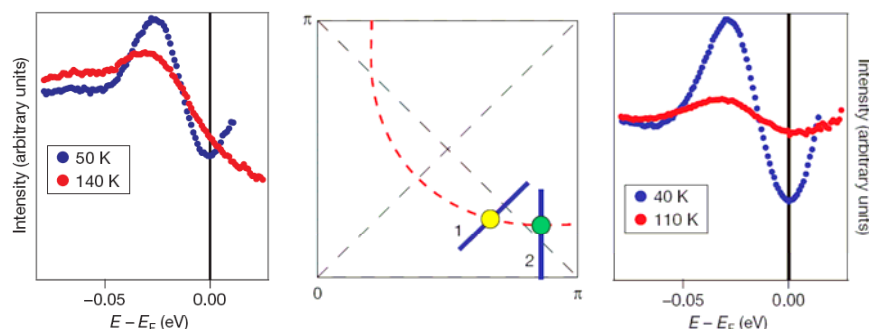


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Некогерентные и “несимметричные” куперовские пары в ВТСП

Каждый сверхпроводник характеризуется сверхпроводящей щелью Δ – энергией, которую необходимо затратить для разрыва одной куперовской пары. В обычных (“низкотемпературных”) сверхпроводниках $\Delta = 0$ при температурах выше критической температуры T_c и возрастает по мере охлаждения образца ниже T_c . А в высокотемпературных купратных сверхпроводниках имеются многочисленные свидетельства наличия еще одной энергетической щели при $T > T_c$, которую называют “псевдощелью” [1]. Ее природа до сих пор окончательно неясна. В литературе обсуждалось два варианта: либо псевдощель появляется из-за формирования так называемых локальных пар [2] (но без необходимой для состояния с $R=0$ когерентности пар), либо она отражает наличие в ВТСП какого-то другого состояния, конкурирующего со сверхпроводящим состоянием. Различить эти два случая в принципе можно по наличию (для псевдощели сверхпроводящей природы) или отсутствию (в противном случае) электронно-дырочной симметрии спектров возбуждений квазичастиц относительно уровня Ферми.



Фотоэмиссионные спектры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ в двух различных точках поверхности Ферми (1 и 2) при температуре выше и ниже $T_c = 65$ К. Слева – для точки 1 (ближе к узловому направлению), справа – для точки 2 (ближе к антиузловому направлению).

Специалисты из Brookhaven National Laboratory (США) представили результаты исследования фотоэмиссионных спектров слабо допированного ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ [3], которые ясно показывают, что на участке поверхности Ферми вблизи так называемого “антиузлового направления” (то есть направления, вблизи которого сверхпроводящая щель при $T < T_c$ максимальна) спектры симметричны как выше, так и ниже T_c (см. рис.). Таким образом, в этой области поверхности Ферми псевдощель имеет сверхпроводящую природу. Но ближе к “узловому направлению” (вдоль которого d -волновая сверхпроводящая щель при $T < T_c$ обращается в нуль) электронно-дырочная симметрия спектров при $T > T_c$ отсутствует (см. рис.), то есть здесь псевдощель не имеет никакого отношения к некогерентным парам (куперовским или же локальным). Следовательно, спаривание носителей (без их конденсации) выше T_c происходит только в определенных направлениях импульсного пространства и соответствующих

И далее ...

- 2 Купратные и безмедные ВТСП: одно и то же или все-таки нет?

СПИНТРОНИКА

- 3 Электроника без заряда

Электрические бега магнитных доменов

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 4 Квантовая запутанность и классическая термодинамика

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Новый способ получения композиционных материалов «наночастица - углеродное нановолокно»

- 6 Плазмоника как прикладная наука

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Термическая стабильность полевого эмиссионного диода на основе углеродной нанотрубки

- 8 Обратимое разделение однослойных нанотрубок

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 8 Новая модель R&D чипов в США. Конец корпоративной науки?

- 10 НОВЫЕ КНИГИ

им направлениях координатного пространства, а именно – в направлениях связей Cu-O. Этот результат согласуется с теориями, предсказывающими “одномерный” характер спаривания в ВТСП [4], и позволяет отчасти понять причину противоречивости имеющихся в литературе экспериментальных данных о природе псевдощели.

Л.Опенев

1. М.В.Садовский, УФН **171**, 539 (2001).

2. V.M.Loktev et al., Phys. Rep. **349**, 1 (2001).

3. H.-B.Yang et al., Nature **456**, 77 (2008).

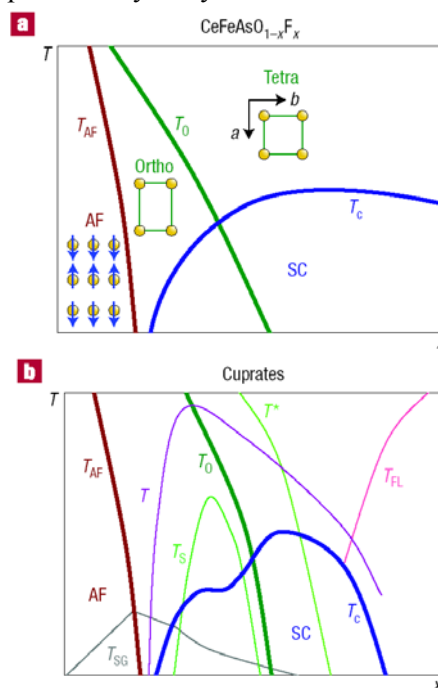
4. A.M.Tsvelik et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 237001 (2008).

Купратные и безмедные ВТСП: одно и то же или все-таки нет?

На протяжении двух последних десятилетий поиски новых высокотемпературных (а если повезет – то и комнатотемпературных) сверхпроводников концентрировались (за малым исключением) на семействе купратных перовскитов, аналогичных по своим структуре и свойствам первому ВТСП, открытому Беднорцем и Мюллером в 1986 году. В начале 2008 года было открыто новое семейство безмедных ВТСП – оксипниктиды, в структуре которых, как и у купратов, присутствует кислород, но нет меди. Хотя их критическая температура $T_c \approx 50$ К почти в два раза ниже, чем у купратных ВТСП, интерес к новому семейству очень велик из-за, во-первых, надежды найти в нем сверхпроводник с гораздо более высокой T_c , а во-вторых – представившейся наконец-то возможности сравнить купраты не с далеко отстоящими от них (по величине T_c) низкотемпературными сверхпроводниками, а с близкими по этому параметру (и при этом имеющими другой элементный состав) материалами.

В работе [1] методом нейтронной спектроскопии исследованы структура и магнитная фазовая диаграмма $\text{CeFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ (типичного представителя оксипниктидов) в координатах температура «(T) – концентрация носителей заряда (x)». Полученные результаты (см. рис.) указывают на удивительное сходство купратных и безмедных ВТСП. Несмотря на более богатую фазовую диаграмму купратов (псевдощель, страйпы, спиновое стекло, переход ферми-жидкость/неферми-жидкость), вид и взаимное расположение кривых, описывающих концентрационную зависимость T_c , температуры структурного перехода и температуры перехода в антиферромагнитное состояние, очень похожи в обеих системах. Во-первых, в каждой из них недопированные исходные соединения являются антиферромагнитными (только в купратах они – диэлектрики, а в оксипниктидах – металлы, хотя и с очень низкой проводимостью). Во-вторых, в каждой системе антиферромагнетизм при допировании исчезает чуть раньше, чем появляется сверхпроводимость. И, наконец, в-третьих, температура структурного перехода и там, и там становится равной нулю при величине x , отвечающей максимуму T_c . Справедливо-

сти ради все же следует отметить важное отличие фазовых диаграмм купратов и оксипниктидов: в последних величина T_c , достигнув при допировании своего максимума, затем очень медленно уменьшается и не обращается в нуль, так что передопированное несверхпроводящее состояние на их фазовой диаграмме отсутствует.



Схематическое изображение фазовых диаграмм безмедных (a) и купратных (b) ВТСП. Здесь T_{AF} – температура антиферромагнитного перехода, T_0 – температура структурного перехода орто-тетра, T_{SG} – температура перехода в состояние спинового стекла, T_S – температура упорядочения страйпов, T^* – температура появления псевдощели, T_{FL} – температура кроссовера ферми-жидкость/неферми-жидкость.

Является ли указанный набор общих черт купратных и безмедных ВТСП признаком одинакового механизма их сверхпроводимости? Не факт, потому что пока не ясно, какие именно из особенностей тех и других систем действительно существенны для сверхпроводимости, а какие играют лишь второстепенную роль. И в этой ситуации очень важно выяснить симметрию сверхпроводящего параметра порядка Δ в оксипниктидах. Некоторые эксперименты свидетельствуют о том, что она является d -волновой. Другие же, напротив, говорят в пользу s -волновой симметрии Δ . В ряде последних теоретических работ (см., например, [2]) высказано предположение, что хотя параметр порядка в безмедных ВТСП и s -волновой, но имеет разный знак в разных “карманах” поверхности Ферми. Так, может быть, для высокотемпературной сверхпроводимости важна не столько симметрия параметра порядка, сколько изменение его знака?

Л.Опенев

1. J.Zhao et al., Nature Mater. **7**, 953 (2008).

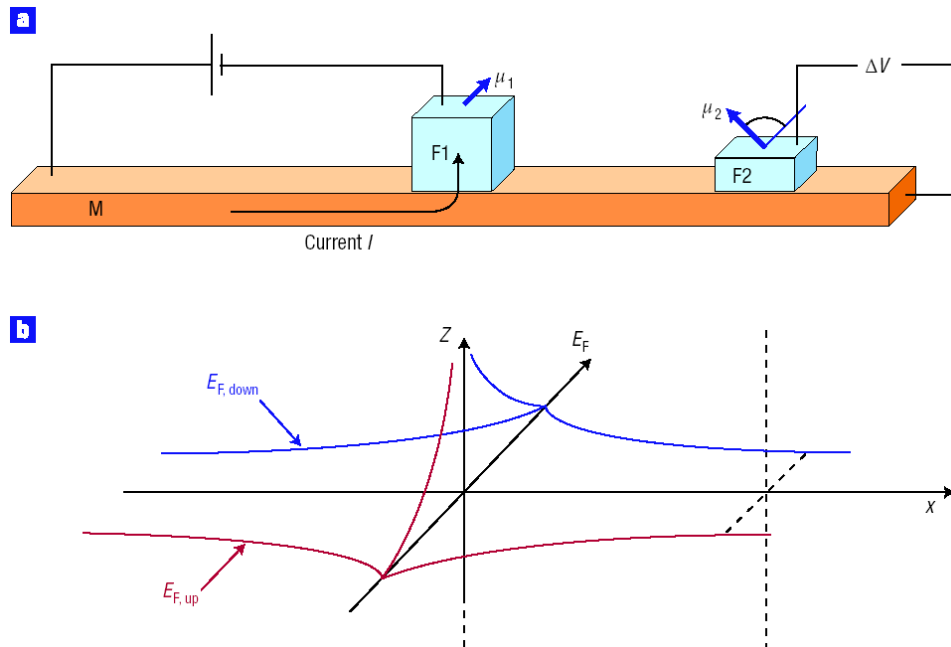
2. I.I.Mazin et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 057003 (2008).

СПИНТРОНИКА

Электроника без заряда

В устройствах магнитной памяти запись информации осуществляется с помощью электрических токов, которые генерируют магнитные поля, необходимые для перемагничивания частиц нанометровых размеров. Непрерывная миниатюризация таких устройств требует увеличения энергии магнитной ани-

зотропии частицы, на которую записывается информация, дабы предотвратить ее случайное перемагничивание из-за тепловых флуктуаций. Это, в свою очередь, влечет за собой необходимость увеличения магнитных полей, а следовательно – и создающих их токов. В результате приборы сильно перегреваются, ухудшаются их характеристики и т.п.



Нелокальный спиновый вентиль.

а) Электрический ток I течет по проводу из нормального металла M через ферромагнитную частицу $F1$ с магнитным моментом μ_1 . Измеряется напряжение ΔV между металлом M и другой ферромагнитной частицей $F2$ с магнитным моментом μ_2 , расположенной вне области протекания зарядового тока. Величина нелокального магнитосопротивления $\Delta V/I$ при этом зависит от взаимной ориентации магнитных моментов μ_1 и μ_2 .

б) Схематическое изображение изменения энергии Ферми для электронов со “спином вверх” и “спином вниз” в металле M и частице $F1$.

В работе [1] для перемагничивания частиц предложено использовать не зарядовые, а спиновые токи. Предлагаемое авторами устройство представляет собой вариант так называемого “нелокального спинного вентиля” (см. рис.). При инжекции зарядового тока через границу раздела нормального металла M (Cu или Au) и ферромагнетика $F1$ (Fe, Co, Ni или NiFe) происходит следующее. Если в металле электроны со “спином вверх” и “спином вниз” рассеиваются одинаково и поэтому дают одинаковый вклад в проводимость (а значит – и в полный ток), то в ферромагнетике, напротив, интенсивность рассеяния электронов с разным направлением спина сильно различается. Это приводит к локальному “расщеплению” уровня Ферми, который становится разным для электронов со “спином вверх” и “спином вниз”, $\Delta E_F \neq 0$, и к возникновению вблизи границы раздела неравновесного (но стационарного) состояния с ненулевым спином (“эффект накопления спина”). Справа от частицы $F1$ течет уже только спиновый ток, пропорциональный градиенту $d(\Delta E_F)/dx$. Если магнитные моменты μ_1 и μ_2 неколлинеарны, то спиновый ток через границу раздела $M/F2$ изменяет направление μ_2 , при условии что ΔE_F превышает определенную пороговую величину.

Результаты работы [1] открывают путь к созданию новых спинтронных устройств, неподвластных губительному джоулеву нагреву, в том числе, например, спиновых транзисторов и логических элемен-

тов на их основе. Но прежде чем в персональных компьютерах появятся “спиновые процессоры”, предстоит решить еще немало проблем, как фундаментальных, так и прикладных. Одна из них заключается в резком уменьшении длины спиновой диффузии (от микрон в меди и десятков микрон в полупроводниках) при повышении температуры до комнатной. А когда все препятствия будут преодолены, и спинтроника войдет в нашу повседневную жизнь наряду с зарядовой электроникой, то следующей целью станет “мезоскопическая спинтроника”, использующая фазовую когерентность спиновых состояний.

1. T.Yang et al., *Nature Phys.* 4, 851 (2008).

Электрические бега магнитных доменов

В недавней статье современного классика в области магнетизма И.Е. Дзялошинского предсказывается, что электрическое поле больше некоторого критического может в однородно намагниченной среде зародить магнитную неоднородность в виде доменной границы [1]. Такое явление, несомненно, может представлять интерес как прообраз памяти с электрической записью и магнитным считыванием. К сожалению, оценки величины порогового поля, в которых происходит такое зарождение, не приводятся, но можно подозревать, что оно должно быть значительным.

Если не зарождение, то, по крайней мере, передвижение уже существующих магнитных доменных

границ под действием электрического поля было обнаружено в пленках ферритов-гранатов исследователями из Московского университета [2]: головки доменов двигались в поле, создаваемым заряженным острием (рис. 1а). На возможность такого движения в неоднородном электрическом поле также указывается в статье Дзялошинского, причем скорость доменной границы должна быть пропорциональна градиенту поля. Как показывают экспериментальные исследования, скорость, действительно, возрастает с увеличением потенциала острия (рис. 1б). Растет также и результирующее отклонение доменной границы от положения равновесия.

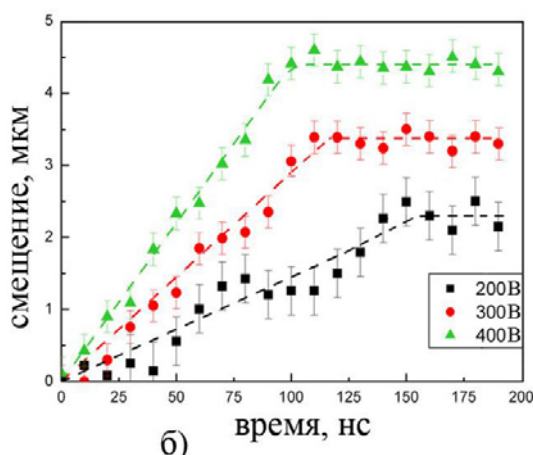
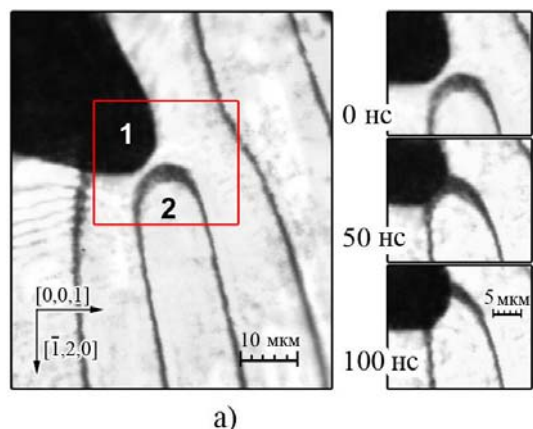


Рис. 1. Движение головки магнитного домена, вызванное электростатическим воздействием: а - исходная конфигурация (1 – электрод, 2 – головка магнитного домена, показаны также последовательные положения головки в различные моменты времени); б - зависимость смещения доменной границы от времени при различном потенциале на электроде.

Сопоставив результаты измерений в электрическом поле с измерениями в магнитном поле, удалось определить величины, характеризующие эффект: напряжение 500 В (что соответствует напряженности на острие 1 МВ/см) производит такой же эффект, как магнитное поле 50 Э. Отсюда можно также определить константу эффекта, а по ней оценить пороговое поле, которое, согласно Дзялошинскому, может зародить магнитную неоднородность. Величина этого поля оптимизма не внушает – 300 МВ/см, что даже при толщинах диэлектрических слоев 10 нм требует управляющих напряже-

ний в сотни вольт, а при меньших толщинах будет сказываться туннельный эффект. Кроме того, при таких полях резко возрастает вероятность электрического пробоя.

Впрочем, невозможность зарождения магнитных структур еще не повод для уныния, поскольку в новой концепции магнитной памяти, предложенной Стюартом Паркиным [3] перемагничивание бита информации не так уж необходимо, достаточно и сдвига границы между доменами (рис. 2). Запоминающее устройство Паркина представляет собой сэндвич из двух магнитных слоев, разделенных немагнитной прослойкой. Намагниченность нижнего слоя неизменна, а намагниченность свободного верхнего слоя зависит от положения доменной границы. При поперечных размерах слоя 100 нм и скорости доменной границы 100 м/с (характерные величины в [2]) время переключения составит 1 нс. Считывание состояния такого элемента памяти осуществляется, как и в любом другом устройстве спинтроники, на основе эффекта гигантского магнитосопротивления – по изменению сопротивления току, протекающему через «сэндвич» перпендикулярно слоям.

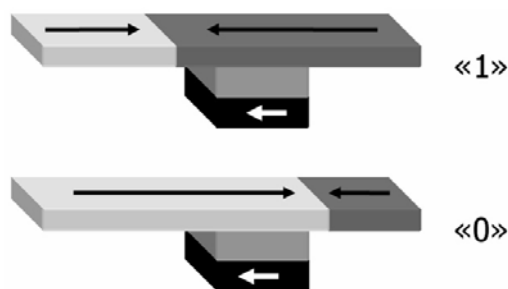


Рис. 2. Альтернативная конструкция ячейки памяти. Положение доменной стенки в свободном слое структуры определяет состояния «0» и «1».

А. Пятаков

1. I. Dzyaloshinskii, *Europhys. Lett.* **83**, 67001 (2008).
2. A.S. Logginov et al, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 182510 (2008).
3. Stuart S.P. Parkin, *US Patent* 6920062 (2005).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовая запутанность и классическая термодинамика

Квантовая запутанность, которая поначалу была предметом квазифилософских дискуссий, сегодня рассматривается как важнейший ресурс квантовой информации и квантовой криптографии. Она отражает такое коррелированное поведение двух или нескольких частиц, которое нельзя описать на языке классической физики. Характер зависимости состояния одной из частиц от состояний остальных можно понять только в рамках квантовой механики. Однако математический аппарат для описания запутанности очень сложный, и поэтому ученые уже давно пытались найти к ней какой-нибудь другой подход. Так, например, в последние годы была подмечена определенная аналогия между запутан-

ными квантовыми состояниями и обычной классической термодинамикой. В работе [1] идея о подобного рода аналогии получила дальнейшее развитие. Авторы [1] показали, что при использовании незапутывающих в асимптотическом пределе операций переход запутанной системы из состояния X в состояние Y возможен только в том случае, когда так называемая энтропия запутанности E_R (величина которой определяется конкретным типом состояния, то есть, фактически, его матрицей плотности) не возрастает, $E_R(X) \geq E_R(Y)$. Напомним, что адиабатический переход классической системы из состояния A в состояние B возможен, если для энтропий этих состояний справедливо соотношение $S(A) \leq S(B)$. Таким образом, аналог второго закона термодинамики для квантовых систем справедлив “с точностью до наоборот”.

Значение полученного в [1] результата состоит в том, что он имеет самый общий характер и остается справедливым даже при наличии “шума”. Теперь было бы интересно попытаться сформулировать для запутанных систем аналог первого закона термодинамики. Для этого нужно сначала понять, какая характеристика запутанной квантовой системы соответствует классической внутренней энергии.

I. F.G.S.L.Brandao, M.B.Plenio, Nature Phys. 4, 873 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Новый способ получения композиционных материалов «наночастица - углеродное нановолокно»

Новые наноматериалы, состоящие из углеродных нанотрубок или нановолокон, декорированных наночастицами металлов (например, платины или палладия), перспективны для применения в качестве химических сенсоров, сорбентов водорода, электрокатализаторов топливных элементов [1,2]. Неудивительно, что исследователи постоянно ищут такие способы получения этих нанокомпозитов, которые позволили бы наиболее полно использовать их уникальные свойства. О некоторых новых методах уже сообщалось в публикациях ПерсТа [3]. Но, оказывается, весьма эффективным может оказаться умелое применение давно известного способа. В недавней совместной японско-корейской работе сообщается о получении углеродных нановолокон с наночастицами палладия на поверхности при помощи электроспиннинга (*electrospinning*) и последующей термообработки [4].

Процесс электроспиннинга – вытягивание тончайшего волокна (на микро- или нано- уровне) из жидкости под действием электрического поля – известен более 100 лет. Он был запатентован [5] еще в 1902 году! Важный шаг от теории к промышленному производству волокон и пряжи из полимерных прекурсоров был сделан в 1934 г. в Германии [6].

Российские ученые также внесли большой вклад. Технология производства нетканых волокнистых материалов, основанная на электростатическом вытягивании волокон из растворов полимеров, была разработана для нужд атомной промышленности в сороковых годах прошлого века в СССР в НИФХИ им. Л.Я. Карпова под руководством И.В. Петрянова-Соколова. Она применяется и при производстве фильтров Петрянова.

В последнее время электроспиннинг стал чрезвычайно популярным! Произошло это благодаря развитию нанотехнологий. Оказалось, что с его помощью можно получать нановолокна из самых разных материалов – полимеров, композитов, полупроводников, металлов, даже керамики. Более того, используя различные конструкции и модификации аппаратуры, описанные в обзоре [7], можно *in situ* формировать ансамбли нановолокон, расширяющие возможности применения. Электроспиннинг заинтересовал и нанобиотехнологов, в частности, для производства волокон медицинского назначения.

«Классический» вариант устройства показан на рис. 1.

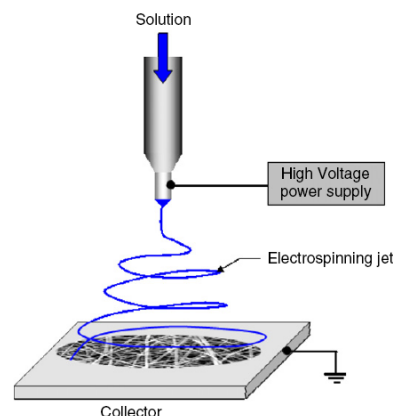


Рис.1. Типичное устройство электроспиннинга [7].

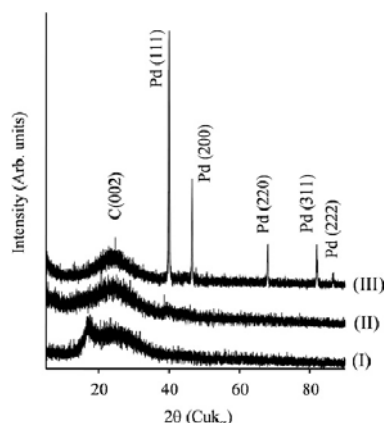


Рис.2. Рентгеновские дифрактограммы исходных нановолокон (I), нановолокон после стабилизации на воздухе (II) и после термообработки в атмосфере аргона (III).

Для синтеза углеродных нановолокон с наночастицами Pd авторы [4] модифицировали методику следующим образом. Они добавили в раствор полимерного прекурсора (полиакрилонитрила) хлорид палладия. Полученные нановолокна стабилизировали термообработкой на воздухе (280°C, 1 час).

Стабилизация на воздухе – важный шаг для превращения органических волокон в углеродные без нарушения морфологии волокна. Катионы палладия, захваченные волокном при его формировании в процессе электроспиннинга, при этом превращаются в наночастицы оксида палладия диаметром менее 10 нм. (Авторы отмечают, что несомненное влияние каталитически активного палладия на процесс стабилизации еще предстоит детально изучить). Затем проводят термообработку в атмосфере

сфере аргона (300 и 800°C, 1 час), которая приводит к появлению на внешней поверхности волокон равномерно распределенных круглых наночастиц металлического палладия (100-200 нм). Образование частиц металла подтверждается соответствующими пиками на рентгеновских дифрактограммах (рис.2). Данные сканирующей электронной микроскопии для нановолокон на разных стадиях синтеза приведены на рис.3.

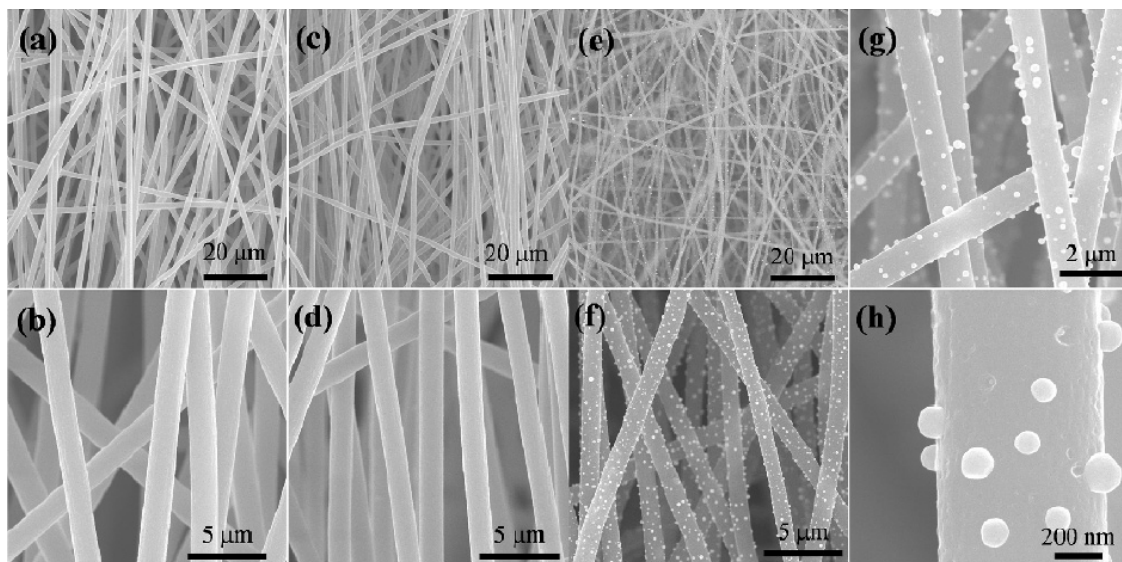


Рис.3. Микрофотографии полученных нановолокон (a,b); нановолокон после стабилизации на воздухе (c,d) и после термообработки в атмосфере аргона (e-h).

Такой способ получения нановолокон, декорированных наночастицами металла, имеет ряд преимуществ перед обычным синтезом нановолокон или нанотрубок на катализаторах: 1) не нужно удалять частицы катализатора, 2) нановолокна могут быть получены в виде тонкой ткани, 3) частицы Pd частично внедрены в волокно и поэтому прочно связаны с его внешней поверхностью.

Этим методом, по мнению авторов [4], могут быть получены материалы на основе углеродных волокон с наночастицами различных металлов (например, Au, Ag, Pt, Ru, Rh, Os, Ir), которые без дальнейшей обработки могут использоваться как эффективные электроды (нано-Pt), в био/газовых сенсорных (нано-Au) и противомикробных (нано-Ag) устройствах, в качестве фильтров и др. Таким образом, возможные области применения не ограничиваются физикой, химией, материаловедением и технологией, но также включают медицину и биологию.

О.Алексеева

1. *ПерсТ* 12, вып.1/2, с.5 (2005).
2. *ПерсТ* 15, вып.17, с.6 (2008).
3. *ПерсТ* 14, вып.4, с.4 (2007).
4. C.Kim et al., *Nanotechnology* 19, 145602 (2008).
5. J.F.Cooley. *U.S. Patent 692,631* (1902); W.J.Morton. *U.S. Patent 0,705,691* (1902).
6. A.Formhals. *U.S. Patent 1,975,504* (1934).
7. W.E.Teo. *Nanotechnology* 17, R89 (2006).

Плазмоника как прикладная наука

Плазмоны – это электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы металла и диэлектрика, амплитуда которых экспоненциально спадает с расстоянием от поверхности раздела сред. Это означает, что энергия плазмонов сосредоточена в области вблизи поверхности на расстоянии меньшем длины волны. Плазмоны представляют собой некое «кентавра»: верхняя часть которого – электромагнитная волна в диэлектрике, а нижняя – волна плотности в электронной плазме, образованной свободными электронами в металле. Две эти волны синфазны и бегут с одной скоростью, которая может быть на порядок меньше скорости света. Плазмон можно возбудить, например, с помощью световой волны, падающей на металл из диэлектрика под некоторым углом, таким, чтобы проекция скорости световой волны на плоскость границы раздела была равна скорости плазмона. Автором [1] выделено несколько примеров, иллюстрирующих идеи плазмоники, которые можно использовать в практических целях.

Первоначальные работы в плазмонике были сконцентрированы на исследовании плазмонного резонанса и локального усиления электромагнитного поля в наноструктурах. Так, в зазоре между двумя металлическими призмами с характерными размерами сотни нанометров (рис.1a) амплитуда колеба-

ПерсТ, 2008, том 15, выпуск 23

ний электромагнитной волны усиливается в сотни раз. В результате этого становятся возможными нелинейные оптические эффекты в окружающем газе. Например, за счет эффекта генерации высших гармоник в аргоне излучение с длиной волны 800 нм

преобразуется в коротковолновое ультрафиолетовое излучение с длиной волны 47 нм. Чип с матрицей из тысяч таких структур в сочетании с лазером подсветки может работать как источник излучения для фотолитографии высокого разрешения.

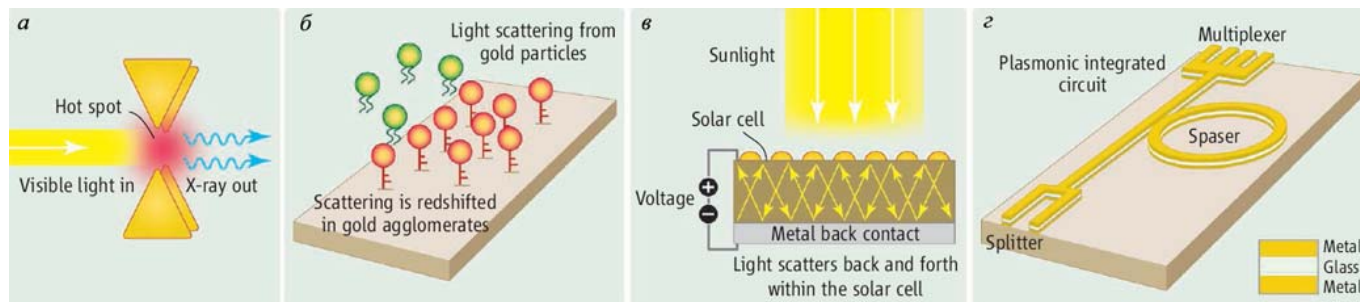


Рис. 1. Плазмоника в приложениях: а - генерация коротковолнового ультрафиолета; б - частицы-биосенсоры; в - фотоэлементы с увеличенным КПД; г - плазмонные интегральные схемы.

Усиление электромагнитного поля вследствие плазмонного резонанса наблюдается также вблизи металлических наночастиц, используемых в качестве маркеров. Поскольку частота резонанса плазмонных частиц сильно зависит от размера частиц и расстояния между ними, то частицы, осевшие на подложку (рис. 1б), рассеивают свет иначе, чем свободные, в результате чего частота плазмонного резонанса сдвигается. Если теперь прикрепить к частицам белковые молекулы, которые будут образовывать связи только с определенным веществом, то они становятся биосенсорами, с помощью которых можно визуализировать движение молекулярных моторов, детектировать молекулы ДНК и т.п. Такие же частицы-биосенсоры используются в стандартном тесте на беременность: темно-красный цвет положительного теста – это результат рассеяния света на осевших на фильтре наночастицах (впрочем, до таких тонкостей, как измерение сдвига частоты плазмонного резонанса в этом случае не доходит).

Высокая концентрация электромагнитной энергии вблизи металлических частиц может увеличить эффективность фотоэлементов и солнечных батарей (рис. 1в). Рассеяние света на наночастицах позволяет осуществить многократное прохождение света в полупроводнике, тем самым, увеличив эффективное поглощение световой энергии.

То, что скорость плазмонов может быть значительно меньше скорости света, на первый взгляд, кажется недостатком, проигрышем в быстродействии. Но плазмонике не ставится задача обеспечить передачу информации на большие расстояния – во-первых, этому мешает затухание плазмонов (они распространяются на расстояния от силы в несколько микрон), а во вторых, с этим отлично справляются оптические волокна. С другой стороны, интеграция оптических волноводов в полупроводниковые электронные схемы, которые давно уже вышли на нанометровый масштаб, представляется затруднительной из-за их относительно больших размеров, ограниченных длиной волны света. Меньшая скорость плазмо-

на означает и меньшую длину волны по сравнению со световой волной той же частоты (преобразование световой волны в плазмон не изменяет частоты). Это означает, что свет, преобразованный в форму плазмона, за счет меньшей длины волны может быть локализован на масштабах десятков нанометров, а то, что плазмоны затухают на малых расстояниях не такая уж большая проблема для наноразмерных устройств. С помощью плазмонных волноводов можно будет реализовать оптические интегральные микросхемы (рис. 1г), и даже воздействовать на сигнал оптической частоты другим оптическим сигналом (поскольку плазмоны, в отличие от световых волн, взаимодействуют друг с другом), то есть реализовать давнюю мечту всех занимающихся фотоникой. Отсюда уже недалеко до оптических вычислений и оптического компьютера.

А. Пятаков

1. A. Polman, *Science* **322**, 868 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Термическая стабильность полевого эмиссионного диода на основе углеродной нанотрубки

Основным элементом современных электронных приборов является диод, обладающий способностью пропускать электрический ток, пропорциональный приложенному напряжению, в случае, если это напряжение имеет определенный знак. В настоящее время наиболее распространенным типом диодов является полупроводниковый диод, что связано с низкой стоимостью и миниатюрными размерами таких приборов. Однако, существенным недостатком полупроводниковых диодов является их высокая чувствительность к повышению температуры. Альтернативой полупроводниковым диодам могут стать разработанные недавно полевые эмиссионные диоды на основе углеродных нанотрубок (УНТ), которые хотя и превосходят по своим размерам полупроводниковые диоды, должны обладать существенно более стабильными характеристиками по отношению к изменениям температуры.

Это подтверждается результатами детального исследования температурных зависимостей параметров полевых эмиссионных диодов, выполненное группой исследователей из нескольких университетов США [1]. В качестве источника полевой эмиссии авторы использовали вертикально ориентированные многослойные УНТ высотой около 340 мкм, синтезированные методом химического осаждения паров (CVD) ферроцена и ксилола на подложке SiO₂, покрытой слоями золота и хрома. В качестве анода использовали полированную медную пластину. Эмиссионные измерения производили в вакууме 10⁻⁶ Торр при межэлектродном расстоянии 530 мкм. Таким образом, расстояние от концов УНТ до анода составляло около 190 мкм. Вольт-амперные характеристики диода в отношении прямого и обратного токов измеряли при температурах 100, 200 и 300°С и изменении приложенного напряжения от 0 до 490 В для прямого и от 0 до 1100 В для обратного токов. Результаты измерений приведены в таблице.

T, °C	Прямой ток		Обратный ток	
	Напряжение, В	Плотность тока эмиссии, мА/см ²	Напряжение, В	Плотность тока эмиссии, мА/см ²
25	490	7,1	1100	0,010
100	490	7,1	1100	0,144
200	490	7,2	1100	0,180
300	490	7,2	1100	0,188

А.Елецкий

1. C.Masarapu et al., *J. Phys. Chem. C* **III**, 12112 (2007).

Обратимое разделение однослойных нанотрубок

Как известно, при массовом производстве однослойных углеродных нанотрубок (УНТ) диаметром около 1 нм образуются не отдельные нанотрубки, а жгуты диаметром примерно 10 нм, содержащие порядка сотни таких объектов. Нанотрубки, входящие в состав жгута, связаны между собой силами вандерваальсовского взаимодействия, которое не позволяет жгутам распасться при нормальных условиях. Между тем, для использования УНТ в качестве элемента нанoeлектронных устройств необходимо располагать отдельными нанотрубками. В связи с этим возникает актуальная технологическая проблема отделения отдельных однослойных УНТ без разрушения нанотрубок и жгутов. Интересный подход к решению этой проблемы предложен и реализован недавно группой исследователей из нескольких американских лабораторий, которые для разделения УНТ использовали их кулоновское отталкивание, возникающее в результате нанесения зарядов

[1]. Однослойные УНТ, объединенные в жгуты, выращивали методом химического осаждения паров на кремниевой подложке, покрытой слоем диоксида кремния толщиной 100 нм. Полученные образцы помещали в камеру сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), где их в течение 15–20 с облучали электронным пучком с энергией 1–5 кэВ при плотности тока 0,8–20 мА/см². Эффект отделения отдельных нанотрубок от жгутов, а также разделения жгутов на более тонкие составляющие наблюдали с помощью СЭМ. Исследование электропроводности исходных образцов жгутов, а также образцов, подвергнутых облучению, показало, что в результате процедуры облучения проводимость образцов в несколько раз снижается.

Продemonстрированный эффект отделения УНТ от жгутов при облучении электронным пучком имеет обратимый характер. Так, выдержка большинства образцов в течение нескольких часов на воздухе приводит к восстановлению исходной проводимости жгутов, что указывает на их восстановление. Подобная процедура разделения и восстановления жгутов можно повторять многократно без изменения проводимости образцов на каждой стадии эксперимента. Анализ показывает, что причиной восстановления жгутов является потеря электронов в результате взаимодействия с молекулами воздуха.

А.Елецкий

1. S. Sahoo et al., *Appl. Phys. Lett.* **93**, 083120 (2008).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Новая модель R&D чипов в США. Конец корпоративной науки?

Стенания по поводу потери Штатами лидерства в полупроводниковых исследованиях и разработках (R&D) вызваны заявлением Bell Labs о прекращении исследований в области полупроводниковых материалов и приборов [1]. Bell Labs была первой в мире не только в изобретении транзистора, но также именно ей принадлежит первенство в разработке полевых транзисторов на основе МОП структур (MOSFET), приборов с зарядовой связью (ПЗС), молекулярно-лучевой эпитаксии, электронолучевой литографии, фотовольтаических элементов, СО₂ лазеров и др.

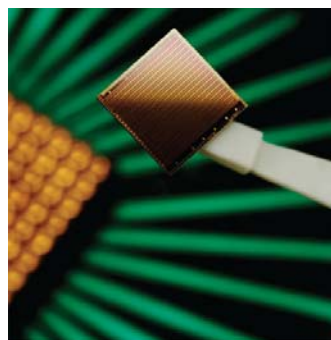
Bell Labs, основанная в Murray Hill (штат Нью-Джерси) и сфокусированная на полупроводниковых исследованиях, теперь стала исследовательским звеном компании Alcatel-Lucent, основанной в Париже. Сегодняшний штат Labs (1000 исследователей, бюджет 2 млрд. долл.) будет заниматься исследованиями, способными самоокупаться в короткие сроки – беспроводная связь, оптика и компьютерные алгоритмы. Лишь небольшая группа продолжит фундаментальные исследования по быстродействующим электронным устройствам и нанотехнологии.

"Заявление о кончине полупроводниковых исследований и бизнеса в США преждевременно" - заявил Gregg Bartlett, вице-президент компании Freescale Semiconductor. "Имеются еще центры в США - Intel, IBM и технологический альянс IBM, где R&D остро сфокусированы на полупроводниках, и здесь еще могут случиться многочисленные инновации".

Это заявление, однако, кажется малоубедительным, когда наблюдаешь такую картину – компания Micron Technology в 2008 г. понесла убытки в размере 1.6 млрд. долл. Micron - единственный оставшийся в США производитель запоминающих устройств (DRAM, динамическая оперативная память). А ведь в свое время все штатовские чипмейкеры имели отношение к разработкам именно запоминающих устройств. Все полупроводниковые фабрики США постигла одинаковая судьба – переместить производство в оффшоры – в фабрики тайваньских и китайских компаний. Пессимисты предсказывают, что полупроводниковые R&D постигнет та же участь, что и полупроводниковое производство. Оптимисты, однако, говорят, что полупроводниковые R&D в США уменьшились, но... не исчезли.

IBM имеет бюджет 6.2 млрд. долл. на исследования и разработки, в которых заняты 3200 ученых и инженеров. Аналогичный бюджет Intel тоже выше 6 млрд. долл., и в ее исследовательской группе – более 1000 инженеров и ученых.

IBM и Intel утверждают, что полупроводниковые R&D в США вполне живы, несмотря на потери прибыльного бизнеса, связанного с запоминающими устройствами, и несмотря на усиливающуюся зависимость США от азиатских полупроводниковых фабрик. Не нужно забывать, что Intel стала первым в мире производителем чипов по 45-нм технологии, а сегодня заявляет о завершении разработок 32-нм технологии [2], доказывая сохраняющееся превосходство США.



Знаменитый Первый: Intel совместно с Калифорнийским университетом в Санта Барбара разработала первый кремниевый лазерный чип

"Вы можете судить о нашем здоровье по темпу развития технологии. Мы смогли перейти к

новой 45-нм технологии с металлическим затвором и изоляцией из материалов с высокой диэлектрической постоянной (high-k) спокойно, без барабанного боя", - заявил Justin Rattner, главный технолог Intel.

IBM, в свою очередь, убеждает, что она движется к 45-нм технологии в соответствии с запланированным графиком и введет эту технологию в коммер-

ческое производство микропроцессоров на одной из своих фабрик в ближайшее время. Однако, поскольку погоду здесь делает высокая стоимость глубоко субмикронных разработок, IBM сформировала альянс (включающий Advanced Micro Devices, Chartered, Freescale, Infineon, Samsung и STMicroelectronics) для ускорения исследований и разработок.

Изменения будут определяться не маршрутной картой, а экономической реальностью. Когда технологическое производство, связанное с полупроводниковыми подложками, перемещается в оффшоры, все большее число разработок движется вслед за этим. Сегодня стоимость новой фабрики подложек превышает 3 млрд. долл. Полупроводниковые исследования в США стали жертвой собственного успеха – сэкономив на оффшорном производстве в Китае и Тайване, полупроводниковые производители США начинают зависеть от этих партнерских фабрик, продвигая передовые технологические процессы (32-нм и ниже). Сегодня финансовое здоровье будет зависеть от дальнейшего масштабирования элементов, чтобы как можно больше чипов можно было изготовить на одной подложке, и, соответственно, снизить стоимость каждого.

"Мы вошли в ситуацию, когда все компании разрабатывают процессы, которые все теснее приближаются к фундаментальным физическим пределам, так что проблемы, которые необходимо решить, невероятно сложны", - сказал Brian Shirley, вице-президент компании Micron, отвечающий за разработку запоминающих устройств. Дороговизна собственных фундаментальных исследований побудила IBM, Intel и другие компании к созданию тесного партнерства с университетами. Один из лучших примеров результативности такого партнерства – недавнее сообщение IBM об изготовлении в Нанотехнологическом исследовательском центре в Олбани (Albany Nanotech Research Center) самого маленького в мире статического оперативного запоминающего устройства (SRAM) по 22-нм технологии. Этот центр был создан совместно IBM - альянсом и университетами Олбани (SUNY) и Нью-Йорка. IBM открыла несколько хорошо финансируемых программ с университетами Нью-Йорка, а также основала партнерство с Ренсселерским политехническим институтом (Rensselaer Polytechnic Institute) по разработке перспективных трехмерных (3D) методов сборки ИС. IBM также имеет два проекта с университетом Олбани – один включает создание 300-мм фабрики с 15-нм литографическим процессом, а другой будет сфокусирован на разработке вычислительных сетевых методов на базе суперкомпьютера IBM Blue Gene.

Intel финансирует в академической среде исследования в области спинтроники, углеродных нанотрубок, графена. Через 8-10 лет эти исследования будут пере-

несены на базу Intel для реализации в виде коммерческих продуктов.

Возможно лучший вариант сотрудничества промышленности с академией в проведении фундаментальных исследований демонстрирует компания Semiconductor Research Corp. (SRC), которая спонсирует более 100 исследовательских программ, координируя совместные исследования университетов многих стран и промышленных компаний.

Focus Center Research Program (FCRP) является совместной программой многих университетов, финансируемой промышленностью и правительством США. Программа имеет целью сохранить исторически лидирующую позицию США в области полупроводниковой технологии. В выполнении программы участвуют 41 университет, 200 факультетов и свыше 500 аспирантов, пытающихся выйти за пределы сегодняшней КМОП технологии.

Но частное финансирование университетских программ кажется просто карликовым по сравнению с правительственными программами, координируемыми Агентством военно-воздушных сил (Air Force Office of Scientific Research), Агентством перспективных оборонных исследований (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA), Национальным институтом стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology – NIST), Агентством военно-морских сил (Office of Naval Research) и Министерством энергетики (Department of Energy – DoD). Самым большим источником гражданских исследований является Национальный научный фонд (National Science Foundation – NSF) с бюджетом в 6 млрд. долл., из которых финансируются до 20% всех университетских исследований.

Однако финансовое давление кризиса увеличивается. Так, правительственное финансирование фундаментальных исследований в интересах микроэлектроники неуклонно снижается от 254 млн. долл. (2005) до 236 млн. долл. (2007) и 197 млн. долл. (2008). Частное финансирование пока не сократилось, но будет ли оно достаточным, чтобы «обуть» Bell Labs и сохранить сегодняшнее лидерство США в полупроводниковых исследованиях, пока не ясно.

1. http://perst.issph.kiae.ru/Inform/index_tem.htm

2. <http://www.semiconductor.net/article/CA6621436.html?desc=topstory>

НОВЫЕ КНИГИ

Вышла в свет книга Дж. Гринштейн, А. Зайонц «Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики» (пер. с англ.). Книга опубликована Издательским Домом «ИНТЕЛЛЕКТ», <http://www.id-intellect.ru/>. Книгу можно приобрести в магазинах книоторговой фирмы «Физматкнига», в Московском физико-техническом институте (г. Долгопрудный); в Московском институте электронной техники (г. Зеленоград), а также в Интернет-магазине <http://www.fizmatkniga.ru/>. Книга является мировым бестселлером в области литературы, посвященной проблемам основ квантовой механики, интерес к которым в последние годы все более возрастает в связи с такими новыми направлениями как квантовые вычисления, квантовая информация и квантовая телепортация. С содержанием книги можно ознакомиться на сайте <http://www.id-intellect.ru/books/physic/17/#contents>.

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, А.Елецкий, Л.Опенков, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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