

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Высокотемпературная сверхпроводимость в $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$

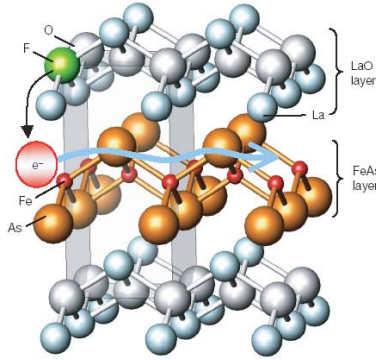


Рис.1. Фрагмент кристаллической решетки LaOFeAs .

Волна, поднятая открытием безмедных железисто-мышьяковых высокотемпературных сверхпроводников [1] (см. Перст, 2008, том 15, выпуск 7), наконец-то докатилась от электронных препринтов до страниц ведущих научных журналов, и в первую очередь, конечно, до "Nature". В номере от 15 мая

2008 г. опубликована короткая статья [2] авторов этого открытия (все – из Японии). Как и купратные ВТСП, четверное соединение LaOFeAs имеет слоистую кристаллическую структуру с периодами тетрагональной элементарной ячейки $a = 0.40355$ нм и $c = 0.87393$ нм (рис. 1).

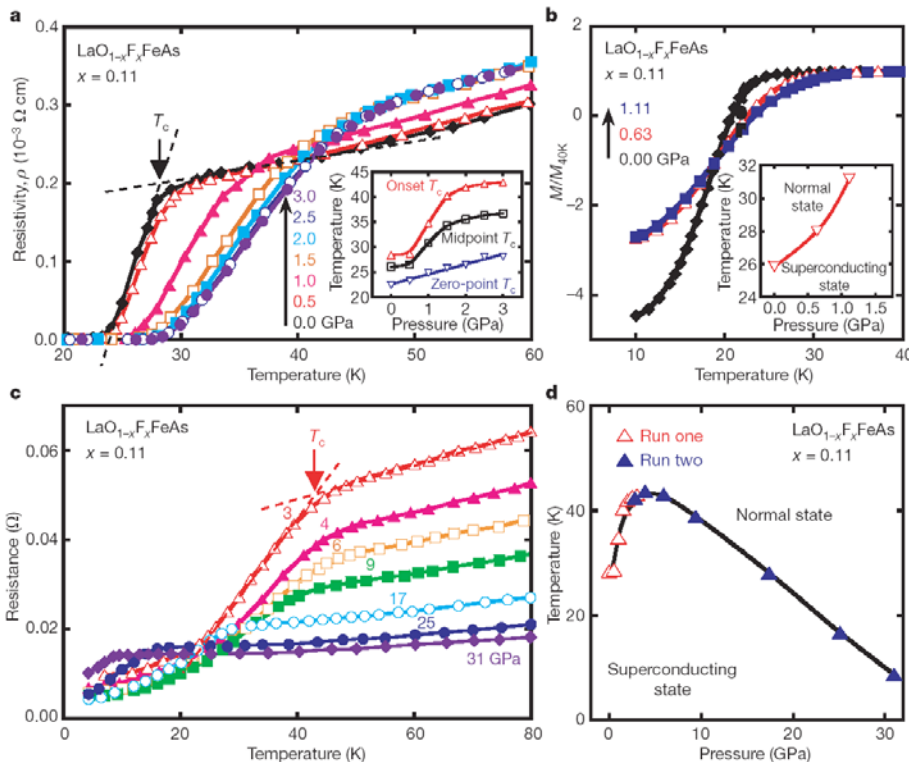


Рис.2. Влияние давления на сверхпроводимость $\text{LaO}_{1.89}\text{F}_{0.11}\text{FeAs}$: *a* - температурные зависимости удельного сопротивления ρ при $P \leq 3$ ГПа (на вставке приведены зависимости температуры начала резистивного перехода, его средней точки и $T_c(R=0)$ от P); *b* - температурные зависимости намагниченности M , нормированной на $M(T = 40 \text{ K})$, при $P \leq 1.1$ ГПа (на вставке изображена зависимость температуры диамагнитного перехода от P); *c* - температурные зависимости сопротивления при $P \geq 3$ ГПа; *d* - Фазовая диаграмма в координатах T - P (величина T_c определяется по началу резистивного перехода).

И далее ...

- 2 Нефононная природа "кинка" в ВТСП

Каков источник спаривающего взаимодействия в ВТСП?

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Четверть электрона

- 4 Топологический квантовый компьютер

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Продолжаются токсикологические исследования углеродных нанотрубок in vivo

- 6 Рутениевые подложки для графена

СПИНТРОНИКА

- 6 Электрическое управление ферромагнетизмом в полупроводнике $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Влияние экранирования на эмиссионные свойства катода на основе углеродных нанотрубок

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 IX Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС - 9) 17-23 ноября 2008 г, г. Екатеринбург, Россия

- 8 НОВЫЕ КНИГИ

Как и в купратных ВТСП, проводящие слои (FeAs) пространственно отделены от слоев-резервуаров заряда (LaO). Концентрацию носителей можно увеличить путем замещения части ионов O^{2-} на ионы F^- . В работе [2] представлены результаты для поликристаллических недодопированных и оптимально допированных образцов $LaO_{1-x}F_xFeAs$ с $x = 0.05$ и 0.11 соответственно. При $x = 0.11$ увеличение P до 4 ГПа приводит к росту температуры начала резистивного перехода от 26 К до 43 К (рис. 2а). Температура диамагнитного перехода при этом также увеличивается (рис. 2б). Дальнейшее увеличение P ведет к быстрому уменьшению T_c (рис. 2с,д). При $x = 0.05$ зависимость $R(T)$ имеет полупроводниковый вид при $P = 0$ и становится металлической с ростом P (рис. 3). При $P \leq 3$ ГПа величина T_c увеличивается с ростом P , но остается меньше, чем при $x = 0.11$.

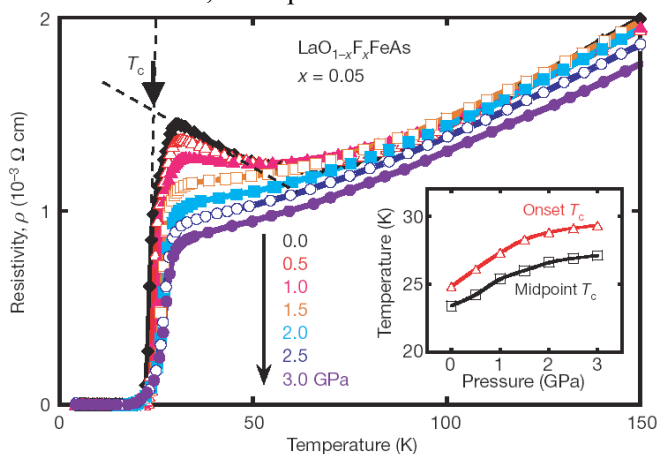


Рис.3 Температурные зависимости удельного сопротивления $LaO_{1.95}F_{0.05}FeAs$ при $P \leq 3$ ГПа (на вставке – зависимости температур начала и средней точки резистивного перехода от P).

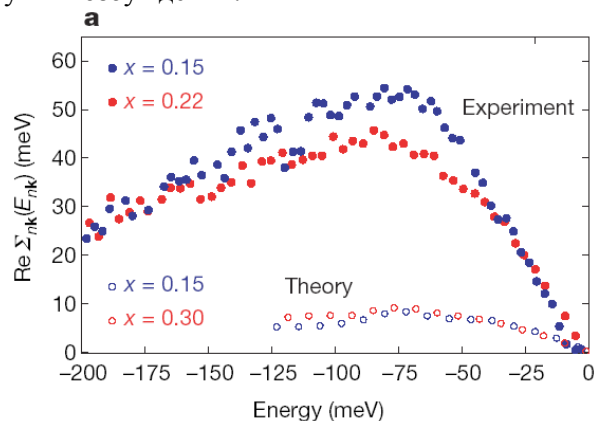
К экспериментальным и теоретическим исследованиям нового класса сверхпроводников уже подключились ученые всего мира, в том числе и из России [3]. Наряду с обсуждением механизма их сверхпроводимости (предположительно – нефононного) ведутся активные поиски других сверхпроводников типа $LnOTMPn$ (Ln – иттрий или редкоземельный элемент, O – кислород, TM – переходной металл, Pn – элемент V группы Периодической таблицы). Всем памятен 1986 год, когда P.Chu, прослышав об увеличении T_c в La_2BaCuO_4 под давлением, догадался использовать так называемый эффект “химического давления”, заменил лантан иттрием и преодолел “азотный рубеж”. Та же идея может сработать и в новых безмедных ВТСП. Какой барьер будет взят на этот раз? Может быть, “водяной”? Так, для начала...

Л.Опенев

1. Y.Kamihara et al., *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
2. H.Takahashi et al., *Nature* **453**, 376 (2008).
3. I.A.Nekrasov, Z.V.Pchelkina, M.V.Sadovskii, *Письма в ЖЭТФ* **87**, 647 (2008).

Нефононная природа “кинка” в ВТСП

Эксперименты по фотоэмиссии с угловым разрешением (ARPES) свидетельствуют о наличии в ВТСП излома (“кинка”) в законе дисперсии элементарных возбуждений при энергии (50 ÷ 80) мэВ [1,2]. Этот кинк обычно приписывают взаимодействию электронов с какими-то бозонами (например, фононами или магнонами). Однако расчеты из первых принципов, выполненные сотрудниками Калифорнийского университета в Беркли (США) [3], для $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ показали, что перенормировка электронной собственной энергии за счет электрон-фононного взаимодействия почти на порядок меньше экспериментально наблюдаемой (см. рис.). Отличие теории от эксперимента слишком велико, чтобы списать его на неизбежные для таких сложных расчетов приближения. Такие же результаты получены в работе [4] для кинка в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Таким образом, кинк в ВТСП имеет нефононную природу. Возможно, он появляется из-за взаимодействия электронов со спиновыми флуктуациями. Но нельзя исключить и причастность к нему каких-то других возбуждений.



Действительная часть электронной собственной энергии в $La_{2-x}Sr_xCuO_4$: теория и эксперимент.

Л.Опенев

1. A.Lanzara et al., *Nature* **412**, 510 (2001).
2. P.-D.Johnson et al., *Phys.Rev.Lett.* **87**, 177007 (2001).
3. F.Giustino et al., *Nature* **452**, 975 (2008).
4. P.Heid et al., *Phys.Rev.Lett.* **100**, 137001 (2008).

Каков источник спаривающего взаимодействия в ВТСП?

В спорах о механизме высокотемпературной сверхпроводимости ключевым является вопрос о роли бозонных возбуждений в спаривании электронов. Если куперовские пары формируются вследствие обмена такими возбуждениями, то для описания ВТСП можно использовать теорию типа БКШ-Элиашберга (конечно, с соответствующими модификациями). Если же нет (как считает, например, P.W.Anderson), то механизм спаривания принципиально иной. Кандидатами в “бозонный клей” сейчас считаются: 1) магнитная резонансная мода с энер-

гией около 40 мэВ; 2) спиновые возбуждения с энергией более 40 мэВ; 3) фононы с энергией около 40 мэВ; 4) флуктуации вблизи квантовой критической точки с энергией до нескольких сотен мэВ. Все эти возбуждения в ВТСП присутствуют, но их отношение к спариванию электронов остается предметом дискуссий. Интерпретация экспериментальных данных (как правило, усредненных по образцу) осложняется неоднородностью спаривающего взаимодействия на нанометровых расстояниях.

В работе [1] туннельная проводимость ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ была измерена в разных точках поверхности скола с атомным разрешением. При $T < 110$ К температура фиксировалась с точностью лучше 10 мК. Температурные зависимости туннельных спектров передопированных и оптимально допированных образцов оказались совершенно различными: хотя сильный разброс локальных значений сверхпроводящей щели Δ имел место в обоих

случаях (рис. 1 С,Ф), при избыточной концентрации дырок повышение температуры выше T_c всегда приводило к полному исчезновению особенностей на дифференциальных ВАХ (рис. 1 А,В), тогда как при оптимальном уровне допирования они сохранялись и при $T > T_c$, хотя становились менее выраженными (рис. 1 D,Ф). Электрон-дырочная асимметрия при $T > T_c$ говорит против бозонного происхождения этих особенностей. Авторы [1] считают, что их (согласно теории Р.В.Андерсона) можно объяснить взаимодействием носителей с возбуждениями допированного моттовского диэлектрика, энергия которых достигает, согласно оценке, 400 мэВ. Они, а не бозонные возбуждения ответственны, по-видимому, за спаривание в ВТСП, поскольку выполненный в [1] анализ однозначно указывает на то, что именно эти возбуждения определяют локальную величину Δ .

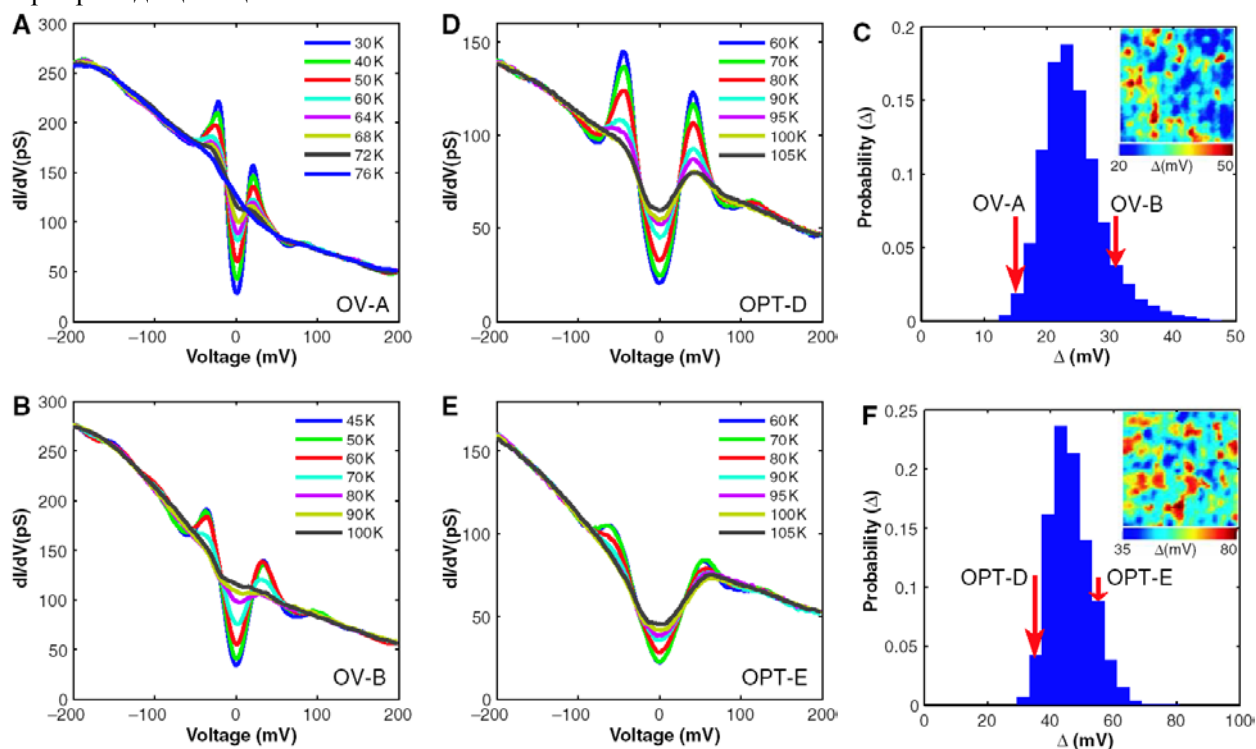


Рис. 1. Локальные дифференциальные ВАХ, измеренные в разных точках сильно передопированных (А,В) и оптимально допированных (D,Е) монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с $T_c = 68$ К и 93 К, соответственно. С и F – распределение локальных значений сверхпроводящей щели Δ в этих образцах.

Л.Опенев

1. A.N.Pasupathy et al., Science 320, 196 (2008).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Четверть электрона

17 апреля группа Heiblum'a из Weizmann Institute of Science (Израиль) опубликовала сенсационное сообщение об экспериментальном наблюдении квази-частиц с зарядом равным четверти заряда электрона ($1/4$) в режиме дробного квантового эффекта Холла (FQHE) с фактором заполнения $\nu=5/2$ [1, 2]. Такой фактор заполнения означает, что две зоны Ландау полностью заполнены, а одна – наполовину. Заряд частиц удалось определить в результате измерения

дробового шума тока, протекающего через сужение в двумерном электронном газе. Мощность такого шума, как известно, пропорциональна заряду частиц. Ранее аналогичные эксперименты позволили уже наблюдать частицы с дробным зарядом, но все эти дроби имели нечетные знаменатели. Повышенный интерес именно к заряду $1/4$ связан с топологическим квантовым компьютером.

Остановимся на подробностях рассматриваемого эксперимента. Наличие возбуждений двумерного

электронного газа с зарядом $1/4$ в режиме дробного квантового эффекта Холла с фактором заполнения $\nu=5/2$ предсказывала теория. Однако для наблюдения таких квазичастиц понадобились достаточно совершенные структуры. Лучшие по качеству гетероструктуры на основе GaAs/AlGaAs выращиваются как раз в Weizmann Institute of Science. Здесь получены рекордные подвижности двумерного электронного газа, а значит и максимальная длина свободного пробега электронов. На рис. 1а представлены зависимости продольного (диссипативного) и холловского сопротивлений от магнитного поля. На холловской кривой хорошо видны широкие ступени, соответствующие целочисленному квантовому эффекту Холла. Эти ступени наблюдают многие. В промежутке едва заметны очень узкие ступени, отвечающие дробному эффекту. Эти ступени видят только избранные.

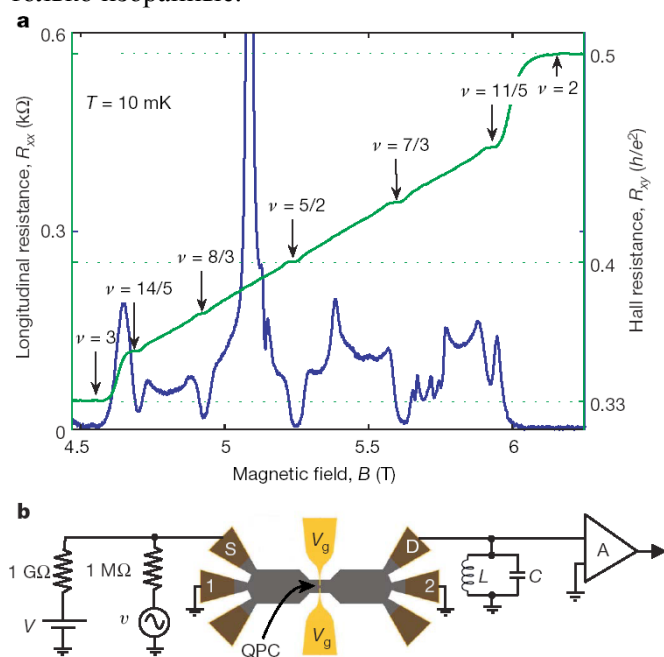


Рис. 1. *a* - Зависимость от магнитного поля продольного сопротивления (синяя кривая) и холловского сопротивления (зеленая кривая); *b* - схема устройства: ток, пропускаемый между контактами S и D, проходит через сужение (QPC).

При некоторых дробных величинах фактора заполнения двумерная сильно взаимодействующая система электронов приходит в состояние с упорядочиванием (аналог кристаллизации). В результате кулоновская энергия взаимодействия электронов понижается, и возникает небольшая щель в энергетическом спектре. Она и приводит к образованию небольшой ступени на холловском сопротивлении. Из-за наличия щели в этом состоянии при низкой температуре электронный ток является бездиссипативным, как в сверхпроводниках. Диссипативная компонента тока возникает из-за наличия возбуждений в этой системе (квазичастиц). Квазичастицы такого состояния могут обладать дробным зарядом и статистикой отличной от фермионов и бозонов. Квантовая электродинамика в четырехмерном про-

странстве-времени устанавливает четкую связь статистики со спином. Для пространственных двумерных систем это утверждение не работает.

Измерение дробового шума тока, протекающего через сужение, позволило определить заряд квазичастиц, соответствующих ступени $\nu=5/2$, как четверть заряда электрона. Попутно авторы исследовали и другие ступени, приведенные на рис. 1а.

В.Вьюрков

1. M. Dolev et al. *Nature* 452, 829 (2008).
2. E. Fradkin. *Ibid*, p. 823.

Топологический квантовый компьютер

Главное препятствие на пути создания квантового компьютера, помимо технологических проблем, представляет декогерентизация, которая нарушает состояние квантовой системы и не позволяет проводить вычисления. Усилия теоретиков распределились по трем направлениям. Одни разрабатывают методы коррекции ошибок. Для квантового компьютера это сделать очень не просто из-за теоремы, запрещающей клонирование неизвестного состояния квантовой системы. Пока только возможно исправление некоторых типов ошибок. В другом направлении ищут возможности подавления процессов декогерентизации. И, наконец, в третьем направлении изобретают квантовые системы, устойчивые к этим процессам. Именно по этому пути пошел Алексей Китаев (California Institute of Technology), который в 1997 г. предложил использовать топологические состояния анионов для квантовых вычислений. Интуитивно идея ясна: как состояние не деформируй, его топология будет сохраняться. Можно из бублика сделать чашку, но топология останется прежней.



Рис. «Плетение» топологического квантового компьютера.

Слово анион (anyon) не имеет никакого отношения к слову анион (anion) – отрицательно заряженный ион. Оно происходит из слова «anyone» и означает, что перестановка таких частиц изменяет фазу волновой функции на любую величину в интервале от 0 до π . Для бозонов изменение фазы при перестановке равно 0, а для фермионов – π . Анионы обладают свойством, присущим фермионам. Для них работает принцип запрета Паули: две частицы не могут находиться в одинаковом состоянии. Иными словами, траектории этих частиц в пространстве-времени не могут пересекаться и сливаться, как траектории бозонов. Если перестановку частиц изображать как скрещивание траекторий, то возникает

аналогия с пряжей. Состояниям из n анионов могут соответствовать топологически различные переплетения. Этот зрительный образ позволяет построить математические теории соответствующих групп и алгебр, которые оказываются не-абелевыми. На этих состояниях (braiding anyons) можно построить квантовый компьютер в результате «плетения» (см. рис.). Для этой цели особенно удобны частицы с зарядом $1/4$, которые недавно обнаружены в эксперименте. При перестановке таких частиц фаза волновой функции изменяется на $\pi/4$. Система, содержащая $2n$ таких частиц, имеет 2^{n-1} топологически различных состояний. Это и есть основа для квантового компьютера подобно тому, как обычные кубиты в запутанных состояниях создают основу для квантовых вычислений. Устойчивость к декогерентизации интуитивно понятна: как пряжу не трепать – переплетения сохраняются. Кстати, если попробовать аналогию с плетением перенести на электроны, то получим следующее: все переплетения n электронов оказываются топологически одинаковыми.

Чтобы несколько убавить разгоряченность, назовем еще не решенные проблемы в области топологических компьютеров. Хотя и показано, что на этом принципе можно создать универсальный компьютер, который может решать любые задачи, пока не разработаны квантовые алгоритмы, аналогичные алгоритму Шора и Гровера, применяемые для традиционных квантовых компьютеров. Это означает, что пока не известно, будут ли эти алгоритмы давать ускорение вычислений на топологическом квантовом компьютере по сравнению с классическим компьютером. Кроме того, источником декогерентизации может оказаться «вплетение» новых квазичастиц или разрыв нитей, т.е. уничтожение нужных квазичастиц.

В.Вьюрков

I. L. Venema. *Nature* **452**, 803 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Продолжаются токсикологические исследования углеродных нанотрубок in vivo

Китайские ученые, занимающиеся вопросами токсичности наноматериалов, в кратком обзоре [1] представили наиболее важные результаты недавних экспериментов на мышах. Отдавая должное простому и эффективному радиоиндикаторному методу изучения биораспределения углеродных нанотрубок *in vivo* (описанному, например, в *ПерсТе* [2]), они, тем не менее, отметили, что он подходит для довольно короткого слежения и не может дать полной картины. Новый шаг к пониманию того, как воздействуют нанотрубки на живой организм, сделан в работе S. Gambhir и его коллег из Стэнфордского университета (США) [3]. Исследователи изучали острую и хроническую токсичность одностен-

ных нанотрубок (ОСНТ) при введении их в систему кровообращения мышей путем инъекций. Предварительные исследования на небольшой группе мышей не выявили токсичности функционализированных углеродных одностенных нанотрубок (ОСНТ) в течение 4 месяцев [3].



Рис. Группа из пяти лабораторных мышей [1].

Будущее использование углеродных нанотрубок и других наноматериалов в биомедицинских целях (например, для диагностики или доставки лекарств в живом организме) требует изучения *in vivo*. Однако в последнее время в России проявляется резко негативное отношение (которое поддерживается средствами массовой информации) к проведению экспериментов на животных. Телеведущие и некоторые журналисты объясняют нам, что для развития медицины и биологии достаточно компьютерного моделирования. Конечно, компьютерные методы и разнообразные методы *in vitro* очень полезны и широко используются, но они могут служить лишь дополнением, а не альтернативой исследованиям *in vivo*. Современная биомедицина не может обойтись без экспериментов на лабораторных животных. Такие эксперименты являются важнейшим этапом доклинических исследований. Только в них можно получить данные о дозах, фармакокинетике веществ, только в них можно изучить побочные эффекты, токсичность, канцерогенность [4]. Заметим, что основные принципы постановки экспериментов с использованием лабораторных животных четко регламентируют обязанности экспериментатора, и результаты экспериментов, в которых животным причинялись излишние страдания, не могут быть представлены ни в научных журналах, ни на конференциях.

Пока защитники прав животных не добились прекращения исследований, ученые продолжают проводить важные эксперименты на мышах. В работе [3] было изучено воздействие двух типов ОСНТ - с нековалентной функционализацией полиэтиленгликолем (ОСНТ-ПЭГ) как «наименее токсичный сценарий» и с ковалентной функционализацией полиэтиленгликолем окисленных нанотрубок (ОСНТ-О-ПЭГ) как «наиболее токсичный сценарий». Растворы с ОСНТ были введены внутривенно; в контрольный экземпляр вводили физиологический раствор. Использовались группы из 5 мы-

шей, в каждой группе были мыши одного пола, подопытной была одна из них. В статье указано, что эксперименты проводили в соответствии со всеми действующими правилами и рекомендациями использования животных.

За мышами вели постоянное наблюдение. Не было замечено ни изменения внешнего вида, ни каких-либо особенностей в поведении животных, которым были сделаны инъекции. Регулярно проводили полный биохимический анализ крови. Он не выявил статистически значимых различий между группами, а также изменений в течение всех четырех месяцев эксперимента. Исследования *in vitro* (атомная силовая микроскопия и рамановская спектроскопия) тканей, взятых у мышей после окончания эксперимента, показали, что как ОСНТ-ПЭГ, так и ОСНТ-О-ПЭГ сохранились внутри макрофагов* печени; при этом отсутствовали признаки какой-либо патологии.

Это первое систематическое исследование токсичности введенных внутривенно ОСНТ, однако из-за небольшого количества изученных животных авторы рассматривают его как пилотное. Кроме того, эксперименты проводили на иммунодефицитных мышах. Для тщательной оценки токсичности нанотрубок необходимо проведение экспериментов с использованием достаточно большого количества животных [1,3].

* Макрофаги – (от греч. *makrós* – большой и *phágos* – пожиратель) крупные клетки, принимают участие в работе врожденного и приобретенного иммунитета. Активно захватывают и «поедают» чужеродные частицы (вирусы, бактерии, токсичные для организма частицы). Макрофаги участвуют в заживлении ран, удалении отживших клеток. Тканевые макрофаги распространены по всему телу; например, к ним относят так называемые купферовские клетки печени. Термин введен И.И. Мечниковым в 1892 г.

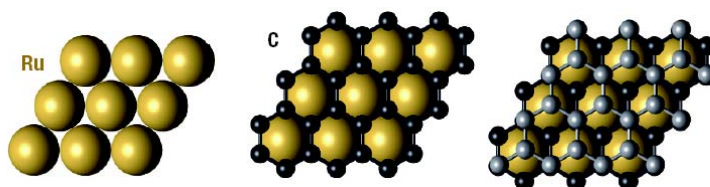
О.Алексеева

1. Y. Zhao et al. *Nature Nanotech.* **3**, 191 (2008).
2. *ПерсТ* **15**(8) (2008) с.5
3. M.L. Schipper et al. *Nature Nanotech.* **3**, 216 (2008).
4. <http://www.neuroscience.ru> Современная нейробиология и нейронауки.

Рутениевые подложки для графена

Уникальные электронные характеристики графена (монослоя атомов углерода) делают его перспективным материалом для использования в нанoeлектронике, квантовой информатике и пр. Поэтому встает вопрос о производстве графена в больших количествах. Трудоемкая и не отличающаяся воспроизводимостью методика микромеханического отщепления графеновых слоев от графита здесь не годится. Альтернативой является эпитаксиальный рост графена на подложке, например на 6H-SiC или 4H-SiC [1]. Но здесь возникают проблемы, связанные с малыми поперечными размерами графеновых областей и их неоднородностью по толщине. При использовании подложек из переходных металлов взаимодействие

атомов углерода с подложкой ведет к существенному изменению электронной структуры графена и препятствует его отделению для переноса на другие подложки [2]. Новая технология эпитаксии графена на Ru(0001) разработана в Brookhaven National Laboratory (США) [3]. Хотя первый графеновый слой действительно очень сильно взаимодействует с подложкой, но уже второй слой (см. рис.) с ней практически не связан. Характерные размеры монокристаллических графеновых областей превышают 200 мкм, что вполне подходит для большинства практических применений.



Схематическое изображение фрагментов подложки Ru и осажденных на нее монослоя графена и двуслойного графена.

Л.Опенев

1. W.A. de Heer et al., *Solid State Commun.* **143**, 92 (2007).
2. S. Marchini et al., *Phys. Rev. B* **76**, 075429 (2007).
3. P.W.Sutter et al., *Nature Mater.* **7**, 406 (2008).

СПИНТРОНИКА

Электрическое управление ферромагнетизмом в полупроводнике (Ga,Mn)As

В последнее время все чаще появляются сообщения об управлении магнитным состоянием вещества с помощью электрического поля без привлечения токов, а значит, без омических потерь (см. напр. *ПерсТ* т.13, вып.10; т.15 вып.4, вып.9). Однако в большинстве случаев это управление реализуется в ферромагнитных оксидах, плохо совместимых с полупроводниковой технологией. В недавней статье в *Nature Materials* [1] сообщается об управлении ферромагнетизмом в магнитном полупроводнике (Ga,Mn)As с помощью электрического поля.

Идея устройства схожа с принципом действия полевого транзистора (рис.1): изменение электрического потенциала на затворе изменяет концентрацию дырок в полупроводниковом материале под ним. Только в данном случае изменение концентрации сказывается не только на проводимости материала, но и на ферромагнетизме, поскольку обменное взаимодействие между ионами марганца, упорядочивающее магнитные моменты в веществе, осуществляется в (Ga,Mn)As дырками валентной зоны. Другой особенностью данной структуры является то, что в качестве изолятора между электродом затвора и полупроводником служит не просто слой диэлектрика, а сегнетоэлектрик с большой поляризуемостью (ferroelectric-gate field-effect transistor (FeFET)).

Как и в истории создания полевого транзистора, простота идеи отнюдь не означала простоту ее тех-

ПерсТ, 2008, том 15, выпуск 10

нической реализации. В данном случае основные трудности были следующие:

а) равновесная концентрация дырок в материале (Ga,Mn)As довольно высока (10^{20} – 10^{21} см⁻³), и для того, чтобы изменения в концентрации, наводимые напряжением на затворе, были заметными, и чтобы избежать эффекта экранировки поля затвора, потребовалось уменьшить толщину полупроводника до 7 нм; подложка из материала с большей величиной запрещенной зоны (Ga,Al)As позволяет создать еще большее пространственное ограничение для дырок (а, следовательно, уменьшить эффективную толщину канала);

б) вторая трудность состоит в плохой технологической совместимости (Ga,Mn)As и сегнетоэлектриков, поскольку при изготовлении последних требуется производить отжиг при температурах 400–600 °С, а при этом в арсениде галлия резко уменьшается концентрация ионов Mn, и, соответственно, теряются магнитные свойства полупроводника; выход состоял в использовании вместо обычного перовскитного сегнетоэлектрика полимерного материала – фторида поливинилидена с трифторэтиленом, его температура отжига составляла всего 140 °С.

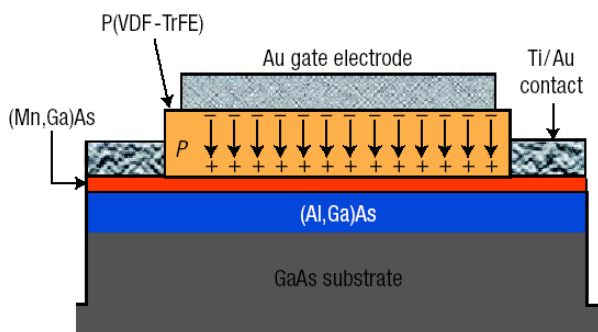


Рис. 1. Схема устройства: полупроводниковый канал из (Ga,Mn)As толщиной 7 нм проходит под затвором из золота, изолированным с помощью сегнетоэлектрика на основе полимера (P(VDF-TrFE), polyvinylidene fluoride trifluoroethylene). Промежуточный (Al,Ga)As слой между проводящим каналом и подложкой из GaAs служит для пространственного ограничения дырок и уменьшения эффективной толщины слоя (Ga,Mn)As. Подача напряжения на затвор существенно изменяет концентрацию дырок в (Ga,Mn)As, и, следовательно, его магнитные и проводящие свойства.

Надо отметить, что это далеко не первая попытка на принципе полевого транзистора осуществить управление магнетизмом в полупроводниках. В отличие от предыдущих реализаций, использовавших в качестве изолятора обыкновенный диэлектрик [2,3], данную схему отличают относительно небольшие управляющие напряжения (десятки вольт вместо сотен) и энергонезависимый (non-volatile) характер намагниченного состояния – система «запоминает» его после снятия электрического напряжения. Как считают авторы [1], продемонстрированный ими принцип откроет дорогу к созданию

новых многофункциональных устройств программируемой логики и компьютерной памяти.

А. Пятаков

1. I. Stolichnov et al, *Nature Mater.* 7, 464 (2008).
2. H. Ohno, *Nature*, 408, 944 (2000).
3. D. Chiba, *Appl. Phys. Lett.* 89, 162505 (2006).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Влияние экранирования на эмиссионные свойства катода на основе углеродных нанотрубок

Важнейшей особенностью углеродных нанотрубок (УНТ), определяющей возможность их эффективного использования в качестве основы холодных полевых эмиссионных катодов, является их способность усиливать электрическое поле. Это свойство обусловлено чрезвычайно высоким аспектным отношением (отношением длины к диаметру), присущим УНТ. Поскольку ток полевой эмиссии характеризуется экспоненциальной зависимостью от напряженности электрического поля на поверхности катода, то катоды на основе УНТ являются источниками достаточно высоких токов при относительно небольших величинах приложенного напряжения. Однако естественное стремление повысить плотность тока подобного эмиттера за счет увеличения поверхностной плотности нанотрубок наталкивается на ограничение, обусловленное явлением электростатического экранирования УНТ. В самом деле, высокий коэффициент усиления электрического поля, величина которого порядка аспектного отношения эмиттера, реализуется только в случае, когда нанотрубки, образующие катод, расположены достаточно далеко друг от друга. Однако в этом случае плотность тока эмиссии относительно невелика. Уменьшение среднего расстояния между нанотрубками приводит, с одной стороны, к увеличению плотности эмиттеров, а с другой стороны - к снижению коэффициента усиления индивидуальных УНТ вследствие эффекта экранирования. При плотном сближении нанотрубок эффект усиления поля вовсе пропадает, а вместе с ним пропадают преимущества нанотрубок в качестве источника эмиссии. В этом случае катод эмитирует как плоский эмиттер. Таким образом, плотность тока эмиссии характеризуется немонотонной зависимостью от среднего расстояния между индивидуальными нанотрубками. Расчеты показывают, что максимальная величина плотности тока эмиссии достигается при расстоянии между нанотрубками, составляющем примерно половину их высоты.

Более сложный характер экранирования наблюдается в весьма распространенном случае, когда эмиттер состоит не из изолированных УНТ, а из жгутов, каждый из которых включает в себя несколько десятков нанотрубок.

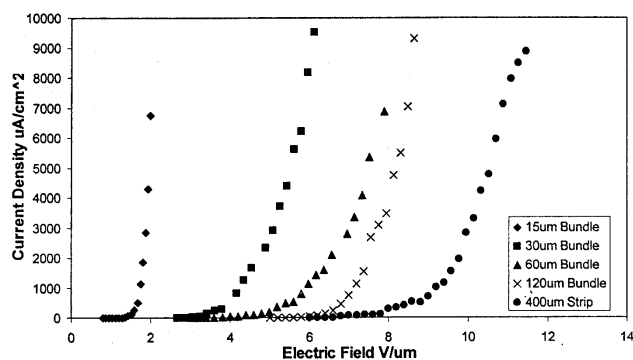


Рис. 1. Зависимость плотности тока эмиссии индивидуального жгута УНТ от его диаметра.

Математическое моделирование такой ситуации наталкивается на значительные вычислительные трудности, поэтому основным источником информации в этом случае является эксперимент. Недавно группа специалистов из университетов штатов Орегон и Вашингтон (США) выполнила детальные экспериментальные исследования явления усиления электрического поля катода, составленного из жгутов УНТ различного диаметра при наличии эффекта экранирования. 320 индивидуальных вертикально ориентированных жгутов высотой около 100 мкм и диаметром 120, 60, 30 и 15 мкм размещали регулярным образом на подложке размером 3600x3600 мкм на расстоянии 200 мкм друг от друга. Нанотрубки выращивали на кремниевой подложке методом CVD в потоке $H_2 + C_2H_2$ при температуре 700°C с использованием катализатора на основе железа. Диаметр жгута определялся размером частицы катализатора. Индивидуальные нанотрубки, образующие жгуты, имели диаметр 10–15 нм, состояли из 5–7 графитовых слоев и располагались в среднем на расстоянии около 50 нм друг от друга. При исследовании эмиссионных свойств катода в качестве анода использовали цилиндрический вольфрамовый зонд диаметром 150 мкм с плоской вершиной. Тем самым площадь поверхности анода значительно превышала поперечное сечение любого жгута, однако его диаметр оставался меньше расстояния между жгутами. Измерения эмиссионного тока производили при межэлектродном расстоянии 100 мкм. Результаты выполненных измерений, представленные на рис. 1, указывают на сильную зависимость вольт-амперных характеристик эмиттера от диаметра жгута. Чем меньше диаметр жгута, тем при меньшем приложенном напряжении наблюда-

ется эмиссия. Обработка представленных характеристик в координатах Фаулера-Нордгейма приводит к величинам коэффициента усиления электрического поля $\beta = 602, 639, 1013, 1726$ и 2425 для жгутов диаметром 400, 120, 60, 30 и 15 мкм, соответственно.

А.В.Елецкий

I. D. McClain et al. J. Phys. Chem. 111, 7514 (2007).

КОНФЕРЕНЦИИ

IX Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС – 9) 17-23 ноября 2008 г, г. Екатеринбург, Россия

- Магнитные свойства;
- Фазовые переходы и критические явления;
- Проводимость и транспортные явления;
- Оптика и спектроскопия;
- Резонансные явления;
- Физика низких температур;
- Структурные и механические свойства твердых тел;
- Неразрушающий контроль;
- Теплофизические свойства веществ;
- Электрофизика.

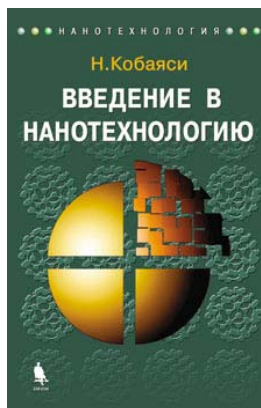
ВАЖНЫЕ ДАТЫ

Последний срок подачи заявок — **30 сентября**.

Последний срок подачи тезисов — **30 сентября**.

Web: (<http://www.imp.uran.ru/PUBLIC/young/spfks/>)

НОВЫЕ КНИГИ



Вышло в свет третье переводное издание популярной книги Н. Кобаяси «Введение в нанотехнологию» (2008, издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»). В Москве ее можно приобрести в магазине «Книги» по адресу Перовское ш., д. 10/1, тел. (495) 171-19-54, (495) 170-66-74 или в интернет-магазинах (например, <http://www.lbz.ru>, <http://www.ozon.ru>, <http://www.my-shop.ru>, <http://www.book.ru> и др.).

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.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64