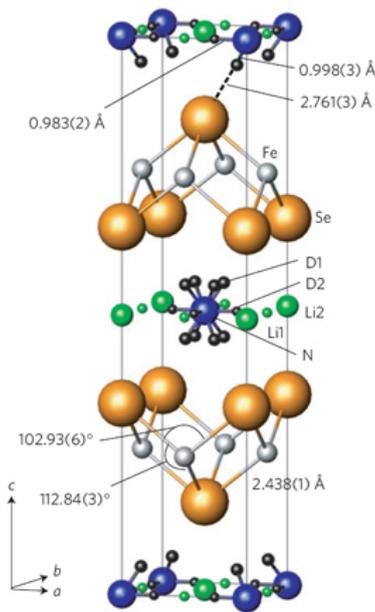


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Увеличение критической температуры FeSe при интеркаляции молекулярного слоя

В слоистых пниктидах железа, таких как LaFeAsO, BaFe₂As₂ и NaFeAs, сверхпроводимость возникает при допировании спейсерных слоев, расположенных между проводящими слоями FeAs. Изменение химического состава этих слоев позволяет повысить критические температуры различных семейств безмедных ВТСП. А вот в тетрагональном селениде железа Fe_{1+δ}Se с δ = 0.01 и T_c ≈ 8.5 К спейсерные слои отсутствуют, что затрудняет управление его сверхпроводящими характеристиками. В работе [1] (Великобритания, Япония) синтезирован селенид с молекулярным буферным слоем Li_x(NH₂)_y(NH₃)_{1-y} (x ≈ 0.6, y ≈ 0.2).



Кристаллическая структура
Li_{0.6}(NH₂)_{0.2}(NH₃)_{0.8}Fe₂Se₂

В нем межслоевое расстояние FeSe-FeSe намного больше, чем в Fe_{1+δ}Se, а T_c значительно выше – 43 К. Одной из причин резкого роста T_c является, возможно, полное отсутствие в этом сверхпроводнике междоузельных атомов железа появляющихся за счёт нестехиометрии. Авторы [1] полагают, что эксперименты по интеркаляции солей и молекулярных групп в пниктиды и селениды железа могут привести к открытию новых безмедных ВТСП.

1. M.Burrard-Lucas et al., *Nature Mater.* **12**, 15 (2013).

Сверхпроводимость и бозонная мода в безмедных ВТСП

В сверхпроводниках взаимодействие электронов со спаривающими бозонами приводит к появлению на туннельных спектрах особенностей, по положению которых можно определить энергию этих бозонов Ω и тем самым получить косвенную информацию об их физической природе. В работе [1] китайские и американские физики измерили локальные туннельные ВАХ пниктидов железа Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ с T_c = 40 К и Na(Fe_{0.975}Co_{0.025})As с T_c = 21 К. В обеих системах когерентные сверхпроводящие пики и бозонные особенности ВАХ одновременно исчезают как при повышении температуры до T_c, так и в сердцевинах абрикосовских вихрей, что указывает на тесную связь этих бозонных мод со сверхпроводимостью. Оказалось, что несмотря на существенное различие T_c двух исследованных пниктидов отношение Ω/k_BT_c ≈ 4.3 в них практически

И далее ...

- 2 Переход
диэлектрик-сверхпроводник
в La_{2-x}Sr_xCuO₄

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Нефермижидкостная
d-волновая фаза сильнокоррелированных электронов

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 3 Квантованный перенос тепла
через наноконтакты

ГРАФЕН

Графеновые наноструктуры
металл-полупроводник-металл

Холодный полевой эмиттер
на основе графена

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 4 Наноматериалы
на защите урожая

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Губка из фуллеренов

ФОТОНИКА

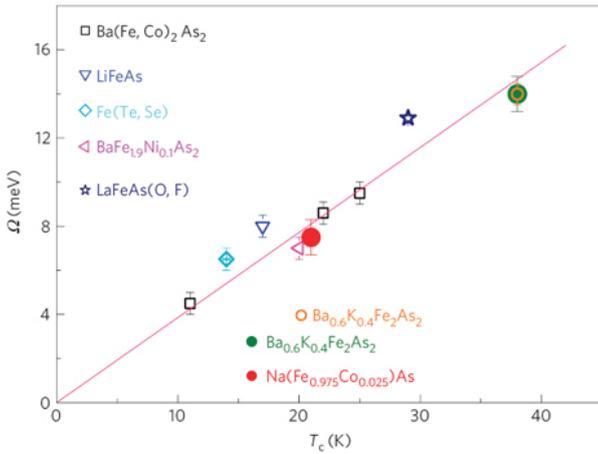
Симфония света и звука в
полупроводниковом лазере

МАГНИТЫ

- 8 Скачки доменных стенок в
кристаллическом рельефе
обычных и хиральных
молекулярных магнетиков

- 10 **КОНФЕРЕНЦИИ**

одинаковое. Более того, это отношение имеет такую же величину и во многих других безмедных ВТСП, если для них в качестве Ω взять энергию резонансной магнитной моды, определенную из нейтронной спектроскопии (см. рис.).



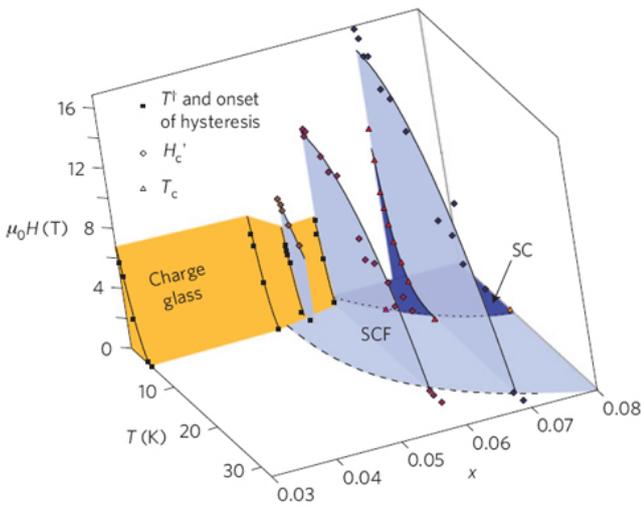
Универсальное соотношение энергии бозонной моды Ω и критической температуры T_c в различных семействах безмедных ВТСП. Закрашенные символы – результаты работы [1], пустые символы – данные нейтронной спектроскопии.

Авторы приходят к заключению, что наиболее вероятной причиной куперовского спаривания в пниктидах является обмен электронов антиферромагнитными спиновыми флуктуациями.

Л. Опенов

1. Z.Wang et al., Nature Phys. 9, 42 (2013).

Переход диэлектрик-сверхпроводник в $La_{2-x}Sr_xCuO_4$



Фазовая диаграмма $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ в координатах $T-H-x$.

Высокотемпературная сверхпроводимость купратных ВТСП возникает при добавлении носителей заряда в родительские антиферромагнитные диэлектрики. Электронная природа “промежуточного” состояния, разделяющего диэлектрическую и сверхпроводящую фазы, пока не вполне ясна. В работе [1] (США, Германия, Греция, Сингапур) для

исследования перехода диэлектрик-сверхпроводник в $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ было измерено низкотемпературное ($T > 0.3$ К) магнитосопротивление диэлектрических ($0.03 < x < 0.06$) и сверхпроводящих ($0.065 < x < 0.08$) пленок этого купрата. Анализ экспериментальных данных показал, что при $x < 0.05$ дырки в слоях CuO_2 образуют зарядовое стекло, а при $x > 0.05$ сначала появляются локализованные куперовские пары (бозе-стекло) и лишь затем происходит делокализация этих пар и формирование сверхпроводящего состояния (см. рис.). Таким образом, при низком уровне допирования зарядовая и сверхпроводящая неустойчивости конкурируют друг с другом.

Л. Опенов

1. X.Shi et al., Nature Mater. 12, 47 (2013).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Нефермижидкостная d-волновая фаза сильнокоррелированных электронов

Теория ферми-жидкости Ландау часто оказывается неприменимой к материалам с сильнокоррелированными электронами. В качестве типичных примеров здесь можно привести фазу “странного металла” в купратных ВТСП и соединения с тяжелыми фермионами вблизи квантовой критической точки. Свойства таких систем не удается объяснить в рамках привычной концепции слабо взаимодействующих квазичастиц. В работе [1] предложена теория одной из возможных нефермижидкостных фаз, которую авторы называют d-волновой металлической фазой. Для ее описания используется вариационная волновая функция, представляющая собой произведение волновых функций фермионов (спинов) и бозонов (зарядонов), образующих бозе-металл с d-волновыми парными корреляциями. Микроскопический гамильтониан представляет собой $t-J$ модель, дополненную четырехузельным обменным взаимодействием K (рис. 1).

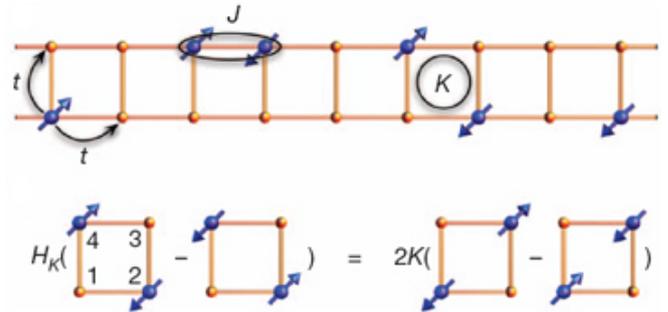


Рис. 1. Параметры $t-J-K$ модели.

Детальные расчеты показали, что основное состояние $t-J-K$ модели действительно является нефермижидкостным в широком диапазоне параметров (рис. 2). Представляют интерес дальнейшие исследования этой модели на предмет наличия в ней сверхпроводящей неустойчивости и псевдощелевых особенностей.

ПерсТ, 2013, том 20, выпуск 1/2

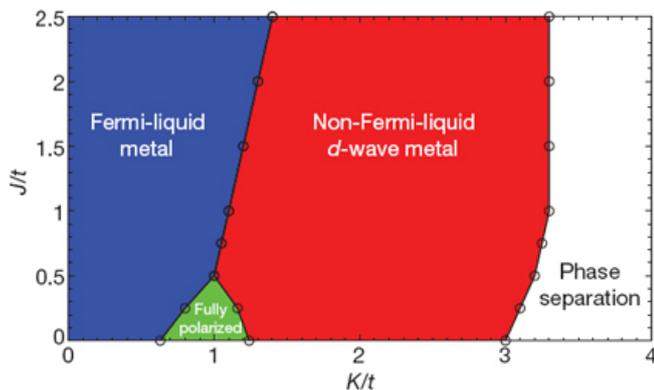


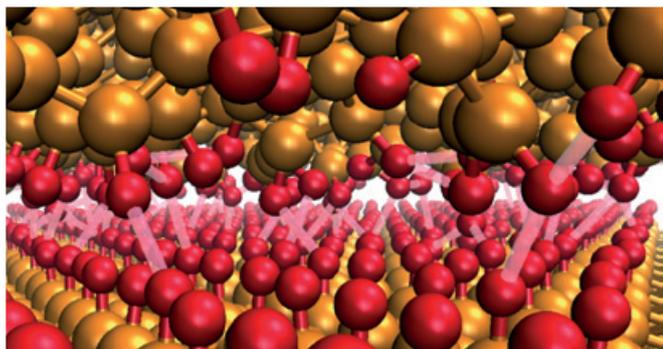
Рис. 2. Фазовая диаграмма t - J - K модели при концентрации электронов $\rho = 1/3$.

1. H.-C.Jiang et al., *Nature Nanotech.* **493**, 39 (2013).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Квантованный перенос тепла через наноконтакты

Что представляет собой граница раздела двух твердых тел, находящихся в тесном контакте друг с другом? Вопрос далеко не праздный и до конца не решенный. Ответ на него важен для понимания механизмов переноса электричества и тепла через такие границы, а также для выяснения микроскопической природы силы трения. В работе [1] швейцарские физики установили, что при сжатии наноразмерного контакта его теплопроводность увеличивается гораздо быстрее, чем предсказывает теория, основанная на предположении об атомарно гладкой форме контакта. Из этого они делают вывод, что в области контакта имеется дискретный набор контактных точек, то есть граница раздела выглядит шероховатой даже на наномасштабе (см. рис.).



Атомная структура твердотельного контакта.

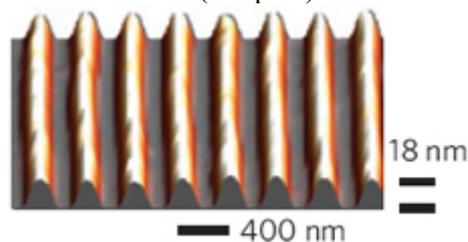
Такая атомная структура границы должна приводить к квантованию ее теплопроводности, что и наблюдалось в [1]. Развитая в [1] методика сканирующей термической микроскопии позволяет изучать динамику изменения эффективной площади контакта *in situ*. Это может пригодиться при разработке различных наномеханических устройств.

1. B.Gotsmann, M.A.Lantz, *Nature Mater.* **12**, 59 (2013).

ГРАФЕН

Графеновые наноструктуры металл-полупроводник-металл

Из теории следует, что в узких графеновых нанолентах с краями кресельного типа имеется запрещенная энергетическая зона, поэтому такие наноленты могут составить основу графеновой наноэлектроники. Однако на практике, используя современные литографические методики, не удастся изготовить длинные наноленты с достаточно ровными границами. В работе [1] (Франция, США) массив качественных нанолент получен путем эпитаксиального роста графена на подложке SiC с предварительно сформированной на ней системой параллельных канавок (см. рис.).



Графитизированные канавки в SiC

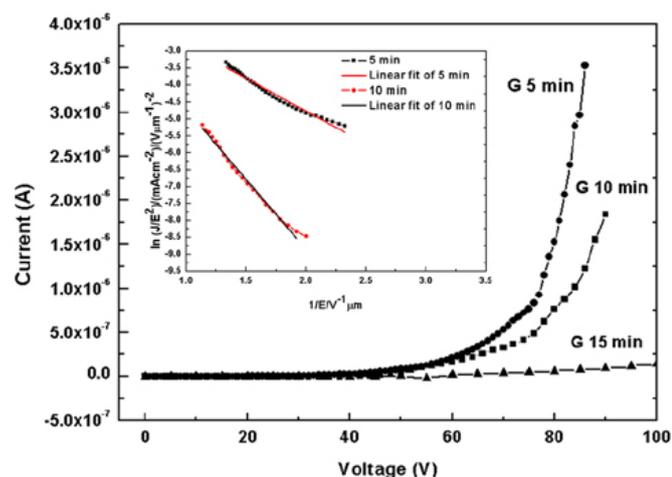
Ширина таких нанолент составляет менее 10 нм и задается с точностью до нескольких периодов решетки, а их длина достигает сотен микрон. Полупроводниковая щель в этих топографически определенных областях превышает 0.5 эВ, что достаточно для электронных устройств с комнатной рабочей температурой. По обеим сторонам от нанолент располагается металлический графен.

1. J.Hicks et al., *Nature Phys.* **9**, 49 (2013).

Холодный полевой эмиттер на основе графена

Одно из перспективных направлений использования графена связано с разработкой холодных полевых эмиттеров. Такая возможность обусловлена высокой электропроводностью и теплопроводностью графена, а также высоким аспектным отношением (отношение ширины образца к его толщине), обеспечивающим значительное усиление электрического поля в окрестности графенового края. Однако, несмотря на обещающие первые эксперименты по эмиссии образцов графена, эмиттеры на основе графена не получили столь же широкого распространения, как катоды на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Это связано с трудностями, возникающими на пути изготовления массива вертикально ориентированных лепестков графена, прикрепленных к проводящей подложке. Недавно группе исследователей из Китая и Сингапура [1] удалось заметно продвинуться на пути устранения этих трудностей благодаря использованию метода электрофоретического осаждения. Для получения графена использовали стандартный метод Хаммера, основанный на окислении графита с последующей

эксфолиацией слоев в результате ультразвуковой обработки. Восстановление оксида графена проводили в течение 30 мин в водном растворе при повышенной температуре (150°C) при воздействии СВЧ излучения мощностью 100 Вт с последующим центрифугированием (3000 об/мин.). Полученный графеновый порошок (80 мг) заливали 200 мл этанола с добавлением 10 мг $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ и образовавшуюся суспензию в течение часа обрабатывали ультразвуком. С целью проведения процедуры электрофоретического осаждения графена в эту суспензию погружали электроды, в качестве которых использовали проводящую углеродную бумагу (анод) и сильно легированную кремниевую пластину $\text{Si}(\text{n}^{++}\text{Si})$ (катод). Процедуру осаждения проводили при напряжении 20 В в течение 5, 10 или 15 мин. Размер подложек, заполненных вертикально ориентированными лепестками графена, составлял $2 \times 1 \text{ см}^2$. Наблюдения, выполненные с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения, показывают, что лепестки графена размером несколько микрон, ориентированные преимущественно перпендикулярно поверхности подложки, покрывают ее практически равномерно.



Вольт-амперные характеристики эмиттеров, полученных при 5, 10 и 15-минутном осаждении графена. На вставке эти характеристики представлены в координатах Фаулера-Нордгейма.

Эмиссионные свойства полученного катода исследовали при давлении остаточного газа 10^{-6} Торр и межэлектродном расстоянии 100 мкм. Измеренные вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов, отличающихся длительностью процедуры осаждения, представлены на рис. Измерения показывают, что плотность тока эмиссии $10 \text{ мкА}/\text{см}^2$ достигается при величинах средней по промежутку напряженности электрического поля 0.68 и 0.88 В/мкм для образцов с длительностью осаждения 5 и 10 мин, соответственно. Подобные величины пороговой напряженности поля примерно соответствуют минимальным величинам, достигнутым при использовании в качестве эмиттера углеродных нанотрубок.

Образец, полученный при осаждении в течение 15 мин, выгорал при таких значениях поля и не был пригоден для изучения эмиссии. Прямолинейная форма ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма указывает на полевой механизм эмиссии. Обработка этих зависимостей в предположении, что работа выхода графена составляет 5 эВ, позволила оценить среднюю величину коэффициента усиления эмиттеров на основе графена. Она оказалась равной 39530 и 17300 для образцов с длительностью осаждения 5 и 10 мин, соответственно. Такое различие обусловлено, очевидно, влиянием эффекта экранирования электрического поля, который проявляется тем заметнее, чем плотнее расположение индивидуальных эмиттеров на подложке. Несмотря на относительно невысокие величины полного тока эмиссии, достигнутые в данном эксперименте, перспективы использования графена в качестве холодного полевого эмиттера следует признать весьма хорошими, что связано с крайне низкой пороговой напряженностью электрического поля и чрезвычайно высоким коэффициентом усиления электрического поля, присущими таким системам.

А.Елецкий

1. A.T.T.Koh et al., Appl. Phys. Lett. 101, 183107 (2012).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Наноматериалы на защите урожая

Быстрый рост населения резко обостряет проблему дефицита продовольствия, особенно в развивающихся странах. Ученые и специалисты в области нанотехнологий надеются, что использование наноматериалов (НМ) поможет удовлетворить растущий спрос на сельскохозяйственную продукцию. В настоящее время используется почти вся пригодная для обработки земля, запас важнейших питательных веществ (фосфора, калия) тоже ограничен. Наноматериалы могут повысить эффективность удобрений (например, минимизировать потери активных компонентов вследствие вымывания, фотолиза, гидролиза, деградации из-за микроорганизмов) и средств защиты растений (следовательно, снизить концентрацию вредных веществ в почве).



В обзоре швейцарских учёных [1] рассмотрены современное состояние, перспективы и возможные проблемы применения НМ в сельском хозяйстве. Анализ научных и патентных баз данных, а также литературных источников, показал, что интерес к проблеме в последние годы резко возрос (рис. 1).

Самыми активными в плане научных публикаций являются страны с большим народонаселением и

развитым сельским хозяйством (Китай, Индия, Корея), а по числу запатентованных технологий лидируют США и Германия (рис. 2). Тем не менее, удобрений и средств защиты растений с указанием “нано” на мировом рынке практически нет.

- Google: "Nanomaterials and agriculture"
- ▽ Google: "Nanomaterials and pesticide"
- ◇ Google: "Nanomaterials and fertilizer"
- Web of Knowledge (WoK): "nano" and agricult**
- Specifically selected PPP and fertilizer related publications and patents

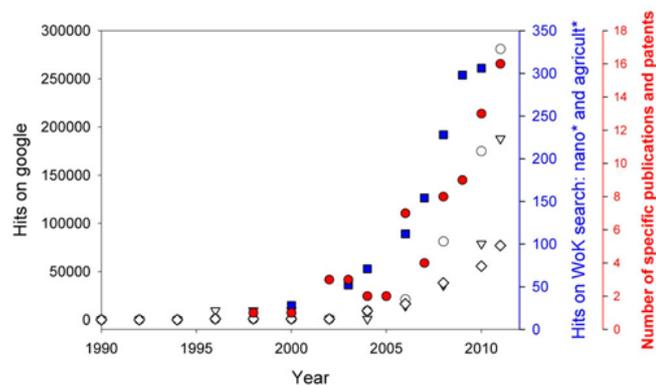


Рис. 1. НМ в с/х. Рост исследований с 1990 г.

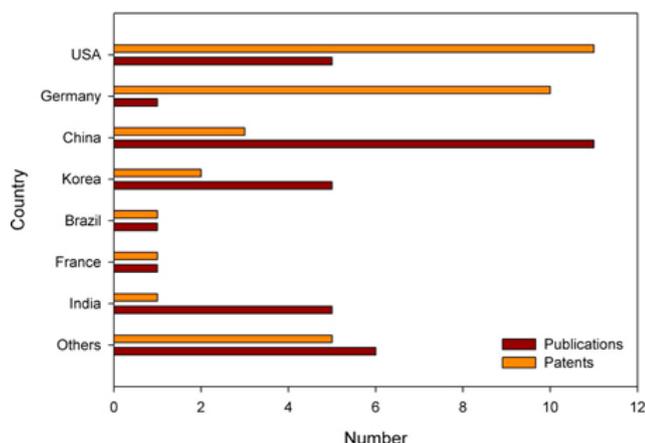


Рис. 2. НМ в сельском хозяйстве. Число патентов и публикаций.

Анализ, проведенный в [1], показал, что НМ для нужд сельского хозяйства могут быть использованы в виде твердых частиц, эмульсий, полимерных композиций и др. Примерно 40% публикаций посвящено материалам на основе углерода (углеродные нанотрубки (УНТ), органические полимеры, липосомы). Затем следуют металлы и оксиды металлов (в основном речь идет о TiO_2 и Ag), силикагели и др. Предлагаемые варианты использования наноматериалов в сельском хозяйстве представлены на рис. 3. НМ могут применяться в средствах защиты растений (PPP), в удобрениях, для защиты от УФ излучения (рис. 3А). Средства защиты – фунгициды, инсектициды, гербициды, комбинированные варианты (рис. 3В). НМ в средствах защиты могут быть как добавками, так и активными компонентами (рис. 3С). Добавки в средствах защиты планируется использовать в качестве носителей, обеспечивающих контролируемое выделение, для диспергирования, биодоставки, защиты, как фотокатализаторы (рис. 3D).

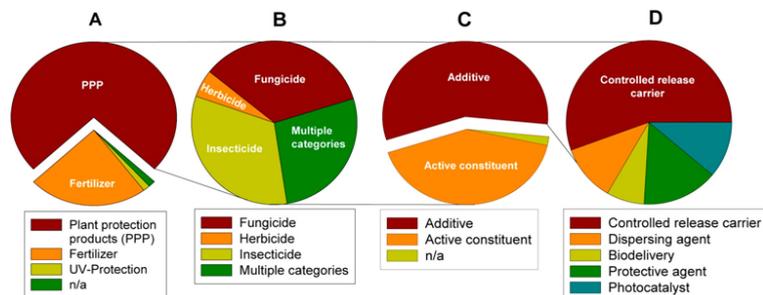


Рис. 3. Сельскохозяйственное применение наноматериалов.

Остановимся подробнее на некоторых наиболее известных наноматериалах, рассмотренных в обзоре.

TiO_2 . Как уже рассказывалось в ПерсТе, нано- TiO_2 производится в больших количествах и используется в России и многих других странах в качестве “красителя” (добавки E171) в пищевых продуктах, лекарствах и средствах гигиены; также в необрастающих и противомикробных покрытиях; в косметических средствах как поглотитель УФ [2,3]. Для сельского хозяйства наиболее важна фотокаталитическая активность этих наночастиц. В обзоре [1] рассказано о возможностях применения нано- TiO_2 для деградации пестицидов и других загрязняющих почву веществ. Ширина запрещенной зоны диоксида титана ~ 3.2 эВ, и он активен в ультрафиолетовой части спектра солнечного света, что составляет всего 5%. Это ограничивает его применение в сельском хозяйстве. Однако модифицирование с помощью добавок позволяет изменить запрещенную зону и повысить фотокаталитическую активность в видимом диапазоне. Так, например, использование нано- TiO_2 с добавками Се привело к уменьшению периода полураспада пестицидов без снижения эффективности.

Наночастицы TiO_2 могут применяться и с противоположной целью – для защиты активных компонентов от фотодegradации. В этом случае используют рутит (модификацию диоксида титана с меньшей фотокаталитической активностью) и функциональные покрытия. Такие наноматериалы можно применять и для защиты частей растений от УФ. Например, специалисты Evonik-Degussa GmbH (Германия) разработали “суперсмазку” из нано- TiO_2 , спасающую поверхность листьев от ожогов.

При этом, конечно, нельзя забывать о возможных неблагоприятных экологических последствиях использования диоксида титана и других фотоактивных наноматериалов – недавно была обнаружена фототоксичность наночастиц диоксида титана по отношению к морскому фитопланктону [3].

Ag. Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам серебро широко применяется в разных областях. Еще в древности серебряные сосуды использовали для хранения и перевозки воды, кресты и чаши – в церковных церемониях; пластины – для обработки ран. Всем известно, какую важную роль сыграло серебро в изобретении и развитии фототграфии (В 1727 г. немецкий физик И.-Г. Шульце

обнаружил чувствительность солей серебра к свету, и примерно через сто лет были получены первые закрепленные изображения). Сейчас на рынке имеется много товаров, содержащих наносеребро – косметика, текстиль, медицинские препараты, в том числе противомикробные перевязочные материалы. Однако исследований, относящихся к применению nano-Ag в сельском хозяйстве пока мало, и все они относятся к фунгицидам, средствам против вредных грибов. Например, предлагается использовать nano-Ag для борьбы с возбудителями мучнистой росы на розах и с основными патогенами, поражающими ячмень и кукурузу (*Bipolaris sorokiniana*) и рис (*Magnaporthe grisea*). Исследования показали, что эффективность новых средств выше, чем у применяемых сейчас фунгицидов, то есть количество препарата можно уменьшить. Тем не менее, по оценкам авторов концентрация nano-Ag в почве будет высокой, что может повлиять на живущие там микроорганизмы.

УНТ. В обзоре представлены только две работы, в которых обнаружено, что углеродные нанотрубки способствуют развитию растений, т.к. увеличивают поступление воды. В ПерсТ подробно рассказывалось об этих и других интересных, но иногда противоречивых результатах [4]. Например, было показано, что многостенные углеродные нанотрубки (МСНТ), проникая из питательной среды через оболочки семян томатов, положительно влияют на их прорастание и развитие рассады. Однако в других работах выяснили, что МСНТ могут адсорбироваться на поверхности корней риса и мешать поступлению питательных веществ. В результате развитие растений замедляется. Также было обнаружено, что одностенные УНТ (ОСНТ) оказывают вредное воздействие на протопласты и листья риса и арабидопсиса. Они вызывают окислительный стресс, от которого часть клеток погибает. Тем не менее, некоторые оптимисты считают, что на основе ОСНТ, проникающих даже сквозь клеточные стенки растений, можно разработать наносистемы доставки удобрений, например, азота [5]. Коэффициент его использования растениями очень мал из-за выноса легкорастворимых нитратов и солей аммония из почвы и из-за газообразных потерь, но если удобрение поместить в нанотрубки, они будут защищать его от воды, почвы, микроорганизмов, пока не доставят внутрь растения. В идеале можно будет обеспечить контроль над выделением нужного количества азота в нужном месте растения.

Заметим, что кроме нанотрубок в сельском хозяйстве могут быть использованы и другие углеродные наноматериалы. Интересные результаты представили недавно ученые из Ирана [6]. Они синтезировали наноконпозиты $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ на различных углеродных носителях, в том числе на графене. Фотокаталитическая активность оказалась гораздо выше, чем у наночастиц TiO_2 и $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$. На рис. 4 приведе-

ны данные по фотодеградационности загрязнителей почвы гербицида 2,4 D и красителя RR195. Наилучшие результаты получены при использовании наноконпозита $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ -графен, обладающего уникальными электронными свойствами и структурой.

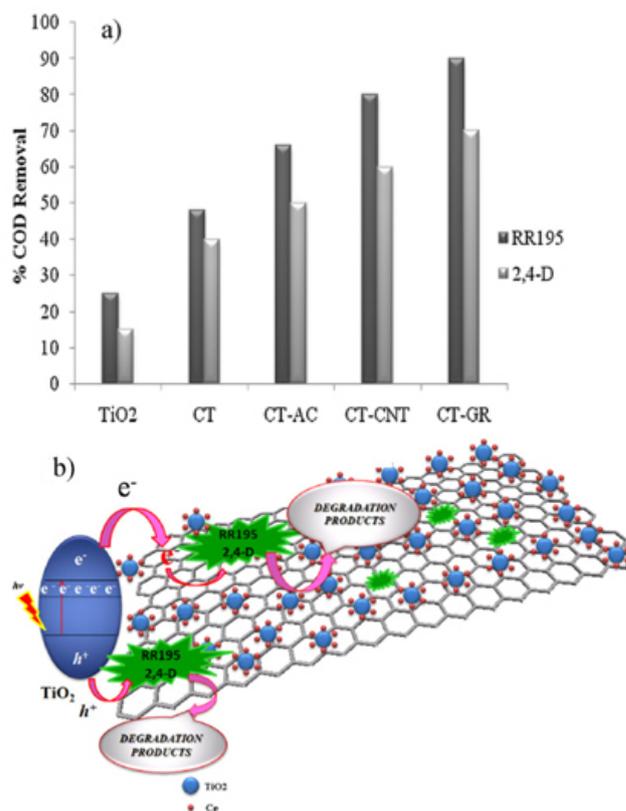


Рис. 4. а - Эффективность удаления гербицида 2,4 D и красителя RR195 с помощью наночастиц TiO_2 и $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ (CT), а также наноконпозитов CT на активированном угле (CT-AC), на УНТ (CT-CNT) и на графене (CT-GR); б – структура наноконпозита CT-GR и схема фотодеградационности загрязнителя.

Оценивая перспективы применения наноматериалов в сельском хозяйстве, авторы обзора [1] подчеркивают необходимость изучения их поведения в почве (подвижности, стабильности) и воздействия на почвенные микроорганизмы. Таких исследований пока очень мало. Не разработаны аналитические методы, пригодные для измерения концентрации НМ в воде и почве. Маловероятно, что существующие методики оценки риска применения обычных защитных средств на основе органических соединений можно будет использовать для наноматериалов. Международные принципы определения “нанориска” всё еще находятся на начальной стадии разработки.

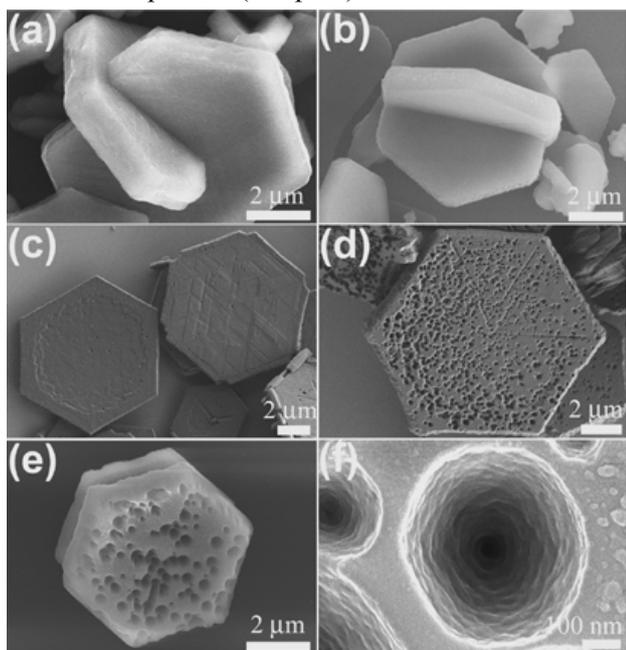
О.Алексеева

1. A.Gogos et al., *J. Agric. Food Chem.* **60**, 9781 (2012).
2. [ПерсТ 19, вып. 5, с. 5 \(2012\).](#)
3. [ПерсТ 19, вып. 7, с.5 \(2012\).](#)
4. [ПерсТ 17, вып. 23, с. 6 \(2010\).](#)
5. M.C.DeRosa et al., *Nature Nanotech.* **5**, 91 (2010).
6. S.Ghasemi et al., *J. Hazard. Mater.* **199-200**, 170 (2012).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Губка из фуллеренов

Новый класс пористых кристаллов, целиком построенных из фуллеренов C_{60} , удалось получить японским исследователям [1] при помощи технологии “снизу-вверх”. Наноматериал, содержащий макро- и мезопоры авторы синтезировали на границе раздела изопропилового спирта и насыщенного раствора фуллеренов C_{60} в смеси бензола и тетрахлорида углерода (CCl_4). При этом содержание CCl_4 в бензоле напрямую влияло на пористость изготавливаемых образцов (см. рис.).



Полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии изображения кристаллов C_{60} , синтезированных в системе изопропиловый спирт/ CCl_4 + бензол при различном соотношении CCl_4 и бензола – 30:70 (a), 50:50 (b), 70:30 (c), 80:20 (d) и 90:10 (e), соответственно. Изображение макропоры на поверхности кристалла C_{60} , показанного на вставке (e), полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения (f).

Примечательно, что при отсутствии CCl_4 авторы получали лишь нановискеры со средним диаметром 100–300 нм и длиной в несколько десятков-сотен микрон. Качественные морфологические изменения от одномерных систем (нановискеров) до двумерных гексагональных пластин наблюдались лишь при соотношении CCl_4 :бензол = 30:70. Характерный размер синтезированных кристаллов толщиной от 800 нм до 1 мкм составил около пяти микрон. Однако поры в таких структурах отсутствовали, как отсутствовали они и при соотношении CCl_4 :бензол = 50:50. Лишь дальнейшее увеличение содержания CCl_4 привело к образованию сначала двухсотнанометровых (CCl_4 :бензол = 70:30), а затем и многочисленных четырехсотнанометровых пор (CCl_4 :бензол = 90:10). Кроме того, авторы провели ряд электрохимических измерений полученных образцов и установили зависимость удельной емкости

ПерсТ, 2013, том 20, выпуск 1/2

материала от изначального содержания тетрахлорида углерода в системе. Исследователи рассчитывают, что синтезированные ими кристаллы окажутся перспективными для создания реальных работающих устройств, в том числе органических солнечных батарей, и уже сейчас в активной разработке находятся фотовольтаические устройства на основе нового класса наноструктур C_{60} с добавлением молекул порфирина и пентацена.

М.Маслов

1. L.K. Shrestha et al., *J. Am. Chem. Soc.* **135**, 586 (2013).

ФОТОНИКА

Симфония света и звука в полупроводниковом лазере

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором VCSEL (vertical cavity surface emitting lasers) представляют собой многослойные полупроводниковые структуры, совмещающие в себе оптический резонатор с активной средой и диэлектрические зеркала, окружающие резонатор (рис. 1).

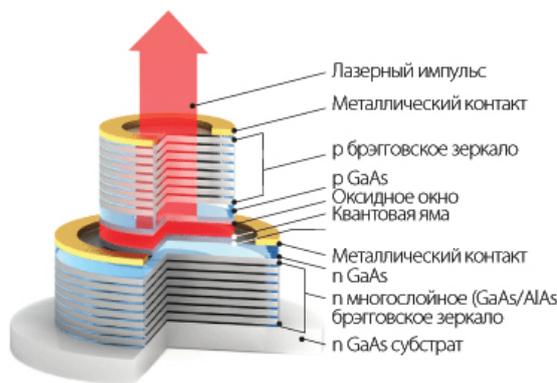


Рис. 1. VCSEL: лазер с вертикальным резонатором.

В отличие от предшественников (полупроводниковых лазеров с торцевым излучением) в VCSEL активный слой излучает не с узенькой полоски-торца, а с широкой области в направлении перпендикулярном поверхности кристалла, что позволяет резко уменьшить дифракционную расходимость излучения, а также создавать матрицы из лазерных элементов. Благодаря этим преимуществам лазеры с вертикальным резонатором широко применяются в системах высокоскоростной передачи данных. В недавней работе аргентино-французской команды ученых [1] продемонстрировано, что архитектура VCSEL оказывается идеально подходящей для создания устройств с сильным оптомеханическим взаимодействием, в том числе сазеров – акустических лазеров.

Системы, в которых сильна связь между электромагнитными колебаниями оптического диапазона и механическими колебаниями, изучаются не первый год, но большинство реализаций – тороидальные резонаторы, мембраны, кантилеверы, отличается

чрезвычайной хрупкостью, в то время как полупроводниковый лазер – классический пример устройства твердотельной электроники, устойчивого к механическим воздействиям.

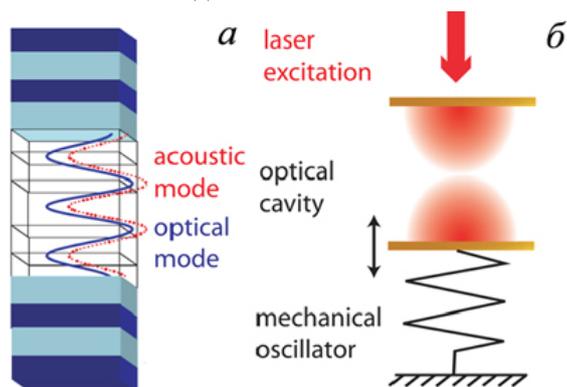


Рис. 2. Взаимодействие оптической и механической подсистем: а - оптические и акустические моды колебаний в микрорезонаторе; б - механизм взаимодействия мод [2].

Диэлектрические зеркала в VCSEL представляют собой многослойную структуру, состоящую из перемежающихся слоев полупроводниковых материалов AlGaAs и AlAs с различным показателем преломления. За счет брэгговской дифракции на таких структурах возникает запрещенная зона для света, т.е. диапазон частот, в которых свет не распространяется в материале, а практически полностью отражается. По странному совпадению соотношение скоростей света и звука в паре AlGaAs и AlAs одинаково, т.е. область между брэгговскими отражателями является одновременно резонатором для света с длиной волны 780 нм и звука с частотой 20 ГГц (рис. 2а). Более того, магия чисел на этом не заканчивается, поскольку отношение волновых импедансов для звука и света опять-таки оказывается очень близким, так что даже добротности акустического и оптического резонаторов совпадают. Это приводит к весьма сильному взаимодействию между оптической и механической подсистемами: акустические колебания приводят к изменению расстояния между зеркалами, что сказывается на оптическом поле, а то, в свою очередь, оказывает механическое давление на зеркала (рис. 2б). В результате получается система, для которой перспектива создания лазера на VCSEL выглядит вполне реалистичной: пороговая мощность генерации фононов лежит в диапазоне от микроватт до одного милливатта.

А.Пятаков

1. A.Fainstein et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 037403 (2013).
2. Y.Leger, *Physics* **6**, 6 (2013).

МАГНИТЫ

Скачки доменных стенок в кристаллическом рельефе обычных и хиральных молекулярных магнетиков

К.Новоселов и А.Гейм увлекаются не только графеном, но и элементарными процессами перемагничивания тонких пленок [1]. В этой области они обнаружили ряд фундаментальных особенностей перемагничивания тонких ферромагнитных пленок. На рис. 1а, б. представлена схема эксперимента, выполненного в [1]. С помощью холловских датчиков, нанесенных на тонкую пленку граната, они смогли обнаружить скачкообразное движение доменных стенок в периодическом кристаллическом рельефе (в рельефе Пайерлса). Сдвиг средней позиции доменной стенки Δx индуцирует изменение магнитного потока ΔF в чувствительной области, отмеченной прерывистой линией (рис. 1с). Это приводит к прямо пропорциональному изменению холловского сопротивления, которое было использовано в [1] в качестве количественной меры сдвига доменных стенок.

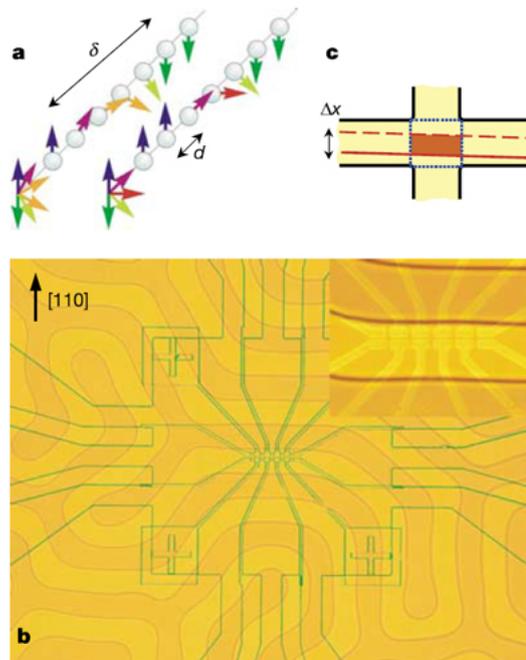


Рис. 1. Схема эксперимента. а – Основная спиновая конфигурация для узкой блоховской стенки: ее центр совпадает с одной из атомных плоскостей (слева) или лежит между плоскостями (справа); веерная диаграмма показывает ориентацию индивидуальных спинов в направлении перпендикулярном доменной стенке. б – Набор микрометровых датчиков Холла на поверхности ферромагнитного граната; рисунок в нижнем слое – фотография доменной структуры, полученная в проходящем поляризованном свете при комнатной температуре. На вставке центральная часть экспериментальной структуры. с – Сдвиг средней позиции доменной стенки Δx индуцирует изменение магнитного потока ΔF в чувствительной области, отмеченной прерывистой линией.

На рис. 2 представлен пример локальной петли гистерезиса, которая содержит резкие скачки намагниченности (измеряемой датчиками Холла и пропор-

циональной магнитному полю B). Эти скачки вызваны периодическим перескакиванием отдельных доменных стенок через кристаллический рельеф. Движение доменных стенок в этой “стиральной доске” оказывается прерывистым. До работы [1] прямые доказательства влияния рельефа Пайерлса на динамику доменных стенок отсутствовали.

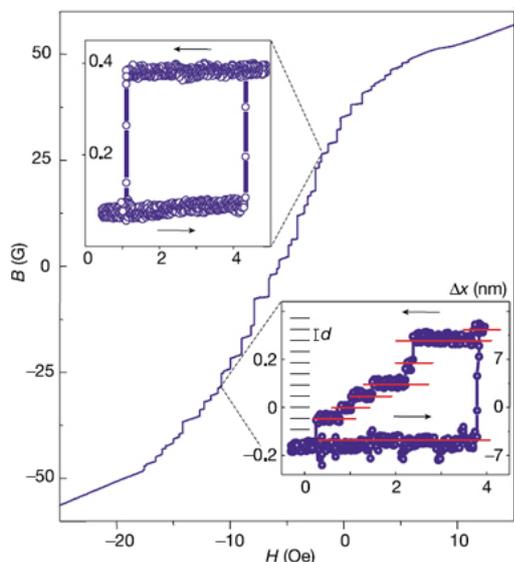


Рис. 2. Нанометровые движения доменных стенок на субмикронные расстояния. Типичный отклик в холловском эксперименте, измеренный в процессе ползучести доменных стенок от одной до другой стороны ферромагнитной пленки. На нижней вставке пример локальной гистерезисной петли (абсцисса - ΔH (Э); левая ордината - ΔB (Гс), правая ордината - смещение стенки Δx (нм)).

Авторами [2] были установлены основные режимы доменных стенок (напоминающие классическое движение дислокаций в потенциальном рельефе Пайерлса): дебаевское упругое колебание между стопорами, ползучесть, скольжение и надбарьерное движение (срыв) (рис. 3). При переходе между режимами возникает увеличение амплитуды переменного магнитного поля, инициирующее движение доменных стенок (оно играет роль механической нагрузки в дислокационных экспериментах).

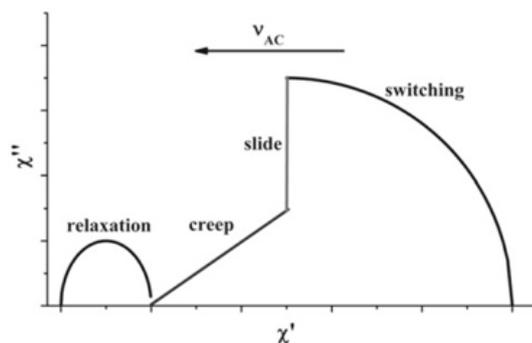


Рис. 3. Схематическая зависимость $\chi''(\chi')$ различных мод движения доменных стенок в ферромагнетике: (слева направо) дебаевская релаксация, ползучесть, скольжение, надбарьерное движение.

Поэтому эксперименты в переменном магнитном поле также способны нести информацию о вкладе Перст, 2013, том 20, выпуск 1/2

рельефа Пайерлса в движение доменных стенок (подобно тому, как в физике пластичности эксперименты в методике внутреннего трения несут информацию о движении дислокаций). Это можно сделать только в том случае, если доменная стенка является “узкой”, т.е. ее ширина меньше 5-6 параметров решетки. В противном случае, доменная стенка усредняет вклады многих плоскостей, и различить периодичность кристаллического рельефа становится невозможным (в этом случае он дает вклад типа вязкого трения). Основываясь на этом, авторы [3] проверили, как будет влиять атомная хиральность и соответствующие изменения рельефа Пайерлса на движение доменных стенок в молекулярных магнетиках. В экспериментах с переменным магнитным полем было обнаружено, что “правые” и “левые” хиральные кристаллы ведут себя одинаково и отличаются от рацемических (нехиральных) кристаллов (рис. 4). Максимум на диаграмме Коула-Коула, которая характеризует перемагничивание молекулярного магнетика в переменном магнитном поле, смещается иначе в рацемических кристаллах по сравнению с хиральными. Естественным объяснением является различие рельефов Пайерлса в хиральных и рацемических кристаллах.

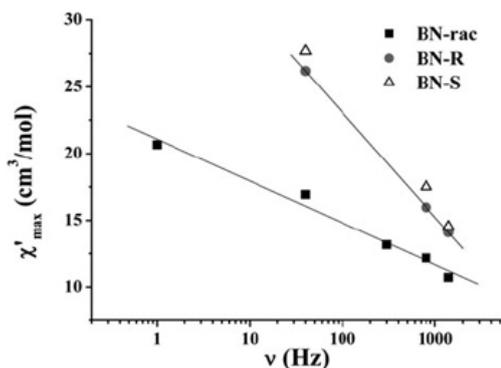


Рис. 4. Частотная зависимость положения максимума действительной части магнитной восприимчивости в переменном магнитном поле с амплитудой 4 Э в хиральных (“левых” и “правых”) и рацемических молекулярных магнетиках.

При оценке “узости” доменной стенки в [3] выяснилось, что рыхлая структура молекулярных магнетиков (большие лиганды, большой параметр решетки) способствуют тому, что именно в молекулярных магнетиках (а не в неорганических магнетиках) доменные стенки почти всегда “узкие”. Поэтому молекулярные магнетики представляют собой класс веществ, наиболее подходящих для изучения вклада рельефа Пайерлса в перемагничивание и в движение доменных стенок. Заметим, что эта ситуация также напоминает физику пластичности, поскольку, например, в ионных кристаллах вклад рельефа Пайерлса в движение дислокаций практически отсутствует, а в кристаллах кремния и германия является доминирующим.

О.Коплак

1. K.S.Novoselov et al., Nature 426, 813(2003).

2. N.J.Zhou et al., *Europhys. Lett.* **92**, 36001 (2010); <http://arxiv.org/abs/1202.1343>
3. F.Mushenok et al., *Eur. Phys. J. B* **84**, 219 (2011).

КОНФЕРЕНЦИИ

21st International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, 24-28 June 2013, St. Petersburg, Russia

Topics:

Technology of Nanostructures: Growth, Self-Organization and Nanopatterning
Atomic-Scale Characterization of Nanostructures
Electric, Magnetic and Optical Properties of Nanostructures (including Spin-Related Phenomena, Many Particle Effects, Infrared and THz Phenomena)
Nanostructure Device Applications in Electronics, Spintronics and Computing Nanophotonics, Microcavity and Photonic Crystals: Properties, Characterization and Applications Emerging Materials in Nanostructures (including Semiconductors, Oxides, Metals, Ferromagnetics, Carbon-based, Polymer and Biomaterials)
Nanostructures and Life Sciences Metamaterials

Abstract submission deadline - **15 February 2013**.

Website: <http://www.ioffe.ru/NANO2013/>

13th International Workshop “Cryogenic Nanodevices”, 20-27 March 2013, Bjorkliden, Kiruna, Sweden

Topics:

1. Ultrasensitive detectors for IR and submillimeter waves
2. Thermo-electric effects in superconductors and thermo-electric bolometers
3. Electron cooling by SIN tunnel junctions; cryogenics
4. Readout systems; Andreev interferometer as a readout; multiplexing;
5. Quasioptics and HF coupling with bolometers; HF filtering; coupling with bolometers
6. Distributed focal plane arrays of bolometers
7. Radioastronomy in mm/submm/IR regions

8. Novel electronics based on graphene,
9. Applications to quantum computing
10. T-rays and THz imaging;

E-mail: konferens@bjorkliden

Website: <http://www.chalmers.se/mc2/bjorkliden13-en>

International Symposium Spin Waves 2013, 9-15 June 2013, St. Petersburg, Russia

Topics:

1. Ultrafast magnetization dynamics.
2. Excitations in quantum and frustrated magnets.
3. Spin waves on surfaces and in multilayers.
4. Spintronics and magnetism at nanoscale.
5. Magnonics, magneto-photonics.
6. Nonlinear spin-wave phenomena and relaxation processes.
7. Novel probes of magnetism: THz, X-ray, neutron, etc.
8. Spin-torque effects: oscillators, switching, DW motion.
9. Advances in spin-based devices and technology.

E-mail: optics-lab@mail.ioffe.ru

Website: <http://www.ioffe.ru/optics/SW2013>

2nd International Conference on Materials Science & Technology (ICMST 2013), 11-12 April 2013, Hong Kong

E-mail: icmst2013@163.com

Website: <http://www.icmst-conf.org>

6th Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS2013), 11-14 June 2013, Istanbul, Turkey

Website: <http://www.cmsim.org>

12th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics (12NCTAM), 22-25 September 2013, St. Constantine and Helena near Varna, Bulgaria

Website: <http://nctam.imbm.bas.bg>

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, О.Коплак,
М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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