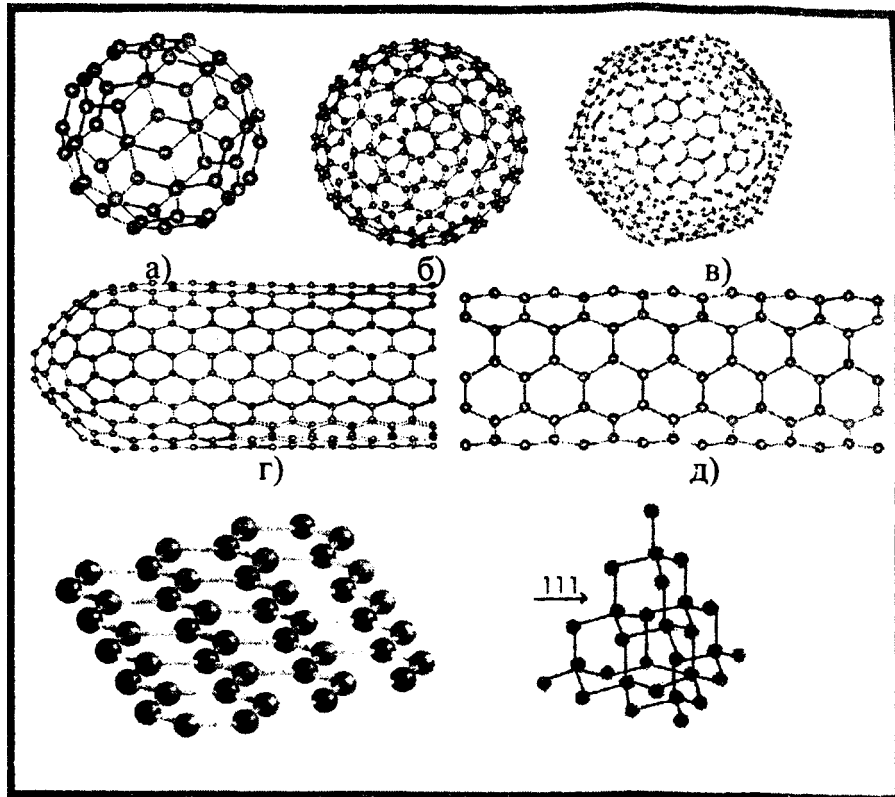


Рисунок 1- Кристаллические структуры различных аллотропов углерода: а) фуллерен  $C_{60}$ , б) фуллерен  $C_{240}$ , в) фуллерен  $C_{540}$ , г) нанотрубка с закрытым концом, д) нанотрубка с открытым концом, е) графин, ж) алмаз [5].

### УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

При частичном термическом разрушении слоев графита наряду с молекулами фуллеренов образуются и длинные трубки, поверхность которых составлена из правильных шестиугольников (или гексагонов). Углеродные нанотрубки — протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких микрон состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и заканчиваются обычно полу-сферической головкой.

Как следует из определения, основная классификация нанотрубок проводится по способу сворачивания графитовой плоскости. Способ предложен Хамадой и др. [7]. Структура нанотрубок описывается двумя целыми числами  $(m, n)$ , указывающими координаты шестиугольника, который в результате сво-

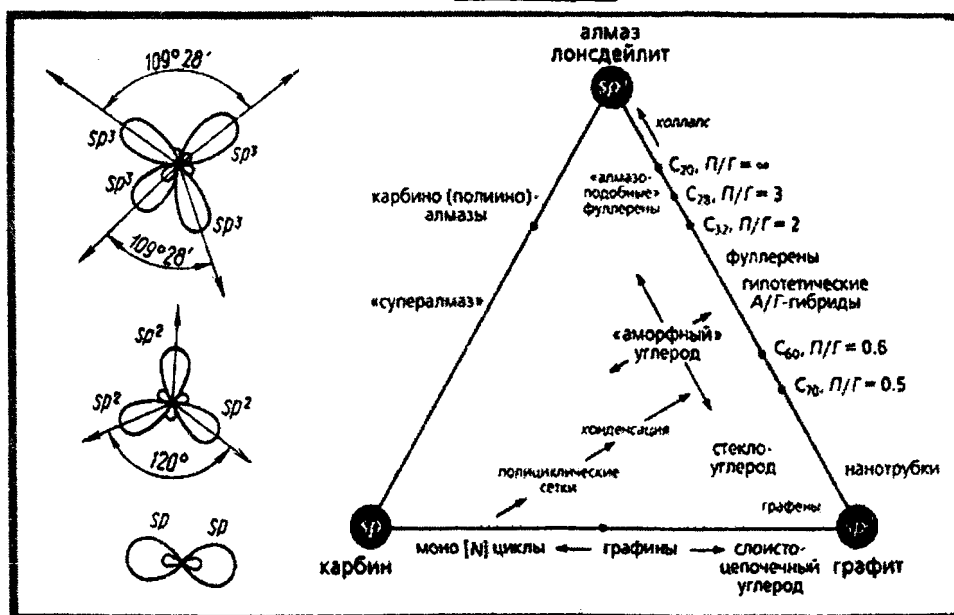


Рисунок 2 - Формы  $sp^n$ - гибридных орбиталей

рачивания плоскости должен совпасть с шестиугольником, находящимся в начале координат (рис. 4). Также эти числа можно обозначить как параметры так называемого хирального вектора, который задается следующей формулой:

$$\vec{c} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2,$$

где  $\vec{a}_1, \vec{a}_2$  - элементарные векторы трансляций графитовой плоскости.

Другой способ обозначения хиральности состоит в указании угла  $\theta$  между направлением сворачивания нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону.

Однослойные нанотрубки (с англ. single-walled carbon nanotubes, SWNT) делятся на следующие подвиды:

- тип «кресло» (с англ. armchair) или «зубчатые»  $n=m$ ;
- тип «зигзаг» (с англ. zigzag) или «зигзагообразные»  $n=0$  или  $m=0$ ;
- хиральные (с англ. chiral) ( $n, m$ ), где  $n > m$ .

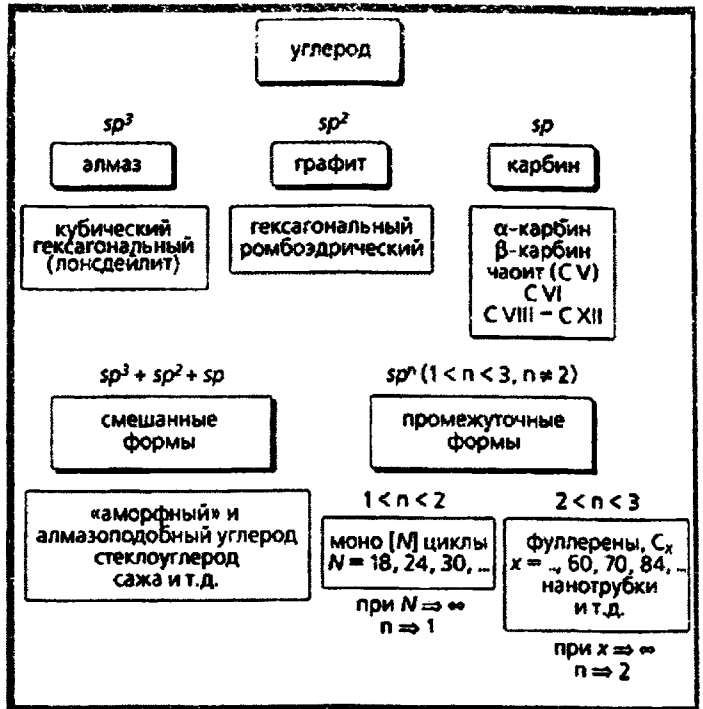


Рисунок 3- Гибридизация аллотропных форм углерода

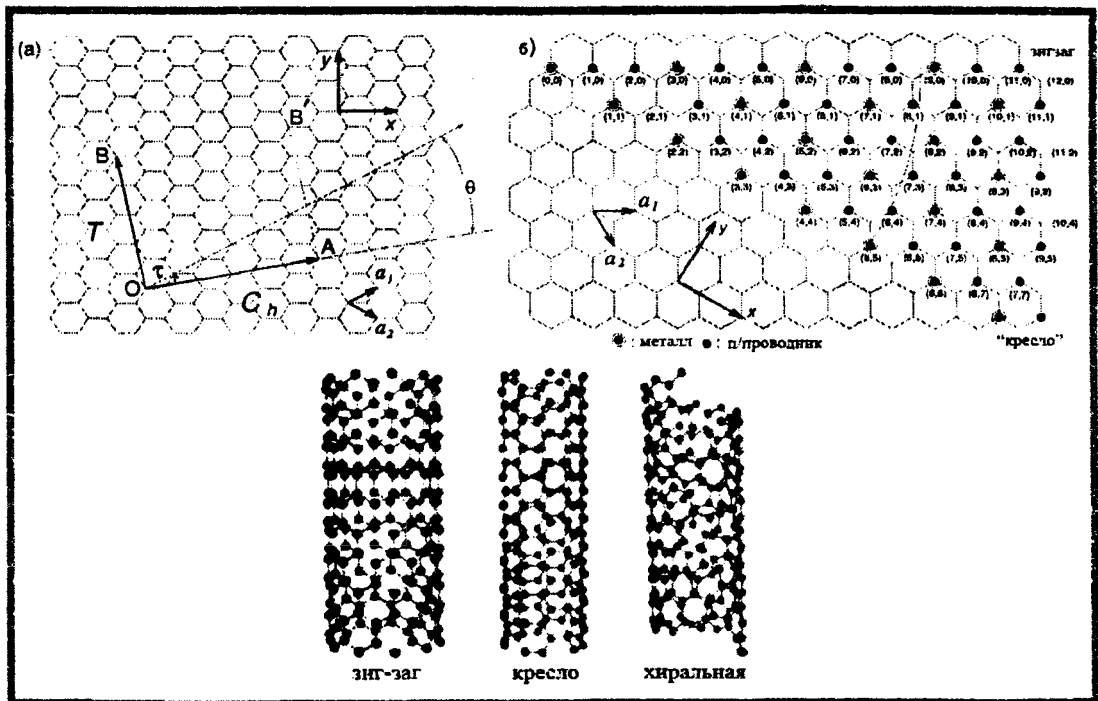


Рисунок 4 - Часть графитовой плоскости, сворачивание которой в цилиндр приводит к образованию однослойной нанотрубки

Индексы хиральности однослойной нанотрубки ( $n, m$ ) однозначным образом определяют ее диаметр  $D$ . Эта связь имеет следующий вид:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi},$$

где  $d_0 = 1,44 \text{ \AA}$  - расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости.

Связь между индексами хиральности (m, n) и углом  $\theta$ , а также другие структурные параметры углеродных нанотрубок представлены в таблице 1.

Электронные и колебательные свойства углеродных нанотрубок существенным образом зависят от типа трубок.

Если разница  $|m - n|$  кратна 3, такие трубки обладают металлическими свойствами. Металлические нанотрубки проводят электрический ток даже при абсолютном нуле температур, в то время как проводимость полупроводниковых трубок равна нулю при абсолютном нуле и возрастает при повышении температуры. Технически говоря у полупроводниковых трубок есть энергетическая щель на поверхности Ферми. Полуметаллами являются также все ахиральные трубки типа «armchair». В других случаях нанотрубки показывают полупроводниковые свойства [8].

Таблица 1. Структурные параметры углеродных нанотрубок.

Символ	Название	Формула	Параметр
a	Длина единичного вектора	$a = \sqrt{3}a_{C-C} = 2,49 \text{ \AA}$	$a_{C-C} = 1,44 \text{ \AA}$
$a_1, a_2$	Единичные вектора	$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)a, \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}\right)a$	x, y координата
$b_1, b_2$	Вектора кристаллической решетки	$\left(\frac{1}{\sqrt{3}}, 1\right)\frac{2\pi}{a}, \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, -1\right)\frac{2\pi}{a}$	x, y координата
$C_h$	Вектор хиральности	$C_h = na_1 + ma_2 \equiv (n, m)$	$0 \leq  m  \leq n$
L	Длина вектора $C_h$	$L =  C_h  = a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}$	
$d_t$	Диаметр	$d_t = L/\pi$	
$\theta$	Угол хиральности	$\sin \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$ $\cos \theta = \frac{2n + m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$	$0 \leq  \theta  \leq \frac{\pi}{6}$ $\tan \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2n + m}$
d	НОД (n,m)		
$d_R$	НОД (2n+m, 2m+n)	$d_R = \begin{cases} d, (n - m) & \text{некратно} \\ 3d, (n - m) & \text{кратно} \end{cases}$	$3d$ $3d$
T	Вектор смещения	$T = t_1a_1 + t_2a_2 \equiv (t_1, t_2)$ $t_1 = \frac{2m + n}{d_R}, t_2 = -\frac{2n + m}{d_R}$	НОД ( $t_1, t_2$ ) = 1
T	Длина вектора смещения T	$T =  T  = \frac{\sqrt{3}L}{d_R}$	
N	Число 6-угольников в единичной ячейке нанотрубки	$N = \frac{2(n^2 + m^2 + nm)}{d_R}$	
R	Вектор симметрии	$R = pa_1 + qa_2 \equiv (p, q)$ $t_1q - t_2p = 1,$ $(0 < mp - nq \leq N)$	НОД (p, q) = 1
$\tau$	Степень R	$\tau = \frac{(mp - nq)T}{N} = \frac{MT}{N}$	
$\psi$	Угол поворота R	$\psi = 2\pi/N$	в радианах
M	Число T в NR	$NR = C_h + MT$	

Примечание. Параметры n, m,  $t_1, t_2, p, q$  – целочисленные, а параметры d,  $d_R, N, M$  – функция этих чисел. НОД (n,m) – наибольший общий делитель чисел n и m

Известный наименьший диаметр нанотрубки 0,7 нм, что является диаметром молекулы фуллерена  $C_{60}$ . Нанотрубки, состоящие из коаксиальных графитовых цилиндров, с рас-

стоянием между слоями 0,34 нм, называются многослойными нанотрубками (с англ. multi-walled carbon nanotubes, MWNT).

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

Возможные разновидности поперечной структуры многослойных нанотрубок представлены на рис. 5 [9]. Структура типа «матрешки» (russian dolls) представляет собой совокупность коаксиально вложенных друг в друга однослойных цилиндрических нанотрубок.

Другая разновидность этой структуры представляет собой совокупность вложенных друг в друга коаксиальных призм. Последняя из приведенных структур напоминает свиток (scroll). Для всех структур характерно значение расстояния между соседними графитовыми слоями, близкое к величине 3,4 Å, присущей расстоянию между соседними плоскостями кристаллического графита.

Реализация той или иной структуры многослойной нанотрубки в конкретной экспериментальной ситуации зависит от условий синтеза. Анализ имеющихся экспериментальных данных указывает, что наиболее типичной структурой многослойных нанотрубок является структура типа «матрешки», в которой трубки меньшего размера последовательно вложены в трубки большего размера [10].

Следует заметить, что многослойные нанотрубки привлекают к себе не меньшее внимание, чем однослойные.

#### Синтез углеродных нанотрубок

**Электродуговой метод.** Наиболее широко распространен метод получения нанотрубок, использующий термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда, горящей в атмосфере He. Модифицирование метода [11], заключавшееся в нахождении оптимальных параметров: давления He, тока дуги, напряжения и зазора между электродами, позволило увеличить выход нанотрубок. Предпочтительнее является непрерывный поток He при постоянном давлении, чем статическая газовая атмосфера.

В качестве катализатора использовались смеси: Ni-Co, Co-Y или Ni-Y с различным процентным содержанием атомов металла по отношению к углероду [12]. Распределение диаметров нанотрубок, относительная концентрация и структура нанотрубного материала определяются типом используемого катализатора, а также параметрами дугового разряда. Так, например, использование металлов группы железа (Co, Ni, Fe) способствует получению одностенных трубок с разбросом диаметров от 0,7 до 2,0 нм, с максимумами 0,84, 1,05 и 1,4 нм. Вдобавок к перечисленным выше рост одностенных трубок наблюдался на катализаторах Ce, Gd, La, Mn, Sc, V, Zr и не наблюдался на Co/Ru, Ni/B, Cu, Ti.

**Лазерное распыление.** Фокусирующийся системой линз лазерный пучок сканирует поверхность графитовой мишени для обеспечения равномерного испарения материала мишени. Получающийся в результате лазерного испарения пар попадает в поток инертного газа и выносится из высокотемпературной области в низкотемпературную, где осажается на охлаждаемой водой медной подложке. Сажа, содержащая трубки, собирается с медной подложки, стенок кварцевой трубки и обратной стороны мишени. Так же, как и в дуговом методе, получается несколько видов конечного материала.

В экспериментах, где в качестве мишени использовался чистый графит, получались многостенные нанотрубки [3], которые имели длину до 300 нм и состояли из 4-24 графеновых цилиндров. При 1200°C все наблюдаемые нанотрубки не содержали дефектов и имели

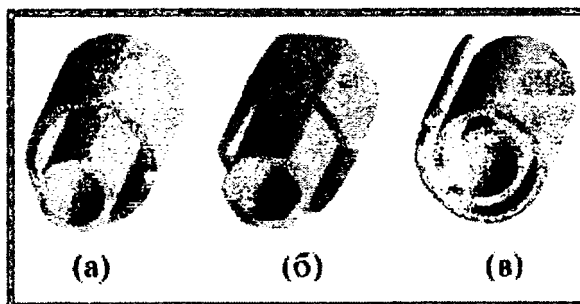


Рисунок 5 - Модели поперечных структур многослойных нанотрубок: а - матрешка; б - шестигранная призма; в - свиток

шапочки на окончаниях. При понижении температуры синтеза до 900°C в трубках появлялись дефекты, число которых увеличивалось с дальнейшим понижением температуры, и при 200°C образование нанотрубок не наблюдалось.

При добавлении в мишень небольшого количества переходных металлов, в продуктах конденсации наблюдались одностенные трубки. Однако в процессе испарения мишень обогачалась металлом, и выход таких нанотрубок снижался [3].

Каталитическое разложение углеводородов. Широко используемый способ получения нанотрубок основан на использовании процесса разложения ацетилена в присутствии катализаторов. В качестве катализаторов использовались частицы металлов Ni, Co, Cu и Fe размером несколько нанометров. В кварцевую трубку длиной 60 см, внутренним диаметром 4 мм, помещается керамическая лодочка с 20-50 мг катализатора. Смесь ацетилена C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (2,5-10%) и азота прокачивается через трубку в течение нескольких часов при температуре 500-1100°C. После чего система охлаждается до комнатной температуры. На эксперименте с кобальтовым катализатором наблюдались четыре типа структур, а именно: аморфные слои углерода на частицах катализатора; закапсулированные графеновыми слоями частицы металлического катализатора; нити, образованные аморфным углеродом и многостенными углеродными нанотрубками.

Наименьшее значение внутреннего диаметра этих нанотрубок составляло 10 нм. Наружный диаметр свободных от аморфного углерода трубок находился в пределах 25-30 нм, а для трубок, покрытых аморфным углеродом, – до 130 нм. Длина определялась временем протекания реакции и изменялась от 100 нм до 10 мкм.

Выход и структура нанотрубок зависит от типа катализатора - замена Co на Fe дает меньшую концентрацию и количество бездефектных нанотрубок сокращается. При использовании никелевого катализатора большинство нитей имело аморфную структуру, иногда встречались нанотрубки с графитизированной бездефектной структурой. На медном катализаторе формируются нити с нерегулярной формой и аморфной структурой.

Электролитический синтез. Основная идея этого метода состоит в том, чтобы получить углеродные НТ, пропуская электрический ток между графитовыми электродами, находящимися в расплавленной ионной соли [11]. Графитовый катод расходуется в процессе реакции и служит источником атомов углерода. В результате формируется широкий спектр наноматериалов.

Для того чтобы выделить частицы углерода, получившиеся вследствие эрозии катода, соль растворялась в воде. Осадок выделялся, растворялся в толуоле и диспергировался в ультразвуковой ванне. Продукты электролитического синтеза исследовались с помощью ПЭМ. Выявлено, что они состоят из закапсулированных частиц металла, лукович и углеродных НТ различной морфологии, включая спиральные и сильно изогнутые. В зависимости от условий эксперимента диаметр нанотрубок, образованных цилиндрическими графеновыми слоями, колебался от 2 до 20 нм. Длина МСНТ достигала 5 мкм.

Методы очистки и детектирования. Наиболее удобный и широко распространенный метод экстракции нанотрубок и фуллеренов из продуктов термического разложения графита, а также последующей сепарации и очистки, основан на использовании растворителей и сорбентов.

Этот метод включает в себя несколько стадий. На первой стадии углеродсодержащая сажа обрабатывается с помощью неполярного растворителя, в качестве которого используются бензол, толуол и другие вещества. При этом фуллерены и нанотрубки, обладающие значительной растворимостью в указанных растворителях, отделяются от нерастворимой фракции, содержание которой составляет обычно 70-80 %. Выпаривание полученного таким образом раствора приводит к образованию черного поликристаллического порошка, представляющего собой смесь фуллеренов и нанотрубок различного сорта.

Экстракт нанотрубок, растворенный в одном из растворителей, пропускается через сорбент, в качестве которого может быть использован алюминий, активированный уголь либо оксиды (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) с высокими сорбционными характеристиками. Нанотрубки собира-

ются этим металлом, а затем экстрагируются из него с помощью чистого растворителя. Эффективность экстракции определяется сочетанием сорбент-растворитель. Поэтому растворитель, пропущенный через сорбент с сорбированными в нем нанотрубками, экстрагирует из сорбента поочередно нанотрубки различного вида, которые, тем самым, могут быть легко отделены друг от друга.

### Свойства нанотрубок

Нанотрубки обладают уникальными свойствами. Так, они имеют очень малую массу и в то же время рекордно высокий модуль упругости (до 1 ТПа). Нанотрубки на данный момент являются прочнейшими волокнами, которые когда-либо могли быть созданы. При этом их можно произвольно закручивать: они не ломаются, а только гнутся. Данное свойство было успешно применено для использования нанотрубок в производстве зондов для атомно-силовой микроскопии [9].

Одним из интересных свойств углеродных нанотрубок является возможность адсорбирования в них различных атомов или молекул [4]. Огромная удельная площадь поверхности УНТ, достигающая  $600 \text{ м}^2/\text{г}$ , обеспечивает возможность адсорбирования больших количеств инертных газов, водорода, металлов, воды и т.д. Например, экспериментально показано [10], что УНТ могут поглощать более 3,5 % (вес.) водорода, что делает их перспективными аккумуляторами водорода. Там же показано, что экономически оправданным такое применение УНТ в машиностроении может быть уже при содержании водорода в них  $\sim 6,5\%$ .

Широкие перспективы использования нанотрубок в материаловедении открываются при капсулировании внутрь углеродных нанотрубок сверхпроводящих кристаллов (например, TaC). Возможность получения сверхпроводящих кристаллов, капсулированных в нанотрубки, позволяет изолировать их от вредного воздействия внешней среды, например, от окисления, открывая тем самым путь к более эффективному развитию соответствующих нанотехнологий [13].

Большая отрицательная магнитная восприимчивость нанотрубок указывает на их диамагнитные свойства. Предполагают, что диамагнетизм нанотрубок обусловлен протеканием электронных токов по их окружности. Величина магнитной восприимчивости не зависит от ориентации образца, что связано с его неупорядоченной структурой. Относительно большое значение магнитной восприимчивости указывает на то, что, по крайней мере, в одном из направлений эта величина сравнима с соответствующим значением для графита. Отличие температурной зависимости магнитной восприимчивости нанотрубок от соответствующих данных для других форм углерода указывает на то, что углеродные нанотрубки являются отдельной самостоятельной формой углерода, свойства которой принципиально отличаются от свойств углерода в других состояниях.

### Применение нанотрубок

В основе многих технологических применений нанотрубок лежит такое их свойство, как высокая удельная поверхность (в случае однослойной нанотрубки около  $600 \text{ м}^2/\text{г}$ ), что открывает возможность их использования в качестве пористого материала в фильтрах и т.д.

Материал нанотрубок с успехом может использоваться в качестве несущей подложки для осуществления гетерогенного катализа, причем каталитическая активность открытых нанотрубок заметно превышает соответствующий параметр для замкнутых нанотрубок [14].

Возможно использование НТ с высокой удельной поверхностью в качестве электродов для электролитических конденсаторов с большой удельной мощностью.

Углеродные нанотрубки хорошо себя зарекомендовали в экспериментах по использованию их в качестве покрытия, способствующего образованию алмазной пленки.

Такие свойства нанотрубки, как ее малые размеры, меняющаяся в значительных пределах в зависимости от условий синтеза, электропроводность, механическая прочность и химическая стабильность, позволяют рассматривать нанотрубку в качестве основы будущих элементов микроэлектроники.

Сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: прикладывая запирающее напряжение в несколько вольт, ученые научились изменять проводимость однослойных нанотрубок в пределах пяти порядков. Вообще создание полупроводниковых гетероструктур, то есть структур типа металл/полупроводник или стык двух разных полупроводников, позволит не выращивать отдельно два материала и затем соединять их друг с другом, а всего лишь в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником). Тогда одна часть нанотрубки будет проявлять металлические свойства, а другая – полупроводниковые [15].

Впрочем, возможности применения нанотрубок в электронике не ограничиваются областью создания на их основе новых типов миниатюрных элементов электронных схем. Наряду с этим нанотрубки могут служить основой тончайшего измерительного инструмента, используемого для контроля неоднородностей поверхностей таких схем [16].

В одной из работ в данном направлении была использована многослойная нанотрубка в качестве зонда для исследования поверхности на нанометровом уровне. Преимущества использования нанотрубок для этой цели связаны с их чрезвычайно высокой механической прочностью, на которую указывают, в частности, результаты прямых измерений. Так, модуль Юнга нанотрубок в аксиальном направлении составляет порядка 7000 ГПа, в то время как для стали и иридия, традиционно используемых для изготовления таких зондов, значение этого параметра не превышает 200 и 500 ГПа соответственно.

Другой пример использования нанотрубки – «насаживание» ее на острие сканирующего туннельного или атомного силового микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам подобная 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.

Уже существуют применения 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 пиксела. Получающееся при этом зерно изображения будет чрезвычайно малым – порядка микрона.

Интересные применения могут получить нанотрубки при заполнении их различными материалами. При контакте открытого конца нанотрубки с расплавленным свинцом трубка под действием капиллярного эффекта заполняется металлом, превращаясь в тончайший изолированный провод в оболочке. При этом нанотрубка может использоваться как в качестве носителя заполняющего ее материала, так и в качестве изолирующей оболочки, предохраняющей данный материал от электрического контакта, либо от химического взаимодействия с объектами [17].

Открытие углеродных нанотрубок относится к наиболее значительным достижениям современной науки. Эта форма углерода по своей структуре занимает промежуточное положение между графитом и фуллереном. Однако многие свойства углеродных нанотрубок не имеют ничего общего ни с одним из указанных элементов. Это позволяет рассматривать и исследовать нанотрубки как самостоятельный материал, обладающий уникальными физико-химическими характеристиками. Исследования углеродных нанотрубок представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес. В настоящее время ведутся большие работы по исследованию электронных свойств нанотрубок – перспективных сверхпроводящих, проводящих и полупроводниковых материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Баркалин В.В., Польшкова Е.В. Интеллектуальные акустоэлектронные микросистемы на основе углеродных и алмазоподобных пленок // Сборник «Машино-



строение» - Мн., вып. 17, 2001, с. 437-442. 2. Колешко В.М., Баркалин В.В., Шевченко А.А., Полюнкова Е.В. Алмазоподобные пленки, полученные магнетронным способом для сенсорики и электроники // Сб. «Пленки и покрытия 2001» - С-Пб., 2001, с. 629-636. 3. Колешко В.М., Шевченко А.А., Полюнкова Е.В. Мишени на основе графита для получения углеродных и алмазоподобных пленок // Сборник «Слоистые композиционные материалы» - Волгоград, 2001, с. 156-158. 4. Колешко В.М., Чашинский А.С., Хмурович Н.В. Сенсорные молекулярные микроанализаторы идентификации веществ // Сборник «Теоретическая и прикладная механика» - Мн., 2007, № 22, с. 131-139. 5. Graphene: carbon in two dimensions // Materials Today – 2007, vol. 10, № 1-2. 6. Федосеев Д.В., Новиков Н.В. Алмазы: Справочник – Мн.: Научова думка, 1981. 7. N. Hamada, S. Samada, A. Oshiyama. // Phys. Rev. Lett. - 1992, vol. 68, p. 1579. 8. С.В. Лисенков, И.В. Пономарева, Л.А. Чернозатонский // Физика твердого тела. 2004, т. 46, вып. 8. 9. А.С. Федоров, П.Б. Сорокин, П.В. Аврамов, С.Г. Овчинников «Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокластеров и их взаимодействия с легкими элементами» - Электронное издание: Новосибирск, 2006. 10. Елецкий Ф.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН - 2002, т. 172, № 4, с. 401. 11. Белов Н.Н. и др. Структура поверхности катодного нароста, образующегося при синтезе фуллеренов // Аэрозоли - т. 4, № 1, 1998 г.. 12. Интернет-источник: <http://www.ktf.krakow.pl/courses/fulleren/g1.htm>. 13. H. Zhu, A. Cao, X. Li et al. // Applied Surface Science 178, 50 (2001). 14. Харрис П. «Углеродные нанотрубки и родственные структуры» - М: 2003. 15. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris «Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and application» - изд. Springer: 2001. 16. V.N. Popov, Ph. Lambin «Carbon nanotubes: from basic research to nanotechnology» - изд. Springer: 2006. 17. Колешко В.М., Дейнак Д.А. Электронный язык на поверхностных акустических волнах // Сб. «Теоретическая и прикладная механика» - Мн., 2006, № 21, с. 104-109.

УДК 621.38.049.76

*Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ТУННЕЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ МДМ-НАНОСТРУКТУРАХ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В качестве чувствительных элементов наносенсоров перспективно применение туннельных МДМ-наноструктур (металл–диэлектрик–металл) на основе сверхтонких диэлектрических пленок, в частности оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) [1]. Указанные тонкие пленки обладают относительно большой удельной емкостью, незначительным температурным коэффициентом емкости, низкими электрическими потерями, высокой термической и химической стойкостью [2]. Экспериментальные методы исследования элементов МДМ-наносенсоров на основе оксидов РЗЭ эффективно дополняются аналитическим моделированием параметров туннельных сенсорных МДМ-наноструктур [3]. С учетом того, что внешнее воздействие на МДМ-наносенсоры проявляется в изменении, прежде всего, переноса заряда в тонкой диэлектрической пленке, представляет значительный интерес моделирование механизмов токопереноса в МДМ-наноструктурах.

**Механизмы токопереноса в туннельных МДМ-наноструктурах**

Проводимость рассматриваемых тонких пленок оксидов РЗЭ определяется несколькими механизмами, проявление каждого из которых зависит от условий эксперимента. Для разных условий получения и толщин пленок, а также свойств диэлектрических материалов, электрического напряжения и температуры измерения один из механизмов проводимости может стать преобладающим. В связи с этим проанализированы различные механизмы токо-