

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Новые данные о псевдощели, сверхпроводящей щели и нанонеоднородностях в ВТСП

В последние годы споры о том, имеет ли псевдощель отношение к механизму высокотемпературной сверхпроводимости, свелись к дискуссии о количестве энергетических щелей в ВТСП. Из одних экспериментов следует, что как выше, так и ниже критической температуры T_c в спектре квазичастичных возбуждений имеется только одна щель, то есть псевдощель при $T > T_c$ является "предвестником" сверхпроводящей щели при $T < T_c$. Согласно соответствующим теоретическим моделям, при $T = T_c$ возникает фазовая когерентность между куперовскими парами, сформированными при $T = T^* > T_c$. Другие эксперименты свидетельствуют о наличии при $T < T_c$ двух щелей, одна из которых сверхпроводящая, а вторая – нет. Если это действительно так, то сверхпроводимость в ВТСП либо конкурирует, либо сосуществует с какой-то несверхпроводящей фазой. В пользу "двухщелевой картины" говорят, в частности, различные размеры щели, определяемые при $T < T_c$ разными методами (СТМ, фотоэмиссия, андреевское отражение, рамановская спектроскопия и др.). Еще один вопрос, по которому единого мнения пока нет, касается экспериментально наблюдаемой неоднородности щели на масштабе порядка нанометра. Широкое распространение получила точка зрения, что такая неоднородность является неотъемлемым атрибутом (может быть, даже причиной) высокотемпературной сверхпроводимости. Но не все с этим согласны. В работах [1] и [2] две группы исследователей независимо друг от друга пришли к выводу, что щелей в ВТСП все-таки две. При этом пространственно неоднородной является несверхпроводящая щель, тогда как сверхпроводящая – однородна.

Авторы [1] исследовали недодопированные и передопированные монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) и однозначно показали, что существует щель, "открывающаяся" строго при $T = T_c$ (когда сопротивление становится равным нулю) и отсутствующая при $T > T_c$. Это и есть сверхпроводящая щель. Она имеет симметрию, близкую к d -волновой (то есть, максимальна в направлении связей Cu-O и обращается в нуль на диагоналях Cu-Cu между этими связями), а при $T < T_c$ ведет себя в соответствии с теорией БКШ (рис.1). Другая щель (псевдощель) при $T \approx T_c$ почти не зависит от температуры. Она тоже максимальна в направлениях Cu-O, но гораздо больше сверхпроводящей щели и поэтому "загораживает" ее. По мере приближения к диагонали Cu-Cu псевдощель уменьшается, но остается больше сверхпроводящей щели на значительной части контура Ферми. Это и является причиной того, почему в предыдущих исследованиях ARPES сверхпроводящая щель либо оставалась "незамеченной", либо за нее ошибочно принимали псевдощель. В работе [1] впервые удалось найти такую область импульсного пространства вблизи диагонали Cu-Cu (рис.1), где сверхпрово-

И далее ...

- 2 Переход сверхпроводник-диэлектрик при разупорядочении

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Однофотонный транзистор для оптического компьютера
- 4 Дробный спин

Эффект Джозефсона в бозе-эйнштейновском конденсате

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Рябь на графене
- Размер не имеет значения!

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Нанотрубки из листьев эвкалипта
- 7 Стручки могут поставлять лекарства

СПИНТРОНИКА

- 8 Пленки EuO на Si и GaN – материальная база спинтроники?

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 9 Беззубый тигр точит когти
- Живые – это не обязательно нано...

КОНФЕРЕНЦИИ

- 10 6th International Conference of the "Stripes and high T_c superconductivity" ("STRIPES 08"), 26 July – 1 August 2008, Erice, Sicily ITALY

дящая щель хоть и невелика, но все же больше псевдощели, и поэтому ARPES "видит" именно ее (если подойти к диагонали Cu-Cu еще ближе, то сверхпроводящая щель уменьшается настолько, что становится сравнимой с погрешностью ARPES).

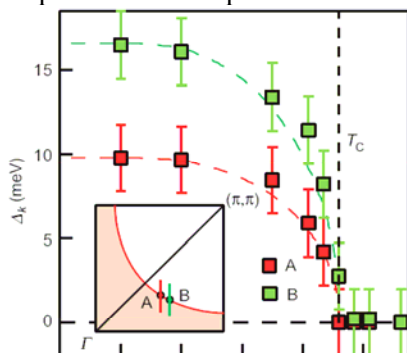


Рис. 1. Температурная зависимость сверхпроводящей щели Δ в различных участках контура Ферми ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$. Направление Γ -(π,π) в импульсном пространстве соответствует направлению Cu-Cu в координатном пространстве.

В работе [2] для измерения локальной величины энергетической щели в ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$ с $T_c = 15\text{ K}$ был использован сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Эксперимент проводили в сверхвысоком вакууме с очень высоким пространственным разрешением. Усовершенствование из-

мерительной методики позволило построить "карты" распределения щели в одной и той же области образца при различных температурах. Как и в предыдущих СТМ-исследованиях, была обнаружена сильная пространственная неоднородность щели, причем максимальные размеры щели достигали 40 мэВ. Но очень слабая температурная зависимость этой неоднородности и ее наличие как при $T < T_c$, так и при $T > T_c$ (рис. 2) навели авторов [2] на мысль вычесть "неоднородный фон" при $T = 16\text{ K} > T_c$ из данных при $T < T_c$. Результатом такого вычитания явилась маленькая и практически однородная щель (рис. 3). Она обращается в нуль при $T = T_c$, то есть именно эта щель и является сверхпроводящей.

Данные работ [1] и [2], взятые в своей совокупности, указывают на то, что при $T = T^* > T_c$ в ВТСП формируется большая пространственно неоднородная щель (псевдощель), не имеющая отношения к сверхпроводимости, а при $T = T_c$ возникает собственно сверхпроводящая щель – однородная и значительно меньшая по величине.

Л.Опенков

1. W.S.Lee et al., *Nature* **450**, 81 (2007).

2. M.C.Boyer et al., *Nature Phys.* **3**, 802 (2007).

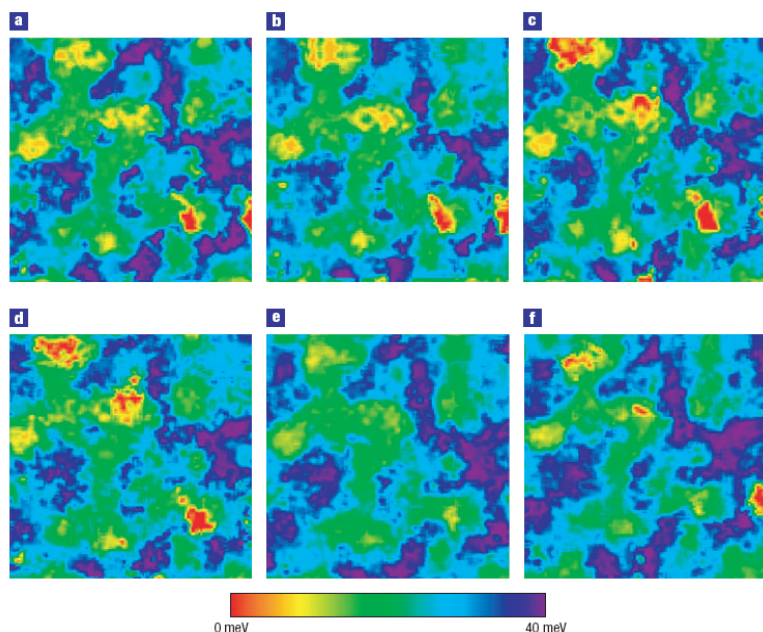


Рис. 2. Эволюция неоднородности энергетической щели в ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$ с $T_c = 15\text{ K}$ при увеличении температуры: $T = 5\text{ K}$ (a); 8 K (b); 11 K (c); 13 K (d); 15 K (e); 17 K (f). Размер области сканирования $17.5 \times 17.5\text{ nm}^2$.

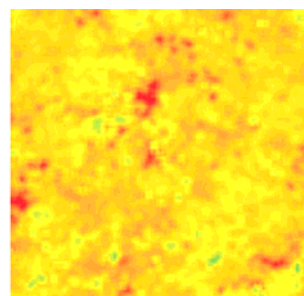


Рис. 3. Пространственное распределение "маленькой" (сверхпроводящей) щели $\Delta = (6.7 \pm 1.6)\text{ мэВ}$ при $T = 6\text{ K}$ для того же участка образца, что и на рис. 2, но после вычитания "неоднородного фона" при $T = 16\text{ K}$.

Переход сверхпроводник-диэлектрик при разупорядочении

Вопрос о влиянии атомного беспорядка на сверхпроводники давно привлекает к себе внимание исследователей. Разупорядочение приводит, как правило, к увеличению сопротивления R нормальных

металлов, тогда как в сверхпроводнике $R = 0$ при $T < T_c$. Хотя теоретически было показано [1], что в присутствии беспорядка (по крайней мере, "не очень сильного") сверхпроводимость сохраняется, эксперименты с тонкими пленками свидетельствуют о переходе сверхпроводник-диэлектрик при ра-

зупорядочении [2]. Природа этого перехода до сих пор является предметом дискуссий, особую остроту и актуальность которым придает осознание того факта, что в ВТСП нанометровые неоднородности играют важную (возможно, даже ключевую) роль в механизме спаривания носителей заряда [3]. Принято считать [4], что сильный беспорядок приводит как к сильным флуктуациям параметра сверхпроводящего порядка $\Delta(\mathbf{r})$, так и к уменьшению его средней (по образцу) величины, следствием чего, в конечном счете, и является разрушение сверхпроводимости.

В работе [5] израильские физики из Ben Gurion University представили результаты численного моделирования двумерного разупорядоченного s -волнового сверхпроводника в магнитном поле B . Была использована "negative- U " модель Хаббарда (т.е. модель со взаимным притяжением $-U$ двух электронов с противоположными направлениями спинов на одном узле решетки). Энергия t , соответствующая перескокам электронов между соседними узлами, принималась равной $-U/2$. Диагональный беспорядок вводился путем разброса узельных энергий в определенном диапазоне W . Тепловые (не квантовые!) флуктуации фазы $\Delta(\mathbf{r})$ учитывались за рамками приближения Боголюбова – де Жена. Было показано, что разупорядочение приводит к появлению "сверхпроводящих островков" с большой величиной $|\Delta(\mathbf{r})|$, окруженных со всех сторон областями с малыми $|\Delta(\mathbf{r})|$. Но если при слабом беспорядке ($W=0.1t$) и большой концентрации электронов ($n=0.92$ в расчете на один узел) обращение $|\Delta(\mathbf{r})|$ в нуль во всем "образце" и исчезновение фазовых корреляций на больших расстояниях происходит при одном и том же "критическом" значении B_c , то при сильном беспорядке ($W=t$) или маленькой концентрации электронов ($n=0.42$) корреляции между фазами $\Delta(\mathbf{r})$ в различных "островках" при увеличении B пропадают до того как $|\Delta(\mathbf{r})|$ в самих "островках" становится равен нулю. Таким образом, если в первом случае сверхпроводимость исчезает как в модели БКШ, то во втором (при переходе сверхпроводника в диэлектрическое состояние) сохраняются локальные области с $\Delta(\mathbf{r}) \neq 0$. Этот результат согласуется со многими экспериментами и позволяет, в частности, объяснить недавно обнаруженный резкий пик магнитосопротивления в разупорядоченных сверхпроводящих пленках. Не исключено, что он имеет отношение и к "псевдощелевым явлениям" в недодопированных ВТСП. Авторы [5] считают, что микроскопическая модель высокотемпературной сверхпроводимости обязательно должна учитывать фазовые флуктуации.

Л.Опенев

1. P.W.Anderson, J. Phys. Chem. Solids **11**, 26 (1959).
2. A.M.Goldman, N.Markovic, Phys. Today **51**, 39 (1998).
3. S.H.Pan et al., Nature **413**, 282 (2001).
4. M.Ma, P.A.Lee, Phys. Rev. B **32**, 5658 (1985).
5. Y.Dubi et al., Nature **449**, 876 (2007).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Однофотонный транзистор для оптического компьютера

Одноэлектронный транзистор хорошо известен. Теперь сотрудники Harvard University (США), в том числе и М.Лукин, придумали однофотонный транзистор. Стимулом служила давняя мечта создать оптический компьютер взамен электронного (см. работу [1] и комментарий к ней [2]). Главное препятствие на этом пути состоит в том, что фотоны очень плохо взаимодействуют друг с другом. Эта же проблема существует и в оптическом квантовом компьютере.

Работа предложенного транзистора основана на эффекте трансформации объемной электромагнитной волны в поверхностную – поверхностный плазмон или поляритон. Поверхностный плазмон является гибридом объемной электромагнитной волны вне металла и плазменной волны в узком приповерхностном скин-слое. Двойственная природа поверхностного плазмона обеспечивает его сильную связь с фотонами над поверхностью.

Схема однофотонного транзистора представлена на рис. 1. Однофотонный источник рядом с металлической нанопроволокой помещены в волновод. По волноводу бегут фотоны подобно тому, как бегут электроны в канале обычного транзистора. Оказывается, что один фотон от источника может перекрывать этот поток. Это уже очень похоже на одноэлектронный транзистор.

Важно правильно выбрать расстояние от однофотонного источника до металлической нанопроволоки. Если его расположить слишком близко, то преимущественно будет возбуждаться нераспространяющаяся плазменная мода (затухающая – evanescent mode). Если расположить слишком далеко, будет преимущественно излучаться объемный фотон – волноводная мода. Надо выбрать расстояние так, чтобы преимущественно возбуждался распространяющийся поверхностный плазмон.

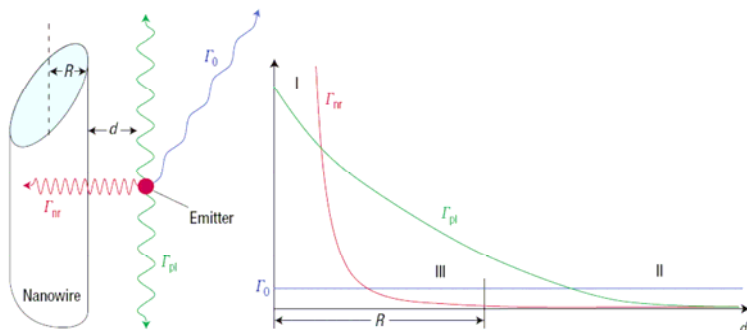


Рис. 1 Схема однофотонного транзистора. Однофотонный источник (emitter), помещенный в волновод вблизи металлической нанопроволоки. На графиках представлены вероятности трех возможных процессов в зависимости от расстояния до нанопроволоки: испускание объемного фотона (синяя кривая), возбуждение затухающего плазмона в металле (красная линия) и возбуждение распространяющегося плазмона (зеленая линия).

Однофотонный источник является, фактически, двухуровневой системой, излучающей фотон при переходе электрона с возбужденного уровня на нижний уровень. В качестве такого источника может служить атом или квантовая точка. Если соблюдены условия резонанса излучаемого фотона, поверхностного плазмона и волноводного фотона, то дальше вступает в действие эффект, хорошо известный в физике волноводов. Если на пути волны поместить резонатор, то эта волна будет полностью отражаться, как от зеркала. Кстати, для электронных волн этот эффект известен как эффект Фано. Если у однофотонного излучателя существует еще третье состояние, выбивающее его из резонанса, то фотоны будут свободно проходить по волноводу. Вот и получаются два состояния однофотонного транзистора: «ON» и «OFF».

Хотя авторы имели в виду оптический компьютер, реализующий классические алгоритмы, представленная работа имеет выход и в область квантового компьютера. Фотоны, превращенные в плазмоны, сильно взаимодействуют, поскольку плазмоны это колебания зарядовой плотности, между которыми действуют кулоновские силы.

В.Вьюрков

1. D.E.Chang et al., *Nature Physics* **3**, 807 (2007).

2. M.Orrit, *Nature Physics* **3**, 755 (2007).

Дробный спин

Теория многочастичных систем с сильным взаимодействием является очень сложной наукой, в которой пока не сложились единые подходы для рассмотрения подобных систем. Спасает гипотеза о том, что, по крайней мере, низкоэнергетические возбуждения в этих системах ведут себя, как слабо взаимодействующие квазичастицы. Эти частицы могут иметь дробный заряд. Они проявляются, например, в дробном квантовом эффекте Холла. Их даже удалось наблюдать более непосредственно, когда измеряли величину джонсоновского теплового шума, вызванного протеканием тока через сужение в двумерном газе, находящемся в условиях дробного квантового эффекта Холла. Как известно, величина найквистовский шума пропорциональна заряду частиц.

Теперь ученые из University of California, Santa Barbara (США) (см. работу [1] и комментариев к ней [2]) завели разговор о существовании дробного спина. Теоретически им удалось получить подобные возбуждения в двумерных антиферромагнетиках. В дальнейшем эта работа может открыть подход к построению теории высокотемпературных сверхпроводников, основанной на развитии идеи Андерсона о тесной связи спиновой жидкости с высокотемпературной сверхпроводимостью.

В.Вьюрков

1. M.Kohno et al., *Nature Physics* **3**, 790 (2007).

2. R.H.McKenzie, *Nature Physics* **3**, 756 (2007).

Эффект Джозефсона в бозе-эйнштейновском конденсате

Когерентное туннелирование куперовских пар из одного сверхпроводника в другой (через тонкий диэлектрический слой) приводит к эффекту Джозефсона: стационарному (когда постоянный ток течет через диэлектрик в отсутствие напряжения) и нестационарному (когда при постоянном напряжении ток через контакт осциллирует). Этот эффект не только интересен с фундаментальной точки зрения (поскольку представляет собой яркий пример макроскопического проявления квантовых законов), но и лежит в основе важных практических применений явления сверхпроводимости (стандарт напряжения, суперчувствительные датчики магнитного поля и др.).

В работе [1] сотрудники института Technion (Израиль) показали, что эффект Джозефсона имеет место и в атомной системе, если последняя, как и электроны в сверхпроводнике, описывается единой волновой функцией. Они охладили газ из $\sim 10^5$ атомов ^{87}Rb в магнитной ловушке ниже температуры перехода в сверхтекучее состояние и разделили его лазерным пучком на две части. Этот пучок выполнял ту же функцию, что и диэлектрическая прослойка в контакте сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник: он не позволял атомам свободно пролетать из одной части ловушки в другую, но при этом был достаточно тонким, чтобы атомы могли туннелировать через него с ненулевой вероятностью. Быстрое смещение пучка в сторону от центра ловушки приводит к тому, что концентрация атомов в разных частях ловушки становится различной, и поэтому энергии межатомного взаимодействия (а значит и химические потенциалы) в этих частях соответствующим образом изменяются. Различие химпотенциалов здесь играет ту же роль, что разница электрических потенциалов в электронике: атомы стремятся перейти в область с низким химпотенциалом. Но интерференция двух "волн материи" из разных частей ловушки приводит к периодическому изменению направления преимущественного туннелирования атомов (рис. 1a) – как и при нестационарном эффекте Джозефсона. Если же пучок смещать достаточно медленно, то концентрации атомов (и химпотенциалы) в обеих частях конденсата остаются одинаковыми, и через пучок-барьер течет "атомный сверхток" (рис. 1b) – как при стационарном эффекте Джозефсона.

Бозе-эйнштейновский конденсат – вещь достаточно сложная в изготовлении и очень деликатная в обращении. Поэтому вряд ли атомный эффект Джозефсона найдет такое же широкое применение, как электронный. И, тем не менее, авторы [1] все же не исключают перспективы его практического использования в чрезвычайно чувствительных датчиках вращения для систем навигации ракет и самолетов. Но гораздо больше пользы он может при-

нести фундаментальной науке. В первую очередь это связано с простотой контроля проницаемости "лазерного барьера" (достаточно изменить мощность лазера) и с возможностью регулировки силы межатомного взаимодействия. Вот только температура должна быть очень низкой. Но тут уж ничего не поделаешь...

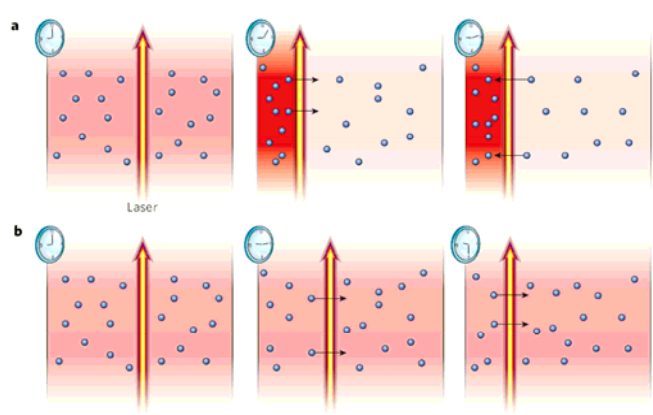


Рис. 1. Эффект Джозефсона в бозе-конденсате атомов ^{87}Rb : *a* - нестационарный: быстрое перемещение пучка барьера индуцирует периодическое "перетекание" атомов из одной части ловушки в другую и обратно; *b* - стационарный: при медленном перемещении пучка атомы туннелируют только в одном направлении, так что атомные концентрации в обеих частях ловушки остаются одинаковыми (при этом скорость перемещения пучка должна быть меньше критической величины $v_c \approx 40$ мкм/с — по аналогии с критическим током в сверхпроводниковом джозефсоновском контакте).

Л.Опенев

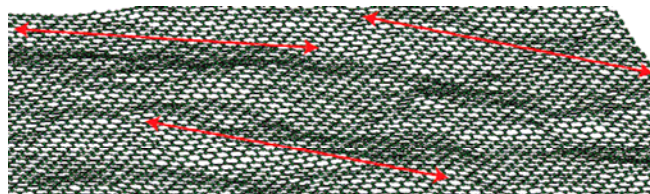
1. S.Levy et al., *Nature* **449**, 579 (2007).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Рябь на графене

Устойчивость двумерных (2D) слоев и мембран давно является предметом теоретических дискуссий. Согласно так называемой теореме Мермина-Вагнера [1], длинноволновые флуктуации разрушают дальний порядок в 2D кристаллах, а из теории упругости следует, что 2D мембраны в трехмерном пространстве при $T > 0$ не могут оставаться плоскими [2]. Разработка методов отщепления отдельных слоев от некоторых слоистых веществ (BN, MoS₂, графит) позволяет проверить предсказания теории. Так, например, экспериментально обнаружено, что один графитовый слой (графен) хоть и существует в свободном виде (без подложки), но является местами изогнутым [3]. Для выяснения причин такого изгиба теоретики из Radboud University, Nijmegen (Нидерланды) выполнили численные расчеты равновесной структуры графена методом Монте-Карло с эффективным многочастичным потенциалом межатомного взаимодействия [4]. Они моделировали графен квазидвумерными слоями из $N \leq 19940$ атомов углерода (примерно квадратной формы) с периодическими гра-

ничными условиями. Было показано, что при $T = 300\text{K}$ на графене спонтанно образуются "бугорки" (см. рис.) с характерными линейными размерами $L \approx 8$ нм (в эксперименте $L = 5 \div 10$ нм [3]). Это соответствует ≈ 50 межатомным расстояниям. Высота "бугорков" менее 0.1 нм. В их окрестности длины связей изменяются от 0.13 нм (типичная длина двойной ковалентной связи C=C) до 0.154 нм (длина одинарной связи C-C в алмазе). Такая "рябь" ограничивает тепловое движение атомов в перпендикулярном направлении и в конечном итоге способствует целостности графена (при $T = 300\text{K}$ в нем не образуются даже топологические дефекты типа колец Стоуна-Уэльса 5-7-7-5). Следует понимать, что неоднородность структуры графена влечет за собой появление дополнительных каналов рассеяния электронов и соответствующее уменьшение электрической проводимости. Это обязательно нужно учитывать при проектировании наноэлектронных устройств на основе графена.



Типичная атомная конфигурация графена при $T = 300\text{ K}$ (данные численного моделирования [4]). Длина красных стрелок около 8 нм.

1. N.D.Mermin, H.Wagner, *Phys. Rev. Lett.* **17**, 1133 (1966).
2. P.Doussal, L.Radzihovsky, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1209 (1992).
3. J.C.Meyer et al., *Nature* **446**, 60 (2007).
4. A.Fasolino et al., *Nature Mater.* **6**, 858 (2007).

Размер не имеет значения!

Для исследования кристаллической структуры твердых тел обычно используется дифракция рентгеновских лучей. Рентгеноструктурный анализ дает надежные результаты, если линейные размеры монокристалла l превышают 10 мкм. Так как кристаллы таких размеров получается вырастить далеко не всегда, то часто приходится ограничиваться порошками, состоящими из частиц с $l < 10$ мкм. При этом для количественного анализа рентгеновских дифрактограмм используют данные численных расчетов методами *ab initio*. И здесь все упирается в размеры элементарной ячейки. Если ее объем превышает $V \approx 300\text{ нм}^3$, то атомное строение определить не удастся. Между тем за последние годы синтезирован ряд новых металлоорганических соединений с $V \approx 1000\text{ нм}^3$ и более. Они характеризуются очень низкой плотностью упаковки атомов и наличием больших "пор", поэтому их предполагается использовать для хранения газов, в сепараторах и пр. Но отсутствие детальной информации о структуре этих соединений препятствует целенаправленному поиску новых материалов такого ти-

па. Сложилась очень интересная ситуация: непрерывное совершенствование технологии позволяет синтезировать все новые и новые вещества, а структура многих из них остается нам неизвестной. И вот дело вроде бы сдвинулось с мертвой точки. В работе [1] исследователей из двух французских институтов, Institut Lavoisier, Versailles и ESRF, Grenoble, разработана методика определения структуры кристаллов микронных размеров с использованием "микродифракции" сфокусированного до ≈ 1 мкм пучка рентгеновских лучей от синхротронного источника. Она использована для исследования маленьких кристалликов $\text{Al}_8(\text{OH})_{12}\{(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3\}[\text{bct}]_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где *bct* – 1,3,5-бензол трикарбоксилат (авторы назвали это соединение MIL-110 – аббревиатура от Materials of Institute Lavoisier) (рис. 1). Результаты представлены на рис. 2. Теперь на повестке дня – определение атомного строения различных твердотельных соединений, долгое время "ждавших своего часа". Новая методика может быть задействована также в биологии (например, для изучения структуры белков), медицине и других областях. По мнению авторов, в перспективе ее можно модифицировать так, что станут возможными исследования кристаллов субмикронных и даже нанометровых размеров.

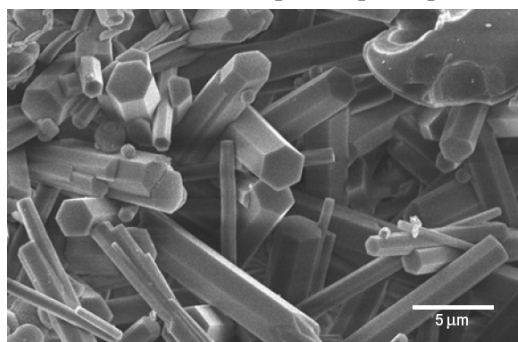


Рис. 1. Кристаллы MIL-110 с поперечными размерами (0.5 ÷ 3) мкм и длиной (5 ÷ 30) мкм.

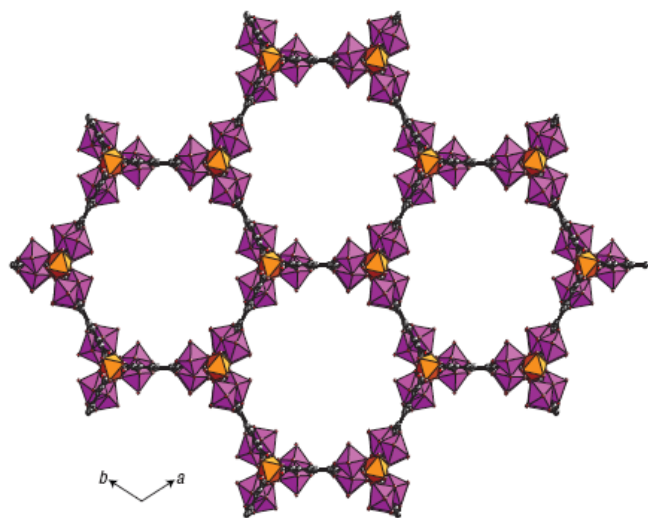


Рис. 2. Структура MIL-110 (вид вдоль оси *c*). Кластеры Al_8 связаны друг с другом молекулами бензолкарбоксилата.

I.C.Volklinger et al., Nature Mater. 6, 760 (2007)

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Нанотрубки из листьев эвкалипта

Ученые постоянно продолжают искать новые «нетрадиционные» источники углерода для получения нанотрубок. Например, в работе китайских авторов из Taiyuan University of Technology предлагается использовать побочный продукт нефтяной промышленности – твердый остаточный (после удаления масел) битум [1]. Многостенные нанотрубки высокой чистоты были получены из него методом CVD, только вместо газообразных углеводородов источником углерода являлись продукты пиролиза битума. При пиролизе битума образуются различные углеродсодержащие газы (CO_2 , CO , CH_4), а также H_2 , N_2 и небольшие органические молекулы. CO , CH_4 – идеальные прекурсоры для углеродных нанотрубок, а водород способствует образованию последних. Прекурсором катализатора служил ферроцен в атмосфере водорода и аргона. Образцы (в виде пленки) собирали с внутренней поверхности реактора – кварцевой трубки, помещенной в печь. Они состояли из нанотрубок, ориентированных случайным образом, спутанных друг с другом. Их диаметр ~ 35 нм (точнее, от 30 до 40 нм), а длина – несколько микрон.

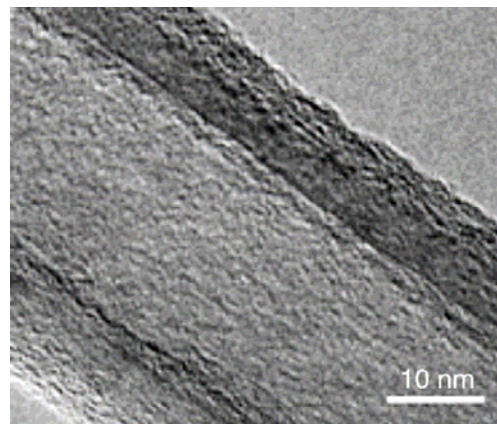


Рис. 1. ТЕМ – изображение нанотрубки.

Работ по использованию природных материалов очень мало. Несколько лет назад ПерсТ сообщал о перспективном ботаническом прекурсор – камфоре [3]. Напомним, что авторы [4] вырастили из нее целый сад одностенных и многостенных нанотрубок (на кварцевой подложке вертикальные нанотрубки выглядели как клумбы цветов). Камфора – нетоксичный, экологически чистый, воспроизводимый, очень дешевый материал. От одного крупного дерева (камфорного лавра) с помощью простой отгонки с водяным паром можно получить примерно 3 т камфоры. В лабораторных условиях авторы [3] при термическом разложении 0.5 г камфоры в атмосфере аргона (с добавлением 1 вес.% ферроцена) получили за один эксперимент примерно 0.1 г нанотрубок! Однако, несмотря на то, что предложенный метод синтеза является безопасным, простым и недорогим, дополнительной

информации о производстве нанотрубок из этого прекурсора не появилось.

Ученые из Nagoya Institute of Technology (Япония) предлагают свой метод получения одностенных нанотрубок (ОСНТ) из природного прекурсора – эвкалиптового масла [2]. Его источник – листья эвкалипта (рис. 2), очень быстро растущего, самого высокого в мире дерева (встречаются экземпляры до 150-155 м). Прирост составляет до 5 м в год, так что это легко возобновляемое сырье. Эвкалипты помогают осушать болотистые места, испаряя огромное количество воды.



Рис. 2. В этих листьях так много масла для получения нанотрубок... Эвкалипт

Родина эвкалиптов – Австралия и остров Тасмания, но постепенно эвкалипты были культивированы в других странах. Распро-

странились они повсюду, в том числе и на Черноморском побережье Кавказа (правда, насчет эвкалиптов в Японии информации что-то нет).

Ценное эфирное масло, главной составной частью которого является цинеол, широко используется в медицине и парфюмерии. Молекулярная формула соответствует $C_{10}H_{18}O$. Точка кипения 176-177°C. Авторы [2] использовали метод получения нанотрубок, близкий к *CVD*, но одностадийный. В кварцевую трубку, находящуюся в печи, помещали катализатор (цеолит, пропитанный солями Fe/Co). При достижении 850°C в реактор подавали азот (скорость потока 100 см³/мин) и эвкалиптовое масло (0,1 г/мин). Синтез проводили около 25 мин при атмосферном давлении. Температура, равная 850°C, и 5 вес.% металла в катализаторе оказались необходимыми параметрами для селективного получения ОСНТ. Этот метод не требует использования водорода, оксида углерода или вредных химикатов. Аморфный углерод не образуется. Очень хороша и воспроизводимость результатов. Наличие ОСНТ подтверждается данными электронной микроскопии (*TEM*, *SEM*) (рис. 3). По результатам рамановской спектроскопии диаметр нанотрубок примерно 0,79-1,71 нм.

Достоинства эвкалиптов привели к тому, что они стали важным источником сырья для целлюлозно-бумажной промышленности, принося быструю прибыль. В Испании, по словам местных жителей,

эвкалипты теперь выращивают «на бумагу», в Португалии уже каждое шестое дерево – эвкалипт. Посадки этих деревьев заменяют собой смешанные леса и оливковые рощи, что нарушает водный баланс почвы. Что же будет, если и производители углеродных нанотрубок начнут претендовать на эту так называемую «зеленую нефть»?..

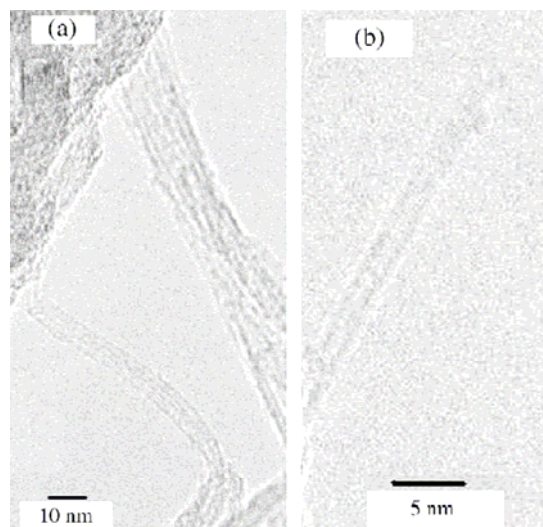


Рис. 3. HRTEM изображения полученных ОСНТ

О.Алексеева

1. X. Liu et al., *Mater. Lett.* **61**, 3916 (2007)
2. P. Ghosh et al., *Mater. Lett.* **61**, 3768 (2007)
3. *ПерсТ*, т.10, вып.12, с.1, (2003)
4. M. Kumar, Y. Ando, *Diamond and Related Materials* **12**, 998 (2003)

Стручки могут поставлять лекарства

Одной из замечательных разновидностей углеродных нанотрубок (УНТ) являются стручки (peapods), представляющие собой однослойную УНТ, заполненную молекулами фуллерена. В последние годы наблюдается заметное обострение интереса к получению и исследованию свойств стручков. Однако этот интерес, как правило, имеет чисто фундаментальный, научный характер. Он стимулирован главным образом возможностью реализовать и наблюдать протяженные одномерные кристаллы фуллеренов, которые невозможно получить никаким другим способом. Однако, по мере развития технологии получения стручков, этот материал набирается все в больших количествах, что позволяет не только проводить фундаментальные исследования, но также развивать различные приложения. В частности, результаты исследований, выполненных недавно Universität Wien и Technische Universität Wien (Австрия) [1], указывают на возможность использования стручков в медицине для дозированной поставки лекарственного препарата в организм больного. В этом случае предполагается, что радикал, оказывающий необходимое воздействие на организм, является химическим аддуктом, присоединенным к молекуле фуллерена, а дозированная поставка лекарства

осуществляется по мере выхода таких молекул из нанотрубки. Авторам цитированной работы удалось управляемым и обратимым образом осуществить процедуру извлечения молекул фуллерена из стручка, что закладывает принципиальную основу для разработки описанного подхода к доставке лекарства. Ключевым элементом рассматриваемого подхода являются однослойные УНТ большого диаметра (свыше 1.5 нм), которые легко впитывают молекулы фуллеренов, образуя стручки. Эти нанотрубки синтезируют методом химического газофазного осаждения (CVD). Стандартная процедура очистки позволила не только повысить содержание УНТ в образце до 50%, но также и раскрыть их концы. Заполнение УНТ фуллеренами C_{60} проводят в течение 2 часов в условиях вакуума при температуре 650° С. Наряду с этим, используют также процедуру заполнения УНТ фуллеренами в растворе метанола (10 мл), куда вводят 5 мг УНТ и 5 мг C_{60} . Раствор в течение 4 часов подвергают ультразвуковому воздействию, что также приводит к образованию стручков. Затем образец освобождают от растворителя, просушивают и прогревают с целью удаления фуллеренов, не вошедших внутрь нанотрубок. Удаление фуллеренов из стручков производят посредством ультразвуковой обработки в течение 2 часов в дихлорбензоле, в котором фуллерены не плохо растворяются. Это позволяет извлечь до 80% инкапсулированных фуллеренов. Полученные образцы изучали методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), рентгеновской дифрактометрии, а также с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения. Результаты исследований показали наличие в образце однослойных нанотрубок большого диаметра. Результаты анализа спектров КР образцов указывают на степень заполнения нанотрубок молекулами фуллеренов, близкую к 80%. Полученные результаты показывают, что молекулы фуллеренов, входящие в состав стручков, достаточно хорошо связаны с нанотрубкой, так что даже нагрев до 1000K не приводит к их извлечению. С другой стороны, эта связь не слишком велика, так что фуллерены можно извлекать, используя сильный растворитель (дихлорбензол). Возможность контролируемого обратимого введения фуллеренов в УНТ рассматривается как основа для разработки лекарственных препаратов на основе стручков.

А.В.Елецкий

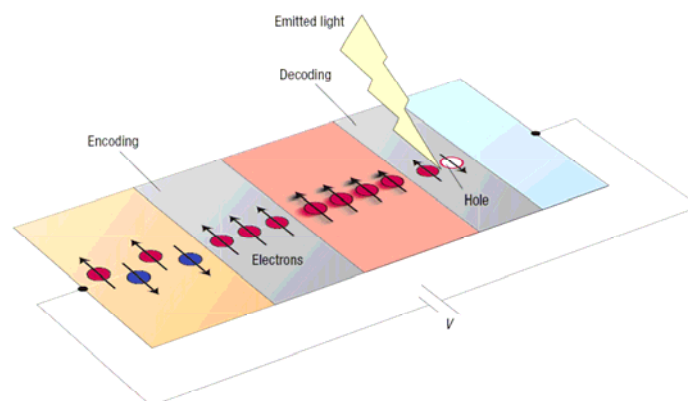
1. F.Simon et al., Chem. Phys. Lett. **445**, 288 (2007).

СПИНТРОНИКА

Пленки EuO на Si и GaN – материальная база спинтроники?

Основными элементами устройств спиновой электроники (спинтроники) являются "поляризаторы" электронных спинов и "спиновые провода", двигаясь по которым, электроны переносят информа-

цию, закодированную в направления их спинов, (см. рис.). Функцию поляризатора может выполнять ферромагнитный полупроводник или полуметалл, а спиновые провода нужно изготавливать из вещества со слабым спин-орбитальным взаимодействием, чтобы поляризация спинов сохранялась на как можно большей длине L_s и в течение как можно более длительного времени T_s . В качестве такого вещества очень подошел бы кремний ($L_s \sim 1 \div 10$ мкм и $T_s \sim 100$ мкс). Что касается ферромагнитного полупроводника, то одним из оптимальных кандидатов считается оксид европия EuO. Он имеет сравнительно высокую температуру Кюри $T_C \approx 69K$, а спиновая поляризация при соответствующей концентрации носителей может достигать почти 100 %. Кроме того, EuO является единственным магнитным бинарным оксидом, который термодинамически устойчив в контакте с кремнием. Но использовать "сладкую парочку" EuO+Si на практике долгое время не удавалось из-за проблем с изготовлением качественных тонких пленок EuO/Si и разложением (+ окислением) на воздухе ($EuO \rightarrow Eu_2O_3 + \text{гидроксиды}$).



Схематическое изображение типичного спинтронного устройства. Неполаризованные по спину электроны инжектируются в электрод, где они поляризуются, а затем двигаются к другому электроду, неся на себе "спиновую информацию", которая затем "считывается" путем измерения поляризации света, испускаемого при рекомбинации электронов с дырками (в зависимости от ориентации спинов этот свет имеет левую или правую круговую поляризацию).

В работе [1] международный коллектив физиков и технологов из Германии, США и России (ИФТТ РАН) сообщил о разработке технологии выращивания эпитаксиальных пленок $Eu_{1-y}La_yO_{1-x}$ на подложках (001) Si (небольшой дефицит кислорода и частичное замещение Eu/La необходимы для того, чтобы удельные сопротивления EuO и Si по порядку величины сравнялись – это является обязательным условием эффективной инжекции спинов из EuO в Si). Для предотвращения деградации пленок на воздухе их покрывали защитным слоем Al_2O_3 толщиной (10 ÷ 20) нм. Условия осаждения оптимизировали так, чтобы пленки были однофазными и монокристаллическими (о чем свидетельствуют

данные рентгеновской дифракции). Поляризация спинов в них превышает 90 %. Такие же пленки удалось вырастить и на подложках (0001) GaN. Интеграция EuO с "технологичными" полупроводниковыми материалами сулит спинтронике выход на новый качественный уровень уже в самом ближайшем будущем. Помимо известных низкочастотных приложений, можно ожидать разработок СВЧ и оптических спинтронных устройств. Не исключено, что скоро в научный обиход войдут такие термины как, например, "спиновая оптика" и "спиновый эффект Ганна".

1. Schmehl et al., Nature Mater. 6, 882 (2007).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Беззубый тигр точит когти

В ноябре с.г. на встрече экспертов от полупроводниковой промышленности и от инвесторов в Германии [1] обсуждался вопрос, как может европейская электроника устоять перед жестким натиском Азии. Удивительный факт – из 45 производств полупроводниковых чипов, создаваемых в настоящее время в мире, 40 расположены в азиатском регионе. Электроника играет ключевую роль в национальной экономике, так как сильно воздействует на другие отрасли, в частности, на автомобильную и приборостроительную. Отсюда острый интерес молодых азиатских экономик к развитию полупроводниковой промышленности. Лаборатории в Японии, Китае, Корее и Индии более гибкие, имеют больше стимулов и возможностей для развития. К тому же, например, корейские производители полупроводниковых изделий получают высокие государственные субсидии.

У ЕС, несмотря на развитую инфраструктуру и высокий уровень образования по техническим наукам, в запасе не так много времени, чтобы составить должную конкуренцию бегущей вперед азиатской электронике. Распределив функции между различными странами-членами ЕС, в условиях беспрецедентных инвестиций в агропромышленный сектор, ЕС не имеет возможности также сильно финансировать высокотехнологичные отрасли. Это делает ЕС «беззубым тигром» (так заявил на встрече [1] Gerd Теере, представитель европейского отделения компании AMD). Из-за высокой стоимости полупроводникового производства в Европе (из-за высоких зарплат) в ближайшие годы сохранится и даже усилится тенденция переноса полупроводникового производства в азиатские страны с низкими зарплатами, что дополнительно приведет к усилению электронных отраслей в Азии. Параллельно с ростом стоимости производства многократно повышается и стоимость новых электронных исследований и разработок. Согласно прогнозам некоторых аналитиков [2], через некоторое время шансы удержаться в полупроводниковом бизнесе сохраняют только исследовательские группы

из двух мощных полупроводниковых конгломератов, это - IBM camp (объединение компаний - IBM, Chartered Semiconductor Manufacturing, Infineon и Samsung Electronics) и TSMC camp (Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd.).

В этой ситуации ЕС может взять реванш при опережающем развитии нанoeлектронных исследований и разработок. В ноябре с.г. Европейская Комиссия анонсировала программу [CATRENE](#) (Cluster for Application and Technology Research in Europe on NanoElectronics). CATRENE стартует с 1 января 2008 г., объем финансирования – 8.8 млрд. долл. (6 млрд. евро) на 4-х летний период с возможностью продолжения в последующие 4 года [3]. CATRENE призвана трансформировать европейскую полупроводниковую электронику в нанoeлектронику. В качестве исполнителей будут привлекаться промышленные компании (большие и малые), университеты и исследовательские институты. Ключевая цель программы – усиление интеллектуальной собственности ЕС во всей нанотехнологической цепочке – литография, кремниевые материалы, электронные компоненты, новые приложения нанoeлектронных устройств. Нанoeлектроника предоставит ни с чем не сравнимые возможности тем, кто первым создаст и выведет на рынок ее результаты.

1. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=204201536>
2. <http://eetimes.eu/showArticle.jhtml?articleID=201001934>
3. [http://www.smalltimes.com/display_article/311926/109/ARTCL/none/none/1/Europe-launches-\\$88B-nanoelectronics-R&D-program/](http://www.smalltimes.com/display_article/311926/109/ARTCL/none/none/1/Europe-launches-$88B-nanoelectronics-R&D-program/)

Живые – это не обязательно нано...

В 20-ом выпуске ПерсТ'а в публикации «Нанoeлектроника. Лукавая цифра?» сообщалось о сайте www.nanotechproject.org/consumerproducts, формируемом Woodrow Wilson International Center for Scholars (Washington, США), на котором представлена информация о потребительских товарах, изготавливаемых с применением нанотехнологий (более 600 нанообъектов в восьми категориях). Тем более было приятно обнаружить, что аналогичный сайт формируется компанией Nanonewsnet.ru и в России - Наномаркет.ру — место встречи бизнеса и нанотехнологий (<http://www.nanomarket.ru/>). На сайте планируется представить каталог российских предприятий, нанопroduкцию предприятий, предоставляемые ими услуги, информацию о ключевых персонах, занятых в наноиндустрии. Компании-производители могут размещать на этом сайте информацию о себе и анонсировать свою продукцию.

В настоящее время представлена бета версия сайта со следующими разделами:

1. Товары (нанотехнологическая продукция: товары для науки, бизнеса и частных потребителей)
2. Виды деятельности
3. Компании (каталог предприятий и научных учреждений, занятых в наноиндустрии)
4. Услуги

В разделе «Товары» выделены следующие категории (цифра в скобках – число представленных нанообъектов на 24.11.2007)

1. Живые системы (1)
2. Инструменты (11)
3. Информационные системы (1)
4. Метрология и стандарты (1)
5. Наноматериалы (4)

Авторы сайта сообщают, что в настоящее время в состоянии заполнения находится База данных по нанообъектам.

Сайт находится в состоянии отладки, поэтому не тревожьтесь, если в категории «Живые системы», помимо косметических кремов компании Низар, содержащих эмульсионные системы, являющиеся структурными и функциональными аналогами живой клетки, появятся фамилии персон, занятых в нанобизнесе - они действительно очень живые, но все же еще не нано...

Авторам сайта пожелаем успехов!

КОНФЕРЕНЦИИ

**6th International Conference of the
"Stripes and high T_c superconductivity"
(STRIPES 08), 26 July – 1 August 2008, Erice,
Sicily ITALY**

physics to applications:

- 1) striped phases in highly correlated electronic systems
- 2) phase separation
- 3) striped phases in complex materials
- 4) anisotropic superconductors
- 5) competition between CDW and superconductivity
- 6) quantum condensates in ultracold fermion gases
- 7) feshbach resonances in superlattices
- 8) photoinduced phase transitions
- 9) quantum size effects and quantum coherence
- 10) polaron liquids
- 11) pairing mechanisms.

e-mail: Conf.Stripes@roma1.infn.it.

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

Научный редактор К.Кугель

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

В подготовке выпуска принимали участие: О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий,
Ю.Метлин, Л.Опенев

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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