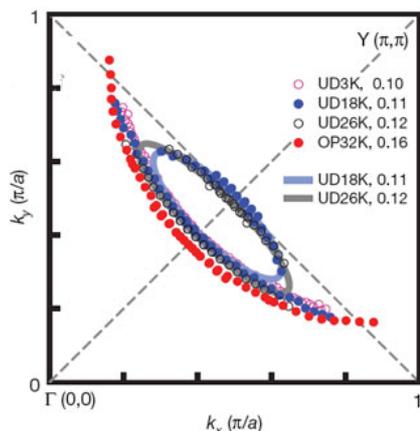


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Существование фермиевских дуг и карманов в купратных ВТСП

Фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES) показывает, что в псевдощелевом состоянии купратных ВТСП поверхность Ферми не является замкнутой, а состоит из нескольких не связанных друг с другом участков – так называемых фермиевских дуг [1]. Между тем недавние эксперименты по квантовым осцилляциям де Гааза – ван Альфена свидетельствуют о наличии в ВТСП небольших замкнутых “карманов” поверхности Ферми [2]. Одно из возможных объяснений этого противоречия заключается в том, что ARPES просто “не видит” боковые стороны карманов, ошибочно принимая их за дуги. В работе [3] китайских (не только по национальности, что стало уже привычным, но и по месту работы) ученых показано, что дело обстоит гораздо интереснее: дуги и карманы сосуществуют (см. рис.). В оптимально допированных и передопированных образцах карманы отсутствуют. Носителями заряда в них являются дырки, а не электроны, как полагали авторы [2]. Форма и размер этих карманов, а также их положение в зоне Бриллюэна согласуются с предсказаниями модели резонирующих валентных связей, но противоречат теории d -волнового “скрытого” порядка. В работе [3] утверждается, что полученные результаты не являются следствием фазовой неоднородности образцов (наличием в них областей с различной концентрацией дырок и, соответственно, с разной T_c): если бы это было так, то температурная зависимость намагниченности имела бы ступенчатый вид. Теперь слово за теоретиками.



Поверхность Ферми в La-Bi2201 с различной T_c (от 3 К до 32 К) и различным уровнем допирования (от 0.10 до 0.16 дырок в расчете на один атом меди) по данным ARPES [3]. Показан только один квадрант зоны Бриллюэна.

Л.Опенев

1. H.B. Yang et al., *Nature* **456**, 77 (2008).
2. D. LeBoeuf et al., *Nature* **450**, 533 (2007).
3. J. Meng et al., *Nature* **462**, 335 (2009).

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

2 Ультраплоский графен

Гетероструктура полупроводник/сверхпроводник

МАГНИТЫ

Магнитные наночастицы: охлаждай не торопись!

НАНОМАТЕРИАЛЫ

3 Спиновое электричество в молекулярных нанокластерах

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

3 Новые исследования токсичности нанотрубок

5 Фторфуллерены на поверхности кремния: эксперимент и теория

Получение графенов из многослойных углеродных нанотрубок в импульсном разряде

6 Углеродные нанотрубки усиливают СВЧ излучение

7 Преимущественный рост углеродных нанотрубок с металлической проводимостью

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

7 Мера запутанности

8 “Nanotech Europe 2009”

КОНФЕРЕНЦИИ

10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics
July 4th -9th, 2010,
Potsdam, Germany

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Ультрарасплоский графен

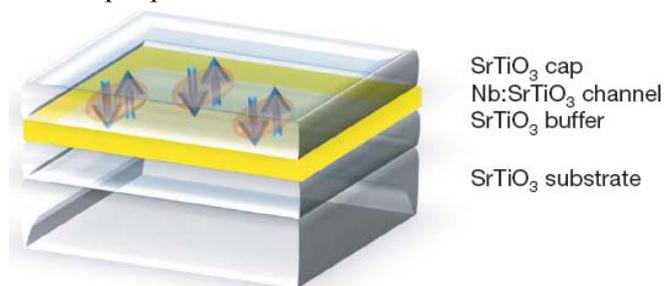
Графен привлекает к себе внимание, прежде всего благодаря своим уникальным электронным свойствам (дираковские фермионы и пр.) Однако большой интерес представляет также и атомная структура этой модельной двумерной системы. Так, например, было обнаружено, что графен не является абсолютно плоским: на нем имеется “рябь”, благодаря которой, как считается, обеспечивается термодинамическая устойчивость свободного (не на подложке) графена. Впрочем, такая же рябь наблюдалась и в слоях графена на подложке. Типичная высота “волн” при этом составляет около 1 нм, а их длина – (10 - 25) нм. Высказывались даже предположения, что некоторые специфические электронные и химические свойства графена (образование электрон-дырочных “капель”, подавление слабой локализации и т.д.) обусловлены именно наличием на нем таких волн. Но чтобы проверить эти предположения, нужно иметь в своем распоряжении идеально плоские образцы графена, а их долгое время получать не удавалось. Первыми здесь преуспели специалисты из Колумбийского университета (США), которые изготовили ультрарасплоские монослои графена путем надлежащего выбора подложки для них. Атомная силовая микроскопия показала, что “шероховатость” этих монослоев не превышает 0.02 нм и практически не отличается от таковой для поверхности скола монокристалла графита (чтобы исключить влияние иглы микроскопа на образец, измерения проводили в бесконтактном режиме). Теперь на повестке дня – сравнительный анализ различных характеристик плоского и волнистого графена.

1. C.H.Lui et al., *Nature* **462**, 339 (2009).

Гетероструктура полупроводник/сверхпроводник

Слоистые полупроводниковые гетероструктуры – основа для исследования низкоразмерных (квазидвумерных) систем с низкой концентрацией и высокой подвижностью электронов. Недавние сообщения о сверхпроводимости сильно легированных образцов алмаза, кремния, карбида кремния и германия наводят на мысль о возможности синтеза гетероструктур нового типа – с чередующимися полупроводниковыми и сверхпроводящими слоями. Но сначала нужно как-то справиться с сильным беспорядком, присущим тонким сверхпроводящим пленкам и приводящим к очень малой (меньше толщины пленки) длине свободного пробега электронов l , причем настолько малой, что l оказывается значительно меньше длины сверхпроводящей когерентности ξ (“грязный предел”). Первый шаг в этом направлении сделан учеными из Японии и Южной Кореи [1]: путем дельта-легирования изготовлена гетероструктура $\text{SrTiO}_3/\text{Nb-SrTiO}_3$ со

сверхпроводящим слоем Nb-SrTiO_3 толщиной $d = 5.5$ нм (см. рис.) и $T_c = 370$ мК. В нормальном состоянии ($T = 2$ К) подвижность носителей превысила $1000 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, что позволило даже наблюдать четко выраженные осцилляции Шубникова – де Гааза на зависимости сопротивления от $1/H$ (признак высокой чистоты образца). Сверхпроводящее состояние сильно анизотропно: в параллельном магнитном поле величина H_{c2} существенно больше, чем в перпендикулярном (1.87 Тл и 0.06 Тл, соответственно). Это связано с тем, что $d \ll \xi$, то есть сверхпроводимость слоя Nb-SrTiO_3 является практически двумерной и не может быть разрушена параллельными ему магнитными вихрями. Развита в [1] методика открывает путь к изготовлению самых различных гетероструктур из полу- и сверхпроводников. Так, например, стоит попробовать вырастить сверхрешетки, моделирующие слоистую структуру купратных ВТСП, и так подобрать их параметры, чтобы взаимодействие между сверхпроводящими слоями было максимально. Может быть, таким путем удастся изготовить новые высокотемпературные сверхпроводники?



Схематическое изображение гетероструктуры $\text{Nb-SrTiO}_3/\text{SrTiO}_3$. Стрелками условно обозначены спины электронов в куперовских парах.

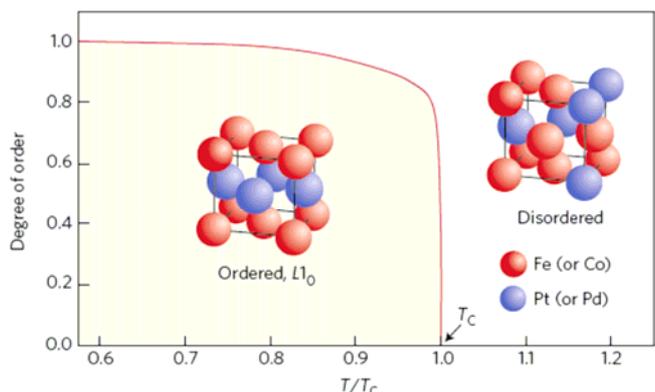
Л.Опенев

1. Y.Kozuka et al., *Nature* **462**, 487 (2009).

МАГНИТЫ

Магнитные наночастицы: охлаждай не торопись!

В последние годы много внимания уделяется исследованию магнитных наночастиц бинарных сплавов FePt , CoPt и FePd с тетрагональной структурой типа $L1_0$ и большой магнитокристаллической анизотропией вдоль оси c . Их предполагается использовать для изготовления магнитной памяти со сверхвысокой плотностью записи информации. Проблема заключается в том, что такие наночастицы (в отличие от объемных образцов) представляют собой разупорядоченные твердые растворы с ГЦК структурой (см. рис.), причем, если их диаметр d не превышает 5 нм, то полностью восстановить магнитную $L1_0$ фазу посредством отжига не удастся. Причины такой странной зависимости структуры наночастиц от их размеров широко обсуждались в литературе, но остались до конца не выясненными.



Упорядоченная ($L1_0$) и разупорядоченная (ГЦК) фазы бинарных магнитных сплавов Fe(Co), Pt(Pd).

В работе [1] показано, что даже при $d = (2 \div 3)$ нм восстановить $L1_0$ -структуру путем отжига все-таки можно. Но при этом надо, во-первых, правильно выбирать температуру отжига T_0 , во-вторых, проводить термообработку в течение достаточно длительного (16 ч) времени и, наконец, в-третьих, как можно медленнее охлаждать образцы после отжига. Величина T_0 должна быть ниже температуры перехода $L1_0 \rightarrow$ ГЦК, которая, как оказалось, для наночастиц существенно меньше, чем для объемных образцов, причем тем меньше, чем меньше d . Наблюдать структурные переходы на наноуровне стало возможно благодаря использованию авторами [1] просвечивающего электронного микроскопа с очень высоким разрешением.

Л.Опенев

I. D.Alloyeau et al., Nature Mater. 8, 940 (2009).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Спиновое электричество в молекулярных нанокластерах

В 1894 г. Пьер Кюри предположил, что в природе существуют такие вещества, молекулы которых намагничиваются под действием электрического поля и электризуются под действием магнитного. С этого момента принято отсчитывать историю науки о магнитоэлектрических материалах. Первый из магнитоэлектрических эффектов был открыт Д.Н. Астровым лишь спустя более полувека, и руководствовался он в своих поисках совсем не идеями Кюри, а предсказаниями отечественных теоретиков Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшица, И.Е. Дзялошинского. Они указали на группу кристаллов с нарушенной пространственной и временной четностью, симметрия кристаллической решетки которых разрешала существование магнитоэлектрического эффекта.

В недавней работе [1] первоначальная идея Кюри обретает зримые очертания. В ней указывается на молекулярную систему, обладающую магнитоэлектрическими свойствами – молекулярные редкоземельные нанокластеры (рис. 1а).

Основными состояниями молекулы являются конфигурации с вихревым упорядочением спинов (рис. 1б). Такое упорядочение называют тороидным, и

ПерсТ, 2009, том 16, выпуск 23

для него характерны магнитоэлектрические свойства. Более подробно о тороидном моменте можно прочитать, например, в заметке *Ферротороидные домены: новый вид памяти?* [2]. Казалось бы, рецепт молекулярного магнитоэлектричества найден, но не тут-то было. В отсутствие магнитных полей основное состояние системы ионов диспрозия двукратно вырождено: в нем направления спинов по часовой стрелке и против нее представлены в равной степени, так что результирующий тороидный момент и, следовательно, магнитоэлектрический эффект, равен нулю.

Что делать? Авторы [1] дают ответ и на этот вопрос. Приложение магнитного поля параллельно одной из сторон треугольника снимает вырождение, и основным становится состояние, соответствующее конфигурации спинов, изображенной на рис. 1в. Хотя величина тороидного момента становится меньше в три раза (два вектора смотрят по часовой стрелке, а один против), но средняя величина тороидного момента уже отлична от нуля, и магнитоэлектрический эффект может быть обнаружен.

Теперь слово за экспериментаторами.

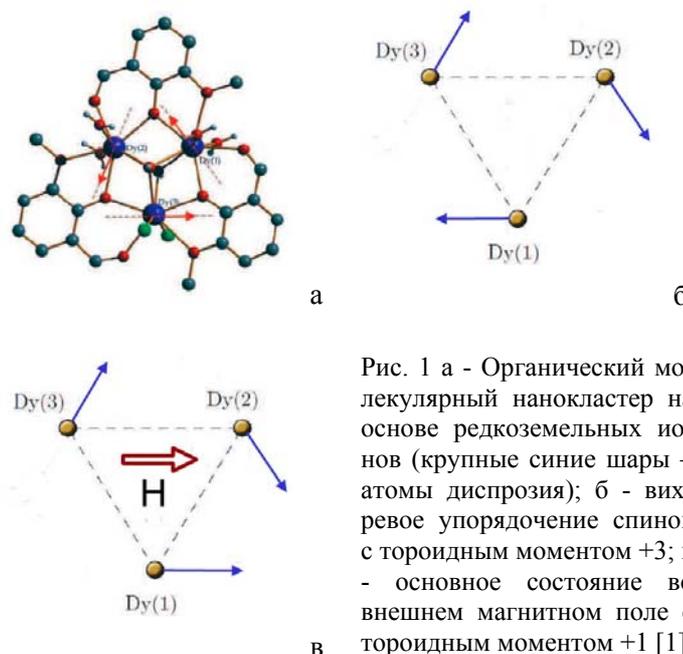


Рис. 1 а - Органический молекулярный нанокластер на основе редкоземельных ионов (крупные синие шары – атомы диспрозия); б - вихревое упорядочение спинов с тороидным моментом +3; в - основное состояние во внешнем магнитном поле с тороидным моментом +1 [1].

А.Пятаков

1. *A.I.Popov et al. Europhys. Lett. 87, 67004 (2009).*
2. [ПерсТ 15, вып.1, с. 6 \(2008\).](#)

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Новые исследования токсичности нанотрубок

Результаты экспериментов, проведенных в последние годы, показали, что длинные многостенные углеродные нанотрубки (МСНТ) могут вызвать отклик, аналогичный асбестовым волокнам. Эта проблема уже довольно подробно обсуждалась в *ПерсТе* [1], однако недавно были опубликованы результаты новых исследований, имеющие существенную особенность. В

отличие от предшествующих работ, МСНТ в экспериментах ученых из США [2] не вводились с помощью инъекций в брюшную полость, а попадали в организм подопытных мышей при вдыхании. Эксперименты с инъекцией в брюшную полость, по мнению проводивших их исследователей, были оправданы, т.к. мезотелий брюшины мыши идентичен мезотелию плевры. Однако волокна асбеста, которые могут через много лет вызвать в мезотелии легких злокачественную опухоль мезотелиому, попадают в легкие человека именно при вдыхании, поэтому важно проверить, достигают ли плевры и мезотелия нанотрубки, проникшие таким путем.

Плевра — оболочка (двухслойная мембрана), покрывающая легкие и внутреннюю поверхность грудной клетки. Вокруг каждого легкого образуется плевральная полость, которая содержит небольшое количество плевральной жидкости. Поверхности плевры, обращенные в полость, покрывает мезотелий — слой плоских клеток.

Лабораторные мыши в исследованиях [2] в течение 6 ч дышали воздухом, содержащим аэрозоли МСНТ (смесь агломератов и отдельных нанотрубок длиной от менее 100 нм до более 10 мкм, концентрация 1 или 30 мг/м³). Легочные ткани исследовали на следующий день, через 2 недели, 6 и 14 недель. Через день после ингаляции МСНТ были обнаружены в макрофагах и в клетках субплевральной области (рис.1). Нанотрубки оставались вблизи плевры и мезотелия в течение нескольких недель (рис.2), некоторые — в течение 14 недель. Мезотелиома растет очень медленно, поэтому ее нельзя обнаружить даже через 14 недель, однако у мышей наблюдался субплевральный фиброз (появление рубцовых изменений). Большая доза МСНТ (30 мг/м³) вызвала заметный рост фиброза через 2 недели и через 6 недель после ингаляции. При малой дозе нанотрубок эффектов не было.

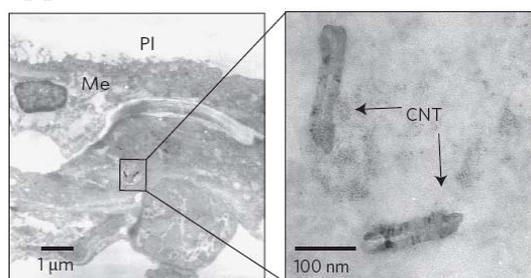


Рис.1. TEM — изображение нанотрубок вблизи плевры через день после ингаляции. (Me — мезотелий, PI — плевра)

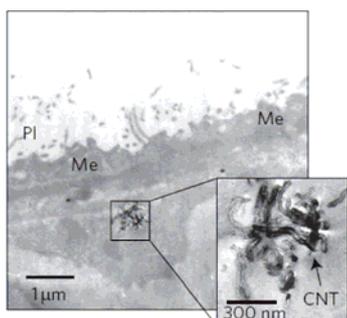


Рис.2. TEM — изображение нанотрубок вблизи плевры через 2 недели после ингаляции

Контрольный эксперимент был проведен с наночастицами сажи (30 мг/м³). Вредного воздействия не наблюдалось. Обсуждая эти исследования, K.Donaldson, руководитель одной из предыдущих работ по сравнительному изучению воздействия углеродных нанотрубок и асбеста (см. Перст [1]), наглядно поясняет, почему опасны именно длинные нанотрубки (рис.3 [3]). Ни у курильщиков, ни у шахтеров мезотелиомы не возникает, хотя они вдыхают огромное количество частиц. Эти частицы (так же, как и короткие нанотрубки) удаляются из легких и затем из организма через горло и рот.

Авторы работы [2] считают необходимым продолжать сравнительные исследования воздействия нанотрубок и асбеста. Они отмечают, что волокна асбеста вызывают воспаление плевры и диффузный фиброз, а МСНТ, по их данным, приводят к другой патологии - локальному субплевральному фиброзу. Кроме того, нанотрубки используемые в экспериментах, содержали никель (катализатор синтеза). И, конечно, было изучено только однократное воздействие в течение 6 ч, а влияние хронической ингаляции не определено. Вывод ясен - пока не сделаны оценки отдаленных эффектов, важно минимизировать ингаляцию нанотрубок при обращении с ними.

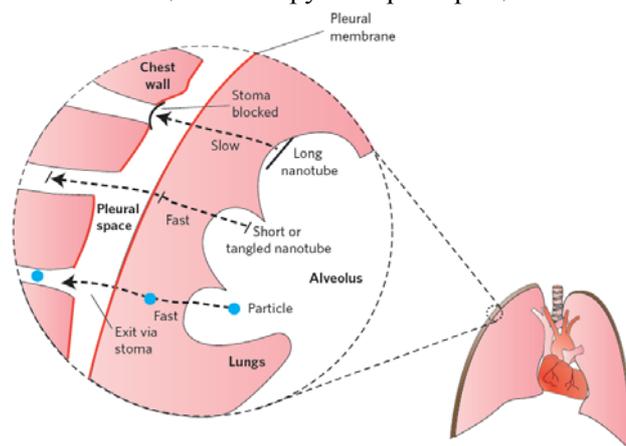


Рис. 3. Движение частиц через легкие. Мелкие частицы и короткие нанотрубки выходят через поры в грудной стенке (диаметр 3-8 мкм), а длинные нанотрубки могут задерживаться и со временем вызвать патологические изменения [3].

Заметим, что хотя короткие нанотрубки и наночастицы, судя по всему, не приводят к мезотелиоме, они могут вызвать другие тяжелые заболевания. Появились сообщения о том, что синтезированные наночастицы при вдыхании могут достигать мозга, а из него они не выводятся так, как из легких! Цель новой международной программы NeuroNano - изучить влияние синтезированных наночастиц на риск таких нейродегенеративных заболеваний как болезни Альцгеймера и Паркинсона – болезни индустриального общества. Эта программа позволит получить совершенно новые знания в области нейротоксикологии [4].

О.Алексеева

1. [Перст 15, вып.21, с. 3 \(2008\).](#)

2. J.P.Ryman-Rasmussen et al., *Nature Nanotech.* **4**, 747 (2009).
3. K.Donaldson et al., *Nature Nanotech.* **4**, 708 (2009).
4. *Nanowerk news*: <http://www.nanowerk.com/August 26, 2009>

Фторфуллерены на поверхности кремния: эксперимент и теория

Стремительное развитие химии фуллеренов открыло практически безграничные возможности получения его многочисленных производных: хлоридов, бромидов, оксидов и других не менее интересных молекул на основе “бакиболов”. Из всего многообразия “мира фуллереновых веществ” выделим класс фторидов фуллеренов или просто фторфуллеренов, которые не только находят применение как реагенты в органическом синтезе, но и могут быть использованы, например, в качестве электродных материалов в литиевых батареях или легирующих добавок при изготовлении светодиодов на основе органических полупроводников. Важным направлением в физико-химии фторфуллеренов является исследование взаимодействия молекул $C_{60}F_n$ с подложкой: интересно выяснить, каким образом данное взаимодействие меняет электронную структуру соединения. Ведь в дальнейшем полученные знания, несомненно, смогут использоваться для создания различных одномолекулярных технологий. Собственно поведению и физико-химическим свойствам адсорбированных на поверхности кремния фторфуллеренов $C_{60}F_{18}$ (рис. 1) в работе [1] и уделено самое пристальное внимание.

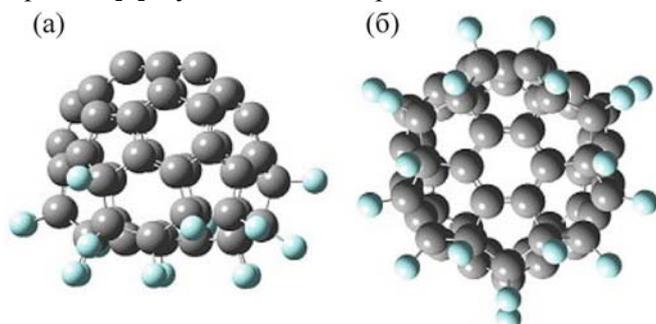


Рис. 1. Фторид фуллерена $C_{60}F_{18}$: а - вид “сбоку”, б - вид вдоль оси симметрии третьего порядка молекулы. Атомы углерода обозначены серым цветом, атомы фтора – синим.

Интернациональным коллективом авторов из России, Индии, Японии и США выполнены экспериментальные и теоретические исследования молекул $C_{60}F_{18}$ на кремниевой подложке: представлены результаты сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) изолированных фторфуллеренов, осажденных на поверхности кремния $Si(1\ 1\ 1)-7 \times 7$, а также выполнены *ab initio* расчеты в рамках теории функционала плотности для определения атомной конфигурации и электронной структуры данных соединений. Для синтеза фторфуллеренов $C_{60}F_{18}$ использовалась новая методика, основанная на твердофазных химических реакциях фуллеренов с фторидами переходных металлов (MnF_3 или K_2PtF_6). Авторы отмечают, что молекула $C_{60}F_{18}$ не обладает

высокой симметрией (рис. 1) и имеет значительный электрический дипольный момент (более 9 Д). Непосредственно при проведении исследований особое внимание было уделено адсорбции $C_{60}F_{18}$ в так называемую угловую дырку поверхности $Si(1\ 1\ 1)-7 \times 7$. В результате оказалось, что в случае ориентации молекулы, когда большинство атомов фтора направленно взаимодействует с поверхностью кремния, величина энергии связи максимальна – ~ 6.65 эВ. Авторам удалось выяснить, что значительный перенос заряда между фторфуллереном и поверхностью отсутствует, а столь высокая величина энергии связи обусловлена индуцированной поляризацией. Наименьшая длина связи между атомами кремния и фтора составила примерно 3 Å, что подтверждает отсутствие химического связывания между поверхностью и молекулой фторида фуллерена. Еще одним интересным результатом является склонность атомов фтора к миграции на кремниевую подложку во время эксперимента: данный вывод сделан, в частности, на основании СТМ-исследований.

Подводя итог, отметим, что фторфуллерены, безусловно, представляют немалый интерес, как для фундаментальной, так и для прикладной науки, и можно с уверенностью говорить о том, что представленные в работе [1] результаты, несомненно, способствуют более глубокому пониманию их физико-химических свойств.

М.Маслов

I. R.Z.Bakhtizin et al., *Chem. Phys. Lett.* **482**, 307 (2009).

Получение графенов из многослойных углеродных нанотрубок в импульсном разряде

За несколько лет, прошедших после первой публикации о получении и исследовании индивидуальных графенов, было разработано так много разнообразных подходов к их синтезу, что приходится удивляться тому, что графены не были обнаружены на много десятилетий раньше. В качестве объяснения этой загадки можно отметить, что в проблеме получения графенов наиболее трудной стадией является не столько их синтез, сколько идентификация и установление основных параметров (размеры, число слоев). Недавно группе исследователей из Hanyang Univ. (Южная Корея) и Tohoku Univ. (Япония) [1] удалось в результате использования импульсного разряда постоянного тока получить графены из многослойных углеродных нанотрубок (УНТ). Образцы многослойных УНТ диаметром около 20 нм со степенью очистки 90% (по массе) были синтезированы методом химического осаждения паров (CVD) с использованием Fe-Mo/MgO в качестве катализатора и C_2H_2 в качестве источника углерода. Очистку образцов от примесей производили с помощью кислотной обработки. Таблетки толщиной 2 мм и массой 2 г, полученные из нанотрубок в условиях вакуума 10^{-5} Торр, помещали в

цилиндрическую графитовую форму диаметром 20 мм, оснащенную контактами. Эту форму под давлением 1000 атм нагревали до температуры 2000°C со скоростью 100°C, после чего через нее в течение 10 мин пропускали импульсный ток силой 2500 А. Величина приложенного напряжения не превышала 5 В, длительность импульсов равнялась 12 мс, а интервал между импульсами составлял 2 мс. Полученные после такой обработки образцы исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа, рентгеновского дифрактометра и спектрометра комбинационного рассеяния.

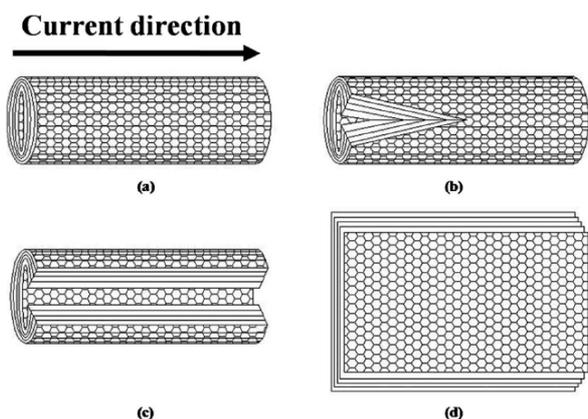


Иллюстрация модели превращения УНТ в графены: а - нанотрубка перед прохождением тока; б - начало разрыва; в - разрыв нанотрубки вдоль направления тока; д - формирование графеновых листов.

Как показывают исследования, в результате прохождения тока через образец нанотрубки частично разрушались, что приводило к образованию графеновых листов шириной несколько десятков нанометров и толщиной около 6 нм. При этом площади слоев, образованных из внешних и внутренних стенок многостенной нанотрубки не совпадают, постепенно уменьшаясь по мере движения от внешнего слоя к внутреннему. Такая геометрия графеновых листов соответствует модели превращения нанотрубок в графены, проиллюстрированной на рисунке. Процесс превращения подобен процедуре расстигивания молнии на одежде, так что точка разреза продвигается вдоль нанотрубки в направлении приложения электрического поля.

А.Елецкий

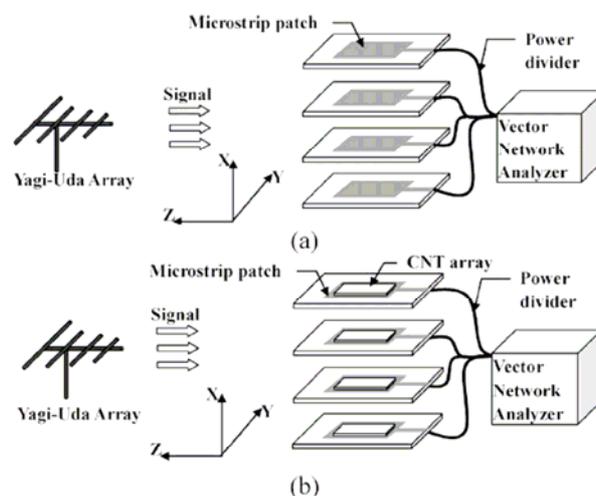
1. W.S.Kim et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**, 083103 (2009).

Углеродные нанотрубки усиливают СВЧ излучение

Высокое аспектное отношение и хорошие проводящие свойства углеродных нанотрубок (УНТ) открывают перспективы использования этого материала в качестве эффективного источника СВЧ излучения. Преимущества таких антенн перед обычными металлическими или диэлектрическими антеннами связаны с относительно низким уровнем омических потерь, вследствие баллистического характера электронной проводимости УНТ. Экспери-

ментальные исследования, выполненные в последние годы, показали, что антенна на основе УНТ, имеющих радиус порядка нанометра, характеризуется существенно более низким уровнем потерь, чем медный цилиндр той же геометрии. Детальное исследование характеристик антенны на основе нанотрубок выполнено недавно в Univ. of Hefei (КНР) и Univ. of Arizona (США) [1]. Авторы [1] использовали массив нанотрубок, выращенный методом химического осаждения паров (CVD) на кремниевой подложке в присутствии катализатора на основе железа. Кремниевую пластину, покрытую золем на основе железа, вводили в кварцевую трубку и выдерживали в течение 10 ч при температуре 500°C в атмосфере водорода, что приводило к образованию наночастиц железа нужного размера (диаметр 27 нм при среднем расстоянии между частицами 10 нм). Синтез УНТ производили на подготовленной таким образом подложке при температуре 670°C в потоке ацетилена и аргона при отношении 1:15. Полученные образцы исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Наблюдения показали, что массив нанотрубок, имеющих диаметр около 20 нм и длину около 20 мкм, характеризуется высокой степенью однородности.

Для исследования влияния массива УНТ на работу СВЧ антенны использовали конфигурацию, показанную на рисунке.



Исходная полосковая антенна (а) имела рабочие пластины площадью 2x5 см². Излучательные свойства этой антенны сравнивали с соответствующими характеристиками антенны (б), на пластины которой помещали подложки с массивами УНТ. Расстояние между излучателем и приемной антенной составляло 2 м. Исследования, проведенные в частотном диапазоне от 9 кГц до 2 ГГц, показали, что использование массивов УНТ повышает интенсивность излучения антенны. Эффект зависит от частоты излучения и на некоторых частотах может достигать 10 дБ.

А.Елецкий

1. Q.Zhu et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**, 083119 (2009).

Преимущественный рост углеродных нанотрубок с металлической проводимостью

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальными свойствами, что делает их привлекательным материалом для использования в различных областях нанотехнологии. Одна из причин, препятствующих широкому применению УНТ в различных прикладных целях, связана с трудностью синтеза УНТ с заданными физическими характеристиками. Так, при синтезе однослойных УНТ стандартными методами образуются нанотрубки, электронные свойства которых, в зависимости от хиральности, соответствуют либо металлу, либо полупроводнику. Ширина запрещенной зоны полупроводниковых УНТ определяется не только хиральностью, но и диаметром, и может варьироваться в довольно широких пределах даже в том случае, если образец УНТ получен при строго определенных условиях синтеза. Полагая, что при заданном диаметре однослойной нанотрубки все возможные индексы хиральности равновероятны, можно прийти к заключению, что вероятность образования УНТ с металлической проводимостью равна одной трети, в то время как остальные две трети нанотрубок имеют свойства полупроводника. Поскольку в такой ситуации использование УНТ в качестве элемента наноэлектронного устройства проблематично, возникает задача синтеза УНТ с заданными электронными характеристиками.

В работе [1], выполненной недавно группой исследователей из различных научных организаций США, представлен подход к решению этой задачи, основанный на использовании частиц катализатора со специальной микроструктурой. Синтез однослойных УНТ диаметром от 0.9 до 1.85 нм проводили на SiO_2/Si подложке с использованием в качестве катализатора частиц железа. Подложку с нанесенным катализатором отжигали в потоке He или Ag с добавлением H_2 либо H_2O . Синтез УНТ проводили при температуре 860°C в потоке метана. Отношение долей металлических и полупроводниковых УНТ определяли на основании анализа интенсивностей спектров КР, возбуждаемых лазерным излучением с $\lambda = 0.6328$ мкм. В этом случае полоса спектра КР, отвечающая радиальным дышащим модам нанотрубки, попадает в диапазон между 120 и 160 см^{-1} для полупроводниковых УНТ и в диапазон между 160 и 230 см^{-1} для металлических УНТ. Наблюдения, выполненные с помощью КР-спектрометра, показали, что отношение R числа металлических к числу полупроводниковых УНТ, полученных в результате синтеза, существенно зависит от состава газа, используемого при отжиге. Так, отжиг подложки в течение 5 мин в потоке He: H_2 в соотношении 9:1 в присутствии паров воды при давлении 3.5 мТорр приводит к величине $R = 0.34$, в то время как использование потока Ag: H_2 в том же

соотношении и при том же количестве воды приводит к увеличению фактора R до 1.71. При этом максимальная величина $R = 20.2$, которая соответствует содержанию в образце металлических УНТ около 96%, достигается при соотношении He: $\text{H}_2 = 8:2$. При этом отмечено, что в отсутствие паров воды замена аргона на водород практически не сказывается на содержании металлических УНТ в образце. Наряду с измерением спектров КР, для определения доли металлических УНТ в образцах использовали прямые измерения проводимости, которые проводили в конфигурации полевого транзистора. Результаты этих измерений оказались в качественном соответствии с данными, полученными на основании обработки спектров КР. Тем самым продемонстрирована возможность существенного изменения доли металлических нанотрубок в синтезируемом образце. Для установления влияния режима отжига на долю металлических УНТ в образце были проведены сравнительные исследования изменения структуры частиц катализатора в результате воздействия потоков нагретых газов различного состава. Результаты исследования указывают на формирование резких граней у нанокристаллов железа в результате отжига в потоке He: H_2 . Столь ярко выраженные грани не наблюдаются при отжиге в потоке Ag: H_2 , что указывает на важную роль нанокристаллической структуры катализатора на преимущественный рост металлических УНТ.

А.Елецкий

1. A.R.Harutyunyan et al., Science 326, 116 (2009).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Мера запутанности

В Физико-технологическом институте уже на протяжении многих лет проводятся общемосковские семинары по квантовой информатике (QI).

На последнем семинаре 10 декабря были представлены материалы диссертации А. Чернявского (МГУ, ФТИАН) (научный руководитель - Ю. Ожигов). Доклад был посвящен мере запутанности (entanglement) состояний многочастичной квантовой системы. Действительно, запутанность кубитов в квантовом компьютере является необходимым условием ускорения решения некоторых задач, например, с помощью алгоритма Шора (разложение числа на простые множители) или алгоритма Гровера (поиска в базе данных). Иногда говорят, что это есть следствие квантового параллелизма вычислений.

По определению, запутанным называется состояние системы многих частиц, которое не представляется в виде произведения состояний отдельных частиц. Запутанность есть отличительное свойство квантовой системы. В частности, она приводит к нелокальности квантовой теории, с которой так и не смирился А. Эйнштейн. Вследствие запутанности результат измерения состояния одной частицы зависит от исхода измерения состояния другой час-

тицы, хотя они могут быть разнесены в пространстве на большие расстояния. В этом состоит парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена.

Конечно же, как понятие физики запутанность должна иметь меру, соответственно, должна измеряться и вычисляться. Над этой проблемой начали биться давным-давно. Шмидт хорошо исследовал запутанность двух частиц и предложил меру своего имени. Однако усилия модифицировать эту меру для многих частиц не дали результата. Дело в том, что мера запутанности должна удовлетворять некоторым естественным требованиям. Все предложенные до сих пор меры не удовлетворяли всей совокупности требований. В частности, запутанность не должна изменяться при изменении состояния отдельных частиц в системе.

А. Чернявский добился инвариантности оригинальным приемом: ищется минимум функционала по всем возможным состояниям отдельных частиц в системе. Задача поиска абсолютного минимума функционала, у которого много локальных минимумов, является очень сложной. Автору удалось распараллелить вычисления и проводить расчеты на обычном персональном компьютере, используя в работе процессоры видеокарт. В настоящее время удается рассчитывать за разумное время меру запутанности системы из 17 кубитов.

Особой проблемой является описание запутанности фермионов. Известно, что даже состояние частиц, которые никогда друг с другом не взаимодействовали, описывается определителем Слэтера, т.е. формально уже является запутанным, хотя разумно его считать незапутанным. Есть продвижение и в решении этой проблемы.

В качестве наглядной демонстрации, автор рассчитал изменение меры запутанности кубитов в квантовом компьютере при выполнении алгоритма Гровера. Сначала мера равна нулю, потом нарастает до максимальной величины, затем снижается, и в самом минимуме необходимо считать результат.

Выдающийся специалист по квантовой информатике А.С.Холево, присутствовавший на семинаре, высказал мнение, что, может быть, и не стоит искать единую меру запутанности. В самом деле, ткани с одинаковой мерой запутанности нитей могут иметь разную текстуру, что важно при пошиве брюк. Вопрос, заданный в ироничной манере, в действитель-

ности, является очень серьезным. В самом деле, в конечном итоге, важно не само знание меры запутанности, а умение им пользоваться.

Статья А. Чернявского размещена на сайте <http://files.allscience.ru/Articles/081209001.pdf>

Объявления о семинарах QI помещаются на сайте института <http://ftian.ru/>

В.Вьюрков

“Nanotech Europe 2009”

С 28 по 30 октября в Берлине состоялся крупнейший конгресс по нанотехнологиям “Nanotech Europe 2009”, в котором приняли участие ведущие ученые, специалисты и руководители крупнейших фирм в области нанотехнологий из 56 стран мира. Большое внимание участников привлекли исследования в области получения новых материалов с заданными свойствами, разработки молекулярного компьютера, вопросы организации нанопроизводства, применение нанотехнологий в медицине. С лекцией по физике новых магнитных явлений и ее применением в нанотехнологии выступил лауреат Нобелевской премии в области физики 2007 г. профессор Питер Грюнберг. Работа конференции проходила по четырем секциям: нанoeлектроники, бионанотехнологии, наноматериалов и отдельно рассматривались проблемы организации научных исследований. На конференции с обзорными докладами выступили организаторы нанотехнологических исследований и бизнеса в области нанотехнологий: Пекка Коронен, председатель CEA Spinverce LTD, М. Ковальчук, директор Российского научного центра “Курчатовский институт”, управляющий директор РОСНАНО Е. Евдокимов, председатель французского центра высоких технологий Франциза Роуре. В работе конгресса приняли участие такие фирмы, как NOKIA, BASF, ZEISS, Китайская корпорация нанотехнологий. В рамках симпозиума состоялся конкурс постеров, где третье место было присуждено группе российских исследователей (Лаборатория сложных молекулярных систем, Институт социальных технологий, Уфа, Россия).

Д.Шуляковская

КОНФЕРЕНЦИИ

10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), July 4th -9th, 2010, Potsdam, Germany

Web: <http://www.icsd2010.com>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой ИФТТ РАН и РИЦ «Курчатовский институт»

Ответственный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий,

М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков, Д.Шуляковская

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а