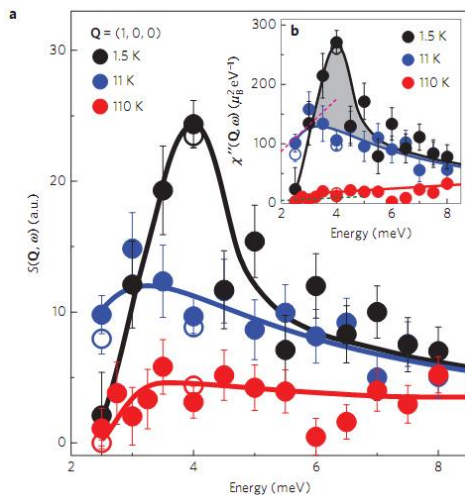


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Страйповые спиновые флуктуации, нематичность и сверхпроводимость в FeSe

Сверхпроводимость безмедных ВТСП на основе железа возникает, когда антиферромагнитный и электронный нематический порядок полностью или частично подавляются путем химического допирования или сильного сжатия. Бытует мнение, что куперовское спаривание в этих соединениях обусловлено теми же взаимодействиями, которые приводят к нематичности, характеризующейся нарушением симметрии электронной фазы относительно поворота в плоскости a - b . На роль таких взаимодействий претендуют орбитальные и спиновые флуктуации.



a – Динамическая спиновая корреляционная функция с поправкой на фон.
b – Мнимая часть динамической восприимчивости. Затенённая область иллюстрирует изменение спектрального веса спиновых возбуждений при переходе в сверхпроводящее состояние. Такое изменение свидетельствует в пользу важной роли спиновых флуктуаций при формировании сверхпроводимости в FeSe.

В работе [1] (Китай, Франция, Египет, Россия, США) изучено рассеяние нейтронов на монокристаллах FeSe с $T_c = 8.7$ K, в которых нематическое упорядочение при $T_s = 90$ K имеет место в отсутствие антиферромагнетизма. При $T = T_s$ наблюдается резкое усиление страйповых спиновых флуктуаций, а охлаждение до $T < T_c$ ведет к формированию спинового резонанса, энергия которого (≈ 4 мэВ) близка к энергии электрон-бозонного взаимодействия (определенной по данным сканирующей туннельной спектроскопии). Полученные результаты не согласуются с моделью орбитальной природы нематичности. Авторы приходят к выводу, что причиной как нематичности, так и сверхпроводимости FeSe является взаимодействие носителей заряда со спиновыми флуктуациями. При этом параметр сверхпроводящего порядка является знакопеременным, то есть имеет либо s_{\pm} -волновую, либо d -волновую симметрию.

1. Q. Wang et al., *Nature Mater.* **15**, 159 (2016).

И далее ...

2 Спиновая поляризация и сверхпроводимость на границе раздела оксидов

Неравновесная высокотемпературная сверхпроводимость в K_3C_{60} ?

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

3 Квантовый металл в двумерном сверхпроводнике

4 Неклассические корреляции фотонов и фононов

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

4 Двухкикие частицы в роли микромашин

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

5 Влияние атомов замещения на электронные свойства углеродных нанотрубок

НАНОМАТЕРИАЛЫ

5 Влияние метильных групп на устойчивость углеродного кубического остова

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ, ОБЗОРЫ, ПУБЛИКАЦИИ

КОНКУРЕНТЫ

7 Ставка на твердооксидный топливный элемент

КОНФЕРЕНЦИИ

8 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2016), July 31- August 5, 2016, Beijing, China

International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA-2016), July 19-22, 2016, Surabaya, Indonesia

Спиновая поляризация и сверхпроводимость на границе раздела оксидов

Недавнее открытие квазидвумерной электронной системы (q2DES) на границе раздела зонных диэлектриков LaAlO_3 и SrTiO_3 вызвало огромный интерес специалистов по оксидной электронике. В работе [1] (Италия, США, Франция, Швейцария) обнаружено, что введение нескольких слоев антиферромагнитного диэлектрика EuTiO_3 с $T_N = 5.5$ К между LaAlO_3 и SrTiO_3 (рис. 1) позволяет получить q2DES, в которой наблюдаются и ферромагнетизм, и сверхпроводимость (рис 2).

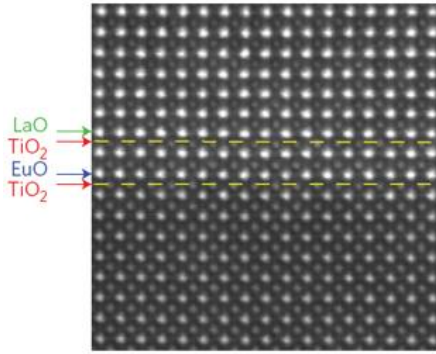


Рис. 1. Гетероструктура, изготовленная последовательным напылением слоев EuTiO_3 толщиной в две элементарные ячейки и LaAlO_3 толщиной в десять элементарных ячеек на монокристалл SrTiO_3 . Изображение получено методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии с атомарным разрешением.

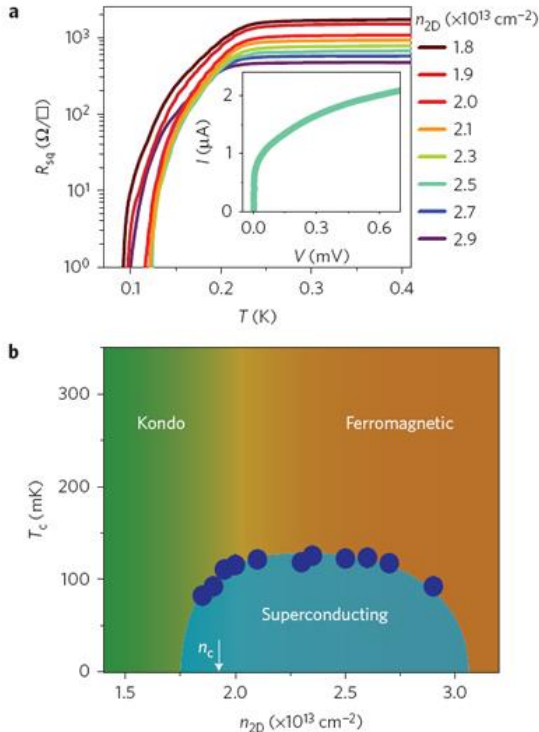


Рис. 2. а – Температурные зависимости сопротивления гетероструктуры $\text{LaAlO}_3/\text{EuTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ при различных концентрациях носителей n_{2D} . На вставке показана вольт-амперная характеристика при $T = 50$ мК и $n_{2D} = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. б – Фазовая диаграмма этой гетероструктуры; концентрация $n_c = 1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ отвечает переходу от режима, соответствующему эффекту Кондо, к зонному ферромагнетизму.

2

Поляризация спинов при нагревании обусловлена обменным взаимодействием между $4f$ -электронами европия и $3d$ -электронами титана. Что касается сверхпроводимости, то здесь не совсем понятно: то ли она сосуществует с ферромагнетизмом и является нефононной с необычным параметром порядка (например, p -волновым), то ли сверхпроводящие и магнитные корреляции просто-напросто имеют место в разных слоях гетероструктуры, то есть пространственно разнесены.

1. D.Stornaiuolo et al., *Nature Mater.* **15**, 278 (2016).

Неравновесная высокотемпературная сверхпроводимость в K_3C_{60} ?

Недавно было обнаружено, что в купратных ВТСП возбуждение определенных фоновых мод при температуре значительно выше критической температуры T_c приводит к такому же (хотя и кратковременному) изменению оптических спектров, что и охлаждение образца ниже T_c . Это было интерпретировано как признак неравновесных сверхпроводящих корреляций. Аналогичный эффект наблюдали авторы работы [1] (Германия, Италия, Великобритания, Сингапур) в допированном калием фуллере C_{60} (рис. 1a) с $T_c = 20$ К при фотовозбуждении колебательной моды $T_{1u}(4)$ (рис. 1b). Это хорошо видно из сравнения рис. 1с-е и рис.2.

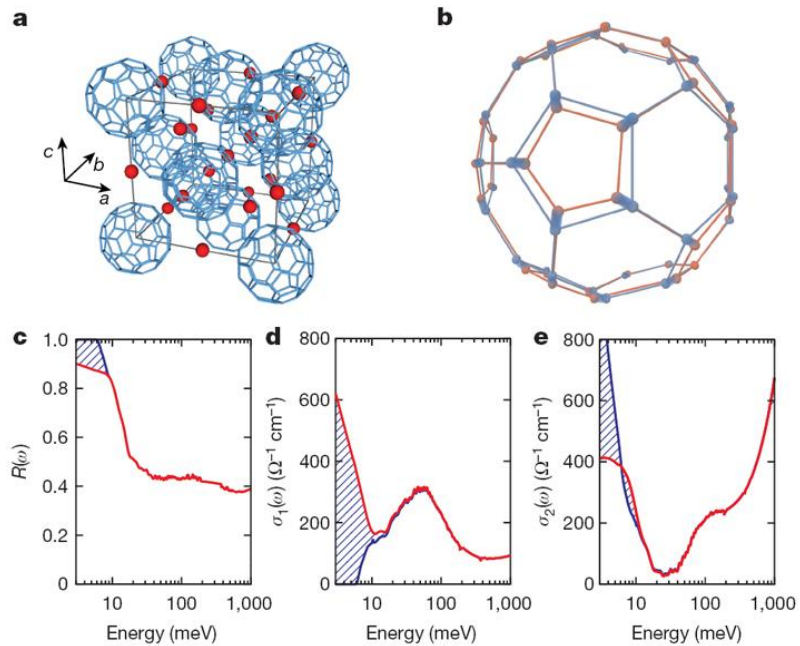


Рис. 1. а – Элементарная ячейка K_3C_{60} . Красные кружки – атомы калия.

б – Искажение молекулы C_{60} (красный цвет) при колебаниях по моде $T_{1u}(4)$. Синим цветом изображена равновесная структура.

с-е – Коэффициент отражения (с), действительная (д) и мнимая (е) части оптической проводимости при $T = 25$ К $> T_c$ (красные линии) и $T = 10$ К $< T_c$ (синие линии). Штриховкой отмечены изменения при сверхпроводящем переходе.

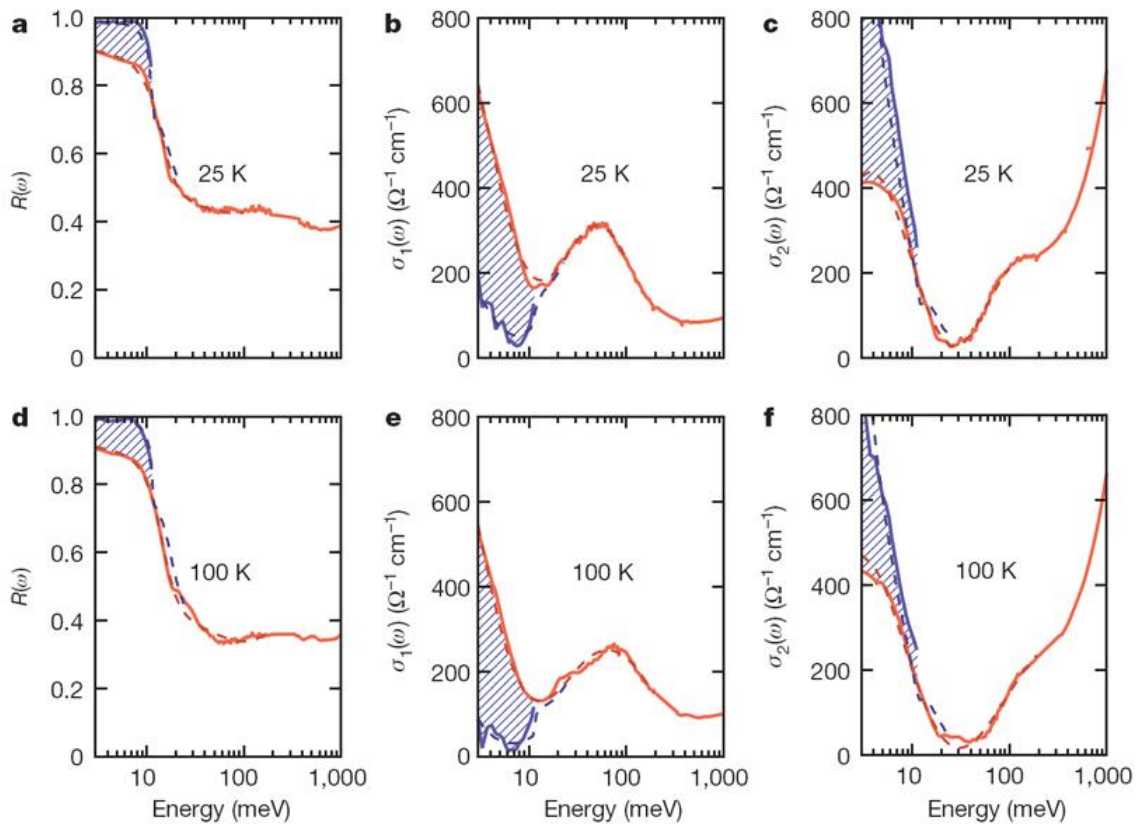


Рис. 2. Оптический отклик K_3C_{60} в равновесном состоянии (красные линии) и спустя 1 пс после фотовозбуждения (синие линии). Штриховкой отмечены изменения, индуцированные световым импульсом.

Интересно, что эффект сохраняется даже при нагреве до 300 К. Не ясно, впрочем, действительно ли он имеет отношение к неравновесной сверхпроводимости.

Л.Опенев

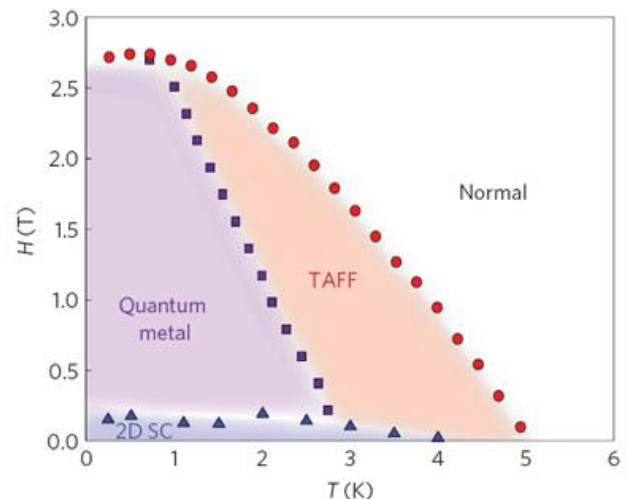
1. M.Mitrano et al., Nature 530, 461 (2016).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовый металл в двумерном сверхпроводнике

Долгое время считалось, что при низких температурах двумерные системы не могут быть металлическими из-за локализации электронов. Действительно, первые же эксперименты в свое время показали, что основное состояние ультратонких пленок является либо сверхпроводящим, либо диэлектрическим, а переход сверхпроводник \leftrightarrow диэлектрик происходит при изменении степени атомного беспорядка или магнитного поля. Позднее было замечено, что между диэлектрической и сверхпроводящей фазами вклинивается промежуточное металлическое состояние, происхождение которого осталось невыясненным. В работе [1] это состояние обнаружено в двухслойных пленках $NbSe_2$, полученных (как в свое время графен) механическим отщеплением от объемного сверхпроводника $NbSe_2$ с $T_c \approx 7$ К и имеющих $T_c = 5.76$ К. Оно наблюдается в перпендикулярном магнитном поле с

$0.2 \text{ Тл} < H < 2.7 \text{ Тл}$ при $T < 3$ К (см. рис.) и характеризуется степенной зависимостью сопротивления от магнитного поля, что согласуется с моделью так называемого бозе-металла.



Фазовая диаграмма двухслойной пленки $NbSe_2$. Красные кружки – верхнее критическое магнитное поле. Лиловые квадраты отделяют фазу квантового металла от режима термоактивированного течения потока (ТАФФ). Синие треугольники – граница сверхпроводящей фазы.

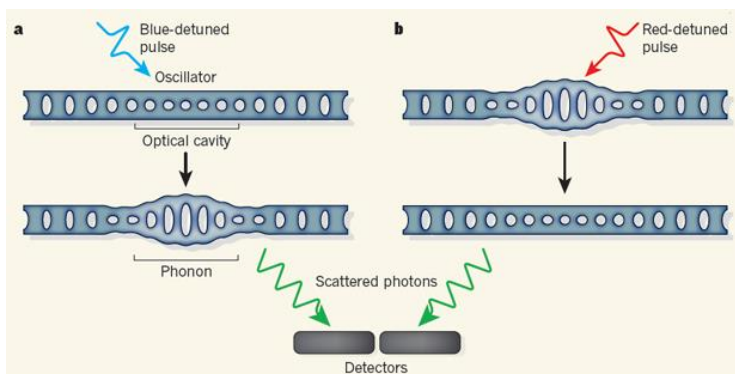
Откуда берутся бозоны? По всей видимости, они представляют собой ни что иное, как некоррелированные по фазе куперовские пары.

Л.Опенев

1. A.W.Tsen et al., Nature Phys. 12, 208 (2016).

Неклассические корреляции фотонов и фононов

В современной квантовой информатике взаимодействие фотонов с другими квантовыми системами используется для приготовления квантовых состояний (например, спиновых), управления ими и их передаче на большие расстояния. В работе [1] (Австрия, Нидерланды, США) обнаружены неклассические корреляции между одиночными фотонами (квантами электромагнитных колебаний) и фононами (квантами механических колебаний), которые эти фотоны возбуждают в кремниевом нанобруске (см. рис.).



Фотон-фононный интерфейс. Первый нерезонансный лазерный импульс возбуждает в наносоцилляторе один фонон (а), который затем поглощается вторым импульсом (б). После рассеяния оба фотона имеют резонансную частоту и регистрируются детектором.

Если в резонаторе нет фотонов, то и фононы в нанобруске отсутствуют (эксперимент проводили при субкельвинных температурах), а если детектором зарегистрирован один фотон, то в нанобруске есть ровно один фонон (“фотон-фононное спаривание”). Следующим шагом может стать создание суперпозиционных и запутанных состояний фононов, находящихся в удаленных друг от друга наносоцилляторах.

По материалам заметки
 “Photons paired with phonons”,
 M.Blencowe, *Nature* 530, 284 (2016)

1. R.Riedinger et al., *Nature* 530, 313 (2016).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Двуликие частицы в роли микромашин

Ученые из Института робототехники и интеллектуальных систем в Цюрихе предложили использовать кремниевые частицы, покрытые с одной из сторон магнитоэлектрическим композитом, в качестве микророботов, перемещающихся под управлением магнитного поля и способных оказывать электростатическое воздействие на микроуровне [1]. Это может пригодиться при очистке воды, утилизации отходов, содержащих ценные металлы, адресной доставке лекарств, а также для электростимуляции отдельных клеток.

Стоит отметить, что такого рода частицы, в которых наблюдается явно выраженный пространственный градиент свойств, называют *частицами Януса*, по имени двуликого римского бога. Одним из первых массовых применений частиц Януса стала ранняя версия электронной бумаги *гирикон*, в которой черно-белое изображение возникало при вращении полиэтиленовых микросфер, одна сторона которых была окрашена черным тоном, а другая оставалась белой.

В данном случае анизотропия формы частиц достигается за счет одностороннего нанесения слоев из магнитоэлектрического материала и пьезоэлектрика на пятимикронные шарики оксида кремния. Двухслойная структура действует как эффективный магнитоэлектрический материал: под действием сильного магнитного поля (~800 Э) магнитная компонента испытывает механические деформации, которые передаются пьезоэлектрическому слою, что порождает связанные электрические заряды на поверхности частицы. С использованием этого эффекта авторам [1] удалось продемонстрировать осаждение ионов благородных металлов: золота, серебра и платины.

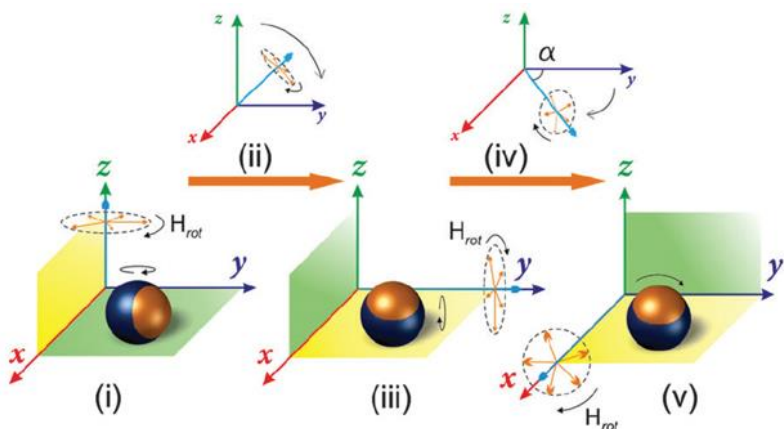


Рис. 1. Манипуляции магнитным полем, с помощью которых осуществляется управляемое перемещение частиц по поверхности: (i) вращение частицы на месте для достижения нужной ориентации, (ii) поворот оси вращения поля и разворот частицы для поступательного движения, (iii) перемещение вдоль горизонтальной оси OX, (iv) подготовка к движению вдоль оси OY, (v) качение микрочастицы направо.

Авторами также разработан остроумный способ контролируемого слабым магнитным полем (~100 Э) перемещения частиц (рис.1). Это выгодно отличает данную реализацию от обычной ситуации, в которой функции движения микророботов и дистанционного управления их свойствами имеют различные источники энергии.

А. Пятаков

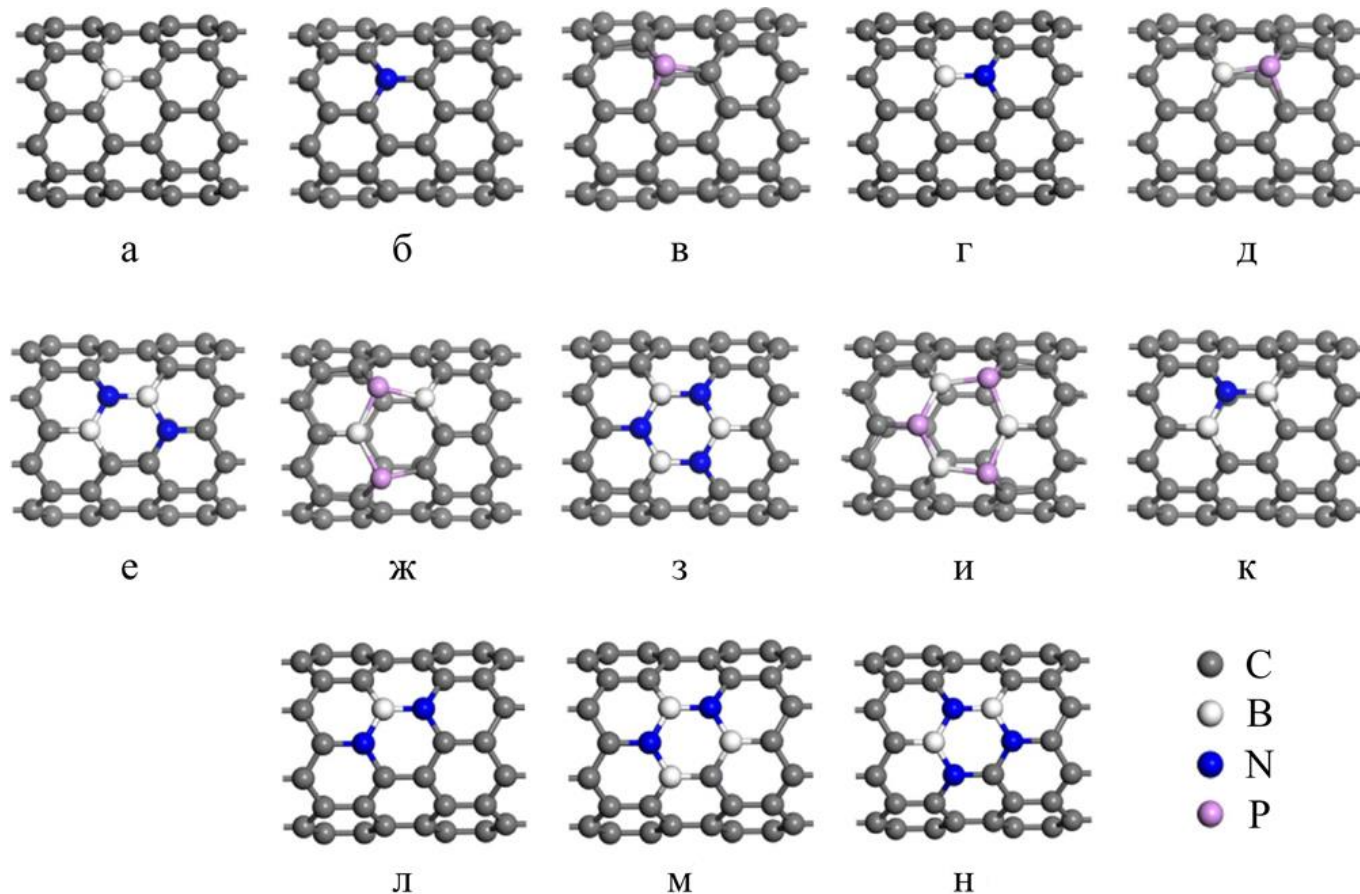
1. X.-Zh. Chen et al., *Mater. Horiz.*, 3, 113 (2016).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Влияние атомов замещения на электронные свойства углеродных нанотрубок

Известно, что допирование является одним из наиболее действенных способов изменения электронных свойств молекулярных систем. Выбирая допанты особым образом, можно варьировать ха-

рактеристики соответствующих наноструктур в широких пределах: от диэлектрических до металлических. Авторы работы [1] проанализировали влияние отдельных атомов бора, азота и фосфора, а также их пар В/Н, В/Р на устойчивость и электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок типа зигзаг (см. рис.).



а-в - Фрагменты углеродных нанотрубок, допированных атомами бора, азота и фосфора, соответственно.
г-и - Фрагменты углеродных нанотрубок, допированных парами В/Н и В/Р в различной концентрации.
к-н - Возможные расположения различных атомных комплексов с преимущественным содержанием бора или азота на поверхности углеродной нанотрубки.

Исследователи выбрали нанотрубку (8,0), состоящую из 64 атомов, и с помощью теории функционала плотности (программа DMol³) рассчитали весь спектр электронных характеристик, включая зонную структуру, как чистого, так и замещенных образцов. В результате было показано, что постепенное увеличение концентрации допантов приводит к уменьшению, а впоследствии и к полному исчезновению энергетической щели. Таким образом, изначально полупроводниковая нанотрубка начинает проявлять металлические свойства. При этом авторы отмечают, что термодинамическая устойчивость допированных нанотрубок заметно выше, чем незамещенных образцов. Еще одной интересной особенностью является схожесть электронного строения нанотрубок, допированных отдельными атомами бора или азота, с аналогами, допированными атомными комплексами с преимущественным содержанием того или другого элемента. В конеч-

ном итоге полученные авторами результаты в очередной раз подтверждают, что допирование является эффективным инструментом настройки электронных свойств наноструктур с привлекательными перспективами применения, например в нанoeлектронных устройствах.

М. Маслов

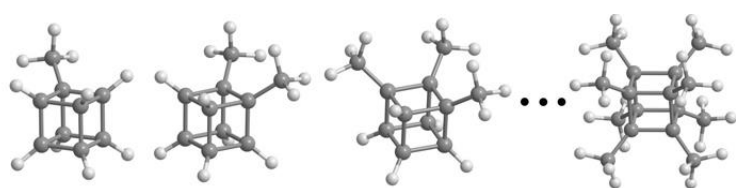
1. J. Ye et al., *Chem. Phys. Lett.* **646**, 95 (2016).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Влияние метильных групп на устойчивость углеродного кубического остова

Кубан С₈Н₈ относят к классу углеводородных систем с напряженным каркасом. Остов молекулы представляет собой куб, в вершинах которого расположены атомы углерода, так что угол между ковалентными связями равен 90°, в отличие от традиционной для sp³-гибридизованных углеродных ор-

биталей величины – 109.5°. При этом углеродный остов стабилизируется атомами водорода, поэтому кубан является очень устойчивым соединением. Для современных нанотехнологий интерес также представляют его производные, в которых один или несколько атомов водорода замещены различными функциональными группами. Эти химические группы способны повлиять на стабильность системы. Например, недавние исследования продемонстрировали, что нитрогруппы дестабилизируют углеродный каркас из-за их эффективного отталкивания, поэтому синтез полинитрокубанов, содержащих соседние NO₂-радиалы значительно затруднен. В продолжение этой темы авторы работы [1] постарались прояснить вопрос влияния метильных групп на устойчивость углеродного кубического остова. В своих расчетах они использовали теорию функционала плотности с функционалом B3LYP и базисом 6-311G, реализованную в программном комплексе GAMESS, и специально разработанную неортогональную модель сильной связи. Изначально исследователи определили геометрические и энергетические характеристики изолированных молекул семейства полиметилкубанов с различным расположением метильных групп (всего их 21). Оказалось, что их термодинамическая устойчивость падает с увеличением числа радикалов: от метилкубана до октаметилкубана (см. рис.).



Ослабление термодинамической устойчивости

Усиление кинетической устойчивости

Иллюстрация ослабления термодинамической устойчивости и усиления кинетической устойчивости углеродного кубического остова при увеличении числа метильных групп в полиметилкубане.

А вот кинетическая устойчивость, наоборот, усиливается. Об этом свидетельствуют данные, полученные для высот энергетических барьеров, препятствующих распаду. Так, единственная метильная группа способна значительно ослабить устойчивость углеродной клетки (по сравнению с незамещенным кубаном C₈H₈), но последующее увеличение CH₃-групп делает ее кинетически более стабильной. Таким образом, октаметилкубан – наиболее устойчивый представитель семейства. С помощью прямого молекулярно-динамического моделирования авторы получили параметры температурной зависимости его времени жизни до распада: энергию активации и частотный фактор. Эти параметры позволяют оценить время жизни октаметилкубана при комнатной температуре величиной ~10⁹ с, что вполне достаточно не только для его

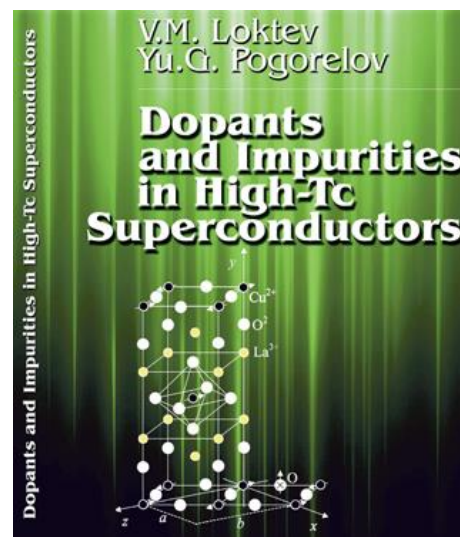
экспериментального наблюдения, но и для лабораторного синтеза без использования экстремальных температурных режимов. Это в значительной степени верно и для остальных представителей семейства полиметилкубанов, поскольку энергетические барьеры, препятствующие их распаду, также достаточно высоки. По мнению исследователей, полученные данные окажутся полезными для поиска эффективных масштабируемых технологий синтеза полиметилкубанов и кристаллов на их основе. Сами авторы, основываясь на данных по распаду этих молекул, предлагают использовать сверхвысокие давления, выбрав в качестве прекурсоров кристаллы полиметилциклооктатетраена.

М. Маслов

1. K.P. Katin et al., *Physica E* 81, 1 (2016).

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ, ОБЗОРЫ, ПУБЛИКАЦИИ

Вышла в свет монография В.М. Локтева и Ю.Г. Погорелова “Dopants and Impurities in High-Tc Superconductors” (на английском языке). Она посвящена различным аспектам теории влияния примесей разной природы на высокотемпературные сверхпроводники, включая купраты и ферропниктиды. Особое



внимание уделено различию между *допантами* и *примесями* (другого рода дефектами, в том числе магнитными и немагнитными). Последние являются центрами рассеяния носителей, но их концентрация никак не связана с числом носителей, тогда как допанты не только рассеивают носители, но и являются поставщиками последних, так что равенство их концентраций заведомо делает системы ВТСП *плохими металлами*. Рассмотрение основано на технике двухвременных функций Грина и групповых разложениях. Подробно обсуждается конкуренция эффектов металлизации - за счет увеличения концентрации носителей при допировании исходно диэлектрических систем неизоэлектронными примесями - и локализации этих носителей из-за их нахождения в поле примесных центров. Теоретические результаты сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными. Книга рассчитана на научных сотрудников (теоретиков и экспериментаторов), аспирантов и студентов старших курсов.

Электронную версию книги можно свободно скачать по ссылке <http://www.bitp.kiev.ua/lectures.html>

ПерГ, 2016, том 23, выпуск 5

КОНКУРЕНТЫ

Ставка на твердооксидный топливный элемент

Проблемы с постоянным и бесперебойным энергообеспечением знакомы многим. В качестве одного из перспективных подходов, направленных на их решение, может рассматриваться генерация электроэнергии с помощью электрохимических устройств, в основе функционирования которых лежит принцип работы топливного элемента. Группа учёных из Института физики твёрдого тела РАН под руководством С. Бредихина сделала ставку на разработку электрохимических генераторов энергии на основе так называемых твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ).

“Батарея” ТОТЭ представляет собой устройство, состоящее из единичных топливных ячеек, соединённых, как правило, последовательно. Каждая топливная ячейка имеет три основных компонента: анод, твердый электролит и катод. Для ее функционирования требуется, чтобы со стороны анода подавалось топливо, а со стороны катода – воздух. На катоде происходит электрохимическое восстановление кислорода воздуха. Образующиеся таким образом ионы кислорода через газоплотную твердоэлектролитную мембрану, разделяющую катодное и анодное пространства, переносятся к аноду и электрохимически окисляют топливо. В результате электрохимических реакций, протекающих на аноде и катоде, во внешней цепи возникает электрический ток.

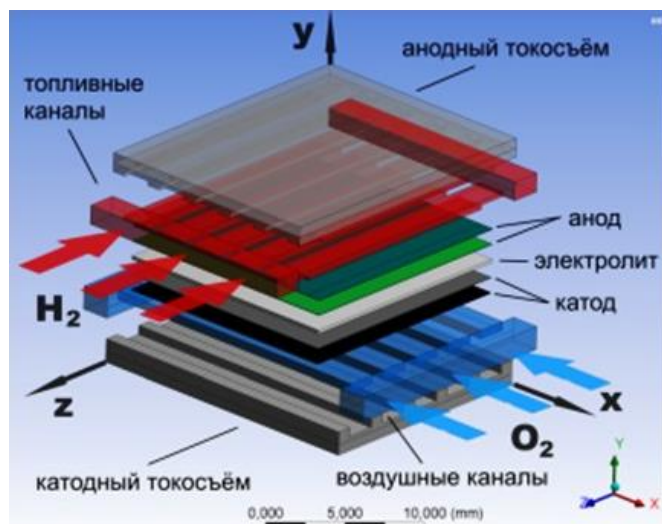


Схема устройства единичной топливной ячейки в составе батареи ТОТЭ

Примечательно, что для ТОТЭ подходят самые разные виды топлива от чистого водорода до угарного газа и различных углеводородных соединений. Такие энергоустановки имеют КПД более 50%, и это только по выходу электроэнергии, а с учётом возможности утилизации тепла КПД может достигать 85-90%. Следует отметить, что при использовании

водорода в качестве топлива отсутствуют вредные выбросы в атмосферу.

Одной из особенностей работы ТОТЭ является необходимость поддержания высокой температуры. Для нагрева устройства до рабочей температуры (850°C) требуется примерно 10 часов, после чего он будет работать несколько лет.

Разрабатываемые в ИФТТ РАН электрогенераторы на основе ТОТЭ будут способны генерировать электроэнергию мощностью до 2 кВт. На данный момент изготовлены и протестированы макетные образцы батарей ТОТЭ мощностью 50 Вт.

Между тем зарубежные компании уже внедряют электрогенераторы на основе ТОТЭ. Лидером в этом направлении является американская Bloom Energy, которая производит энергоустановки мощностью 100 кВт для вычислительных центров таких компаний, как Google, Bank of America и Walmart.

http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d_no=116726#.VtajZfmLTcs

КОНФЕРЕНЦИИ

33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2016), July 31 - August 5, 2016, Beijing, China

ICPS is the premier meeting for reporting all aspects of semiconductor physics including electronic, structural, optical, magnetic and transport properties. ICPS 2016 will feature plenary sessions, parallel topical sessions, poster sessions and a Nobel Laureates in Nobel Symposium.

SCIENTIFIC PROGRAM

- Material growth, structural properties and characterization, phonons
- Wide-bandgap semiconductors
- Narrow-bandgap semiconductors
- Carbon: Nanotubes and Graphene
- 2D Materials beyond Graphene
- Organic Semiconductors
- Topological states of matter, topological Insulators and Weyl semimetals
- Transport in heterostructures
- Quantum Hall effects
- Spintronics and spin phenomena
- Electron devices and applications
- Optical properties, optoelectronics, solar cells
- Quantum optics, nanophotonics
- Quantum information
- Other topics in semiconductor physics and devices
- Special topic: Majorana fermions in solid state

IMPORTANT DATES

Abstract Submission Deadline - **March 28, 2016**

Abstract Status Sent to Authors - **Late April 2016**

Web: www.icps2016.org

International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA-2016), July 19-22, 2016, Surabaya, Indonesia

The programme includes the following topics, namely:

- **Materials:** i. Ferro-Piezoelectrics, Semiconductors, High-Temperature Superconductors, Energy Harvesting Materials, Environmental Materials, Medical Materials, Composite, Ceramics, Thin Films, Nanomaterials, etc.
- **Synthesis & Processing:** ii. Powder Processing, Processing Technologies, Piezoelectric Technologies, MEMS-Processing, etc.
- **Characterization and Research Methods:** Microstructure Properties, Physical Properties, Mechanical Properties, Strength Properties, Finite-Element Modeling, Mathematical Modeling, Physical Modeling, Physical Experiment, etc.
- **Underwater Technologies:** Underwater Communication, Marine Engineering, Power System, Ocean Energy, etc.
- **Applications:** MEMS, Hetero-structures, Piezotransducers, Piezoactuators, Piezogenerators, Light-Emitting Diodes, Multimedia Communication, Fiber Reinforced Composites, etc.

IMPORTANT DATES

Deadline for Abstracts: **April 1, 2016**

Web: <http://phenma2016.math.sfedu.ru>

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

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: М. Маслов, Л. Опенов, А. Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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