

В этом выпуске:

НАНОСТРУКТУРЫ

Атомные переключатели для нанoeлектроники

Основным элементом конструкции первых электронно-счетных устройств был обычный механический переключатель (реле). Его главный недостаток заключался в жестких ограничениях на возможность уменьшения размеров и увеличения рабочей скорости. На смену реле пришли сначала вакуумные лампы, а затем – полупроводниковые элементы. Но не зря, наверное, говорят, что все эволюционирует по спирали, и на очередном витке своего развития переключатели вновь могут стать механическими. Только, в отличие от громоздких предшественников, их размеры будут составлять всего лишь несколько межатомных расстояний. Такой неожиданный поворот представляется весьма вероятным в свете результатов, полученных недавно японскими учеными (Nat. Inst. Materials Sci., ICORP-SORST, RIKEN) [1], которые разработали технологию изготовления "атомных переключателей".

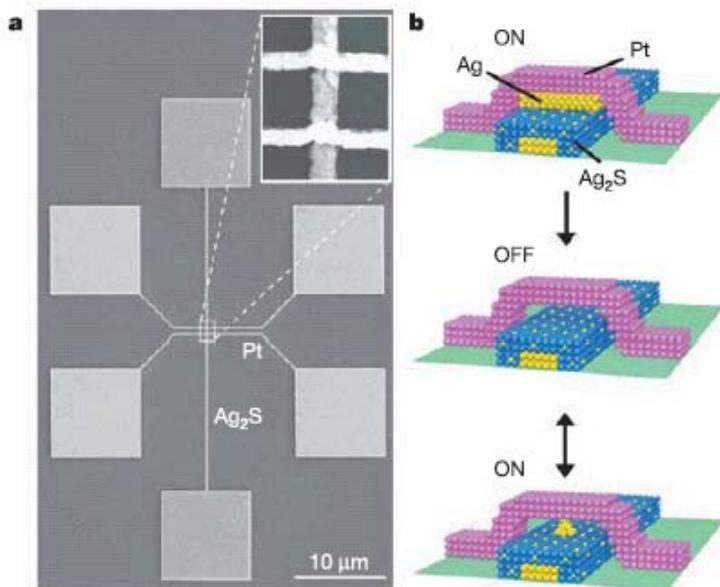


Рис. 1. а) Изображение атомного переключателя, полученное методом сканирующей электронной микроскопии. Провод из Ag_2S толщиной 150нм пересекается с двумя Pt проводами толщиной 100нм.

б) Иллюстрация принципа работы атомного переключателя за счет обратимого формирования и удаления "мостика" из атомов Ag между проводами Ag_2S и Pt .

Суть японского "наночуда" такова. На поверхности кристалла ионно-электронного проводника Ag_2S при электрохимической реакции в твердой фазе (за счет туннельного тока) могут образовываться "выступы" из нескольких атомов Ag . Изменяя полярность приложенного напряжения, оказывается возможным контролировать формирование и удаление этих "выступов". Если теперь (используя электронно-лучевую литографию и т.п.) расположить электроды (провода Ag_2S и Pt) на расстоянии ~ 1 нм друг от друга, то при подаче на Ag_2S положительного напряжения между

И далее ...

- 3 Магнетоэлектрики
в спинтронике
Канавы памяти

От науки до техники один шаг

Вера в светящийся кремний
вдохновляет не только Перст

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Антенны из нанотрубок
Синтез нанотрубок при низкой
температуре

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 5 Три тела в запутанном
состоянии
Удастся ли сделать оптический
квантовый компьютер?
Точка привязывается к полости

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 6 Дефекты и высокотемпературная
сверхпроводимость

МАГНИТЫ

- 7 Магнитопластичность
«в бронзе»

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 19-23 сентября 2005 г.,
Ялта, Украина.
NATO Advanced Research Workshop
"Electron Correlations in
New Materials and Nanosystems"
(ECNMN'2005).

электродами вырастет "серебряный мостик", и проводимость резко возрастет - переключатель в положении "Вкл". При подаче отрицательного напряжения мостик исчезнет, а проводимость, соответственно, упадет - переключатель в положении "Выкл" (рис. 1).

На практике японцы поступали следующим образом. Чтобы создать нанометровый зазор между пересекающимися проводами Ag_2S и Pt , они предварительно осаждали на провод Ag_2S (в области предполагаемого пересечения) слой серебра толщиной ~ 1 нм, то есть переключатель исходно приготавливался в состоянии "Вкл". Затем его переводили в состояние "Выкл", прикладывая положительное напряжение к Pt проводу. Этот процесс был достаточно длительным (несколько секунд), поскольку требовал ионизации большого числа атомов Ag в прослойке между проводами. Но уже при следующей операции время переключения резко падало до $\tau \sim 1$ мкс из-за уменьшения количества атомов Ag в "серебряном мостике" (рис. 1), так что переключатель прекрасно работал на частоте 1 МГц (рис. 2).

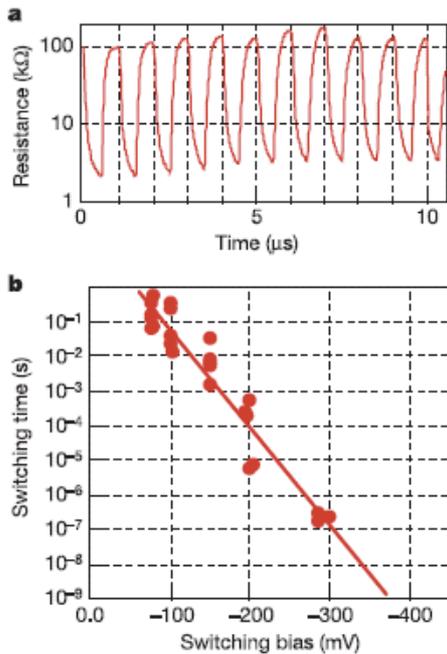


Рис. 2. а) Переключение с частотой 1 МГц при напряжении ± 600 мВ. б) Время переключения как функция напряжения.

Величина τ экспоненциально уменьшается с ростом напряжения переключения. Это говорит о наличии некой энергии активации у электрохимической реакции. К сожалению, из-за сравнительно большой толщины (то есть большой емкости) проводов, образующих переключатель, не удалось надежно измерять величину τ , когда она становилась намного меньше 1 мкс. Но полученные данные говорят о том, что при увеличении напряжения переключения τ уменьшается до ~ 1 нс и менее, то есть переключатель вполне может работать и на частоте 1 ГГц.

Для практических применений очень важна устойчивая работа атомного переключателя. Так вот, после более чем 10^5 переключений никаких отклонений замечено не было. При этом переключатель одинаково хорошо функционировал как в вакууме, так и на воздухе. И охлаждать его не надо – комнатной температуры вполне достаточно. От известных эффектных (но не практичных) нанотехнологических изысков (как-то укладывание атома к атому с помощью СТМ и т.п.) новая методика выгодно отличается простотой и надежностью. Она может быть с успехом использована как для изготовления дополнительных элементов современных электронных устройств, так и при создании принципиально новых приборов нового поколения. Ясно просматриваются и пути ее дальнейшего усовершенствования. В первую очередь это касается уменьшения времени переключения (то есть повышения рабочей частоты) за счет уменьшения толщины проводов. Можно также попробовать использовать вместо Ag_2S другие твердые электролиты, например, Cu_2S .

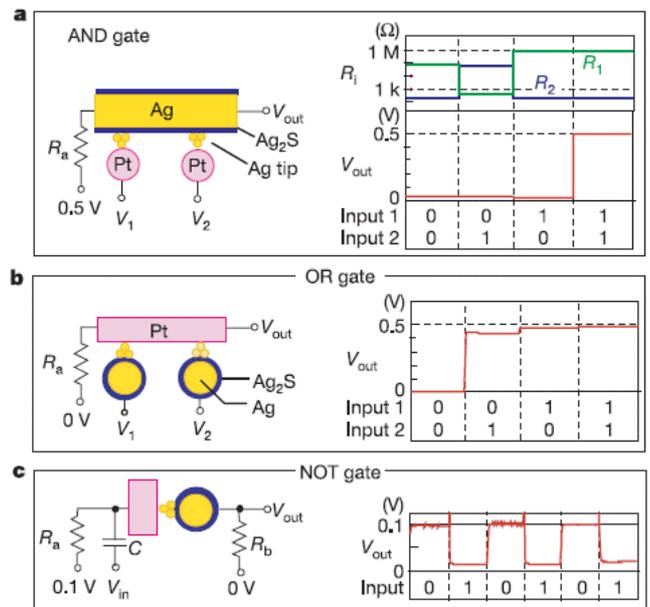


Рис. 3. Логические устройства на основе атомных переключателей.

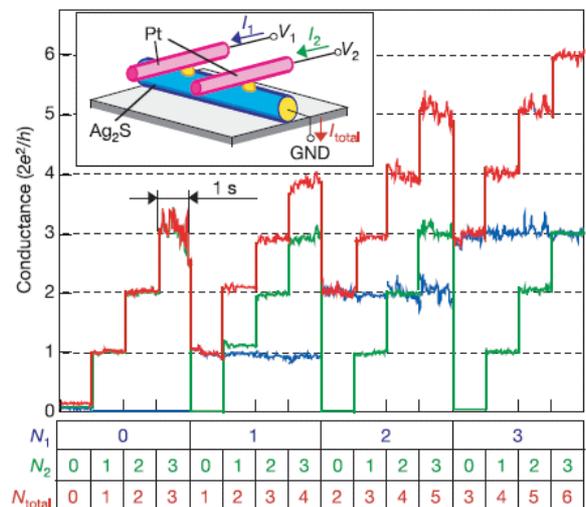


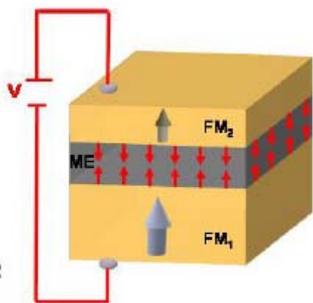
Рис. 4. Квантование проводимости системы из двух атомных переключателей.

В качестве первого шага к практическому использованию атомных переключателей японцы сконструировали из них три логических элемента: "И", "ИЛИ", "НЕ" (рис. 3). В заключение заметим, что, как и у квантовых проводов, проводимость атомного переключателя изменяется квантами $2e^2/h$ (рис. 4), поэтому авторы называют его "quantized conductance atomic switch" (QCAS). Этот эффект также может быть использован при конструировании нанoeлектронных схем.

Л. Опенов

1. *Nature* 2005, 433, 47

Магнетоэлектрики в спинтронике



Сотрудники University of Nebraska предлагают использовать магнетоэлектрический эффект (возникновение магнитного момента под действием электрического поля) в устройствах памяти, основанных на гигантском магнетосопротивлении.

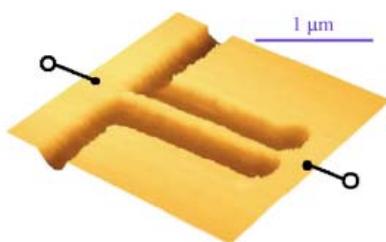
В одной из предлагаемых конструкций антиферромагнетик с магнетоэлектрическим эффектом (магнетоэлектрик, ME) выступает в качестве разделительного слоя между слоями жесткого (FM_1) и мягкого (FM_2) ферромагнетика. Приложенное электрическое поле наводит магнитный момент в ME слое, достаточный, чтобы перемагнитить FM_2 и изменить таким образом электросопротивление системы (т.е. записать один бит информации). Запись и считывание производится с помощью одних и тех же электродов (см. рис.)

В.Вьюрков

1. *J.Phys.:Condens.Matter* 2005, 17, L39.

Канавы памяти

Сотрудничество University of Manchester (Англия) и Lund University (Швеция) привело к созданию оригинального



устройства памяти. За основу берется плоская $InGaAs/InP$ гетероструктура с квантовой ямой, в которой находится двумерный электронный газ. На поверхности структуры протравливаются изолирующие канавки, проходящие через область двумерного газа. Вид сверху представлен на снимке, полученном с помощью СТМ. Показано также подключение двух электродов, которые используются как для записи, так и для считывания информации. Два состояния такой структуры обусловлены накоплением и снятием заряда на поверхностных центрах на стенках канавки. Существенным является несимметричность канавок по отноше-

ПерсТ, 2005, том 12, выпуск 3

нию к направлению протекания тока. Пока удалось добиться времени запоминания несколько минут при комнатной температуре.

Авторы рассчитывают, что подобное устройство может быть изготовлено и на кремнии, поскольку его работа не связана с баллистическим переносом.

В.Вьюрков

1. *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 042106

От науки до техники один шаг

Огромный поток работ по исследованию влияния микроволнового излучения на проводимость двумерного электронного газа, помещенного в магнитное поле, привел к естественному практическому результату. И.Кукушкин (ИФТТ РАН), J.Smet, K. von Klitzing (Max-Planck-Institut fur Festkorperforschung) и С.Михайлов (Mid-Sweden University) объявили о создании микроволнового спектрометра в диапазоне до 1ТГц, работающего при азотных температурах. Принцип работы основан на генерации магнетоплазмонов, приводящей к фотовольтаическому эффекту. Поскольку для хорошей чувствительности важна интерференция плазмонов, существенными становятся размеры и форма структуры.

В.Вьюрков

1. *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 044101

Вера в светящийся кремний вдохновляет не только ПерсТ

ПерсТ проявлял равнодушие к тематике люминесцирующего кремния с начала 90-х, что, в общем, повторяло общемировую тенденцию и отражало интересы собственно читателей ПерсТ'а. И хотя отдельные многообещающие результаты регулярно сменялись другими, не менее обещающими, но уже в несколько иных направлениях, наш бюллетень стойко наступал на горло своему скептицизму и искренне старался вызвать восхищение и веру в конечный успех кремниевой оптоэлектроники у своих читателей.

Но, как ни обидно это признавать, в январе этого года ПерсТ на этом своем тернистом пути был обойден журналом *Materials Today*. Этот отпрыск почтенного издательства *Elsevier*, выпустил номер, почти исключительно посвященный оптоэлектронному применению кремния. Чуть успокаивает то, что ничего особенного «вдруг» не открыли и не изобрели, и что читатели ПерсТ'а ничего существенного не пропустили.

Но то, что удалось сделать *Materials Today*, ПерсТу даже не снилось. Основные направления кремниевой оптоэлектроники, уже достигшие известности и некоторого успеха, подаются из первых рук, самими авторами оригинальных работ, с глянцевыми цветными иллюстрациями и в изложении, доступном мало-мальски пытливым первокурсникам.

«Путь к лазерам на кремнии» представляет Lorenzo Pavesi (University di Trento), автор открытия оптического усиления в системе нанокристаллов кремния – работы, вошедшей, по мнению сообщества научных журналистов, в десятку лучших в 2000 году. В обзоре

нашлось место и для обсуждения уже достигнутых результатов и перспектив кремниевых лазеров с эрбием, с длиной волны 1.5 мкм для оптоволоконных линий связи. Эрбиевая тематика так или иначе обсуждается почти во всех обзорах номера.

Тема люминесценции квантовых точек на кремнии исполнена Philippe Fauchet (Rochester Univ.) – автором основополагающей работы по рамановскому рассеянию в низкоразмерных полупроводниках, на которую ссылались практически все авторы работ по раман-эффекту в пористых формах кремния. На этот раз – все о люминесценции. Основные положения известны по прежним работам – 100% эффективность, полный набор цветов в люминесценции в зависимости от размера квантовых точек, возможность организации встроенных в активных слой резонаторов – все это уже нас восхищало. И тот же материал, собранный вместе, как минимум, не разочаровывает.

«Инженерия дислокаций» представлена в статье К. Homewood'a и Manon Lorenzo. Статья подробно рассказывает о результатах, полученных группой университета Surrey (UK) и публиковавшихся ранее. Среди прочего обращает на себя внимание необычная температурная зависимость эффективности люминесценции в описываемых приборах – эффективность внешнего выхода значительно возрастает с ростом температуры. Авторы приписывают ее специфике рекомбинационных процессов на дислокациях. Счастливы несведующие! Видно, что они не получают ПерсТ! Иначе бы они знали о том, что именно такой тип зависимости удастся наблюдать в заведомо бездислокационных структурах. Группа из ФТИ им. Иоффе (П.Д. Алтухов, Е.Г. Кузминов) не только наблюдала такие зависимости экспериментально, но и полностью объяснила такое поведение люминесценции, открыв самокомпрессию электронно-дырочной плазмы в кремнии еще несколько лет назад (Phys. Stat. Sol. (b) 2002, **232**, no 2, p.364).

Отдельный обзор посвящен кремниевым оптоэлектронным устройствам - модуляторам, разветвителям, коммутаторам и т.д. Такие устройства, строго говоря, не вполне кремниевые, так как в качестве светопроводящей среды чаще используют оксид, чем собственно кремний. Зато при их изготовлении используется кремниевая микротехнология, и сами устройства выполняются монолитно на поверхности кристалла кремния или даже внутри его. Это удачный завершающий аккорд всего собрания обзоров.

Конечно, авторы каждого обзора в конце клянутся в перспективности своего направления и его весьма скорой и положительной результативности. Поскольку не в первый раз, то подозрительно конечно, но что в этом плохого? Кто сказал, что продвижение вперед по лестнице технологий будет даваться легко? На фоне истории продвиже-

ния к управляемому термоядерному синтезу история люминесцирующего кремния – короткая череда счастливых находок. Так что еще посмотрим, что будет раньше: лазер на кремнии с токовой накачкой или дешевая термоядерная энергия. А пока, если вы не подписаны на *Materials Today*, читайте www.materialstoday.com.

М.Компан

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Антенны из нанотрубок

Антенны служат для регистрации и передачи электромагнитных волн. Частотный диапазон, в котором может работать антенна, определяется ее размерами. Например, антенны длиной $L \sim 1$ м обслуживают радиоволновый диапазон. Отклик любой антенны зависит от угла между ее осью и плоскостью поляризации излучения (эффект поляризации), а также от соотношения между L и длиной волны λ (эффект длины). Максимальная чувствительность достигается при $L = \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$, и т.д.

В работе [1] экспериментально подтверждена давно обсуждавшаяся возможность изготовления антенн из упорядоченных массивов многостенных углеродных нанотрубок с $L = (0.2 \div 1.0)$ мкм. Показано, что в таких массивах имеют место как эффект поляризации, так и эффект длины. Диаметр каждой нанотрубки при этом составляет около 50 нм. К числу возможных практических применений нанотрубочных антенн относится, в частности, их использование в оптоэлектронике как ИК-поляризаторов и детекторов.

1. *Appl. Phys. Lett.* 2004, **85**, 2607

Синтез нанотрубок при низкой температуре

С ростом интереса к применению углеродных нанотрубок (УНТ) все более актуальной становится потребность в снижении температуры их синтеза, а, следовательно, и стоимости их производства. Важным достижением на этом пути представляется работа, выполненная недавно в Boston College (США), в которой, используя хорошо известный сольвотермический синтез, удалось получить многослойные УНТ уже при температуре 310°C. В эксперименте смесь 60 мл гексана, 0.6 мл $SiCl_4$, 3 г $C_{12}E_4$ (этоксиглицированный спиртовой полиоксиэтиленовый эфир) и 6 мл дисперсии Na в толуоле (концентрация 25 мас. %), после десятиминутного перемешивания помещали в герметичный реактор, который выдерживали в течение 72 час. в печи при $T = 310^\circ C$. После охлаждения продукты реакции многократно промывали гексаном, спиртом и дистиллированной водой, а затем сушили в вакуумном сушильном шкафу печи при 60°C в течение 6 час.

Как показывают наблюдения, выполненные с помощью электронного микроскопа, полученный образец оказался на 20% состоящим из многослойных нанотрубок длиной несколько микрон, имеющих внешний диаметр между 5 и 20 нм и внутренний диаметр между 2 и 8 нм. Трубки имели как открытые, так и закрытые вершины. Расстояние между соседними слоями в на-

нотрубках составляет 0.34 нм, что присуще большинству многослойных графитовых структур.

Авторы предполагают, что в данном методе роль катализатора играют наночастицы $NaCl$, образованные в результате восстановления $SiCl_4$ атомами натрия. На это указывает, в частности, присутствие в образце наночастиц $NaCl$ и аморфного SiO_2 , многие из которых находятся на вершинах нанотрубок.

А.В.Елецкий

1. *Nanotechnology* 2005, 16, 21

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Три тела в запутанном состоянии

Квантовый компьютер, основанный на атомах в ловушке, представляется неперспективным, потому что не позволяет использовать количество квантовых битов (кубитов), достаточное для практического применения, поскольку невозможно организовать надежную адресацию к определенным атомам при большом их количестве. Однако в последнее время идеи такого компьютера неожиданно заиграли в совершенно другой области, а именно, в квантовом компьютере на сверхпроводящих структурах. Одной из основных проблем в этих компьютерах является организация взаимодействия между удаленными кубитами. В University of Maryland продемонстрирована возможность организации такого взаимодействия с помощью резонатора, как и в квантовом компьютере на атомах в ловушке. В качестве «атомов» выступают два зарядовых кубита, основанных на джозефсоновских контактах, которые имеют емкостную связь с микроволновым резонатором. Хитроумными приемами удалось наблюдать запутанное состояние трех объектов – двух кубитов и фотона в резонаторе. В отличие от атомов в ловушке, в сверхпроводящем компьютере существует возможность надежного управления состоянием каждого кубита в отдельности. Кажется, представленная работа открывает заманчивые перспективы в создании сверхпроводящего квантового компьютера.

В.Вьюрков

1. *Phys.Rev.Lett.* 2005, 94, 027003

Удастся ли сделать оптический квантовый компьютер?

Китайские и немецкие ученые (Univ. Sci. & Technol., Китай; Univ. Heidelberg, Германия) сообщили [1] об успешной экспериментальной реализации квантовой логической операции $CNOT$ на фотонах с помощью только линейных оптических элементов (поляризаторов, делителей и фазовращателей). Выполнение операции $CNOT$ является одним из самых основных требований к квантовому компьютеру. Кажется бы, это достижение открывает прямую дорогу к созданию оптического квантового компьютера. Однако разберемся с этим подробнее.

Перст, 2005, том 12, выпуск 3

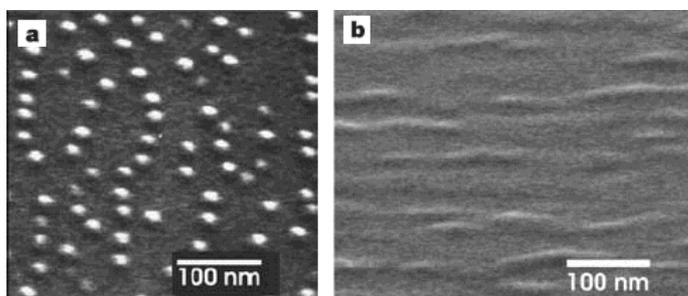
Главным препятствием на пути создания оптического квантового компьютера является отсутствие сильной нелинейной среды, которая бы позволила двум летящим вместе фотонам хорошо взаимодействовать, пройдя достаточно небольшое расстояние. Однако, как выяснилось, можно устроить аналог взаимодействия фотонов, используя процедуру измерения их состояния, поэтому в используемой установке все-таки имеются нелинейные элементы – это однофотонные детекторы. Если проводить измерение непосредственно над фотонами, участвующими в операции $CNOT$, то согласно законам квантовой механики их состояние изменяется, и они уже не пригодны для проведения дальнейших вычислений. И это препятствие удалось преодолеть. Используются вспомогательные фотоны (ancilla), которые в силу неразличимости эквивалентны основным. Именно над ними производится измерение, которое показывает, правильно ли или нет выполнена операция $CNOT$ над основными фотонами. Вот в этом и состоит основная загвоздка. Вероятность правильного выполнения операции с одного раза составляет 79%. Это довольно большая величина, если попробовать несколько раз, то почти наверняка повезет. Однако в квантовом компьютере таких операций надо выполнять много, например, N раз, и тогда вероятность их успешного выполнения будет экспоненциально уменьшаться как $(0.79)^N$. Эта экспонента может «забить» экспоненциальный выигрыш, получаемый иногда в квантовых расчетах по сравнению с классическими, например, при реализации алгоритма Шора.

Авторы, конечно, прекрасно представляют эти трудности, поэтому в статье нет прямого упоминания оптического квантового компьютера, а называются лишь системы квантовой коммуникации. Таким образом, вопрос, вынесенный в заголовок этой заметки, пока остается открытым.

В.Вьюрков

1. *Phys.Rev.Lett.* 2005, 94, 030501

Точка привязывается к полости



В квантовом компьютере на атомах в ловушке взаимодействие между ними организуется с помощью оптического резонатора (cavity). Естественно попытаться проделать это и на искусственных атомах, каковыми являются квантовые точки. Одну из первых работ в этом направлении выполнили совместно сотрудники Univ. Wurzburg (Германия), ФИАН им. Лебедева, ИФТТ РАН (Россия) и Naval Res. Lab. (США). На рисунке представлены полученные с помощью

STM изображения мелких (а) и продолговатых крупных (b) *InGaAs* квантовых точек на *GaAs* подложке. Большие точки - лучше, в них экситон больше связан с фотонами в резонаторе. Сам резонатор устроен на основе брэгговских отражателей, сформированных с помощью *GaAs* и *AlAs* слоев. В спектре фотолуминесценции удалось наблюдать особенности, обусловленные связанным состоянием экситона в отдельной квантовой точке и фотона в резонаторе.

В.Вьюрков

1. *Nature* 2004, 432, 197

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Дефекты и высокотемпературная сверхпроводимость

Если отвлечься от споров о механизме высокотемпературной сверхпроводимости, пока не вполне понятно даже то, можно ли использовать для описания сверхпроводящего состояния ВТСП приближение среднего поля (пусть с какими-то модификациями) или же здесь требуются принципиально иные подходы. Одной из популярных концепций "необычной" сверхпроводимости является так называемая теория фазовых флуктуаций [1], согласно которой специфические свойства ВТСП обусловлены флуктуациями фазы параметра сверхпроводящего порядка Δ , а критическая температура T_c представляет собой температуру фазового упорядочения. Эта теория позволяет, в частности, объяснить наличие в ВТСП псевдощели при $T > T_c$.

Чтобы проверить справедливость той или иной теоретической модели, нужно сравнить ее предсказания с экспериментом. Недавно теория фазовых флуктуаций была с успехом использована для объяснения данных по контролируемому подавлению сверхпроводимости монокристаллов ВТСП $YBa_2Cu_3O_7$ радиационными дефектами, образующимися при электронном облучении [2]. В работе [2] была определена зависимость T_c от концентрации дефектов x_d (пропорциональной изменению удельного сопротивления $\Delta\rho_{ab}$ при облучении) во всем диапазоне от исходной (до облучения) величины $T_{c0} \approx 90\text{K}$ до $T_c = 0$. Ранее этого сделать не удавалось, так как неоднородное распределение дефектов по объему образца приводило к очень быстрому увеличению ширины перехода ΔT_c (то есть "погрешности" определения T_c), которая сравнивалась с T_c в лучшем случае при $T_c/T_{c0} \approx 0.3$. По этой причине функциональный вид зависимости $T_c(x_d)$, или $T_c(\Delta\rho_{ab})$, оставался неизвестным в самой интересной области $T_c/T_{c0} < 0.3$, где разные теории предсказывают разное поведение $T_c(\Delta\rho_{ab})$. И вот авторам [2] удалось получить дефектные монокристаллы, в которых $\Delta T_c \ll T_c$ вплоть до $T_c/T_{c0} \sim 0.01$! Совершенно неожиданно было обнаружено, что зависимость T_c от $\Delta\rho_{ab}$ является *квазилинейной* во

всем диапазоне $0 \leq T_c/T_{c0} \leq 1$. Это в корне противоречит предсказаниям теории распаривания Абрикосова-Горькова, основанной на приближении среднего поля: согласия с ней не удалось добиться ни при каком значении единственного подгоночного параметра – характеристической энергии ω_{pl} (см. рис. 1А). Поэтому авторы [2] и обратились к теории фазовых флуктуаций.

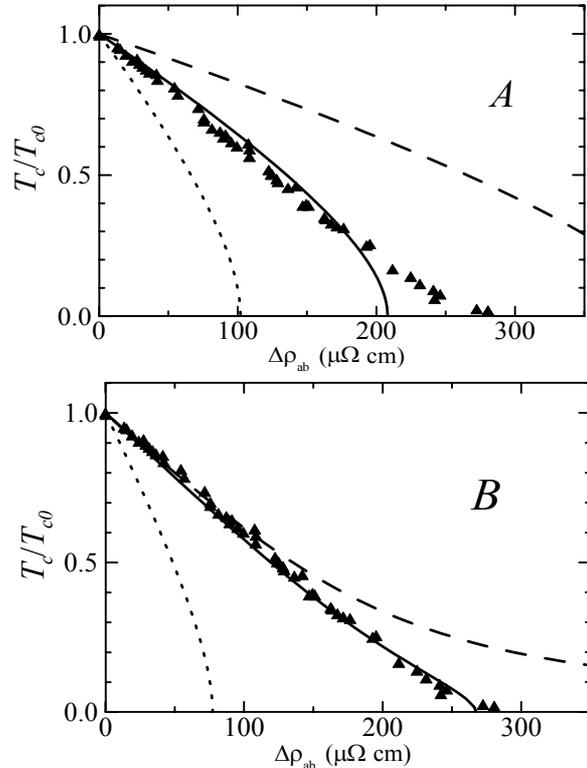


Рис. 1. Зависимость приведенной критической температуры монокристаллов ВТСП $YBa_2Cu_3O_7$ от изменения удельного сопротивления $\Delta\rho_{ab}$ при электронном облучении. Треугольники – эксперимент [2].

(А) – теория для d -волнового сверхпроводника при величинах характеристической энергии (имеющей порядок плазменной частоты, но не тождественной ей) $\omega_{pl} = 0.5$ эВ (штриховая линия), 0.7 эВ (сплошная линия), 1.0 эВ (пунктирная линия).

(В) – теория для $(d+s)$ -волнового сверхпроводника с $\omega_{pl} = 1.0$ эВ и относительным вкладом процессов рассеяния с переворотом спина в полную скорость рассеяния $\alpha = 0$ (штриховая линия), 0.045 (сплошная линия), 1 (пунктирная линия).

Они, однако, не учли следующие два обстоятельства. Во-первых, кристаллическая структура $YBa_2Cu_3O_7$ является орторомбической, что исключает чистую d -волновую симметрию Δ (к d -волне должна обязательно подмешиваться s -волна). Во-вторых, известно, что радиационные дефекты в плоскостях CuO_2 нарушают антиферромагнитные корреляции спинов атомов меди, то есть эффективно являются магнитными (отлична от нуля вероятность рассеяния электрона с переворотом спина). Между тем при сравнении эксперимента с теорией распаривания в [2] была использована формула для чисто d -волнового сверхпроводника с немагнитными дефектами, которые не переворачивают спин. Таким образом, теория распаривания и ее фундамент –

приближение среднего поля – были поставлены под сомнение без достаточных на то оснований (проще говоря, взяли не ту формулу ...).

А что получится, если аккуратно учесть две отмеченные выше особенности дефектных образцов $YBa_2Cu_3O_7$? Обобщение теории распаривания Абрикосова-Горькова на сверхпроводники с произвольной симметрией Δ (включая s -волну, d -волну, $d+s$ -волну и т.д.), содержащие при этом как немагнитные, так и магнитные дефекты было сделано в работах [3,4]. Оказалось [5,6], что эта "подправленная" теория распаривания прекрасно объясняет "неожиданные" результаты эксперимента [2] (см. рис. 1В). Таким образом, хотя процессы рассеяния с переворотом спина дают лишь незначительный (несколько процентов) вклад в полную скорость рассеяния электронов, они качественно изменяют поведение T_c анизотропного ($d+s$ -волнового) сверхпроводника при разупорядочении. Их учет позволяет привести теорию распаривания в согласие с экспериментальными данными.

Но тогда, наверное, пока рано сбрасывать со счетов и само приближение среднего поля. Ведь оно позволяет объяснить не только упомянутые, но и достаточно большое количество других экспериментов. Например, квазичастичные состояния ВТСП в координатно-импульсном пространстве прекрасно описываются в рамках картины БКШ-Боголюбова [7,8]. Да и псевдощель в ВТСП, по-видимому, связана не со сверхпроводящим, а с конкурирующим несверхпроводящим порядком [9]. Так может быть, прежде чем отправляться на поиски чего-то нового (пусть увлекательного, но призрачного), стоит сначала повнимательнее присмотреться к старому (пусть скучному, но надежному)?

Л. Опенов

1. *Nature* 1995, **374**, 434
2. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **91**, 047001
3. *Письма в ЖЭТФ* 1997, **66**, 627
4. *Phys. Rev.* 1998, **В 58**, 9468
5. *Phys. Rev. Lett.* 2004, **93**, 129701
6. *Письма в ЖЭТФ* 2005, **81**, 43
7. *Nature* 2003, **422**, 592
8. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **90**, 217002
9. *Nature* 2003, **422**, 698

МАГНИТЫ

Магнитопластичность «в бронзе»

Влияние магнитного поля на пластические свойства диамагнитных кристаллов привлекает интерес и интенсивно исследуется в течение последних 10-15 лет [1-3]. Несмотря на большой объем экспериментальных данных, до сих пор нет определенности в физических механизмах магнитопластического эффекта. Относительно понятной и физически непротиворечивой можно признать магнитопластичность ионных кристаллов (таких как $NaCl$, LiF , KCl). Для них установлено, что

магнитное поле изменяет структуру неравновесных кластеров, являющихся стопорами для дислокаций. Эти стопоры состоят из нескольких парамагнитных ионов, ориентация спинов которых и атомарная конфигурация могут быть изменены в магнитном поле, что, в свою очередь, изменяет и эффективность взаимодействия кластеров с дислокациями [3]. Подобные эффекты были обнаружены также в Si , $InSb$ и других полупроводниковых материалах [4,5].

Чрезвычайно интересным является ответ на вопрос о том, можно ли слабыми магнитными полями при комнатной температуре управлять пластичностью металлов (что важно для практики). Теория предсказывает магнитопластические эффекты в металлах при комнатной температуре [6], основываясь на представлениях о взаимодействии спинов, локализованных на дислокациях, со спинами парамагнитных дефектов, встречающихся на пути движущейся дислокации в объеме кристалла. Первые эксперименты в кристаллах Zn и Al были выполнены в [7, 8], однако эти исследования не были продолжены, оставив в недоумении «болельщиков» магнитопластичности. Несколько весьма странных особенностей было обнаружено в Zn . Например, обнаружено, что протекание тока по образцу значительно усиливает магнитопластический эффект. Нанесение диэлектрического лака на его поверхность устраняет влияние электрического тока. Сами авторы [7,8] считают, что слой лака предотвращает протекание постоянного тока по поверхности, что представляется довольно странным, так как независимо от точки подключения в металле токовые линии заполняют весь объем.

Более систематические исследования были проведены независимыми группами исследователей в оловянистой и бериллиевой бронзе. Первоначально обнаружено влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение в оловянистой бронзе [9]. Авторы обнаружили, что для появления магнитного эффекта необходимо сначала термически обработать образец, а затем поместить в магнитное поле. Последовательность действий в этих экспериментах была той же, что и при исследовании ионных кристаллов [3], т.е. в термически возбужденном образце происходил некоторый процесс, который оказывался чувствительным к магнитному полю.

Несмотря на схожесть описанного магнитопластического эффекта с тем, который изучался, например, в $NaCl:Eu$, оставалось много вопросов. В частности неясно, существенно ли, что магнитное поле было импульсным, ведь при используемой длительности импульсов ~ 100 мкс в образце неизбежно индуцировались вихревые токи, способные оказать значительно большее влияние на процессы в подсистеме дефектов по сравнению с действием самого постоянного поля. Недавно в работе [10] удалось ответить и на этот вопрос, поскольку был обнаружен эффект влияния постоянного магнитного поля на микротвердость

образцов бериллиевой бронзы в процессе ее старения после термообработки.

Нелинейная зависимость микротвердости от времени после закалки, наличие магнитоэластического эффекта не в начале старения, а на промежуточной стадии этого процесса, отсутствие эффекта в незакаленных кристаллах – все это делает магнитоэластический эффект в бронзе практически идентичным тому, что наблюдается в *NaCl:Eu* [3]. Использование рентгеновской дифракции позволило авторам [10] обнаружить, что в металлах в магнитном поле изменяется не только микротвердость, но и микродеформация блоков, параметр решетки и плотность дислокаций.

Таким образом, можно предполагать, что исследованные ранее магнитоэластические эффекты на модельных образцах могут быть перенесены на практически полезные материалы, а накопленная информация о механизмах этих эффектов уже сейчас может быть применена для обсуждения сходных макроскопических проявлений эффекта магнитного поля. Механизмы влияния магнитного поля на пластичность бронзы скорее всего не связаны с моделями, предложенными в [6], поскольку действие магнитного поля и движение дислокаций были разделены во времени, и поле не могло повлиять на процесс взаимодействия движущихся дислокаций со стопорами. Скорее всего, в бронзе, так же, как в кристаллах *NaCl:Eu*, в процессе старения образуются магниточувствительные кластеры, атомарная структура которых чувствительна к наличию магнитного поля.

Отметим, что поиском именно таких кластеров занимаются химики-синтетики в содружестве с физиками. Они планируют получить малоатомные ячейки памяти, способные «переключаться» слабым полем при высоких температурах. Пока что им не удалось удалиться от температуры жидкого гелия и полей 15-25Тл. Но может быть нужные кластеры уже найдены в работах, перечисленных в этой заметке?

Р.Моргунов

1. *Кристаллография*, 2003, **48**, 768
2. *ФТТ*, 2004, **46**, 769
3. *УФН*, 2004, **174**, 131
4. *ЖЭТФ*, 2003, **122**, 123

5. *ФТТ*, 2001, **43**, 462
6. *Phys.Rev.B*, 1995, **52** 15829
7. *Кристаллография*, 1990, **35**, 1014
8. *ФТТ*, 1992, **34**, 155
9. *ФТТ*, 1997, **39**, 1234
10. *ФХОМ*, 2003, **№3**, 18

КОНФЕРЕНЦИИ

19-23 сентября 2005 г., Ялта, Украина. NATO Advanced Research Workshop “Electron Correlations in New Materials and Nanosystems” (*ECNMN'2005*).

<http://www.i.com.ua/~ecn>

THE MAIN TOPICS

- nanodevices,
- mesoscopic superconductivity and semiconductors,
- new nanodevice applications,
- novel materials (C_{60} and nanotubes),
- quantum computing technology,
- mesoscopic superconductivity,
- physics of novel superconductivity,
- sensors and biosensors.

The ARW will be open to approximately 100 participants. Registration form should contain the following information:

REGISTRATION FORM

Name and Surname:

Nationality:

Address:

Phone:

Fax:

E-mail:

Registration forms should be sent to Prof. S.Kruchinin:

e-mail: ecn@i.com.ua, kruchitp@bitp.kiev.ua

Deadline for registration is **1 May 2005**.

Экспресс-бюллетень ПерсТ выходит

при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ,

Научных Советов Российских научно-технических программ:

“Актуальные направления в физике конденсированных сред”,

“Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники”, “Физика твердотельных наноструктур”

Редактор: С.Корецкая тел: (095) 930 3389, e-mail: stk@issp.ras.ru

В подготовке выпуска принимали участие:

В.Вьюрков, А.Елецкий, М.Компан, К.Кугель, Ю.Метлин, Р.Моргунов, Л.Опенев

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Ю.Мухин

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