

анализа этих характеристик модель UrQMD была дополнена рождением j/ψ частиц и рассмотрены различные сценарии поглощения j/ψ частиц.

Наконец, некоторые редкие результаты, например, распределения рожденных частиц по переменной Феймана, распределения взаимодействий по поперечной энергии, распределения нейтронов по кинетической энергии и т. д., приведены в разделе 11.

Мы полагаем, что такое представление обзора применения модели UrQMD значительно облегчит ориентацию потенциальных пользователей в потоке информации и поможет им в подборе необходимой литературы.

Авторы выражают благодарность Г. А. Ососкову, П. В. Зрелову и Х. Абдель-Вагеду за интерес к работе и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bass S. A. et al. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions // Prog. Part. Nucl. Phys.— 1998.— Vol. 41.— P. 255–369.

2. Bleicher M. et al. Relativistic hadron hadron collisions in the ultrarelativistic quantum molecular dynamics model // J. Phys.— 1999.— Vol. G25.— P. 1859–1896.

3. См.: http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM/index_e.html

4. См.: http://www-panda.gsi.de/auto/_home.htm

5. Flaminio V., Moorhead W. G., Morrison D. R. O., Rivoire N. Compilation of Cross-Sections III: p and \bar{p} Induced Reactions // CERN-HERA 84-01.— 1984.

6. Gazdzicki M., Rohrich D. Pion multiplicity in nuclear collisions // Zeit. Fur Phys.— 1995.— Vol. C65.— P. 215–223.

7. Gazdzicki M., Rohrich D. Strangeness in nuclear collisions // Zeit. Fur Phys.— 1996.— Vol. C71.— P. 55–64.

8. Gazdzicki M. Entropy in nuclear collisions // Zeit. fur Phys.— 1995.— Vol. C66.— P. 659–662.

9. Gazdzicki M., Gorenstein M. I. On the early stage of nucleus-nucleus collisions // Acta Phys. Pol.— 1999.— Vol. B30.— P. 2705–2743.

Материал поступил в редакцию 06.08.07.

УДК 537.3:620.3

Н. М. Буйлова, С. П. Яшукова

Углеродные нанотрубки. Анализ публикаций по материалам выпуска РЖ ВИНТИ “Физика твердых тел (Электрические свойства)”

Дается краткий обзор информационного потока по одному из наиболее важных объектов наноматериалов — углеродным нанотрубкам. Изучение нанотрубок и технологий их получения — это междисциплинарная область науки, вклад в которую вносят различные области знаний: физика, химия, электроника, материаловедение и т. д. Реферативный журнал “Физика” отражает только часть достижений в этой области, имеющих, однако, фундаментальный характер.

ВВЕДЕНИЕ

Наноматериалы — это новые объекты физических исследований, необычность свойств которых определяет их широкое практическое применение.

Впервые на важность и перспективность исследований наночастиц указал выдающийся американский физик лауреат Нобелевской премии Р. Фейнман [1]. В своей лекции “Внизу 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 отметил, что, “научившись регулировать и управлять структурой на атомном

уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные эффекты... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить множество проблем”.

В настоящее время под наночастицами подразумеваются объекты, линейные размеры которых хотя бы в одном направлении заключены в пределах 10–100 нм (10^{-6} – 10^{-5} см). Для сравнения: среднее расстояние между атомами в кристалле — 0,2 нм, линейные размеры зерен кристаллитов — 40–300 нм.

Низкоразмерные объекты являются квантовыми, т. е. для описания их свойств классических представлений оказывается уже недостаточно.

Своеобразный квантовый характер нанообъектов позволяет создать на их основе новые технологии и осуществить глубокий прорыв в науке и технике. Так возникли новые области науки — наномеханика, нанохимия, нанотехнология, наноматериаловедение и т. д.

Информационный поток в области нанотехнологии и наноматериалов огромен. Информация, касающаяся этой проблемы, публикуется более чем в 350 журналах, а число специализированных, посвященных только нанообъектам журналов, превышает 50 (до 1990 г. не было ни одного). В мире ежедневно появляются более 100 статей и почти ежедневно проходят конференции по нанотехнологии [2, 3]. Исследования в этой области развиваются фантастическими темпами. Достаточно сказать, что США и Евросоюз тратят сейчас по миллиарду долларов в год на развитие этой области [4].

Старт нанотехнологическому “буму” во многих странах был дан принятием в США Государственной программы “Национальная нанотехнологическая инициатива”, подписанной президентом Б. Клинтон в январе 2000 г. [4].

В России теоретические и прикладные работы по нанотехнологии первое время проводились преимущественно в университетах и отдельных лабораториях [4]. Потребность науки и промышленности в специалистах по нанотехнологии привела к введению в 2003 г. Министерством образования и науки России нового направления подготовки дипломированных специалистов “Нанотехнология” по специальностям “Нанотехнология в электронике” и “Наноматериалы”. Учебно-методический совет по данному направлению возглавил Нобелевский лауреат академик Ж. И. Алферов. Сейчас разрабатывается программа по приоритетному направлению “Индустрия наносистем и материалов” федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.”, которая предусматривает финансирование в размере 134 млрд. руб. [5].

В настоящее время исследования по наноматериалам, включая нанотрубки, проводятся более чем в 40 странах. Фирма “Lux Research” выделила, основываясь на научных достижениях, 13 ведущих стран, разделив их на четыре группы [2, 3]:

1. США, Япония, Южная Корея, Германия.
2. Тайвань, Израиль, Сингапур.
3. Великобритания, Франция.
4. Китай, Канада, Австралия, Россия.

В последние годы темпы развития научных исследований в Китае и Тайване таковы, что они претендуют на переход в группу лидеров. По числу публикаций уже в 2004 г. Китай вышел на второе место после США, опередив Японию и Германию.

Динамика роста суммарного числа публикаций по нанотематике, показанная на рис. 1, носит экспоненциальный характер. Если эта тенденция сохранится, то в 2010 г. следует ожидать появления более 80 000 публикаций в год. Аналогичная тенденция наблюдается в динамике роста финансовых вложений в эту область. Например, в 2005 г. бюджетные ассигнования США на нанотехнологические исследования составили 962 млн. долларов, что в восемь с лишним раз больше, чем в 1997 г. [6].

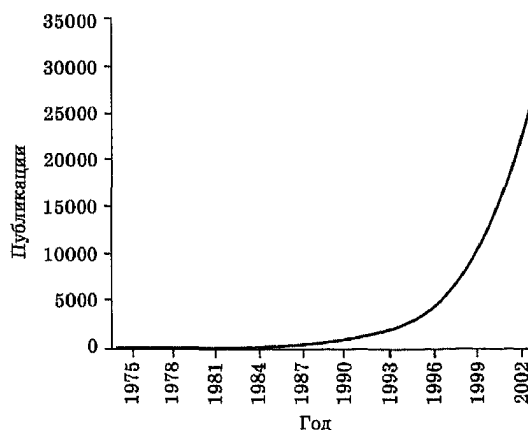


Рис. 1. Динамика роста суммарного числа публикаций по нанотематике

В настоящей публикации дается краткий обзор информационного потока по одному из наиболее важных объектов наноматериалов — углеродным нанотрубкам.

Изучение нанотрубок и технологий их получения — это междисциплинарная область науки, вклад в которую вносят различные области знаний: физика, химия, электроника, материаловедение и т. д. Реферативный журнал “Физика” отражает только часть достижений в этой области, имеющих, однако, фундаментальный характер.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Углеродные нанотрубки (УНТ), впервые обнаруженные в 1991 г. Сумио Идзисимой [6, 7], представляют собой квазиодномерную трубчатую структуру, которая образуется в результате свертывания базисных плоскостей гексагональной решетки графита в бесшовные цилиндры. Нанотрубки могут быть однослойными (одностеночными) и многослойными (многостеночными), открытыми и закрытыми. В закрытых УНТ “крышка” представляет собой половину молекулы фуллерена C_{60} . Диаметр УНТ составляет 0,5–10 нм, длина может достигать десятков микрон. Помимо углерода нанотрубки могут формироваться молекулами SiC, BN, MoS_2 , WS_2 , V_2O_5 , TiO_2 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. Идзисима 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.

УНТ обладают высокой механической прочностью и могут использоваться для создания высокопрочных композитов, а также для различных механических наностроительств, в том числе и как инденторы при измерении микротвердости. УНТ, в зависимости от геликоидального упорядочения атомов углерода в их стенках, имеют полупроводниковую или металлическую проводимость, поэтому их широко применяют в качестве проводящих элементов

в электронных структурах, в атомно-силовых микроскопах и т. д. В настоящее время УНТ (и фуллерены) изучены гораздо лучше, чем трубки другого состава. Уже в 2003 г. метод лазерного, а впоследствии и дугового испарения, обеспечил получение измеряемых граммами количеств УНТ (в то время стоимость одного грамма УНТ составляла 500 долл. [8]). Для примера укажем, что производство УНТ и фуллеренов в Японии достигло сейчас сотен тонн. Технология получения нанотрубок другого состава развита еще недостаточно, а область их практического применения пока ограничена.

Анализ динамики роста числа публикаций по УНТ, представленных в РЖ “Физика твердых тел (Электрические свойства)” обнаруживает ту же тенденцию, что и динамика общего числа публикаций по нанотехнологиям. Публикации в российских журналах составляют существенно меньшую часть суммарного числа публикаций (рис. 2). Следует, однако, иметь в виду, что многие российские авторы публикуют свои работы в иностранных журналах. Кроме того, значительная часть российских ученых работает за рубежом, где и публикуется.

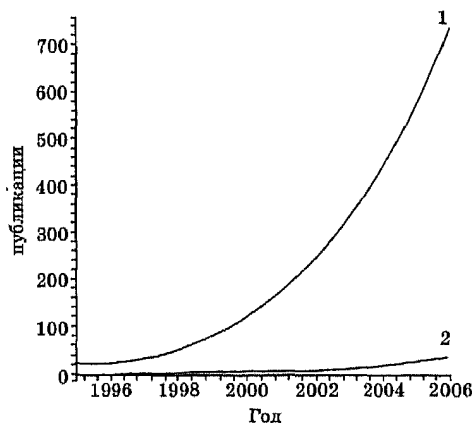


Рис. 2. Динамика роста числа публикаций по углеродным нанотрубкам: 1 — иностранные публикации; 2 — русские публикации

В таблице показаны темпы роста количества иностранных и русскоязычных публикаций.

Год	Число публикаций	
	Иностранная	Русские
1995	22	1
2000	119	5
2003	328	12
2006	704	39

Динамика роста суммарного числа публикаций по УНТ не позволяет понять, за счет каких научных или технологических направлений происходит этот рост. Детальный анализ содержания публикаций позволил выделить следующие направления исследований УНТ.

1. Свойства УНТ.
2. Технология получения.
3. Области практических применений.

1. Свойства УНТ

Углеродные нанотрубки в отличие от фуллеренов, которые представляют собой молекулярную

форму углерода, сочетают в себе как свойства нанокластеров, так и твердого тела. Этим определяется своеобразие свойств УНТ.

Обсудим, как отражены исследования свойств УНТ в публикациях рассматриваемого выпуска РЖ “Физика” за 2006 г. Примем следующую классификацию свойств:

- Механические.
- Теплофизические.
- Электрические и магнитные.
- Автоэмиссионные.
- Оптические.
- Химические.
- Структурные.

Из общего числа отраженных в выпуске работ примерно 73% относятся к электрическим свойствам, 4,6% — к магнитным и 13% — к автоэмиссионным. Таким образом, электронные свойства (в широком смысле слова) обсуждаются более чем в 90% всех работ. Это не значит, что на остальные разделы падают только 10%, поскольку многие статьи по УНТ попадают в несколько разделов по принятой здесь классификации свойств.

Повышенный интерес к электронным свойствам объясняется, прежде всего, широкими возможностями их практического использования при создании наноустройств.

Среди публикаций по *электрическим свойствам* основное место занимают работы по электропроводности. Естественно, что при интерпретации этих свойств рассматривается электронная структура УНТ.

Автоэлектронной эмиссии посвящено 20% всех работ, касающихся электронных свойств УНТ. Основное направление работ этой тематики связано с изучением характеристик автоэлектронной эмиссии и влиянию на них способов получения УНТ и материала подложки.

Второе место по числу работ (17%) занимают публикации, относящиеся к *оптическим свойствам*. При их изучении основное внимание уделяется исследованиям динамики решетки УНТ. Методы изучения включают оптическую спектроскопию комбинационного рассеяния. Наблюдающаяся при комбинационном рассеянии группа линий с определенными частотами присуща только однослойным УНТ и используется для их идентификации.

К оптическим свойствам принадлежит также способность однослойных трубок взрываться при интенсивном освещении (например, при фотовыщелке). Одно из возможных объяснений этого явления состоит в том, что происходит нагрев кислорода, находящегося как внутри нанотрубок, так и между ними. Нагрев приводит к возникновению ударной волны, которая повышает температуру внутри нанотрубок, что и приводит к мгновенному сгоранию. В отсутствие кислорода эффект не наблюдается.

Химическим свойствам посвящено 13% работ. Этими свойствами занимается “химия нанотрубок”, которая включает синтез, очистку и различные формы химического модифицирования внутренней и внешней поверхностей нанотрубок. Кроме того, в химии нанотрубок изучаются размерные эффекты, которые проявляются в качественном изменении физико-химических свойств и реакционной способности в зависимости от количества

частиц и происходят при линейных размерах менее 100 атомных диаметров.

Структурным свойствам УНТ посвящено 10% публикаций. Это лишь часть полного списка публикаций, поскольку они отражаются в основном в выпуске РЖ "Физика твердых тел (Структура и динамика решетки)". Здесь же мы отметим, что УНТ могут иметь различную атомную структуру, причем трубки разной структуры имеют разные свойства. Однослойные УНТ могут иметь кресельную, зигзагообразную структуру, а, кроме того, различную хиральность. Многослойные УНТ обладают большим разнообразием форм. Отдельные трубки агрегируют с образованием ростков различного типа.

Механические свойства УНТ (6% публикаций) столь же необычны, как и другие. В УНТ сочетаются высокая прочность и жесткость с высокой упругостью: трубка гнется, но не ломается. Модуль Юнга трубок почти в 10 раз больше, чем у стали, а прочность примерно в 20 раз. В УНТ обнаружены также два электромеханических эффекта: деформация под действием поля и значительное изменение электропроводности даже при небольшом изгибе.

В работах, посвященных механическим свойствам, в основном обсуждаются две проблемы: влияние механических нагрузок на УНТ и влияние УНТ на прочностные характеристики композитов.

Публикации по свойствам (4,6%) относятся к магнитооптическим явлениям, к выяснению влияния магнитного поля на проводимость (магнитопереносу) и на другие характеристики УНТ, в частности обсуждается явление гигантского магнитосопротивления.

2. Методы получения углеродных нанотрубок

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

В первом методе для получения УНТ используется термическое распыление графитового электрода (анода) в плазме дугового разряда, происходящего в атмосфере гелия. Графитовый анод интенсивно испаряется. Испарившиеся атомы углерода оседают на катоде или на охлажденных водой стенках камеры, где и формируются УНТ.

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.

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

В статьях, отраженных в выпуске, обсуждаются все три метода выращивания УНТ и их модификации. Например, новая разновидность метода лазерной абляции, пиролиз углеводородов на частицах катализатора в условиях активирования процесса ВЧ-разрядом, использование шаблонов для

выращивания ориентированных УНТ, изготовление одностеночных УНТ, обернутых одной спиралью ДНК, и т. д. Фактически в каждой экспериментальной работе в той или иной мере обсуждаются методы получения УНТ.

3. Применения углеродных нанотрубок

Необычность свойств УНТ определяет широту их практических применений. На основе анализа публикаций, отраженных в выпуске, можно предложить следующую классификацию областей применения.

- Механика.
- Электроника, эмиттеры, электротехника.
- Оптика
- Химия.
- Биология.
- Медицина.

Наибольшее число статей в области применения принадлежит **электронике** (62%), **эмиттерам** (27%) и **электротехнике** (12%). Некоторые из статей относятся сразу к нескольким областям применения. Среди публикаций по этой тематике наибольшее их число связано с использованием УНТ в качестве важных элементов наноприборов в электронных и оптоэлектронных приборах: диодах, полевых транзисторах, холодных катодах, дисплеях и т. д.

Второе место по числу статей (18%) занимают **химические приложения**. Важнейшим из них является применение УНТ для поглощения и удержания водорода в больших количествах, поскольку аккумуляция водорода является одной из ключевых проблем современной техники (и, в частности, автомобильной промышленности). Кроме того, УНТ являются хорошим катализатором для многих химических реакций.

Механические приложения (6%) касаются в основном использования УНТ в качестве острия сканирующего туннельного или атомно-силового микроскопа. Панотрубка представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких диаметров атомов. Двухслойная УНТ является хорошим цилиндрическим подшипником. Если внутреннюю часть трубки оставить неподвижной, а внешнюю заставить вращаться, то получится почти идеальный подшипник скольжения, коэффициент трения в котором на два порядка меньше, чем у лучших пар трения в макроскопических твердых телах.

Оптические приложения (5,5%) посвящены главным образом светодиодам, солнечным элементам, пеллицильным оптическим затворам и т. д. Способность УНТ взрываться при вспышке может найти новые, совершенно неожиданные применения вплоть до использования их в качестве детонатора для подрыва боезарядов с помощью светового сигнала [8].

Наконец, **биологические и медицинские приложения**, которые охватывают соответственно (2,7%) и (1,4%) от полного числа публикаций. Здесь в перспективе — создание технологий адресной доставки лекарств. Пока это дело будущего. В рецензируемом выпуске обсуждаются частные проблемы медицинской и биологической физики: bipolarные транзисторы, создание материалов для искусственных мускулов, интеграция УНТ с биологическими объектами.

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

На прошедшей недавно в г. Иваново IV Международной конференции “Кинетика и механизмы кристаллизации. Нанокристаллизация. Биокристаллизация” было проанализировано состояние науки о наносистемах. На основе этого анализа член-корр. РАН И. Мелихов предложил пять направлений исследований [9]:

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” [10].

Обозначенные пути исследований относятся ко всем наносистемам, в том числе и к УНТ, которые среди всех наноматериалов занимают особое место. Можно ожидать, что разнообразие новых и необычных механических, электрических, магнитных, химических и других свойств УНТ обеспечат основу прорыва в нанонауке и нанотехнологиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технический прогресс в обществе определяется прежде всего соразмерным накоплением фундаментальных и прикладных знаний. Можно ожидать, что в первой половине XXI века будут доминировать три группы технологий – электроника и компьютерные технологии, биотехнологии и нанотехнологии.

По оценкам А. И. Гусева [4] развитие электроники и компьютерных технологий достигнет максимума в 2010–2015 гг., вклад биотехнологий станет наибольшим в период 2025–2035 гг., а нанотехнологии станут основной движущей силой прогресса в 2045–2055 гг.

Надо, однако, иметь в виду: предсказания будущего страдают тем недостатком, что неожиданные открытия в фундаментальных науках могут перечеркнуть все прогнозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейнман Р. Внизу полным-полно места. приглашение в новый мир физики // Российский химич. журнал. – 2002. – Т. 46, № 5 – С. 4–6.
2. Андриевский Р. А. Нанотехнология и наноматериалы. Современное состояние и перспективы // Принципы и процессы создания неорганических материалов. Межд. симп. (3 Самсоновские чтения), Хабаровск, 12–15 апр. 2006. Матер. симп. Хабаровск, 2006.
3. Буйлова Н. М., Егоров В. С., Кириллова О. В., Королева Л. М., Пронина Т. А., Солошенко Н. С. Анализ публикаций пилотного выпуска информационного сборника ВИНТИ РАН “Индустрия наносистем и материалов” // НТИ. Сер. 1. – 2007. – № 11. – С. 26–29.
4. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005. – 134 с.
5. Третьяков Ю. Д. Проблема развития нанотехнологий в России и за рубежом // Вестник РАН. – 2007. – Т. 77, № 1. – С. 3–10.
6. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature (London). – 1991. – V. 354 – p. 56–58.
7. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
8. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки, свойства, применения. – М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
9. Мелихов И. Логика целесообразности // Поиск. – 2007. – № 14 (932).
10. Карасев М. В. Математические технологии на рубеже нанореволюции // Вестник РАН. – 2006. – № 1. – С. 44–47.

Материал поступил в редакцию 5.09.07.