

ТОРЖЕСТВО



7 июля 2011 г. исполнилось 75 лет Президенту Российской академии наук академику Юрию Сергеевичу Осипову. Академик Ю.С. Осипов – выдающийся российский ученый с мировым именем, основатель научной школы, крупный организатор науки, автор пионерских работ в ряде направлений математики и механики. Его исследования по теории устойчивости, математической теории управления для обыкновенных систем, систем с последствием и распределенными параметрами, по обратным задачам динамики, дифференциальным играм, по общей теории дифференциальных уравнений получили всеобщее признание и вошли в золотой фонд науки.

ПОЗДРАВЛЯЕМ Юрия Сергеевича Осипова с ЮБИЛЕЕМ!
Желаем здоровья, благополучия, творческих успехов, новых свершений и открытий!

Авторы и редакция Перста

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Модель магнетизма ферропниктидов

Присутствие атомов железа в решетке безмедных ВТСП делает их совершенно непохожими на купраты. Тем не менее, у этих двух классов ВТСП есть и нечто общее: в каждом из них несверхпроводящие родительские соединения являются антиферромагнитными, что указывает на возможную связь высокотемпературной сверхпроводимости с магнетизмом. Поэтому особое значение приобретает всестороннее экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств этих материалов. Антиферромагнетизм недопированных диэлектрических купратов хорошо описывается стандартной моделью Гейзенберга, учитывающей обменное взаимодействие спинов $J_{ij}\mathbf{S}_i\mathbf{S}_j$. А вот для металлической антиферромагнитной фазы ферропниктидов эта модель не годится. В работе [1] предложено дополнить спиновый гамильтониан негейзенберговским биквадратичным взаимодействием спинов $\sim (\mathbf{S}_i\mathbf{S}_j)^2$. Такой подход позволяет описать с единых позиций большое количество экспериментальных данных, включая спектр спиновых волн, тонкие доменные стенки, кроссовер между переходами первого и второго рода при допировании и пр. Кроме того, в определенном диапазоне величин параметров новая модель предсказывает наличие так называемой нематической фазы, которая на эксперименте наблюдается выше температуры Нееля, но ниже температуры структурного перехода. Авторы [1] считают, что наличие в эффективной спиновой модели биквадратичных слагаемых есть следствие сильного взаимодействия подвижных электронов со спиновыми флук-

И далее ...

- 2 Узлы сверхпроводящей щели в FeSe

ГРАФЕН

Графен без границ

Муар на графене

- 3 Примесная зона и примесная дираковская точка в графене

Курсы кройки и шитья графена

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 4 Как измерить волновую функцию

СПИНТРОНИКА

- 5 На пути к комнатотемпературной спинтронике

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Углеродные нанотрубки и дождевые черви

- 7 Термическая устойчивость Si-C гетерофуллеренов

Фототермовольтаический эффект в углеродных нанотрубках

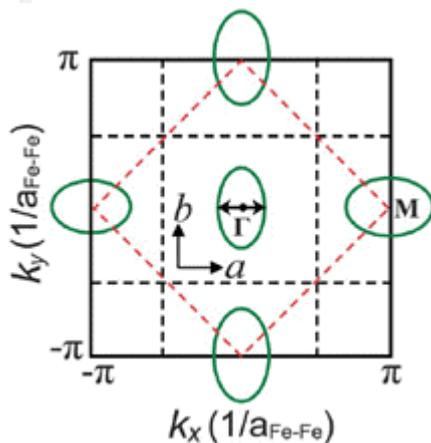
туациями. А это, по их мнению, указывает на возможную причастность спиновых флуктуаций к механизму сверхпроводимости ферропниктидов.

Л. Опенов

1. A.L.Wysocki et al., *Nature Phys.* 7, 485 (2011).

Узлы сверхпроводящей щели в FeSe

Экспериментальные данные о наличии или отсутствии узлов сверхпроводящей щели в безмедных ВТСП на основе железа достаточно противоречивы. Между тем вопрос о поведении параметра порядка Δ в импульсном пространстве важен для понимания механизма спаривания носителей заряда в этих соединениях. В работе [1] (Китай, США) представлены результаты исследования туннельных спектров монокристаллических пленок FeSe, выращенных на подложке SiC(0001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в сверхвысоком вакууме. Обнаружено, что при $T \ll T_c$ дифференциальные ВАХ имеют V-образную форму, как и в купратных ВТСП. Это говорит о линейной зависимости плотности состояний квазичастиц от энергии вблизи уровня Ферми, то есть – об узлах Δ , что согласуется с исследованиями квазичастичных возбуждений вблизи коров магнитных вихрей, адатомов Fe и вакансий Se, а также – с наличием страйпов при небольшом избытке Se. Анализируя свои результаты в рамках s_{\pm} -волновой модели, авторы [1] замечают, что при $\Delta \sim \cos k_x \cos k_y$ размеры электронных карманов в окрестности точек M зоны Бриллюэна недостаточны для пересечения с линиями узлов Δ , поэтому наиболее вероятной представляется зависимость $\Delta \sim \cos k_x + \cos k_y$ (см. рис.).



Зона Бриллюэна и карманы поверхности Ферми (зеленые эллипсы) в FeSe. Черные и красные штриховые линии – узлы для $\Delta \sim \cos k_x \cos k_y$ и $\Delta \sim \cos k_x + \cos k_y$, соответственно.

Интересно, что узлы Δ наблюдаются только в стехиометрических образцах FeSe, тогда как в Fe(Se,Te) они исчезают, хотя сверхпроводимость сохраняется. Поскольку изменение механизма спаривания при добавлении Te крайне сомнительно, то приходится допустить, что при одном и том же ме-

ханизме симметрия Δ может быть различной. Остается выяснить, какие факторы на нее влияют.

Л. Опенов

1. C.-L.Song et al., *Science* 332, 1410 (2011).

ГРАФЕН

Графен без границ

Большинство материалов являются поликристаллическими: они состоят из большого числа очень маленьких кристалликов – зерен, которые, как правило, хаотически ориентированы относительно друг друга. Межзеренные границы оказывают существенное влияние на физические свойства. Например, в металлах они препятствуют движению дислокаций, способствуя тем самым повышению прочности, а с другой стороны – рассеивают электроны и поэтому уменьшают проводимость. Квазидвумерный графен не является исключением: он тоже состоит из зерен. Желательно, чтобы эти зерна были покрупнее, а еще лучше – чтобы весь образец представлял собой одно большое зерно, то есть фактически был бы монокристаллом. Добиться этого трудно еще и по той причине, что при выращивании графена на подложке он “копирует” все ее несовершенства, в том числе – зернистость.

В работе [1] была обнаружена удивительная вещь: при химическом осаждении графена из паровой фазы на поликристаллическую медь с размером зерен ~ 1 мкм графеновый монослой “не замечает” эти зерна, преодолевая в процессе своего роста межзеренные границы без сбоев в кристаллографической ориентации (иными словами, эпитаксия отсутствует). В итоге поперечные размеры кристаллов графена достигают десятков микрон. В работе [2] за счет снижения парциального давления паров метана (что приводит к уменьшению концентрации зародышей графена и замедляет их рост) эти размеры удалось увеличить до ~ 1 мм, так что теперь монокристаллический графен можно разглядеть даже невооруженным глазом. Опыт, накопленный при разработке технологии изготовления бездефектного графена, может быть в дальнейшем использован для оптимизации синтеза других квазидвумерных и слоистых материалов, в том числе гексагонального нитрида бора, дихалькогенидов, топологических диэлектриков и пр.

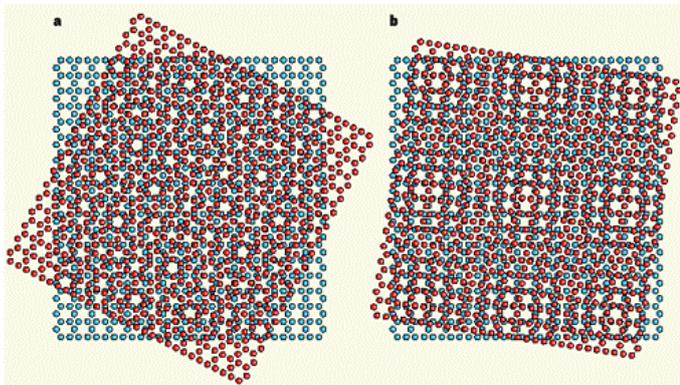
1. Q.Yu et al., *Nature Mater.* 10, 443 (2011).

2. X.Li et al., *J. Am. Chem. Soc.* 133, 2816 (2011).

Муар на графене

Более 20 лет назад на поверхности графита были обнаружены периодические модуляции (сверхструктуры), связанные с небольшой разориентацией приповерхностных графеновых слоев [1]. Аналогичный эффект наблюдается и в двухслойном графене (см. рис.). В работе [2] экспериментально показано, что при угле разориентации $\alpha > 20^\circ$ соседние монослои ведут себя как независимые – каж-

дый со своим дираковским конусом и со своими уровнями Ландау в магнитном поле. А вот при $\alpha < 2^\circ$ межслоевое взаимодействие приводит к существенному изменению электронной структуры и появлению щели в плотности состояний. Чувствительность электронных характеристик к взаимной ориентации слоев может найти практическое применение в датчиках смещения, ультратонких конденсаторах и пр.



Периодический (а) и квазипериодический (б) муаровый узор, формирующийся при разориентации соседних монослоев графена на угол 27.8° и 9° , соответственно.

По материалам заметки [Nature 474, 453 (2011)].

1. M.Kuwabara et al., Appl. Phys. Lett. 56, 2396 (1990).
2. A.Luican et al., Phys. Rev. Lett. 106, 126802 (2011).

Примесная зона и примесная дираковская точка в графене

В 80-90-е годы прошлого века киевские теоретики М.А. Иванов, В.М. Локтев и Ю.Г. Погорелов предсказали эффект коллективной перестройки (КП) электронного спектра кристаллов с примесями (теория ИЛП). Позднее это предсказание было полностью подтверждено экспериментом. КП наблюдалась в молекулярных кристаллах и полупроводниках, но особенно ярко – в магнитных диэлектриках (см. обзор [1]). Согласно теории ИЛП, причина КП заключается в косвенном межпримесном взаимодействии, обусловленном гибридизацией того или иного примесного уровня (электронного, спинного, колебательного) с соответствующей зоной. С одной стороны, такое взаимодействие приводит к уширению исходных примесных уровней, а с другой – к возможности коллективизации в примесной подсистеме. В зависимости от того, какая тенденция превалирует (а фактически – в зависимости от концентрации примесей, расположения примесного уровня относительно основной зоны и от степени гибридизации) КП может быть как когерентной (то есть приводящей к появлению новой дисперсионной ветви в неупорядоченной среде), так и некогерентной – создающей в кристалле достаточно широкие области локализованных состояний. Существенно, что КП может иметь место даже в кристаллах с ничтожной (10^{-5} - 10^{-6}) концентрацией примес-

ных атомов, вклад которых в различные характеристики оказывается, тем не менее, сравним с вкладом от атомов матрицы.

В недавней работе [2] идеи КП развиты применительно к квазидвумерному графену, для которого определены конкретные критерии появления примесных ветвей спектра. Интересное отличие примесного графена от обычных кристаллов с массивными носителями заряда состоит в том, что наличие в нем безмассовых фермионов приводит к появлению в электронном спектре еще одной – примесной – дираковской точки. Как показано в [2], это делает возможным наблюдение в графене с примесями (в том числе адсорбентами) возвратных переходов металл-диэлектрик при изменении плотности носителей (например, за счет напряжения на затворах). Теперь слово за экспериментом.

Л.Опенюв

1. M.A.Ivanov, V.M.Loktev, Yu.G.Pogorelov, Phys. Rep. 153, 209 (1987).
2. Ю.В.Скрипник, В.М.Локтев, Письма в ЖЭТФ 93, 787 (2011).

Курсы кройки и шитья графена

Складки, стрелки, рюши и оборки... даже далекий от швейных дел читатель будет вынужден разобрататься в многочисленных видах отделки тканей, читая статью американских исследователей, посвященную многократно сложенному листу графена [1]. Изменение формы в данном случае приводит к глубокой перестройке внутренних свойств материала (например, зонной структуры), что сильно сказывается на всех его физических свойствах.

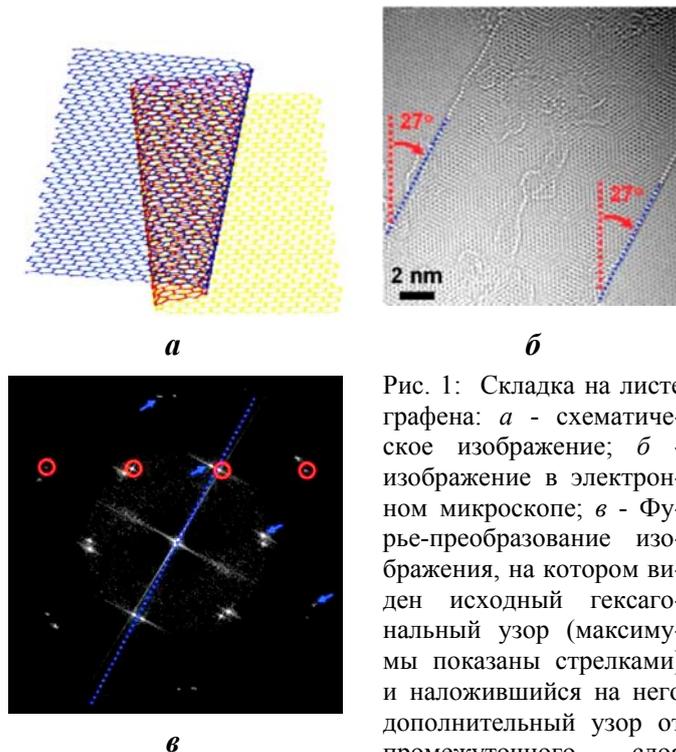


Рис. 1: Складка на листе графена: а - схематическое изображение; б - изображение в электронном микроскопе; в - Фурье-преобразование изображения, на котором виден исходный гексагональный узор (максимумы показаны стрелками) и наложившийся на него дополнительный узор от промежуточного слоя складки (максимумы обведены кружками) [1].

Несмотря на большую величину упругого модуля, графен, подобно ткани, легко сминается и деформируется в перпендикулярном его плоскости направлении. Незначительное увеличение энергии в местах возникновения складок с лихвой компенсируется выигрышем за счет взаимодействия слоев. Только в отличие от ткани, направление изгиба

следует выбирать не произвольно, а с учетом гексагональной симметрии решетки графена. Складки на графене без труда обнаруживаются как по характерным муаровым узорам на изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа (рис. 1б), так и по удвоению гексагонального узора в Фурье-изображениях (рис. 1в).

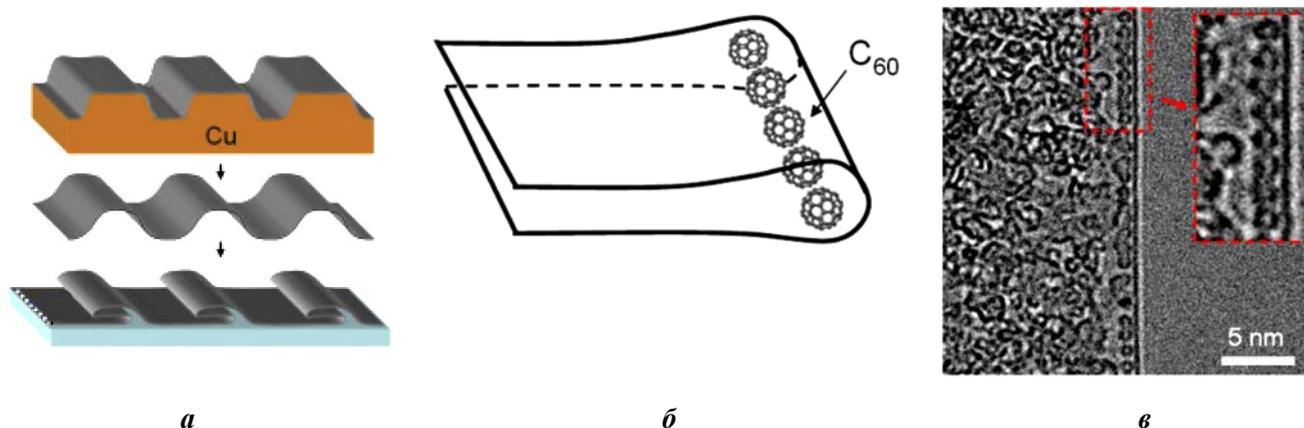


Рис. 2: *a* - изготовление складок из графена; *б* - схематическое изображение складки со вставками из молекул фуллерена; *в* - изображение фуллереновых включений в электронном микроскопе.

Механические напряжения, возникающие в складчатом графене, приводят к вариациям локальной плотности электронов, а также к изменению вероятности переходов электронов между соседними атомами углерода, что создает эффективные электрические и магнитные поля внутри материала. Авторами продемонстрирована возможность дизайна электронной структуры складчатого графена, отличающейся как от зонной структуры обычного графена, так и от полупроводниковой. Во внешнем магнитном поле магнитный поток, пронизывающий складки графена, значительно варьируется и даже изменяет знак на расстояниях, сравнимых с размером элементарной ячейки. Это создает для свободных носителей сильно неоднородный магнитный ландшафт – вещь труднодостижимую в полупроводниковых гетероструктурах.

Как создать упорядоченные складки на листе графена? Авторами [1] предлагается следующий способ: на рифленую медную подложку химическим осаждением из газовой фазы наносят слой графена (рис. 2а), далее подложку стравливают, а графен переносят на плоскую подложку. В результате складки на листе графена ориентируются преимущественно вдоль первоначальных канавок на подложке из меди. Исследователям даже удалось зашить в графен “стразы” из молекул фуллерена (рис. 2б и 2в).

В комментарии на статью, написанном испанской ученой с говорящей фамилией *Prada*, провозглашается новая эра графенового *prêt-à-porter* [2]. Останется ли кройка и шитье графена уделом “высокой моды” или, действительно, будет “пригодно для носки”, покажет время.

А. Пятаков

1. Kwanpyo Kim et al., *Phys. Rev. B* **83**, 245433 (2011).
2. E. Prada, *Physics* **4**, 51 (2011).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Как измерить волновую функцию

Для полного описания состояния квантовой системы нужно знать ее волновую функцию Ψ . Квадрат модуля $|\Psi|^2$ пропорционален вероятности получить при измерении тот или иной результат (например, если речь идет об одной частице, найти ее в определенной точке пространства или обнаружить у нее определенный импульс). Можно ли измерить волновую функцию? Если в нашем распоряжении имеется одна-единственная копия исследуемой системы, то этого нельзя сделать в принципе, поскольку воздействие измерительного устройства приводит к изменению состояния системы (то есть ее волновой функции), и последующие измерения становятся просто бессмысленными. Однако, располагая ансамблем идентичных систем, можно определить распределения вероятностей различных измеряемых величин и по ним восстановить волновую функцию, хотя бы приближенно. Такая методика известна как томография квантового состояния. Она играет важную роль в квантовой информатике.

В работе канадских физиков [1] предложена методика не косвенного, а прямого экспериментального определения волновой функции. Она основана на последовательном измерении двух взаимно дополнительных величин (например, координаты и импульса) таким образом, чтобы первое измерение было “слабым” [2], то есть не приводило к кардинальному изменению исходного состояния, а вто-

ПерсТ, 2011, том 18, выпуск 13/14

рое – обычным (“сильным”). При слабом измерении смещение стрелки прибора настолько мало, что не выходит за пределы неопределенности ее начального положения. Поэтому, как и в квантовой томографии, требуется большое количество измерений над идентичными копиями системы и усреднение по ним. Статистическая погрешность может быть сделана сколь угодно малой за счет увеличения числа таких копий в ансамбле. В зависимости от результатов второго измерения отбираются системы с определенной величиной измеренного параметра (например, с нулевым импульсом). Только эти системы и учитываются при анализе данных первого измерения (“postselection”). Таким образом, авторы [1] измерили волновую функцию единичного фотона в перпендикулярном к его импульсу направлении, определив квадрат ее модуля и фазу как функции координаты. Предложенный в [1] подход к измерению волновой функции можно распространить и на другие физические объекты и системы (например, на электронные спины, скивды, ионы в магнитной ловушке и пр.). Особенно интересно было бы обобщить его на запутанные многочастичные состояния.

По материалам заметки “How to catch a wave”,
O.Hosten, *Nature* **474**, 170 (2011).

1. J.S.Lundeen et al., *Nature* **474**, 188 (2011).

2. Y.Aharonov et al., *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1351 (1988).

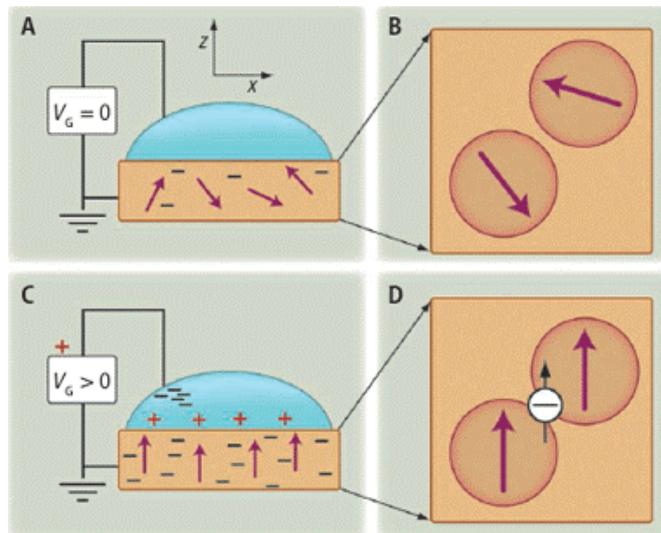
СПИНТРОНИКА

На пути к комнатнотемпературной спинтронике

В парамагнетиках намагниченность возникает только при наличии внешнего магнитного поля, которое ориентирует спины (локальные магнитные моменты) в одном направлении. В типичных ферромагнетиках при температуре ниже точки Кюри T_C спины сами ориентируются за счет спин-спинового взаимодействия. Для спинтроники особый интерес представляют магнитные полупроводники, намагниченность которых можно контролировать электрическим напряжением. Однако низкие T_C таких материалов (например, $T_C = 190$ К в $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$) не позволяют использовать их при комнатной температуре. В работе [1] японские ученые показали, что в парамагнетике $(\text{Ti},\text{Co})\text{O}_2$ ферромагнетизм можно обратимым образом индуцировать, прикладывая небольшое (несколько вольт) напряжение к покрытой жидким электролитом пленке $\text{Ti}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (см. рис.). Концентрация электронов в пленке при этом возрастает от $n_{2D} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $n_{2D} = 2.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Установлено, что именно подвижные электроны способствуют ферромагнитному упорядочению спинов ионов Co^{2+} , подобно дыркам в $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, хотя конкретные детали этого эффекта еще предстоит выяснить. Может оказаться, что T_C зависит от n_{2D} немонотонно. Ведь, с одной стороны, при на-

гревании число электронов в зоне проводимости увеличивается, что благоприятствует ферромагнетизму $(\text{Ti},\text{Co})\text{O}_2$, а с другой – повышение температуры нарушает спиновый порядок. Здесь требуются дальнейшие исследования.



Регулируемый ферромагнетизм в $(\text{Ti},\text{Co})\text{O}_2$:

А и В – в отсутствие напряжения V_g между пленкой $(\text{Ti},\text{Co})\text{O}_2$ и верхним электролитическим контактом концентрация свободных электронов в $(\text{Ti},\text{Co})\text{O}_2$ мала: при этом далеко отстоящие друг от друга спины ионов Co^{2+} взаимодействуют слабо и не упорядочиваются;

С и D – при $V_g > 0$ на границе раздела пленки с жидким электролитом формируется двойной электрический слой, в результате чего концентрация электронов возрастает примерно на порядок; эти электроны и обеспечивают ферромагнитную ориентацию спинов кобальта.

1. Y.Yamada et al., *Science* **332**, 1065 (2011).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Углеродные нанотрубки и дождевые черви

Земляные черви (или дождевые, как мы обычно их называем) часто используются в научных исследованиях для проверки токсичности различных веществ, попадающих в почву. Это связано с тем, что черви непрерывно “обрабатывают” землю, заглатывая её и пропуская “через себя”. Чарльз Дарвин еще в 1837 г. пришел к заключению, что “весь растительный слой уже не раз прошел через кишечный канал червей и еще пройдет много раз” (о чем и сообщил в своем докладе “Об образовании растительного слоя” в Лондонском геологическом обществе [1])*.

В последнее время земляных червей стали использовать и для изучения экологической токсичности наноматериалов. В одной из первых работ на эту тему показано, что вместе с почвой черви могут заглатывать окисленные наночастицы меди [2]. Это означает, что наночастицы могут попасть в пищевую цепочку (например, наночастицы → черви → птицы и т.д.) и вызвать нежелательные последствия для природы и человека. Правда, вредные эффекты авторы [2] наблюдали при сравнительно высокой концентрации (> 65 мг Си на кг почвы). Недавно ученые из США получили первые

данные по биоаккумуляции земляными червями и сорбции в почве модифицированных углеродных нанотрубок с разными поверхностными зарядами [3]. Для различных применений нанотрубок часто используется функционализация, поэтому важно изучить, как она влияет на их поведение в окружающей среде.

Многостенные нанотрубки (МСНТ), в том числе с радиоактивной меткой ^{14}C , были получены каталитическим *CVD* методом и модифицированы добавлением на поверхность разветвленных полиэтилениминов (ПЭИ) (рис.1). Дисперсии таких модифицированных МСНТ-ПЭИ (*MWCNT-PEI*) могут сохраняться несколько месяцев, и это важно для изучения поглощения червями. В последующих реакциях с ангидридом уксусной кислоты и ангидридом янтарной кислоты в диметилсульфоксиде получили МСНТ с ацетильными группами (*MWCNT-PEI-Ac*) и группами янтарной кислоты (*MWCNT-PEI-Suc*), соответственно.

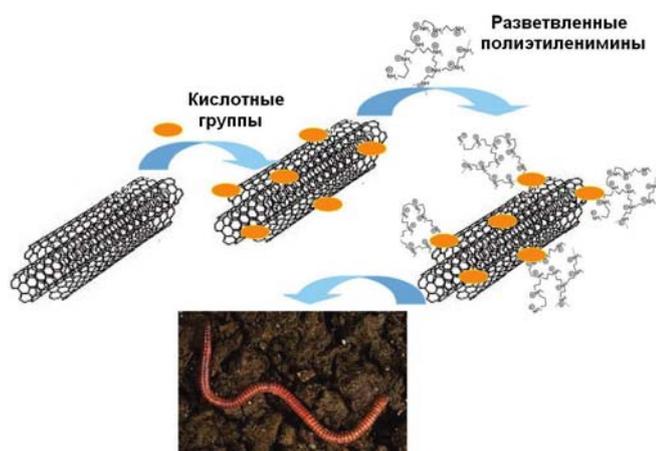


Рис.1. Схема модифицирования МСНТ, проведенного в [3]. Внизу – фото земляного червя *Eisenia fetida*.

Образцы почвы с разным содержанием органического углерода были взяты из нескольких мест (*North Campus of the University of Michigan, Rochester Hills, Chelsea*). В 100-мл стеклянные сосуды насыпали по 30 г сухой почвы в каждый и добавляли суспензию МСНТ, так что содержание влаги в почве было 22.5%, а концентрация нанотрубок – 0.5 мг/г почвы. В эти сосуды помещали по 3 взрослых червя *Eisenia fetida* (общая масса 1.2-2.0 г), прикрыв крышкой, чтобы черви не расплозились (конечно, обеспечивая при этом доступ воздуха) и держали в темноте при комнатной температуре. Для каждого измерения использовали три одинаковых сосуда. Через 2, 7, 14 или 28 дней червей вынимали, промывали, помещали на фильтровальную бумагу в темноте и в течение 24 ч собирали выделения из кишечника. Затем червей высушивали, сжигали в биологическом окислителе и по содержанию ^{14}C определяли биоаккумуляцию (*накопление организмом химических веществ, поступающих из окру-*

жающей среды в концентрации большей, чем находится в окружающей среде) нанотрубок. Также исследователи изучили выведение нанотрубок из организма. Для этого после 14 дней выдержки в почве с МСНТ червей перемещали в сосуды с чистой почвой и через 2, 6 и 9 дней определяли в их тканях остаток ^{14}C .

Ученые выяснили, что наличие полимеров на поверхности влияет на характер сорбции нанотрубок в почве (нелинейные изотермы сорбции в отличие от линейных для чистых МСНТ), но при этом сорбционная емкость для всех типов МСНТ, включая исходные, и для всех образцов почвы практически не отличается. Это – неожиданный результат, поскольку функционализация существенно увеличивает массу МСНТ и меняет поверхностный заряд. Авторы считают необходимым провести дополнительные исследования с разным количеством полимеров на МСНТ с одинаковым поверхностным зарядом и на исходных МСНТ с разными зарядами.

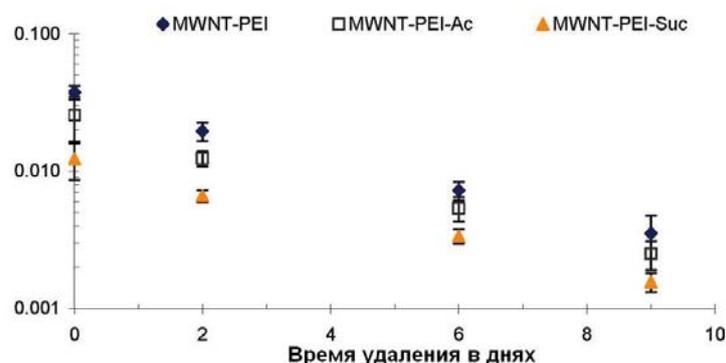


Рис.2. Коэффициенты биоаккумуляции червями разных МСНТ-ПЭИ в разных образцах почвы после 14 дней воздействия.

Эксперименты по биоаккумуляции МСНТ червями показали, что она незначительна для всех нанотрубок. Хотя коэффициенты биоаккумуляции (*отношение концентрации в организме к концентрации в среде*) МСНТ-ПЭИ во всех экспериментах немного выше, чем исходных МСНТ, все различия находятся в пределах погрешности измерений. Более того, в течение 28 дней величины коэффициентов для всех нанотрубок увеличивались или уменьшались случайным образом. Коэффициенты биоаккумуляции червями разных МСНТ-ПЭИ в разных почвах после 14 дней воздействия приведены на рис.2. Видно, что накопление в тканях очень невелико – известно, например, что в загрязненных почвах коэффициент биоаккумуляции диоксинов дождевыми червями достигает ~ 9 [4]. Ранее авторы работы [3] показали, что при отсутствии биоаккумуляции химического вещества коэффициент для земляных червей, измеренный в условиях, аналогичных условиям [3], равен ~ 0.03 [5].

Важный вывод, сделанный в работе [3] – модифицирование нанотрубок полимером, так необходимое для многих применений, не увеличивает биоак-

кумуляцию. Более того, все МСНТ-ПЭИ быстро выводятся из организма червей (рис.3). Исследователи оптимистично заявляют, что если черви, проглотившие нанотрубки в некоем загрязненном месте, уползут в чистую почву и там их выделят, риск токсичности заметно снизится.

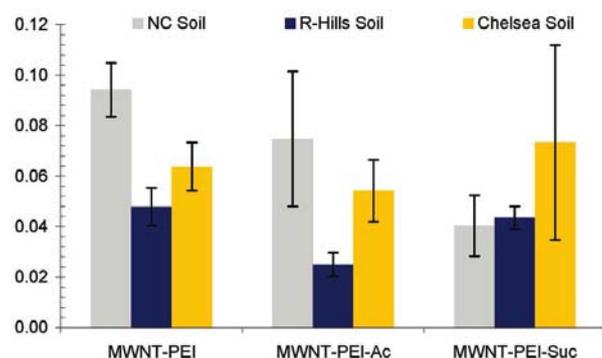


Рис.3. Удаление разных МСНТ-ПЭИ из организма червей после 14-дневного пребывания в почве. По оси ординат – масса нанотрубок в мг на г сухой ткани червя.

**Чарльз Дарвин, вероятно, первым оценил важную роль дождевых червей в природе. Он изучал их строение, пищеварение, образ жизни, способности почти полвека (классический труд о дождевых червях вышел через 44 года после упомянутого выше доклада). Дарвин проводил наблюдения в своем рабочем кабинете (держал червей в наполненных землях горшках) и в разных районах Англии. Он писал: "...во многих местностях Англии на площадь в акр ежегодно выбрасывается более 10 тонн сухой земли, прошедшей через тело дождевых червей, так что весь поверхностный слой земли в течение нескольких лет проходит через их тело...[1]". Отвечая возражения своих оппонентов ("непосильная работа для слабых мелких животных"), Дарвин подчеркивал: "Здесь мы сталкиваемся с неумением суммировать результаты непрерывно повторяющихся явлений... Положение "de minimis non curat lex" (закон не заботится о ничтожных) не должно иметь места в науке"!*

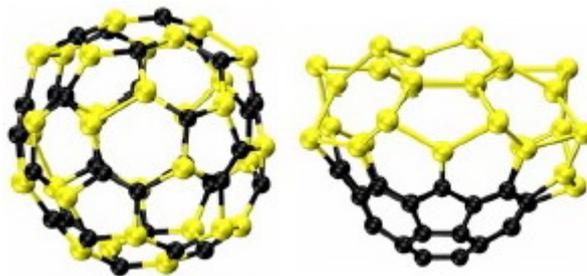
О.Алексеева

1. Ч.Дарвин, Собр. соч., т.2, изд. АН СССР, М.-Л. (1936).
2. J.M.Unrine et al., J. Environ. Qual., **39**, 1942 (2010).
3. E.J.Petersen et al., Environ. Sci. Technol. **45**, 3718 (2011).
4. Д.А.Криволицкий и др., Ekologija (Vilnius) Nr.4, 30 (2002).
5. E.J.Petersen et al., Environ. Sci. Technol. **42**, 3090 (2008).

Термическая устойчивость Si-C гетерофуллеренов

Гетерофуллерены – химические соединения, образованные замещением одного или нескольких углеродных атомов фуллеренов на атомы других веществ, например, бора, серы, азота или щелочных металлов. В работе [1] рассмотрены два различных Перст, 2011, том 18, выпуск 13/14

изомера гетерофуллерена $C_{30}Si_{30}$, а именно, конфигурация, в которой атомы кремния и углерода лежат в соседних разделенных частях фуллереновой клетки (SE), и конфигурация с максимально возможным числом связей кремний-углерод (NSE), (см. рис). Вопросом, который заинтересовал авторов, стал непосредственный анализ их термической устойчивости.



Изомеры $C_{30}Si_{30}$: NSE (слева) и SE (справа). Черным цветом показаны атомы углерода, желтым – атомы кремния.

Согласно проведенным предварительным расчетам методом структурной релаксации удалось установить, что SE-изомер энергетически более выгоден, чем NSE-конфигурация. Исследование же термической устойчивости кластеров $C_{30}Si_{30}$ проводили методом молекулярной динамики в рамках теории функционала плотности (DFT) при достаточно высокой (2000 K) температуре. В процессе эволюции системы авторы отслеживали изменения и деформацию фуллереновой клетки и детектировали ее фрагментацию. Оказалось, что время жизни SE-изомера не превышало 10 пс, в то время как NSE-изомер не распался в течение, по крайней мере, 20 пс. Таким образом, удалось установить, что, несмотря на большую энергетическую предпочтительность SE-изомера по сравнению с NSE, он обладает меньшей термической устойчивостью.

В конечном итоге авторы показали, что термическая устойчивость кластеров $C_{30}Si_{30}$ сильно зависит от взаимного расположения связей между атомами углерода и кремния. Тем не менее, интересно было бы проследить за эволюцией $C_{30}Si_{30}$ гетерофуллеренов и при более низких температурах.

М. Маслов

1. R. Scipioni et al., Chem. Phys. Lett. **510**, 14 (2011).

Фототермовольтаический эффект в углеродных нанотрубках

Постоянное обострение энергетических проблем, которые усугубляются экологическими ограничениями, требует разработки путей использования возобновляемых источников энергии. Наиболее емким источником такого типа является наше Солнце, поэтому уже давно проблема преобразования солнечного излучения в электричество составляет одно из основных направлений энергетической науки. Благодаря развитию полупроводниковой электроники проблема преобразования видимого (оптического) излучения в электричество в принципе мо-

жет считаться решенной, и уже сейчас преобразователи солнечного излучения являются коммерческим продуктом.

Однако значительная часть энергии солнечного излучения находится в ИК-диапазоне, что затрудняет возможность преобразования этой энергии в электричество. Так, наиболее распространенные солнечные элементы на основе Si способны преобразовывать излучение с длиной волны короче 1.1 мкм, что соответствует энергии кванта 1.1 эВ. Длинноволновое излучение может быть преобразовано с помощью фотоэлементов на основе GaSb (0.7 эВ), PbS (0.37 эВ), HgCdTe и InGaAsN. Однако высокая стоимость этих материалов, малое содержание в земной коре некоторых входящих в их состав химических элементов и относительно невысокое выходное напряжение ставят под вопрос возможность коммерческого использования подобных приборов. Для этих целей в качестве альтернативного материала можно использовать углеродные нанотрубки (УНТ), которые обладают свойствами полупроводника с малой шириной запрещенной зоны и характеризуются достаточно высоким коэффициентом поглощения излучения (до 10^5 см^{-1}) как в видимой, так и в ИК-области спектра. В этом случае, как установлено группой исследователей из Univ. of Wisconsin (США) [1], преобразование ИК-излучения в электричество возможно благодаря фототермовольтаическому эффекту.

В качестве объекта исследования использовали очищенные (до 90%) коммерческие пленки, однослойных УНТ, обладающие полупроводниковыми свойствами. Измерения показали, что пленки хорошо поглощают излучение с $\lambda < 2 \text{ мкм}$. Для изготовления термовольтаического элемента из пленки вырезали полоски размером $36 \times 120 \times 1300 \text{ мкм}$, которые наносили между двумя золотыми полосками, расположенными на кварцевой подложке. Полоску припаивали к подложке с помощью двух индиевых частиц, нагретых до температуры 200°C . Вольтамперные характеристики (ВАХ) пленок, измеренные при различных уровнях освещения образца ИК-излучением, показаны на рис. 1.

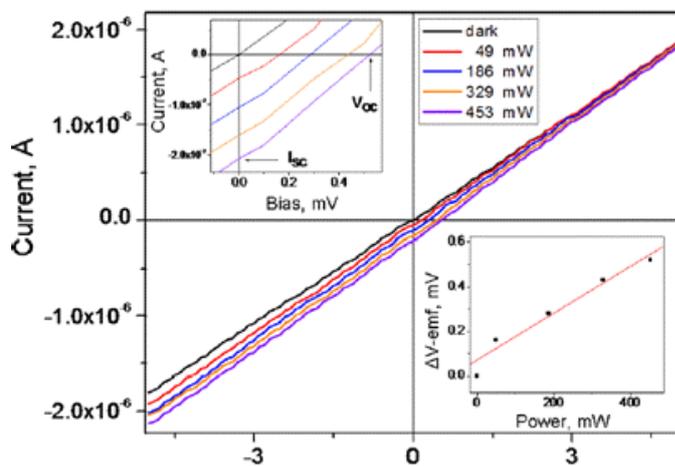


Рис. 1. ВАХ термовольтаического элемента, измеренные при различном уровне освещения. Левый верхний рисунок представляет увеличенное изображение области ВАХ вблизи нуля. Правый нижний рисунок представляет зависимость фотоэдс от интенсивности падающего излучения.

Наблюдаемая зависимость наклона ВАХ от интенсивности падающего излучения обусловлена эффектом возрастания проводимости образца вследствие увеличения температуры. Это следует из того, что фототок наблюдается только при условии асимметричного облучения образца, приводящего к возникновению температурного градиента. Поскольку некоторый вклад в теплопроводность УНТ связан с наличием свободных электронов, температурный градиент вызывает градиент носителей заряда, что приводит к возникновению фототермовольтаического эффекта. Авторы отмечают, что данный эффект может быть использован не только в преобразователях ИК-излучения в электричество, но также в датчиках ИК-излучения, которые могут работать без внешнего источника питания.

А.Елецкий

1. M.Omari, N.A.Kouklin, Appl. Phys. Lett. 98, 243113 (2011).

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, А.Елецкий, М.Маслов,
Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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