

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

“Необычная” сверхпроводимость в $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$

Новый класс безмедных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), содержащих слои FeAs [1], привлекает к себе внимание как из-за достаточно высокой критической температуры $T_c \approx 50$ К, так и из-за сходства с купратными ВТСП. В обеих системах сверхпроводимость приходит на смену антиферромагнетизму, когда концентрация носителей заряда увеличивается до определенного уровня. Общим для всех купратных ВТСП является наличие при $T < T_c$ резонансных магнитных возбуждений, локализованных в узком диапазоне энергий и импульсов [2]. Теория предсказывает [3], что такой магнитный резонанс (наблюдавшийся, кстати, и в некоторых сверхпроводниках с тяжелыми фермионами) должен иметь место, когда параметр сверхпроводящего параметра Δ меняет свой знак на поверхности Ферми (такая симметрия Δ может быть следствием, например, короткодействующего потенциала отталкивания электронов). Исследования безмедных ВТСП методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением [4] не обнаружили в них сильной анизотропии сверхпроводящей щели $|\Delta|$. Однако эта методика не чувствительна к знаку Δ , поэтому вопрос о симметрии Δ оставался открытым.

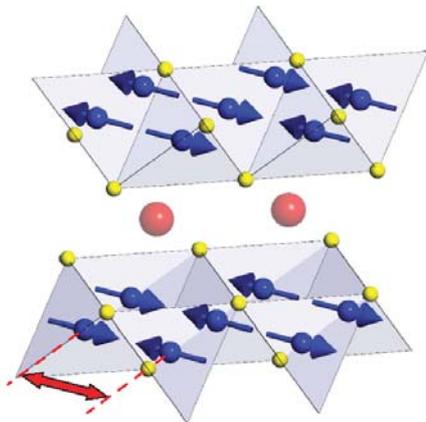


Рис. 1 Кристаллическая структура $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$ (синие кружки – атомы Fe, желтые кружки – атомы As, красные кружки – атомы Ba и K). Синие стрелки – спины атомов Fe в недопированном родительском соединении $BaFe_2As_2$.

В работе [5] ученые из США и Великобритании сообщили о результатах, полученных ими при исследовании неупругого рассеяния нейтронов на поликристаллических образцах слоистого (рис. 1) безмедного ВТСП $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$ с $T_c = 38$ К. При энергии около 14 мэВ и волновом векторе $\approx 1.15 \text{ \AA}^{-1}$ они обнаружили в сверхпроводящем состоянии узкий пик интенсивности рассеяния (магнитный резонанс), который отсутствовал в нормальном состоянии (рис. 2). Из этого авторы [5], ссылаясь на теорию [3] и проводя аналогию с купратными ВТСП, делают вывод о различии знака Δ на разных участках поверхности Ферми. Но симметрия Δ при этом, по их мнению, является не d -волновой, как в купратных ВТСП а расширенной (extended) s -волновой: величина Δ изотропна как на дырочных, так и на электронных “карманах”, но имеет на тех и других разный знак. Это предположение позволяет согласованно объяснить данные фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением и спектроскопии неупругого рассеяния нейтронов.

И далее ...

- 2 Сверхпроводимость границы раздела $LaAlO_3/SrTiO_3$

Сверхпроводимость на службе у общей теории относительности

- 3 Безмедные ВТСП (взгляд с Урала)

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Гигантская электрооптика

- 4 Обойдемся без резонатора

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Расширение магнитных нанокристаллов при охлаждении

Нановзгляд на рост кристаллов

- 6 Нанотрубки в медицинских целях надо использовать осторожно

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 7 Energy harvesting: энергия, собранная по крохам

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 8 Новый материал на основе графена

Синтез крупных графенов в больших количествах

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 10 Все флаги в гости будут...к ним? Сингапурский R&D узел открыт для инновационных компаний со всего мира.

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

- 10 Шлите статьи!

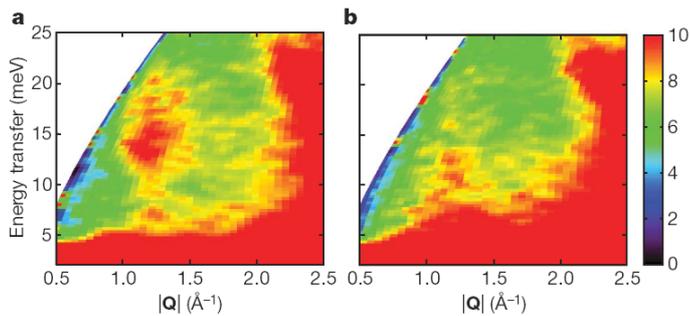


Рис. 2. Интенсивность неупругого рассеяния нейтронов на $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ (цветная шкала) как функция переданных при рассеянии энергии и импульса для $T = 7$ К (a) и $T = 50$ К (b).

Л. Опенов

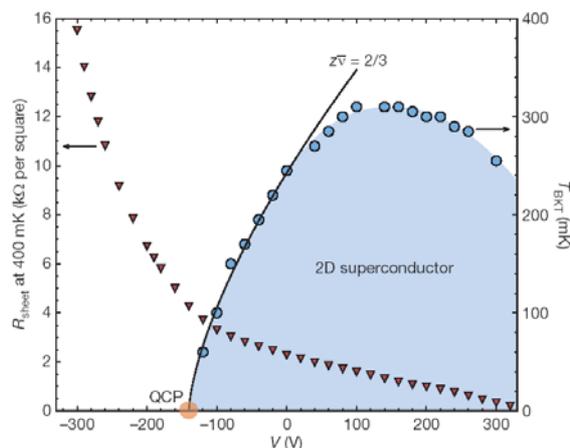
1. Y. Kamihara et al., *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
2. H. He et al., *Science* **295**, 1045 (2002).
3. J. Chang et al., *Phys. Rev. B* **76**, 024503 (2007).
4. H. Ding et al., *Europhys. Lett.* **83**, 47001 (2008).
5. A. D. Christianson et al., *Nature* **456**, 930 (2008).

Сверхпроводимость границы раздела $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$

Перераспределение электрического заряда вблизи границы раздела двух типичных диэлектриков LaAlO_3 и SrTiO_3 приводит к формированию на этой границе проводящего двумерного электронного газа [1]. При понижении температуры наблюдается его переход либо в магнитное [2], либо в сверхпроводящее [3] основное состояние. Для исследования фазовой диаграммы атомарно четкой границы раздела $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ швейцарские (университеты Женевы и Цюриха), французские (университет Парижа) и немецкие (университет Аугсбурга) физики изменяли концентрацию электронов на этой поверхности, помещая образец в постоянное электрическое поле, а проще говоря – прикладывая к нему напряжение V [4]. При этом, в зависимости от знака V , концентрация носителей n увеличивалась или уменьшалась по отношению к своей исходной величине ($n = 4.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при $T = 100$ К), определенной по эффекту Холла. Преимущество такого “электрического допирования” заключается в отсутствии на поверхности раздела хаотически расположенных примесей и дефектов, всегда появляющихся при “химическом допировании” из-за локального изменения элементного состава и осложняющих интерпретацию экспериментальных данных.

Полученные в [4] результаты проиллюстрированы на рисунке. Обращает на себя внимание наличие на фазовой диаграмме квантовой критической точки, разделяющей области диэлектрического и двумерного сверхпроводящего состояния при $T = 0$. Никаких признаков магнетизма границы раздела в [4] обнаружено не было. Помимо фундаментального интереса, возможность локального электростатиче-

ского контроля сверхпроводимости открывает путь к созданию новых сверхпроводниковых наноструктур (включающих, например, сетку сформированных электрическим полем джозефсоновских контактов).



Фазовая диаграмма границы раздела $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ (V – электрическое напряжение, определяющее концентрацию свободных носителей). Синие точки – температура сверхпроводящего перехода (в двумерной системе – температура перехода Березинского-Костерлица-Таулеса) T_{BKT} (правая шкала). Сплошная линия – скейлинговая зависимость $T_{\text{BKT}} \sim (V - V_c)^{z\nu}$, где $z\nu = 2/3$. QCP – квантовая критическая точка (quantum critical point) при $V = V_c$. Красные точки – сопротивление слоя при $T = 0.4$ К (левая шкала).

Л. Опенов

1. A. Ohtomo, H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004).
2. A. Brinkman et al., *Nature Mater.* **6**, 493 (2007).
3. N. Reyren et al., *Science* **317**, 1196 (2007).
4. A. D. Caviglia et al., *Nature* **456**, 624 (2008).

Сверхпроводимость на службе у общей теории относительности

Число экспериментов, для объяснения которых необходимо привлекать общую теорию относительности (ОТО) Эйнштейна, можно пересчитать по пальцам. В качестве примера обычно приводят результаты измерения прецессии орбиты Меркурия. А можно ли провести исследования в лабораторных условиях, не прибегая к услугам астрономов? В принципе – да, только эта лаборатория должна находиться в космосе. Теория предсказывает, что тело, вращающееся по околоземной орбите, должно прецессировать с угловой скоростью $6.6''/\text{год}$ в плоскости орбиты и $0.042''/\text{год}$ перпендикулярно этой плоскости. Однако регистрация такого мизерного эффекта долгое время считалась невозможной.

Американские ученые предложили провести эксперимент в жидком гелии, используя в качестве ротора сверхпроводник. Направление его оси вращения может быть определено с очень высокой точностью по направлению сопутствующего вращению сверхпроводника магнитного момента (лондонского мо-

мента). Для этого было предложено использовать опять же сверхпроводящее устройство – СКВИД. Расчеты показали, что точности должно хватить для регистрации прецессии оси вращения. Проект получил название “Gravitation Probe B” (GPB). Спутник со всем необходимым оборудованием (см. рис.) был выведен на орбиту в 2008 г. Сейчас ученые занимаются обработкой полученных данных. Собственно говоря, в справедливости ОТО мало кто сомневается. Но обращает на себя внимание сам факт использования одного фундаментального явления (сверхпроводимости) для исследования другого – еще более фундаментального (гравитации). Да и кто знает, к чему приведет расшифровка результатов. Все-таки сверхпроводник – это вам не Меркурий...



Спутник, запущенный в рамках проекта GPB. Все экспериментальное оборудование заключено в большой контейнер с жидким гелием.

Л. Опенов

1. P.Mason, Cold Facts 24, № 4, 30 (2008).

Безмедные ВТСП (взгляд с Урала)

Сразу три обзора высокотемпературной сверхпроводимости в безмедных FeAs-соединениях одновременно опубликованы в декабрьском номере УФН за 2008 год [1-3]. Примечательно, что авторы всех этих обзоров – из Екатеринбурга (Институт электрофизики УрО РАН, Институт химии твердого тела УрО РАН, Институт физики металлов УрО РАН). Как отметил В.Л.Гинзбург в преамбуле “От редколлегии”, авторы излагают несколько различные точки зрения на физику новых сверхпроводников. Оно и понятно, ведь исследования этого класса материалов сейчас в самом разгаре, и для однозначных выводов часто просто не хватает экспериментальных данных.

Помимо обязательного для подобного рода обзоров набора соответствующим образом систематизированных “объективных” данных (методы синтеза, основные физические свойства, кристаллическая и электронная структура, коллективные возбуждения и пр.), их критического анализа и обширного списка литературы, особый интерес всегда представляет “субъективное” мнение авторов на те или иные вопросы, пока остающиеся открытыми. Отправляя читателя за деталями к первоисточникам [1-3], за-

метим, что в [1] высказано предположение о вероятном различии микроскопических механизмов спаривания в купратных (“почти однозначно электронный механизм”) и безмедных (“роль электрон-фононного взаимодействия, по-видимому, может оказаться вполне существенной”) ВТСП, а в [3] – о спин-флуктуационном механизме спаривания в обеих системах.

И, наверное, стоит сказать, что сравнительная “простота” FeAs-сверхпроводников может оказаться обманчивой. Ведь в первое время после открытия ВТСП и речи не было о псевдощели, страйпах и т.п. Безмедные ВТСП тоже могут преподнести нам свои сюрпризы. Как справедливо отмечено в [2], исследования нового класса сверхпроводящих материалов только начинаются. Необходимы дальнейшие эксперименты в сочетании с их тщательным теоретическим анализом. И еще: может, не стоит так уж заикливаться на оксипниктидах, а покопаться в других строчках и столбцах Таблицы Менделеева? Ведь, пожалуй, главное, за что мы должны благодарить безмедные ВТСП (а точнее – их первооткрывателей) – это “ликвидация монополии купратов в физике высокотемпературной сверхпроводимости” [1] и осознание того факта, что “явление ВТСП гораздо шире распространено, чем было принято считать последние 20 лет” [1].

1. М.В.Садовский, УФН 178, 1243 (2008).

2. А.Л.Ивановский, УФН 178, 1273 (2008).

3. Ю.А.Изюмов, Э.З.Курмаев, УФН 178, 1307 (2008).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Гигантская электрооптика

Фотоны являются идеальными летящими кубитами для квантового компьютера, однако они плохо взаимодействуют друг с другом. В вакууме они вообще не взаимодействуют, в веществе обычно очень слабо. Есть возможность значительно усилить взаимодействие фотонов, приведя их частоту в резонанс с оптическими переходами в среде. Однако это усиление неизбежно связано и с большим поглощением фотонов.

Выход из этой ситуации дает эффект индуцированной электромагнитным полем прозрачности (EIT) [1]. В недавней работе ученых Англии и Германии был продемонстрирован этот эффект [2]. От предыдущих экспериментов данная работа отличается использованием ридберговских состояний атомов рубидия. Схема эксперимента представлена на рис. 1 (внизу). Частота сигнального пучка соответствует переходу в атоме рубидия из основного состояния $5s$ в возбужденное – $5p$. Мощность этого пучка мала. В то же время, мощность пучка накачки (coupling) велика, а частота соответствует переходу из состояния $5p$ в ридберговское состояние ns ($n=28$). Ридберговскими состояниями называют верхние возбужденные состояния атома с большим номером $n \approx 20-50$. По причине пространственной протяжен-

ности энергия ридберговских состояний очень чувствительна к постоянному электрическому полю (рис. 1, верх). Это предоставляет возможность управлять эффектом ЕИТ, поскольку выбором приложенного электрического поля можно добиться резонанса или выйти из него. В этом и состоит “гигантская электрооптика”, родственная эффекту Керра, который заключается в изменении диэлектрической проницаемости среды под действием электрического поля. В данном случае эффект такого воздействия оказывается на 6 порядков величины сильнее, чем рекордные значения эффекта Керра, наблюдаемые в нитробензоле.

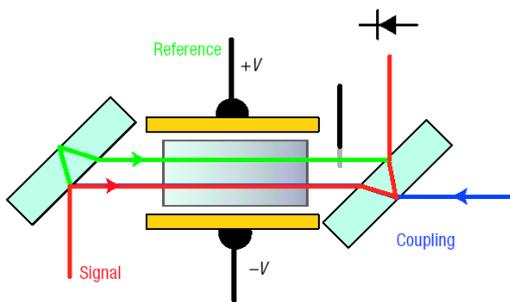
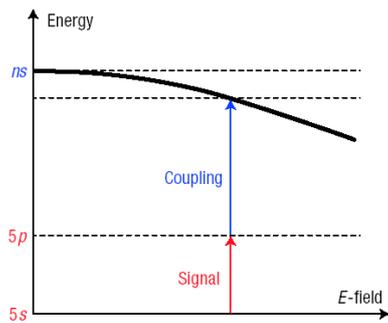


Рис. 1. Схема оптических переходов (верх): сигнальный пучок (signal) возбуждает электрон из состояния 5s в 5p, пучок накачки (coupling) возбуждает электрон из состояния 5p в ридберговское состояние ns ($n=28$). Схема установки (низ): сигнальный пучок разделяется на собственно сигнальный и опорный (reference), пучок накачки распространяется навстречу сигнальному, на выходе сигнальный и опорный пучки собираются вместе.

Эффект ЕИТ реализуется в той области, где сигнальный пучок находится вместе с пучком накачки (на рис. 1 нижняя часть сигнального пучка). Суть эффекта ЕИТ состоит в том, что мощный опорный пучок вызывает когерентные переходы из возбужденного состояния 5p в верхнее возбужденное состояние (в данном случае оно является ридберговским состоянием). Иными словами, осуществляется режим осцилляций Раби, когда электрон ходит между двумя состояниями, то испуская, то поглощая фотон. Когерентность возбужденного состояния 5p вызывает когерентный режим переходов 5s \rightarrow 5p, хотя мощность сигнального пучка мала и сама по себе недостаточна для обеспечения этого режима (рис. 2). Когерентность означает отсутствие поглощения. Таким образом, пучок накачки создает для сигнального пучка особую среду, которая для него имеет высокую реальную часть диэлектрической

проницаемости. Такая высокая диэлектрическая проницаемость возникает из-за резонанса, в то же время, поглощение отсутствует. Высокая диэлектрическая проницаемость означает большой показатель преломления, приводящий к замедлению сигнального пучка по отношению к его опорной части (верхняя часть сигнального пучка на рис. 1). Фазовая задержка вызывает интерференцию на выходе системы, где обе части сигнального пучка собираются вместе, что и регистрируется в эксперименте.

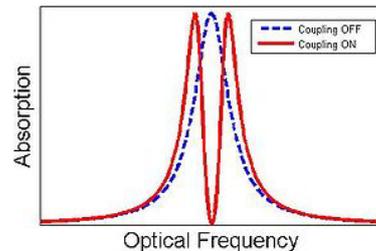


Рис. 2. Поглощение сигнального пучка в отсутствие (штриховая линия) и в присутствии пучка накачки (сплошная линия).

Отметим, что на ридберговские состояния атомов уже давно обращают внимание специалисты по квантовым компьютерам. Поскольку волновая функция в этих состояниях широко расплывается, это обеспечивает возможность эффективного взаимодействия соседних атомов, которые могут являться кубитами квантового компьютера.

В.Вьюрков

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetically_induced_transparency
2. A.K.Mohapatra et al., *Nature Phys.* 4, 890 (2008).

Обойдемся без резонатора

Для передачи квантовой информации с помощью фотонов необходимо их достаточно сильное взаимодействие с атомами. Вероятность поглощения фотона отдельным атомом может быть очень близка к единице, если атом помещен в микрорезонатор с высокой добротностью. Однако изготовить такой резонатор, да еще привести его в точный резонанс, представляет сложную технологическую проблему. А можно ли вообще обойтись без резонатора? Этим вопросом задались ученые из National University of Singapore [1]. Для проведения эксперимента было необходимо осветить всего один атом в ловушке и измерить поглощение. Современные методы позволили это сделать. Эксперимент дал положительный ответ на поставленный выше вопрос. Действительно, атомы эффективно поглощали фотоны. Объяснение состоит в том, что сам по себе атом в ловушке имеет высокую добротность, что и обеспечивает достаточно сильное поглощение фотонов.

Проведенный эксперимент может дать новый импульс к созданию квантовых компьютеров на атомах в ловушках, поскольку кажется возможным отказаться от резонаторов. Кроме того, новые пер-

спективы открываются и в оптических квантовых компьютерах. Хотя фотоны очень слабо взаимодействуют друг с другом, они могут хорошо взаимодействовать через посредство атомов.

В. Вьюрков

1. M.K. Teyi et al., Nature Phys. 4, 924 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Расширение магнитных нанокристаллов при охлаждении

Подавляющее большинство твердых тел при охлаждении сжимается, поскольку амплитуда тепловых колебаний атомов уменьшается, и атомы начинают слабее отталкиваться друг от друга. Из этого правила есть, однако, исключения. Например, в ZrW_2O_8 ослабление колебаний атомов кислорода при понижении температуры приводит к тому, что связи Zr-O-W “выпрямляются” (рис. 1a), и объем образца увеличивается (так как в этом случае нагрев приводит к уменьшению межатомных расстояний, то говорят об отрицательном коэффициенте термического расширения).

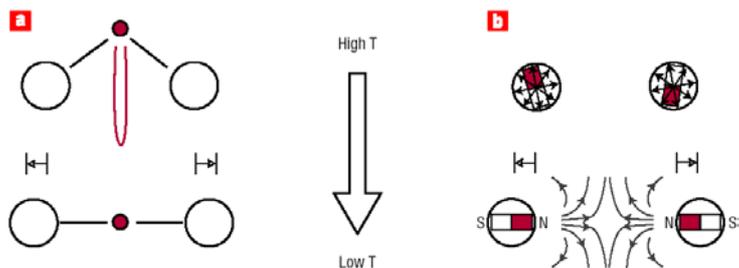


Рис.1. Механизмы отрицательного термического расширения: *a* - при понижении температуры уменьшение амплитуды колебаний атомов кислорода (маленькие красные кружки) в ZrW_2O_8 приводит к увеличению расстояния между атомами Zr и W (большие кружки), каждый из которых связан с кислородом; *b* - причиной расширения некоторых магнитных материалов при охлаждении является упорядочение магнитных моментов.

О принципиально другом механизме отрицательного термического расширения, эффект от которого на четыре порядка больше, чем в ZrW_2O_8 , сообщили авторы работы [1]. Они исследовали соединения CuO , NiO и MnF_2 , в каждом из которых у атомов металлов есть магнитный момент. При высокой температуре ориентации этих моментов быстро и хаотически изменяются, в результате чего магнитная составляющая энергии взаимодействия двух соседних атомов соответствует то их притяжению, то отталкиванию. При охлаждении флуктуации ослабевают, и магнитные моменты становятся в той или иной степени упорядоченными. Два соседних момента могут быть направлены как в одну сторону, так и в противоположные. Соответственно, магнитные атомы либо сближаются, либо удаляются друг от друга. В одних материалах (NiO) отталкивание и притяжение взаимно компенсируются, а в *ПерсТ*, 2009, том 16, выпуск 1/2

других (CuO , MnF_2) отталкивание преобладает, и решетка распухает (рис. 1b).

Самое интересное, что в [1] обнаружено многократное усиление этого эффекта при измельчении образца до наноразмеров. Наиболее сильно он выражен в CuO при размере нанокристаллитов около 5 нм. Физические причины этого явления пока не вполне ясны. Но уже сейчас его можно использовать для изготовления наноструктурированных композитов с заданным коэффициентом термического расширения, в том числе с нулевым. А это очень важно для обеспечения устойчивой работы многих приборов в широком диапазоне температур.

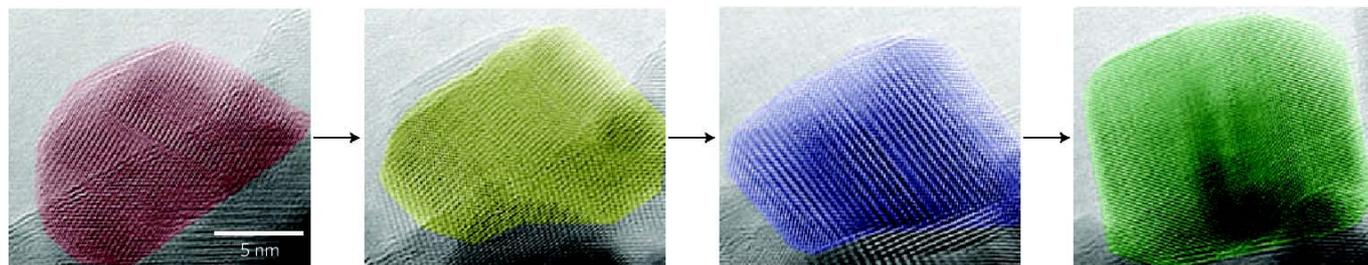
1. S.G.Zheng et al., Nature Nanotech. 3, 724 (2008).

Нановзгляд на рост кристаллов

Кристаллы обычно зарождаются в расплаве и затем растут, приобретая в итоге совершенные формы. Детальный механизм процесса роста кристаллов пока окончательно не понят. Свыше 100 лет назад Вильгельм Оствальд сформулировал так называемое “правило стадий” (“rule of stages”) [1]. Основываясь на результатах визуального наблюдения за кристаллизацией переохлажденных расплавов и пересыщенных растворов, он постулировал, что кристалл формируется путем цепочки последовательных переходов из одного метастабильного состояния в другое, пока не достигнет термодинамического равновесия. Сначала группа атомов спонтанно образует маленький упорядоченный кластер, который начинает расти за счет присоединения к нему других атомов, но при этом остается термодинамически неустойчивым и поэтому в любой момент может вновь “раствориться”. Однако как только размеры этого кластера достигают определенной критической величины (при которой понижение энергии за счет упорядочения атомов внутри кластера больше, чем рост энергии из-за формирования у кластера “поверхности”), его диссоциации уже не происходит.

Пока радиус кристаллита меньше критического, новые атомы могут присоединиться к нему только в том случае, если им удастся преодолеть определенный энергетический барьер. Оствальд предположил, что существуют некоторые “промежуточные” состояния кластера, для которых этот барьер сравнительно низок и поэтому может быть легко преодолен за счет термических возбуждений, так что кластер успевает “дорости” до термодинамически устойчивого размера. С экспериментальной точки зрения, исследования начального этапа образования кристалла осложняются высокой скоростью роста зародыша до критической величины и большим количеством таких зародышей, одновременно присутствующих в расплаве. Эти трудности были преодолены корейскими учеными [2], изучавшими не рост кристаллов в расплаве, а рекристаллизацию аморфной фазы. Подбирая температуру системы в интер-

вале между температурами рекристаллизации и плавления, они смогли тем самым регулировать характерное время формирования кристаллитов и сделать его доступным для экспериментального наблюдения (несколько минут). Кроме того, в работе [2] была использована локальная электронная микроскопия, что позволило проследить за “жизнью”



Последовательность изменения состояния нанокристалла LiFePO_4 при $T = 450^\circ\text{C}$ в процессе его роста по данным электронной микроскопии высокого разрешения [2]. Промежуток времени между первым и последним кадром составляет 4 минуты.

1. W.Z.Ostwald, Z. Phys. Chem. 22, 289 (1897).
2. S.-Y.Chung et al., Nature Phys. 5, 68 (2009).

Нанотрубки в медицинских целях надо использовать осторожно

Продолжаются исследования, направленные на решение важнейших вопросов – являются ли токсичными для человека (и если да, то насколько) углеродные нанотрубки. Результаты, представленные в статье итальянских ученых [1], показывают, как важно правильно применять эти уникальные материалы.

В работе были изучены биологическое воздействие многостенных углеродных нанотрубок (МСНТ) *in vitro* на три типа клеток человека и *in vivo* на лабораторных животных, а также иммунологические эффекты. Использовались коммерческие МСНТ (Aldrich 659258) (рис.1). По данным производителей, материал по меньшей мере на 90 % состоял из многостенных нанотрубок, содержал остаточный аморфный углерод и менее 0,1% примесей металлов. Диаметр нанотрубок 110-170 нм, длина 5-9 мкм.

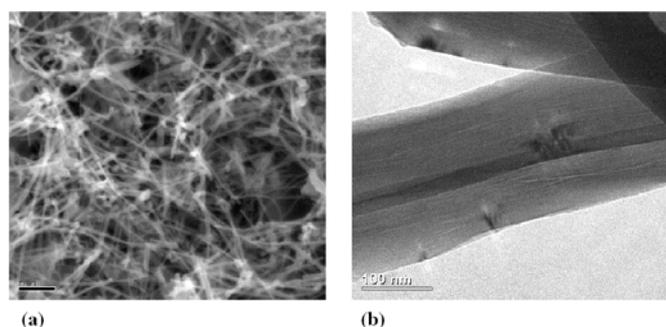


Рис.1 SEM (a) и TEM (b) изображения исследованных нанотрубок.

Авторы не модифицировали МСНТ, но стерилизовали их перед экспериментами *in vivo* и *in vitro*. В качестве лабораторных животных использовали мышей и крыс. Суспензии с концентрацией МСНТ 10, 20 и 40 мг/кг тела вводили внутривентриально (мыши были разделены на группы по 4-5 мышей в

отдельных кристаллитов (см. рис.). В целом правило Оствальда подтвердилось: имели место последовательные переходы кластера-нанокристаллита от менее устойчивых кристаллических форм к более устойчивым. Детали микроскопического механизма таких переходов еще предстоит выяснить.

каждой). Поведение, внешний вид, физиологические функции животных изучали в течение 7 дней в соответствии с тестом Ирвина, который используется в фармакологии при оценке эффектов новых лекарственных средств. После этого мышей умерщвляли и проводили гистологические исследования. Для изучения эффектов от многократного воздействия группе из 4 мышей вводили дозу 5 мг/кг каждый день в течение 7 дней.

Тест Ирвина не выявил никаких существенных нейровегетативных или поведенческих эффектов, кроме незначительного кратковременного снижения активности непосредственно после воздействия (после введения и однократной дозы 20 мг/кг, и 40 мг/кг в течение 7 дней была зарегистрирована смерть только одного животного в каждой из соответствующих групп).

Гистологические исследования, проведенные на 24 животных, не показали никакой патологии в плевральной и перикардиальной полости. Для большой дозы в 40 мг/кг наблюдался адгезивный перитонит (в этом случае были ясно видны агрегаты нанотрубок). Для дозы в 20 мг/кг перитонит был менее выражен, агрегаты МСНТ не обнаружены.

При введении 5 мг/кг каждый день в течение 7 дней отклонений в поведении мышей и смертности зарегистрировано не было. При вскрытии обнаружались отложения МСНТ в брюшине.

Иммунологические исследования не выявили различий между подопытными и контрольными животными. Таким образом, в этом отношении введенные дозы МСНТ оказались безвредными.

Изучение эффектов от имплантации МСНТ было проведено на 2 крысах. В спине каждой был сделан глубокий надрез (с применением анестезии), и в мышцы было внедрено 20 мг МСНТ одной крысе и 5 мг другой. Первая крыса погибла через 180 мин, вторая на 7 день была в нормальном состоянии. На-

блюдалась только вполне ожидаемая гранулематозная реакция на инородное тело.

Интересно, что воздействие МСНТ на три различных типа клеток человека оказалось разным. В одном случае наблюдалось снижение числа клеток, что свидетельствовало о цитотоксичности нанотрубок, в другом эффект наблюдался лишь при большой дозе, в третьем никакого эффекта не было вообще.

Таким образом, в экспериментах *in vivo* однократные дозы в 5 и 10 мг/кг веса тела оказались безопасными, чего нельзя сказать о больших дозах. Повторное воздействие в дозе 5 мг/кг также практически безвредно. Очевидно, что имплантированная доза в 20 мг МСНТ чрезмерно большая, тогда как доза в 5 мг не привела к патологическим реакциям. (По-видимому, нанотрубки не сдвинулись с места имплантации). Исследования *in vitro* в целом показали, что отклик на воздействие МСНТ (снижение пролиферации, или роста клеток) может зависеть от клеточной линии и типа ткани. Необходимо изучить другие эффекты МСНТ также для разных типов клеток.

Авторы отмечают, что они не касались вопроса канцерогенности нанотрубок, то есть их возможности преобразовать нормальные клетки в клетки опухоли. Для этого необходимы специальные исследования. В целом результаты работы [1] показывают, что дозы МСНТ в 5 и 10 мг/кг веса тела не являются токсичными, однако авторы призывают к осторожному использованию нанотрубок в медицинских целях.

О.Алексеева

I. M. Chiaretti, *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 474203 (2008).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Energy harvesting: энергия, собранная по крохам

Не нужно проводить специального исследования, а достаточно взглянуть на обложку текущего журнала Nature или даже просто на заголовки новостных агентств, чтобы понять какой основной вопрос сейчас стоит на повестке дня. Энергетика, желательно экологически чистая, возобновляемая, “даровая”, никак не связанная с углеродом – вот та желанная цель, на достижение которой направлены усилия многих ученых. По понятным причинам особенно остро вопрос “зеленой энергетики” стоит перед западноевропейскими учеными и их коллегами по другую сторону Атлантики [1].

Когда говорят об альтернативных источниках энергии, обычно выделяют три ресурса: световая энергия (от Солнца), тепловая энергия (например, земных недр), а также энергия всякого рода движения (ветер, течения, приливы и т.п.). Если же говорить об источниках питания для автономных датчиков и имплантантов в медицине, для средств связи и мобильной электроники, то, на поверку, остается

лишь третий ресурс (движение), поскольку работа фотоэлементов зависит от наличия светового потока, а термоэлементы требуют больших перепадов температур между частями устройства, что трудно осуществить в миниатюрных приборах.

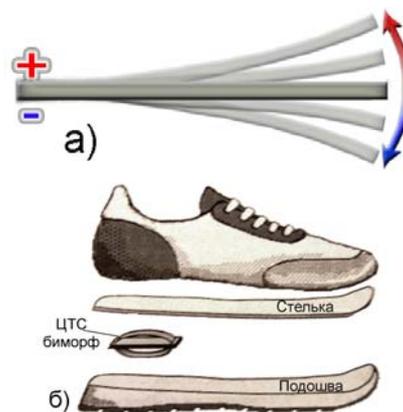


Рис. 1. а - Механические колебания кантилевера из пьезоэлектрического материала преобразуются в электрическую энергию; б - пьезоэлектрический элемент для сбора энергии при ходьбе [4].

Одна из наиболее популярных схем сбора энергии основана на использовании упругой консоли (кантилевера) из пьезоэлектрического материала, механические колебания которой преобразуются в колебания электрического напряжения (см. рис.1 а). Интересно, что, как показывают расчеты, резкое увеличение эффективности такого преобразования наблюдается на тонких пластинках толщиной десятки нанометров, что связано с выходом на сцену *флексосоэлектрического* эффекта: изгибная деформация пластины приводит к дополнительному вкладу в поляризацию, который может в разы превосходить вклад от обычного «объемного» пьезоэлектрического эффекта [2].

Любопытное развитие описанной выше схемы сбора энергии предложено в статье [3]: кантилевер изготовлен из композиционного материала — слоя пьезоэлектрика, жестко скрепленного магнитострикционным слоем. При колебаниях кантилевера в магнитном поле Земли магнитострикционный слой испытывает дополнительные деформации, которые передаются связанному с ним пьезоэлектрическому слою, в результате чего амплитуда переменного напряжения удваивается по сравнению со случаем чисто пьезоэлектрического кантилевера. Такое устройство авторы [3] предлагают использовать на подводных аппаратах и буях, где всегда есть океанские волны и магнитное поле Земли.

Здесь надо сделать еще одно замечание: частоты колебаний ω , встречающиеся в естественных условиях невелики – герцы, от силы, десятки герц, а это означает, с одной стороны, малую мощность, вырабатываемую агрегатом (мощность пропорциональна произведению амплитуды силы инерции ($F \sim \omega^2$) на амплитуду скорости ($V \sim \omega$), т.е. кубу частоты), с другой стороны – совсем немикроскопические размеры уст-

ройства, для которого такие частоты являются собственными [4]. Так, система, описанная в [3] представляла собой пластину длиной в 10 см, шириной 2 см и толщиной 3 мм с грузиком массой 1 г и вырабатывала микроватт в пересчете на кубический сантиметр (для сравнения, литий-ионная батарея с емкостью 1 кДж/см^3 может работать в таком режиме 30 лет). Лучших результатов ожидают от использования других видов колебательного движения: человеческого тела при ходьбе (расположенные в ботинке пьезоэлементы (рис.1 б) уже позволяют получать до 1 мВт/см^3) и еще более высокочастотных вибраций мотора автомобиля – до 30 мВт/см^3 . В любом случае, о том, что данные элементы могут заменить аккумуляторы в сотовых телефонах и карманных компьютерах, речи пока не идет. Сам сбор урожая даровой энергии (“energy harvesting”) напоминает скорее процесс, описанный в известной сказке: “по сусякам поскрести, по амбарам помести”, и это объясняет, почему в таких случаях часто используют другой термин: “energy scavenging” (scavenging в буквальном переводе с английского означает “уборка, утилизация мусора”).

А. Пятаков

1. *Rex Dalton, Nature 457, 241 (2009).*
2. *M.S.Majdoub et al., Phys. Rev. B 78, 121407(R) (2008)*
3. *Shuxiang Dong et al., Appl. Phys. Lett. 93, 103511 (2008).*
4. *P.D.Mitcheson et al., Proc. IEEE 96, 1457(2008).*

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Новый материал на основе графена

Научное сообщество, вовлеченное в деятельность по получению, исследованиям и применениям новых нанокремнистых материалов, переживает бум, связанный с открытием графенов. Эти наноструктуры, представляющие собой элементы графитовой плоскости поперечником до нескольких микрон, отличаются уникальными физико-химическими свойствами, такими как гибкость, высокая электро- и теплопроводность, большое количество свободных связей, придающих им способность присоединять различные радикалы и т.п. Эти особенности открывают возможность использования графенов как в качестве элементов нанoeлектронных устройств, так и в качестве одного из компонентов нанокompозитных материалов с улучшенными механическими свойствами. Возможность использования графенов в различных приложениях исследуется во многих лабораториях мира. Так, недавно в одной из лабораторий японского Исследовательского центра нанотехнологий синтезирован и исследован новый нанокompозитный материал, содержащий, наряду с графенами, также продольно упорядоченные углеродные нанотрубки (УНТ). Эта структура была синтезирована методом химического осаждения паров (CVD) с использованием двухслойного катализатора, представляющего собой

пленку Со толщиной от 2,1 до 3,6 нм, нанесенную на пленку из нитрида титана толщиной 5 нм. В качестве подложки использовали пленку оксида кремния толщиной 300 нм, нанесенную на кремниевую пластину. Нанокompозит синтезировали в течение 10 мин при температуре 510°C в потоке смеси аргон/ацетилен (9:1) при полном давлении 1000 Па. В результате синтеза на подложке формировалась структура толщиной около 5 мкм. Как показывают наблюдения, выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа, эта структура содержит вертикально ориентированные УНТ, связанные между собой несколькими графеновыми слоями (рис. 1).

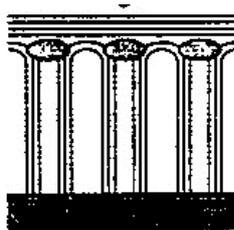


Рис. 1. Схематическое представление структуры композита, содержащего УНТ, связанные между собой сверху несколькими графеновыми слоями.

Необходимо подчеркнуть, что описываемая

здесь композитная структура может быть получена лишь при строго определенных параметрах роста, которые устанавливаются в результате тщательной оптимизации. Следует отметить высокую степень гладкости верхней поверхности полученного материала (характерный размер шероховатости не превышает 4 нм на площади 500 нм^2). Благодаря этому поверхность имеет характерный блеск. Исследования, выполненные с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показывают, что толщина поверхности, составленной из графеновых слоев, пропорциональна толщине пленки Со катализатора и меняется в пределах от 5 до 30 нм. Расстояние между графеновыми слоями составляет, согласно измерениям, около 0,38 нм, так что число слоев в графеновой пленке меняется от 5 до 105, в зависимости от толщины пленки катализатора. Характерный диаметр многослойных нанотрубок, входящих в состав синтезированного композитного материала, составляет около 12 нм. Наблюдения показывают, что полученные образцы содержат, помимо УНТ и графеновых слоев, также частицы Со катализатора, которые находятся, в основном, на границе УНТ с графеновыми слоями. Отсюда следует, что рост УНТ происходит в направлении от графенового слоя к подложке.

А.Елецкий

1. *D.Kondo, T.Sato, Y.Awano, Appl. Phys. Express 1, 074003 (2008).*

Синтез крупных графенов в больших количествах

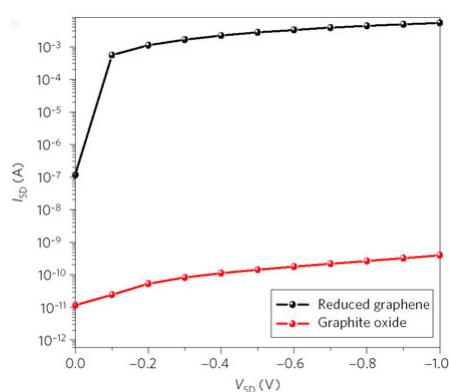
Графены привлекают интерес многих исследователей благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, открывающим широкие прикладные возможности. В настоящее время разви-

тие исследований, направленных на установление особенностей поведения графенов и реализацию таких возможностей, затруднены в связи с техническими трудностями их выделения. В связи с этим многие исследовательские группы направляют усилия на разработку методов получения графенов в макроскопических количествах, а также на развитие подходов к изучению их характеристик. В настоящее время используют несколько подходов к получению однослойных графенов. Один из этих методов основан на использовании липкой ленты, с помощью которой производят отшелушивание графенов от кристаллического графита с последующим отбором однослойных фрагментов под микроскопом. Другой подход, заключающийся в химическом восстановлении карбида кремния при температуре около 1100°C, приводит к формированию графенов весьма малого размера (не более 0,2 мкм²). Оба указанных подхода отличаются чрезвычайно низкой производительностью, так что проблема получения графенов микронных размеров в макроскопических количествах остается нерешенной.

Более перспективным представляется подход, основанный на использовании окисленных графенов (ОГ). В результате окисления и последующего расслоения графита водной дисперсии образуется эмульсия, содержащая окисленные индивидуальные графены. Восстановление этих объектов производится либо в результате проведения химической реакции, либо посредством термообработки. К недостаткам такого подхода следует отнести нарушение плоской структуры полученных графеновых слоев, которые, как следует из микронаблюдений, оказываются скрученными и сморщенными. Кроме того, процедуру восстановления графенов, как правило, не удается провести до конца, поэтому в результате образуются слои графенов, содержащие гидроксильные и эпоксидные группы. Это препятствует использованию графенов в качестве элементов нанoeлектронных устройств. Интересный путь преодоления указанных недостатков данного метода получения графенов был, похоже, нащупан недавно группой исследователей из Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США). Этот метод состоит в использовании коллоидного раствора ОГ в гидразине (N₂H₄), который легко наносится на подложки различной природы, образуя однородную пленку графенов, содержащих один или несколько слоев. Подобный подход к получению графенов основан на установленной ранее возможности химического восстановления ОГ до графена в присутствии гидразина. Процесс восстановления продолжается несколько часов и сопровождается выделением пузырьков газов (NO₂ и N₂). В результате восстановления образуются графеновые слои с присоединенными анионами N₂H₄⁺. Последующая обработка полученной суспензии с помощью ультразвука и центрифугирования приводит к получению больших графеновых монослоев размером порядка 20x20 мкм². Повторная

ультразвуковая обработка позволяет при необходимости снизить поперечный размер слоев до 1 мкм. Отдельные графены наносили на подложку SiO₂ и исследовали с помощью оптического, сканирующего электронного (SEM) и атомного силового (AFM) микроскопов. Сравнение изображений, полученных с использованием различных методов, повышает надежность результатов выполненных наблюдений. Использование AFM позволяет определить не только площадь графенового листа, но также его высоту над плоскостью подложки. Измерения показали, что типичная высота графена над плоскостью подложки составляет 0,6 нм.

Полученные графеновые слои использовали в качестве рабочего элемента полевого транзистора. С этой целью графен большой площади наносили с помощью стандартной фотолитографии на подложку SiO₂, где на его концы напыляли золотые контакты.



Расстояние между контактами составляло 7 мкм. Рабочая характеристика транзистора представлена на рисунке, где она сравнивается с соответствующей зависимостью для транзистора, изготовленного на основе исходного ОГ. Как видно, восстановление графена снижает его электрическое сопротивление примерно на 8 порядков.

А.Елецкий

1. V.C.Tung et al., *Nature Nanotech.* 4, 25 (2009).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Все флаги в гости будут...к ним?

Сингапурский R&D узел открыт для

инновационных компаний со всего мира



17 октября 2008 г. премьер-министр Сингапура Lee Hsien Loong торжественно открыл Fusionopolis* – Международный центр исследований и разработок. Завершен первый этап строительства, рассчитанного на 7 этапов. Сингапурское правительство надеется использовать центр, расположенный на территории в 30 га, для привлечения международного бизнеса, вовлеченного в сферу высоких технологий. Арендаторов ожидают прекрасные здания, предназначенные для проведения исследований в самых разных областях – инженерные науки, химия, экология, информационные технологии и другие области знаний.

Две башни (24 и 22 этажа), строительство которых завершилось, имеют общую полезную площадь 120 000 кв. м.

13 арендаторов (из Японии, Франции, США и самого Сингапура) уже вселились в новые здания, среди них - Nitto Denko Corp.; Panasonic Corp.; Vestas Wind Systems A/S, (датский производитель ветряных турбин); Electronic Arts Inc. (разработчик видео игр из США); Thales Group (французский поставщик электронных приборов и устройств для оборонных целей); институты, занимающиеся исследованиями материалов и ультрамалых электронных приборов (как теперь осторожно называют и нано-электронные приборы) и находящиеся под эгидой Сингапурского Агентства по науке, технологии и исследованиям (Agency for Science, Technology and Research - A*STAR). В новых высотках приступают к работе более 800 ученых и инженеров.

В исследовательском комплексе Fusionopolis'a под одной крышей будут собраны различные исследовательские организации, высокотехнологические компании, правительственные агентства, торговые агентства и различные сервисные службы.

“Собрав со всего мира под одной крышей компании, занимающиеся самыми передовыми технологиями, Сингапур надеется усилить взаимодействие между исследователями, работающими в самых разных областях науки, и, таким образом, создать исследовательский центр, имеющий сильное глобальное влияние”, - заявил Lim Chuan Poh, председатель A*STAR.

На втором этапе строительства, завершение которого планируется в 2011-2012 г.г., будут созданы строения общей площадью 100 000 кв.м. с большими чистыми комнатами, специализированными лабораториями и с развитой инфраструктурой для проведения полупроводниковых и нанотехнологических исследований.

* Fusionopolis [Фьюженополис] - Город синтеза (объединения) наук – котел, в котором будут вариться разные народы, высокие идеи, инновационный бизнес и торговля

1. <http://www.semiconductor.net/articleXml/LN892622063.html>

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

Шлите статьи!

Издающийся с 2008 г. журнал "Advances in Condensed Matter Physics"(АСМР) планирует в конце 2009 г. опубликовать специальный выпуск "Phonons and Electron Correlations in High-Temperature and Other Novel Superconductors" и призывает научную общественность присылать обзорные и оригинальные статьи по следующим тематикам:

- фононные спектры купратов и родственных соединений;
- экспериментальная информация об электрон-фононном взаимодействии (ЭФВ);
- расчеты ЭФВ из первых принципов;
- обобщения теории БКШ-Элиашберга на случай сильной связи (включая поляроны и биполароны);
- конкуренция и взаимосвязь электрон-электронного взаимодействия и ЭФВ;
- фазовое расслоение в системах с сильнокоррелированными электронами;
- ЭФВ в фуллеренах, MgB₂, рутенатах, ферропниктидах и в других новых некупратных сверхпроводниках;
- пути повышения T_c .

Редакторы выпуска:

Sasha Alexandrov, Loughborough University, UK; a.s.alexandrov@lboro.ac.uk

Carlo Di Castro, Universita di Roma "La Sapienza", Italy; carlo.dicastro@roma1.infn.it

Igor Mazin, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA; mazin@nrl.navy.mil

Dragan Mihailovic, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia; dragan.mihailovic@ijs.si

Рукописи подаются в электронной форме через Интернет-сайт журнала, срок до 1.06.2009. Подробности на сайте <http://www.hindawi.com/journals/acmp/osi.html>

Заметим напоследок, что все читатели имеют свободный доступ к статьям в АСМР, но зато авторы оригинальных статей должны платить за публикацию. Авторы же обзоров освобождаются от платы. Так что пишите обзоры, дорогие друзья!

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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