

## О Б З О Р

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

## Нанотехнологии и физика молекул

Н. Н. Сысоев, А. И. Осипов, А. В. Уваров<sup>а</sup>

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярной физики. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: <sup>а</sup> uvarov@phys.msu.ru

Краткий обзор современного состояния научных исследований в нанотехнологии. Дана общая характеристика нанотехнологических исследований: финансирование, рост числа публикаций, вклад российских ученых. Отдельно рассмотрены методы получения и диагностики наноматериалов, свойства наноматериалов и практическое применение. Основное внимание уделено углеродным наноматериалам: углеродным нанотрубкам и фуллеренам. Подчеркивается связь нанотехнологий с молекулярной физикой.

PACS: 61.46.Fg, 62.25.-g, 65.80.+n, 81.07.b, 81.16.-c.

*Ключевые слова:* свойства наноматериалов, получение и диагностика наноматериалов, практические применения наноматериалов, нанотехнология и молекулярная физика.

Статья поступила 23.04.2008, подписана в печать 22.05.2008.

## Введение

В настоящее время наука и техника переживают нанотехнологический бум. Он пришел на смену лазерной революции и увлечению высокотемпературной сверхпроводимостью и в перспективе обещает новую революцию. Цель настоящей работы — дать краткую характеристику современного состояния нанотехнологических исследований и разработок, обращая наибольшее внимание на углеродные наноматериалы.

Термин «нанотехнология» впервые был введен в обиход в 1974 г. японским ученым Танигучи на конференции Японского общества точного машиностроения [1, 2], хотя, по существу, химики занимаются нанотехнологиями уже в течение двух веков.

Нанотехнология (наноиндустрия)<sup>1</sup> в широком смысле слова — это, по определению академика Ю. Д. Третьякова [1], область научной деятельности, ориентированная на создание, изучение и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, т. е. упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Из этого определения следует, что, как правило, под термином «нанотехнология» понимают не только технологический процесс изготовления наноматериалов, объектов и систем нанометрового размера, но и деятельность, связанную с конструированием и исследованием наносистем.

Нанотехнологические исследования охватили различные области науки и техники, включая физику, химию, электронику, механику, биологию, медицину, авиацию и космонавтику и другие более узкие области человеческой деятельности. С появлением усовершенствованной аппаратуры (литографы нанометрового разрешения, прецизионные установки вакуумного напыления, травления, эпитаксии и пр.) и методик (химические процессы формирования наночастиц, молекулярных кластеров и их сборки в более сложные системы) началось интенсивное «строительство» нанообъектов и наносистем сначала традиционными, а затем и разработанными оригинальными

методами. Уже первые успехи в создании, исследовании и применении наноструктур продемонстрировали широкие открывающиеся возможности практического использования наноматериалов, наноструктур и нанотехнологий.

Впервые на важность и перспективность исследований наночастиц указал выдающийся американский физик лауреат Нобелевской премии Р. Фейнман [3] в своей лекции «Внизу полным полно места, приглашение в новый мир физики», прочитанной в конце декабря 1959 г. в Калифорнийском технологическом институте. Он обратил внимание на проблему контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. В частности, он заметил, что «научившись регулировать и управлять структурой на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные объекты... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить множество проблем».

В результате начавшихся интенсивных исследований наноразмерных структур и материалов в течение последнего десятилетия XX в. научная общественность в полной мере осознала важность изучения нанотехнологий. Об этом свидетельствует, например, быстрый рост числа публикаций, посвященных исследованию нанообъектов и методам их изготовления (рис. 1) [4–6]. Очень быстро растут и капиталовложения в эту область. Если в 1997 г. бюджетные ассигнования на развитие нанотехнологий в США составляли 116 млн долл., то в 2005 г. — уже 962 млн долл. (с учетом вложений венчурного инновационного капитала — 2.5 млрд долл. [7]), а на период 2005–2008 гг. — 5.06 млрд долл. [8].

В России на развитие нанотехнологий истрачено по разным целевым программам примерно 150 млрд руб. (около 6 млрд долл.) и не менее 130 млрд руб. (около 5.2 млрд долл.) предполагается выделить в будущем, из них 30 млрд руб. на 2007 г. Отметим, что бюджет РАН составляет 20 млрд руб. [1, 9]. По оценкам [1], мировой рынок нанотехнологий в 2012 г. составит более триллиона долларов.

<sup>1</sup> В США различают понятия «наноиндустрия» и «нанотехнология», поскольку они финансируются по разным статьям бюджета.

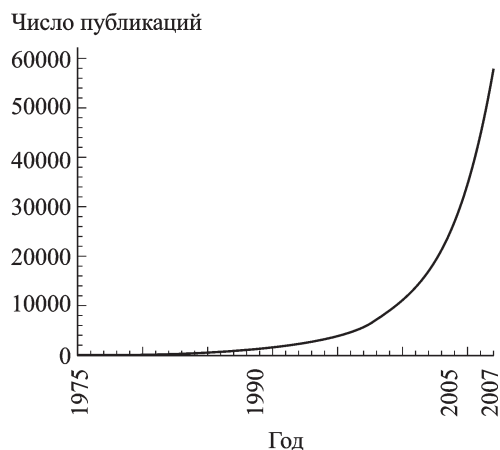


Рис. 1. Рост числа публикаций по нанотехнологиям

Сейчас во всем мире работы по нанотехнологическим исследованиям публикуют примерно 500 журналов, из них 58 являются специализированными изданиями в этой области, причем 12 стали выходить в 2006 г. [6, 10]. Отметим, что, по данным Всероссийского института научной и технической информации [10], в 2007 г. по этой тематике было опубликовано более 60 000 статей. Число публикаций российских авторов в 2005–2007 гг. составило примерно 3000. Однако, по оценкам академика Ю. Д. Третьякова [1], вклад ученых, работающих в России, в мировую технологическую науку последние 5–6 лет заметно снижался и составляет сейчас около 1.5% против 6% в 2005 г. Вклад российских ученых, работающих за границей, более существенен, поскольку они занимают достаточно высокие позиции в мировых научных центрах.

Существенное влияние на резкое увеличение интенсивности исследований наноструктур в конце 1980-х — начале 1990-х гг. оказало появление новой области мезоскопической физики — одноэлектроники, описывающей эффекты коррелированного туннелирования электронов и куперовских пар в системах связанных туннельных переходов сверхмалых размеров. Родоначальниками этой области стали российские ученые, в то время сотрудники физического факультета МГУ — К. К. Лихарев, Д. В. Аверин и А. Б. Зорин (см., напр., [11–14]). Для наблюдения одноэлектронных эффектов требовалось уменьшить размеры элементов структуры до величин менее 100 нм. Первые пионерские работы (кроме физического факультета МГУ) начались в нескольких лабораториях мира (США, Голландия, Швеция). Именно в это время в исследовательских центрах и лабораториях появляется технологическое оборудование для изготовления наноструктур, а технология становится необходимым атрибутом исследовательской деятельности в мезоскопической физике. Сейчас технологические залы и чистые комнаты достаточно высокого класса стали необходимыми компонентами инфраструктуры университетских лабораторий и научно-исследовательских центров, хотя стоимость их создания очень высока [1].

В настоящее время можно выделить несколько основных направлений, по которым развивается и будет развиваться нанотехнология.

Комиссия по нанотехнологиям при президенте РАН, возглавляемая лауреатом Нобелевской премии академиком Ж. Алферовым, разработала крупную общеакаде-

мическую программу исследований, включающую шесть основных разделов [15]:

- 1) физика наноструктур;
- 2) нанoeлектроника;
- 3) наноматериалы;
- 4) нанобиотехнологии;
- 5) нанодиагностика;
- 6) образование.

В обзоре основное внимание будет обращено на физическую сторону исследований по нанотехнологии.

## 1. Наноматериалы и наноструктуры как объекты молекулярной физики

Наноматериалы, как правило, состоят из наночастиц (наночастиц) с упорядоченной структурой. Наночастицами принято называть объекты размером от 1 до 100 нм, которые занимают промежуточное положение между молекулами и микрочастицами. Свойства наночастиц и способ их организации в упорядоченные структуры определяют необычные свойства наноматериала. Изменяя размер и конфигурацию составляющих наночастиц или способ соединения их между собой, можно изменять свойства наноматериалов и даже управлять ими. Уже продемонстрированы, например, материалы, отличающиеся повышенной прочностью, электрической проводимостью, теплопроводностью, термостойкостью, аномальными магнитными свойствами и пр.

Согласно рекомендации 7-й Международной конференции по нанотехнологиям (Висбаден, 2004 г.) наноматериалы подразделяются на типы следующим образом [1]:

- нанопористые структуры;
- наночастицы;
- нанотрубки и нановолокна;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры.

Из этого перечня видно, что наноматериалы являются объектами молекулярной физики или, по химической терминологии, объектами физической химии. В этой области, однако, нет четкой границы между физикой и химией.

Среди перечисленных типов наноматериалов наибольший интерес для физиков представляют материалы, состоящие из наночастиц, нанотрубок и нановолокон, поскольку они наиболее перспективны для практических приложений. В настоящем обзоре этим нанообъектам будет уделено наибольшее внимание.

Среди наноматериалов наибольший практический интерес представляют углеродные наноматериалы, в частности фуллерены и углеродные нанотрубки. Фуллерены были обнаружены в 1985 г. Г. Крото, Р. Смолли и Р. Керлом [16, 17]. Фуллерены — это большие молекулы, напоминающие по форме футбольные мячи, составленные из шести- и пятиугольников с пустой сердцевиной (рис. 2). Известны фуллерены с числом атомов углерода от 20 до нескольких сотен. Числа атомов 60, 70 и т. д. называют магическими, поскольку они соответствуют наиболее устойчивым конфигурациям фуллеренов.

Фуллерены названы в честь архитектора Бакминстера Фуллера, который впервые применил такие структуры при конструировании куполообразных зданий.

Углеродные нанотрубки (УНТ), впервые обнаруженные в 1991 г. Сумио Ииджимой [18–20]<sup>1</sup>, представляют

<sup>1</sup> Существуют более ранние свидетельства открытия углеродных нанотрубок (Gibson J.A.E. // Nature. 1992. 359. P. 369).

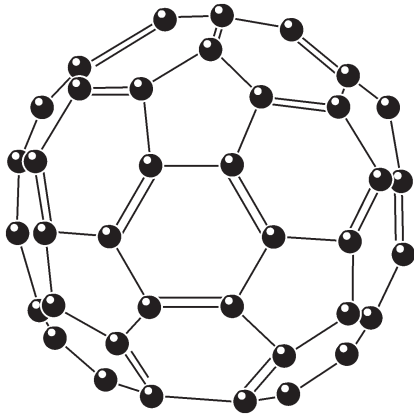


Рис. 2. Молекула  $C_{60}$

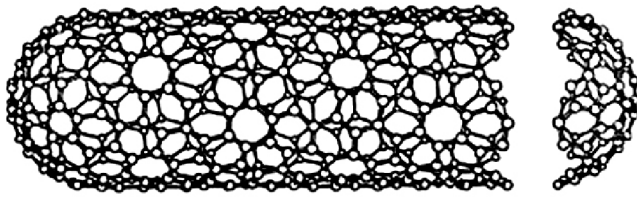


Рис. 3. Модель однослойной нанотрубки

собой квазиодномерную трубчатую структуру, которая образуется в результате свертывания базисных плоскостей гексагональной решетки графита в бесшовные цилиндры (рис. 3). Их можно представить в виде свернутой в цилиндр графитовой плоскости. Сворачивать плоскости можно в различных направлениях относительно основных направлений графитовой плоскости. Нанотрубки могут быть однослойными (одностеночными) и многослойными (многостеночными), открытыми и закрытыми. В закрытых УНТ «крышка» представляет собой половинку молекулы фуллерена  $C_{60}$ . Диаметр УНТ составляет от 0.5 нм (однослойные) до 100 нм в случае многослойных структур. Длина может достигать несколько сантиметров. Помимо углерода, нанотрубки могут формироваться молекулами SiC, BN, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> и т. д.

УНТ, как это нередко происходит при больших открытиях, были обнаружены случайно. Рассматривая в электронном микроскопе сажу, полученную в результате распыления графита в плазме электрической дуги, С. Ииджима обнаружил тонкие протяженные нити как побочные продукты синтеза фуллеренов. Это и были первые наблюдавшиеся УНТ. Углеродные нанотрубки наряду с фуллеренами образуют новую аллотропную модификацию углерода. Благодаря особой топологии УНТ не имеют свободных химических связей, поэтому, несмотря на малые размеры, они не проявляют «поверхностных» эффектов.

В настоящее время УНТ (и фуллерены) изучены гораздо лучше, чем трубки другого состава. Для примера укажем, что производство фуллеренов и УНТ в Японии достигло уже сотен тонн.

В России сильна школа, связанная с синтезом и изучением углеродных нанотрубок, поэтому именно в этом направлении можно ожидать заметных успехов [9].

Среди других наиболее интересных нанообъектов следует отметить новые физические объекты — квантовые точки [19], которым довольно трудно дать исчерпывающее определение. Удачная и краткая характеристика принадлежит Ж. И. Алферову: «Квантовые точки — это искусственные атомы, свойствами которых можно управлять».

Квантовая точка — фрагмент проводника или полупроводника, образующий трехмерную структуру с размерами в несколько единиц или десятков нанометров, способную удерживать счетное количество электронов (порядка 100 и менее). Электрон в квантовой точке имеет много дискретных квазистационарных уровней энергии и чувствует себя как частица в трехмерной потенциальной яме. Аналогично атому такая система при переходе между энергетическими уровнями может излучать фотон, частотой которого, в отличие от настоящих атомов, можно легко управлять, меняя размеры квантовой точки.

В настоящее время наиболее перспективный метод формирования упорядоченных массивов квантовых точек основан на явлении самоорганизации (самосборки) чужеродных атомов на кристаллических поверхностях или в растворах [19]. Если размеры квантовых точек составляют единицы нанометров, то возможно создание одноэлектронных устройств, работающих при комнатной температуре. Работа таких устройств основана на контролируемом движении отдельных электронов [21].

Отдельный тип наноматериалов составляют композиты, например наностекла. Они состоят из чередующихся нанокристаллов и аморфных зерен («стеклянная» фаза). Перечень наноматериалов непрерывно возрастает. Однако в настоящем обзоре будут рассмотрены в основном углеродные материалы и в первую очередь углеродные нанотрубки. Коллоиды, пленки, кластеры и нанокристаллы останутся вне поля нашего рассмотрения.

## 2. Методы получения и диагностика наноматериалов

Существует множество различных способов получения наноструктур. Остановимся лишь на принципиальной стороне этих методик<sup>1</sup>.

Для получения наноматериалов существует два основных подхода: по принципам «сверху вниз» и «снизу вверх» [19, 22]. В первом подходе «сверху вниз» за счет уменьшения размеров физических тел механической или иной обработкой добиваются получения нанометрового размера. Например, некоторые полупроводниковые устройства создаются фотолитографической обработкой. Литографические методы широко используются и для получения других нанообъектов.

Идея технологии «снизу вверх» заключается в сборке создаваемой конструкции непосредственно из элементов «низшего порядка» (атомов, молекул, структурных блоков и т. д.). Например, методом секвестирования отдельных молекул, методом самоорганизации.

Перечислим методы получения такого перспективного материала, как углеродные нанотрубки [20].

УНТ образуются в результате химических превращений углерода при высоких температурах. Существует три основных способа получения УНТ: электродуговое распыление графита, абляция графита с помощью лазерного излучения и каталитическое разложение углеводородов.

В первом методе для получения УНТ используется термическое распыление графитового электрода (анода)

<sup>1</sup> Ссылки на оригинальные работы ввиду их обильности не являются полными. Они иллюстрируют только последние достижения и охватывают в основном период 2006–2007 гг.

в плазме дугового разряда, горящей в атмосфере гелия. Графитовый электрод интенсивно испаряется, и испарившиеся атомы углерода оседают на катоде или на охлажденных водой стенках камеры, где и формируются УНТ [23].

Во втором методе происходит облучение лазером графитовой поверхности в атмосфере инертного газа. Выбитый лазерным импульсом углерод оседает в виде УНТ на близко расположенную холодную подложку [24].

Последний метод состоит в простом пропускании углеводорода (чаще всего ацетилена) через объем, содержащий катализаторы, при температурах 600–800°С. В результате на катализаторах образуются разнообразные УНТ [25].

В настоящее время получил широкое распространение метод химического осаждения из пара (CVD процесс). Этим методом можно получать макроскопические количества нанотрубок в виде пучков труб, связанных между собой молекулярными силами, и длиной труб в несколько микрометров. Этим методом в 2005 г. группе Ииджимы удалось получить материал из однослойных нанотрубок чистотой 99.98% [26]. В работе [27] сообщается о синтезе бездефектной однослойной нанотрубки длиной 4 см, что говорит о принципиальной возможности создания отдельных нанотрубок для получения канатов и тканей. Способы получения канатов и тканей изложены в работах [28, 29].

Большие успехи нанотехнологии в последние годы связаны главным образом с новыми возможностями диагностики и целенаправленного изменения характеристик наноматериалов. В первую очередь эти успехи обязаны достижениям техники электронной микроскопии [17].

Электронные микроскопы разделяются на два больших класса: просвечивающие электронные микроскопы (стандартное обозначение ПЭМ) и сканирующие (СЭМ). В ПЭМ электронный пучок пропускается через очень тонкие слои (толщиной менее 1 мкм), как бы просвечивая их. В СЭМ электронный пучок падает на малые участки поверхности. Регистрируются отраженные электроны или вторичные электроны, возникающие при взаимодействии пучка с поверхностью.

Широкое распространение получили также различные методики зондовой микроскопии: сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) [30], атомно-силовая микроскопия (АСМ) [31, 32], сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (СОМБП) [33]. В этих микроскопах происходит сканирование поверхности исследуемого образца с помощью зонда или щупа в виде крошечной металлической иглы. Например, в СТМ при идеальной «остроте» зонда, когда на его острие находится единственный атом, точность описания будет соответствовать отдельным атомам. Разновидностью АСМ является магнитно-силовая микроскопия, в которой регистрируются кроме ван-дер-ваальсовых сил еще и магнитные силы взаимодействия образца и зонда, покрытого магнитным материалом. Всего насчитывается более 50 различных методик зондовой микроскопии. Зондовая техника используется не только для исследования профиля поверхности с наноразмерным разрешением, но и позволяет эффективно модифицировать поверхность и изменять уже сформированные в ней наноструктуры.

### 3. Свойства наноматериалов

Наноструктуры — одно из наиболее интересных состояний конденсированной фазы. Они имеют много особенностей и не наблюдаемых ранее физических и хи-

мических свойств. Успешное практическое применение нанобъектов возможно только после тщательного изучения их свойств и характеристик.

Обсудим свойства нанобъектов по следующей схеме.

1. Механические свойства.
2. Теплофизические свойства.
3. Электрические и магнитные свойства.
4. Оптические свойства.
5. Химические свойства.

#### 3.1. Механические свойства

По своим механическим свойствам УНТ резко отличаются от объемных материалов. В УНТ сочетаются высокая прочность и жесткость с высокой упругостью. Трубка гнется, но не ломается. Модуль Юнга почти в 10 раз больше, чем у стали, а прочность выше примерно в 20 раз. Эти свойства позволяют использовать УНТ в качестве индентора для определения микротвердости [34]. При синтезе УНТ возможно образование нитей из жгутов одностеночных УНТ длиной в десятки сантиметров и миллиметровой толщины. Модуль Юнга у нитей на порядок меньше, чем у индивидуальных одностенных трубок.

Двуслойная УНТ является хорошим цилиндрическим подшипником. Если внутреннюю часть трубки оставить неподвижной, а внешнюю заставить вращаться, то получается почти идеальный подшипник скольжения, коэффициент трения в котором на два порядка меньше, чем у лучших пар трения в макроскопических твердых телах [35].

Если теперь внутреннюю трубку вытянуть из внешней и отпустить, то она не только возвратится в середину, но и проскочит дальше, высунувшись из противоположного конца. Из-за очень низкого трения и малой массы внутренняя трубка способна совершать колебания с гигагерцевой частотой [20, 36].

Наконец, УНТ в силу капиллярных явлений может втягивать в себя жидкость. Экспериментально наблюдалось втягивание расплавленного свинца в УНТ, причем диаметр самого тонкого свинцового провода внутри нанотрубок составлял 1.5 нм [20].

#### 3.2. Теплофизические свойства

Теплофизические свойства УНТ изучены хуже всего. Наибольшее число результатов получено при исследовании теплопроводности.

Теплопроводность углеродных наноматериалов заметно отличается от других аллотропных форм углерода. Если для алмаза и графита (в направлении вдоль плоскости) она велика, то для фуллеренов и УНТ она значительно более низкая. Так, при комнатной температуре абсолютное значение коэффициента теплопроводности образца, заполненного нанотрубками, примерно в 60 раз меньше, чем для графита (в направлении плоскости). Основным механизмом переноса тепла в объеме нанотрубок является фононный. Длина свободного пробега фононов при температурах ниже 30 К равна 0.5–1.5 мкм [20]. Низкая теплопроводность материалов с фуллеренами и УНТ объясняется слабой межмолекулярной связью между молекулами фуллерена в кристалле и неупорядоченной структурой образцов с УНТ.

Отметим, что почти все методы синтеза наночастиц приводят к образованию их в структурно-неравновесном метастабильном состоянии. Именно по этой причине

процесс образования УНТ очень чувствителен к температурным условиям. Отжиг может сильно менять характеристики УНТ. Так, один из методов раскрытия УНТ, т. е. удаления верхней части — крышечки, состоит в отжиге УНТ при температуре  $850^\circ\text{C}$  [20].

Кроме того, при всех процессах в УНТ, которые сами по себе нарушают статистическое равновесие, необходимо учитывать флуктуации [36].

### 3.3. Электрические и магнитные свойства

Эти свойства для УНТ изучены наиболее полно [17, 20]. В соответствии с температурной зависимостью сопротивления все УНТ можно разделить на две группы: металлические и полупроводниковые. У первых сопротивление незначительно и почти линейно возрастает с температурой. У вторых наблюдается почти линейная зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры. При этом характерные энергии активации составляют  $0.1\text{--}0.3$  эВ. Металлический или полупроводниковый тип УНТ зависит от структуры УНТ, т. е. от того, по каким правилам можно получить УНТ путем сворачивания в рулон графитовой плоскости. Этими же правилами определяется и хиральность УНТ, т. е. существование винтовой оси симметрии. Нехиральными оказываются те нанотрубки, в которых углеродные шестиугольники ориентированы параллельно или перпендикулярно оси трубки.

В металлических нанотрубках наблюдается баллистическая проводимость, которая характеризуется отсутствием температурной зависимости и объясняется баллистическим переносом электронов без рассеяния и потерь энергии. При этом проводимость не зависит от длины нанотрубки и равна кванту проводимости  $e^2/h = (25813 \text{ Ом})^{-1}$ . Напомним, что проводимость обычного проводника прямо пропорциональна его сечению и обратно пропорциональна его длине.

УНТ обладают ярко выраженным магнитосопротивлением. При приложении внешнего магнитного поля в направлении оси нанотрубки в зависимости от напряженности поля наблюдаются осцилляции электрического сопротивления, что объясняется квантовомеханическим эффектом Ааронова–Бома. Амплитуда осцилляций сравнима с квантом сопротивления  $h/e^2$  [37].

Магнитное сопротивление зависит также от направления спинов электронов, инжектируемых при контакте ферромагнитных материалов с многостенными УНТ и от ориентации намагниченности контактов. При антипараллельной ориентации спинов электронов двух контактов сопротивление больше, чем при параллельной. Этот эффект важен для новой области электроники — спинтроники (спиновой электроники) [38, 39].

Углеродные нанотрубки обладают повышенной электронной эмиссионной способностью, что позволяет их использовать в низкотемпературных высокоэффективных катодах [17].

### 3.4. Оптические свойства

Оптические свойства УНТ аналогичны кристаллическим твердым телам. Специфика объекта проявляется лишь в частотных характеристиках спектров.

Методика комбинационного рассеяния света позволяет анализировать динамику решетки УНТ. Наблюдаемая при комбинационном рассеянии группа линий с частотами  $1590$ ,  $1506$  и  $1551 \text{ см}^{-1}$  соответствует

тангенциальным колебаниям атомов углерода. Она наблюдается только в одностенных УНТ и является как бы их «визитной карточкой». Другая группа линий в области  $150\text{--}250 \text{ см}^{-1}$  соответствует «дышащим» радиальным модам и обязана колебаниям диаметра нанотрубки относительно среднего положения. Частота таких колебаний обратно пропорциональна радиусу нанотрубки и может служить для определения диаметра нанотрубок. Оптические спектры поглощения в области энергий  $0.75 \div 2.00$  эВ так же, как и спектры комбинационного рассеяния, позволяют определять средний диаметр нанотрубок и их распределение по размерам [17, 40].

Эмиссия электронов из нанотрубок сопровождается появлением люминесценции в области длин волн  $0.6\text{--}0.75 \text{ мкм}$ , а нагрев нанотрубных эмиттеров вызывает заметное тепловое излучение [17].

К оптическим свойствам принадлежит также способность однослойных трубок взрываться при интенсивном освещении (например, при фотовспышке). Одно из возможных объяснений этого явления состоит в том, что при фотовспышке происходит нагрев кислорода, находящегося как внутри, так и вне нанотрубок. Нагрев приводит к резкому повышению температуры внутри нанотрубок и мгновенному сгоранию. В отсутствие кислорода эффект не наблюдается [20].

### 3.5. Химические свойства

Химическими свойствами УНТ занимается отдельная область химии — нанохимия [41]. Она включает синтез, очистку и различные формы химического модифицирования внутренней и внешней поверхностей нанотрубок. Отметим, что УНТ и фуллерены представляют собой каркасные структуры. Они выглядят как оболочки, пустые внутри. Пустоты внутри нанотрубок могут быть заполнены. Для таких УНТ существуют особые обозначения. Например,  $\text{Gd}@C_{60}@SWNT$  означает, что Gd находится внутри фуллерена  $C_{60}$ , который в свою очередь находится внутри однослойной нанотрубки.

Реакционная способность УНТ зависит от количества частиц и проявляет заметные размерные эффекты при линейных размерах менее  $100$  атомных диаметров.

Важнейшим свойством УНТ является способность поглощать и удерживать водород и другие вещества в больших количествах. Это значит, что УНТ могут выступать не только как адсорбенты, но и как хранилища газообразных и жидких веществ [20]. Кроме того, УНТ являются хорошими катализаторами для многих химических реакций [42].

Большой диаметр нанотрубок по сравнению с межплоскостным расстоянием в графите делает перспективным создание на их основе литий-ионных аккумуляторов с рекордной емкостью и рабочим ресурсом.

## 4. Практическое применение

Перспективы применения нанотехнологии в науке и практике огромны. Однако в этой области пока делаются только первые шаги, хотя они и очень впечатляющие.

### 4.1. Электроника и приборостроение

Наиболее важной областью применения является в настоящее время электроника. Изобретение точечного транзистора (биполярный транзистор) в 1948 г. (Нобелевская премия 1956 г.) явилось революционным событием, заложившим основу полупроводниковой техники. Совершенствование этой техники шло по пу-

ти уменьшения размеров основных элементов. Успехи нанотехнологии открыли для электроники новое поле деятельности, связанное с освоением наноматериалов. Так возникла молекулярная электроника, опирающаяся на квантовые свойства нанобъектов. Перспективным материалом для наноэлектроники являются УНТ. Электропроводящие и электроэмиссионные свойства УНТ могут использоваться в электронных и световых устройствах. Некоторые из них — миниатюрные источники рентгеновского излучения, люминесцентные осветительные лампы, источники СВЧ-излучения и др. — уже сейчас находятся на полупромышленной стадии производства и широко рекламируются [16, 38, 39].

Другой областью применения нанотрубок является атомно-силовая микроскопия. Удачное сочетание высокой прочности и высокой упругости УНТ позволят использовать их для создания уникального острия в атомно-силовом микроскопе. Новые возможности открываются при применении в атомно-силовой микроскопии химически модифицированных нанотрубок со специально подобранными функциональными группами на конце острия. В этом случае удастся исследовать не только рельеф поверхности, но и ее химический состав. С помощью зонда с химически модифицированной нанотрубкой можно изучать биологические объекты в нанометровом масштабе.

Существует много других примеров, указывающих на перспективность использования УНТ в приборостроении. Отметим возможные применения УНТ для создания нановесов, нанопинцетов, наносенсоров для изучения потоков жидкости, наночистот и т. д. [20].

В качестве последних разработок следует отметить создание в Японии на основе УНТ «вечных» аккумуляторов, использующих суперконденсаторы большой емкости [47].

#### 4.2. Материаловедение

Одним из важнейших применений нанотехнологий является создание новых материалов, способных привести к коренному изменению промышленных технологий. Основные направления работ в этой области таковы [45].

**1. Создание устройств для информационной техники.** Нанотехнология предлагает новые способы записи информации. Например, использование излучения ближнего поля. (Излучением ближнего поля называется излучение, возникающее в очень небольшой области на поверхности образца при его облучении. Длина волны возникающего излучения много короче, чем у источника облучения.) При использовании этой технологии плотность записи можно увеличить в 1000 раз.

**2. Получение наноразмерных металлических композиций (керметов).** Здесь следует отметить новую технологию производства наноконкомпозитов с применением ультрадисперсных порошков. Такие порошки используются для изготовления высококачественных металлообрабатывающих инструментов, для получения наноструктурированных покрытий на различных деталях, а также для создания наносмазки, уменьшающей трение между различными поверхностями.

**3. Изготовление огнестойких пластмасс и наполнителей в виде диспергированных наночастиц.** Одним из основных недостатков пластмасс является их горючесть, которая сопровождается выделением ядовитых и вредных веществ. Огнестойкость пластмасс удается значительно повысить введением в них диспергированных неорганических наполнителей из наноразмерных порошков. Кроме

того, такие наноконкомпозиты обладают высокой абляционной стойкостью, что важно для создания термостойкой защиты поверхностей космических аппаратов.

#### 4.3. Медицина и бионанотехнология

Проникновение нанотехнологий в биологию придало ей мощный импульс, способствующий развитию новой области — бионанотехнологии. За последние 10 лет количество статей по бионанотехнологии выросло почти в 10 раз. Отметим, что количество статей в Китае и Южной Корее за тот же период увеличилось в 100 раз. В абсолютных цифрах количество публикаций в США превышает количество публикаций любой другой страны. Россия снизила свой ранг, перейдя с 12-го места в 1995–1997 гг. на 19-е место в 2004–2005 гг. [48].

Основные направления работ в области медицины и биоинженерной нанотехнологии и цели исследований таковы [19].

1. «Адресная доставка» лекарств, при которой препараты переносятся в нужные органы или ткани при помощи молекул-носителей.

2. Получение новых биоматериалов, в том числе заменителей тканей организма, таких, которые позволяют осуществить «ремонт» организма.

3. Создание наноустройств, в особенности биодатчиков (автономных или вводимых в организм), которые в сочетании с веществами, способными к молекулярному распознаванию, могли бы осуществить раннюю диагностику, например, рака.

4. Создание биомеханизмов, допускающих возможность непрерывного мониторинга состояния, связи с врачом и по рекомендации врача — требуемых медицинских действий.

Подчеркнем, что успехи нанотехнологии позволяют перейти к крупномасштабным исследованиям в области биологии и здравоохранения на клеточном и молекулярном уровнях.

#### 4.4. Военные нанотехнологии (по материалам зарубежных источников [8, 49])

По мнению зарубежных военных специалистов, внедрение нанотехнологии в военную технику может изменить характер боевых действий в большей степени, чем изобретение пороха [49]. Основные направления научно-технических исследований в военной области нацелены на решение следующих задач:

1) разработка перспективных конструкционных и композиционных материалов для систем вооружений и военной техники. В рамках этого направления, например, на кораблях ВМС США в конструкции валов, винтов, перископов и других узлов и механизмов, работающих в тяжелых коррозионных условиях, уже применяют покрытия из керамических наноматериалов;

2) использование наноконкомпозитов в энергетических конденсированных системах (разработка нанодисперсных компонентов для ракетного топлива, взрывчатых веществ, порохов и т. д.);

3) исследования по созданию элементной базы наноэлектроники военного назначения (кардинальное уменьшение размеров и массы электронных приборов, в том числе за счет использования квантовых компьютеров). О применении нанотехнологии в отечественной ракетно-космической технике см. [50, 51];

4) создание образцов военной техники для проведения радиационной химической и биологической разведки. В этой области ведутся работы по конструированию

приборов, использующих в качестве чувствительного элемента мономолекулярные слои распознающего вещества. Приборы такого класса будут способны определять вредные вещества в концентрациях до  $10^{-4}$  %;

5) использование нанотехнологий в экипировке военнослужащих. В настоящее время, например, вес полного комплекта экипировки пехотинца армии США достигает 64 кг. За счет внедрения новых наноматериалов предполагается к 2010 г. уменьшить этот вес до 20 кг. Весьма перспективны также разработки новых легких углеродных наноматериалов для бронезилов и космических скафандров.

Для реализации будущих проектов в США сформирован закрытый Институт армейских технологий, объединяющий ведущих специалистов в этой области — от военных организаций до университетских исследовательских центров.

### Заключение

Нанотехнология в той ее части, которая относится к свойствам наночастиц и других нанообъектов, тесно примыкает к молекулярной физике. Более того, она является новой ветвью молекулярной физики. Традиционная молекулярная физика в основном занималась изучением свойств ансамбля частиц. Развитие экспериментальной техники позволило ей проникнуть в область поведения индивидуальных частиц (броуновские частицы, дислокации и т. д.). Дальнейший прогресс в технике эксперимента сделал возможным изучение наночастиц вплоть до распознавания отдельных атомов. В будущем наука о наночастицах будет, по мнению чл.-корр. РАН И. Мелихова [52], развиваться в следующих направлениях.

1. Уточнение представлений о движении наночастиц в электрическом, магнитном и температурном полях.

2. Выяснение закономерностей временной физико-химической эволюции наносистем.

3. Получение достоверной информации о взаимодействии наночастиц друг с другом и с поверхностью массивных твердых тел.

4. Изучение взаимодействия наночастиц с биологическими объектами. Формулировка требований к нанотехнологии лекарственных сред.

5. Совершенствование методов определения свойств наночастиц и изменений свойств при их взаимодействии со средой.

К перечисленным направлениям следует добавить еще одно, связанное с разработкой математических технологий анализа наносистем. Это направление сейчас известно как квантовая математика [53].

Сформулированная программа по существу есть программа развития одной из основных областей молекулярной физики — физики наночастиц.

Отметим, что только совместное развитие фундаментальных и прикладных наук, включая молекулярную физику, сможет обеспечить рынок в области нанотехнологий.

Авторы благодарят Н. М. Буйлову (ВИНИТИ РАН) за предоставление материалов [54, 55], которые были частично использованы при написании обзора.

### Список литературы

1. Третьяков Ю.Д. // Вестн. РАН. 2007. **77**, № 1. С. 3.
2. Андриевский Р.А., Хачоян А.В. Послесловие // Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. М., 2002.

3. Фейнман Р. // Росс. хим. журн. 2002. **46**, № 5. С. 4.
4. Андриевский Р.А. // Принципы и процессы создания неорганических материалов: Междунар. симпозиум (3 Самсоновские чтения). Хабаровск, 12–15 апреля, 2006. С. 10.
5. Roco M.C. // J. of Nanoparticle Research. 2005. **7**. P. 707.
6. Alencar M.S.De M., Canongria C., Antunes A.M.S. The trend and geography of nanotechnological research. Fennia. 2006. 184:1.
7. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М., 2005.
8. Бочаров Л.Ю., Иванов А.А., Мальцев П.П. // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 12. С. 2.
9. Третьяков Ю.Д. // Поиск. 2006. № 16 (1383). С. 39.
10. Индустрия наносистем и материалов: Пилотный выпуск информационного издания ВИНТИ РАН. М.: ВИНТИ РАН, 2007.
11. Likharev K.K., Zorin A.B. // J. Low Temp. Phys. 1985. **59**, N 3/4. P. 347.
12. Аверин Д.В., Зорин А.Б., Лихарев К.К. // ЖЭТФ. 1985. **88**, № 2. С. 697.
13. Аверин Д.В., Лихарев К.К. // ЖЭТФ. 1986. **90**, № 2. С. 733.
14. Averb D.V., Likharev K.K. // Mesoscopic Phenomena in Solids / Ed. by B. Altshuler, P.A. Lee, R. Webb. Amsterdam: Elsevier, 1991. Ch. 6.
15. Алферов Ж. // Поиск. 2008. № 4 (974). С. 11.
16. Smalley R. // Rev. Mod. Phys. 1997. **69**, N 3. P. 723.
17. Суздальев И.П. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров. М., 2006.
18. Iijima S. // Nature. 1991. **351**. P. 56.
19. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. Пер. с яп. М., 2005.
20. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М., 2006.
21. Likharev K.K. // Nano and Giga challenges in microelectronics / Ed. by J. Geer et al. Amsterdam, 2003. P. 27.
22. Gaubert H.E., Frey W. // Nanotechnology. 2007. **17**, N 13. P. 135101/1.
23. Mathur R.B., Seth S., Lal Ch. et al. // Carbon. 2007. **45**, N 1. P. 132.
24. Amoroso S., Bruzzese R., Wang X. et al. // Nanotechnology. 2007. **18**, N 14. P. 145612/1.
25. Апресян Л.А., Власов Д.В., Власова Т.В. и др. // ЖТФ. 2006. **76**, № 12. С. 92.
26. Hata K., Futaba D.N., Mizuno K. et al. // Science. 2004. **306**. P. 1362.
27. Zheng L.X., O'Connell M.J., Doom S.K. et al. // Nature Materials. 2004. P. 673.
28. Zheng M., Alkinson K.R., Baiighman R.H. // Science. 2004. **306**. P. 1358.
29. Zhang M., Fang S., Zakhidov A.A. et al. // Science. 2005. **309**. P. 1215.
30. Albrecht M., Barrasa-Lopez S., Lyding J.W. // Nanotechnology. 2007. **18**, N 9. P. 095204/1.
31. Trevelyan T., Kantorovich L., Polesel-Maris J., Ganthier S. // Nanotechnology. 2007. **18**, N 8. P. 084017/1.
32. Humphris A.D.L., Miles M.J., Hobbs J.K. // Applied Physics Letters. 2005. **86**. P. n034106.
33. Hyang F.M., Culfaz F., Festy F., Richard D. // Nanotechnology. 2007. **18**, N 1. P. 015501/1.
34. Wen S.P., Zong R.L., Zeng F. et al. // Acta mater. 2007. **55**, N 1. P. 345.
35. Subramanian A., Dong L.X., Tharian J. et al. // Nanotechnology. 2007. **18**, N 7. P. 075703/1.
36. Gaspard P. // Progr. Theor. Phys. Supplement. 2006. N 165. P. 33.

37. *Rapp E., Micu C., Aur L., Racolta D.* // *Physica E.* 2007. **36**, N 2. P. 178.
38. *Grunberg P., Burgler D.E., Dassow H.* et al. // *Acta mater.* 2007. **55**, N 4. P. 1171.
39. *Чеченин Н.Г.* Магнитные наноструктуры и их применение: Учеб. пособие. М., 2006.
40. *Duan X., Tang C., Zhang J.* et al. // *Nano Lett.* 2007. **7**, N 1. P. 143.
41. *Сергеев Г.Б.* Нанохимия. М., 2006.
42. *Lu Chi-Yuan, Wey Ming-Yen.* // *Fuel.* 2007. **86**, N 7–8. P. 1153.
43. *Алексенко А.Г.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 2.
44. *Liu R.S., Suyatin D., Pettersson H., Samuelsen L.* // *Nanotechnology.* 2007. **18**, N 5. P. 055302/1.
45. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. М., 2002.
46. *Елецкий А.В.* // Российские нанотехнологии. 2007. **2**, № 5–6. С. 6.
47. Восьмая Междунар. конф. «Фуллерены и атомные кластеры». СПб., 2007; Мяч несется вскачь // Поиск. 2007. № 29030 (947–948). С. 22.
48. *Маркусова В.А.* Бионанотехнологии: библиометрический анализ по базам данных Science Citation Index и Social Science Citation Index, 1995–2006 // Сб. «Индустрия наносистем и материалов: Пилотный выпуск информационного издания ВИНТИ РАН». М., 2007. С. 24.
49. *Бочаров Л.Ю., Иванов А.А., Мальцев П.П.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 5.
50. *Голованев И.В., Дубовой А.Н.* Нанотехнологии в ракетно-космической технике. Тр. Междунар. научно-практической конф. «Нанотехнологии — производству, 2005». Фрязино, 30 нояб. – 1 дек. 2005. С. 417.
51. *Альтман Ю.* Военные нанотехнологии. М., 2006.
52. *Мелихов И.* // Поиск. 2007. № 14 (932).
53. *Карасев М.В.* // Вестн. РАН. 2006. № 1. С. 44.
54. *Буйлова Н.М., Егоров В.С., Кириллова О.В.* и др. // Науч.-техн. инф. Сер. 1. Орг. и методика инф. работы. 2007. № 1. С. 26.
55. *Буйлова Н.М., Ящуклова С.П.* // Науч.-техн. инф. Сер. 2. Инф. процессы и системы. 2007. № 12. С. 24.

## NANOTECHNOLOGY AND PHYSICS OF MOLECULES

**N. N. Sysoev, A. I. Osipov, A. V. Uvarov<sup>a</sup>**

*Department of Molecular Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>uvarov@phys.msu.ru.*

A brief review of a nowadays situation in the field of nanotechnology research is given, including overview of the funding, tendency in the number of publications, and contribution by the Russian scientists. Specifically, methods of fabrication and characterization of nanomaterials, their properties, and practical applications are considered. Special attention is paid to the carbon nanomaterials, i. e., carbon nanotubes and fullerenes. An emphasis is made on the links between nanotechnology and molecular physics.

PACS: 61.46.Fg, 62.25.-g, 65.80.+n, 81.07.b, 81.16.-c.

*Keywords:* properties of nanomaterials, fabrication and characterization of nanomaterials, nanotechnology and molecular physics.

*Received 23 April 2008.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)

### Сведения об авторах

1. Сысоев Николай Николаевич — д.ф.-м.н., профессор, зам. декана, зав. кафедрой, профессор; тел.: 939-10-97, e-mail: sysoev@phys.msu.ru.
2. Осипов Алексей Иосифович — д.ф.-м.н., профессор, профессор; тел.: 939-10-97.
3. Уваров Александр Викторович — д.ф.-м.н., профессор, профессор; тел.: 939-10-97, e-mail: uvarov@phys.msu.ru.