

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Кинки в дисперсии сильно коррелированных электронов

Согласно теории ферми-жидкости, для описания системы взаимодействующих между собой электронов удобно использовать представление о квазичастицах – одноэлектронных состояниях, характеризующихся импульсом k и законом дисперсии $E_k = Z_{FL} \epsilon_k$, который отличается от закона дисперсии ϵ_k невзаимодействующих электронов (коэффициент Z_{FL} равен отношению массы свободного электрона к его эффективной массе). Если вектор k находится на поверхности Ферми, то при $T=0$ время жизни квазичастиц бесконечно велико, что отвечает действительной величине E_k . Вблизи поверхности Ферми (низкоэнергетические возбуждения) и при ненулевой температуре время жизни хоть и становится конечным (у E_k появляется мнимая добавка), но остается достаточно большим, так что концепцию квазичастиц можно по-прежнему использовать для расчета различных электронных характеристик. Вдали от поверхности Ферми эта концепция считается неприменимой из-за слишком малого времени жизни возбуждений. Однако в спектрах фотоэмиссии с угловым разрешением даже при больших энергиях возбуждений часто наблюдают четко различимые пики одночастичной спектральной функции $A(k, \omega)$. При изменении k положения этих пиков также изменяются, что свидетельствует о дисперсии соответствующих возбуждений. При этом на законе дисперсии E_k иногда имеются изломы, называемые "кинками". Наличие кинков обычно объясняют взаимодействием электронов с какими-то коллективными возбуждениями (в частности, дискуссия о фононном или плазмонном механизме высокотемпературной сверхпроводимости часто сводится к спору о фононном или магнотонном происхождении кинков в ВТСП, см. предыдущий, 7-й, выпуск Перста).

В работе [1] теоретиков из Германии, Польши и России показано, что кинки могут появляться в результате взаимодействия электронов только между собой, без участия других квазичастиц. Причина этого заключается в том, что при увеличении энергии возбуждения до величины, соответствующей границе применимости ферми-жидкостного описания, изменяется коэффициент Z , перенормирующий закон дисперсии свободных электронов (на другом языке – изменяется эффективная масса электронов). Для иллюстрации этого эффекта в [1] использована модель Хаббарда с энергией отталкивания электронов на узлах кубической решетки, равной ширине исходной (неперенормированной) разрешенной зоны. Результаты численных расчетов, выполненных в рамках динамической теории среднего поля (dynamical mean-field theory, DMFT) представлены на Рис.1. В [1] показано также, что кинк имеет место при энергии возбуждения $E^* = Z_{FL}(\sqrt{2} - 1)D$, где D – характерный масштаб энергий для невзаимодействующих электронов (например, полуширина разрешенной зоны).

И далее ...

2 КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Рвется ли квантовый компьютер на продажу?

3 Спиновые кубиты в графене

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

4 Цепочки из фуллеренов C_{20}

Травление кремниевых микросхем с помощью углеродных нанотрубок

5 Магнитная обменно-силовая микроскопия с атомным разрешением

КОНФЕРЕНЦИИ

6 NATO Advanced Research Workshop, 17-21 September, 2007, Yalta, Ukraine Electron Transport in Nanosystems (ETN-2007)

Bardeen-Cooper-Schrieffer Theory of Superconductivity @ 50, 10-13 October, 2007, University of Illinois at Urbana-Champaign

Научная сессия ОФН РАН
30 мая 2007 г.

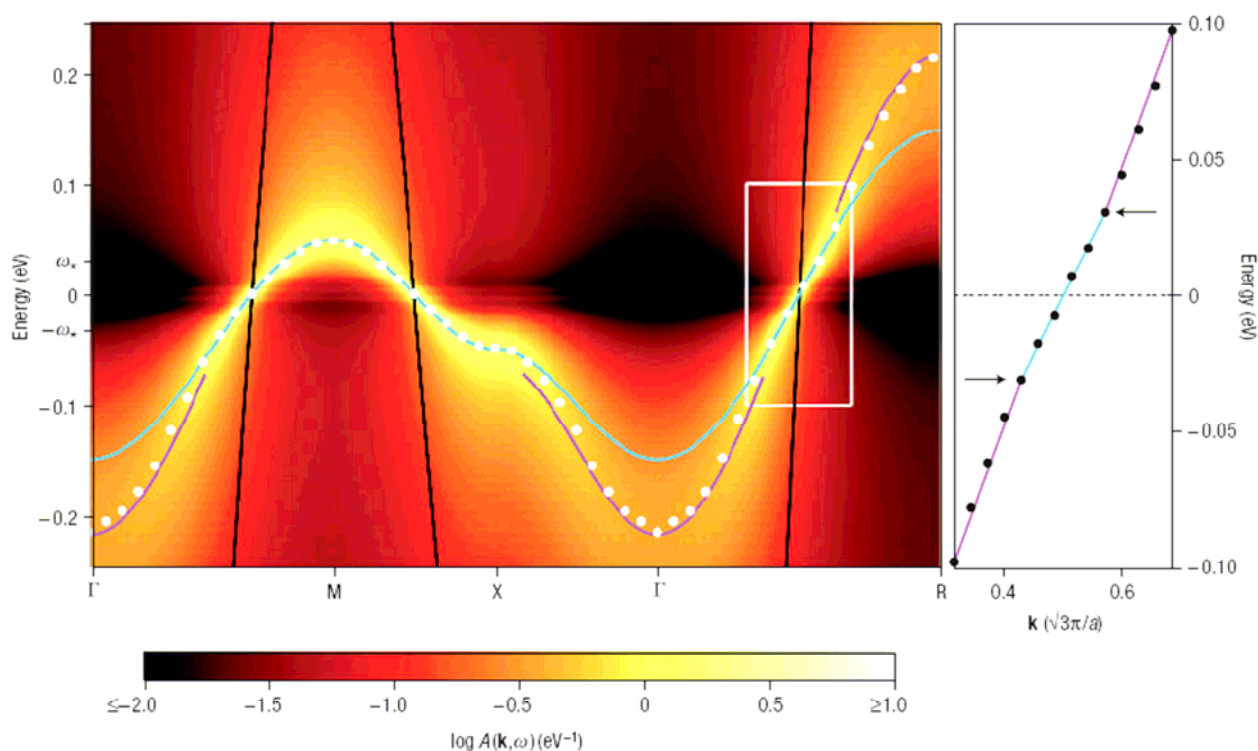


Рис.1. Карта интенсивности спектральной функции $A(\mathbf{k}, \omega)$ для модели Хаббарда на кубической решетке при половинном заполнении зоны и $T=5$ К. Кружки – расчетный закон дисперсии. Синяя и розовая линии – перенормировка закона дисперсии для невзаимодействующих электронов с использованием коэффициентов $Z_{FL}=0.086$ (ферми-жидкостной режим) и $Z=0.135$, соответственно. Справа – увеличенное изображение закона дисперсии в направлении Γ -R.

Таким образом, для определения E^* достаточно знания одночастичной зонной структуры (расчет которой обычно не составляет большого труда) и ферми-жидкостного перенормировочного коэффициента Z_{FL} (определяемого, например, из экспериментов по электронной теплоемкости). При слабых электронных корреляциях $Z_{FL} \approx 1$, поэтому $E^* \approx D/2$, и кинк почти неразличим, так как попадает на край зоны. Напротив, при сильных корреляциях $Z_{FL} \ll 1$, и кинк сдвигается ближе к энергии Ферми (величина E^* может оказаться даже меньше дебаевской энергии). Таким образом, E^* является количественной мерой корреляций. Авторы [1] отмечают, что полученные ими результаты относятся прежде всего к системам с частично заполненными d - и f -орбиталями, в которых локальные межэлектронные взаимодействия особенно велики, а также к системам с сильной гибридизацией (например, между d -орбиталями атомов меди и p -орбиталями атомов кислорода в ВТСП). Таким образом, кинки должны наблюдаться в самых различных материалах, а не только в оксидах переходных металлов и ВТСП. Что касается ВТСП: если кинки не имеют отношения ни к фононам, ни к магнонам, то, может быть, они вообще не причастны к высокотемпературной сверхпроводимости?

I. K. Byczuk et al., Nature Physics 3, 168 (2007).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Рвется ли квантовый компьютер на продажу?

Поскольку все еще не улеглись страсти по поводу создания фирмой D-Wave «коммерческого квантового компьютера» посылаем вдогонку к заметке в № 3 ПерсТа еще несколько комментариев. В журнале Nature, предназначенном для публикации выдающихся достижений в науке, Geoff Brumfiel поместил в разделе «Бизнес» свое восприятие этого события [1]. Прежде всего, он отмечает, что название компьютера «коммерческим» слишком поспешно, даже если он работает как истинный квантовый компьютер, поскольку он пока не может решать практически важные задачи быстрее обычного классического. Однако сами исследователи рассчитывают к концу года увеличить число кубитов до 1000. Надежду на успех им вселяет использование особого адиабатического метода проведения квантовых вычислений. Его предложил в 2000 г. E. Farhi с соавторами [2]. Суть состоит в том, что можно осуществлять выполнение квантового алгоритма как эволюцию основного состояния системы, в котором она все время поддерживается. Ниже, как говорится, падать некуда, поэтому в результате декогерентизации система может переходить только в возбужденные состояния, а эти процессы эффективно подавляются при понижении температуры. Для адиабатичности требуется еще, чтобы и управляющие воздействия были достаточно медленными. В противном случае начинают «подмешиваться» возбужденные состояния. Какая при этом может быть скорость вычислений, пока не ясно.

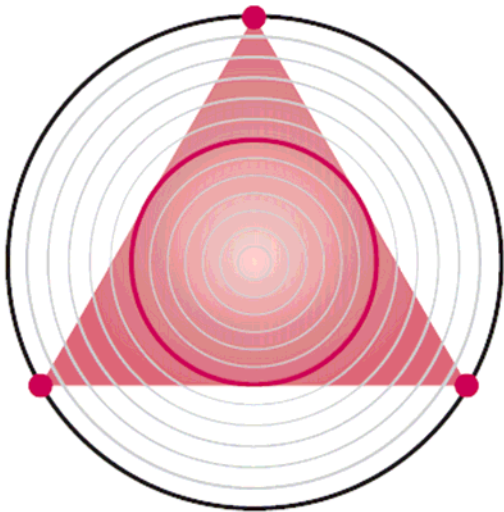


Рис. 1. Схема, поясняющая переход квантовых вычислений в классические.

Всеобщий интерес стал поводом для того, чтобы Wim van Dam в своей заметке [3] уже в разделе науки затронул общую проблему соотношения квантовых и классических вычислений. Дело в том, что резкой грани между квантовым характером вычислений и классическим характером вычислений не существует. В качестве иллюстрации приведен рис. 1. Все операции, которые позволяет проводить «чистая» квантовая механика, изображены черной окружностью. Среди них есть некоторые, которые могут быть выполнены классически (красные точки). В силу непрерывности операции внутри красного треугольника тоже могут быть выполнены классически. Квантовая система с шумом (с декогерентизацией) живет внутри окружностей меньшего радиуса. Этот образ имеет прямую аналогию с блоховской сферой для описания эволюции кубита, у которой смешанные (зашумленные) состояния живут на сфере меньшего радиуса. Для большого шума квантовые расчеты могут быть заменены классическими (внутри красной окружности).

Недавно математики доказали теорему, что точность выполнения отдельной квантовой логической операции 55%-ной точности достаточно для того, чтобы квантовый компьютер в конечном итоге давал верный ответ. Правда, при этом все его преимущества перед классическим компьютером в скорости вычислений совершенно пропадают. Получение правильного ответа носит вероятностный характер, чтобы его достичь требуется проведение многократных вычислений. Количество запусков экспоненциально зависит от числа операций в алгоритме. Для обеспечения детерминированного правильного ответа требуется ошибка выполнения отдельной квантовой логической операции 10^{-3} - 10^{-5} , чего добиться пока никому не удавалось. То, что это внезапно удалось группе из D-Wave, вызывает большие сомнения, поэтому заметка завершается восклицанием: «Caveat

emptor!» ("Будь осторожен, покупатель!"). Это восклицание провозглашало принцип свободной торговли и свободы деловой активности в США в XIX в.

В.Вьюрков

1. G. Brumfiel, *Nature* **446**, 245 (2007).
2. E. Farhi et al., <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0001106v1>.
3. W. van Dam, *Nature Physics* **3**, 220 (2007).

Спиновые кубиты в графене

Электронные спины рассматриваются как вероятные кандидаты в носители квантовой информации. Логические состояния спинового кубита "0" и "1" соответствуют двум противоположным ориентациям спина электрона. В последние годы теоретически и экспериментально изучается возможность организации квантовых вычислений со спиновыми кубитами в полупроводниковых квантовых точках на основе GaAs. При этом основными источниками декогеренции являются спин-орбитальное взаимодействие и сверхтонкое взаимодействие спина электрона с ядерными спинами. Чтобы увеличить время сохранения когерентности спиновых состояний, нужно изготавливать квантовые точки из других материалов, в которых эти взаимодействия значительно слабее, чем в GaAs. Например, в углеродных нанотрубках и графене спин-орбитальное взаимодействие сравнительно невелико, а сверхтонкое взаимодействие в изотопе ^{12}C с нулевым ядерным спином вообще отсутствует (концентрация примеси ^{13}C , как правило, очень мала).

В теоретической работе [1] физиков из Университета Базеля предложен способ формирования спиновых кубитов в квантовых точках на основе графена. Для этого из графенового слоя нужно вырезать узкую полосу со слегка изогнутыми краями (в результате чего снимается присущее графену двукратное вырождение зоны проводимости и валентной зоны) и приложить соответствующие напряжения на электроды, расположенные вдоль полосы, см. рисунок. Такие квантовые точки имеют прямоугольную форму. В них имеются дискретные уровни энергии, которым отвечают локализованные волновые функции. Расчеты показали, что если поперечные размеры квантовых точек составляют около 30 нм, и в каждой из них находится по одному электрону (поверх заполненной валентной зоны), то энергия обменного взаимодействия между спинами электронов в двух соседних квантовых точках составляет $J \approx (0.1 \div 1.5)$ мэВ. При этом возникает возможность организовать (с помощью управляющих кубитов) даже взаимодействие между спинами достаточно удаленных друг от друга точек, не затрагивая промежуточные спины. Это является следствием "квазирелятивистского" конусообразного закона дисперсии, в результате которого в графене имеет место аналог эффекта Клейна (заключающегося в проникновении электрона через потенциальный барьер, высота которого более чем в два раза превышает энергию покоя электрона, с близкой к единице вероятностью [2], подробнее см. [1]). Такие нело-

кальные взаимодействия между кубитами важны, в частности, для квантовой коррекции ошибок.

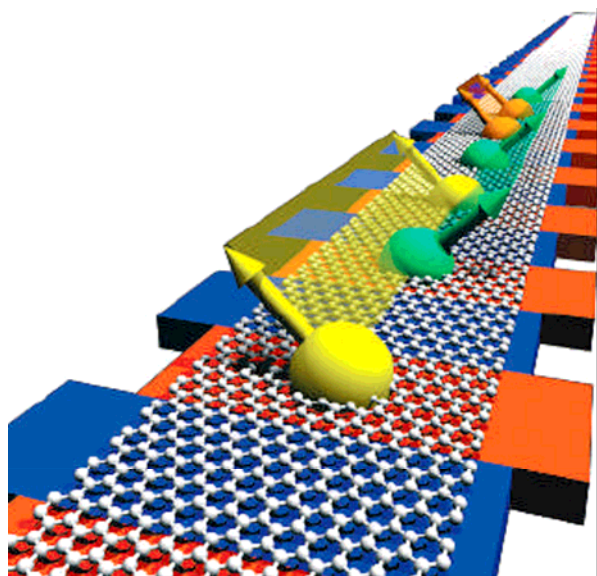


Рис.1. Схематическое изображение спиновых кубитов в наноленте из графена. Синим цветом изображены "барьерные электроды", разделяющие наноленту на квантовые точки; красным цветом – электроды, посредством которых осуществляется контроль взаимодействия между кубитами.

Хотя система квантовых точек в графеновой наноленте допускает масштабирование, с практической точки зрения ее существенным недостатком является одномерность. Альтернативу представляют два параллельных друг другу слоя графена, в которых можно попробовать сформировать двумерный массив квантовых точек [3].

Л.Опенев

1. B.Trauzettel et al., *Nature Physics* **3**, 192 (2007).
2. M.I.Katsnelson et al., *Nature Phys.* **2**, 620 (2006).
3. V.Fal'ko, *Nature Physics* **3**, 151 (2007).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Цепочки из фуллеренов C_{20}

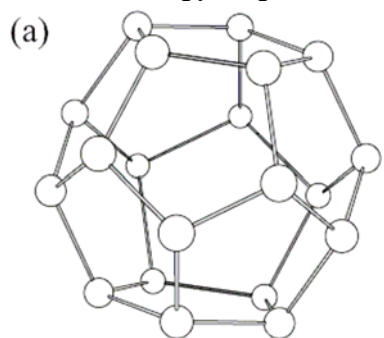


Рис.1. Фуллерен C_{20} .

После того как в 2000 г. был экспериментально обнаружен наименьший возможный фуллерен C_{20} [1], (см. рис.1) встал вопрос о возможности существования твердого вещества – фуллерита – на его основе (по аналогии с фуллеритом, состоящим из фуллеренов C_{60}). Теоретические расчеты свидетельствуют о возможности формирования конденсированного состояния из фуллеренов C_{20} , хотя согласия по поводу кристаллической струк-

туры этого гипотетического кластерного вещества пока нет. В отличие от фуллерита C_{60} , в котором отдельные кластеры связаны друг с другом за счет слабого ван-дер-ваальсовского притяжения, межкастерные связи в фуллерите C_{20} должны иметь, согласно теории, ковалентную природу. Сообщения [2,3] о синтезе кристаллов C_{20} пока остаются неподтвержденными. Между тем экспериментально наблюдались заряженные димеры $(C_{20})_2^+$, а также комплексы $(C_{20})_N^+$ с $N = 3 \div 13$ [4]. В работе [5] высказано предположение, что эти комплексы представляют собой квазиодномерные цепочки. Численные расчеты показали, что межкастерные связи в таких цепочках могут быть различных типов (рис.2). С энергетической точки зрения наиболее выгодны так называемые *open*-[2+2] связи, (рис.2а). Эта конфигурация является метастабильной: утрата "цепочечно-кластерной структуры" может происходить по трем каналам – из-за распада одного из фуллеренов, слияния двух фуллеренов в кластер C_{40} и из-за разрыва цепочки. Тем не менее моделирование "жизни" цепочек при конечной температуре методом молекулярной динамики свидетельствует об их достаточно высокой устойчивости: высота минимального энергетического барьера, препятствующего разрушению цепочки, составляет около 2 эВ. Оценка времени жизни при комнатной температуре дает $\tau \sim 10^7$ сек.

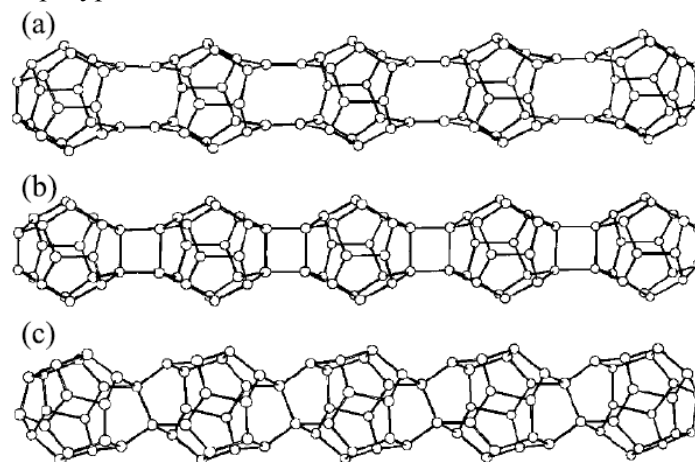


Рис.2. Возможные типы межкастерных связей в цепочках из фуллеренов C_{20} .

Л.Опенев

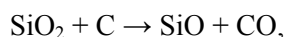
1. H. Prinzbach et al. *Nature* **407**, 60 (2000).
2. Z. Wang et al. *Phys., Lett. A* **280**, 351 (2001).
3. Z. Iqbal et al. *Eur. Phys. J. B* **31**, 509 (2003).
4. R. Ehlich et al. *J. Chem. Phys.* **115**, 5830 (2001).
5. О. Опенев и др., *Письма в ЖЭТФ* **85**, 418 (2007).

Травление кремниевых микросхем с помощью углеродных нанотрубок

Одна из основных задач, стоящих перед современной нанотехнологией, связана с развитием возможности изготовления электронных схем, элементы которых имеют нанометровые размеры. Простейший путь к реализации этой возможности состоит в разработке технологии травления поверхностей микросхем с поперечным размером траншеи на нанометровом уровне

Перст, 2007, том 14, выпуск 8

не. Однако для этого необходимо иметь инструмент соответствующего размера, с помощью которого можно было бы создавать подобные траншеи. В настоящее время едва ли не единственным кандидатом на роль такого инструмента являются углеродные нанотрубки (УНТ), размеры которых составляют от одного до нескольких десятков нанометров. До сих пор технические трудности, возникающие на пути использования УНТ в технологии получения микросхем, не позволяли реализовать описанную выше возможность. Однако недавно в одном из университетов Кореи была выполнена работа, внушающая оптимизм в отношении использования УНТ в качестве средства создания электронных схем с нанометровым разрешением. В этом случае в основе механизма травления диоксида кремния SiO_2 лежит химическая реакция восстановления кремния углеродом, входящим в состав однослойных УНТ:



один из продуктов которой (CO) находится в газообразном состоянии. Однослойные УНТ были выращены стандартным CVD методом в присутствии небольшого количества кислорода с использованием в качестве катализатора частиц железа. Присутствие кислорода в процессе синтеза нанотрубок способствует процедуре травления. Форма, длина и траектория траншеи полностью определяются контактом УНТ с поверхностью оксида кремния. При этом в процессе травления происходит выгорание наконечника УНТ, так что ее длина уменьшается. Наблюдения, выполненные с помощью атомного силового микроскопа над 13 образцами траншей, показывают, что средняя ширина траншеи составляет $9,8 \pm 2,4$ нм, что значительно превышает диаметр нанотрубок (около 1,7 нм). Это указывает на эффект дополнительного травления поверхности фрагментами разрушенных нанотрубок. Полученные траншеи использовались для получения нанопроволочек из металлического хрома толщиной менее 10 нм. В этом случае протравленный слой оксида кремния использовался в качестве маски, через которую осаждались пары металла.

А.В.Елецкий

1. H.R.Byon, H.C.Choi, *Nature Nanotechnology* 2, 162 (2007)

Магнитная обменно-силовая микроскопия с атомным разрешением

Упорядочение магнитных моментов (спинов) атомов в твердых телах приводит к возникновению таких коллективных явлений, как, например, ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Чтобы разобраться в деталях магнитного строения вещества на масштабе порядка нанометра, экспериментальную информацию об ориентации спинов нужно уметь получать с атомным разрешением.

Перст, 2007, том 14, выпуск 8

Такую информацию дает, в принципе, сканирующая спин-поляризационная микроскопия [1]. Но она годится только для проводящих материалов. Магнитная силовая микроскопия [2] применима как к металлам, так и к полупроводникам с диэлектриками и часто используется для изучения доменной структуры. Но она не позволяет достичь атомного разрешения, поскольку основана на дальнедействующих магнитоупругих силах. Для устранения этого недостатка было предложено изготавливать иглу микроскопа из магнитного материала, что делает возможным регистрацию короткодействующего обменного взаимодействия между спинами поверхностных атомов и спинами атомов, расположенных на острие иглы. Эта методика получила название магнитной обменно-силовой микроскопии (Magnetic Exchange Force Microscopy, MExFM) [3].

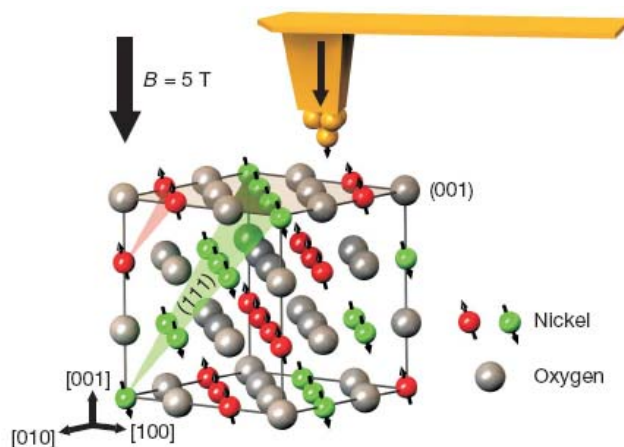


Рис.1. Схематическая иллюстрация MExFM. Ферромагнитная игла вблизи поверхности NiO.

Первые попытки практического применения MExFM не дали, однако, желаемого результата: разрешающей способности оказалось недостаточно для определения ориентаций спинов отдельных атомов. В работе [4] немецких физиков из Университета Гамбурга методика MExFM была усовершенствована следующим образом. Иглу микроскопа, покрытую тонким ферромагнитным слоем железа, помещали в параллельное ей магнитное поле с $B = 5$ Тл, которое ориентировало спины атомов Fe перпендикулярно поверхности исследуемого образца и усиливало тем самым их взаимодействие со спинами поверхностных атомов. Игла микроскопа крепится к свободному концу кантилевера и колеблется с резонансной частотой, которая зависит от силы, действующей на иглу со стороны образца. Сканирование вдоль поверхности позволяет определить не только ее атомную структуру, но и ориентацию спинов поверхностных атомов. В работе [4] эта методика была апробирована на антиферромагнитном диэлектрике NiO, у которого спины атомов Ni в каждой атомной плоскости {111} упорядочены ферромагнитным образом, а в каждой паре соседних плоскостей – антиферромагнитным (см. рис.). Внешнее поле не нарушает этот порядок, поскольку зеемановская энергия много меньше энергии взаимодействия между спинами атомов Ni. Авторы [4] отме-

чают, что методика МЭХФМ может использоваться для исследования не только статического спинового порядка, но и для изучения динамических процессов, в том числе прецессии спинов и спиновых волн. Она может помочь и при решении такого фундаментального вопроса, как микроскопический механизм обменного взаимодействия в том или ином магнитном материале.

1. S.Heinze et al., *Science* **288**, 1805 (2000).
2. Y.Martin, H.K.Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1455 (1987).
3. R.Wiesendanger et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **9**, 519 (1990).
4. U.Kaiser et al., *Nature* **446**, 522 (2007).

КОНФЕРЕНЦИИ

NATO Advanced Research Workshop 17-21 September, 2007, Yalta, Ukraine Electron Transport in Nanosystems (ETN-2007)

The main objective of this Advanced Research Workshop is to bring together leading experts on key current topics in nanodevices, mesoscopic superconductivity and semiconductors in order to review recent developments and to outline new directions for nanotechnology research at the start of the new millennium. Topics include new nanodevice applications, quantum computing technology, novel materials, mesoscopic superconductivity, physics of novel and high-Tc superconductivity, sensors and biosensors. Deadline for registration is 1 June 2007.

Contact:

Prof. S.Kruchinin:

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics,

Metrologichna str. 14-b,

03143, Kiev, Ukraine,

fax: 380 44 526 59 98

phone: 380 44 492 14 38

E-mail: etn@i.com.ua,

kruchitp@bitp.kiev.ua

Web: <http://www.i.com.ua/~etn>

Bardeen-Cooper-Schrieffer

Theory of Superconductivity @ 50

Wednesday-Saturday, October 10-13, 2007

University of Illinois at Urbana-Champaign

The celebration of the 50th anniversary of the 1957 BCS paper will attempt to meet three goals: 1) highlight a physics discovery unique to the University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC); 2) stress the intellectual impact of BCS on other areas of physics as well as technology; and 3) raise public awareness of solid state physics.

Each day of this four-day conference will be dedicated to different aspects of superconductivity. The first day will be devoted to the making of BCS – that is, the history and people behind BCS. Current trends in superconductivity will be featured on the second day, and on the third day the technological impact of BCS will be highlighted. The last day of the conference will feature the impact of BCS on other areas of physics. Also, to help impart to the UIUC community the impact of BCS, we intend to hold a public lecture on the quantum magic of superconductivity.

Registration:

Registration will open to the public on June 1, 2007.

The registration fee for the conference is \$250.

Contact Registration and Logistics: David J. Ward
Conferences & Institutes University of Illinois at Urbana-Champaign 302 East John Street, Suite 202 Champaign, Illinois 61820

217-333-2880; toll free 877-455-2687

E-mail: conferences@uiuc.edu

Content Info: Philip W. Phillips

Department of Physics University of Illinois at Urbana-Champaign

217-244-2003

E-mail: dimer@uiuc.edu

Web: <http://www.conferences.uiuc.edu/bcs50/registration.html>

Научная сессия ОФН РАН

30 мая 2007 г, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, (Ленинский проспект, 53)

Программа:

1. Аксенов В.Л. (РНИЦ «Курчатовский институт») Нейтронная рефлектометрия слоистых магнитных систем.

2. Авдеев М.В. (ОИЯИ)

Структурные особенности магнитных жидкостей.

Web: www.gpad.ac.ru

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

Научный редактор К.Кугель

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

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

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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