

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Двумерный бозе-металл?

Согласно теории, в двумерных системах сколь угодно слабый атомный беспорядок приводит к андерсоновской локализации электронов, и поэтому основное (при $T = 0$) состояние является не металлическим, как в трехмерии, а диэлектрическим. Между тем некоторые эксперименты указывают на то, что 2D металлы вроде бы все-таки существуют. В работе [1] к этой проблеме подошли с несколько иной стороны: авторы исследовали резистивные переходы массивов сверхпроводящих островков Nb на слое нормального металла Au (рис. 1), варьируя при этом расстояние l между островками.

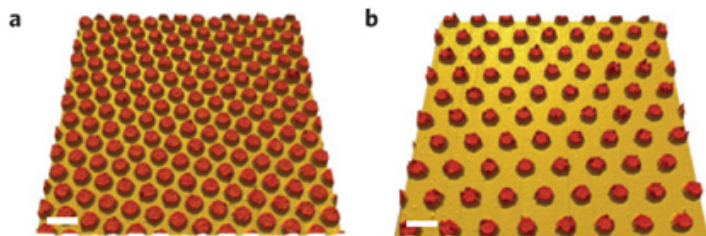


Рис. 1. Массивы островков Nb на поверхности Au (данные сканирующей электронной микроскопии). Расстояние между краями соседних островков $l = 140$ нм (a) и 340 нм (b). Длина масштабной линейки 500 нм.

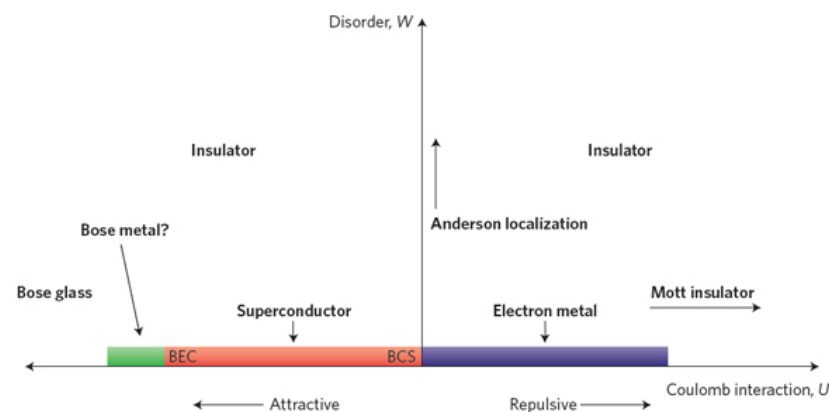


Рис. 2. Фазовая диаграмма двумерного металла в координатах кулоновское взаимодействие U – беспорядок W .

В отличие от многочисленных предыдущих работ на эту тему, размеры островков (~ 100 нм) не сильно превышали длину сверхпроводящей когерентности в Nb (~ 30 нм). При фиксированной величине l понижение температуры приводило сначала к падению R на $\approx 20\%$ при $T = T_1 < 9$ К (из-за перехода каждого островка по отдельности в сверхпроводящее состояние), а затем – к обращению R в нуль при $T = T_2$ (вследствие установления фазовой когерентности между куперовскими парами разных островков). Но при чем здесь 2D металлы? Авторы [1] полагают, что в диапазоне $T_2 < T < T_1$ реализуется необычное металлическое состояние с “региональными” фазовыми корреляциями на масштабе больше размера островков, но не захватывающими весь массив. Куперовские пары в этом со-

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

2 Трое в квантовых точках

Операция Тоффли в сверхпроводниковой цепи

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАОЭЛЕКТРОНИКА

3 Закон Ома в наномире

Транзисторы из нанопроводов: от 2D к 3D

СНОВА К ОСНОВАМ

4 Демона Максвелла отправляют на пенсию?

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Суровая правда жизни о переходе Вервея в магнетите богаче упрощенных моделей теоретиков

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

6 Как вытянуть нанотрубку?

Искусственные мышцы на основе углеродных нанотрубок

НАНОМАТЕРИАЛЫ

7 Взаимодействие наноматериалов с иммунной системой

КОНФЕРЕНЦИИ

9

стоянии уже подвижны, но еще не сконденсированы, формируя что-то типа “бозе-металла” (рис. 2). Интересно, что экстраполяция как T_1 , так и T_2 к большому l дает 0 К. Это указывает на наличие в исследуемой системе двух квантовых фазовых переходов (КФП), одним из которых является давно предсказанный, но пока не наблюдавшийся КФП сверхпроводник – нормальный металл.

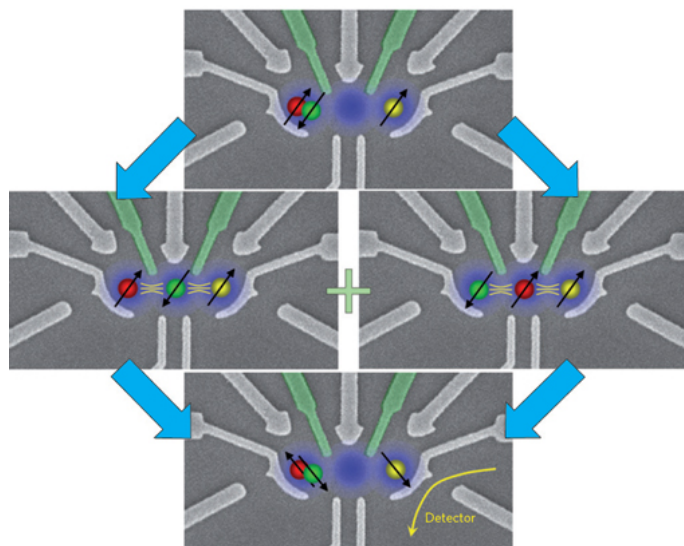
Л.Опенев

1. S.Eley et al., *Nature Phys.* **8**, 59 (2012).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Трое в квантовых точках

Спиновые состояния электронов в квантовых точках гораздо менее чувствительны к декогерентизирующему воздействию внешнего окружения, чем зарядовые состояния. Поэтому электронные спины в квантовых точках считаются перспективными кандидатами в кубиты для масштабируемых твердотельных систем обработки квантовой информации [1]. К настоящему времени продемонстрировано когерентное управление спином одного электрона в изолированной квантовой точке (“вверх” и “вниз”) и двух электронов в паре туннельно-связанных квантовых точек (синглет и триплет). В работе [2] канадские физики успешно осуществили операции с трехспиновыми состояниями, используя цепочку из трех квантовых точек в гетероструктуре GaAs/AlGaAs. Подавая импульсы напряжения на центральную квантовую точку, они понижали или повышали энергию электронного уровня в этой точке, инициируя, таким образом, переходы электрона между точками (см. рис.).



Когерентный контроль трех спинов в квантовых точках.

В результате им удалось создать запутанные трехспиновые состояния. Используя такие состояния, можно осуществлять любые универсальные квантовые операции. Кроме того, трехкубитные состояния играют важную роль в алгоритмах коррекции квантовых ошибок. Интересно, что время декоге-

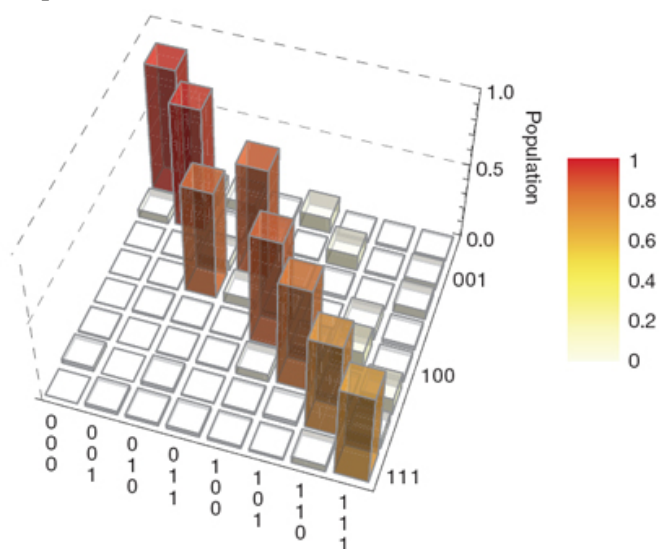
рентизации трехспиновых состояний оказалось таким же, как у двухспиновых (~ 10 нс). Отсюда авторы [2] делают вывод, что и в том, и в другом случае сбой когерентности происходит преимущественно из-за локальных флуктуаций магнитного поля ядерных спинов, то есть при увеличении числа спиновых кубитов новых механизмов декогерентизации не возникает. А значит, увеличивая количество квантовых точек со спиновыми кубитами, можно создавать достаточно сложные архитектуры для многокубитных квантовых вычислений.

Л.Опенев

1. D.Loss, D.P.DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
2. L.Gaudreau et al., *Nature Phys.* **8**, 54 (2012).

Операция Тоффоли в сверхпроводниковой цепи

Операция Тоффоли (Toffoli gate) – это трехкубитная условная операция, в результате которой состояние одного кубита инвертируется в зависимости от состояния двух других (управляющих) кубитов. Совместно с преобразованием Адамара она формирует универсальный набор операций для квантовых вычислений. Ранее операция Тоффоли была экспериментально реализована в линейных оптических системах, на ионах в ловушке и на ядерных спинах.



Экспериментально определенная в [1] таблица истинности трехкубитной операции Тоффоли

В работе [1] (Швейцария, США, Канада) для осуществления этой операции впервые использованы сверхпроводниковые кубиты, связанные с СВЧ-резонатором. По данным томографии результирующих квантовых состояний, точность операции составила 76% (рис. 1). Авторы [1] отмечают возможность использования операции Тоффоли для коррекции квантовых ошибок.

1. A.Fedorov et al., *Nature* **481**, 170 (2012).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Закон Ома в наномире

Продолжающаяся миниатюризация активных элементов компьютеров и прочих электронных устройств влечет за собой соответствующее уменьшение поперечного сечения и длины L проводов, соединяющих эти элементы между собой. Если размеры провода из легированного полупроводника (например, Si:P) не намного превышают эффективный борковский радиус (2.5 нм для донорных примесей фосфора в кремнии), то сопротивление R_w такого провода может оказаться очень чувствительно к конкретному расположению в нем атомов легирующей примеси. В частности, не очевидно, что величина R_w будет линейна по L вплоть до $L \sim 10$ нм. Более того, не ясно, будет ли на таком масштабе выполняться закон Ома. В работе [1] (Австралия, США) провода Si:P “толщиной” в один атом, шириной $w = (1.5 \div 11)$ нм и длиной $L = (20 \div 106)$ нм изготовлены путем легирования фосфором полосок соответствующих размеров на поверхности Si (100) (см. рис. 1).

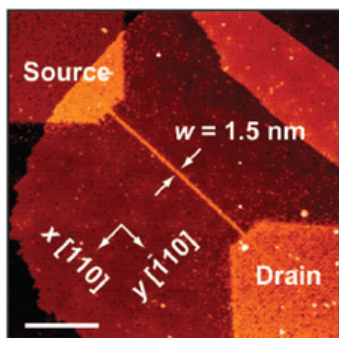


Рис. 1. СТМ-изображение провода Si:P. Длина масштабной линейки 50 нм.

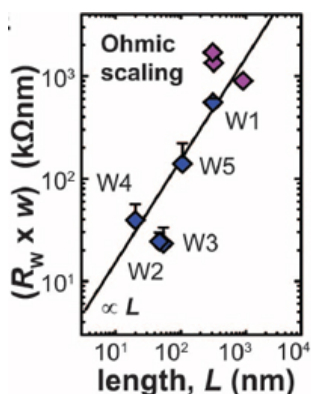


Рис. 2. Зависимость произведения сопротивления R_w и ширины w провода от его длины L . Ширина проводов W1, W2, W3, W4 и W5 равна 11.0, 4.6, 2.3, 2.3 и 1.5 нм, а длина – 312, 47, 54, 20 и 106 нм, соответственно. Представлены также данные других авторов для проводов длиной 1000 нм и более.

При этом среднее расстояние между атомами фосфора не превышало 1 нм. ВАХ при $T = 4.2$ К имели омический вид, причем по своей токнесущей спо-

собности эти провода почти не уступали медным (плотность тока достигала $5 \cdot 10^5$ А/см² при $U = 0.5$ мВ). При увеличении L произведение $R_w \cdot w$ возрастает линейно по L (рис. 2), то есть удельное сопротивление проводов не зависит от геометрических характеристик (длины и ширины). Высокое качество и масштабируемость таких проводов делает их реальными кандидатами для использования как в классических, так и в квантовых приборах (подводящие провода, межсоединения, локальные электроды и пр.).

Л. Опенов

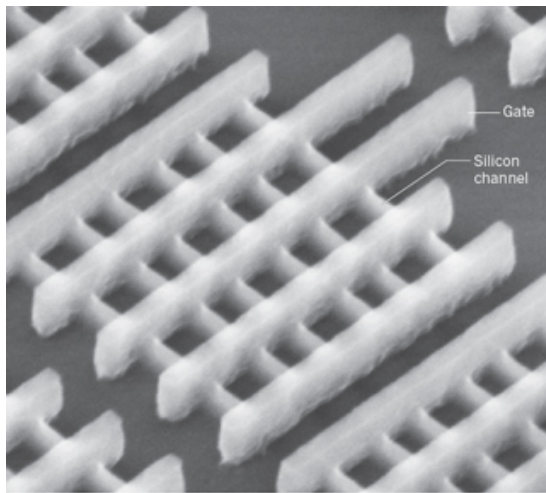
I. B. Weber et al., *Science* 335, 64 (2012).

Транзисторы из нанопроводов: от 2D к 3D

Для практического использования нанопроводов в электронике и компьютерной технике требуется разработать технологии изготовления на их основе транзисторов – основных элементов всех электронных устройств, в которых ток между двумя электродами (источником и стоком) контролируется напряжением на третьем (управляющем) электроде. Обычно ток протекает по узкой двумерной области, называемой каналом. Характеристики транзисторов из нанопроводов можно существенно улучшить, если перейти к трехмерным конфигурациям, когда канал “обернут” управляющим электродом (wrap-gate transistors). Впервые подобная конструкция была предложена в 1999 г. и названа fin-FET.

Новый шаг в этом направлении сделан в работе [1]. Ее авторы предложили простой способ изготовления “свободных” (не касающихся подложки) проводов InAs, из которых на следующем этапе можно сконструировать как источник со стоком, так и “обернутый электрод”. При этом не надо забывать о еще одной проблеме нанопроводной электроники – проблемы интеграции миллиардов нанопроводов и транзисторов в единое устройство. Между тем компания Intel объявила о подготовке к производству микропроцессоров нового типа, в которых управляющие электроды хоть и не оборачивают нанопровода (кремниевые каналы) полностью, но контактируют не с одной, а с тремя их сторонами: слева, справа и сверху (см. рис.), то есть опять же имеет место переход от 2D к 3D (см. ПерсТ, [5]).

Из числа других перспективных разработок можно отметить технологию интеграции на одном чипе транзисторов из нанолент InAs и обычных кремниевых транзисторов [2]. Интерес представляют также транзисторы из нанолент GaN [3], в каналах которых плотность заряда повышена на 50%. А в нанопроводах SiGe с германиевой “оберткой” обнаружен рост подвижности дырок на 40% [4]. Практическую пользу от всех этих фундаментальных исследований мы ощутим в самое ближайшее время по увеличению производительности процессоров, повышению качества мобильных телефонов и пр.



Проводимость нанопроводов (кремниевых каналов) на подложке контролируется перпендикулярным им электродом длиной 22 нм, который контактирует с тремя сторонами каждого нанопровода.

По материалам заметки Y.Palacios,
"Nanowire electronics comes of age",
Nature **481**, 152 (2012)

1. S.Dhara et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 173101 (2011).
2. H.Ko et al., *Nature* **468**, 286 (2010).
3. M.Azize, T.Palacios, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 042103 (2011).
4. P.Hashemi et al., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 063109 (2010).
5. *ПерсТ* **18**, вып. 18, с. 4 (2011).

СНОВА К ОСНОВАМ

Демона Максвелла отправляют на пенсию?

Хорошо известен мысленный эксперимент, предложенный Джеймсом Клерком Максвеллом, призванный поставить под сомнение второе начало термодинамики. Для сортировки молекул по скоростям или по размерам требовалось гипотетическое разумное существо микроскопических размеров. Однако согласно результатам численного моделирования [1] с работой сортировщика справляется намного более примитивное устройство: канал с гофрированными стенками (рис. 1) и приложенным вдоль его оси электрическим полем.

Асимметричная форма стенок делает более вероятным отскок молекулы вправо, нежели влево, так что хаотическое движение в такой ограниченной области частично становится направленным. Если частицы электрически заряжены, то приложив переменное поле, можно наблюдать выпрямляющий эффект. В процессе теплового движения все молекулы сталкиваются со стенками, но для крупных частиц такие события происходят чаще (рис. 1а).

В результате, распределение по скоростям молекул, находящихся в таком канале, отличается от нормального: вероятность обнаружить движущуюся слева направо крупную молекулу больше, чем мелкую.

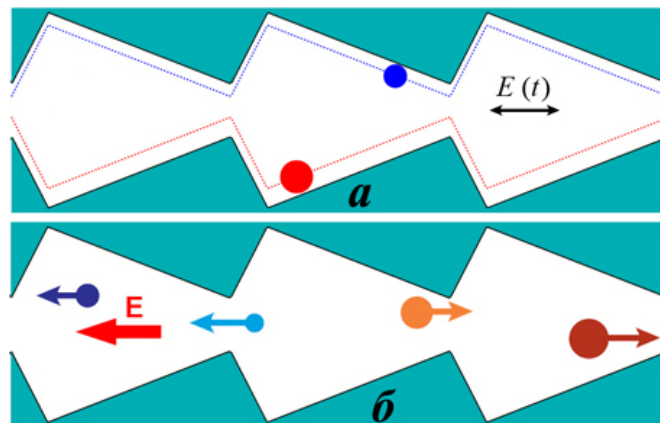


Рис. 1. Микросепаратор молекул по размерам: а) эффективный профиль канала для крупных молекул уже, чем для мелких; б) в постоянном электрическом поле возникает направленное движение крупных и маленьких молекул в противоположные стороны.

Уже один этот факт позволил бы рассортировать молекулы по размерам (подобно тому, как это делается при электрофорезе), но авторы [1] идут еще дальше: они создают условия, при которых большие и маленькие молекулы движутся в разные стороны. Для этого нужно приложить электрическое поле, которое заставляло бы все частицы, находящиеся в свободном пространстве, двигаться влево. Однако для частиц в канале ситуация иная. Реже сталкивающиеся со стенками маленькие частицы, как и положено, движутся под действием электрического поля влево, а вот крупные, для которых выпрямляющий эффект сильнее, движутся вправо.

Таким образом, задача сортировки молекул, имеющая далеко не только академический интерес (она возникает, например, в биохимических исследованиях и при анализе ДНК), заметно упрощается. Данный метод, позволяющий получать чистоту 99.99%, может составить серьезную альтернативу традиционным методам сепарации: центрифугированию и электрофорезу. А демон Максвелла, изрядно послуживший науке, наверное, уже подумывает о законном отдыхе... Впрочем, он пытался рассортировать молекулы по скоростям, а это без дополнительных усилий вряд ли получится.

А.Пятаков

1. D. Reguera et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 020604 (2012).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Суровая правда жизни о переходе Вервея в магнетите богаче упрощенных моделей теоретиков

Переход металл-диэлектрик в магнетите Fe_3O_4 привлекает внимание физиков уже более 70 лет. Еще в 1939 г. Вервей предположил, что ниже точки перехода $T_v = 125\text{K}$ происходит зарядовое упорядочение ионов Fe^{+2} и Fe^{+3} в В-узлах решетки шпинели. Высокоспиновое состояние $d^5 \text{Fe}^{+3}$ иона характеризуется однократным заполнением каждой из 5 элек-

тронных подболочек, в то время как в состоянии $d^6 \text{Fe}^{+2}$ иона один дополнительный электрон со спином вниз заполняет t_{2g} оболочку. В результате зарядовое упорядочение приводит к орбитальному упорядочению и искажению кристаллической решетки (эффект Яна-Теллера). Прямая структурная информация о свойствах диэлектрического состояния до сих пор была практически недоступна из-за дублирования кристаллов. Благодаря развитию синхротронных методов дифракции при высокой энергии гамма квантов (70 кэВ) группе британских и французских исследователей удалось получить прецизионные структурные данные с маленького кристаллита размером ~ 40 мкм [1]. В таком малом кристаллите около 90 процентов наблюдаемых дифракционных данных обусловлено вкладом одного домена. В результате тщательного анализа структурных данных сделан вывод, что переход характеризуется замораживанием 168 фононных мод (рис. 1). Важно, что сверхструктура не описывается небольшим числом замороженных фононов, все попытки описать моноклинную фазу с числом замороженных фононов менее 100 оказались безуспешными. Видна также дисперсия смещений, наименьший вклад от смещений в центре зоны Бриллюэна.

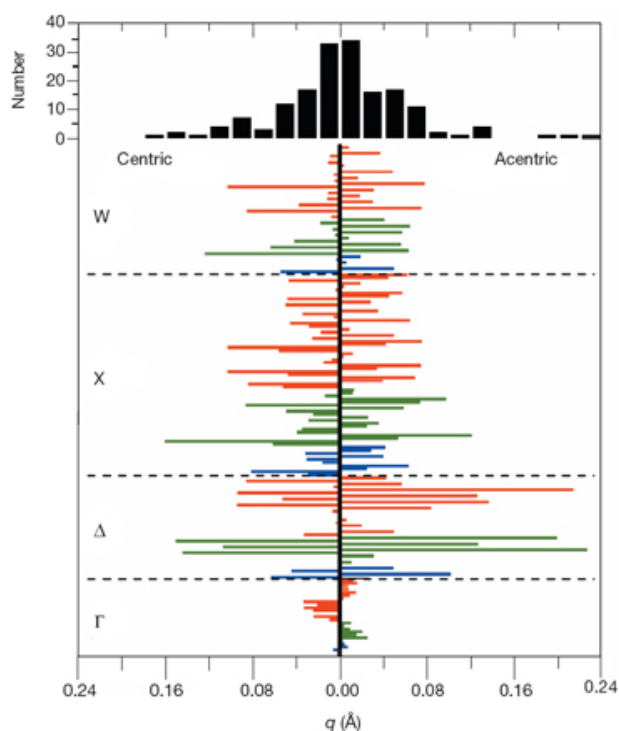


Рис. 1. Амплитуды 168 атомных смещений в низкотемпературной моноклинной сверхрешетке магнетита. Центральная панель: симметричные и асимметричные смещения q атомов А, В и О шпинели AB_2O_4 показаны синим, зеленым и красным цветом. Смещения характеризуются волновыми векторами $\Gamma(0,0,0)$, $\Delta(0,1/2,0)$, $X(0,1,0)$ и $W(1/2, 1,0)$ зоны Бриллюэна кубической структуры. Верхняя панель: распределение амплитуд смещений.

Согласно Вервею, в шпинели AB_2O_4 ионы Fe^{+3} заполняют тетраэдрические А-позиции, в то время как 16 неэквивалентных октаэдрических В-позиций

занимаются Fe^{+3} и Fe^{+2} ионами в пропорции 1:1. Каждый FeO_6 октаэдр в В позиции имеет нерегулярные искажения, анализ которых позволил определить амплитуды радиальных (дыхательных) локальных мод (Q_{rad}) и тетрагональных ян-теллеровских локальных мод (Q_{JT}). Полученное бимодальное распределение ян-теллеровских мод подтверждает, что в первом приближении модель Вервея о зарядовом упорядочении верна. Однако широкое распределение Q_{rad} и оценка ионных зарядов из правила сумм показывают более сложную картину распределения зарядов, нежели простое чередование Fe^{+3} и Fe^{+2} ионов. Цепочки чередующихся коротких и длинных В-В связей (димеров) были предсказаны в ряде моделей теоретически, но эти предсказания не подтверждаются данными [1].

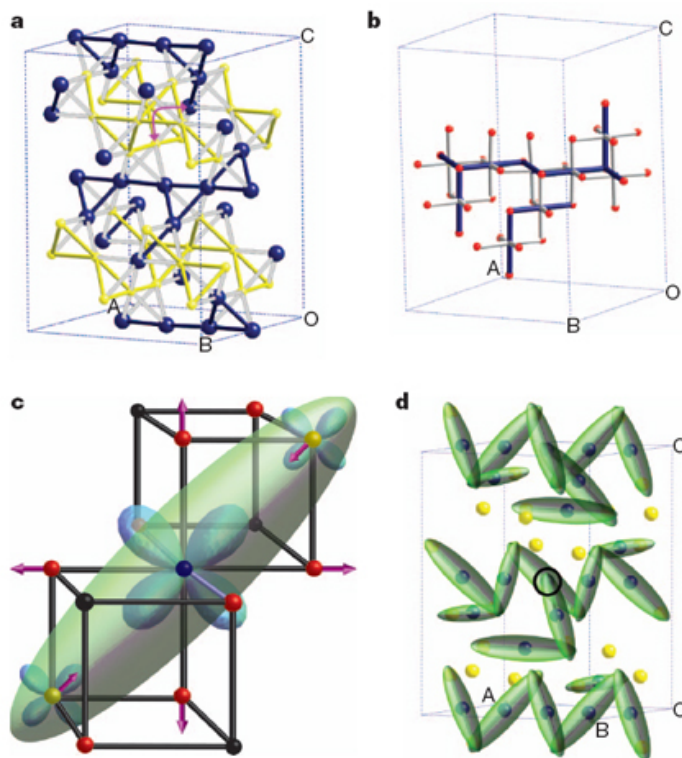


Рис. 2. Зарядовое, орбитальное и тримерное упорядочение в низкотемпературной структуре магнетита.

а - Распределение Fe^{+2} (синие шарики) и Fe^{+3} (желтые шарики) в модели Вервея.

б - Искажения кристаллической решетки, соответствующие орбитальному упорядочению в цепочке Fe^{+2} с длинными (серыми) и короткими (синими) связями с ближайшим кислородом (красные шарики).

с - Связь распределения электронной плотности для t_{2g} -электрона со спином вниз и локальных смещений соседних ионов (пурпурные стрелки) в тримере.

д - Упорядочение тримеров в моноклинной структуре.

Оказалось, что шестой d-электрон со спином вниз не локализован на одном ионе Fe^{+2} , а частично переходит от своего Fe^{+2} донора на два ближайших Fe^{+3} иона, играющих роль акцепторов (рис. 2). В результате такой частичной электронной делокализации и сопровождающихся смещений катионов и соседних анионов (рис. 2с) формируется анизотропный полярон малого радиуса, названный авто-

рами [1] тримероном. Авторы [1] также утверждают, что тримероны могут играть важную роль и выше точки перехода как квазичастицы, которые вносят вклад в формирование энтропии перехода.

С.Овчинников

I. M.S. Senn et al., Nature 481, 173 (2012).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Как вытянуть нанотрубку?

Одним из возможных способов получения идеальной углеродной нанотрубки заданного диаметра и хиральности, по мнению авторов работы [1], вполне может стать серия химических реакций, представляющих последовательное контролируемое удлинение молекул полициклических ароматических углеводородов (полиаренов) полусферической формы. Методика, предсказываемая исследователями, заключается в следующем: на начальном этапе необходимо выбрать прекурсор – углеводородный шаблон, похожий на половинку фуллерена, а затем посредством доступного инструментария органического синтеза последовательно добавлять по открытому краю углеродные атомы, таким образом, чтобы они образовывали шестичленные кольца, как показано на рис. 1.

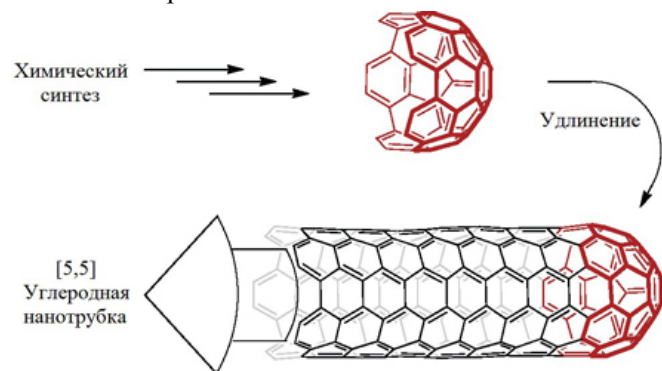


Рис. 1. Иллюстрация одного из возможных способов получения идеальной углеродной нанотрубки заданного диаметра и хиральности

В результате получается одностенная нанотрубка заданного диаметра с расположением углеродных шестиугольников на поверхности в полном соответствии с выбранным шаблоном. Однако основным барьером на пути к непосредственной реализации этой идеи являлось отсутствие до настоящего времени способов синтеза самих углеводородных шаблонов. В работе [1] авторам удалось получить полусферический полиарен $C_{50}H_{10}$ (рис. 2), вполне подходящий для изготовления (5,5) углеродных нанотрубок.

Исследователи разработали простую трехэтапную методику синтеза полиарена, взяв в качестве исходного вещества коранулен $C_{20}H_{10}$, который, кстати, используется для получения одного из изомеров самого маленького фуллерена C_{20} – “чаши” [2]. Используемые методы контроля, а именно, ЯМР и УФ спектроскопия, масс-спектрометрия, рентгено-

структурный анализ подтвердили успех поставленного эксперимента.

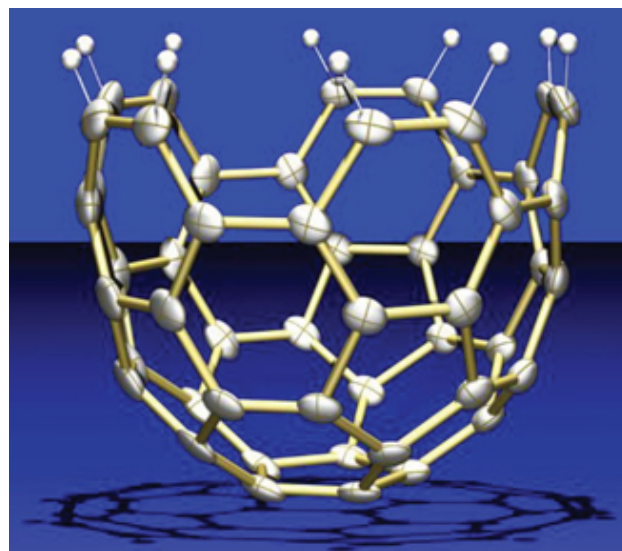


Рис. 2. Молекулярная структура полусферического полиарена $C_{50}H_{10}$

Следующей крупной задачей является разработка эффективной методики удлинения полученных образцов-шаблонов. Будем надеяться, вслед за авторами, что в недалеком будущем станет возможным “вытянуть” нанотрубку любого диаметра и хиральности, просто подобрав нужные полиарены или изготовив их, например, методами молекулярной хирургии из высших фуллеренов.

М.Маслов

1. L.T. Scott et al., *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 107 (2012).
2. H. Prinzbach et al., *Nature* **407**, 60 (2000).

Искусственные мышцы на основе углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются потенциально хорошим материалом для изготовления искусственной мышцы, в которой под действием электрического сигнала возникают механические напряжения. Действие такого устройства основано на использовании двойного электрохимического слоя, который служит для передачи заряда от источника питания к жгуту из УНТ. Исследования, выполненные в последние годы, показали, что в результате электрохимического инициирования пленка УНТ удлиняется примерно на 0.2%, а удлинение искусственной мышцы на основе УНТ при электрохимическом иницировании достигает 220%. Однако несмотря на демонстрацию подобных достижений, до сих пор искусственные мышцы на основе УНТ не получили широкого практического распространения, что связано с неспособностью прежних систем к обратимому торсионному вращению. Существенный прогресс в этом отношении был достигнут недавно в работе [1], выполненной большой группой исследователей из Австралии, Канады, США и Южной Кореи. В основу искусственной мышцы, разработанной этой группой, положена

Перст, 2012, том 19, выпуск 1/2

проводящая нить (пряжа) из многослойных УНТ, которая была получена несколько лет назад в Univ. of Texas at Dallas (США) [2]. Для получения пряжи использовали нанотрубки длиной 400 мкм и диаметром около 12 нм, свернутые в толстые жгуты, которые, в свою очередь, были свиты в нить. Для исследования возможности обратимого вращения элемента мышцы нить погружали в электролит, в качестве которого использовали 0.2 М раствор гексафторфосфата тетрабутиламмония в ацетонитриле и с помощью электродов подвергали действию напряжения. К наконечнику нити прикрепляли тонкую металлическую пластинку, наличие которой позволяло наблюдать визуально повороты жгута под действием приложенного потенциала. На рис. 1 показаны некоторые конфигурации, использованные в данном эксперименте.

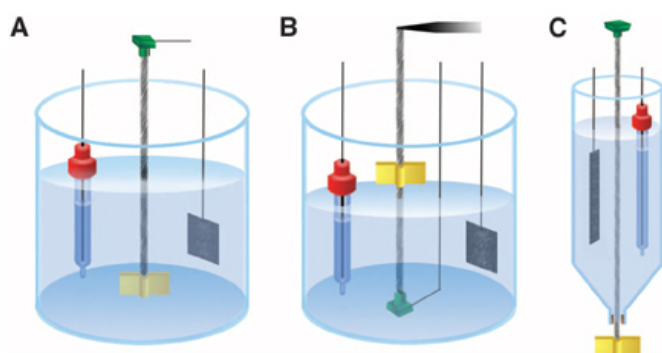


Рис. 1. Различные конфигурации измерения торсионного поворота нити УНТ под действием приложенного потенциала. Слева направо: опорный электрод Ag/Ag^+ , УНТ нить, платиновый противозлектрод. А - один из концов нити закреплен, металлическая пластина закреплена на конце нити и погружена в электролит. В - оба конца нити закреплены, что позволяет измерять одновременно поворот и растяжение нити; металлическая пластина закреплена над поверхностью электролита. С - один конец нити закреплен; пластина вращается в воздухе.

При подаче импульсного напряжения амплитудой от 0 до 5 В наблюдалось обратимое торсионное вращение нити с частотой 0.1 Гц на угол от 0 до 15000° . Такой поворот соответствует примерно $250^\circ/\text{мм}$ длины, что в 1000 раз превышает соответствующую величину, характеризующую такие материалы, как пьезокерамика, проводящие полимеры и др. Направление вращения соответствует раскручиванию нити, которая при изготовлении была сильно закручена. Учитывая, что исходный угол закручивания нити составляет около 20000 оборотов/метр, а длина погруженной части нити составляет 6 см, максимальный угол торсионного вращения нити достигает лишь 3.4% от полного исходного угла закручивания. Максимальная скорость вращения нити наблюдалась в течение 4 с и составила 590 оборотов/мин. Оценки, выполненные с учетом массы металлической пластины, показывают, что удельный момент вращения, развиваемый нитью под действием электрического потенциала, достигает $1.85 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$.

Эта величина сопоставима с параметрами обычных электромоторов ($2.5 - 6 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$), хотя существенно уступает моменту, развиваемому бактериями ($\sim 200 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$). Удельная мощность, развиваемая искусственной мышцей на основе УНТ, достигает $60 \text{ Вт}/\text{кг}$, что несколько ниже типичной величины для больших электромоторов ($300 \text{ Вт}/\text{кг}$). Описанное устройство может быть использовано не только в качестве искусственной мышцы, но также в качестве миксера, смешивающего потоки жидкости различной природы.

А.Елецкий

1. J. Foroughi et al., *Science* **334**, 494 (2011).
2. M. Zhang et al., *Science* **306**, 1358 (2004).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Взаимодействие наноматериалов с иммунной системой



Изучение воздействия наноматериалов (НМ) на иммунную систему очень важно для создания безопасных нанотехнологий. Каковы механизмы взаимодействия НМ и компонентов иммунной системы? Какие эффекты возникают сразу, какие проявляются через длительное время? Изучением этих вопросов в последние годы занимается много исследователей, но в основном в статьях приводятся результаты, относящиеся к био-разлагаемым наночастицам, применяемым в медицинских целях. Однако в промышленности и быту широко используются небiorазлагаемые НМ; существуют и при-

родные биостойкие наночастицы, например, так называемый “чёрный углерод”, который образуется при неполном сгорании биомассы. Данных об их взаимодействии с иммунной системой очень мало. Ученые из США, Франции и Бельгии в своем обзоре постарались восполнить этот пробел [1]. В центре внимания авторов – отклики различных клеток иммунной системы (“иммунные ответы”) на биостойкие НМ, а также вызванные этими наноматериалами иммуномодулирующие эффекты (стимулирование или, наоборот, подавление иммунной системы).

Иммунная система человека включает центральные органы – костный мозг и вилочковую железу (тимус), и периферические – селезенку, лимфатические узлы, лимфоидную ткань. Эти органы вырабатывают несколько типов клеток, основные из которых фагоциты и лимфоциты. Главная функция иммунной системы – защитить организм от патогенов* – чужеродных объектов, в основном микроорганизмов, но также и от пыли, мелких частиц. Существует несколько линий защиты. Первая линия –

врождённая иммунная система. Если патоген проникает через физический защитный барьер (кожу и слизистые оболочки) возникают неспецифические реакции – приток крови, повышение температуры, воспаление. Клетки иммунной системы – фагоциты** – распознают и уничтожают чужеродные частицы путём фагоцитоза (поглощения и последующего внутриклеточного переваривания). Вторая линия защиты – приобретённая иммунная система. Приобретённый иммунитет высокоспецифичен по отношению к конкретному типу антигенов***. Первый раз иммунный ответ возникает не сразу (на это требуется несколько дней или даже недель), но при повторной “встрече” с помощью лимфоцитов быстро вырабатываются специфические антитела (иммуноглобулины), и чужеродные объекты эффективно уничтожаются – проявляется иммунологическая память.

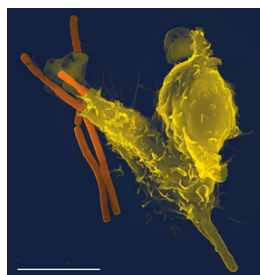
Конечно, обе системы (врождённая и приобретённая) тесно связаны. Все клетки иммунной системы имеют определенные функции и работают в сложном взаимодействии, которое обеспечивается особыми молекулами – цитокинами (к ним относятся, например, интерферон). Авторы обзора [1] обсуждают возможное воздействие НМ на всех уровнях защиты организма и кратко приводят экспериментальные данные, полученные в разных лабораториях. Особое внимание, конечно, уделяется организму человека.

Врождённая иммунная система. Первый анатомический (физический) барьер – кожа. Непосредственное воздействие на иммунные клетки будет происходить, если наночастицы проникнут достаточно глубоко. Возможно ли это? Это важный вопрос, поскольку многие косметические товары, например, кремы, содержат наночастицы TiO_2 , ZnO ; в состав противомикробных покрытий и перевязочных материалов входит нано-Ag, а теперь еще появилось “корректирующее белье для женщин с уникальными биоактивными наночастицами” (SiO_2 и Ag)! Как показывают экспериментальные данные, НМ могут проникать не только через поврежденную кожу, но также в местах сгибов, складок; наночастицы серебра из текстильных изделий выделяются в пот человека и тоже могут попасть в организм [2]. Другой путь – через слизистые оболочки (в основном при вдыхании). Здесь большую опасность представляет профессиональное воздействие биостойких наночастиц. Воспалительные эффекты в легких от TiO_2 , полимерных наночастиц, углеродных нанотрубок и др. продемонстрированы во многих работах [3].

Если наноматериалы проходят через первый физический барьер, они попадают в кровь, лимфу и встречаются с различными биомолекулами. Известно, что на поверхности TiO_2 , полимерных и других наночастиц активно адсорбируются белки, образуя так называемую “белковую корону” [4].

Недавно было обнаружено активное связывание белка C1q из комплекса белков сыворотки крови (важной части иммунной системы) с поверхностью углеродной нанотрубки [5]. Адсорбированные белки во многом определяют дальнейшую судьбу наночастиц. Кроме того, изменения могут произойти в структуре самих белков, что повлияет на их функцию и вызовет иммунные ответы. Изучать эти эффекты очень сложно, т.к. данные сильно зависят от среды клеточных культур.

Авторы обзора приводят результаты наиболее интересных исследований воздействия наночастиц на различные клетки врождённой иммунной системы – фагоциты (макрофаги, нейтрофилы и дендритные клетки), тучные клетки и некоторые другие. Воспалительные отклики наблюдали при воздействии на макрофаги наночастиц TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 , Co *in vitro* и от наночастиц CeO_2 в легких крыс *in vivo*. Активность легочных макрофагов крыс была также подавлена под действием нано- TiO_2 . В некоторых работах получены данные о том, что даже предварительное воздействие наночастиц на макрофаги в дальнейшем снижает их способность бороться с чужеродными объектами. Дендритные клетки очень важны для координации врожденного и приобретенного иммунитета. Данных об их взаимодействии с наноматериалами мало, и они противоречивы. В нескольких работах показано, что вредных эффектов можно избежать, если правильно подобрать покрытие для наночастиц. Нейтрофилы эффективно защищают организм от бактерий и грибов. Сообщается, что различные типы наночастиц могут вызывать нейтрофильные воспаления в легких, однако их влияние на физиологию нейтрофилов не изучено.

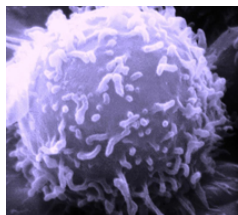


Нейтрофил, поглощающий бактерию *Bacillus anthracis* – возбудителя сибирской язвы (SEM изображение).

Тучные клетки играют важную роль в воспалительных реакциях. Они часто связаны с аллергией. В одном из исследований сравнили воздействие нано- CeO_2 на мышей с дефицитом тучных клеток и на обычных мышей. Капельное введение CeO_2 активировало тучные клетки и вызвало воспаление только у обычных мышей.

Авторы обзора приводят свидетельства того, что наночастицы (например, нано-Ag) могут действовать и как противовоспалительные средства. Их можно использовать для лечения иммунологических и воспалительных заболеваний. Наноматериалы, даже осажденные в отдаленных органах, могут и стимулировать, и подавлять иммунные ответы. И то, и другое может быть как желательным, так и вредным.

Приобретённая иммунная система. Как уже говорилось, в большинстве случаев борьбу с чужеродными объектами начинает врождённая иммунная система, а затем активируется приобретённая иммунная система. Лимфоциты распознают “чужих”, происходит образование специфических антител. Если иммуномодулирующий эффект наночастиц приведёт к подавлению иммунной системы, чужеродный объект не будет уничтожен (возможно, даже и не распознан). Если произойдет чрезмерная стимуляция иммунной системы, то могут возникнуть реакции аллергические или аутоиммунные (против собственных клеток).



Лимфоцит человека
(SEM изображение)

К сожалению, исследований взаимодействия НМ и приобретённой иммунной системы очень мало. Конечно, известно, что некоторые природные наночастицы вызывают аллергические реакции. Информации о синтезированных гораздо меньше. Данные, полученные авторами обзора [1] и некоторыми другими исследователями, говорят о том, что наночастицы TiO_2 и Au усиливают астматический отклик при совместном воздействии с источником астмы (толуоловым диизоцианатом, который широко используется в промышленности для синтеза полиуретанов). Выяснилось также, что аллергии “способствуют” углеродные нанотрубки. Интересно, что для фуллеренов наблюдали антиаллергические эффекты.

Между врождённым и приобретённым иммунитетом существует тонкий баланс. Его сохранение очень важно для того, чтобы не возникли раковые заболевания и гиперчувствительные реакции. К сожалению, наночастицы, взаимодействуя с определенными клетками иммунной системы, могут нарушить этот баланс. Эксперименты *in vivo* и *in vitro* продемонстрировали, что многие наноматериалы, в том числе и углеродные нанотрубки, могут вызвать появление активных форм кислорода, то есть привести к окислительному стрессу, который играет важную роль в развитии астмы и аллергии.

Авторы обзора [1] приходят к невесёлому заключению, что механизмы модулирования иммунной системы наночастицами по-прежнему не ясны. Требуются более систематические исследования, в которых необходимо контролировать характеристики наноматериалов. Воздействие на клетки и/или организмы должно быть низкотоксичным, позволяющим изучать хронические эффекты. Ученые рекомендуют не проводить исследования *in vivo*, а использовать множество клеток одной культуры, чтобы обеспечить “естественное” взаимодействие между клетками.

О.Алексеева

*Патоген – (от греч. *πάθος* – страдание, болезнь и *γενēs* – рождающий) – в общем случае любой фактор внешней среды (например, микроорганизм), способный вызвать повреждение каких-либо систем организма или развитие каких-либо заболеваний

**Фагоциты – (от греч. *phágos* — пожиратель) – клетки иммунной системы, которые защищают организм путём поглощения (фагоцитоза) вредных чужеродных частиц, бактерий. Роль фагоцитов впервые была определена И.И. Мечниковым в 1882 г.

***Антиген – (от греч. *anti-* и *генēs* – рождающий) – любое вещество в организме, которое иммунная система признает “чужеродным” и против которого начинает вырабатывать антитела.

1. S. Hussain et al., *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology* (published online 5.12.2011); doi:10.1002/wnan.166
2. *ПерсТ* 17, вып. 21, с.4 (2010).
3. *ПерсТ* 16, вып. 23, с.3 (2009).
4. *ПерсТ* 18, вып. 9, с.4 (2011).
5. *ПерсТ* 18, вып. 20, с.4 (2011).

КОНФЕРЕНЦИИ



4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, July 16-19, 2012, St. Petersburg, Russia

The symposium is organized by the Ioffe Physical-Technical Institute of Russian Academy of Sciences. It is a fourth symposium in a biannual series focusing specifically on growth of III-Nitride materials, nanostructures and device structures started in 2006 (Linköping, Sweden), continued in 2008 (Izu, Japan) and 2010 (Montpellier, France).

Symposium topics

- Bulk growth: AlN, GaN, InN
- Epitaxial growth techniques
- Ternary and quaternary alloys
- III-N nanostructures
- Defect control and surface effects
- Optical and electrical properties
- III-N DMS and spin-related phenomena
- Devices: FETs, LEDs, and lasers

Important dates

Deadline for Abstract submission - **February 20, 2012**

Deadline for Registration Form submission - **April 30, 2012**

Web: <http://www.ioffe.ru/ISGN4/>

Conference “The New Generation in Strongly Correlated Electron Systems 2012” (NGSCES 2012), 25th-29th June 2012, Portoroz, Slovenia

The workshop will cover a wide range of topics in strongly correlated electron systems including high-T_c and unconventional superconductivity, quantum magnetism, and non-equilibrium phenomena.

Important dates

Abstract submission: **January 6, 2012 - March 15, 2012.**

Registration deadline: **April 30, 2012.**

Contact : organizers2012@conference.ngscs.org

Web: <http://conference.ngscs.org/>

**Международная конференция
“XXXVI Собрание по физике
низких температур”, 2 – 6 июля 2012 г.,
г. Санкт-Петербург, Россия**

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 **15 марта 2012 г.**

Контакт

E-mail: nt36@mail.ioffe.ru

Вся информация о Собрании (правила регистрации on-line, правила оформления и прием тезисов, информация об оплате оргвзноса и др.) на веб-сайте конференции по адресу <http://www.ioffe.ru/nt36>

7th International Seminar on Ferroelastics Physics (ISFP-7(12)), September 10-13, 2012, Voronezh, Russia

The 7th International Seminar on Ferroelastics Physics will be held on September 10 - 13, 2012 at the Voronezh State Technical University, Russia. This Seminar is designed to bring together the international community of scientists interested in recent developments in all branches of ferroelastics investigations. The scope of the Seminar will be similar to that of the preceding seminar ISFP-6(11) in Voronezh (2009) and will cover all aspects of processing, structure, properties and applications of ferroelastic crystals.

Topics

- Phase transitions, lattice dynamics and soft modes
- Structure and crystal growth
- Domains, domain boundaries and their dynamics
- Mechanical and acoustic properties
- Optical properties
- Superionic conductivity
- Ferroelasticity and superconductivity
- Heterogeneous, glassy and incommensurate systems
- Nanometer structures
- Applications

Important dates

Deadline for pre-registration - **February 28, 2012.**

Deadline for abstracts submission - **April 25, 2012.**

Web: <http://isfp7.narod.ru>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «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, М.Маслов,
С.Овчинников, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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