

В этом выпуске:

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Релаксация к равновесию в квантовом мире

Наш повседневный опыт говорит о том, что любая классическая физическая система после того или иного внешнего воздействия стремится перейти в равновесное состояние (рис. 1). Однако так ведут себя не все системы, а лишь те из них, которые с течением времени способны побывать во всех доступных для них состояниях. Такие системы называются эргодическими. Концепции эргодичности и необратимости в классической статистической механике впервые сформулировал Людвиг Больцман. В 1872 году он доказал, что идеальный газ приходит к равновесию всегда, независимо от типа его начального неравновесного состояния. Но существует класс многочастичных классических систем, описываемых так называемыми интегрируемыми моделями, динамика которых является неэргодической и не допускает релаксации этих систем к равновесию. Дело в том, что такие системы характеризуются бесконечным числом законов сохранения и поэтому не могут попасть во все точки их фазового пространства. Более того, математиками доказана теорема о том, что "почти интегрируемые" классические системы (например, цепочка связанных нелинейных осцилляторов) также являются неэргодическими.



Рис.1. На пути к равновесию: холодное молоко перемешивается с горячим кофе, и во всех точках занимаемого этой смесью объема устанавливается одинаковая температура.

Пока одни спорят друг с другом, есть ли у этой теоремы аналог в квантовой динамике, другие пытаются получить ответ от Природы и проводят эксперименты. В качестве типичного представителя квантовых почти интегрируемых систем они обычно используют конденсат холодных бозе-атомов в магнитной ловушке. Год назад было обнаружено [1], что после "встряски" такого бозе-конденсата равновесие в нем не устанавливается в течение очень длительного времени: при столкновениях атомы раз за разом как бы "проходят друг сквозь друга" без признаков релаксации, что интерпретировалось как свидетельство неэргодичности квантовых почти интегрируемых систем, схожих в этом отношении со своими классическими аналогами. Но результаты, полученные недавно немецкими и австрийскими физиками [2], ставят такой вывод под сомнение. Авторы [2] адиабатически расщепляли заключенный в одномерную ловушку бозе-конденсат из нескольких тысяч атомов рубидия на две части, создавая в поперечном направлении (с помощью ВЧ излучения) двухъямный потенциал с регулируе-

И далее ...

2 Перемещение атома-кубита оптическим пинцетом

3 Независимые фотоны запутались

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

4 Как в графене сделать щель?

СВЕРХПРОВОДНИКИ

5 Флуктуационная сверхпроводимость органических сверхпроводников вблизи моттовского состояния

6 Сверхпроводимость и волна зарядовой плотности: враги или союзники?

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

6 Селективное выжигание однослойных нанотрубок в зависимости от радиуса и хиральности

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

7 Органическая спинтроника

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

8 Нанoeлектроника. Лукавая цифра?

Научная сессия ОФН РАН

10 28 ноября 2007 г.

мой высотой барьера. Непосредственно после расщепления фазы обоих конденсатов совпадали, о чем свидетельствовал вид интерференционной картинки, возникающей вследствие перекрытия двух атомных облаков при выключении формирующих ловушку полей (рис. 2).

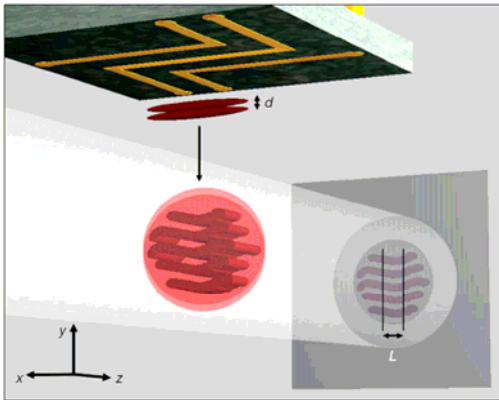


Рис. 2. Схематическая иллюстрация эксперимента по расщеплению бозе-конденсата атомов рубидия на два квазиконденсата и их последующей интерференции.

Если же после расщепления эти конденсаты сначала выдерживались в своих половинках ловушки в течение некоторого времени и лишь затем интерферировали, то интерференционный узор оказывался размытым, что количественно выражалось в уменьшении фактора когерентности Ψ , являющегося мерой флуктуаций относительной фазы конденсатов ($\Psi = 1$ в отсутствие флуктуаций) (рис. 3).

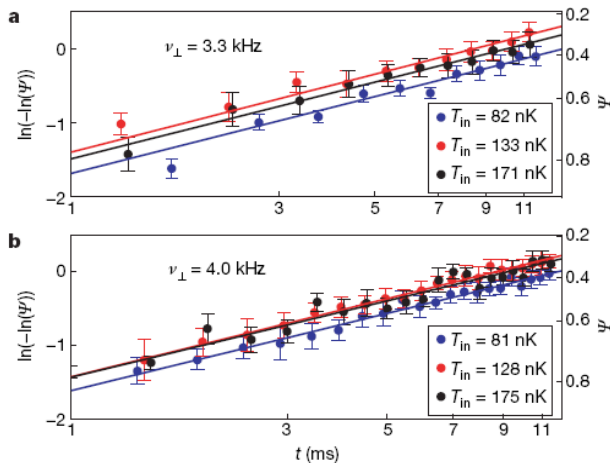


Рис. 3. Эволюция фактора когерентности Ψ двух не взаимодействующих конденсатов в ловушках с различной частотой поперечных колебаний $\nu_{\perp}$ при различных начальных температурах T_{in} .

Зависимость Ψ от t имеет вид $\Psi(t) \sim \exp[-(t/t_0)^a]$ с $t_0 = (5 \div 9)$ мс и $a = 0.64 \div 0.67$, что отлично согласуется с теорией [3], предсказывающей $a = 2/3$. Причиной потери конденсатами своей когерентности и их релаксации к тепловому равновесию являются межатомные взаимодействия, которые приводят к различной эволюции фаз конденсатов после расщепления. Пока не вполне понятно, с чем связано расхождение результатов работ [1] и [2]: то ли с разными начальными состояниями, то ли с

различием радиальных компонент потенциала ловушки (что влияет на точность описания в рамках интегрируемой модели), то ли с разными температурами.... Остается открытым фундаментальный вопрос: какого типа и какой величины должно быть возмущение, чтобы восстановить эргодичность почти интегрируемой квантовой системы и позволить ей достичь равновесия?

1. T.Kinoshita et al., *Nature* **440**, 900 (2006).
2. S.Hofferberht et al., *Nature* **449**, 324 (2007).
3. A.A.Burkov et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 200404 (2007).

Перемещение атома-кубита оптическим пинцетом

К настоящему времени предложено несколько различных вариантов архитектуры квантовых вычислительных устройств, допускающих масштабирование до полноценного квантового компьютера. Наиболее привлекательной представляется такая организация вычислений, при которой большое число независимых друг от друга кубитов хранится в одной части компьютера (регистре). Операции с отобранными для этой цели кубитами осуществляются в другой его части, которую можно назвать "операционной" (после чего кубиты возвращаются обратно в регистр), а измерения проводятся в третьей части, куда подлежащие измерению кубиты переносятся опять же из регистра [1]. Все эти манипуляции в принципе можно проделывать с нейтральными атомами-кубитами в дипольных ловушках. Для транспортировки атомов между ловушками можно использовать так называемый "оптический пинцет", образованный сфокусированными лазерными пучками [2]. Но при этом возникают два принципиальных вопроса: 1) как сильно нагреваются атомы в процессе такой транспортировки? и 2) сохраняется ли при этом когерентность? Ведь требуется перемещать не просто атомы, а когерентные суперпозиции атомных состояний (то есть суперпозиции логических состояний кубитов, ассоциируемых с этими атомами).

В работе [3] французских ученых из CNRS на оба вопроса дан положительный ответ. Авторам [3] удалось передвинуть атом ^{87}Rb между дипольными ловушками так аккуратно, что и его начальная температура (56 мК) осталась неизменной в пределах погрешности эксперимента, и суперпозиционное состояние $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ сохранилось не хуже, чем если бы в течение всего времени, затраченного на перемещение (около 200 микросекунд), (рис. 1) кубит оставался нетронутым в своей ловушке. Следовательно, движение атома не приводит к появлению новых каналов декогерентизации. Роль базисных состояний кубита $|0\rangle$ и $|1\rangle$ при этом играли состояния сверхтонкой структуры с величиной полного углового момента $F = 1$ и 2,

соответственно (проекция момента на ось квантования в обоих случаях равна нулю). Максимальное ускорение a атома в процессе его перемещения составило около 15 м/с^2 , что на три порядка меньше предельной величины a , при которой движение становится заведомо неадиабатическим. Используемая в работе [2] методика позволяет контролируемым образом перемещать атомы по двум ортогональным направлениям на расстояние до нескольких десятков микрон (рис. 2). Следующим этапом этого направления работ по организации квантовых вычислений в масштабируемых системах должна стать демонстрация когерентного взаимодействия двух и более атомов-кубитов в "операционной части" компьютера.

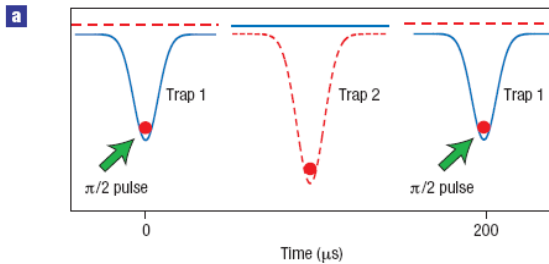


Рис. 1. Иллюстрация процесса переноса атома-кубита ^{87}Rb из одной дипольной ловушки в другую и обратно. Первый $\pi/2$ -импульс создает исходное суперпозиционное состояние $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, а второй служит для измерения конечного состояния.

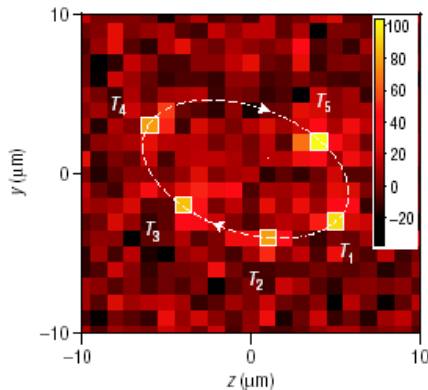


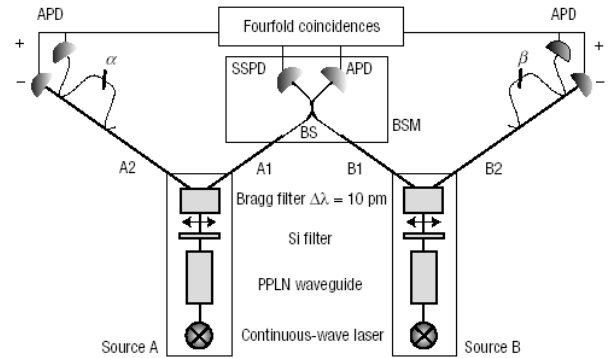
Рис. 2. Результаты исследования флюоресценции атома ^{87}Rb при его движении по эллиптической траектории: сумма пяти изображений, полученных на различных этапах движения. Цветная шкала показывает число срабатываний CCD-детектора в расчете на один пиксель (за вычетом фона).

1. D.Kielpinski et al., *Nature* **417**, 709 (2002).
2. Y.Miroshnychenko et al., *Nature* **442**, 151 (2006).
3. J.Beugnon et al., *Nature Phys.* **3**, 696 (2007).

Независимые фотоны запутались

Главная проблема в квантовой коммуникации заключается в том, что в каналах связи существует затухание. Фотоны гибнут, не дойдя до цели. Недавно удалось продемонстрировать работу секретного квантового канала длиной 144 км (ПерсТ, том 14, вып. 3, 2007). И это предел. Если брать большие расстояния, то появляется возможность незаметного подслушивания. Становится трудно отли-

чить естественное пропадание фотонов от пропадания в результате подслушивания. Для увеличения расстояния требуются повторители. Однако квантовая механика запрещает как неразрушающее измерение, так и клонирование (копирование) состояния квантовой системы. Пока единственная реальная возможность повторителя выглядит следующим образом. Старейший фотон приходит к повторителю, где его состояние передается на молодой фотон в результате операции entanglement SWAP (обмен состояниями в результате запутывания). Молодой фотон уносит состояние до следующего повторителя, и т.д. Такой повторитель пока не сделан. Для начала надо хотя бы запутать состояния фотонов от различных удаленных источников.



Это удалось ученым из University of Geneva [1, 2]. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке. В качестве источника пар фотонов используется нелинейный кристалл, в котором распадаются фотоны от лазера (down-conversion). Их пропускают через узкополосный брэгговский фильтр, чтобы сделать фотоны идентичными. После этого из источников вылетают запутанные идентичные ЭПР-пары фотонов (A_1, A_2) и (B_1, B_2). Фотоны (A_1, B_1) пропускаются через 50% делитель и попадают на детекторы SSPD и APD. Срабатывание обоих детекторов означает, что эти фотоны были в антисимметричном по перестановкам пространственном состоянии. Для фотонов как бозе-частиц это означает, что и поляризационная часть их волновой функции тоже является антисимметричной, а это возможно только при их запутанности. Подобное измерение является одним из вариантов измерения Белла, которое предназначено для выяснения симметрии квантового состояния двух частиц. Таким образом, в результате такого измерения выяснилось, что пара фотонов (A_1, B_1) была запутанной, а это означает, что и пара оставшихся в живых фотонов (A_2, B_2) тоже стала запутанной, учитывая изначальную запутанность ЭПР-пар. Это доказывается измерением состояния этой пары. Срабатывание одного из детекторов SSPD или APD (т.е. оба фотона попадают в один детектор) означает симметричное пространственное состояние фотонов (A_1, B_1), которое не гарантирует их запутанность.

Главным препятствием при реализации этого эксперимента является обеспечение синхронного попадания фотонов на делительную пластину. Подобный эксперимент уже был выполнен раньше [3], но тогда источники фотонов находились рядом, что позволяло добиться их синхронизации. В настоящем эксперименте из-за удаленности источников пришлось надеяться только на случайное совпадение. В результате число благоприятных событий было в 100 раз меньше и составляло всего 5 событий в час. Для целей коммуникации это конечно слишком мало, но это только первый шаг.

В.Вьюрков

1. *Nature Physics* **3**, 687, (2007).
2. *Nature Physics* **3**, 692, (2007).
3. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 240502, (2006).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Как в графене сделать щель?

Нет, речь идет не о том, чтобы просверлить в графене (монослое атомов углерода) дырку. Имеется в виду диэлектрическая (или полупроводниковая) щель в плотности электронных состояний. Дело в том, что бесщелевой линейный закон дисперсии квазичастиц в графене (который, собственно, и определяет уникальные физические свойства графена) препятствует широкому использованию графена в нанoeлектронике. Связано это с тем, что большинство (хотя и не абсолютное) электронных устройств (например, транзисторы) основано на полупроводниках, в электронном спектре которых имеется щель, отделяющая валентную зону от зоны проводимости. Чтобы сформировать в графене такую щель, было предложено несколько способов, основанных преимущественно на ограничении движения электронов в одном или даже в двух направлениях, для чего из графена изготавливали полоски или квантовые точки [1,2]. Но это достаточно сложно и не очень практично. Гораздо более простой и изящный способ диэлектризации графена предложили испанские и американские физики в работе [3]. Они показали, что взаимодействие графена с подложкой может индуцировать в нем полупроводниковую щель шириной до 0.3 мэВ (рис. 1).

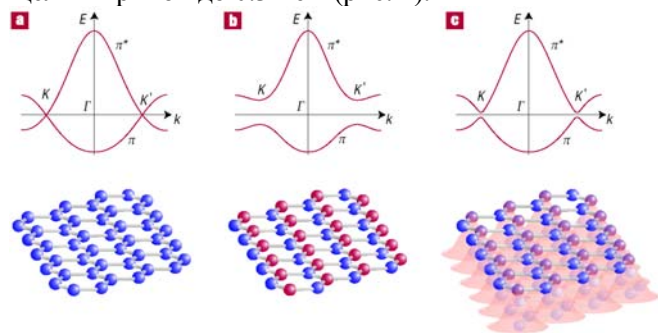


Рис. 1. Схематическое изображение кристаллической (внизу) и электронной зонной (вверху) структуры изолированного графена (а), нитрида бора (б), эпитаксиального (осажденного на подложку) графена (с).

В чем причина появления этой щели? Вспомним, что отсутствие щели в изолированном графене (рис. 1а) связано с его специфической кристаллической структурой, представляющей собой две вложенные друг в друга эквивалентные подрешетки. В нитриде бора (рис.1б) кристаллические слои имеют такую же структуру (и такое же число валентных электронов в элементарной ячейке), как и графен, но подрешетки уже неэквивалентны, так как одна состоит из атомов бора, а другая – из атомов азота. Такое нарушение симметрии и приводит к возникновению щели в спектре. В предыдущих работах после отщепления графенового слоя от ориентированного графита этот слой помещали на подложку SiO_2 , с которой он взаимодействует посредством очень слабых вандерваальсовских сил, не влияющих на его атомное строение и не нарушающих эквивалентность подрешеток. Авторы [3] использовали в качестве подложки не SiO_2 , а SiC – материал, с которым графен взаимодействует гораздо сильнее. Поскольку только каждый второй атом углерода имеет соседа в подложке (рис. 1с), то это взаимодействие приводит, как и в нитриде бора, к неэквивалентности подрешеток и, соответственно, к диэлектризации спектра. По данным фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) с ростом толщины образца (то есть числа графеновых слоев N) щель быстро уменьшается и обращается в нуль при $N > 4$ (рис. 2). Поскольку уровень Ферми в таком эпитаксиальном графене находится выше щели, то для того чтобы сместить его вниз, требуется небольшое дырочное допирование.

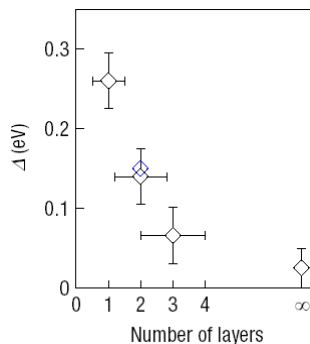


Рис. 2. Зависимость полупроводниковой щели Δ от числа графеновых слоев в образце.

Результаты работы [3] – это еще один шаг на пути к "углеродной электронике". Но не все настроены так оптимистично. Например, Константин Новоселов (один из "отцов" графена) считает, что для однозначного доказательства наличия полупроводниковой щели в изготовленных авторами [3] образцах нужны дополнительные тщательные исследования их электрических свойств. Так или иначе, а взаимодействие графена с подложкой может быть использовано для "инженерии" его электронной структуры.

Л.Опенев

1. A.K.Geim, K.S.Novoselov, *Nature Mater.* **6**, 183 (2007).
2. M.Y.Han et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 206805 (2007).
3. S.Y.Zhou et al., *Nature Mater.* **6**, 770 (2007).
4. K.Novoselov, *Nature Mater.* **6**, 720 (2007).

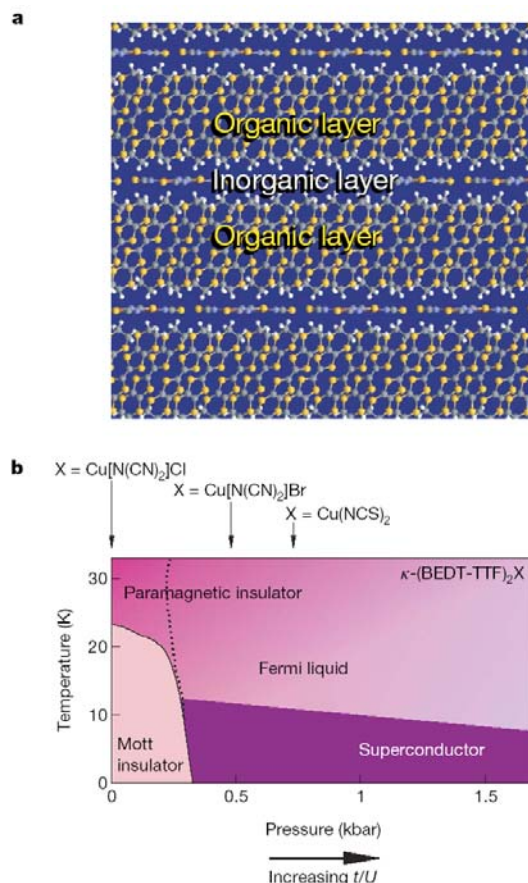
СВЕРХПРОВОДНИКИ

Флуктуационная сверхпроводимость органических сверхпроводников вблизи моттовского состояния

При охлаждении обычных сверхпроводников до критической температуры T_c носители заряда объединяются в куперовские пары. Поскольку для разрыва каждой такой пары требуется затратить некоторую энергию, то в спектре квазичастичных возбуждений возникает щель. Сверхпроводящее состояние макроскопической системы представляет собой когерентную суперпозицию состояний всех куперовских пар, причем фазовая когерентность тоже появляется при температуре T_c , то есть одновременно с самими парами. Именно фазовая когерентность ответственна за два основных отличительных признака сверхпроводимости: нулевое электросопротивление и эффект Мейснера. Но во многих "необычных" сверхпроводниках с сильными межэлектронными корреляциями куперовские пары формируются при температуре выше T_c , то есть выше температуры когерентной "конденсации" пар. Это сопровождается рядом особенностей физических свойств, в своей совокупности называемых "псевдощелевыми". До настоящего времени псевдощелевые явления детально исследовались (за малым исключением) только в одном классе сверхпроводников – ВТСП [1]. Интерпретация экспериментальных данных при этом осложняется сильными тепловыми эффектами (являющимися следствием высоких T_c) и структурным беспорядком, который возникает при изменении концентрации носителей заряда (ключевого параметра, позволяющего "регулировать" свойства ВТСП) за счет изменения содержания кислорода или химического допирования. Кроме того, для изучения характеристик нормального состояния ВТСП при низкой температуре требуются огромные магнитные поля, превышающие H_{c2} .

Чтобы лучше понять физику псевдощелевого состояния, нужно изучить различные классы сверхпроводников, где такое состояние имеет место. Это и послужило авторам работы [2] мотивацией для исследования семейства слоистых органических сверхпроводников $k\text{-(BEDT-TTF)}_2X$, у которых $T_c \approx 10$ К и $H_{c2} < 10$ Тл гораздо ниже, чем у ВТСП. В этих соединениях зона проводимости заполнена ровно наполовину, а изменение X от $X = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$ до $X = \text{Cu}(\text{NCS})_2$ ведет к уменьшению расстояния между димерами BEDT-TTF (как при гидростатическом сжатии), что при описании электронной зонной структуры в рамках модели Хаббарда эквивалентно увеличению матричного элемента перескока t при неизменной энергии одноэлектронного кулоновского отталкивания U (см. рис.). При малых t/U , что отвечает $X = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$, основное состояние является диэлектрическим.

С ростом t/U в соединении с $X = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ появляется сверхпроводимость, а дальнейшее увеличение t/U при $X = \text{Cu}(\text{NCS})_2$ ведет к незначительному понижению T_c . Таким образом, параметр t/U в $k\text{-(BEDT-TTF)}_2X$ – это аналог концентрации дырок в ВТСП, за тем существенным отличием, что его изменение не сопровождается разупорядочением. По данным ядерного магнитного резонанса [3], при $T > T_c$ в $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Br}$ имеет место уменьшение плотности электронных состояний, что напоминает псевдощель в ВТСП с низкой концентрацией дырок.



(a) Кристаллическая структура молекулярных сверхпроводников $k\text{-(BEDT-TTF)}_2X$. Органические молекулы BEDT-TTF образуют проводящие слои, разделенные диэлектрическими слоями неорганической компоненты. (b) Фазовая диаграмма семейства $k\text{-(BEDT-TTF)}_2X$ в координатах температура – "эффективное давление". Соединения с различными анионами X соответствуют различным точкам на горизонтальной оси и характеризуются различными величинами параметра t/U (слева направо – от $X = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$ до $X = \text{Cu}(\text{NCS})_2$).

Поскольку магнитные вихри очень эффективно переносят тепло, то одним из признаков наличия сверхпроводящих флуктуаций при $T > T_c$ является эффект Нернста: возникновение электрического поля $E_y = -NB_z \nabla_x T$, перпендикулярного магнитному полю и градиенту температур. Ранее этот эффект наблюдался в псевдощелевом состоянии ВТСП [4]. В работе [2] обнаружено, что при охлаждении $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Br}$ с $X = \text{Cu}(\text{NCS})_2$ (большая величина t/U) коэффициент Нернста N практически не изменяется, оставаясь близким к нулю вплоть до T_c , а

вот для $X = \text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ ("промежуточная" величина t/U , ближе к области моттовского диэлектрика на фазовой диаграмме) резкий рост N начинается при температуре $T \approx 18$ К, значительно превышающей $T_c \approx 12$ К. Из этого наблюдения авторы делают два вывода: 1) наличие сверхпроводящих флуктуаций при $T > T_c$ в таких разных по химическому составу и электрическим свойствам материалах как органические сверхпроводники и ВТСП говорит о том, что источник флуктуаций следует искать в сильных межэлектронных корреляциях, присутствующих и в том, и в другом классах соединений; 2) флуктуации имеют место в непосредственной близости к фазе моттовского диэлектрика. На основании сравнения своих результатов с различными теоретическими моделями [5,6] авторы [2] пришли к заключению, что наблюдаемые при $T > T_c$ аномалии обусловлены флуктуациями фазы параметра сверхпроводящего порядка, а не его амплитуды.

Л.Опенев

1. T.Timusk, B.Statt, *Rep. Prog. Phys.* **62**, 61 (1999).
2. M.-S.Nam et al., *Nature* **449**, 584 (2007).
3. H.Mayaffre et al., *Europhys. Lett.* **28**, 205 (1994).
4. Z.A.Xu et al., *Nature* **406**, 486 (2000).
5. V.J.Emery, S.A.Kivelson, *Nature* **374**, 434 (1995).
6. A.Pourret et al., *Nature Phys.* **2**, 683 (2006).

Сверхпроводимость и волна зарядовой плотности: враги или союзники?

Области сверхпроводящего и зарядового порядка присутствуют на фазовых диаграммах самых различных соединений, таких как NbSe_3 , $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$, низкоразмерные органические сверхпроводники, дихалькогениды переходных металлов, ВТСП и т.д. В большинстве этих соединений (ВТСП пока оставим в стороне) как состояние с волной зарядовой плотности (ВЗП), так и сверхпроводящее состояние обязаны своим существованием электрон-фононному взаимодействию. Хотя оба состояния характеризуются наличием энергетической щели на уровне Ферми, физическая природа этих щелей совершенно различна, а потому и физические свойства различаются кардинально: если состояние с ВЗП является диэлектрическим, то в сверхпроводящем состоянии, напротив, $R=0$. Поэтому принято считать, что они конкурируют друг с другом, а если и сосуществуют, то лишь потому, что ВЗП-щель имеется на одной части поверхности Ферми, а сверхпроводящая щель – на другой. Однако экспериментальное доказательство этой точки зрения на сегодняшний день отсутствует, поскольку нет данных фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) об электронной структуре соединений с сосуществующим сверхпроводящим и ВЗП-состояниями. Между тем вопрос о взаимоотношениях ВЗП со сверхпроводимостью важен, в том числе, для выяснения механизма куперовского спаривания в ВТСП, где сверхпроводящее со-

стояние близко и к состоянию с ВЗП, и к состоянию с волной спиновой плотности. Если ВЗП действительно не является союзником сверхпроводимости, то ее можно будет смело вычеркнуть из списка кандидатов на роль посредника в спаривании носителей заряда в ВТСП.

Важный шаг к пониманию взаимосвязи ВЗП со сверхпроводимостью сделан в работе [1] японскими и индийскими учеными. Они измерили ARPES-спектры качественных монокристаллов слоистого сверхпроводника 2H-NbSe_2 с $T_{\text{ВЗП}} \approx 33$ К и $T_c = 7.2$ К. Было показано, что сверхпроводящая щель Δ хоть и отлична от нуля на всей поверхности Ферми, но сильно анизотропна и изменяется в пределах $(0.3 \div 1.2)$ мэВ. Вопреки ожиданиям оказалось, что при $T < T_c$ величина Δ максимальна в тех точках импульсного пространства, в которых при $T_c < T < T_{\text{ВЗП}}$ имеет место наиболее сильное изменение спектрального веса из-за формирования ВЗП, то есть, другими словами, где ВЗП-щель максимальна. В этих же точках максимальна константа электрон-фононной связи и минимальна скорость Ферми. Таким образом, при понижении температуры сильное взаимодействие электронов с фононами приводит сначала к возникновению ВЗП, а затем – к куперовскому спариванию носителей "на фоне" этой ВЗП. Выходит так, что в 2H-NbSe_2 сверхпроводимость и ВЗП не противники, а союзники. А в ВТСП?

Л.Опенев

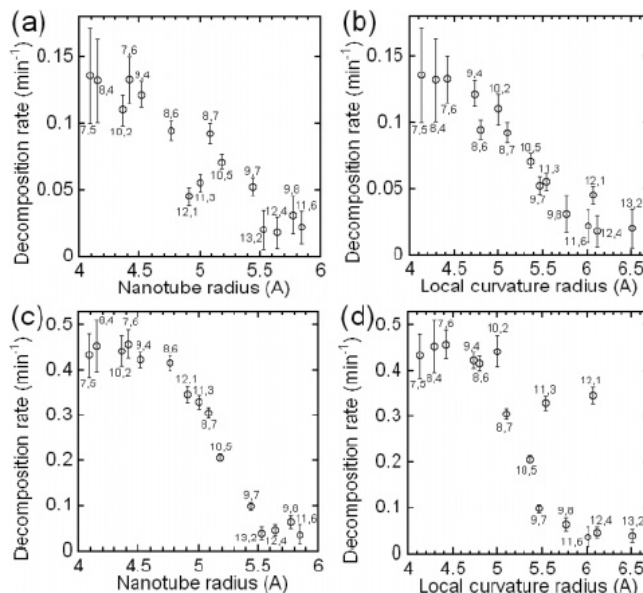
I.T.Kiss et al., *Nature Phys.* **3**, 720 (2007)

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Селективное выжигание однослойных нанотрубок в зависимости от радиуса и хиральности

Электронные свойства углеродной нанотрубки (УНТ) (ширина запрещенной зоны, электросопротивление, концентрация носителей и т.п.) зависят от ее диаметра и угла хиральности, который представляет собой угол ориентации графитовой плоскости, из которой свернута нанотрубка, по отношению к ее оси. С одной стороны, такое свойство УНТ открывает широкие возможности для применений в нанoeлектронике, поскольку нанотрубка представляет собой готовый полупроводниковый прибор, характеристики которого варьируются в широком диапазоне. Однако, с другой стороны, для практической реализации этих возможностей необходимо научиться выделять нанотрубки с определенными величинами диаметра и хиральности. Поскольку в результате синтеза УНТ стандартными методами получаются нанотрубки, диаметр и угол хиральности которых изменяются в широком диапазоне, возникает серьезная техническая проблема выделения нанотрубок с заданными параметрами. В настоящее время на решение этой проблемы направлены усилия многих научных кол-

лективов, в результате которых определился ряд перспективных направлений ее преодоления. Одно из таких направлений основано на зависимости реакционной способности УНТ от таких ее параметров, как диаметр и угол хиральности. Такое различие связано с зависимостью химического состояния атомов углерода в УНТ от угла между соседними связями, который, в свою очередь, определяется геометрией нанотрубки. Результаты недавнего исследования, выполненного в Токуо Metropolitan Univ. (Япония), указывают на возможность использования данного свойства УНТ для выделения нанотрубок определенной хиральности и диаметра. Авторы использовали в своих экспериментах однослойные УНТ, синтезированные в результате термического разложения СО на металлическом катализаторе (метод HiPco) и очищенные стандартными методами. Эксперименты по селективному выжиганию УНТ с определенными величинами диаметра или хиральности проводили при нагреве тканеподобного образца УНТ либо на воздухе, либо в присутствии перекиси водорода. В первом случае эволюцию распределения УНТ по углам хиральности определяли из спектров комбинационного рассеяния (КР), полученных после 15, 25, 35, 45 и 50 минутной термической обработки на воздухе при 450° С. Во втором случае - 4 мг образца, диспергированного в 30 мл 30%-ного водного раствора H₂O₂, в течение часа подвергали ультразвуковой обработке при комнатной температуре, после чего взвесь размешивали в водяной бане при 90°С. Наряду с измерениями спектров КР, в обоих случаях проводили измерения спектров фотолюминесценции образцов в диапазоне от 1000 до 1500 нм при изменении длины волны возбуждения в диапазоне от 500 до 900 нм до и после процедуры окисления. Анализ полученных спектров КР и фотолюминесценции указывает на существенное изменение распределения нанотрубок по хиральностям и диаметрам в результате окисления на воздухе и в перекиси водорода. Так, в результате окисления на воздухе существенно снижается вклад нанотрубок малого диаметра в сигнал фотолюминесценции. При этом возрастает относительный вклад нанотрубок с малыми величинами угла хиральности. Полученные данные означают, что скорость разложения однослойных УНТ в результате окисления на воздухе возрастает с уменьшением диаметра и ростом угла хиральности. С другой стороны, окисление перекисью водорода приводит к увеличению относительного вклада УНТ большего диаметра в спектр фотолюминесценции, однако практически не изменяет распределение нанотрубок по углам хиральности. Аналогичный вывод следует также из анализа спектров КР, которые, как известно, содержат информацию о распределении УНТ по диаметрам.



Зависимости скорости разложения УНТ от их диаметра и локального радиуса кривизны, полученные на основании анализа спектров фотолюминесценции и КР: (a) и (b) – окисление на воздухе; (c) и (d) – окисление перекисью водорода.

На рисунке показаны зависимости скорости разложения УНТ от их диаметра и локального радиуса кривизны, полученные на основании анализа спектров фотолюминесценции и КР. Индексы хиральности нанотрубок указаны на соответствующих графиках. При этом учитывается связь между локальными величинами диаметра нанотрубки, локальным радиусом кривизны и углом хиральности. Обнаруженная в данной работе чувствительность скорости окисления к углу хиральности и диаметру УНТ может быть положена в основу развития технологии селективного синтеза нанотрубок большого диаметра с малыми углами хиральности.

А.В.Елецкий

1. Y.Miyata et al., *J. Phys. Chem. C* **111**, 9671 (2007)

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Органическая спинтроника

Исторически сложилось так, что спиновая электроника (основанная на переносе информации спинами, а не зарядами электронов) и органическая электроника (основанная на использовании органических материалов) развивались параллельно, не зависимо друг от друга. Первый шаг к их интеграции сделан на конференции “1st International Workshop on Spintronic Effects in Organic Semiconductors” (SpinOS07), состоявшейся 9-11 сентября 2007 года в Болонье (Италия). Основной вопрос, который там обсуждался, касался поиска альтернативных способов поляризации спинов в органических полупроводниках, где слабое спин-орбитальное взаимодействие делает фемтосекундную оптическую спектроскопию неэффективной. Международный коллектив ученых из различных университетов Швейцарии и Великобрита-

нии предложил использовать для этой цели мюонную спектроскопию, что позволяет изучать динамику спиновой инжекции в режиме реального времени. Их немецкие коллеги разработали методику двухфотонной фотоэмиссии, которая дает информацию, как о спиновой поляризации, так и о механизме переворота спинов. Основным источником деполяризации являются, как и в графене, спин-спиновые взаимодействия. В ряде выступлений подчеркивалось, что для эффективной инжекции спинов в органический полупроводник необходимо строго контролировать качество границы его раздела с магнитным металлом. Здесь большое внимание следует уделить теоретическим расчетам атомной структуры этих границ и их электронного строения. Много докладов было посвящено измерению времени релаксации спина T_s в органических материалах. Обнадешивает сравнительно большая величина T_s (десятки микросекунд) и ее слабая температурная зависимость, что позволяет всерьез говорить о спинтронных устройствах, работающих при комнатной температуре. Но из-за низкой подвижности носителей длина спиновой релаксации L_s оказывается очень маленькой. Таким образом, для органической спинтроники нужно искать применения, не требующие перемещения спинов. Конечно, она не заменит полностью обычную электронику, но вполне может занять свою нишу в ряде приложений. Следующая конференция (SpinOS09) состоится в 2009 году в Солт Лейк Сити (США).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК *Нанoeлектроника. Лукавая цифра?*

В процессе дискуссий ученые пришли к единому мнению, что классифицировать изделие как нанотехнологическое можно, если, по крайней мере, один из его размеров находится в диапазоне от 1 до 100 нм и *этот размер существенен для функций квалифицируемого изделия*. Само по себе достижение размера от 1 до 100 нм - недостаточное условие, хотя бы потому, что все исходные природные и искусственные материалы имеют структуру наномасштабного диапазона. Нанотехнология – это способность понимать, контролировать и манипулировать материей на уровне индивидуальных атомов, молекул или кластеров молекул (размером от 1 до 100 нм), для того чтобы создавать материалы, приборы и системы с фундаментально новыми свойствами и функциями, обязанными именно малыми размерами (см., например, такое определение в [1]).

С этой точки зрения освоенная в современной электронике 90-, 65- и 45 нм технология может быть отнесена к нанотехнологии лишь условно. В действительности эти размеры достигнуты на традиционном в микроэлектронике пути масштабирования, а изготовленные в результате интегральные схемы имеют традиционно улучшенные параметры (плотность упаковки, рассеиваемая мощность, бы-

стродействие) без принципиального изменения функций.

По мнению координатора европейского проекта PullNano Gilles Thomas (компания STMicroelectronics) присущие нанообъектам новые свойства (например, квантоворазмерный эффект) и функции могут проявиться лишь на пути 32-, 22-, 16- и 11 нм технологий [2].

Но и это – не за горами...

В ситуации неоднозначного толкования понятия “нанообъект” и множественности заявлений об изготовленных нанообъектах чрезвычайно актуальная задача - создание базы данных по результатам нанотехнологических исследований и разработок в мире с единым стандартным подходом к классификации нанотехнологических объектов. Один из вариантов решения такой задачи представлен на Интернет сайте, формируемом Woodrow Wilson International Center for Scholars (Washington, США) в рамках проекта «Emerging Nanotechnologies» - «Нарождающиеся нанотехнологии» [3].

Для отбора нанообъектов для этой базы данных используются следующие три критерия:

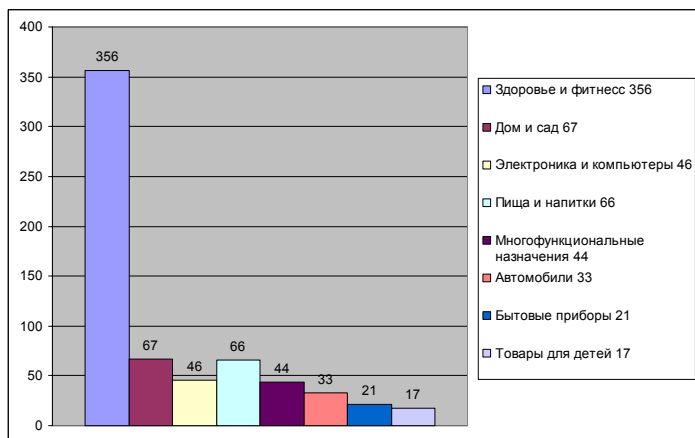
- ~ потребители готовы легко их покупать;
- ~ они идентифицированы изготовителем или другим субъектом как изготовленные с применением нанотехнологии;
- ~ два первых критерия признаны администрацией сайта обоснованными.

На сегодняшний день на сайте представлены нанообъекты в следующих категориях:

1. бытовые приборы (приборы для нагрева и охлаждения; большие кухонные приборы; машины для стирки и чистки одежды);
2. автомобильные назначения (техобслуживание и аксессуары для автомобиля);
3. товары для детей (игрушки и игры);
4. электроника и компьютеры (аудио и видео аппаратура; фототехника; элементы компьютера; дисплеи; мобильные приборы; телевидение);
5. пищевые продукты и напитки (кулинария; продукты; сохранность продуктов);
6. здоровье и фитнес (одежда; косметика; фильтры; персональные средства ухода; спорттовары; средства защиты от солнечных лучей);
7. дом и сад (чистящие средства; конструкционные материалы; предметы обстановки; предметы роскоши; краски);
8. многофункциональные назначения (покрытия).

Категории и подкатегории могут добавляться по мере поступления новой информации о нанообъектах, не вписывающихся в предложенную классификацию. Наполнение сайта ведется в динамическом режиме. Поиск нанообъектов в Интернете проводит администрация сайта, а также предусмотрено поступление информации от разработчика и изготови-

теля. Последнее обновление сайта было проведено в сентябре 2007 года. На сегодня на сайте представлена информация о более чем 600 нанообъектах. На диаграмме – распределение числа нанообъектов по категориям.



Такое распределение определяется, в первую очередь, ставкой авторов сайта на потребительские нанотовары, но, с другой стороны, возможно и близко к истинной ситуации в этой области исследований и разработок, так как отражает готовность на сегодняшний день, в основном, нанопорошковых технологий.

Для нас представляет интерес достаточно скромное положение объектов, представленных в категории «Электроника и компьютеры» (46 объектов из 600 зарегистрированных).

Здесь, конечно, чемпионом выглядит 16Гб флэш-память компании Samsung, выполненная в массовом производстве по 51нм технологии. Samsung поставляет эти схемы компании Apple, в частности, для устройства iPod Nano [4].

В процессорных чипах намечается переход от 90нм к 65нм технологии. По 90нм технологии выполнены схемы процессоров PowerPC 970FX (IBM); Athlon™ 64 FX (AMD); Celeron 4 Pentium (Intel). Новый 65нм процесс использован в чипах процессоров Intel Core 2 Duo, Intel Core Solo и Intel Pentium D. 65нм технология все более используется для флэш-памяти мобильных устройств (например, Intel StrataFlash® Cellular Memory; Samsung 65-nm 8-Gbit флэш в iPhone компании Apple).

В июне 2007 года компания Panasonic первой в мире приступила к массовому производству чипов, изготовленных по 45нм технологии, для своей системы UniPhier.

К слову, в октябре с.г. компания Intel также объявила о начале массового производства процессорных чипов по 45нм технологии, а компания Hewlett-Packard уже использует эти чипы в своих рабочих станциях [5].

Следующий шаг также не за горами: компания Intel сообщила об изготовлении первых образцов чипов по 32нм технологии [6]; компании Sony, IBM и Toshiba анонсировали начало совместных иссле-

дований для разработки промышленной 32нм (и меньше) технологии [7].

Большинство сегодняшних жестких компьютерных дисков используют считывающие головки из магнитных многослоев, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления. Такие головки изготавливаются с применением нанотехнологий.

Энергонезависимую оперативную память (динамическую и статическую) на основе углеродных нанотрубок разрабатывает компания Nantero (пожелаем ей удачи!)

Motorola заявила об изготовлении прототипа 5 дюймового цветного видеодисплея с использованием углеродных нанотрубок, однако, о производстве таких дисплеев сообщений нет.

Относительно продвинуты к широкому массовому производству органические светодиоды (OLED) для солнечных батарей и дисплеев, в частности, для дисплеев мобильных телефонов. В их нановерсиях используют электроды из полимерных наноструктурированных пленок. Дисплеи на основе OLED имеют длительный срок службы, хорошее разрешение, высокий контраст, большую яркость при меньшей мощности и при значительной меньшей стоимости в сравнении, например, с жидкокристаллическими дисплеями. Рынок OLED вырос от 112 млн. долл. в 2002 году до 3.1 млрд.долл. к 2007 г. О производстве nanoOLED заявили: в США DuPont; Universal Display Corp.; NanoHorizons; Pioneer Company; в Китае - RiT Display Corp.; в Корее – Samsung; в Японии - Sony Corp.

Если можно принять размещение в категории «Электроника и компьютеры» упрочняющих наноструктурированных покрытий высокого оптического качества для телевизионных экранов и OLED дисплеев (компания Ecology Coatings из США), то несколько «притянутыми за уши» в этой категории стоят нанопокрывания для гитарных струн (Elixir и Siemens Hearing Instruments, США) и антибактериальные покрытия (в основном, на основе наносеребра) для мобильных телефонов (LG Electronics и Samsung, Корея), компьютерных мышек (компания IOGEAR, США) и компьютерных клавиатур (Samsung). На этом фоне даже скромное число зарегистрированных на сайте наноэлектронных объектов (46) выглядит несколько завышенным. Хотя, очевидно, сайт организован недавно, на нем отсутствует, например, информация о нитридных светодиодах. Будем ждать очередного обновления.

Если уйти из категории «Электроника и компьютеры» и мельком заглянуть в раздел «Косметика» категории «Здоровье и фитнес», то встретим «знакомые все лица» - фуллерены и цинкиты. Компания Zelens из Великобритании выпускает целую серию косметических кремов – ночные, дневные и для век – с добавками фуллеренов C₆₀, которые обладают заметными противоокислительными свойствами. Ключевой является форма фуллеренов –

шарообразная с 32 гранями, которые притягивают, нейтрализуют и уничтожают свободные радикалы - настоящие сборщики мусора с лица. Австралийская фирма Advanced Nanotechnology выпускает очищающий и защищающий от солнечных лучей косметический крем на основе наночастиц оксида цинка.

1. <http://www.nanotechproject.org/143/the-nanotech-future-a-conversation-with-mihail-roco>
2. <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml?articleID=201000364>
3. www.nanotechproject.org/consumerproducts
4. http://www.samsung.com/PressCenter/PressRelease/PressRelease.asp?seq=20070429_0000341776
5. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=202803868>
6. <http://www.eetimes.eu/semi/201807406.jsessionid=QBUESQGDYGOMCQSQNDLPSKH0CJU NN2JVN>
7. http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=26184

Научная сессия ОФН РАН

28 ноября 2007 г., в 15.00

Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
(Ленинский просп., 53, главное здание, 3 этаж)

Программа

1. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В.
(ИОФ РАН)

Обобщенные уравнения Ландау-Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах

2. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М.
(ИРЭ РАН, Москва-Фрязино)

Наноразмерные структуры с включением ферромагнитных металлических слоев: новые эффекты при прохождении перпендикулярного тока

Web: www.gpad.ac.ru

Семинар по магнетизму

20 ноября 2007г., в 17.00

Институт физических проблем им. П.Л.Капицы.
Е.З. Мейлихов, Р.М. Фарзетдинова
(РНИИ «Курчатовский институт»)
«Ферромагнетизм в тесном мире»

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

Научный редактор К.Кугель

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

В подготовке выпуска принимали участие: В.Вьюрков, А.Елецкий, Ю.Метлин, Л.Опенков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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