

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сила нефононного притяжения электронов в ВТСП

Большинство теорий нефононного механизма сверхпроводимости купратных ВТСП (хотя и не все) основано на предположении о спаривании электронов за счет их взаимодействия со спиновыми флуктуациями. Но разные авторы существенно расходятся в оценке силы этого взаимодействия. В статье [1] немецкие и американские физики проанализировали результаты экспериментальных исследований спектров зарядовых и спиновых возбуждений одних и тех же недвойникованных монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$, полученных методами фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением и неупругого рассеяния нейтронов (рис. 1).

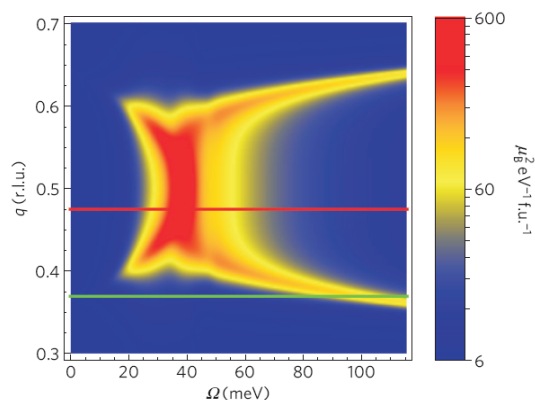


Рис. 1. Интенсивность спиновых возбуждений вдоль $Q = q(2\pi, 2\pi)$ в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$ при $T = 5$ К.

Было показано, что согласованного описания закона дисперсии электронов и их спиновой восприимчивости можно добиться путем надлежащего выбора единственного подго-

ночного параметра – перенормированной энергии электрон-электронного отталкивания $U = 1.59$ эВ. При этом удается с единой точки зрения объяснить такие универсальные для всех ВТСП эффекты как наличие так называемых “магнитных резонансов” с энергией ≈ 40 мэВ в спектрах спиновых возбуждений и изломов (“кинков”) закона дисперсии вдоль узловых направлений обратного пространства, а также очень слабую чувствительность этих кинков к температуре. Воодушевленные полученными результатами авторы [1] рассчитали критическую температуру d -волнового сверхпроводника с такой величиной U . Безразмерная константа спин-фермионного взаимодействия в нормальном состоянии оказалась равной $\lambda = 1.39$ (сильная связь), а величина T_c составила 174 К. Многовато, конечно, но хоть порядок правильный...

Л.Опенев

1. T.Dahm et al., *Nature Phys.* 5, 217 (2009).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Магнитные поверхности

Вольфганг Паули как-то заметил, что если объем создал Бог, то поверхность изобрел дьявол... Возможно, именно по этой причине поверхности различных материалов привлекают внимание исследователей разнообразием своих свойств, функциональностью и возможностью наблюдать на них уникальные эффекты. В работах [1, 2] сообщается о новых результатах, полученных при нанесении на поверхность магнитных атомов и молекул. Авторы [1] сформировали

И далее ...

2 Оксидная нанoeлектроника

3 Нанослой увеличивает мощность на порядок

3 НАНОМАТЕРИАЛЫ

Платиновые нанокатализаторы

4 Эффективное топливо на основе платиновых углеводов

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

4 Сканирующая туннельная микроскопия и поверхность Ферми

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

5 Магнитоэлектрический пиннинг: магнитная структура “на крючке” у сегнетоэлектрической

СПИНТРОНИКА

6 Увидеть магнитный полярон

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

7 Управление электронной структурой графена методом ионного облучения

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

7 Беспредель пределов или о 22-нм литографии (из кулуаров конференции)

КОНФЕРЕНЦИИ

9 Научная сессия ОФН РАН

XXXV Собрание по физике низких температур (НТ-35)

10 6th International Seminar on Ferroelastics Physics ISFP-6(11)

Международная конференция “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”

ровали на поверхности меди упорядоченную супрамолекулярную сетку из органических молекул с атомами Fe (рис. 1). При этом они показали, что направление оси легкого намагничивания (параллельно или перпендикулярно слоям) можно контролировать просто путем адсорбции молекул кислорода.

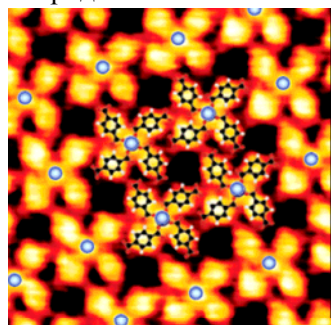


Рис.1. Супрамолекулярный комплекс на поверхности Cu(100). Синие точки – атомы Fe.

В работе [2] был изготовлен монослой из “одномолекулярных магнитов” Fe_4 , закрепленных (опять же с помощью органики) на поверхности золота (рис. 2). Эти наномagnиты демонстрируют гистерезис, что, в принципе, позволяет использовать их, например, в устройствах магнитной памяти. В пределах каждой молекулы Fe_4 спины атомов Fe упорядочены за счет обменного взаимодействия. Общим для работ [1] и [2] является то, что в них продемонстрирована принципиальная возможность избежать размагничивающего влияния подложки на поверхностный магнитный слой. И пусть эксперименты проводились пока при субкельвинских температурах, ведь главное – начать!

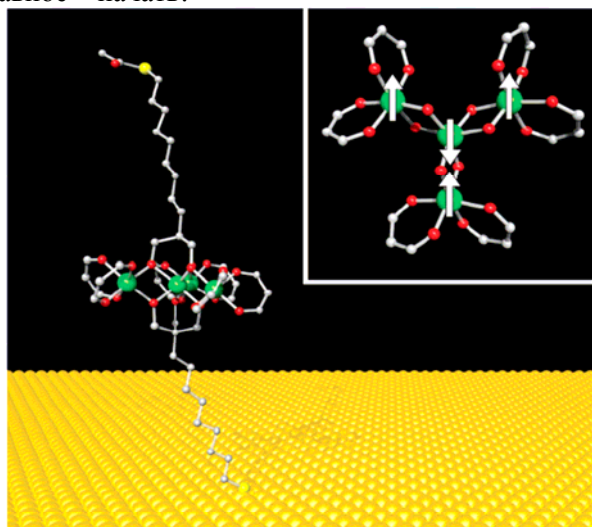


Рис.2. Схематическое изображение молекул Fe_4 , прикрепленных к поверхности золота органическими цепочками.

1. P.Gambardella et al., *Nature Mater.* **8**, 189 (2009).
2. M.Mannini et al., *Nature Mater.* **8**, 194 (2009).

Оксидная наноэлектроника

Немецкие (University of Augsburg) и американские (University of Pittsburgh) ученые разработали сравнительно надежную и простую технологию изготовления наноэлектронных устройств с поперечными размерами элементов 2 нм [1]. Она основана на использовании слоистых оксидных гетероструктур $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$, представляющих собой пленку

полярного полупроводника LaAlO_3 толщиной 3.3 элементарные ячейки, выращенную на кристалле неполярного полупроводника SrTiO_3 . Из-за большого разрыва зон проводимости LaAlO_3 и SrTiO_3 в слое SrTiO_3 толщиной несколько нанометров вблизи границы раздела образуется квазидвумерный электронный газ (q-2DEG). Сканирование поверхности иглой атомного силового микроскопа вдоль заданной траектории приводит к формированию в q-2DEG проводящих дорожек соответствующего профиля, ширина которых δx зависит от величины приложенного к игле микроскопа положительного напряжения V (например, $\delta x = 2.1$ нм и 12 нм при $V = +3$ В и +10 В, соответственно). Таким образом, авторы [1] “нарисовали” на своих гетероструктурах полевой транзистор (рис. 1) и некоторые базовые элементы наноэлектронных устройств (рис. 2).

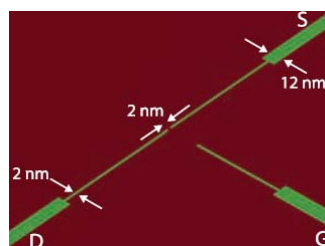


Рис. 1. Полевой нанотранзистор

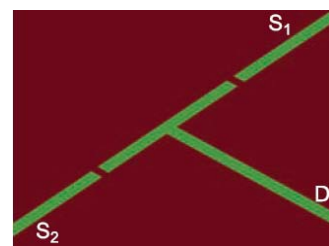


Рис. 2. Нанустройство с двумя туннельными контактами.

В трехконтактных устройствах они, в частности, наблюдали эффект отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 3). Для удаления проводящих дорожек достаточно выполнить повторное сканирование, но уже с отрицательной величиной напряжения V на игле, или же облучить поверхность светом с энергией фотонов $E > E_g \approx 3.2$ эВ (ширина запрещенной зоны в SrTiO_3) – и можно наносить на нее новый узор! Никакие сложные литографические процедуры при этом не требуются.

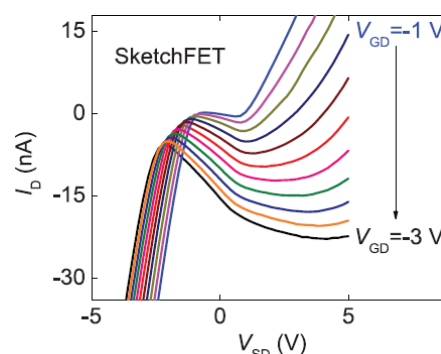


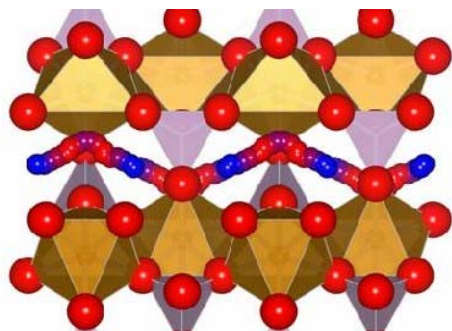
Рис. 3. Вольт-амперная характеристика трехконтактного устройства.

Л.Опенев

1. C.Cen et al., *Science* **323**, 1026 (2009).

Нанослой увеличивает мощность на порядок

На сегодняшний день литиевые аккумуляторы – преобладающий источник электропитания для автономных устройств. Они используются и в российском батискафе, опустившегося на дно на Северном полюсе, и в мобильных телефонах, ставших достоянием всех и каждого отчасти благодаря этим самым литиевым аккумуляторам. Литиевые аккумуляторы обеспечивают плотность энергонакопления порядка 500 Дж/грамм (150Вт·час/кг), что существенно больше, чем у других источников. Для сравнения, типичные свинцовые аккумуляторы обеспечивают округленно 100 Дж/грамм, никель-металлогидридные – 200 Дж/грамм.



Процесс зарядки литиевого аккумулятора состоит в переносе литиевых ионов из катодного электрода (в данном случае из фосфата лития-железа LiFePO_4) в анод, в качестве материала которого используется модифицированный графит. Генерация тока происходит при обратном перемещении ионов. В графите ионы занимают позиции между плоскостями гексагонально упакованных атомов углерода, а в материале катода литий двигается и накапливается в каналах ажурной кристаллической структуры LiFePO_4 (см. рис.).

Основной недостаток литиевых аккумуляторов – флегматичность в процессах заряда/разряда. К примеру: заряд батареи ноутбука занимает порядка часа, что по современным меркам довольно долго. Особенно критично ограничение токов заряда-разряда для разрабатываемого электро- и гибридного транспорта. Для длительного равномерного движения литиевые аккумуляторы обладают достаточным энергозапасом; однако они не могут обеспечить быстрое ускорение или рекуперацию энергии при электромагнитном торможении, которое происходит в течение примерно секунды. Для обеспечения пиковых мощностей параллельно литий-ионным аккумуляторам приходится подключать т.н. суперконденсаторы (ионисторы), что утяжеляет устройство в целом и повышает его цену.

В новой публикации утверждается, что найдено техническое решение, ускоряющее процесс зарядки на порядок [1]. Как выяснили исследователи из Massachusetts Inst. of Technology (MIT), США, проводимость по ионам лития у фосфата лития-железа, используемого в качестве катодного материала, достаточно велика и могла бы обеспечить достаточно вы-

сокие удельные мощности. Лимитирующим процессом для заряда-разряда оказался вход/выход ионов Li с поверхности LiFePO_4 в каналы внутри кристаллической структуры. Специалисты из MIT нанесли на поверхность зерен кристаллического катодного материала пяти-нанометровый аморфный слой с контролируемой нестехиометрией (формулировка авторов), и это обеспечило ускорение процесса внедрения лития более чем на порядок.

По утверждениям авторов, их экспериментальное устройство легко может быть масштабировано; 1 литровая батарея сможет обеспечить 25 кВт. При такой удельной мощности заряд аккумуляторов электромобиля будет занимать всего 5 минут – примерно столько, сколько потребуется, чтобы выпить чашечку кофе на заправочной станции. Правда, в течение этих 5 минут подавать на зарядку придется около 200 кВт мощности, и не исключено, что кофе можно будет варить как раз на автомобильном аккумуляторе.

На этот же аспект обратили внимание комментаторы в блоге на сайте Nature. Как заметил один из них, чтобы зарядить его ноутбук в обещанные 20 секунд, зарядный ток должен составлять порядка 250А.

Там же в блоге специалисты, уже имеющие опыт работы с подобными системами, утверждают, что похожие рецепты уже предлагались, но постепенно выяснилось, что многократные циклы заряд/разряд могут приводить к разрушению материала с аморфным слоем на поверхности и мощность, первоначально высокая, будет снижаться.

Тем не менее, пусть даже пессимисты кое в чем правы; но – повышение мощности литиевых батарей на полтора порядка должно существенно повлиять на будущее энергетики.

М.Компан

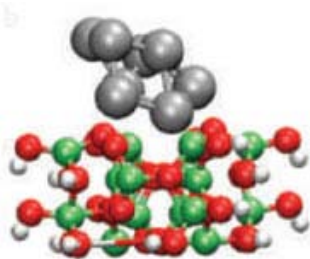
1. B.Kang, G.Ceder, Nature 458, 190 (2009).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Платиновые нанокатализаторы

Известно, что химическая активность атомных кластеров существенно выше, чем у более крупных частиц из того же материала. Объясняется это тем, что в таких кластерах практически все атомы являются “поверхностными”, то есть характеризуются малыми координационными числами, а значит – имеют ненасыщенные связи, которые и участвуют в катализе. В работе [1] показано, что каталитическая способность кластеров Pt_n с $n = 8\div 10$ при окислительной дегидрогенизации пропана не только в 40÷100 раз выше, чем у известных аналогов, но и является избирательной: в результате реакции с их участием образуется пропилен, а не какие-то побочные продукты. Авторам [1] удалось осадить кластеры Pt_n на покрытую тонкой пленкой Al_2O_3 подложку так, что они не слиплись друг с другом,

сохранив свою “кластерную сущность” (см. рис.). Селекция кластеров по числу атомов в них осуществлялась с использованием квадрупольного масс-спектрометра. Сканирующая туннельная микроскопия подтвердила, что все осажденные кластеры имеют одинаковые размеры и остаются устойчивыми при $T < 400$ °С. Каталитическая реакция осуществлялась при $T = 500$ °С. Расчеты из первых принципов показали, что кластеры Pt_8 “вытягивают” электроны из пленки Al_2O_3 и становятся отрицательно заряженными. Возможно, именно это и является причиной их высокой каталитической активности, приводя к уменьшению энергетического барьера для разрыва первой связи С-Н в пропане. Предложенная в [1] технология изготовления кластерных нанокатализаторов может быть использована и в промышленном производстве.



Кластер Pt_8 на поверхности Al_2O_3 (данные численных расчетов).

1. S.Vajda et al., *Nature Mater.* **8**, 213 (2009).

Эффективное топливо на основе платоновых углеводородов

Углеводородные кластеры, остов которых представляет собой правильный многогранник, называются платоновыми углеводородами, в честь великого древнегреческого философа Платона. Самым известным из них безусловно является кубан C_8H_8 (см. [1]): куб из восьми атомов углерода с расположенными на продолжениях главных диагоналей атомами водорода. Кубан обладает высокой энергоемкостью и аномально большой термической устойчивостью, что, несомненно, делает данное вещество перспективным материалом для топливных элементов. Однако его использование в качестве топлива (high-energy-density fuel) технологически неудобно, так как при комнатной температуре кубан – твердое вещество – молекулярный кристалл – практически нерастворимое в других углеводородах. Производное же от кубана – метилкубан C_9H_{10} , в котором один из атомов водорода замещен CH_3 -группой (рис. 1), напротив, является жидкостью и рассматривается как кандидат в эффективное нетоксичное топливо. Однако, по сравнению с кубаном, метилкубан практически не исследован. Его геометрические и энергетические свойства до сих пор оставались мало изученными. Работа [2] несколько исправляет сложившуюся ситуацию.

Основной целью работы [2] являлось теоретическое исследование геометрических и энергетических характеристик молекулы C_9H_{10} , возможных каналов и

продуктов ее распада, а также определение энергии активации процесса распада и соответствующего частотного фактора в формуле Аррениуса для температурной зависимости времени жизни τ . Расчеты проводили методом молекулярной динамики в рамках неортогонального потенциала сильной связи в интервале температур от 1000 К до 2000 К. Поскольку потенциал сильной связи представляет собой разумный компромисс между чрезмерно упрощенными классическими потенциалами и ресурсоемкими первопринципными (*ab initio*) подходами, авторам удалось проследить эволюцию молекулы метилкубана вплоть до 1 мкс (длительного по атомным меркам периода времени), практически не потеряв при этом в точности. Результатом компьютерного моделирования стала температурная зависимость времени жизни метилкубана. Из ее анализа были определены значения энергии активации и частотного фактора в уравнении Аррениуса. Расчеты хорошо согласуются с данными экспериментов по пиролизу метилкубана [3].

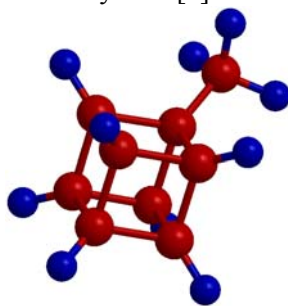


Рис.1. Метилкубан C_9H_{10}

В дальнейшем полученную зависимость $\tau(T)$ можно использовать для оценки времени жизни метилкубана при различных температурах. Особый интерес представляет случай комнатной температуры, при которой его время жизни может достигать $\sim 10^{13}$ с, что довольно необычно для метастабильной молекулы. Кроме того, авторы детально проанализировали каналы распада метилкубана и пришли к выводу, что основным продуктом его распада является изомер C_9H_{10} с более низкой энергией – молекула метилциклооктатетраена. Будем надеяться, что полученные в [2] результаты стимулируют дальнейшие исследования и подскажут направление поиска новых способов синтеза этого перспективного углеводорода.

М.Маслов

1. *ПерсТ*, **16**, вып. 4, с. 4 (2009).
2. *J. Phys. Chem. A* **107**, 1162 (2003).
3. *Хим. физ.* **28**, 44 (2009).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Сканирующая туннельная микроскопия и поверхность Ферми

Наличие в металлах поверхности Ферми – главный признак применимости концепции квазичастиц и теории ферми-жидкости к описанию их электронной подсистемы. Конкретный вид этой поверхности определяет электрические, магнитные, оптические и другие характеристики того или иного металла. Для экспериментального определения поверхности Ферми обычно используют эффект де Гааза – ван Альфена или фотоэмиссионную спектроскопию с

угловым разрешением. В работе [1] коллектива немецких физиков показано, что это можно делать и с помощью сканирующей электронной микроскопии (СТМ). Дело в том, что при внедрении примесных атомов в приповерхностный слой на СТМ-изображении поверхности возникает характерный узор, вид которого зависит от электронной зонной структуры материала, а значит – и от его поверхности Ферми (рис. 1). Авторы [1] применили эту методику к исследованию поверхности Ферми меди. В качестве примеси они использовали кобальт. Интересно, что даже при почти сферической форме поверхности Ферми (как в меди) СТМ-изображения могут быть сильно анизотропными (рис. 1В). Это согласуется с теоретическими расчетами. Очень важно, что с помощью СТМ можно изучать локальные изменения поверхности Ферми на нанометровом масштабе, а также различные характеристики границ раздела и примесных атомов вблизи поверхности.

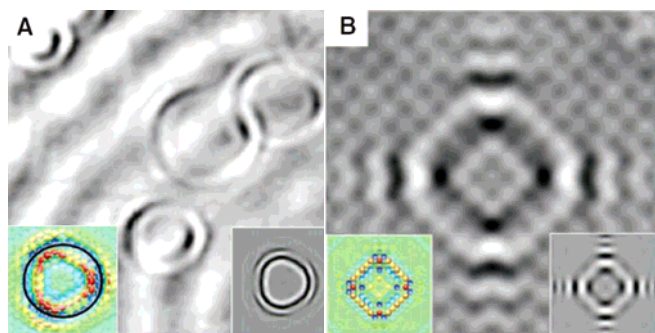


Рис. 1. СТМ-изображения поверхности Cu(111) с четырьмя примесными атомами Co в приповерхностном слое (А) и поверхности Cu(100) с одним атомом Co в приповерхностном слое (В).

1. A. Weismann et al., Science 323, 1190 (2009).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Магнитоэлектрический пиннинг: магнитная структура “на крючке” у сегнетоэлектрической

В недавней работе отечественных ученых [1] предложен механизм, который может объяснить часто наблюдающийся эффект “зацепления” сегнетоэлектрических и антиферромагнитных доменных границ друг за друга (см. например [2]).

Виной тому взаимодействие магнитоэлектрической природы, ранее упоминавшееся в связи с электрической поляризацией в манганитах, вызванной магнитными спиралями [3], а также в связи с зарождением и движением магнитных доменных границ электрическим полем [4]. Это неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие описывается вкладом в свободную энергию вида $P_i n_j \nabla_k n_l$, где P – электрическая поляризация, ∇ – векторный дифференциальный оператор, а n – магнитный параметр порядка – намагниченность или вектор антиферромагнетизма. Если существует простран-

ственная модуляция магнитного параметра порядка n , то с ней связана электрическая поляризация P . Также возможен обратный эффект, при котором электрическое поле порождает неоднородное магнитное упорядочение.

Бывает и такое, что магнитные спирали или доменные стенки не зарождаются, будучи “задавленными” сильной анизотропией, внешним полем или пространственным ограничением в тонких пленках. Вещество находится в однородном магнитном (антиферромагнитном) состоянии. В этом случае вклады в энергию $P_i n_j \nabla_k n_l$ с очевидностью равны нулю. Тем не менее, даже загнанное в подполье неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие может проявить себя, если ему поможет сегнетоэлектрическая доменная структура.

Скачок электрической поляризации на границах сегнетоэлектрических доменов должен приводить к скачку пространственной производной от магнитного параметра порядка, что проявляется в виде “выплесков” на границах (рис. 1а). Графическое изображение модуляции направления вектора антиферромагнетизма, задаваемого углом θ , показано на рис. 1б.

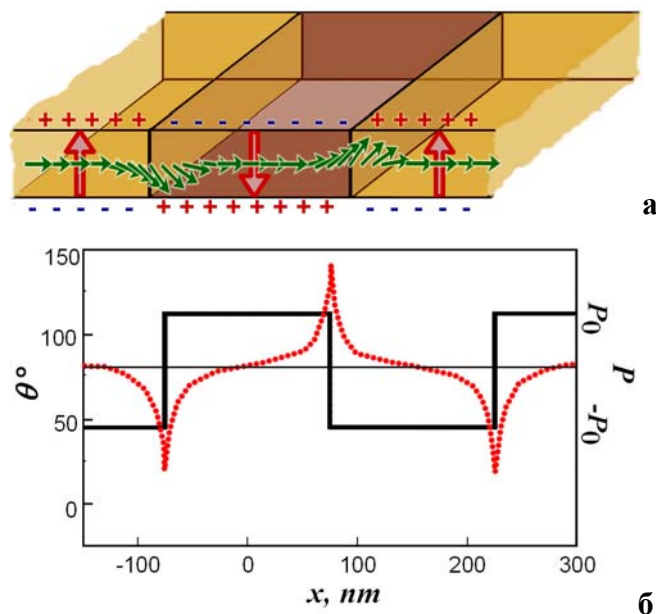


Рис. 1. Наведение модуляции антиферромагнитного вектора под действием сегнетоэлектрической доменной структуры: а – схематическое изображение, красные стрелки – поляризация, зеленые – вектор антиферромагнетизма; б – графическая зависимость [1]: сегнетоэлектрическая доменная структура (сплошная линия, правая шкала), антиферромагнитная (пунктирная линия, левая шкала), θ – угол, образованный вектором антиферромагнетизма с нормалью.

Получается, что при наличии сегнетоэлектрической доменной структуры однородное антиферромагнитное состояние уже не является состоянием с наименьшей энергией. Если же в материале сосуществуют магнитная (антиферромагнитная) и сегнетоэлектрическая доменные структуры, то рассмотренный выше эффект может проявляться в ви-

де пиннига (от англ. *подшивание, зацепление*) магнитных доменных границ на сегнетоэлектрических доменных границах.

А. Пятаков

1. Z.V.Gareeva, A.K.Zvezdin, *Phys. status solidi (RRL)*, **3**, 79 (2009).
2. M.Fiebig et al., *Nature*, **419**, 818 (2002).
3. [ПерсТ 15, вып. 18, с.4 \(2008\).](#)
4. [ПерсТ 15, вып. 23, с. 3 \(2008\).](#)

СПИНТРОНИКА

Увидеть магнитный полярон

Недавно на семинаре в Институте физических проблем им. П.Л.Капицы состоялось выступление В. Сторчака (Курчатовский институт), посвященное исследованию магнитных поляронов мюонными методами. Само понятие магнитный полярон (МП) или ферррон было “введено в научный оборот” Э.Л. Нагаевым более 40 лет назад [1]. Согласно Нагаеву, МП – это ферромагнитная капля нанометровых размеров, возникающая в антиферромагнитном полупроводнике за счет автолокализации носителей тока, вводимых в полупроводник при допировании. Дополнительный всплеск интереса к этим объектам приходится на 90-е годы в связи с открытием эффекта колоссального магнитосопротивления в манганитах, где МП и связанное с ними мелкомасштабное фазовое расслоение играют фундаментальную роль [2]. Интерес к магнитным поляронам подогревается перспективой их использования в приборах спинтроники.

Схема образования МП в ферромагнетике выше температуры Кюри, когда спины решетки полностью разупорядочены, выглядит следующим образом (рис. 1). Вначале электрон локализуется на мелком кулоновском центре (это может быть примесь). Типичная энергия связи порядка 10 мэВ, и волновая функция электрона распространяется на много периодов решетки. При такой малой энергии связи при комнатной температуре электрон часто уходит с центра и участвует в проводимости. Это есть металлическое состояние материала. Оказавшись на центре, далее из-за обменного взаимодействия этого электрона со спинами электронов атомов решетки происходит их взаимная поляризация в одинаковом направлении. Волновая функция “сжимается”, захватывая уже только несколько атомов решетки. Возникает локальное ферромагнитное состояние, которое и называется магнитным поляроном. Энергия связи электрона возрастает до 0.5 эВ. Электрон с такой энергией связи даже при комнатной температуре уже совершенно не участвует в проводимости, иными словами, возникает диэлектрическое состояние. Из представленной картины ясно, почему МП не возникает в ферромагнитном состоянии материала (ниже температуры Кюри). Тогда энергия обменного взаимодействия не зависит от положения электрона.

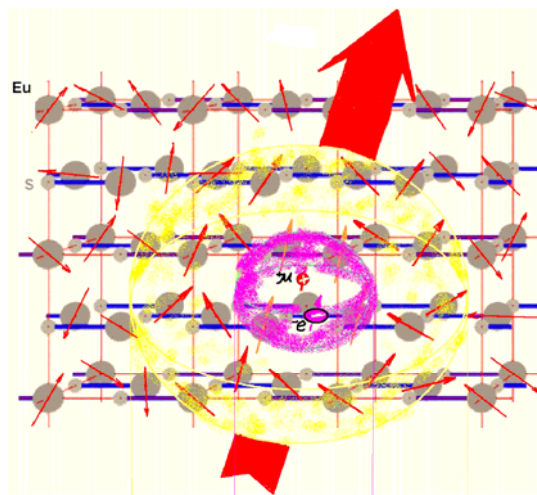


Рис. 1. Схема образования магнитного полярона на основе электрона, захваченного мюоном.

Несмотря на довольно ясную физическую картину, непосредственно наблюдать МП до недавнего времени не удавалось. Что такое “увидеть полярон”? Это означает увидеть локальное магнитное поле, которое в нем существует. Такое наблюдение позволили осуществить мюоны. Эти частицы имеют положительный заряд, равный заряду электрона, и массу в 200 раз большую. Время их жизни составляет 2 мкс. Из мишени, установленной на протонном ускорителе, вылетают мюоны, у которых спин строго ориентирован против направления движения. Это означает, что, попадая в исследуемый материал, они все имеют известную спиновую поляризацию. Оказавшись в области локального магнитного поля, спины прецессируют (рис. 2). При распаде мюона образуется позитрон, у которого спин строго направлен в сторону движения. Как заряженная частица позитрон легко регистрируется. Испускание позитронов в разных направлениях означает наличие локального магнитного поля в материале. При этом среднее магнитное поле равно нулю и не может быть зарегистрировано магнитными датчиками.

Именно подобный эксперимент удалось недавно реализовать группе Сторчака [3], работающей в тесном сотрудничестве с западными научными центрами. Следует отметить, что мюон играл роль не только детектора магнитного поля, но и служил для электронов кулоновским центром, образуя атом мюония (рис. 1 и рис. 2), вокруг которого собственно и возникала ферромагнитная область. В представляемой работе в качестве материала выступал EuS. Группа проводит исследования и с EuO. Отметим, что похожую картину та же группа наблюдала и в разбавленных магнитных полупроводниках системы GaMnAs [4].

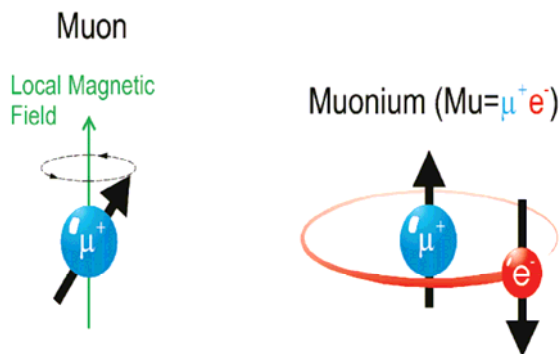


Рис. 2. Прецессия спина мюона в локальном магнитном поле и образование атома мюония.

В.Вьюрков

1. Э.Л.Нагаев, *Письма ЖЭТФ* **6**, 484 (1967).
2. М.Ю.Каган, К.И.Кугель, *УФН* **171**, 577 (2001).
3. V.G.Storchak et al. *Physica B: Condensed Matter* (2008) [doi:10.1016/j.physb.2008.11.142](https://doi.org/10.1016/j.physb.2008.11.142)
4. V. G. Storchak et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 027202 (2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Управление электронной структурой графена методом ионного облучения

По своим электронным свойствам графены подобны углеродным нанотрубками, поскольку их проводимость, как и в случае нанотрубок, зависит от угла между направлением графитовой плоскости и рассматриваемым направлением. Другая особенность графенов связана с чувствительностью их электронных характеристик к наличию структурных дефектов. Такая особенность наводит на мысль о возможности направленного воздействия на электронные свойства графенов путем искусственного наведения дефектов в их структуре. Указанная возможность была продемонстрирована недавно группой исследователей из Института материаловедения в Будапеште (Венгрия) и Университета в Намюре (Бельгия) [1], которые использовали для этой цели ионное облучение. Исследуемые образцы представляли собой однослойные графеновые хлопья, отделяемые от кристаллического графита механическим способом и нанесенные на кремниевую подложку с покрытием из окиси кремния толщиной 300 нм. Образцы с помощью микропайки приводились в контакт с индиевыми электродами, после чего подвергались облучению ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при дозе $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При такой дозе облучения возможно образование индивидуальных дефектов в структуре графенов, которые сравнительно легко регистрируются с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Эти дефекты проявляются на СТМ изображениях графенов в виде возвышений высотой 0.2–0.5 нм и поперечником ~ 1 нм. В близкой окрестности этих возвышений наблюдаются осцилляции электронной плотности с периодом, значительно превышающим постоянную решетки графитового слоя. Природа указанных осцилляций связана с интерференцией

электронов, испытавших рассеяние на дефектах. Измеряя волновой вектор осцилляций в зависимости от напряжения смещения, прикладываемого к графену, удастся воспроизвести дисперсионное соотношение для электронов проводимости в графене с дефектами. Это дает значение характеристической скорости Ферми в дефектном графене $3.2 \times 10^5 \text{ см/с}$, что примерно втрое ниже соответствующего значения, измеренного ранее для бездефектного графена. Сравнение полученных с помощью СТМ спектров дефектного и бездефектного графенов указывает на возникновение дополнительного пика при потенциале смещения ± 1 эВ, связанного с присутствием дефекта. Тем самым результаты описанного эксперимента ясно указывают на возможность изменения электронных характеристик графена в результате облучения ионным пучком, что связано с наведением в графене структурных дефектов.

А.Елецкий

I. L. Tapasztó et al. *Phys. Rev. B* **78**, 233407 (2008).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Беспредел пределов или о 22-нм литографии (из кулуаров конференции)

Точка зрения, что неприятные события имеют тенденцию концентрироваться, часто подтверждается: мировой финансовый кризис пришел одновременно с сумятицей при подходе к непреодолимому барьеру высотой в 22 нм в доселе безупречной классической микроэлектронной технологии. Начиная со времени изготовления первой интегральной схемы (ИС) в 1958 г., число транзисторов, которое можно было экономно разместить на чипе, приблизительно удваивалось каждые два года (а вслед за этим соответственно изменялись скорость обработки данных, емкость запоминающих устройств, и даже число пикселей в цифровых камерах). Эту тенденцию отметил Gordon E. Moore, соучредитель компании Intel, и описал ее в своей статье, опубликованной в 1965 г. А далее почти столетия он управлял мировой микроэлектроникой, пользуясь законом, получившем его имя, как дирижер оркестра своей палочкой.

И вот достигнуты пределы оптической литографии, остановившие дальнейшее соблюдение закона Мура в рамках простого масштабирования рисунка интегральных схем. Пути их преодоления стали предметом детального обсуждения на прошедшей в начале марта с.г. конференции по перспективной литографии (2009 Advanced Lithography Conference, San Jose, Калифорния, США), организованной Обществом инженеров в области оптического приборостроения (SPIE). Представители полупроводниковой промышленности высказали свою озабоченность задержкой с разработками литографических систем следующего поколения, способных поддерживать 22-нм (и ниже) технологии.

Состояние трех главных претендентов (экстремальный ультрафиолет (ЭУФ), электронный луч и наноимпринт) для выполнения этой задачи – неопределенно, существуют сомнения в их готовности поддерживать массовое производство ИС. Чипмейкеры ориентируются и частично спонсируют каждый из перечисленных подходов. К слову, мировые поставки литографических систем (а с ними и доходы поставщиков) неуклонно снижаются от 544 систем (2007 г.) к 323 (2008) и к оцениваемым 184 (а по некоторым оценкам, катастрофическим 80) системам (2009).

Иммерсионная оптическая литография с двойным паттернированием

Барьер в 45-нм в массовом производстве ИС преодолен все той же оптической литографией с источником в области глубокого ультрафиолета ($\lambda = 193$ нм, источник излучения – ArF лазер). Но, чтобы принудить ее рисовать столь тонкие рисунки, пришлось идти на довольно сложные маневры. В результате родились несколько подходов, среди которых мейнстрим – двойное паттернирование (double patterning) с использованием иммерсионных сред при множестве вариантов в зависимости от последовательности выполняемых технологических операций (экспонирование, проявление, травление). Метод достаточно дорогой и сложный, можно сказать, «головная боль» для технологов. В кулуарах конференции Tae-Seung Eom, представляющий компанию Hynix Semiconductor, печально поведал: «Я не хочу разрабатывать двойное паттернирование, но мой босс заставляет. Это просто убивает меня». «Шаблоны для двойного паттернирования – вот, что не дает мне спать по ночам» – сказал в дискуссии за круглым столом Harry Levinson, руководитель разработок литографических технологий компании AMD. «Но как раз это позволяет мне спокойно спать ночами» – парировал Bert Jan Kamperbeek из компании Mapper Lithography, рассказавший на конференции о достоинствах альтернативной безмасочной электронно-лучевой литографии, разрабатываемой его компанией. Ситуацию с двойным паттернированием описывают фразой с трудно переводимой на русский игрой слов – «Double trouble».

Экстремальный УФ

Посему все ждут, когда созреют производительные ЭУФ ($\lambda = 13.5$ нм) литографические системы. Но и тут ситуация неоднозначна. Главные недостающие элементы ЭУФ – отсутствие мощного источника излучения (сегодня – 100 Вт, необходимо – 200 Вт), чувствительного резиста, способа изготовления бездефектных шаблонов и эффективных устройств экспресс-контроля размеров в технологическом процессе.

Intel Corp., основной покровитель ЭУФ, призывает метрологические компании (такие как Applied, Hitachi, KLA-Tencor) выделить дополнительные ре-

сурсы для разработки систем контроля, в частности, технологического контроля в процессе совмещения слоев. Оппоненты Intel отвечают, что на финансирование ЭУФ уже затрачено немеренное количество средств при том, что реально предъявить нечего. Стоимость сегодняшних лабораторных вариантов ЭУФ систем не менее 90 млн. долл.

В рамках конференции датская компания ASML показала демонстрационный вариант своей ЭУФ установки. «Это скорее напоминает электромагнит, который волокут через двор, собирая мусор. Трудно поверить, что подобный инструмент подходит для такой работы. Так и изысканная ЭУФ установка кажется совсем неуместной в массовом производстве» так прокомментировал впечатление о демонстрации Bernie Meyerson из компании IBM.

Chris Mack, известный эксперт в области литографии, предсказывает даже смерть ЭУФ в течение ближайших двух лет. Он категорически заявляет: «Число докладов по ЭУФ литографии на “2011 SPIE Advanced Lithography Conference” будет нулевым». Ему возразил Vivek Bakshi, президент компании EUV Litho Inc. (Austin, Texas, США): «Я предсказываю прямо противоположное – ЭУФ будут использовать на полупроводниковых фабриках не позднее 2013-2014 г.г. или даже раньше. Предлагаю Chris’у пари на спортивную машину марки Lotus sport. Я настолько уверен в себе, что уже ожидаю поставку моего нового автомобиля».

Электронно-лучевая литография

Безмасочная электронно-лучевая литография наиболее привлекательна для литографии следующего поколения, как наиболее простая и не требующая изготовления шаблонов. Этот метод прямого рисования на резисте применяют многие чипмейкеры уже в течение многих лет для производства ИС небольшой емкости на основе полупроводниковых соединений. Для сегодняшних целей производства кремниевых СБИС электронно-лучевая литография – слишком медленный и малопродуктивный метод.

Для увеличения его пропускной способности создаются многолучевые установки, энтузиастом которых выступает тайваньская компания TSMC, инвестирующая разработки в Mapper Lithography NV. Другая активная компания - Multibeam Systems Inc., работающая в партнерстве с Tokyo Electron Ltd. (TEL), японским гигантом по разработке полупроводникового оборудования. Разработки далеки от серийного производства, требуют значительных инвестиций, а внедрение метода – еще и развития инфраструктуры. Если и когда электронные системы будут готовы, они найдут свою нишу, но не будут общепринятыми.

Наноимпринт

Несколько обособленно от электронно-лучевых и ЭУФ систем реальной темной лошадкой стоит на-

ноимпринт (нанопечатные системы), напоминающий процесс горячей чеканки (штамповки), применяемый в настоящее время на субмикронной шкале при производстве, в частности, компакт-дисков. В процессе панельной дискуссии о новом поколении литографических систем ноимпринт был даже исключен из обсуждаемого перечня, как не имеющий перспектив в производстве СБИС. Однако, множество поклонников ноимпринта не согласилось с этим мнением, утверждая, что методом ноимпринт уже получено рекордное суб-10-нм разрешение. Одна из проблем метода – недолговечность штампов. Применяемые кремниевые штампы – хрупки, практически одноразового использования. Решение проблемы видят в применении аморфных материалов. Mark Melliard-Smith, исполнительный директор Molecular Imprints Inc. (МИ), разработчика ноимпринтных систем, уверяет, что системы весьма перспективны в технологии следующего поколения запоминающих устройств, таких как мемристоры, и в технологии дисковой памяти на основе т.н. “паттернированных сред”.

В конце дискуссии за круглым столом Tracy Weed, директор по маркетингу Silicon Engineering Group (компания Synopsys) спроектировал на экран снимок железнодорожной катастрофы и заключил: “Видимо, ситуация с литографией не совсем хороша и, скорее, напоминает следующий снимок”. Оптимисты не теряют надежд – “Именно в этом хаосе – залог успеха”.



По материалам репортажей с конференции “2009 Advanced Lithography Conference”:

1. <http://www.semiconductor.net/blog/870000487/post/980041498.html>
2. <http://www.semiconductor.net/article/CA6643425.html?desc=topstory>
3. <http://www.semiconductor.net/article/CA6642291.html>
4. http://www.eetimes.com/news/semi/rss/showArticle.jhtml?articleID=215800563&cid=RSSfeed_eetimes_semiRSS
5. <http://www.semiconductor.net/blog/920000492/post/1990041799.html>

КОНФЕРЕНЦИИ

Совместное заседание Научной сессии ОФН РАН и Ученого совета ФИАН, посвященное 75-летию Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

6 апреля 2009 г., (в 10.00)

(Ленинский просп., 53, Главное здание ФИАН, конференц-зал)

Программа

1. Месяц Г.А.

75 лет Физическому институту им. П.Н. Лебедева РАН, ведущему свое происхождение от созданного 285 лет назад Физического кабинета Кунсткамеры Петра I

2. Осипов Ю.С., Матвеев В.А., представители институтов

Поздравления ФИАН

3. Болотовский Б.М. (ФИАН)

Излучение Вавилова-Черенкова

4. Копаев Ю.В. (ФИАН)

Тороидные состояния в кристаллах

5. Кардашев Н.С. (ФИАН)

Научная программа миссии РАДИОАСТРОН

6. Зацепин Г.Т. (ИЯИ РАН), Роганова Т.М. (НИИЯФ МГУ)

Исследования космических лучей

7. Масалов А.В. (ФИАН)

Спектроскопия: от атомов до космических объектов

8. Губин М.А., Величанский В.Л. (ФИАН)

Малогабаритные оптические стандарты частоты

9. Дагкесаманский Р.Д. (ФИАН)

Перспективы радиоастрономических исследований в Пушчино

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

ПОЗДРАВЛЯЕМ коллектив ФИАН со славной годовщиной! Желаем дальнейших творческих успехов, новых свершений и открытий!

Авторы и редакция ПерсТа



XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35)

29 сентября – 2 октября 2009 г. Черногловка Московской обл.

Программа

- квантовые жидкости и кристаллы (Q)
- фундаментальные вопросы сверхпроводимости (исключая высокотемпературную) (S)
- низкотемпературный магнетизм и низкотемпературная физика твердого тела (L)

- электронные явления при низких температурах (включая наноструктуры и низкоразмерные системы) (N)

Важные даты

Регистрация и тезисы до 1 мая 2009 г.

Контакт

Тел.: (499)1375623

Факс: (495)6512125

E-mail: nt35@kapitza.ras.ru

Web: <http://www.icp.ac.ru/conferences/LTP2009>

6th International Seminar on Ferroelastics Physics ISFP-6(11)

September 22-25, 2009, Voronezh, Russia

Topics

1. Phase transitions, lattice dynamics and soft modes
2. Structure and crystal growth
3. Domains, domain boundaries and their dynamics
4. Mechanical and acoustic properties
5. Optical properties
6. Superionic conductivity
7. Ferroelasticity and superconductivity
8. Heterogeneous, glassy and incommensurate systems
9. Nanometer structures
10. Applications

Conference Schedule

Deadline for pre-registration - **February 28, 2009**

Deadline for abstracts submission - **April 15, 2009**

Abstract acceptance - **June 15, 2009**

Contact

E-mail: olgakaraeva9@mail.ru

Web: <http://isfp6.narod.ru>

Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах»

7-10 сентября 2009 г., г. Махачкала,

Республика Дагестан, Россия

Тематика

1. Магнитные фазовые переходы
2. Компьютерное моделирование фазовых переходов и критических явлений
3. Фазовые переходы и критические явления в сегнетоэлектриках, высокотемпературных сверхпроводниках и манганитах
4. Критические явления в жидкостях
5. Фазовые переходы, нелинейные явления и хаос в конденсированных средах

Важные даты

прием докладов

и регистрационных форм - **1-30 июня 2009**

Контакт

Телефон: (8722) 62-66-75,

(8722) 62-89-00,

E-mail: dagphys@mail.ru

Web: <http://www.dagphys.ru>

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: В.Вьюрков, А.Елецкий,

М.Компан, М.Маслов, Л.Опенов, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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