

В этом выпуске:

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Нанолазеры

Квазиодномерные структуры – полупроводниковые нанопровода – считаются перспективными кандидатами для изготовления лазеров. При этом нанопровода совмещают функции усиливающей среды и оптической полости. В литературе уже сообщалось о демонстрации работы лазеров на основе нанопроводов из бинарных полупроводников GaSb, ZnO, GaN, CdS, ZnS. Длина волны излучения такого лазера определяется шириной запрещенной зоны материала нанопровода и не допускает плавного изменения (например, путем подачи потенциала на соответствующий электрод). Между тем длину волны удается “подстраивать” в лазерах на основе квазидвумерных структур – нанолент $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ и $\text{CdS}_{1-y}\text{Se}_y$.

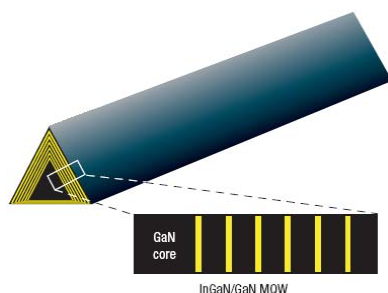


Рис.1 Схематическое изображение треугольного нанопровода GaN с квантовыми ямами InGaN/GaN на его боковых гранях.

Американские специалисты предложили использовать в конструкции “нанолазеров” комбинацию квазиодномерных и квазидвумерных элементов [1]. Изготовленные

ими гетероструктуры представляют собой нанопровода GaN с треугольным поперечным сечением, на гранях которых методом химического осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы выращено от 3 до 26 квантовых ям InGaN/GaN (рис. 1). Толщина ям InGaN составила $(1 \div 3)$ нм, а толщина барьеров GaN – $(1 \div 40)$ нм, в зависимости от режима осаждения. Просвечивающая электронная микроскопия показала, что границы раздела InGaN/GaN являются атомарно плоскими (рис. 2).

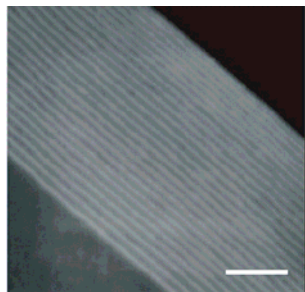


Рис.2 Фрагмент поперечного сечения нанопровода с 26 квантовыми ямами. Изображение получено методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Длина масштабной линейки 20 нм.

При исследовании фотолюминесценции нанопроводов было зарегистрировано излучение с длиной волны $(365 \div 494)$ нм – в зависимости от содержания индия в ямах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Изготовленные в [1] квазиодно/двумерные наноструктуры знаменуют собой выход твердотельной нанотехнологии на новый “уровень сложности”. В дальнейшем авторы [1] предполагают использовать такие структуры для изготовления инжекционных нанолазеров с регулируемой длиной волны.

1. F.Qian et al., *Nature Mater.* 7, 701 (2008).

И далее ...

- 2 Контроль донорных одноэлектронных состояний в кремнии

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 2 Сверхпроводниковые нанотехнологии для астрономии
- 3 Как при переходе ВТСП в диэлектрическое состояние исчезают куперовские пары

МАНГАНИТЫ

- 4 Магнитоэлектрическое взаимодействие, по какому сценарию предпочитает играть природа?

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Получение графенов в макроскопических количествах

Приваривание углеродной нанотрубки к металлической подложке

- 7 Измерение механических характеристик графенового слоя

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 Научная выездная сессия ОФН РАН, посвященная 40-летию Института спектроскопии РАН, 8 октября 2008 г.

1st German-Russian Workshop on Quantum Ground States, IFW Dresden, Germany, 27 – 29 October 2008

Пятая международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», посвященная памяти академика Г.В. Курдюмова, 17-21 ноября 2008 г., Черногоровка, Россия

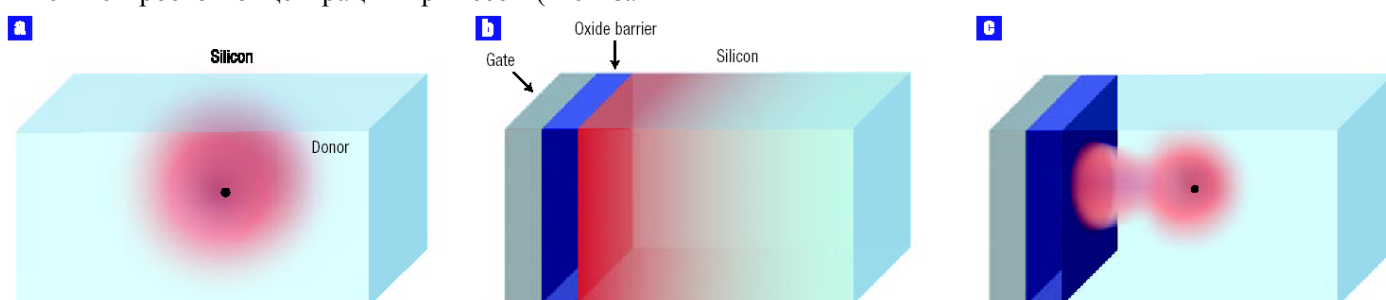
НОВЫЕ КНИГИ

Контроль донорных одноэлектронных состояний в кремнии

Легирование играет в полупроводниковой электронике чрезвычайно важную роль. Добавление в полупроводник даже мизерного количества примесей (одной на миллиард атомов матрицы) может привести к очень существенным изменениям электрических и оптических свойств материала. Неизова- лентные примеси служат источником свободных носителей заряда и тем самым на много порядков увеличивают проводимость полупроводников при низких температурах. По мере уменьшения размеров полупроводниковых устройств до нанометровых масштабов и расширения их функциональных возможностей все более важным фактором становится не просто концентрация примесей (и связан-

ная с ней концентрация подвижных электронов), а конкретный вид волновой функции электрона в окрестности донора. Разработка способов контроля состояний отдельных донорных электронов в перспективе позволит не только значительно повысить быстродействие нанoeлектронных приборов, но и сделает возможным создание твердотельных квантовых компьютеров.

В работе [1] для управления состоянием электрона единичного донора в Si предложено использовать структуру, аналогичную полевому транзистору (см. рис.). Изменяя напряжение на затворе, можно регулировать эффективную ширину и глубину квантовой ямы на границе раздела Si/диэлектрик.



Управление состоянием единичного электрона в кремнии. (a) В отсутствие напряжения на затворе электрон локализован на донорном атоме; (b) При достаточно большом напряжении электрон может перейти с донорного атома в квантовую яму, формирующуюся на границе раздела кремния и оксидного барьера (потенциал донора на этом рисунке не показан); (c) При промежуточной величине потенциала имеет место гибридизация электронных состояний, локализованных в яме и на доноре, в результате чего электронная плотность “размывается” между ямой и донорным атомом (при этом в поперечном направлении электрон остается локализован даже в области ямы).

Несмотря на то, что яма и донор представляют собой физические объекты различной мерности (двумерный и нульмерный, соответственно), создаваемый ими для электрона потенциал является так называемым “двухъямным”, то есть имеет два пространственно разнесенных минимума энергии. Если расстояние L от донора до границы раздела сравнимо с его эффективным боровским радиусом a^*_B (в кремнии – несколько нанометров), то путем подбора соответствующего потенциала на затворе электрон можно “размазать” между ямой и донором (при $L \gg a^*_B$ электрон оказывается локализованным в одном из минимумов потенциала, то есть либо в яме, либо на доноре). Справедливости ради следует отметить, что в отсутствие надежных методов позиционирования доноров с атомарной точностью авторы [1] просто перебирали прибор за прибором в надежде “наткнуться” на приемлемое соотношение между L и a^*_B . Из сотни исследованных приборов таковых (с $L = 3 \div 5$ нм) оказалось всего шесть. Для них на вольт-амперных характеристиках наблюдались характерные максимумы тока, обусловленные прохождением электрона через связанные состояния доноров. Полученные в [1] результаты можно, в частности, попробовать использовать

для практической реализации идеи Кейна [2] о создании квантового компьютера на основе доноров в кремнии.

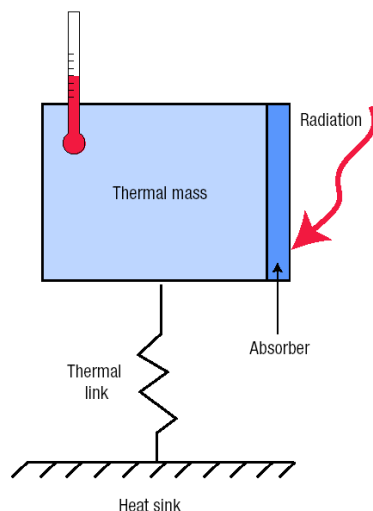
Л. Опенов

1. G.P.Lansbergen et al., *Nature Phys.* **4**, 656 (2008).
2. B.E.Kane, *Nature* **393**, 133 (1998).

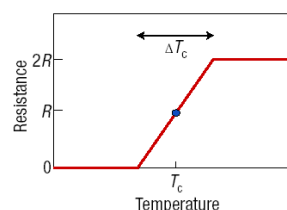
СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводниковые нанотехнологии для астрономии

Далекая инфракрасная область спектра космического излучения (длины волн $0.1 \div 1$ мм) представляет для астрономии особый интерес, поскольку содержит информацию о наиболее удаленных от нас (и наиболее “старых”) объектах. Исследование именно этого диапазона позволяет больше узнать о формировании галактик, звезд и планетарных систем. Однако инфракрасное излучение сильно поглощается атмосферой Земли, и поэтому телескопы нужно размещать за ее пределами – на искусственных спутниках, что довольно накладно. Но и в этом случае сигналы от далеких участков Вселенной оказываются очень слабыми.



Основные конструктивные элементы сверхпроводникового болометра (вверху) и температурная зависимость сопротивления сверхпроводника в окрестности критической температуры (внизу).



Принцип его действия проиллюстрирован на рисунке. Если температура сверхпроводящего элемента болометра (в [1] – нанопровода Ti) соответствует примерно середине перехода (то есть его сопротивление R отлично от нуля, но меньше сопротивления R_n в нормальном состоянии), то поглощение даже одного фотона приводит к поддающемуся измерению увеличению R вследствие нагрева электронной подсистемы. При большой интенсивности излучения величина R быстро входит на константу (R_n). Если же “частота прибытия” фо-

тонов достаточно низкая, то на зависимости R_n от времени наблюдаются последовательные пики, каждый из которых соответствует поглощению единичного фотона. С целью термической изоляции нанопровода контакты к нему изготавливались из ниобия. Сверхпроводниковые болометры использовались для регистрации единичных фотонов и раньше, но только в видимом диапазоне. Лишь уменьшение размеров сверхпроводниковых элементов до нанометрового масштаба позволило авторам [1] освоить и дальний ИК-диапазон. Вот так интересно устроена жизнь: “нано” помогает нам лучше понять “макро”.

Л.Опенев

1. J. Wei et al., *Nature Nanotechnol.* 3, 496 (2008).

Как при переходе ВТСП в диэлектрическое состояние исчезают куперовские пары

В антиферромагнитном основном состоянии плоскости CuO_2 – главного структурного элемента купратных ВТСП – на каждый атом меди приходится ровно одна дырка, причем эти дырки занимают локализованные атомные орбитали. Допирование (то есть добавление подвижных дырок) приводит к формированию “сверхпроводящей жидкости” из делокализованных куперовских пар. В области перехода из диэлектрического в сверхпроводящее состояние присутствуют два типа электронных возбуждений: загадочные “псевдощелевые” при высоких энергиях и боголюбовские квазичастицы (образующиеся из-за разрыва куперовских пар) при низких. Различие между энергиями E_{PG} и E_{SC} этих возбуждений увеличивается при уменьшении концентрации дырок p (рис. 1а).

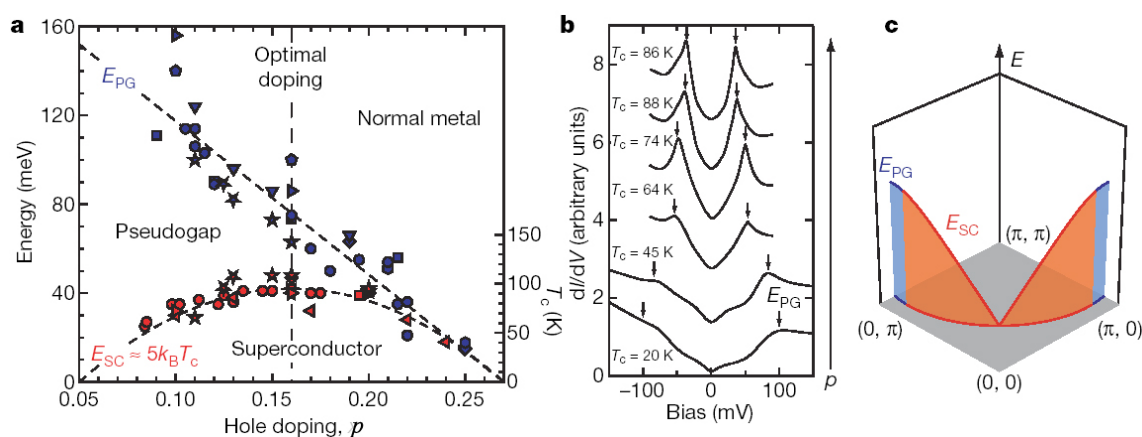


Рис.1 (а) Энергии электронных возбуждений в сверхпроводящем (E_{SC}) и псевдощелевом (E_{PG}) состояниях как функции числа дырок p в расчете на атом меди. Разные символы отвечают различным экспериментальным методикам. Рисунок из работы [1]. (b) Усредненные по шести образцам дифференциальные ВАХ монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Псевдощель E_{PG} увеличивается при понижении T_c (то есть при уменьшении концентрации дырок p). $T_c = 20$ К соответствует $p \approx 0.06$. Рисунок из работы [2]. (c) Электронная структура плоскости CuO_2 в первой зоне Бриллюэна. Оранжевым и синим цветом изображены E_{SC} и E_{PG} соответственно.

По данным одночастичной туннельной спектроскопии псевдощель E_{PG} при фиксированном уровне допирования почти не зависит от температуры (и практически одинакова при $T > T_c$ и $T < T_c$), а при

уменьшении p увеличивается (рис. 1b). Величина E_{SC} , напротив, отлична от нуля только при $T < T_c$, а как функция p имеет максимум при $p_{opt} \approx 0.15$. В импульсном пространстве картина следующая. Псевдощель E_{PG} максимальна в “антиузловом на-

правления”, тогда как когерентные боголюбовские квазичастицы наблюдаются не на всем контуре Ферми, а лишь на так называемых “фермиевских дугах” в окрестности узлов (нулей) d -волнового сверхпроводящего параметра порядка (рис. 1с).

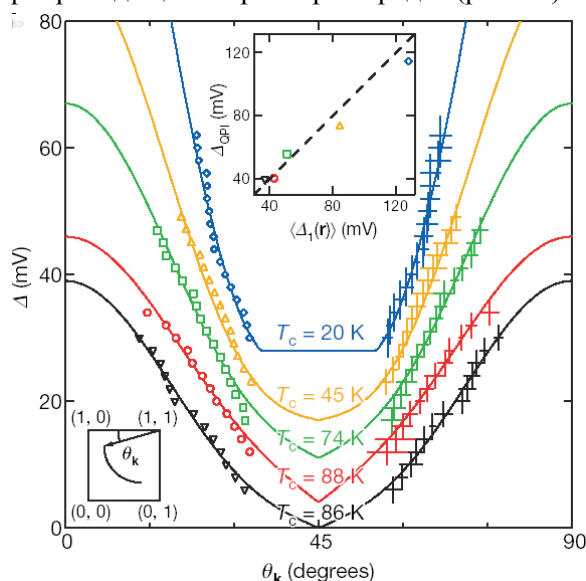


Рис.2 Сверхпроводящая щель Δ в импульсном пространстве для монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с разным уровнем допирования. Слева – экспериментальные значения Δ , справа – погрешности измерений (сдвигка по вертикали сделана для ясности). Сплошные кривые – аппроксимация экспериментальных данных функцией $\Delta(\theta_k) = \Delta_{QPI}[B\cos(2\theta_k) + (1-B)\cos(6\theta_k)]$, где угол θ_k определен на нижней вставке; B – подгоночный параметр, слабо зависящий от концентрации дырок p ; Δ_{QPI} – максимальная величина, которую имела бы щель при $\theta_k=0$, если бы “дотягивалась” до этого участка контура Ферми. На верхней вставке – взаимосвязь Δ_{QPI} и средней (по координате) величины псевдощели $\langle \Delta_1 \rangle$.

В работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований псевдощелевых и сверхпроводящих возбуждений в монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с $p \approx 0.19, 0.17, 0.14, 0.08, 0.06$ и $T_c = 86 \text{ K}, 88 \text{ K}, 74 \text{ K}, 45 \text{ K}, 20 \text{ K}$ соответственно. Были использованы спектрографические методики, позволяющие одновременно “прозондировать” структуру электронных возбуждений, как в координатном, так и в импульсном пространстве (детали см. в [3]). Как видно из рис. 2, уменьшение p приводит к сужению области импульсного пространства, в которой наблюдается интерференция боголюбовских квазичастиц (то есть на поверхности Ферми имеется сверхпроводящая щель). Вне этой области (при $E > \Delta_0$, где Δ_0 – максимальная экспериментально наблюдаемая величина сверхпроводящей щели) боголюбовские квазичастицы быстро затухают. Зато при $E > \Delta_0$ электронные возбуждения хорошо определены в координатном пространстве. Авторы [1] связывают их с псевдощелью. Примечателен тот факт, что средняя (по координате) энергия этих возбуждений $\langle \Delta_1 \rangle$, определяемая по дифференциальным ВАХ, очень близка к максимальной вели-

чине Δ_{QPI} , которую имела бы сверхпроводящая щель, если бы боголюбовские квазичастицы не затухали на соответствующем участке контура Ферми (рис.2). В принципе Δ_{QPI} можно интерпретировать как энергию связи электронов в некоррелированных куперовских парах. При уменьшении p как Δ_{QPI} , так и $\langle \Delta_1 \rangle$ быстро возрастают, оставаясь примерно равными друг другу, то есть $\Delta_0 < \Delta_{QPI} \approx \langle \Delta_1 \rangle$. Выходит так, что высокоэнергетические псевдощелевые возбуждения плавно “перетекают” в низкоэнергетические сверхпроводящие, причем промежуточному диапазону энергий отвечают некогерентные куперовские пары. Из полученных в [1] результатов трудно сделать однозначный вывод о связи таких некогерентных пар с псевдощелью. Ясно лишь, что картина электронных возбуждений в ВТСП является более сложной, чем считалось ранее, и в деталях взаимоотношений между сверхпроводящими и псевдощелевыми корреляциями еще предстоит разобраться.

1. S.Huefner et al., *Rep.Prog.Phys.* **71**, 062501 (2008).
2. O.Fischer et al., *Rev.Mod.Phys.* **79**, 353 (2007).
3. Y.Kohsaka et al., *Nature* **454**, 1072 (2008).

МАНГАНИТЫ

Магнитоэлектрическое взаимодействие, по какому сценарию предпочитает играть природа?

Манганиты – соединения с сильными электронными корреляциями, с которыми связаны корреляции электрических, магнитных и структурных свойств. Они являются неиссякаемым источником новых эффектов и полигоном для проверки идей в теории твердого тела. К колоссальному магнитосопротивлению и магнитокалорическому эффекту в новом столетии добавились еще эффекты управления электрической поляризацией с помощью магнитного поля, послужившие одной из причин очередного бума в физике твердого тела – магнитоэлектрического [1]. В этом году манганиты как новоявленные мультиферроики (т.е. среды с магнитным и электрическим упорядочением, см. Перст т.13, вып.10 http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2006/6_10/index.htm) стали ареной борьбы между сторонниками двух различных механизмов происхождения магнитоэлектрического взаимодействия: релятивистского [2,3] и нерелятивистского [4,5].

Два механизма магнитоэлектрических взаимодействий происходят от двух типов обменного взаимодействия: симметричного гейзенберговского обмена, описываемого скалярным произведением спинов взаимодействующих ионов ($\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$) и антисимметричного обмена Дзялошинского-Мории, описываемого векторным произведением $[\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2]$, связанного со спин-орбитальным взаимодействием, и имеющего релятивистскую природу.

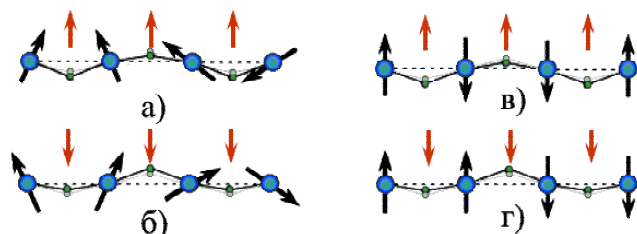


Рис. 1 Механизмы образования электрической поляризации (полярные смещения атомов обозначены красными стрелками) по релятивистскому (а, б) и нерелятивистскому (в, г) механизмам. Конфигурации а), в) связаны операцией инверсии, соответственно, с конфигурациями б), г) [6].

Антисимметричное взаимодействие возникает в структурах с пространственной модуляцией спина (спиновые спирали, рис. 1а, б), в которых направление магнитного момента ионов меняется от точки к точке с периодом, не кратным периоду кристаллической решетки и, как правило, намного превосходящим его (так называемые несоразмерные структуры). Если выбрать определенное направление модуляции (волновой вектор $\mathbf{q}$), то можно ввести ось вращения намагниченности $\mathbf{\Omega}$. При этом $\mathbf{q}$, $\mathbf{\Omega}$ и вектор электрической поляризации $\mathbf{P}$ образуют тройку взаимно перпендикулярных векторов, $\mathbf{P} \sim [\mathbf{\Omega} \times \mathbf{q}]$ (рис.2) [7].

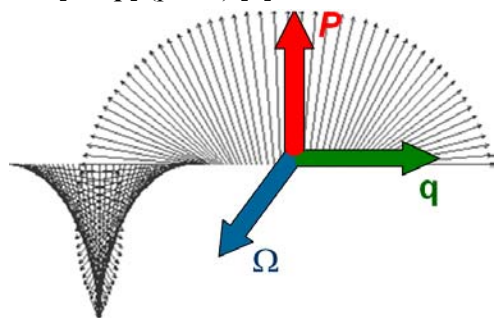


Рис. 2 Тройка взаимно перпендикулярных векторов [7]: ось вращения $\mathbf{\Omega}$, направление модуляции $\mathbf{q}$ и вектор поляризации $\mathbf{P}$.

Для симметричного магнитоэлектрического взаимодействия никакого вращения спинов не требуется, электрическая поляризация может возникать и в коллинеарных структурах (рис.1 в, г), что, впрочем, не исключает ее присутствия и в неколлинеарных структурах.

Релятивистский механизм оказался очень удобным инструментом для объяснения наблюдаемых эффектов в манганитах типа RMnO_3 (R – редкая земля) и предсказания новых магнитоэлектрических явлений. Получили свое объяснение и эффекты поворота электрической поляризации на 90 градусов под действием магнитного поля и эффект переключения направления вращения спиновой спирали под действием электрического поля. Действительно, магнитное поле в вертикальном направлении (рис.2) вызывает переориентацию вектора $\mathbf{\Omega}$ вдоль поля (спин-флоп), что приводит, в полном соответствии с правилом векторного произведения (рис.2),

к повороту вектора поляризации $\mathbf{P}$ на 90 градусов (при условии, что вектор $\mathbf{q}$ остается неизменным). С другой стороны, с помощью электрического поля можно переключать поляризацию $\mathbf{P}$ на 180 градусов, и тем самым изменять направление вращения спина $\mathbf{\Omega}$ на противоположное (рис. 1а, б), что и наблюдалось экспериментально [8]. Подкупающая простота объяснения дотолде загадочных эффектов привела к тому, что к началу 2008 года во всех магнитоэлектрических веществах стремились увидеть спиральные мультиферроики, а релятивистский сценарий стал едва ли не магнитоэлектрической парадигмой, универсальным механизмом. Естественным образом и другой класс мультиферроиков, орторомбические манганиты RMn_2O_5 , приписали к спиральным мультиферроикам, тем более что в них действительно наблюдались неколлинеарное упорядочение и модулированные структуры. Однако более тщательные нейтронографические исследования спинового упорядочения в RMn_2O_5 привели к выводу о том, что переключение направления вращения спина $\mathbf{\Omega}$ никак не сказывается на знаке электрической поляризации [4], а возникает поляризация как раз в той магнитной фазе, когда магнитная структура соразмерна, и магнитные моменты почти коллинеарны [5]. Так нерелятивистский сценарий стал этим летом отвоевывать позиции и даже перешел в контрнаступление: его сторонники указывают на слабые места релятивистского механизма – его малую величину и недостаточную обоснованность квантовомеханического объяснения на микроскопическом уровне [9].

Теория магнитоэлектрических взаимодействий – бурно развивающееся направление, драматическую историю становления которого мы имеем возможность наблюдать. По какому сценарию разыгрываются магнитоэлектрические явления в действительности, покажет время. Скорее всего, как это часто бывает, истина окажется где-то посередине.

А. Пятаков

1. M. Fiebig, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, R123–R152 (2005).
2. J. Okamoto et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 157202 (2007).
3. J.-H. Kim et al, *cond-mat/0803.1123* (2008).
4. P.G. Radaelli et al, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 067205 (2008).
5. P.G. Radaelli et al, *ArXiv* 0808.2237 (Aug 2008).
6. T. Kimura, *JPSJ Online-News and Comments* [Nov. 10, 2006]
7. S.-W. Cheong, M. Mostovoy, *Nature Mater.* **6**, 13 (2007).
8. Е.В. Милов и др., *Письма в ЖЭТФ* **85**, 610 (2007).
9. A.S. Moskvin, *Phys. Rev. B* **78**, 024102 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Получение графенов в макроскопических количествах

Одним из новых интересных представителей широкого класса углеродных наноструктур является графен, представляющий собой индивидуальный слой графита нанометровых размеров, в котором атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников, регулярным образом заполняющих участок плоскости. Миниатюрные размеры в сочетании с хорошей электропроводностью, химической стабильностью и механической прочностью делают графены привлекательным объектом фундаментальных исследований, а также прикладного использования в качестве основы новых нанoeлектронных и наномеханических устройств. Однако развитие работ по исследованию фундаментальных характеристик и возможностей прикладного использования графенов затруднено в связи с трудностями получения этих объектов и манипуляций с ними. В связи с этим усилия исследователей многих стран в течение последних лет направлены на поиск методов синтеза графенов в макроскопических количествах. Недавно большой группе специалистов из Ирландии и Англии удалось разработать процедуру выделения графенов с помощью органического растворителя. В качестве такого растворителя использовался N-метилпирролидон (НМП), куда вводился порошок мелкодисперсного графита. Наряду с этим, в качестве растворителя использовались также N,N-диметилацетамид (ДМА), g-бутиролактон (ГБЛ) и 1,3-диметил-2-имидазолидинон (ДМЕУ). Суспензия, полученная в результате ультразвуковой обработки образующегося раствора, представляла собой однородную жидкость серого цвета с примесью некоторого количества макроскопических частиц, которые легко удалялись в результате центрифугирования. Взаимодействие указанных выше растворителей с частицами графита приводит к их полному либо частичному расслоению с образованием плоских либо изогнутых графеновых монослоев, а также двухслойных и многослойных графеновых структур. Все эти структуры наблюдаются с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ). При этом доля однослойных графеновых структур в исследованных образцах оценивается значением 28%. Это соответствует массовой концентрации таких структур на уровне 12% и, с учетом вклада отфильтрованных макроскопических частиц, массовому выходу графенов на уровне 1%. При многократном использовании суспензии для получения графенов их выход может составить величину порядка 10%.

Структуры синтезированных образцов, содержащих графены, исследовались также методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Спектры КР образцов, представляющих собой тонкие пленки графенов поперечником 1 и 5 мкм, содержат G ($\sim 1,580 \text{ cm}^{-1}$) и 2D ($\sim 2,700 \text{ cm}^{-1}$) полосы, присущие

графитовым структурам. Однако D полоса ($\sim 1,350 \text{ cm}^{-1}$) наблюдается только в спектре пленок размером 1 мкм, что связано с влиянием краевых эффектов.

А.Елецкий

1. Y. Hernandez et al. Nature Nanotechnology 3, 563 (2008).

Приваривание углеродной нанотрубки к металлической подложке

Углеродные нанотрубки (УНТ), которые отличаются удачным сочетанием хорошей электропроводности с высоким аспектным отношением (отношение высоты к диаметру), являются основой эмиссионных катодов в вакуумных электронных приборах нового поколения. В таких приборах в силу способности УНТ усиливать электрическое поле вблизи их концов достаточно высокий ток автоэлектронной эмиссии достигается при умеренных значениях приложенного напряжения. Это позволяет создавать на основе таких катодов портативные дисплеи, источники света и рентгеновского излучения, параметры которых не уступают современным устройствам значительно более крупных размеров и большей массы. На пути разработки таких катодов возникают значительные технологические трудности, одна из которых связана с необходимостью обеспечения надежного контакта нанотрубки с проводящей подложкой. Плохое качество контакта не только снижает электропроводность эмиттера и, следовательно, величину эмиссионного тока, но также является причиной термического разрушения нанотрубки, которая при достижении некоторого критического тока эмиссии отрывается от подложки вследствие омического нагрева. Радикальное решение данной проблемы разработано недавно исследователями из университета г. Нагоя (Япония), которым удалось приварить индивидуальную УНТ к металлической подложке, обеспечив тем самым надежный электрический контакт с ней. Синтезированные в дуговом разряде многослойные УНТ с помощью электрофореза прикреплялись к медной пластинке толщиной 30 мкм, которая монтировалась на подвижном элементе просвечивающего электронного микроскопа. Положение элемента регулировалось с помощью пьезодатчика.

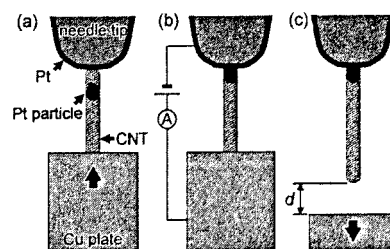


Рис. 1. Иллюстрация процедуры приваривания индивидуальной УНТ к металлической подложке. а) исходная конфигурация нанотрубки, содержащей инкапсулированную платиновую частицу; б) приваривание конца УНТ к платиновой поверхности; в) изготовление эмиттера

ра на основе индивидуальной УНТ в результате удаления медной пластины на расстояние d .

Процедура сварки нанотрубки с металлической поверхностью подложки иллюстрируется на рис. 1. Свободный конец нанотрубки диаметром порядка 5 нм и длиной 176 нм приводился внутри микроскопа в контакт с острием вольфрамовой иглы, покрытым платиновой пленкой. Затем через нанотрубку в условиях вакуума 10^{-7} Торр пропускали электрический ток, что приводило к инкапсулированию внутри нее платиновой наночастицы (рис. 1а). Ток прекращался, когда нанотрубка самопроизвольно отделялась от острия иглы. Затем нанотрубку вновь приводили в соприкосновение с наконечником иглы, и после пропускания тока силой до 100 мкА при напряжении до 2,5 В происходила сварка нанотрубки с платиновой поверхностью (рис. 1б). В результате отделения медной пластины от нанотрубки на расстояние d формировался полевой электронный эмиттер, вольтамперные характеристики которого измерялись при различных значениях межэлектродного расстояния $d = 27 - 442$ нм. Среднее значение напряженности электрического поля, при котором достигается ток эмиссии 100 нА, изменялось при этих расстояниях в диапазоне от 10^7 до 10^6 В/см. При $d = 27$ нм ток эмиссии наблюдался при напряжении 29 В и достигал значения 14 мкА при напряжении 42 В. Это соответствует максимальной плотности тока эмиссии 7×10^7 А/см². Измеренные вольтамперные характеристики (ВАХ) эмиттера хорошо соответствуют классической зависимости Фаулера-Нордгейма. Заметное отклонение измеренных ВАХ от зависимостей Фаулера-Нордгейма наблюдается в области высоких напряжений, что связано с эффектами омического нагрева наконечника нанотрубки, вызывающими повышение тока эмиссии при том же приложенном напряжении. Обработка ВАХ указывает на наличие существенной зависимости коэффициента усиления электрического поля от расстояния d между наконечником нанотрубки и поверхностью медного анода. Величина этого параметра возрастает от 6 до 59 при увеличении d от 27 до 443 нм.

А.Елецкий

I. K.Asaka, H.Nakahara, Y.Saito, Appl. Phys. Lett. 92, 023114 (2008).

Измерение механических характеристик графенового слоя

Недавно семейство наноуглеродных материалов пополнилось еще одним представителем – графеном. Эта двумерная структура представляет собой фрагмент графитовой плоскости, выложенной правильными шестиугольниками, в вершинах которых находятся атомы углерода. Возможность существования графенов обсуждалась уже много десятилетий назад, однако лишь в последние годы удалось не только выделить в чистом виде эти необычные структуры, но и научиться получать их в значи-

тельных количествах. Это позволило перейти от теоретических исследований физико-химических свойств графенов к постановке экспериментов, которые могли ответить на вопрос, в какой степени эти свойства соответствуют результатам модельных расчетов. В частности, расчеты, выполненные на квантовом уровне, указывают на аномальные механические характеристики графенов. Так, согласно этим расчетам, графены должны обладать аномально высоким значением модуля Юнга (на уровне терапаскалей). Такое свойство, однако, присуще лишь графенам, не имеющим структурных дефектов, поэтому лишь прямые измерения могли бы в полной мере прояснить этот вопрос. До сих пор очевидные технические трудности, возникающие при попытке экспериментального исследования графенов, толщина которых составляет порядка ангстрема, препятствовали проведению таких работ. Недавно группа ученых из Колумбийского Университета в Нью-Йорке (США) провела тончайший эксперимент по определению упругих свойств и прочности на разрыв графенов. В качестве подложки они использовали кремниевую пластину, покрытую эпслоем SiO_2 толщиной 300 нм. В пластине сделали круглые отверстия глубиной 500 нм и диаметром 1 и 1,5 мкм, образующие на пластине двумерную матрицу. Затем на подложку механическим способом нанесли графитовые чешуйки, некоторые из которых представляли собой однослойные графеновые структуры, покрывающие отверстия подобно мембранам. Это устанавливалось на основании анализа спектров комбинационного рассеяния, а также наблюдений с помощью атомного силового микроскопа (АСМ). Наблюдения показывают, что отдельные графеновые слои в результате адгезии прикрепляются к вертикальной стенке отверстия, причем контакт происходит на длине 2 – 10 нм. Механические свойства зафиксированных таким образом графенов исследовались с помощью АСМ, оснащенного кантилевером с алмазным наконечником радиусом 27,5 либо 16,5 нм. Исследование механических характеристик производилось при постоянной скорости передвижения наконечника в прямом и обратном направлении, причем цикл измерений многократно повторялся. При измерениях не наблюдался гистерезис, что указывает на упругий характер нагрузки. Результаты измерений механических характеристик, произведенных на одном образце в разное время либо на различных образцах, полностью воспроизводятся. Усредненная по многим образцам величина модуля Юнга графена, определенная на основании измеренного линейного соотношения между растягивающей нагрузкой и величиной растяжения, оказалась равной $(1 \pm 0,1)$ ТПа. Это значение по порядку величины близко к результату измерений соответствующего параметра для бездефектных углеродных нанотрубок. Величина прочности на разрыв определялась на основании прямых измерений нагрузки, сопровождаю-

щейся разрушением графена. Результат оценки этого параметра зависит от предполагаемого значения толщины графенового слоя. В предположении, что толщина графенового слоя равна 0,335 нм, величина прочности на разрыв составляет 130 ± 10 ГПа при предельном значении относительного растяжения 0,25. Приведенные чрезвычайно высокие механические характеристики графенов свидетельствуют о больших возможностях потенциального использования этого материала в нанотехнологиях.

А.Елецкий

1. C. Lee et al., Science 321, 385 (2008).

КОНФЕРЕНЦИИ

Научная выездная сессия ОФН РАН, посвященная 40-летию Института спектроскопии РАН, 8 октября 2008 года, 13.00
(г. Троицк, ул. Физическая, 5)

Web: <http://www.gpad.ac.ru/>

1st German-Russian Workshop on Quantum Ground States, IFW Dresden, Germany, 27 – 29 October 2008

Web: <http://www.ifw-dresden.de/institutes/iff/events/events/feas-workshop/>



Пятая международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», посвященная памяти академика Г.В.Курдюмова, 17-21 ноября 2008 года, Черногловка, Россия

Тематика:

- Бездиффузионные (мартенситные) и диффузионные фазовые превращения. Термодинамика, кинетика, кристаллогеометрия, структура сталей и сплавов.
- Фазовые переходы и критические явления с участием дефектов кристаллического строения, включая процессы пластической деформации. Большие и высокоскоростные деформации. Высокочрезвычайные состояния. Сверхпластичность.
- Структура и свойства внутренних и внешних поверхностей раздела (межфазные, межзеренные и антифазные границы, свободная поверхность) и их вклад в процессы пластической деформации и фазовых превращений.
- Поведение индивидуальных дислокаций и их ансамблей. Взаимодействие с магнитными и

электрическими полями. Влияние внешних воздействий различной природы на поведение дислокационных ансамблей.

- Процессы с участием дефектов кристаллического строения, фазовых превращений процессов пластической деформации (механоактивация, спекание, диффузия, адсорбция, катализ, смачивание).
- Прочность и пластичность перспективных материалов (покрытия, гетероструктуры, фуллерены, высокотемпературные сверхпроводники, нанокристаллические и аморфные материалы, высокопрочные керамики, интерметаллиды).

Контакт

Глезер Александр Маркович

(495) 777-93-50(с), glezer@imph.msk.ru

Страумал Борис Борисович

(916) 6768673, straumal@issp.ac.ru

Черняева Елена Васильевна

(812)428-46-89 (с), lena@smel.math.spbu.ru

Web: <http://chernglk2008.narod.ru>,

<http://sovetsks.issp.ras.ru>

НОВЫЕ КНИГИ



Вышла в свет книга У. Хартманн «Очарование нанотехнологий» (перевод с немецкого). В ней в доступной форме излагаются вопросы, связанные с историческим развитием и современным применением нанотехнологии в различных областях – электронике, медицине, биотехнологии, точной механике и

оптике, автомобильной индустрии, энергетике. Рассматриваются социальноэкономические последствия и этические аспекты внедрения нанотехнологии в жизнь современного общества. Книга предназначена для студентов, изучающих дисциплины, связанные с применением нанотехнологии, преподавателей соответствующих специальностей, а также для широкого круга читателей, интересующихся новейшими достижениями в науке и технике. В Москве ее и другие книги из серии «Нанотехнология», выходящей в издательстве «БИНОМ. Лаборатория знаний» (<http://www.lbz.ru>), можно приобрести в магазине «Книги» по адресу Перовское ш., д. 10/1, тел. (495) 171-19-54, (495) 170-66-74 или в интернет-магазинах (например, <http://www.ozon.ru>, <http://www.my-shop.ru>, <http://www.book.ru> и др.).

Экспресс-бюллетень ПерСТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «Курчатовский институт»

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: А.Елецкий, Л.Опенков, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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