

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Безмедные ВТСП: дождемся ли комнатной T_c ?

В конце февраля 2008 г. группа под руководством Hideo Hosono из Tokyo Institute of Technology сообщила о синтезе нового сверхпроводника $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с $T_c = 26 \text{ K}$ [1]. Как и купратные ВТСП, он имеет слоистую структуру (рис. 1), а сверхпроводимость появляется при изменении концентрации носителей (за счет замещения части атомов кислорода атомами фтора), но при этом не содержит меди.

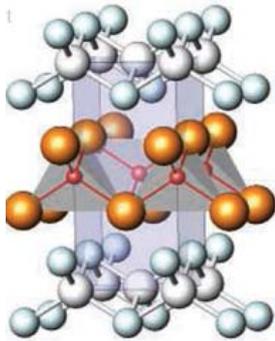


Рис.1 Структура $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$. Красные шарики – атомы Fe, желтые – As, белые – O, синие – La.

На это сообщение не все (и в том числе “Перст”) сразу обратили должное внимание (а вдруг ошибка?), но вслед за ним последовали и другие, причем лавинообразно. Стало понятно, что открыт не просто один новый сверхпроводник, а целое новое “сверхпроводящее семейство”. Критическая температура очень быстро подросла сначала до 43 K в $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, затем до 52 K в $\text{PrO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, а потом и до 55 K в $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, синтезированном при высоком давлении (рис. 2).

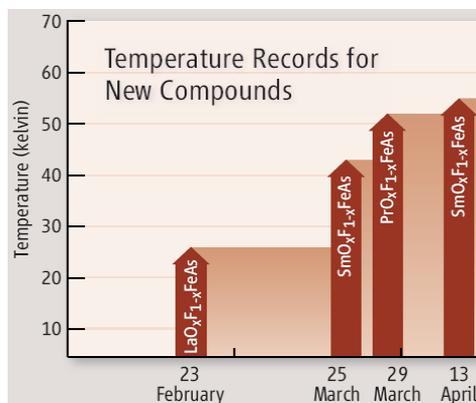


Рис.2 Динамика роста критической температуры в $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$.

И не исключено, что в тот момент, когда вы читаете этот номер “Перста”, в какой-то лаборатории уже изготовлен образец с еще более высокой T_c . Конечно, как и после открытия в 1986 г. купратных ВТСП, все надеются достичь комнатной T_c !

О механизме сверхпроводимости говорить пока рано, но ее присутствие в решетке атомов Fe льет бальзам на душу авторов многочисленных моделей нефононного спаривания. Так или иначе, а тщательный сравнительный анализ свойств купратных и новых безмедных ВТСП будет, безусловно, способствовать лучшему пониманию и тех, и других. Но, как и 20 лет назад, свое слово должны сначала сказать материалovedы: для исследований деталей сверхпроводящего состояния требуются образцы высокого качества. А за многочисленными электронными препринтами (поиск “LaOFeAs” на сайте <http://arxiv.org>.) должны последовать отрецензированные статьи в научных журналах. И в заключение предостережем экспериментаторов: в погоне за Нобелевской премией будьте осторожнее с мышьяком! Иначе просто до нее не доживете...

По материалам заметки [A.Cho, Science 320, 432 (2008)].

1. Y.Kamihara et al., J.Am.Chem.Soc. 130, 2396 (2008).

И далее ...

- 2 Дайте мне хорошую модель – и я опишу эксперимент!
- 3 Сверхпроводящая щель и аномалии Кона в обычных низкотемпературных сверхпроводниках: совпадение не может быть случайным?
- 4 От сверхпроводников к сверхдиэлектрикам

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 4 Спин-орбитальное взаимодействие электронов в углеродных нанотрубках

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Радиоиндикаторный метод слежения за нанотрубками
- 6 Углеродные нанотрубки сворачиваются змейкой

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 7 Квантовая память на атомах фосфора

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 XXXII International Workshop on Condensed Matter Theories, 13-18 August 2008, Loughborough, United Kingdom
- 8 12th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (NDTCS-2008) 23-27 June 2008, Minsk, Belarus

**Дайте мне хорошую модель –
и я опишу эксперимент!**

Несмотря на более чем двадцатилетние интенсивные исследования, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) по-прежнему таят в себе немало загадок. ВТСП представляют собой довольно сложные в химическом и структурном отношении материалы с большим количеством фаз (в т.ч. антиферромагнитной, псевдошелевой, сверхпроводящей, металлической), сменяющих друг друга при изменении температуры и уровня допирования (концентрации носителей заряда). Эти фазы различаются своими электронными свойствами, детальную информацию о которых дает сканирующая туннельная спектроскопия (СТС), позволяющая определять локальную плотность состояний квазичастиц – электронов, характеристики которых (например, эффективная масса) модифицированы за счет их взаимодействия с фононами, другими электронами и пр. Так, например, измерение СТС-спектров ниобия при различных температурах свидетельствует о существовании при $T < T_c$ сверхпроводящей щели Δ – энергетического интервала около уровня Ферми, в котором плотность квазичастиц равна нулю (рис. 1).

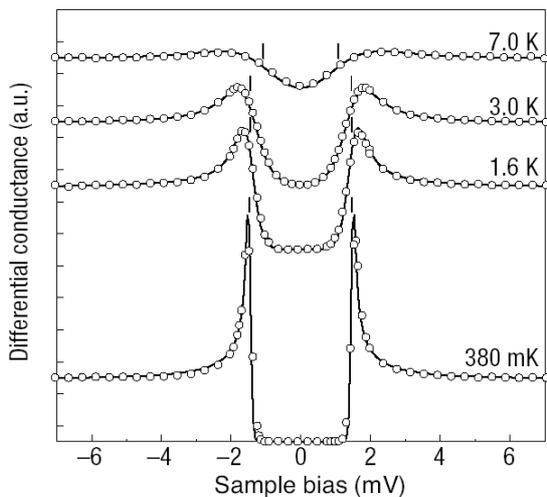


Рис. 1. Дифференциальная проводимость $g(V)$ ниобия при разных температурах. Кружки – эксперимент. Сплошные линии – теория БКШ. На первый взгляд, кажется, что сверхпроводящая щель Δ (если определять ее по расстоянию между двумя “когерентными” пиками) увеличивается с ростом температуры. Однако величина Δ , определяемая из требования наилучшего соответствия экспериментальных данных с предсказаниями модели БКШ, как ей и положено, уменьшается при увеличении температуры (вертикальные штрихи).

И здесь встает очень важный вопрос о *количественной* интерпретации эксперимента. Если для того же ниобия определять Δ непосредственно по расстоянию между максимумами дифференциальной туннельной проводимости $g(V)$, то мы получим качественно неверную зависимость Δ от T (рис. 1). А вот если для описания экспериментальных данных

использовать соответствующую формулу теории БКШ, которая учитывает эффект термического уширения спектров и в которую Δ входит как “подгоночный параметр”, то для $\Delta(T)$ получается совершенно другая зависимость, такая что $\Delta \rightarrow 0$ при $T \rightarrow T_c$. Таким образом, мало получить “сырую” экспериментальную информацию, ее нужно еще осмыслить и правильно обработать.

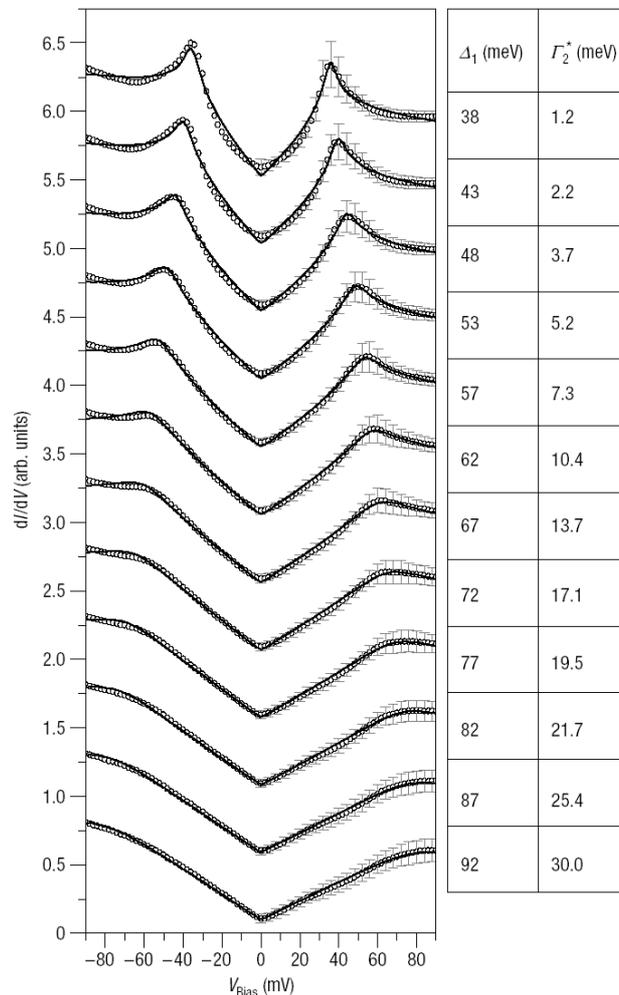


Рис. 2. Кружки – экспериментальные величины $g(r, V)$ в ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с концентрацией дырок $p=0.1$, усредненные по всем областям с одинаковой максимальной щелью Δ_1 . Здесь $\Gamma_2^* = \Gamma_2(E=\Delta_1)$. Сплошная линия – теория БКШ для d -волнового сверхпроводника с затуханием квазичастиц $\Gamma_2 = \alpha E$. Кривые для разных Δ_1 смещены относительно друг друга по вертикали

В статье [1] ученые из США, Шотландии и Японии представили результаты измерения локальной дифференциальной проводимости $g(r, V)$ при $T = 4.2$ К в шести монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с различной концентрацией дырочных носителей $0.08 \leq p \leq 0.22$, что перекрывает весь диапазон составов – от недопированного до передопированного, включая оптимально допированный (с максимальной T_c). Всего было получено более миллиона кривых. Их анализ показал, что все они могут быть количественно описаны в рамках теории БКШ, но с двумя существенными модификациями формулы для плотности со-

стояний квазичастиц $N(E)$: 1) параметр сверхпроводящего порядка Δ как функция квазиимпульса k не является константой, а зависит от k как $\Delta(k)=\Delta_1[\cos(k_x)-\cos(k_y)]/2$ (d -волновое спаривание) и 2) мнимая часть энергии квазичастиц Γ_2 (описывающая эффекты затухания) как функция действительной части E тоже не является константой, а увеличивается с ростом E по закону $\Gamma_2=\alpha E$, где α – безразмерный коэффициент. Неоднородное распределение атомов кислорода приводит к разбросу максимальной щели Δ_1 и, соответственно, к различию кривых $g(r, V)$ в разных точках r поверхности скола. Но для каждой величины Δ_1 (определено путем подгонки теоретической формулы для $g(r, V) \sim N(r, E=eV)$ к соответствующей экспериментальной зависимости) форма кривой $g(r, V)$ практически одинакова, что позволяет говорить о систематическом изменении вида функции $g(V)$ с ростом Δ_1 : от кривой с двумя пиками к V-образной функции (рис. 2). В предыдущих экспериментах за максимальную локальную щель принималась половина расстояния между пиками $g(V)$, что не позволяло найти ее величину для V-образных кривых. Теперь это ограничение снято. В работе [1] были также определены величины и второго подгоночного параметра – коэффициента α . Оказалось, что α (затухание квазичастиц) увеличивается с ростом Δ_1 (рис. 3).

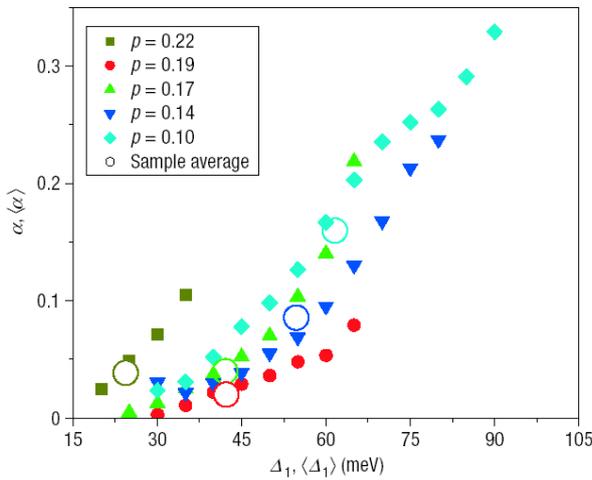


Рис. 3. Зависимость локальной (α) и средней по образцу ($\langle \alpha \rangle$) величин коэффициента в соотношении $\Gamma_2=\alpha E$ от локальной (Δ_1) и средней по образцу ($\langle \Delta_1 \rangle$) величины максимума щели при разных p . Среднее $\langle \Delta_1 \rangle$ увеличивается при понижении p .

Поскольку большая величина Δ_1 обычно ассоциируется с псевдощелью, то полученные результаты открывают широкий простор для дальнейших дискуссий о природе псевдощелевого состояния и его связи со сверхпроводимостью. Интересно также, что распределение локальных величин Δ_1 в окрестности средней по образцу величины $\langle \Delta_1 \rangle$ при разных уровнях допирования p (и, соответственно, разных $\langle \Delta_1 \rangle$) практически одинаково (рис. 4), то есть атомный беспорядок одинаково влияет на ха-

рактеристики недодопированной, оптимально допированной и передопированной фаз ВТСП.

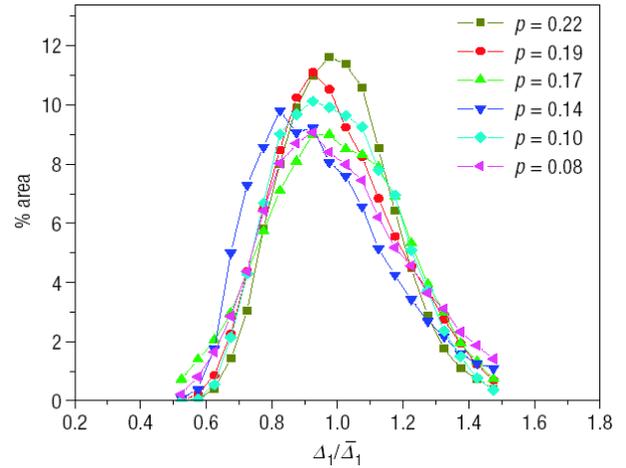


Рис. 4. Распределение локальных величин максимальной щели Δ_1 , нормированных на среднюю величину $\langle \Delta_1 \rangle$, при разных p .

Л.Опенев

I. J.W. Alldredge et al., Nature Phys. 4, 319 (2008).

Сверхпроводящая щель и аномалии Кона в обычных низкотемпературных сверхпроводниках: совпадение не может быть случайным?

Уже давно считается общепризнанным, что вся совокупность экспериментальных данных для обычных низкотемпературных сверхпроводников может (в отличие от ВТСП) быть количественно объяснена в рамках теории БКШ-Элиашберга. Хотя теоретическое предсказание двух наиболее важных характеристик сверхпроводника – критической температуры T_c и сверхпроводящей щели Δ – задача чрезвычайно сложная из-за экспоненциальной зависимости T_c и Δ от силы электрон-фононного взаимодействия, фононной и электронной плотности состояний. Но и здесь время от времени появляются “сюрпризы”. Об одном из них в статье [1] поведали миру ученые из Германии и США. Методом резонансной нейтронной спектроскопии спинового эха они определили Δ в монокристаллах Pb и Nb ($T_c = 7.2$ К и 9.3 К, соответственно) и показали, что $2\Delta(0)$ в точности совпадает с энергией, при которой имеет место первая из так называемых “аномалий Кона” (связанных с резким уменьшением времени жизни фононов), не имеющих отношения к сверхпроводимости и определяющихся только геометрией поверхности Ферми и скоростью звука. Если бы этот эффект наблюдался только в каком-то одном сверхпроводнике, то его можно было бы списать на случайное совпадение. Но в [1] один и тот же результат был получен для двух разных соединений с различными Δ , различными фононными спектрами и различной формой поверхности Ферми. В настоящее время физическая причина такого “совпадения” не ясна.

I. P. Aynajian et al., Science 319, 1509 (2008).

От сверхпроводников к сверхдиэлектрикам

В сверхпроводниках состояние с нулевым сопротивлением R реализуется при величинах температуры, магнитного поля и силы тока, меньших соответствующих критических (рис. 1а), тогда как за пределами этой области фазовой диаграммы величина R конечна.

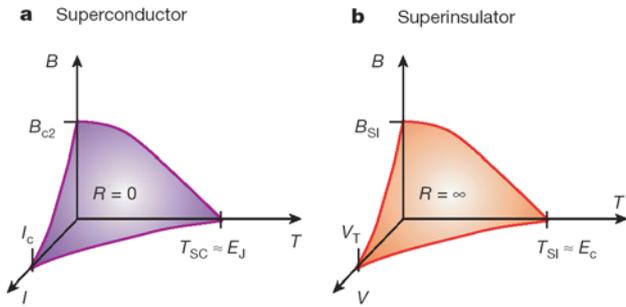


Рис.1. Схематическое изображение фазовых диаграмм сверхпроводника (а) и диэлектрика (б). Для сверхдиэлектрика электрическое напряжение V играет роль силы тока I для сверхпроводника.

Прямо противоположный эффект обнаружен в работе [2] ученых из России (Институт физики полупроводников, Новосибирск), США, Германии и Бельгии: при *конечной* температуре $T_{SI} \sim 0.1$ К тонкие пленки TiN переходят в “сверхдиэлектрическое” состояние с $R = \infty$, то есть с нулевой проводимостью. Величина T_{SI} уменьшается при увеличении магнитного поля и электрического напряжения (рис. 1б). Полученные результаты авторы [1] объяснили тем, что в сверхпроводнике носители заряда и магнитные вихри как бы “меняются ролями” (рис. 2).

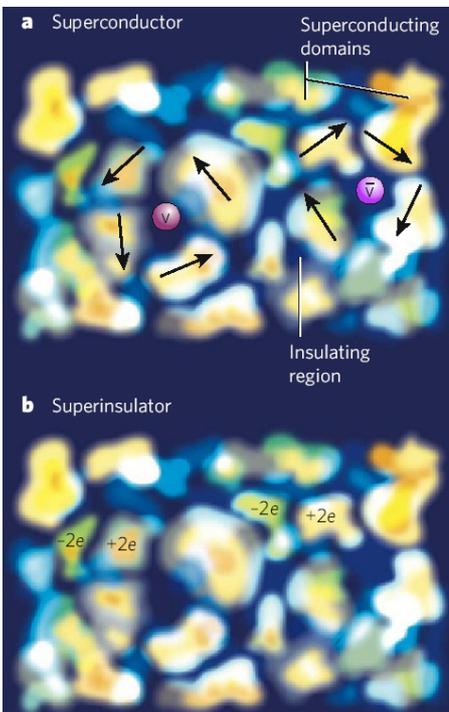


Рис.2. (а) В сверхпроводнике сверхпроводящие домены отделены друг от друга диэлектрическими областями, через которые могут туннелировать носители заряда. Противоположно направленные магнитные вихри (красные кружки) образуют связанные пары вихрь-антивихрь. Носители заряда свободно двигаются вокруг вихрей. (б) В сверхдиэлектрике носители заряда и вихри меняются ролями: первые образуют противоположно заряженные связанные пары, блокируя электрический ток, а последние (на рисунке не показаны) циркулируют вокруг них.

первые образуют противоположно заряженные связанные пары, блокируя электрический ток, а последние (на рисунке не показаны) циркулируют вокруг них.

Их объяснение основано на модели сверхдиэлектрика как сетки сверхпроводящих “капель”, связанных друг с другом посредством джозефсоновских контактов. Механизм формирования таких “капель” пока не ясен. Не исключено, что они образуют периодическую структуру, подобную абрикосовской вихревой решетке в сверхпроводниках.

I. V.M.Vinokur et al., Nature 452, 613 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Спин-орбитальное взаимодействие электронов в углеродных нанотрубках

Электроны в атомах обладают как спиновыми, так и зарядовыми степенями свободы. В нерелятивистской квантовой механике эти степени свободы не зависят друг от друга, и поэтому атомные уровни энергии многократно вырождены. Релятивистские эффекты приводят к спин-орбитальному взаимодействию (СОВ), в результате чего вырождение частично снимается, и у атомных спектров появляется так называемая тонкая структура. Долгое время считалось, что в бездефектных углеродных нанотрубках электронные состояния в отсутствие магнитного поля B четырехкратно вырождены (дважды по спину и дважды по орбитальному квантовому числу) и обладают электрон-дырочной симметрией [1], а при $B \neq 0$ вырожденный уровень расщепляется на четыре уровня, последовательность которых при данной величине B определяется взаимным направлением спинового и орбитального магнитных моментов (рис. 1).

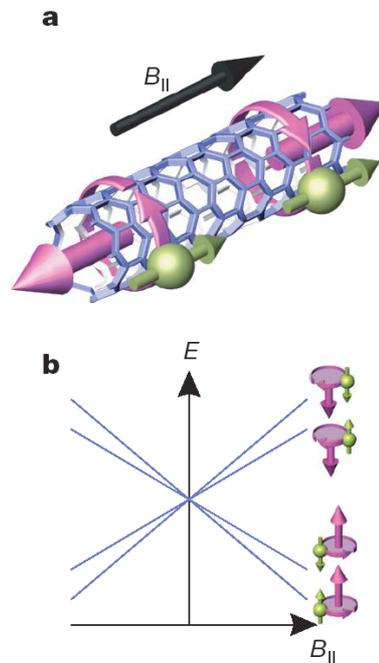


Рис.1. (а) В отсутствие спин-орбитального взаимодействия и рассеяния на дефектах квантованные энергетические уровни электронов в нанотрубках при $B = 0$ четырехкратно вырождены. Фиолетовые стрелки показывают направление орбитального магнитного момента, возникающего вследствие движения электрона вокруг нанотрубки по часовой стрелке и против нее. Зеленые стрелки показывают направление спинового магнитного

момента электрона.

(б) Ожидаемое в отсутствие спин-орбитального взаимодействия расщепление энергетических уровней в магнитном поле, параллельном оси нанотрубки.

Однако в работе [2], выполненной сотрудниками Cornell University (США), обнаружено, что в нанотрубках, как и в атомах, тоже имеет место СОВ. Используя туннельную спектроскопию, авторы [2] непосредственно измерили одночастичные энергетические спектры нанотрубок с одним избыточным электроном и одной дыркой. Было показано, что при $B=0$ вырожденный уровень расщепляется на два дублета, расстояние между которыми составляет $\Delta_{SO} = (0.37 \pm 0.02)$ мэВ. При этом нижний дублет отвечает параллельной ориентации орбитального и спинового магнитных моментов, а верхний – антипараллельной (рис. 2).

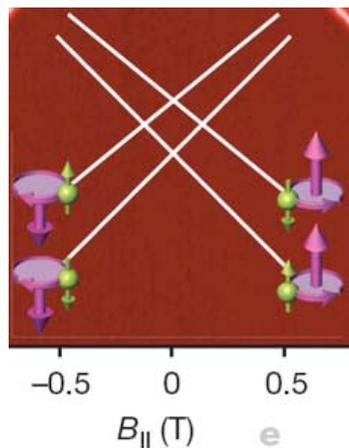


Рис.2. Экспериментальная зависимость одноэлектронного спектра нанотрубки от индукции параллельного ее оси магнитного поля. Размер рисунка по вертикали соответствует интервалу энергий около 2 мэВ.

Существенно, что при $B=0$ последовательность уровней оказывается не такой, как в отсутствие СОВ (сравните рис.2 и рис.1b). Многоэлектронные состояния также получаются совершенно другими, чем предсказывают теории, не учитывающие СОВ. Например, двухэлектронное основное состояние не является ни триплетным (как можно было бы ожидать из моделей, принимающих во внимание электрон-электронные взаимодействия), ни синглетным, а представляет собой слэтеровский детерминант, составленный из двух одноэлектронных состояний, в каждом из которых орбитальный и спиновый магнитные моменты параллельны друг другу. Что же из всего этого следует? Ведь до сей поры нанотрубки считались перспективными кандидатами в спинтронные устройства именно из-за если и не полного отсутствия, то уж во всяком случае чрезвычайно малой величины СОВ. А оказалось, что это взаимодействие не только сравнительно велико, но и кардинально меняет электронную структуру нанотрубок. Однако не стоит торопиться списывать нанотрубки со счетов. Просто нужно так пересмотреть принципы работы спинтронных устройств (а также спиновых кубитов на основе квантовых точек из нанотрубок), чтобы обратить СОВ себе во благо (например, использовать его для управления спиновыми состояниями посредством электрических импульсов).

Л.Опенюв

1. C.L.Kane, E.J.Mele, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 1932 (1997).
2. F.Kuemmeth et al., *Nature* **452**, 448 (2008).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Радиоиндикаторный метод слежения за нанотрубками

Широкое использование углеродных нанотрубок и других наноматериалов в биомедицинских целях, например, для доставки лекарств в живой организм, сдерживается из-за недостатка знаний об их поведении *in vivo*. Для серьезного изучения фармакокинетики и биораспределения *in vivo* требуется быстрый, удобный и универсальный метод слежения. Такой метод – радиоиндикаторный с использованием метки ^{125}I – разработали китайские ученые. Продемонстрирована его эффективность при изучении *in vivo* биораспределения УНТ, функционализированных разными способами; количественно определены поглощение и распределение многостенных углеродных нанотрубок двух типов – *тау-МСНТ* и *твин-МСНТ*. (*Тау-МСНТ* – нанотрубки с ковалентной функционализацией таурином*, *твин-МСНТ* – нанотрубки в оболочке твина**).

Напомним, что для исследований *in vivo* используются растворы нанотрубок. Для их получения нанотрубки, обычно объединенные в жгуты или пучки, надо диспергировать. Существует два подхода к решению этой проблемы: механические методы и методы, которые изменяют поверхностную энергию (как физические, так и химические). Механические методы (например, ультразвуковая обработка) отделяют нанотрубки друг от друга, но могут и повредить их. Химические методы используют ковалентную функционализацию поверхности для повышения смачиваемости или адгезии, но при этом могут ввести дефекты (например, использование кислот при высоких температурах). В последние годы для приготовления и водных, и органических растворов стали широко использовать нековалентную функционализацию УНТ с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ) или полимеров [2]. **Твины** – одна из групп ПАВ. Ультразвуковая обработка, используемая вместе с ПАВ, помогает создать щели на концах пучков и облегчить проникновение ПАВ (рис.1). Возможные механизмы диспергирования нанотрубок с помощью ПАВ схематически показаны на рисунке 2.

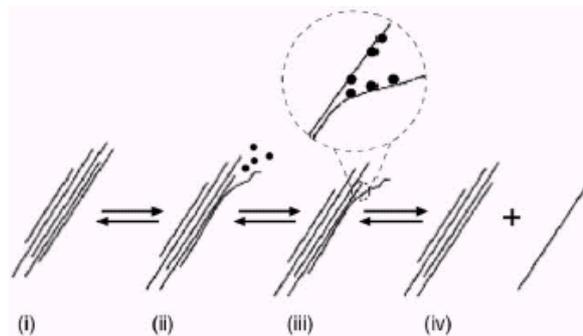


Рис. 1. Механизм отделения нанотрубки от пучка.

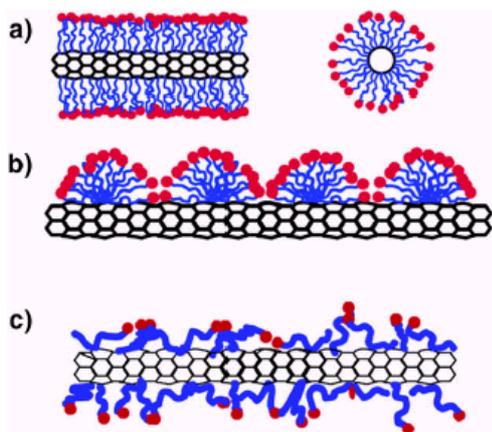


Рис.2 Варианты «обертывания» нанотрубок поверхностно-активным веществом.

МСНТ в работе [1] были синтезированы CVD методом. Диаметр 10-20 нм, длина от нескольких до нескольких десятков микрон. ^{125}I был получен в Китайском институте атомной энергии. После обработки и функционализации *тау*- и *твин*-МСНТ были маркированы радиоактивным йодом ^{125}I с помощью широко применяемого мягкого йодогенного метода. Были приготовлены также *I-тау*-МСНТ со стабильным йодом. Результаты исследования этих нанотрубок методом РФЭС говорят о том, что атомы йода ковалентно связаны с атомами углерода на стенке *тау*-нанотрубки.

Данные электронной микроскопии показывают, что нанотрубки в сыворотке крови мышей остаются диспергированными, при этом на *тау*-МСНТ, в отличие от *твин*-МСНТ, видны адсорбированные белки (рис.3).

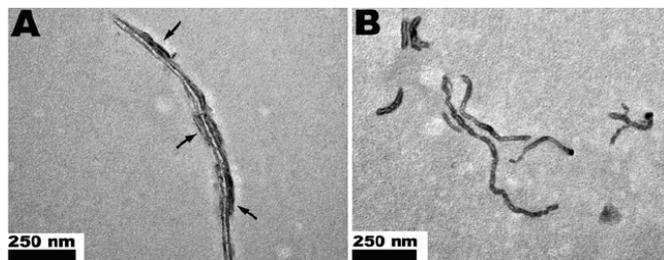


Рис.3. Типичные TEM фото *тау*-МСНТ (А) и *твин*-МСНТ (В) в сыворотке крови. Стрелками показано присоединение белков к *тау*-МСНТ.

Эксперименты *in vivo* были проведены на мышах. После акклиматизации мышей разделили на группы по 5 штук и ввели внутривенно (в вену хвоста) однократную дозу 100 $\mu\text{л}$ раствора ^{125}I *тау*-МСНТ. Через разные промежутки времени после этого мышей умертвили и с помощью γ -детектора определили активность ^{125}I (в процентах к исходной) в отдельно взятых тканях щитовидной железы, сердца, легкого, печени, почек, селезенки, желудка, кишечника.

Через 5 мин после введения примерно 80% *тау*-МСНТ достигло печени, и всего 5,4% и 2,4% попало в легкие и селезенку, соответственно (но не в другие органы – кровь, мозг, желудок, мышечную

ткань, кость и кишечник). Через 6 часов в печени осталось $\sim 75\%$, а 2,6% - в селезенке; в легких активность постепенно снижалась. Низкая радиоактивность в щитовидной железе, главной мишени для йода, указывает на то, что из индикатора теряется чрезвычайно малое его количество.

В отличие от *тау*-МСНТ, *твин*-МСНТ обнаруживаются не только в печени, селезенке, легких, но также в других органах – желудке, почке, кишечнике. При этом их поглощение в печени через все интервалы времени меньше, чем для *тау*-МСНТ. Более того, через 5 минут после инъекции содержание *твин*-МСНТ в крови составляет 6,5%, а *тау*-МСНТ в крови остается всего 0,7%. Видимо, это связано с хорошим диспергированием *твин*-МСНТ.

По мнению авторов метод, использующий радиоактивный йод, наиболее удобен. Нанесение метки происходит быстро и легко. В настоящее время для изучения накопления в органах лекарств и других веществ, путей их выведения, биодоступности используются меченые ^{14}C -соединения, несмотря на очень высокую стоимость и трудоемкость синтеза. Для детектирования требуется жидкий сцинтилляционный счетчик. К тому же период полураспада ^{14}C составляет 5730 лет, в отличие от ^{125}I , который имеет период полураспада 60,2 дня, то есть, нет проблем с хранением радиоактивных отходов. Сходство результатов, полученных для распределения ^{125}I *тау*-МСНТ в печени, селезенке и легком в работе китайских ученых, и в других исследованиях с ^{14}C *тау*-МСНТ, показывает, что метод радиоактивного йода надежен [1]. Конечно, он имеет некоторые ограничения. Ковалентная связь I-C сильнее физической адсорбции ионов йода на УНТ, но в физиологических условиях ее довольно просто разорвать. Метод подходит для довольно короткого слежения (менее 24 часов), однако в большинстве случаев этого достаточно. Метод прост, надежен и универсален.

* таурин - от латинского *taurus* (бык), $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_2\text{SO}_3\text{H}$ (на его основе, кстати, производятся известные глазные капли Тауфон), впервые был выделен из бычьей желчи.

** твины – группа поверхностно-активных веществ (Tween-60 – на основе полиэтиленоксидсорбитмоностеарата, Tween-80 – на основе полиэтиленоксидсорбитмоноолеата).

О.Алексеева

1. X.Deng et al., *Nanotechnology* **19**, 075101 (2008).
2. L.Vaisman, *Adv. Colloid Interface Sci.* **128-130**, 37 (2006).
3. M.S.Strano et al., *J Nanosci. Nanotech.* **3**, 81 (2003).
4. K.Yurekli et al., *J Am. Chem. Soc.* **126**, 9902 (2004).

Углеродные нанотрубки сворачиваются змейкой

Углеродные наноструктуры (УНС), к числу которых относятся фуллерены и нанотрубки, продолжают удивлять многообразием форм. Наряду со

Перст, 2008, том 15, выпуск 8

сфероидальными фуллеренами и нанотрубками, содержащими один или несколько концентрических цилиндров, наблюдают луковичные структуры (представляют собой вложенные друг в друга сфероиды), бамбукоподобные структуры (многослойные нанотрубки непостоянного радиуса), стручки (однослойные нанотрубки, заполненные молекулами фуллеренов, которые, в свою очередь, могут быть заполнены одним или несколькими атомами). Недавние наблюдения израильских исследователей (Вейцмановский институт, г. Реховот) явления самопроизвольного сворачивания нанотрубки в змейку расширили наши представления о способности УНС к самоорганизации. Однослойные нанотрубки диаметром от 0,8 до 4 нм выращивали методом химического осаждения паров (CVD) на подложке из аморфной двуокиси кремния. Характер самоорганизации нанотрубок виден из представленных микрофотографий, которые получены с помощью сканирующего электронного и атомного силового микроскопов (рис.1).

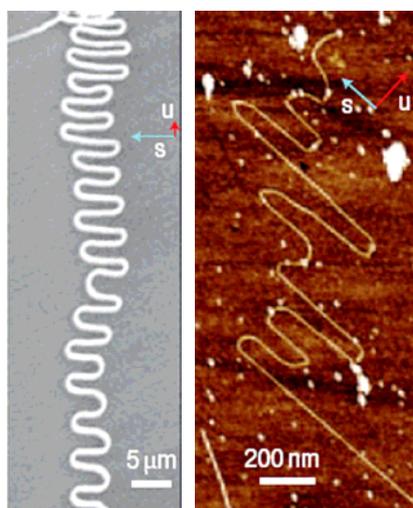


Рис. 1. Изображения нанотрубки, свернутой в змейку, полученные с помощью сканирующего электронного (слева) и атомного силового (справа) микроскопов

Анализ микрофотографий показал, что змеевидные структуры обычно отрастают от аморфных полосок SiO_2 в виде прямого отрезка, направление которого соответствует направлению газового потока. Затем после короткого переходного участка, на котором змеевидная структура неупорядочена, она приобретает все более регулярную форму. Ширина змеевидной структуры, ее шаг и плотность зависят от условий роста. Так, длина змейки меняется в диапазоне от 20 до 1000 мкм, а ширина может варьироваться между 3 и 10 мкм. Характерное расстояние между параллельными участками изменяется между 0,5 и 8 мкм, хотя в отдельных случаях наблюдаются змейки с расстоянием порядка 75 – 100 нм. На отдельных фотографиях наблюдается небольшое утолщение и уплотнение змейки в области хвоста. Обычно на конце нанотрубок наблюдаются наночастицы катализатора, что является указанием на вершинный механизм роста нанотрубок.

Наблюдения показали, что форма змейки сильно зависит от скорости и направления потока газа. Так,

увеличение скорости подачи газа от 250 до 1000 см^3 (при нормальных условиях) приводит к увеличению расстояния между параллельными участками змейки от 0,8 до 4 мкм. Дальнейшее увеличение скорости подачи газа приводит к выпрямлению нанотрубок в направлении потока. Структура змеек также изменяется при изменении направления потока газа относительно полосок оксида кремния. При некоторых углах возникает дополнительная ориентация угла изгиба сегментов змейки относительно общего направления ее роста. Наряду с этим, наблюдается корреляция между шагом змейки (расстояние между параллельными участками) и диаметром образующей нанотрубки.

А.В.Елецкий

I. N.Geblinger et al., Nature Nanotech. 3, 195 (2008).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовая память на атомах фосфора

Ученые сразу трех выдающихся мировых университетов Оксфорда (Англия), Принстона и Беркли (США) выступили с предложением применить спины атомов ^{31}P для квантовой памяти [1]. Количество авторов этой публикации похоже на то, что бывает при открытии новой элементарной частицы. В статье используются идеи Кейна по созданию твердотельного квантового компьютера на атомах фосфора, внедренных в «безспиновый» кремний ^{28}Si [2]. Авторы ссылаются на эту знаменитую работу, но только мимоходом. В действительности, они взяли из нее фрагмент, посвященный отдельному кубиту. Имеется в виду запись квантовой информации на электронном спине, передача ее на ядерный спин и наоборот - передача информации с ядерного спина на электронный спин и ее считывание. Это и есть запись, хранение и считывание квантовой информации.

В атоме ^{31}P присутствует спин электрона на внешней s-орбите, который связан со спином ядра за счет сверхтонкого взаимодействия. Хранить информацию удобнее на ядерном спине ввиду большого времени его декогерентизации. При температуре $T=5.5$ К это время превосходит одну секунду. Время декогерентизации электронного спина на несколько порядков меньше. Казалось бы, можно записывать информацию непосредственно на ядерный спин с помощью методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР), минуя промежуточную стадию электронного спина, но это не так. Ядерные спины невозможно инициализировать, т.е. привести в известное и одинаковое состояние. Частота ЯМР в достижимых магнитных полях находится в радиочастотном диапазоне (rf), а это означает, что энергия перехода «спин вверх - спин вниз» очень мала. Получить определенную ориентацию спина путем охлаждения не удастся даже при сверхнизких температурах. Вот тут и вступает в игру электронный спин. Энергия переворота электронного спина соответствует диапазону микроволнового излучения

(μW). Электронные спины можно инициализировать с помощью охлаждения. Затем на них может быть записана квантовая информация, т.е. спин электрона приведен в суперпозиции состояний «спин вверх» и «спин вниз».

На рис. 1А представлены уровни энергии, соответствующие системе из двух спинов – электронного и ядерного. Спины связаны с помощью сверхтонкого взаимодействия. На рис. 1В показано, как с помощью π -импульсов, которые переворачивают соответствующий спин, произвести обмен состояниями между электронным и ядерным спинами. Извлечение информации производится с помощью обратного процесса, после чего спиновое состояние электрона считывается тем или иным методом.

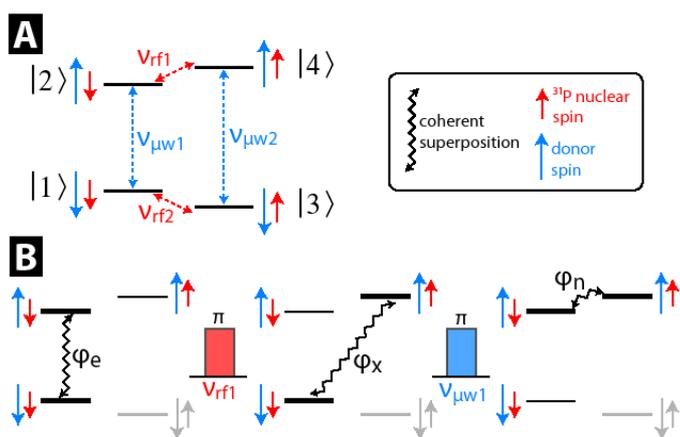


Рис. 1. Система уровней (А) и процедура передачи информации с электронного на ядерный спин (В).

Кстати, совсем недавно ученые Калифорнийского университета в Беркли (США) предложили, как можно измерить состояние электронного спина с помощью тока, протекающего в канале кремниевого полевого транзистора (ПерсТ 15, в. 4, 2008 http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/8_04/index.htm), но в данной работе это пока не реализовано.

Главным достоинством работы, несомненно, является экспериментальное воплощение представленной идеи. Пока продемонстрирована работа только одного ансамблевого кубита, составленного из огромного числа имплантированных атомов фосфора, которые работают независимо друг от друга. Большое количество атомов требуется для того, чтобы измерять состояние системы с помощью макроскопических методов ЯМР и ЭПР.

Преимущества квантового компьютера и квантовой памяти по сравнению с классическими аналогами проявятся только при использовании запутанных состояний кубитов. Для создания квантовой памяти большой емкости все равно потребуются реализация конструкции Кейна с регулярным расположением атомов и управляющих электродов. К сожалению, это по-прежнему остается далеким от современных технологических возможностей.

В.Вьюрков

1. J.Morton et al., *ArXiv:0803.2021[quant-ph]*, 13 Mar 2008.

2. B.E.Kane, *Nature* 393, 133 (1998).

КОНФЕРЕНЦИИ

XXXII International Workshop on Condensed Matter Theories, 13-18 August 2008, Loughborough, United Kingdom

- New materials
- Nano- and metamaterials
- Arrays of Josephson junctions
- Quantum dots
- Correlated low-dimensional systems
- Cold atoms and Bose-Einstein condensation
- High-temperature superconductors
- Coherence of atomic levels under extreme conditions
- Molecular dynamics
- Phase transitions and collective flow
- Electronic transport and nonlinear quantum effects
- Soft condensed matter and biomedical physics problems
- Classical and quantum chaos

Web: <http://www-staff.lboro.ac.uk/~phrtg/aqdji/cmt32-08/>

12th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (NDTCS-2008) 23-27 June, 2008 in Minsk, Belarus.

1. Electronic, atomic and molecular dynamics
2. Biology systems
3. Nanomaterials and nanotechnologies
4. Nano-, micro- and macromechanics
5. Computer technologies and simulation

Web: <http://www.bsuir.edu.by/depmne/>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой ИФТТ РАН и РНЦ «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.В.Елецкий, Л.Опенос

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64