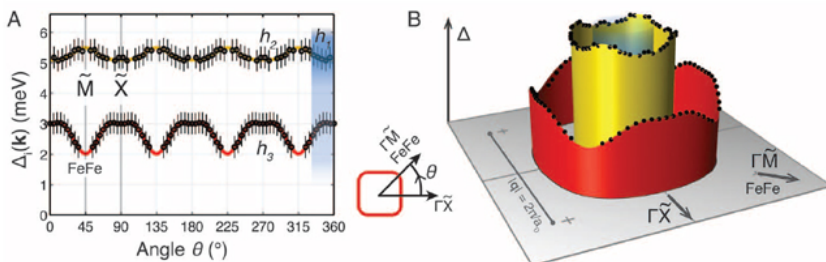


В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Разброд и шатание в семье безмедных ВТСП

Симметрия сверхпроводящего параметра порядка  $\Delta$  является важнейшей характеристикой сверхпроводника. Так как зависимость  $\Delta(\mathbf{k})$  неявно содержит в себе информацию о виде матричного элемента эффективного электрон-электронного притяжения, то знание этой зависимости позволяет строить обоснованные предположения о природе куперовского спаривания. Например, если в обычных сверхпроводниках с фононным механизмом спаривания величина  $\Delta$  на всей поверхности Ферми постоянна ( $s$ -волновая симметрия), то в купратных ВТСП  $\Delta$  имеет узлы, изменяя знак на четырех прямых, параллельных оси  $k_z$  ( $d$ -волновая симметрия). Что касается безмедных ВТСП (пниктидов и халькогенидов железа), то в некоторых из них ( $\text{LaOFeP}$ ,  $\text{LiFeP}$ ,  $\text{KFe}_2\text{As}_2$ ,  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ,  $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ru}_x\text{As}_2$ ,  $\text{FeSe}$ ) узлы  $\Delta$  наблюдаются, а в некоторых ( $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ,  $\text{BaFe}_{2-x}\text{Co}_x\text{As}_2$ ,  $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ ,  $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ) – нет. Новые данные для  $\Delta(\mathbf{k})$  в еще двух пниктидах получены в работах [1, 2]. Фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением показала [1], что в  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$  узлы у  $\Delta$  хоть и есть, но не такие, как при  $d$ -волновом спаривании: узловая линия на поверхности Ферми представляет собой окружность. Авторы [1] полагают, что  $\Delta$  имеет  $s$ -волновую симметрию, но при этом очень сильно анизотропна в  $\mathbf{k}$ -пространстве. Сходные результаты были получены в работе [2] при исследовании интерференции квазичастиц в  $\text{LiFeSe}$ . Авторы [2] определили сверхпроводящие щели  $|\Delta_i(\mathbf{k})|$  на трех дырочных поверхностях Ферми и показали, что все они не имеют узлов и существенно анизотропны (см. рис.). Осталось невыясненным, изменяет ли  $\Delta$  знак при переходе с одной поверхности на другую ( $s_{\pm}$ -волновое спаривание). Многообразие зависимостей  $\Delta(\mathbf{k})$  в пниктидах и халькогенидах железа свидетельствует либо об отсутствии однозначной корреляции механизма сверхпроводимости и симметрии  $\Delta$ , либо о различии механизмов в разных семействах безмедных ВТСП (что представляется маловероятным в виду сходства их структуры и основных физико-химических свойств).



Сверхпроводящая щель в трех дырочных зонах  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  халькогенида  $\text{LiFeSe}$  (в литературе эти зоны обозначают обычно как  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\gamma$ , соответственно).

Л.Опенев

1. Y.Zhang et al., *Nature Phys.* **8**, 371 (2012).
2. M.P.Allan et al., *Science* **336**, 563 (2012).

И далее ...

- 2 Спин-фононное взаимодействие в пниктидах  
Орбитальные токи и псевдощель в купратных ВТСП  
Служка за куперовскими парами  
Эффект близости и геометрия контактов

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовый компьютер и квантовая теория поля

## ГРАФЕН

- 3 Фотомеханический эффект в композитных материалах с присадкой графена

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Карбинофуллерены  
Углеродные нанотрубки определяют зрелость фруктов
- 6 Как внедрить азот в углеродную нанотрубку

Электромеханический преобразователь на основе отдельной углеродной нанотрубки

## МАГНИТЫ

- 7 Загадки алюминиевого компаса

## СПИНТРОНИКА

- 9 Фото-спинтроника: как намагничивает свет

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 9 Измерения скорости звука минералов нижней мантии Земли при высоких давлениях и температурах

## ПЕРВЫЕ СООБЩЕНИЯ

- 11 “Химический портрет” молекулы олимпиадена

## КОНФЕРЕНЦИИ

## Спин-фононное взаимодействие в пниктидах

До сих пор однозначно не установлено, что лежит в основе сверхпроводимости купратных и безмедных ВТСП: то ли взаимодействие электронов с колебаниями решетки (фононами), то ли со спиновыми флуктуациями. При этом молчаливо предполагается, что спиновые и решеточные степени свободы независимы друг от друга. Однако в работе [1] (Германия, Швейцария, Корея, Словения) при исследовании воздействия фемтосекундным оптических импульсов на волну спиновой плотности в пниктиде  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  обнаружено, что магнитный порядок квазиadiaбатически следует за когерентными колебаниями решетки. Это говорит о наличии в пниктидах достаточно сильного спин-фононного взаимодействия. Значит, при обсуждении механизма куперовского спаривания спины и фононы нужно рассматривать как взаимосвязанные объекты, а не отделять друг от друга.

*1. K.W.Kim et al., Nature Mater. 11, 497 (2012).*

## Орбитальные токи и псевдощель в купратных ВТСП

Псевдощель в купратных ВТСП продолжает привлекать к себе внимание исследователей. Есть надежда, что, поняв природу псевдощели, мы приблизимся к разгадке механизма высокотемпературной сверхпроводимости. Согласно одной из теоретических моделей, в псевдощелевом состоянии имеются циркулирующие по слоям  $\text{CuO}_2$  орбитальные токи, такие, что симметрия относительно обращения времени нарушается, а трансляционная симметрия – нет. Эта теория предсказывает наличие в ВТСП двух специфических магнитных возбуждений со слабой дисперсией. Одно из таких возбуждений ранее уже было обнаружено экспериментально. В работе [1] (США, Германия, Франция, Китай, Австрия, Австралия) при исследовании рассеяния нейтронов на монокристаллах  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$  найдено и второе. Энергии этих возбуждений составляют 38 и 54 мэВ. Они появляются при охлаждении образца до температуры возникновения псевдощели  $T^*$ . Таким образом, наличие в ВТСП орбитальных токов и их связь с псевдощелью можно считать практически доказанным. При описании фазовой диаграммы купратов нужно учитывать не только магнетизм локальных спинов, но и “псевдощелевой магнетизм” орбитальных токов. Ждет своего объяснения обнаруженное в [1] “перемешивание” антиферромагнитных возбуждений с псевдощелевыми.

*1. Y.Li et al., Nature Phys. 8, 404 (2012).*

## Слежка за куперовскими парами

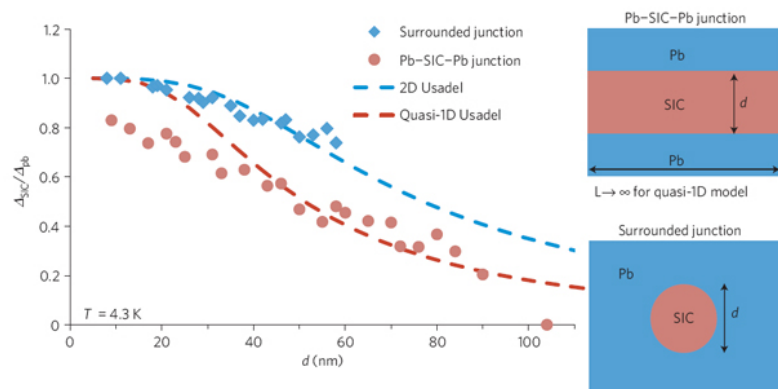
В сверхпроводниках носители заряда с противоположными импульсами и спинами объединяются в куперовские пары, которые и обеспечивают бездиссипативный характер токопереноса. Механизм спаривания в купратных ВТСП пока не установлен. В

работе [1] предложен способ “слежки” за куперовскими парами. Воздействуя на ВТСП  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  фемтосекундным лазерным импульсом, авторы [1] изучали динамику сверхпроводящей щели и квазичастиц, используя фотоэмиссионную спектроскопию с разрешением не только по углам, но и по времени. Было, в частности, установлено, что вблизи узлов  $d$ -волнового параметра порядка куперовские пары рекомбинируют очень медленно, а вдали от узлов – быстро. Дальнейшее развитие этой методики может дать новую полезную информацию о механизме формирования пар.

*1. C.L.Smallwood et al., Science 336, 1137 (2012).*

## Эффект близости и геометрия контактов

При контакте сверхпроводника (S) с нормальным металлом (N) в последнем индуцируется сверхпроводящая щель  $\Delta$ , которая убывает по мере удаления от границы раздела S/N на характерном расстоянии  $l$ , равном длине когерентности  $\xi$  (так называемый эффект близости). В работе [1] показано, что величина  $l$  существенно зависит от геометрии контакта (см. рис.) и может достигать нескольких  $\xi$ . Так, например, для S-N-S контакта  $l$  гораздо больше, чем для S-N контакта. Значительную роль играет и кривизна границы S/N. Авторы [1] предлагают качественное объяснение полученных результатов, основанное на андреевском отражении, а для численных расчетов используют уравнения Узделя.



Сверхпроводящая щель в нормальном металле как функция расстояния от границы S/N для контактов различной геометрии. Сверхпроводник – обычный свинец. Нормальный металл – страйповая несоизмеримая фаза свинца (striped incommensurate, SIC). Штриховые линии – теоретические расчеты.

*1. J.Kim et al., Nature Phys. 8, 464 (2012).*

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Квантовый компьютер и квантовая теория поля

Хотя универсальный квантовый компьютер еще не создан, уже сейчас стоит подумать о том, а зачем он нам, собственно, нужен? Какие задачи он будет решать быстрее, чем обычный компьютер? Пока число таких задач можно пересчитать по пальцам (чаще всего в качестве примера приводят факториза-

*ПерсТ, 2012, том 19, выпуск 11/12*

цию больших целых чисел). В работе [1] показано, что квантовый компьютер пригодится и для нужд квантовой теории поля, объединяющей квантовую механику со специальной теорией относительности ( $\phi^4$ -теория). Предложенный в [1] алгоритм позволяет добиться экспоненциального увеличения скорости расчетов релятивистской амплитуды рассеяния по сравнению с классическим компьютером. Это достигается за счет того, что время квантовых вычислений полиномиально по числу взаимодействующих частиц, их энергии и требуемой точности.

*I. S.P.Jordan et al., Science 336, 1130 (2012).*

## ГРАФЕН

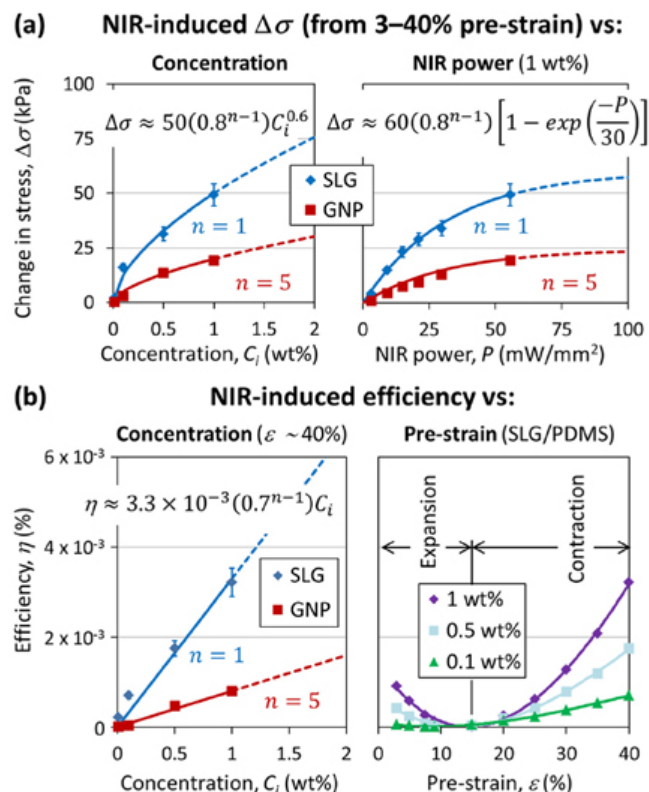
### Фотомеханический эффект в композитных материалах с присадкой графена

Композитные материалы на основе полимеров с присадкой графена обладают уникальными физико-химическими характеристиками, что привлекает к их разработке и исследованию множество научных коллективов. Недавно ученые [1] из Univ. of Louisville (США) исследовали фотомеханический эффект, принцип которого состоит в изменении механического состояния материала в результате оптического облучения. Этот эффект может быть положен в основу преобразования светового сигнала в механическую энергию в наномеханических системах, разработка которых в последнее время привлекает значительный интерес.

В экспериментах использовали композитные материалы двух типов. Материал первого типа представлял собой полидиметилсилоксан (ПДМС) с присадкой однослойного графена (SLG) на уровне 0.01-1 % (по массе), а в материале второго типа использовали тот же полимер с присадкой пластинок, содержащих примерно 5 слоев графена (GNP). Хлопья однослойного графена размером 1-2 мкм были получены стандартным способом в результате химического восстановления оксида графита, синтезированного методом Хаммерса. Пятислойные пластинки примерно того же размера были получены в результате расслоения высокочистого кристаллического графита при плазменной обработке. При получении композитного материала дисперсию двух модификаций графена в ПДМС растворяли в изопропиловом спирте, затем обрабатывали ультразвуком и просушивали, после чего из полученного материала изготавливали фотомеханический преобразователь.

Для исследования фотомеханического эффекта использовали установку, в которой исследуемый образец, имеющий форму прямоугольной продолговатой пластинки, закрепляли между двумя фиксаторами. Образец мог подвергаться предварительному растяжению до 40% от начальной длины. В качестве источника света использовали лазер. При облучении образца лазерным излучением в ближней ИК области спектра возникало дополнительное усилие, *ПерсТ, 2012, том 19, выпуск 11/12*

которое измеряли с помощью динамометра. Результаты исследования фотомеханического эффекта приведены на рисунке.



*a* - Зависимости напряжения, вызванного ИК лазерным облучением образца, от концентрации графена и интенсивности лазерного облучения (измерено при концентрации графена 1%);

*b* - зависимости эффективности фотомеханического преобразования от концентрации графена и уровня предварительного растяжения.

Как видно, эффективность композита для образцов с присадкой SLG примерно вдвое превышает соответствующий показатель для композита с присадкой GNP. Интересно отметить немонотонную зависимость фотомеханического эффекта от предварительного растяжения образца. При растяжении на уровне 10-15 % эффект практически отсутствует, а дальнейшее растяжение сопровождается увеличением эффекта. Максимальная величина дополнительного усилия наблюдалась на образце, содержащем 1 % SLG, и составила  $\sim 50$  кПа. Это соответствует сжатию образца, предварительно растянутого на 0.8 %, примерно на 1.6%. Отмечается обратимый характер эффекта, который проявляется в многократной воспроизводимости результатов измерений в течение 24 часов. Наблюдаемая в эксперименте зависимость фотомеханического эффекта от предварительного растяжения образца обусловлена ориентационным упорядочением графеновых слоев.

*А. Елецкий*

*I. J. Loomis et al., Appl. Phys. Lett. 100, 073108 (2012).*



## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Карбинофуллерены

Карбин и графен представляют собой, соответственно, одно- и двумерную аллотропные модификации углерода. В графене связи С–С образуют шестиугольники с общими сторонами, а карбин имеет цепочечную структуру. Гибрид графена и карбина называется графином (graphyne) [1]: в нем шестиугольники из связей С–С соединены друг с другом короткими двухатомными цепочками (рис. 1).

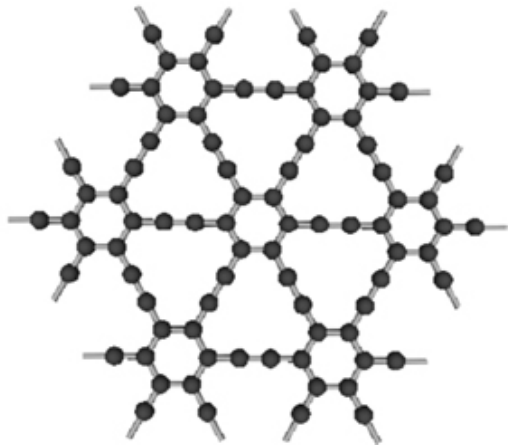


Рис. 1. Фрагмент слоя графина

Такие же (или даже более длинные) цепочки могут быть составными элементами фуллереноподобных сферообразных кластеров, связывая между собой пяти- и шестиугольники С–С (рис. 2).

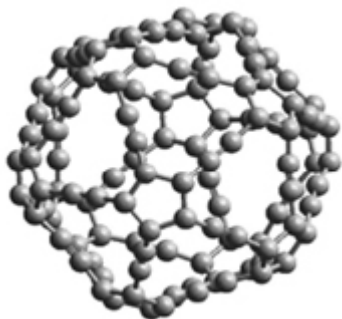


Рис. 2. Один из карбинофуллеренов

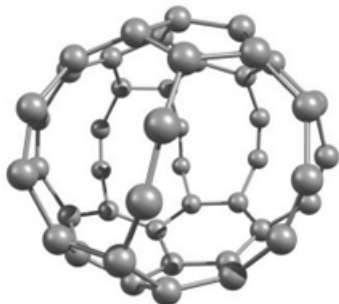


Рис. 3. Графинфуллерен С<sub>46</sub>

Карбинофуллерены пока не синтезированы, но теоретические расчеты [2] показывают, что они отвечают локальным минимумам потенциальной энергии кластера, то есть являются метастабильными. Вопрос в том, достаточно ли высоки ограничивающие метастабильное состояние потенциальные

барьеры, чтобы удержать карбинофуллерен в этом состоянии и не дать ему распасться. О нескольких ином типе карбинофуллеренов – графинфуллерене С<sub>46</sub> (рис. 3) – идет речь в работе [3]. Он был обнаружен при компьютерном моделировании эволюции нагретого фуллерена С<sub>46</sub> методом молекулярной динамики. В нем двухатомные цепочки связывают между собой две группы смежных пяти- и шестиугольников (“полюса”). Здесь барьер оказывается достаточно высоким, около 1 эВ, поэтому в принципе, можно рассчитывать на синтез столь экзотических кластеров.

Л.Опенюв

1. *Phys. Rev. B* **84**, 075439 (2011).

2. *ФТТ* **53**, 2265 (2011).

3. *ФТТ* **54**, 1614 (2012).

### Углеродные нанотрубки определяют зрелость фруктов



“Не срывай яблока, пока зелено: созреет, и само упадет” – гласит народная мудрость. Но что влияет на созревание, и почему плоды падают? Оказывается, важную роль в этих процессах играет

этилен С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>. Его участие в регуляции роста растений было открыто русским учёным Д.Н. Нелюбовым в 1901 г. Он установил, что содержащий этилен светильный газ вызывает большие изменения в развитии проростков гороха. Эти результаты были опубликованы, но в то время на них не обратили внимания, и, как часто бывает, позже влияние этилена на рост растений заново открыли в США. Было установлено, что этилен синтезируется самим растением в очень низких концентрациях и регулирует многие важные физиологические реакции, т. е. представляет собой фитогормон. Он включает определенные генетические программы, которые обеспечивают специфический ответ растения [1]. Этилен активирует созревание плодов, вызывает увядание (старение) листьев и цветков, опадание листьев и плодов.

Концентрация этилена в плодах – индикатор созревания и старения. Детектировать этилен можно с помощью газовой хроматографии или лазерной акустической спектроскопии, но эти методы, конечно, не годятся для использования на практике – в магазинах, на складах, в автофургонах, на морских судах... Учёные из Massachusetts Inst. of Technology (США) создали новый прибор – хеморезистивный сенсор, способный обнаружить очень малые (0.5-1 *ppm*) количества этилена [2]. Чувствительный к этилену материал изготовлен из одностенных углеродных нанотрубок (ОСНТ) и Cu(I) комплекса **1** (рис. 1). Этот комплекс образует стабильный комплекс **2** с этиленом. Учёных вдохновила природа – Cu(I) является важной частью этиленового рецептора в растениях. Взаимодействуя с нанотрубкой, комплекс **1** повышает её проводи-

мость. Когда он соединяется с этиленом, эффект допирования снижается, сопротивление нанотрубки растёт. На этом основано детектирование этилена в устройстве [2].

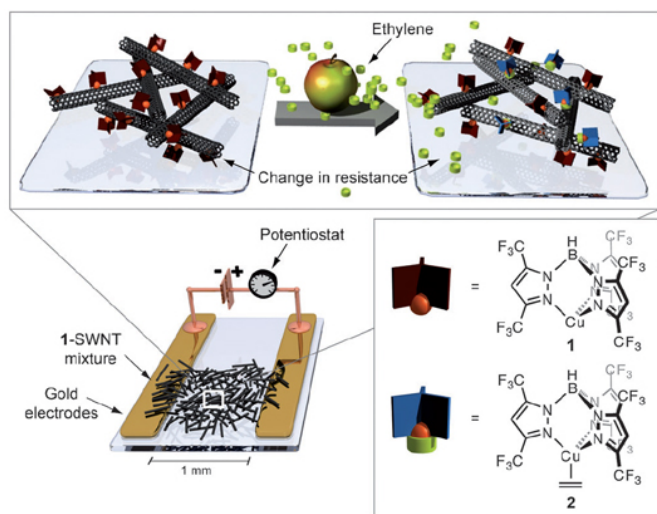


Рис. 1. Схема хеморезистивного сенсора. Смесь 1-ОСНТ нанесена между золотыми электродами. При воздействии этилена образуется комплекс 2, при этом меняется сопротивление.

Исследователи приготовили дисперсию 1-ОСНТ в дихлорбензоле и толуоле и нанесли путём накапывания на стеклянную пластинку между золотыми электродами. Схема экспериментальной установки для измерений представлена на рис. 2. Поток  $N_2$  делится на две части, одна из которых “нулевая”, а другая проходит через камеру с кусочками фруктов или проницаемой трубкой, содержащей этилен.

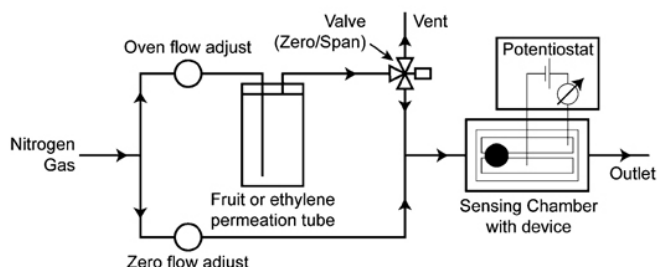


Рис. 2. Схема экспериментальной установки детектирования этилена.

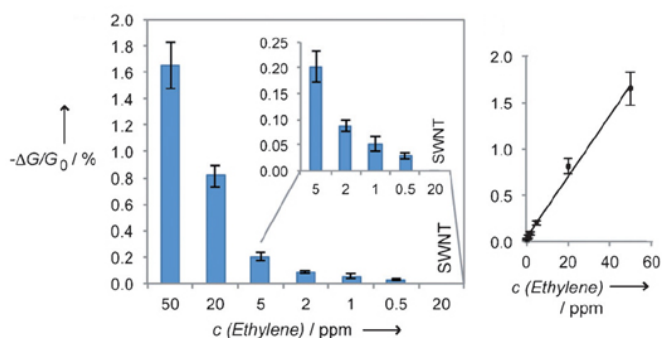


Рис. 3. Относительные отклики устройства 1-ОСНТ на 0.5; 1; 2; 5; 20 и 50 ppm этилена, разбавленного газообразным азотом, и исходных ОСНТ на 20 ppm этилена.

Некоторые результаты авторов работы [2] представлены на рис. 3. Сенсор позволяет регистриро-

вать менее 1 ppm этилена. В диапазоне концентраций 0.5-50 ppm исследователи наблюдали линейную зависимость отклика. Устройство, сделанное только из исходных нанотрубок, на этилен не реагирует. Отклики на этилен являются обратимыми.

Авторы [2] использовали свои устройства для детектирования этилена, синтезированного в разных фруктах. Они выбрали банан, авокадо, два одинаковых яблока, грушу и апельсин. Яблоко 1 хранилось в холодильнике, а яблоко 2 – при комнатной температуре. Относительные отклики (за единицу принят отклик на 20 ppm этилена), нормированные на 100 г фруктов, и их изменения в течение нескольких недель приведены на рис. 4.

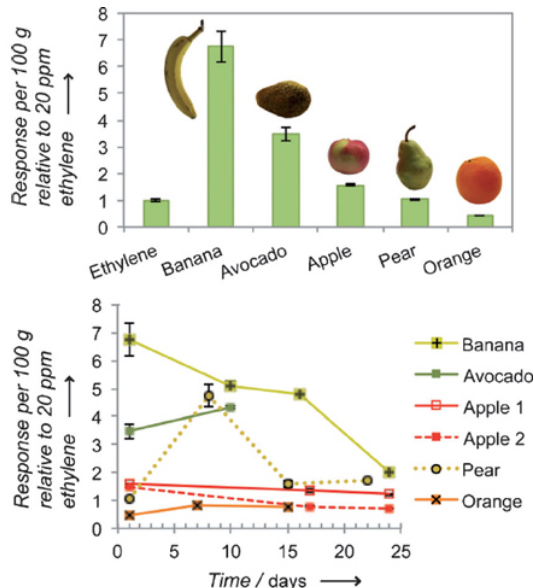


Рис. 4. Отклики устройства 1-ОСНТ на 100 г разных фруктов (по отношению к 20 ppm этилена). Фотографии груши сделаны в 1 и 15 день, банана – в 1 и 10 день, авокадо и апельсина – в 1 день, двух яблок – на 24 день.

Самый сильный отклик зарегистрирован для банана. Для всех фруктов, кроме апельсина, концентрации выше 20 ppm. При созревании этих фруктов происходит повышение дыхательной активности (выделения  $CO_2$ ) и увеличение синтеза  $C_2H_4$ . Для

апельсинов и других цитрусовых выделение этих газов обычно очень мало. После полного созревания дыхание и выделение этилена слабеют. Фрукты начинают стареть – портиться. Для авокадо исследователи смогли наблюдать созревание (рост выделения этилена), для груши созревание и старение после 2 недель. Остальные фрукты уже были спелыми в начале измерений, и на графиках видно их старение. Яблоко при комнатной температуре стареет быстрее (выделение этилена снижается сильнее, чем для яблока в холодильнике).

В большинстве случаев для правильного хранения фруктов необходимо поддерживать концентрацию этилена в воздухе ниже  $1 \text{ ppm}$ , поэтому авторы постарались повысить чувствительность нового устройства. Для этого в смесь 1-ОСНТ они добавили 5 вес.% микрочастиц полистирола. Благодаря увеличению площади поверхности системы чувствительность выросла в 1.3-2.2 раза.

По информации Массачусетского технологического института исследователи собираются сделать свои сенсоры компактными и беспроводными, добавив RFID – чип радиочастотной идентификации [3]. Устройства будут очень дешёвыми – около 25 центов за ОСНТ-сенсор плюс 75 центов за чип.

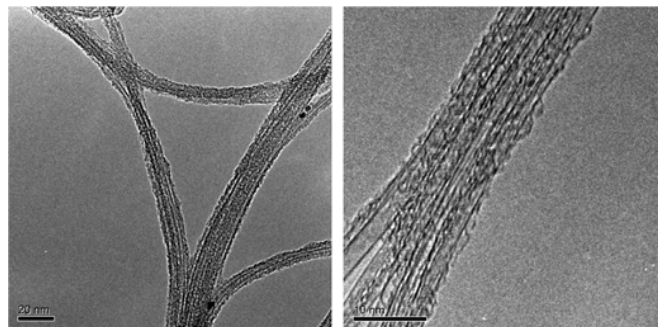
*О.Алексеева*

1. О.Н.Кулаева, Сорос. образ. журнал № 1, с. 78 (1998).
2. B.Esser et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**, 5507 (2012).
3. A. Trafton, MIT Media Relations <http://web.mit.edu/press/2012/fruit-spoilage-sensor.html>

### **Как внедрить азот в углеродную нанотрубку**

Известно, что в зависимости от индексов киральности углеродные нанотрубки могут быть как металлическими, так и полупроводниковыми. Однако, замещая атомы углерода атомами другого сорта (например, азота или бора), можно в определенных пределах варьировать их электронные свойства. Кроме того, допирование дополнительно влияет на реакционную способность образцов и их механическую прочность, поэтому задача поиска простых способов синтеза допированных углеродных нанотрубок представляет немалый интерес. В работе [1] авторы с помощью недорогой масштабируемой методики аэрозольно поддерживаемого химического парофазного осаждения (aerosol-assisted chemical vapor deposition) получили допированные азотом одностенные углеродные нанотрубки (N-SWCNT). Исследователи подвергли пиролизу соединенный с аэрозолями этанола и бензиламина ферроцен в диапазоне температур от 950 до 1100°C и в результате смогли получить N-SWCNT с содержанием азота около 1 ат. %. С помощью просвечивающей электронной и сканирующей электронной микроскопии

и рамановской спектроскопии авторы контролировали качество и морфологию нанотрубок, а наличие азота в образцах определяли посредством спектроскопии характеристических потерь энергии электронами и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В результате синтезированные образцы N-SWCNT представляют собой достаточно толстые “пучки”, поверхность которых покрыта аморфным углеродом (см. рис.) и, кроме того, содержащие изрядное количество крупных частиц катализатора (железо).



Изображения N-SWCNT “пучков”, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

И хотя посредством технических модификаций экспериментальной установки удалось уменьшить их средний диаметр, тем не менее, авторы отмечают, что работа в этом направлении не закончена. Корректировка таких параметров, как температура и состав газа-носителя позволили изменять диаметр нанотрубок в диапазоне от 0.9 до 1.8 нм, а также увеличить скорость реакции ( $> 10 \text{ мг/с}$ ) и процентный выход N-SWCNT. К слову, максимальный выход N-SWCNT исследователи получили при 1000°C в атмосфере аргоно-водородной смеси в пропорции 9:1. Попытки увеличения числа атомов допанта в составе образцов не увенчались успехом, поскольку использование прекурсоров с повышенным содержанием азота сдерживало рост нанотрубок.

В итоге, в работе [1] представлена достаточно простая методика получения допированных азотом одностенных углеродных нанотрубок, которую, будем надеяться, авторы в дальнейшем будут развивать. Можно предположить, что таким развитием станет расширение предлагаемого способа на нанотрубки допированные бором или подбор новых прекурсоров для производства N-SWCNT.

*М. Маслов*

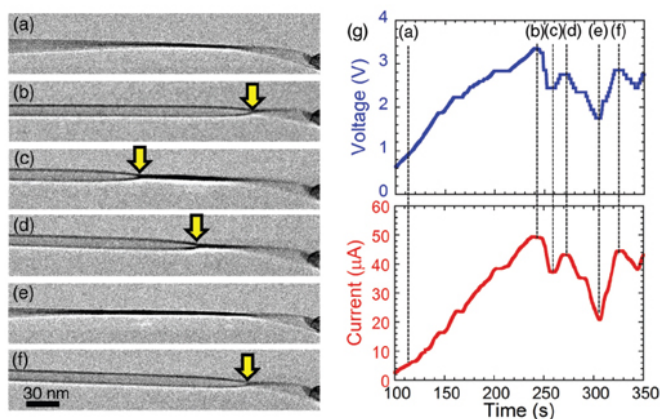
1. A.A.Koós et al., *Chem. Phys. Lett.* **538**, 108 (2012).

### **Электромеханический преобразователь на основе отдельной углеродной нанотрубки**

Электромеханический преобразователь (ЭМП) превращает механическую энергию (усилие) в электрический сигнал (и обратно). Подобные преобразователи являются основой современных технологий. Переход к микро- и нанометровым масштабам



представляет серьезный вызов для исследователей, занятых разработкой ЭМП, поскольку решение этой проблемы требует создания миниатюрных устройств, совершающих усилие при подаче электрического сигнала. Одно из устройств подобного типа основано на электромеханических свойствах углеродных нанотрубок (УНТ), сопротивление которых, как известно, изменяется при изгибе. Недавно группа исследователей из Univ. of Osaka (Япония) сообщила о создании ЭМП на основе отдельной УНТ, преобразующего электрический сигнал в кручение нанотрубки. В эксперименте использовали многослойную УНТ диаметром около 12.5 нм, полученную стандартным электродуговым способом. С помощью манипулятора, встроенного в просвечивающий электронный микроскоп (ТЕМ), из этой УНТ были извлечены внутренние слои, в результате чего была получена полая нанотрубка. После выдержки этой нанотрубки в течение нескольких дней на воздухе или в вакууме трубку сплющивали в двухслойную ленту, поскольку подобная плоская структура является энергетически более выгодной, чем цилиндр.



*a – f*: Микроизображения УНТ, подверженной действию электрического напряжения; *g*: временная эволюция приложенного напряжения и пропускаемого тока. Стрелками показана граница, разделяющая плоский и цилиндрический фрагмент УНТ. Ток равен: *a* - 5 мкА; *b* - 50 мкА; *c* - 36 мкА; *d* - 42 мкА; *e* - 20 мкА; *f* - 42 мкА.

При подаче напряжения между концами УНТ в ней возникает электрический ток, что сопровождается изменением структуры нанотрубки – фрагмент нанотрубки, длина которого зависит от величины пропускаемого тока, изменяет свою структуру от плоской к цилиндрической. На рисунке показана серия микрофотографий, полученных с помощью ТЕМ. Важно отметить, что изменение структуры нанотрубки имеет обратимый характер: при снятии напряжения трубка вновь становится плоской. В качестве механизма, определяющего изменение структуры УНТ под действием электрического тока, авторы [1] рассматривают эффект Джоуля нагрева. На определенной стадии нагрева энергия теплового движения атомов, образующих УНТ, превышает энергию вандерваальсовского взаимодействия слоев нанотрубки, определяющего их слипание.

Выполненные оценки показывают, что это достигается при температуре УНТ ниже 2500 К.

Наряду с изменением структуры УНТ, наблюдается поворот ее плоского фрагмента, причем угол этого поворота зависит как от величины пропускаемого тока, так и от угла, характеризующего кривизну нанотрубки. Оценки показывают, что величина вращательного момента, развиваемого при таком повороте, достигает величины  $\sim 5$  нН·нм, что примерно в 50 раз превышает этот параметр, характерный для биомолекулярных моторов. Указанный эффект может быть положен в основу атомного наноманипулятора, способного перемещать атомные частицы на заданное расстояние.

*А.Елецкий*

*I. R.Senga et al., Appl. Phys. Lett. 100, 083110 (2012).*

## МАГНИТЫ

### Загадки алюминиевого компаса

Ориентация ферромагнитных металлов в магнитном поле хорошо знакома всем – вращение стрелки компаса не вызывает удивления даже у детей. А вот возможность ориентировать “немагнитные” металлы и их структурные элементы может казаться загадкой. Исследованию этого вопроса посвящено множество статей. Кажется, что к настоящему времени причины влияния магнитного поля на микроструктуру неферромагнитных металлов стали ясны. В обзоре [1] дан подробный анализ различных явлений, происходящих при кристаллизации немагнитных металлов в магнитных полях, и приведены ссылки на десятки работ, в которых наблюдалось изменение ориентации зерен в магнитном поле в алюминии, титане и других металлах. Правда, в отличие от стрелки компаса, зерна в металлах ориентируются более сильным полем в несколько тесла. Эволюция микроструктуры кристаллов во время роста зерен наблюдается только в магнито-анизотропных металлах, в которых дополнительная ориентирующая сила возникает вследствие различия свободной энергии для разных ориентаций зерен.

Об асимметрии ориентации зерен судят с помощью техники электронной дифракции обратного рассеяния (Electron backscatter diffraction (EBSD)), известной также как дифракция обратного рассеяния Кикучи (BKD). Эта техника используется для изучения кристаллографической ориентации и текстуры многих материалов, позволяя строить карты ориентации кристаллитов, изучать дефекты, включения фаз, границы зерен и микронапряжения. Обычно этот тип диаграмм получают, используя рентгеновскую дифракцию и электронный микроскоп, оборудованный детектором EBSD. На рис. 1 приведена типичная диаграмма для поликристаллов титана, охлажденных без магнитного поля (а) и в магнитном поле 19.4 Тл (б). Для образцов, полученных в магнитном поле, видна явная асимметрия в ориентациях зерен.

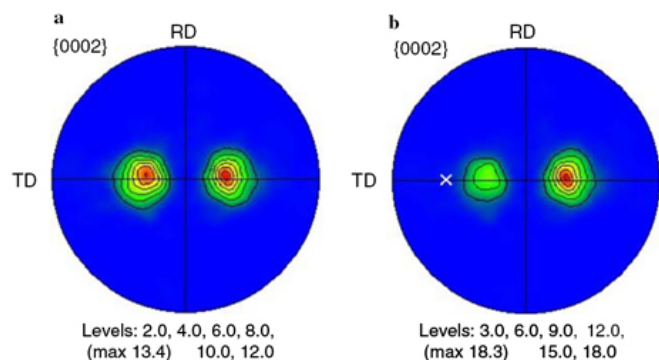


Рис. 1. Типичная диаграмма EBSD для поликристаллов титана, охлажденных без магнитного поля (а), и в магнитном поле 19.4 Тл (b) [1].

Отметим, однако, что указанная причина ориентации зерен и изменения микроструктуры металлов в магнитном поле вовсе не является единственной. В [2], например, авторы обнаружили, что в сплаве Si-Al наблюдается сильная зависимость величины ориентационного эффекта в магнитном поле от скорости охлаждения расплава (рис.2).

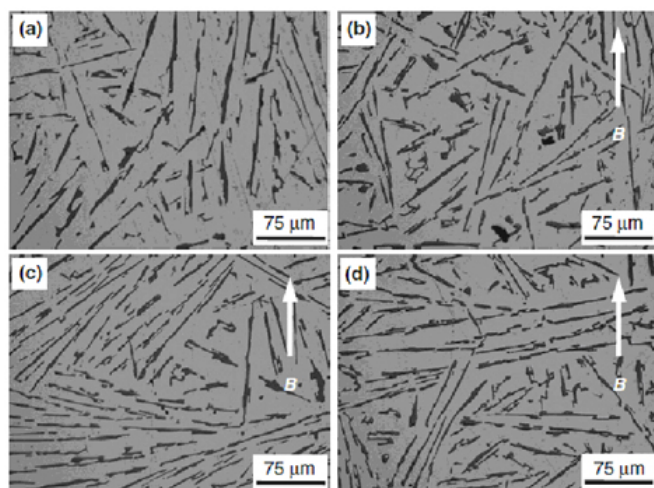


Рис. 2. Типичные микроструктуры эвтектического сплава Al-11.8 вес. % Si, закристаллизованного при скорости охлаждения 1.5 К/мин в магнитных полях: а - 0 Тл; b - 4.4 Тл; с - 8.8 Тл и d - 11.5 Тл.

Этот и другие признаки позволили им утверждать, что главную роль играет подавление конвекции и, как следствие, ослабление диффузии кремния в алюминии. Вероятно, можно ожидать проявления и других механизмов влияния магнитного поля на физико-химические процессы в поликристаллических немагнитных металлах. В литературе сообщается [3], что магнитное поле способно влиять на пластичность (микротвердость) кристаллов алюминия не только в результате ориентационных эффектов при затверждении расплава, но и в результате выдержки твердого образца в магнитном поле при комнатной температуре. Это указывает на то, что, помимо вышеупомянутых ориентационных и конвекционных эффектов, в магнитном поле существуют дополнительные механизмы его влияния на микроструктурные процессы. Авторы [3] пытаются отнести обнаруженный эффект к спин-зависимым

процессам в парах радикалов, упуская из вида, что в металлах скорость спиновой релаксации так высока ( $10^{-11}$ с), что время разориентации спинов оказывается всегда значительно короче времени, необходимого для спиновой конверсии ( $10^{-8}$  с в магнитном поле 0.1 Тл). Эта причина не позволяет сравнивать магнитопластичность в алюминии с магнитопластическими спин-зависимыми эффектами в диэлектриках, на которые ссылаются авторы [3]. Поэтому предложенный ими механизм кажется нереалистичным. Однако сам экспериментальный факт влияния магнитного поля на микротвердость алюминия кажется очень интригующим.

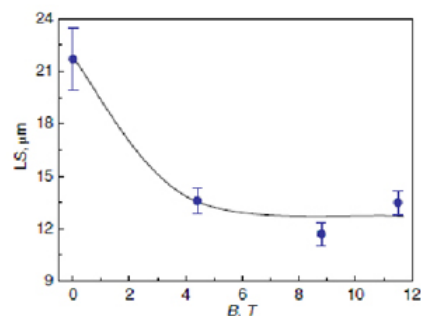


Рис. 3. Разделение дендритов, как функция магнитного поля в кристаллизованном кремний-алюминиевом сплаве при медленном охлаждении (1.5 К/мин) [2].

В заключение отметим, что подавляющее большинство исследователей, хотя и пользуется дорогими сверхпроводящими магнитами (10-15 Тл), наблюдает насыщение эффектов переориентации в относительно невысоких полях (1-3 Тл), которые можно создать в обычном электромагните (рис.3). Кроме того, вращающий момент, конечно, увеличился бы, если бы использовали не постоянное магнитное поле, а неоднородное магнитное поле. Тогда к вращающему моменту, обусловленному анизотропией зерен, добавился бы вращающий момент, обусловленный градиентом поля. Правда, в некоторых случаях эти факторы могут действовать в противоположные стороны.

Об ориентирующем влиянии магнитного поля на текстуру немагнитных материалов было известно давно. Археологи приняли на вооружение этот факт более полувека назад [4], определяя возраст своих находок по ориентации текстуры в глиняных черепках и сравнивая эту ориентацию с той, которая вычисляется по известному временному тренду магнитного поля Земли при движении магнитных полюсов. Поэтому, как обычно, изучаем новое, которое является хорошо забытым старым.

О. Коплак

1. D.A.Molodov et al., *J. Mater. Science* **41**, 7853 (2006).
2. T.Liu et al., *J. Mater. Science* **46**, 1628 (2011).
3. Д.В. Загуляев и др., *Вестник Челябинского государственного университета.. № 12 (193). Физика. Вып. 7*, 21-24 (2010).
4. М.Эйткин, *УФН* **87**, 303 (1965).



## СПИНТРОНИКА

### Фото-спинтроника: как намагничивает свет

Развитие микроэлектроники в сторону повышения производительности устройств породило два “незарядовых” направления – фотонику, использующую в качестве носителя информации свет, и спинтронику, использующую спин электрона. Устройства фотоники обладают высоким быстродействием, а приборы спинтроники – энергонезависимостью. В первое десятилетие нынешнего века стало развиваться также направление, которое позволит объединить сильные стороны обеих ветвей микроэлектроники: магнитные устройства с быстродействием выше 10 ГГц, переключаемые с помощью фемтосекундных импульсов света. Так изменение магнитной анизотропии, вызванное лазерным импульсом, приводит к переориентации спинов на временных масштабах порядка нескольких пикосекунд [1]. Однако этот способ имеет существенный недостаток: магнитная анизотропия безразлична к знаку проекции намагниченности на выделенную ось, так что конечная ориентация спина с 50% вероятностью может оказаться как “вверх”, так и “вниз”. Определенность может внести внешнее магнитное поле, которое снимает вырождение по энергии. Более изящным решением, позволяющим осуществить чисто оптическое управление намагниченностью, является использование циркулярно-поляризованного света, передающего магнитной подсистеме момент импульса: в этом случае облученная область становится однородно намагниченной, причем направление магнитного момента противоположно для областей освещенных право- и лево поляризованным светом (рис. 1а). Механизмы явления до сих пор остаются не вполне ясными, в частности загадкой остается то, каким образом магнитная система “запоминает” поляризацию света, ведь на протяжении большей части времени эволюции системы лазерный импульс не действует.

Новые эксперименты на образцах ортоферритов  $(\text{SmPr})\text{FeO}_3$ , проведенные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, МЭИ и Radboud Univ. Nijmegen (Голландия), позволяют лучше разобраться в механизмах эффекта [2]. В отличие от ранее наблюдавшихся фотоиндуцированных эффектов перемагничивания, в  $(\text{SmPr})\text{FeO}_3$  излучение одной и той же поляризации может в зависимости от начальной температуры кристалла и мощности лазерного импульса породить противоположно намагниченные области. Казалось бы, это обстоятельство только затемняет картину явления, однако за кажущейся запутанностью проступают определенные закономерности. Известно, что в ортоферрите  $(\text{SmPr})\text{FeO}_3$  в температурном интервале 98-130 К происходит переориентация спинов на угол  $\pi/2$ . Лазерные импульсы с энергией порядка микроджоуля вызывают разогрев материала на несколько десятков градусов, что при

*ПерсТ, 2012, том 19, выпуск 11/12*

надлежащем выборе начальной температуры оказывается достаточным для того, чтобы запустить процесс вращения спинов. Конечный результат вращения зависит от начальной фазы и времени спиновой прецессии, т.е. не только в какую сторону начнут вращаться спины (что определяется круговой поляризацией света), но и сколько оборотов сделает спин. Последнее же определяется начальной температурой кристалла и мощностью импульса лазера. Фазовая диаграмма, соответствующая этим двум параметрам, представлена на рис. 1б. Таким образом, становятся более понятными механизмы переключения намагниченности, вызванные светом.

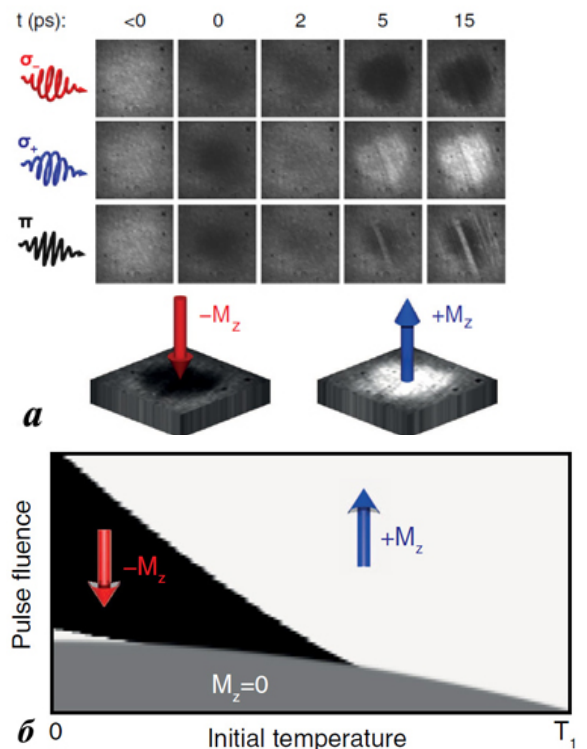


Рис. 1. Намагничивание светом в  $(\text{SmPr})\text{FeO}_3$  [1]. а - Магнитооптические изображения поверхности облученного материала: излучение противоположной круговой поляризации намагничивают среду противоположным образом. Плоскополяризованный свет (нижний ряд) порождает домены с противоположным направлением намагниченности.

б - Фазовая диаграмма в координатах “интенсивность излучения – начальная температура” [2].

А. Пятаков

1. A.V.Kimel et al., *Nature (London)* **429**, 850 (2004).
2. J.A. de Jong et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 157601 (2012).

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### Измерения скорости звука минералов нижней мантии Земли при высоких давлениях и температурах

Исследования химического состава минералов в нижней мантии Земли (глубины от 660 до 2900 км) и их физических свойств является важной проблемой геофизики. Лабораторные измерения свойств

различных минералов при высоких давлениях в камерах с алмазными наковальнями получили в настоящее время достаточное распространение, но обычно измерения проводят при комнатной температуре. Для нижней мантии характерны давления 35-135 ГПа и температуры 2000-3000 К. Авторы работы [1] сообщают об определении скорости звука

для двух наиболее распространенных минералов нижней мантии – перовскита  $\text{MgSiO}_3$  (pv) и ферропериклаза  $\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$  (fp) – в камерах с алмазными наковальнями (давление до 124 ГПа) и лазерным нагревом до 2700 К. Спектры бриллюэновского рассеяния измерялись на канале BL10XU синхротрона Spring 8 в Японии.

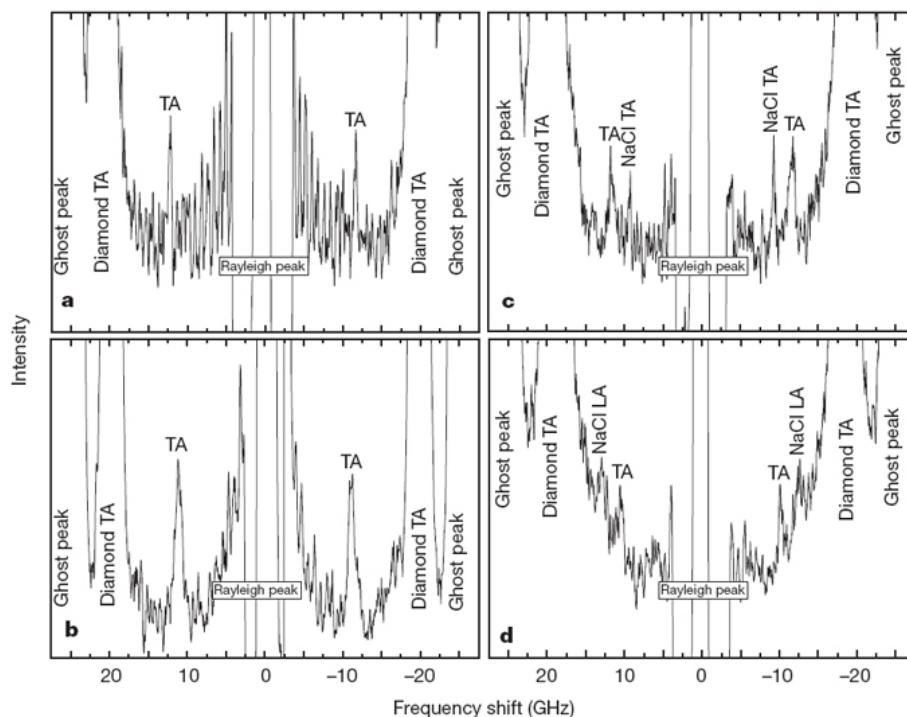


Рис. 1. Бриллюэновские спектры минералов земной мантии: *a* -  $\text{MgSiO}_3$  с добавкой 4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при 95 ГПа и 300 К; *b* -  $(\text{Mg}_{0.92}\text{Fe}_{0.08})\text{O}$  при 86 ГПа и 300 К; *c* -  $\text{MgSiO}_3$  при 91 ГПа и 2700 К; *d* -  $\text{MgO}$  при 48 ГПа и 2700 К (ТА и LA обозначают поперечные и продольные моды).

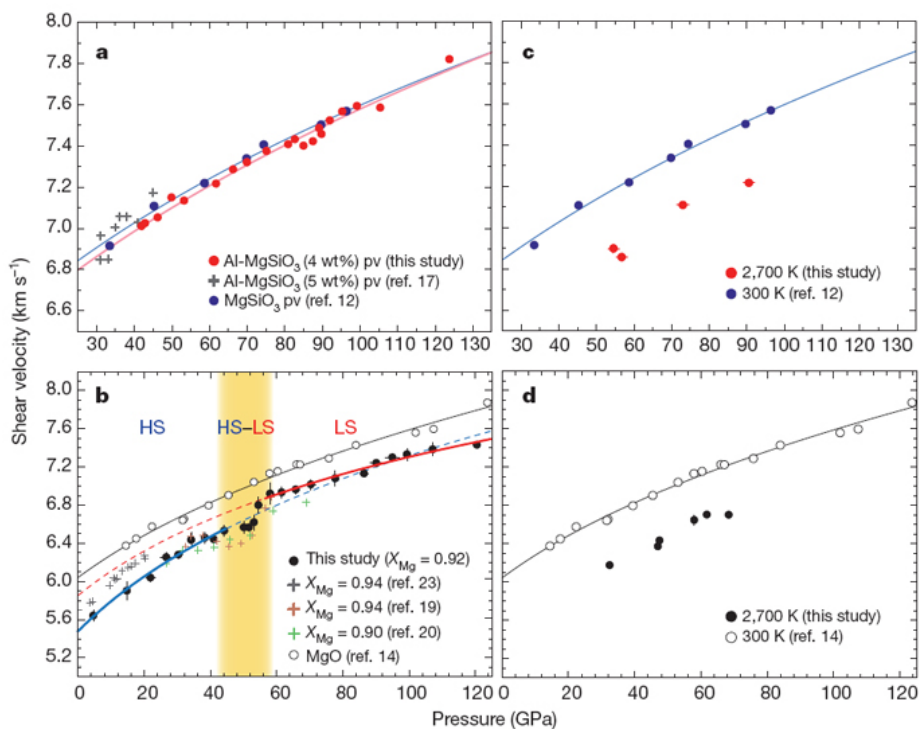


Рис. 2. Скорость звука для минералов нижней мантии: *a* -  $\text{MgSiO}_3(+4\% \text{Al}_2\text{O}_3)$  при 300 К; *b* -  $(\text{Mg}_{0.98}\text{Fe}_{0.08})\text{O}$  при 300 К (заштрихована область спинового кроссовера); *c* -  $\text{MgSiO}_3$  при 300 К и 2700 К; *d* -  $\text{MgO}$  при 300 К и 2700 К.

Были обнаружены весьма резкие пики бриллюэновского рассеяния на поперечных акустических модах, в том числе и при высоких температурах (рис. 1). Результаты показали некоторое уменьшение скорости звука для перовскита (рис. 2а, с) при высоких температурах, а также аномальное изменение скорости звука для ферропериклаза в интервале давлений 40-60 ГПа, обусловленное спиновым кроссовером иона  $Fe^{2+}$  из высокоспинового в низкоспиновое состояние (рис. 2b, d).

Для обоих минералов были определены упругие модули и построена модель распределения минералов в зависимости от глубины.

С. Овчинников

1. M. Murakami et al., *Nature* **485**, 90 (2012).

## ПЕРВЫЕ СООБЩЕНИЯ

### “Химический портрет” молекулы олимпиацена

30 мая 2012 г. на сайте *nanonewsnet.ru* появилось сообщение об открытии новой молекулы - олимпиацена, синтез которой в виде олимпийской системы бензолных колец химии Univ. of Warwick (Великобритания) посвятили грядущей олимпиаде в Лондоне (рис. 1), а изображение с уникально высоким разрешением получили сотрудники фирмы IBM в Цюрихе (рис. 2) (*Science Daily*: May 28, 2012).

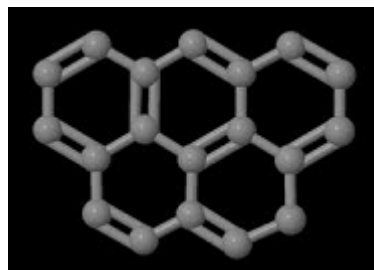


Рис. 1. Структурная формула олимпиацена  $C_{19}H_{11}$

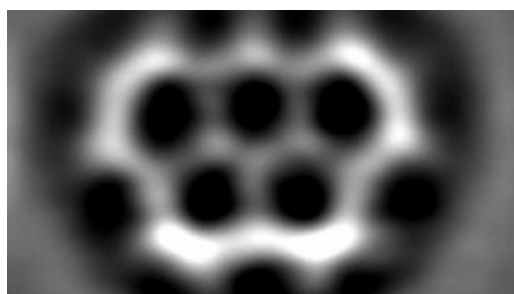


Рис. 2. Изображение молекулы, полученное с помощью сканирующего микроскопа высокого разрешения. (IBM Research - Zurich, University of Warwick, Royal Society of Chemistry).

На эту новость откликнулись исследователи Российского университета дружбы народов. Используя имеющуюся в их распоряжении уникальную программу квантово-химических расчетов, с помощью которой можно выявить такие деликатные свойства электронно ненасыщенной системы как корреляцию ее “лишних” электронов, квантовые химики университета установили, что олимпиацен относится

к коррелированным молекулам и получили его “химический портрет” (рис. 3).

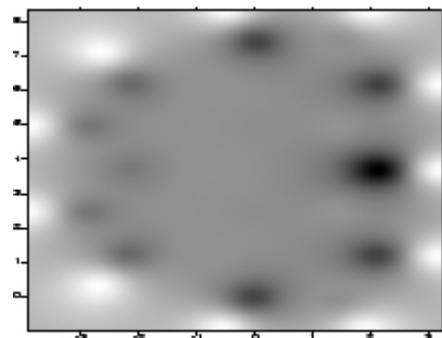


Рис. 3. “Химический портрет” олимпиацена (распределение эффективно неспаренных электронов по атомам молекулы). Цветовая гамма маркирует химическую активность атомов молекулы и постепенный переход от черного и серого цветов на атомах углерода к белому цвету атомов водорода означает уменьшение химической активности соответствующих атомов (РУДН).

Не составляет большого труда увидеть, что изображение на рис. 2. является негативной копией изображения, показанного на рис. 3, и представляет собой первый экспериментальный портрет распределения эффективно неспаренных электронов в молекуле.

Как сообщила научный руководитель Лаборатории вычислительной нанотехнологии РУДН проф. Е.Ф. Шека, молекула обладает рядом уникальных свойств. Молекула является плоской с симметрией  $C_{2v}$ . Основное состояние дублетно, электронная корреляция значительна, так что степень радикализации молекулы составляет 23%. У молекулы низкий потенциал ионизации и достаточно высокое сродство к электрону, что делает ее активным участником процессов, управляемых донорно-акцепторным взаимодействием. Высокая химическая активность молекулы в сочетании с хорошими донорно-акцепторными свойствами, несомненно, привлекут к ней большое внимание исследователей из области оптоэлектроники и химического модифицирования.

## КОНФЕРЕНЦИИ

**VII Международная конференция “Фазовые превращения и прочность кристаллов” (ФППК-2012), посвященная 110-летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова 29 октября - 2 ноября 2012 г.**

**Черноголовка, Россия**

На конференции будут представлены следующие направления исследований:

- Бездиффузионные (мартенситные) и диффузионные фазовые превращения. Термодинамика, кинетика, кристаллогеометрия, структура сталей и сплавов.
- Фазовые переходы и критические явления с участием дефектов кристаллического строения,



включая процессы пластической деформации. Большие и высокоскоростные деформации. Высокочрезвычайные состояния. Сверхпластичность.

- Структура и свойства внутренних и внешних поверхностей раздела (межфазные, межзеренные и антифазные границы, свободная поверхность) и их вклад в процессы пластической деформации и фазовых превращений.
- Поведение индивидуальных дислокаций и их ансамблей. Взаимодействие с магнитными и электрическими полями. Влияние внешних воздействий различной природы на поведение дислокационных ансамблей.
- Процессы с участием дефектов кристаллического строения, фазовых превращений и пластической деформации (механоактивация, спекание, диффузия, адсорбция, катализ, смачивание).
- Прочность и пластичность перспективных материалов (покрытия, гетероструктуры, фуллерены, высокотемпературные сверхпроводники, нанокристаллические и аморфные материалы, высокопрочные керамики, интерметаллиды).

Сайт: <http://mks-phys.ru/index.php/page/get/42>

### ***International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2012), 3-7 September 2012, Budapest, Hungary***

Some of the main topics are:

- mathematical modeling in Fundamental Physics: e.g. high-energy physics, particle physics, nuclear, atomic, and molecular physics, gravitation, cosmology, astrophysics, plasma physics, electrodynamics, fluid dynamics, condensed-matter physics, chemical physics, chaos, statistical mechanics etc.;
- evolutionary computation (Genetic algorithms, Evolutionary programming, Eagle strategy, Swarm intelligence, Ant colony optimization, Particle swarm optimization, Differential evolution etc.);
- mathematical methods and tools for modeling complex physical and technical systems;
- software and computer complexes for experimental data processing;
- methods, algorithms, and software of computer algebra;
- computational chemistry, biology, and biophysics;
- new generation computing tools, distributed scientific computing;
- efficient solvers and nonlinear problems, computational modeling in engineering and science multiscale modeling, multiphysics modeling;
- progress in discretization methods.

Сайт: <http://www.icmsquare.net/>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой  
ИФТТ РАН и НИЦ “Курчатовский институт”

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, О.Коплак,

М.Маслов, С.Овчинников, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>