

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Псевдощелевые состояния вблизи квантовой критической точки

Согласно стандартной картине квантовых фазовых переходов, при  $T=0$  фазы разделены квантовой критической точкой. В работе [1] (Германия, Франция) на конкретном примере слоев  $\text{CuO}_2$  в купратных ВТСП показано, что в двумерных электронных системах ситуация значительно сложнее: антиферромагнитная фаза отделена от нормальной не точкой, а достаточно широкой областью, в которой магнитный порядок нарушен, а на некоторых участках поверхности Ферми имеется большая щель. Эта щель (псевдощель) появляется в результате формирования нового состояния, представляющего собой суперпозицию  $d$ -волновой сверхпроводимости и волны квадрупольной плотности. Квадруполь индуцируется на узлах меди под воздействием зарядов соседних атомов кислорода. Они образуют шахматный узор, несоизмеримый с квадратной решеткой слоя (рис. 1).

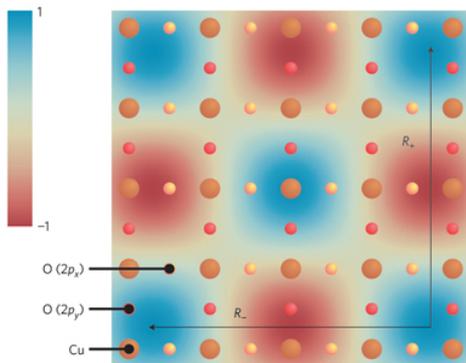


Рис. 1. Пространственное распределение нормированной плотности квадруполей в слое  $\text{CuO}_2$  имеет вид шахматной доски.

Детали перехода антиферромагнитного состояния в сверхпроводящее при низких температурах остались невыясненными (рис. 2).

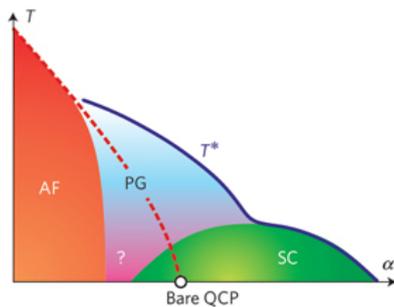


Рис. 2. Фазовая диаграмма купратных ВТСП в спин-фермионной модели [1]. AF – антиферромагнитная фаза, SC – сверхпроводящая фаза, PG – псевдощелевая фаза.

Авторы [1] полагают, что развитая ими теория послужит отправной точкой для объяснения явлений, связанных с высокотемпературной сверхпроводимостью.

Л. Опенов

I. K.V.Efetov et al., *Nature Phys.* **9**, 442 (2013).

### Сверхпроводимость монослоев $\text{FeSe}$

Как в купратных, так и в безмедных ВТСП сверхпроводимость возникает при добавлении носителей заряда в исходное антиферромагнитное (диэлектрическое или металлическое) соединение. Критическая температура  $T_c$  имеет максимум при некоторой оптимальной концентрации носителей  $n$ . Величину  $n$  обычно регулируют

И далее ...

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Когерентная связь удаленных квантовых точек

## ГРАФЕН

- 2 Массивные фермионы в гетероструктуре графен/нитрид бора
- 3 Фотохимическая активность гетероструктур из атомарно тонких пленок

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Простой способ синтеза сложных иерархических структур

- 5 Динамика наночастиц

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Химическая сварка углеродных нанотрубок
- Динамика заполнения нанотрубок водой

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

- 7 Как увидеть квантовую запутанность

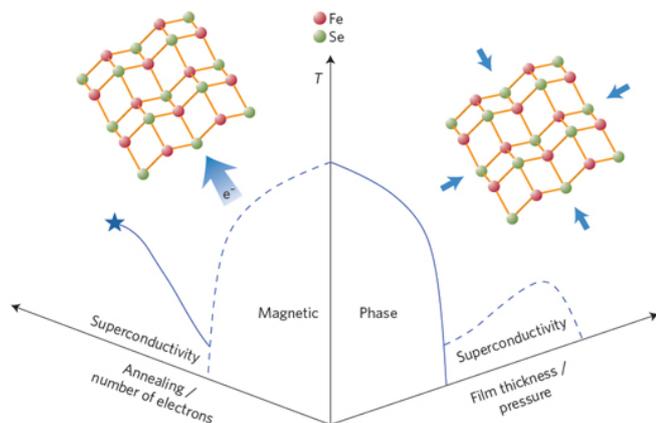
## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 7 Ферромагнетизм в тонких пленках  $\text{LaCoO}_3$ , индуцированный напряжениями на границе раздела с подложкой

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 9 XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, 20-26 ноября 2013 г., г. Екатеринбург

путем неизовалентного химического замещения отдельных элементов и/или изменения содержания кислорода в образце. В работе [1] для допирования монослоя FeSe использован другой подход – отжиг подложки. Кислородные вакансии, возникающие в подложке SrTiO<sub>3</sub> при отжиге, служат источником электронов. В результате авторам [1] удалось достичь рекордной для безмедных ВТСП  $T_c = 65$  К (см. рис.), что почти на порядок больше значения  $T_c$  для массивных образцов FeSe.



Схематическое изображение фазовой диаграммы пленки FeSe. Число электронов и расстояние между атомами изменяется с помощью электронного допирования (слева) или “давления” со стороны подложки (справа).

В работе [2] величину  $T_c$  пленок FeSe регулировали, меняя их толщину, что эквивалентно изменению эффективного давления со стороны подложки (несоответствие периодов решетки FeSe и SrTiO<sub>3</sub> приводит к существенному растяжению монослоя, а при увеличении толщины пленки межатомные расстояния релаксируют к своим равновесным величинам, то есть пленка сжимается в продольных направлениях). Максимальная  $T_c = 60$  К при этом также на данный момент является рекордной для пниктидов и селенидов железа. Заметим, что в обеих работах [1,2] величина  $T_c$  определялась как температура появления щели в электронном спектре (по данным фотоэмиссионной спектроскопии). Резистивные и диамагнитные переходы пленок FeSe еще предстоит изучить. Но сомнений в том, что эти пленки сверхпроводящие, ни у кого нет. Благодаря своей предельно простой структуре монослои FeSe представляют собой идеальную систему для проверки теорий сверхпроводимости безмедных ВТСП. Кроме того, успешное целенаправленное повышение  $T_c$  пленок FeSe вселяет надежду, что сверхпроводники следующего поколения будут “сконструированы”, а не найдены случайно методом проб и ошибок.

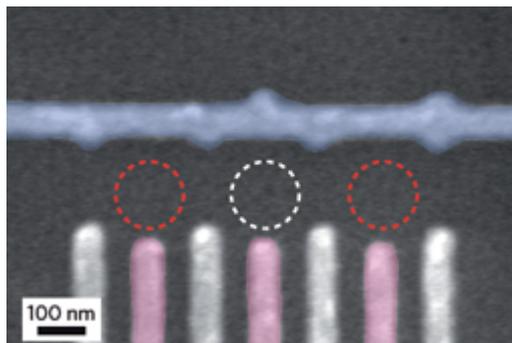
По материалам заметки S.Borisenko,  
“Fewer atoms, more information”,  
*Nature Mater.* **12**, 600 (2013).

1. S.He et al., *Nature Mater.* **12**, 605 (2013).
2. S.Tan et al., *Nature Mater.* **12**, 634 (2013).

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Когерентная связь удаленных квантовых точек

Как спины, так и заряды электронов в полупроводниковых квантовых точках могут использоваться в качестве кубитов – элементарных единиц квантовой информации. Операции со спиновыми кубитами основаны на обменном взаимодействии спиновых магнитных моментов, а с зарядовыми – на эффекте туннелирования электронов из одной квантовой точки в другую. Поскольку с ростом расстояния между квантовыми точками их туннельная связь ослабляется экспоненциально, то на практике туннелирование имеет место только между соседними точками. Поэтому если требуется “перекинуть” электрон с одного края большого массива туннельно-связанных точек на другой, то с ним нужно последовательно провести соответствующее количество локальных операций. В работе [1] (Нидерланды, Швейцария) на примере одномерной цепочки из трех квантовых точек (см. рис.) показано, что возможно когерентное туннелирование единичного электрона между крайними точками, минуя центральную.



Три электростатически определенные квантовые точки в двумерном электронном газе. Изображение получено методом сканирующей электронной микроскопии.

Это достигается посредством виртуального перехода электрона на центральную точку. Скорость туннелирования при этом определяется величиной расстройки энергетических уровней квантовых точек. В принципе ничто не мешает туннелированию такого типа в системе квантовых точек с более сложной архитектурой. Пока не ясно, сохраняется ли когерентность спинового состояния электрона при виртуальных переходах. Если да, то обнаруженный эффект можно использовать для “удаленного доступа” не только к зарядовым, но и к спиновым кубитам.

1. F.R.Braakman et al., *Nature Nanotech.* **8**, 432 (2013).

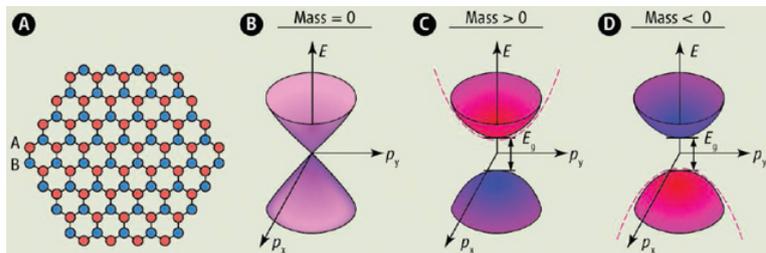
## ГРАФЕН

### Массивные фермионы в гетероструктуре графен/нитрид бора

В работе [1] (США, Япония) обнаружено, что в гетероструктуре из графена и гексагонального нитрида бора слабое вандерваальсовское взаимодействие

*ПерсТ*, 2013, том 20, выпуск 13/14

между слоями приводит к неэквивалентности двух подрешеток графена, в результате чего закон дисперсии электронов изменяется с линейного на квадратичный (электроны приобретают массу), а в энергетическом спектре появляется энергетическая щель  $\approx 30$  мэВ (см. рис.).



Масса и запрещенная зона. А – В элементарной ячейке графена два атома, А и В.

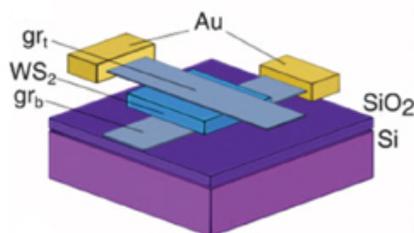
В – Если атомы А и В эквивалентны, то закон дисперсии электронов линейный (их эффективная масса  $m$  равна нулю), а запрещенная зона отсутствует. С, D – Если энергии электрона на атомах А и В различны, то в спектре появляется щель, а закон дисперсии становится квадратичным ( $m \neq 0$ ).

Возможность локального изменения эффективной массы носителей тока открывает путь к созданию в графене квантовых точек, квантовых нитей и т.п. путем выбора соответствующей конфигурации безмассовых областей.

*I. V. Hunt et al., Science 340, 1427 (2013).*

### Фотохимическая активность гетероструктур из атомарно тонких пленок

Многообразие уникальных свойств графена стимулирует интерес к квазидвумерным кристаллам других материалов. В частности, изготовлены и активно исследуются монослои гексагонального нитрида бора ( $h$ -BN) и дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ):  $NbSe_2$ ,  $MoS_2$ ,  $WS_2$  и пр. В последнее время повышенное внимание уделяется гетероструктурам из атомарно тонких пленок, таким как  $h$ BN/графен/ $WS_2$ . В работе [1] (Великобритания, Сингапур, Португалия, Корея, Россия) с участием Гейма и Новоселова показано, что особенности Ван Хофа в плотности электронных состояний слоёв ДХПМ приводят к резкому усилению поглощения света, сопровождающемуся образованием электронов и дырок, которые собираются на прозрачных графеновых электродах. Это позволяет изготовить гибкие фотогальванические устройства (см. рис.) с fotocувствительностью более 0.1 А/Вт, что соответствует квантовой эффективности выше 30%.



Схематическое изображение фотогальванического устройства из работы [1]. Слои  $h$ -BN не показаны.

После осаждения на поверхность гетероструктуры наночастиц Au интенсивность фотогенерации электрон-дырочных пар возрастает на порядок. Это объясняется тем, что наночастицы играют роль “концентраторов” электромагнитной энергии.

*I. L. Britnell et al., Science 340, 1311 (2013).*

### НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ Простой способ синтеза сложных иерархических структур

Иерархические нано- и микро-архитектурные формы, существующие в природе, постоянно вдохновляют ученых на поиски путей их создания в лабораторных условиях.



И не только “ради искусства”, хотя они могут быть удивительно красивыми. Такие структуры чрезвычайно важны для развития оптики, катализа, электроники.

Методом самосборки “снизу-вверх” (по примеру биоминерализации в природе) в ряде лабораторий получили интересные формы композитных соединений (неорганических с добавками органических и только неорганических), напоминающие биоминералы или простейшие организмы. Например, авторы [1] синтезировали спирали, “листья”, глобулярные структуры, состоящие из нанокристаллического  $BaCO_3$  и аморфного  $SiO_2$ . Однако все исследователи в основном обращали внимание только на начальные условия или состав исходного раствора. Результаты часто бывали неожиданными, не всегда соответствовали предложенным механизмам роста. Удивительно простой способ целенаправленного синтеза разнообразных иерархических структур недавно удалось разработать ученым из Harvard Univ. (США) [2]. Как и в работе [1], исследовали структуры состава  $BaCO_3(SrCO_3)/SiO_2$ , но в отличие от прежних исследований авторы [2] влияли на результат, изменяя условия (например, pH) в процессе роста.

Эксперименты проводили следующим образом. В химический стакан со щелочным раствором  $BaCl_2$  и  $Na_2SiO_3$  вертикально помещали пластинку-подложку из алюминия или стекла, покрытого золотом (рис. 1А). Стакан был прикрыт неплотно, и из атмосферного воздуха в раствор диффундировал  $CO_2$ , вызывая осаждение  $BaCO_3$  и  $SiO_2$ . Плотность кристаллизации на вертикально размещенной подложке снижалась по глубине в соответствии с концентрацией  $CO_2$ .

Как показано на рис. 2А, на степень осаждения  $BaCO_3$  и  $SiO_2$  влияет pH раствора. Осаждение  $BaCO_3$  растет с увеличением pH, а для  $SiO_2$  существует узкий оптимальный диапазон. Авторы [2] предполо-

жили, что существуют три зависящих от pH режима роста структур, каждому из которых соответствуют вполне определенные основные формы (рис. 2В).

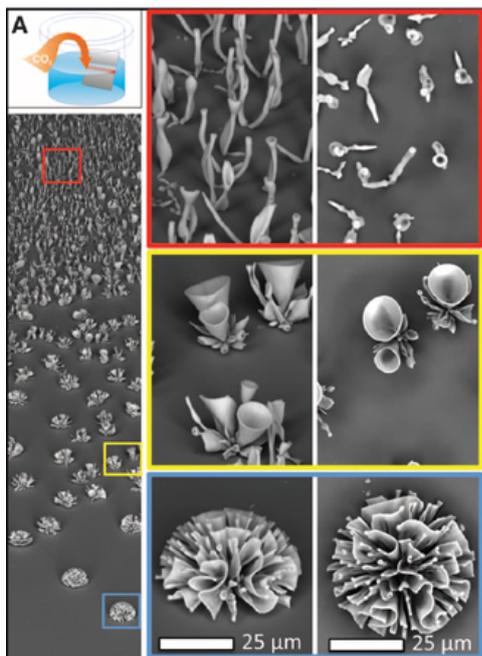


Рис. 1. Схема эксперимента и SEM изображение структур, выросших через 2 ч на подложке, помещенной в раствор с pH=11.8. Справа увеличенные изображения (вид сбоку и сверху).

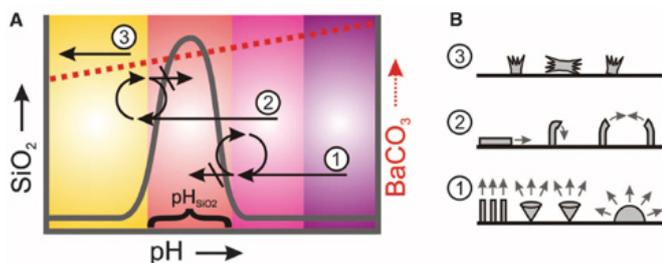


Рис. 2. А – Схематическое представление осаждения SiO<sub>2</sub> (сплошная линия) и BaCO<sub>3</sub> (пунктир) в диапазоне pH ~ 8-12. 1,2,3 – Области разных режимов. В – Примеры структур, растущих в разных режимах.

**Режим 1.** Раствор с высоким pH. Поток CO<sub>2</sub> из воздуха приводит к образованию BaCO<sub>3</sub>:

$Ba^{2+} + CO_2 + H_2O \rightarrow BaCO_3 + 2H^+$ . В области появления H<sup>+</sup> (то есть фронта роста BaCO<sub>3</sub>) pH снижается до pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub> и начинается выделение SiO<sub>2</sub>:  $SiO_3^{2-} + 2H^+ \rightarrow SiO_2 + H_2O$ . Кристаллизация BaCO<sub>3</sub> в местах осаждения SiO<sub>2</sub> прекращается. В результате происходит локальное повышение pH, опять образуется BaCO<sub>3</sub> и т.д. Структуры разрастаются перпендикулярно подложке в свободную область раствора, где pH > pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub>, подальше друг от друга (то есть от соседних фронтов роста, где локальный pH ниже). В зависимости от плотности центров кристаллизации формируются “стебельки”, “тюльпаны” и “махровые цветы” (рис. 1). Авторы назвали это режимом “цветения”.

**Режим 2.** Раствор с меньшим pH. В области фронта роста кристаллов BaCO<sub>3</sub> локальный pH может стать ниже pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub>, и SiO<sub>2</sub> не образуется. В основной части

раствора по-прежнему pH > pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub>, и рост кристаллов в соответствующих направлениях будет блокирован осаждением SiO<sub>2</sub> (pH снижается и попадает в область pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub>). Таким образом, структуры будут расти вдоль подложки или же изгибаться навстречу друг другу, то есть в направлениях, где локальный pH остается ниже pH<sub>SiO<sub>2</sub></sub> (рис. 2В). Это режим “скручивания”.

**Режим 3.** Образуются только кристаллы BaCO<sub>3</sub>.

Авторы подробно изучили образование различных структур в режимах 1 (pH=11.8) и 2 (pH=11.2). Оказалось, что регулируя поток CO<sub>2</sub> (в разной степени прикрывая стакан), в режиме 1 можно менять толщину стенок структур. Увеличение потока CO<sub>2</sub> вызывает рост осаждения карбоната, стенки становятся толще, и “бутоны” раскрываются. Это особенно хорошо видно при замене BaCO<sub>3</sub> на SrCO<sub>3</sub>, растворимость которого в 2 раза ниже (рис. 3). Также создавать различные формы можно меняя температуру или состав раствора, – например, добавляя NaCl, чтобы увеличить осаждение SiO<sub>2</sub> (на кристаллизацию BaCO<sub>3</sub> это не влияет).

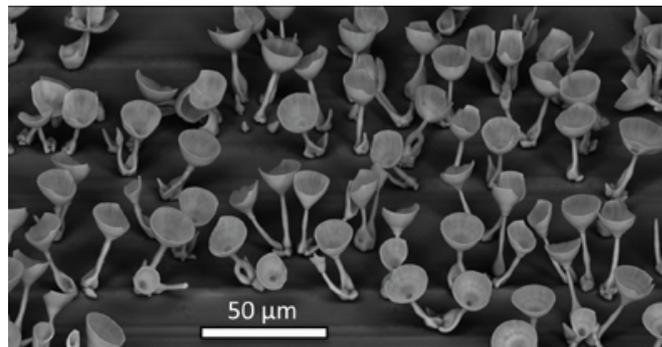
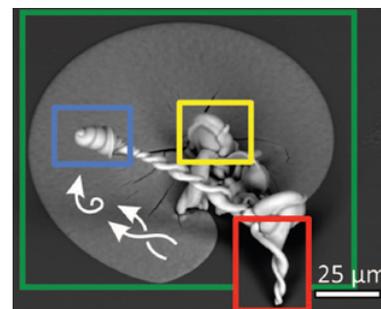


Рис. 3. “Цветы”, выросшие при импульсной подаче CO<sub>2</sub> в Sr/Si раствор.

В режиме 2 авторы получили совсем другой набор основных форм (рис. 4) – спирали, плоские формы, похожие на листья, глобулы. Большие “листья” растут вдоль подложки и пассивируются сверху SiO<sub>2</sub> оболочкой.

Рис. 4. SEM изображение BaCO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> структур, характерных для режима 2: одинарная спираль (голубой квадрат), двойная спираль (красный квадрат), глобулярные формы (желтый квадрат), лист (зеленый квадрат).



Изучив механизмы роста основных форм, авторы приступили к контролируемому синтезу сложных иерархических структур. Меняя в процессе роста температуру, концентрацию CO<sub>2</sub>, наклон подложки, pH (переноса “заготовку” из стакана с одним pH в стакан с другим pH), заменяя Ba на Sr, они с боль-

шим энтузиазмом (и, очевидно, с удовольствием) вылепили разнообразные “цветы” (рис. 5).

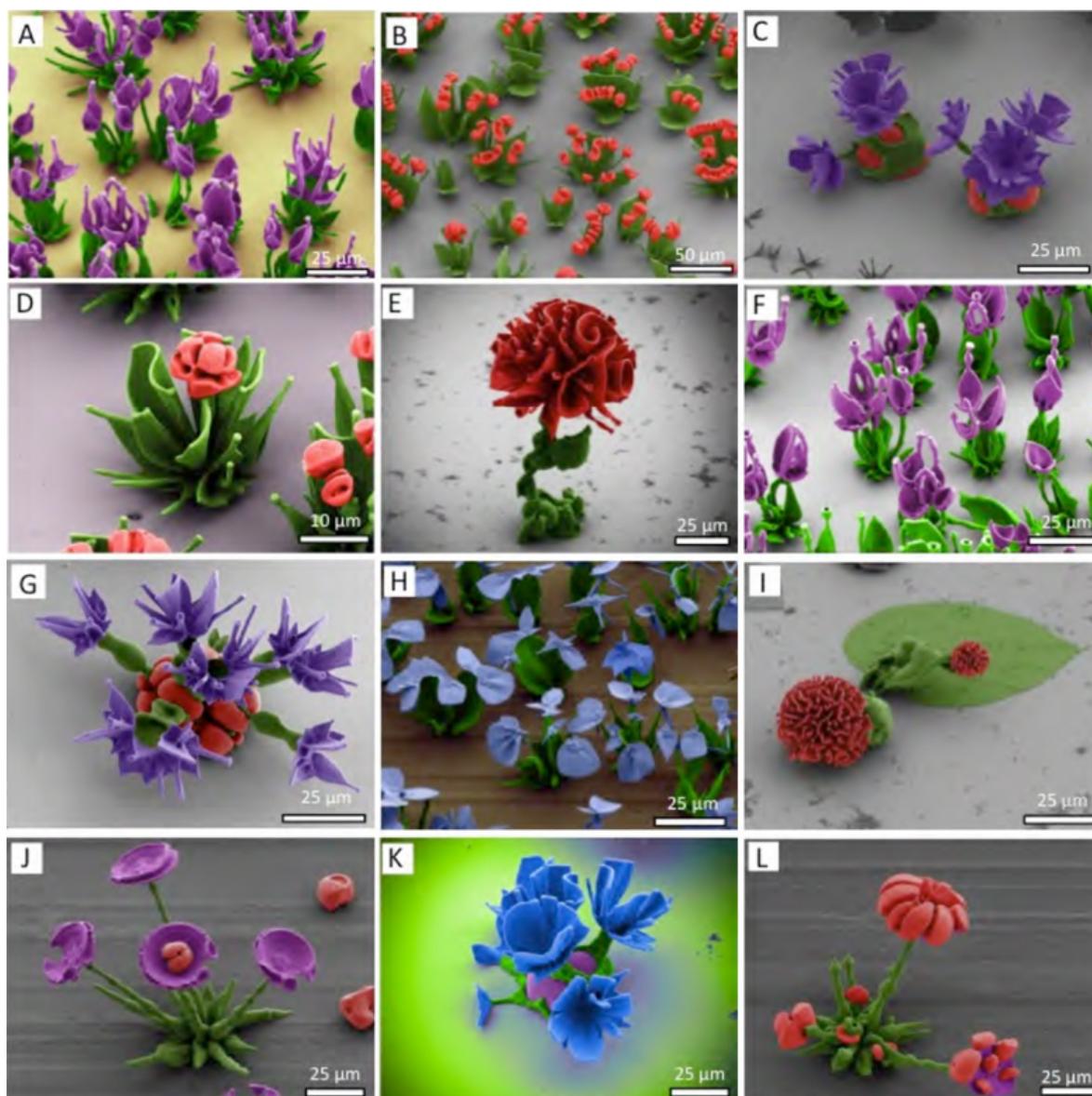


Рис. 5. Обзор иерархических сложных структур (окрашены искусственно, чтобы показать стадии синтеза).

A –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (фиолетовый) на вершинах  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). B –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный) при  $4^\circ\text{C}$  на вершинах  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). C –  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый), открытый импульсами  $\text{CO}_2$  (фиолетовый), вросший в  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$ , выращенный в присутствии  $\text{NaCl}$  (красный). D –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный) при  $4^\circ\text{C}$  на вершинах  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). E –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный) на вершинах спиралей  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). F –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (фиолетовый) на вершинах  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). G –  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый), открытый импульсами  $\text{CO}_2$  (фиолетовый), вросший в  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$ , выращенный при  $4^\circ\text{C}$  (красный). H –  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (голубой) на вершинах  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). I –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный) на вершинах спиралей и листе  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый). J –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный), выращенный при  $4^\circ\text{C}$  на вершинах  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый), открытых импульсами  $\text{CO}_2$  (фиолетовый). K –  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый), открытый импульсами  $\text{CO}_2$  (голубой), вросший в  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$ , выращенный в присутствии  $\text{NaCl}$  (фиолетовый). L –  $\text{BaCO}_3/\text{SiO}_2$  (красный), выращенный при  $4^\circ\text{C}$  на вершинах  $\text{SrCO}_3/\text{SiO}_2$  (зеленый), открытый импульсами  $\text{CO}_2$  (фиолетовый).

Результаты авторов [2] показывают, что изучение механизмов самосборки позволяет использовать этот процесс в нанотехнологии для целенаправленного создания сложнейших иерархических микро/наноструктур. Исследователи планируют применить приборы точного контроля условий эксперимента для стандартизации форм и размеров.

*О.Алексеева*

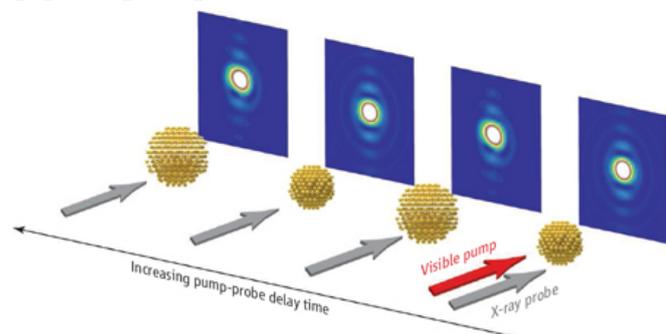
1. *J.M.García-Ruiz et al., Science 323, 362 (2009).*

2. *W.L.Noorduyn et al., Science 340, 832 (2013).*

### ***Динамика наночастиц***

В наши дни уже никого не удивит сообщением о регистрации отдельных наночастиц или молекул и об определении их структуры с атомарным разрешением. А вот следить за ходом химических процессов и/или движением атомов в режиме реального времени мы пока не научились. Оптические методы здесь не годятся, так как их пространственное разрешение ограничено из-за дифракции света. В работе [1] (Великобритания, США, Австралия) для

мониторинга акустических колебаний атомов в наночастице Au были использованы ультракороткие когерентные рентгеновские импульсы. Даже в отсутствие априорного знания о структуре частицы этот подход позволяет определить не только ее форму и размеры, но и тип колебательных мод.

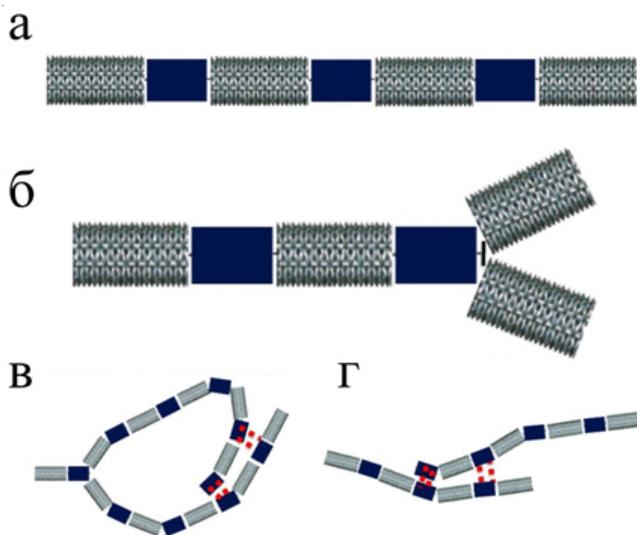


1. J.N.Clark et al., *Science* **341**, 356 (2013).

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Химическая сварка углеродных нанотрубок

Американские ученые представили простую методику стыкового соединения одностенных углеродных нанотрубок (УНТ) [1]. Предложенной авторами стратегией “снизу-вверх”, по сути, является серия химических реакций, которая позволяет произвести управляемую стыковку-сварку торцов отдельных УНТ: образцы формируются в водном растворе в процессе самосборки. Получающиеся в итоге структуры могут быть не только линейными, но и Y-образными или даже циклическими (см. рис.).



Схематическое изображение линейного (а) и Y-образного (б) соединения одностенных углеродных нанотрубок. Ансамбли углеродных нанотрубок, связанных посредством нековалентного взаимодействия (показано красными точками) между молекулами-линкерами (в, г).

Желаемая форма достигается с помощью своеобразных мостиков – молекул-линкеров. Авторы использовали три химических линкера: гексаметилендиамин для получения строгой линейной структуры, полипропиленимин тетрамин дендример и полиамидаминный дендример, основанный на эти-

лендиаминном ядре, для синтеза разветвленных конструкций. Последнее из перечисленных соединений позволило авторам посредством нековалентных связей между линкерами создавать кольцеобразные и параллельные ансамбли УНТ (см. рис. в, г). Контроль полученных образцов осуществляли с помощью атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии. Исследователи рассчитывают, что их методика окажется полезной при создании наноразмерных электронных устройств, в частности молекулярных логических элементов.

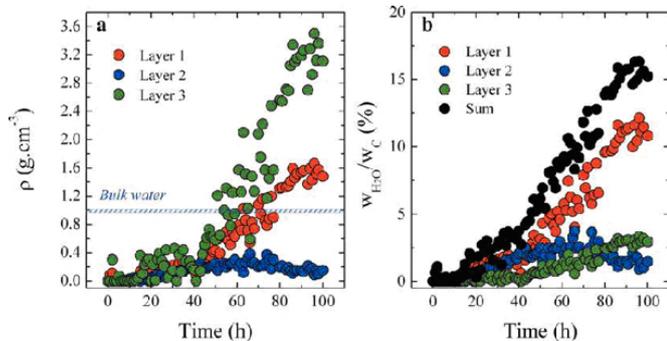
М. Маслов

1. M Palma et al., *J. Am. Chem. Soc.* **135**, 8440 (2013).

### Динамика заполнения нанотрубок водой

Как известно [1, 2], при протекании воды через углеродные нанотрубки (УНТ) наблюдается уникальное явление – скорость протекания на 4-5 порядков превышает величину, определяемую классической формулой Пуазейля. Эта особенность обусловлена характером взаимодействия молекул воды с внутренней поверхностью нанотрубки. В отличие от макроскопических поверхностей, обладающих значительной шероховатостью, поверхность УНТ является почти идеально гладкой на молекулярном масштабе, благодаря чему вода практически не испытывает трения при протекании через нанотрубки. Подобное свойство УНТ открывает новые направления их прикладного использования, связанные с созданием водных опреснительных установок и водоочистных сооружений. Для развития этих направлений, необходимо глубокое понимание механизмов, ответственных за поведение воды внутри УНТ.

Один из экспериментов в этом направлении недавно был выполнен исследователями из Univ. Paris-Sud (Франция), Inst. Laue-Langevin (Франция) и Univ. of Perugia (Италия) [3]. В этом эксперименте динамику заполнения однослойных УНТ диаметром 1.41 нм водой исследовали методом рентгеновского рассеяния. УНТ в виде порошка помещали в стеклянный капилляр, который либо подвергали вакуумной откачке при различных температурах, либо заполняли насыщенным водяным паром. Длина волны рентгеновского излучения составляла 0.15418 нм. С целью удаления адсорбированных молекул воды образцы УНТ перед экспериментом кратковременно нагревали в вакууме до 333 К, после чего вновь охлаждали до 298 К. Процесс заполнения продолжался от 20 мин до 100 ч, в зависимости от плотности исходного образца УНТ. Анализ рентгенограмм указывает на образование в процессе заполнения УНТ водой слоистых водных структур, различающихся плотностью (приосевая область характеризуется более высокой плотностью, чем периферийные области).



Динамика заполнения нанотрубки водой, восстановленная на основании обработки рентгенограмм в рамках трехслойной модели: а – динамика изменения плотности воды, б – динамика изменения доли воды в образце. 1 – слой, ограниченный радиусами 0.43 нм и 0.33 нм; 2 – слой, ограниченный радиусами 0.33 нм и 0.1 нм; 3 – слой, ограниченный радиусом 0.1 нм и осью нанотрубки.

Результаты измерений, обработанные в рамках трехслойной модели, показаны на рисунке. Согласно этой модели, вода, заполняющая УНТ, имеет трехслойную радиальную структуру, так что внешний радиус первого, внешнего слоя составляет  $r_1 = 0.53$  нм, радиус срединного слоя составляет 0.43 нм, а радиус центрального (осевого) слоя составляет 0.1 нм. Представленные на рисунке данные показывают, что на начальной стадии заполнения, при содержании воды в образце ниже 5% (по массе), заполнение практически однородно, так что расслоение происходит на последующих стадиях. Интересно, что радиальное распределение плотности воды в образце не является монотонным: самую низкую плотность имеет второй, промежуточный слой, находящийся между приосевым и периферийным слоями.

А.Елецкий

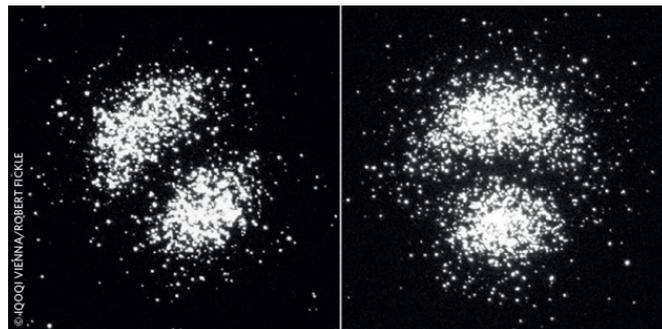
1. M.Majumder et al., *Nature* **438**, 44 (2005).
2. J.K.Holt et al., *Science* **312**, 1034 (2006).
3. E.Paineau et al., *Nano Lett.* **13**, 1751 (2013).

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

### Как увидеть квантовую запутанность

Мы не видим магнитное поле, но не сомневаемся в его существовании, поскольку наблюдаем многочисленные проявления магнетизма в повседневной жизни: прикрепляем маленькими магнетиками к холодильнику всякую ерунду, следим за вращением стрелки компаса и пр. В природе, однако, существуют и гораздо более “неуловимые” явления, такие как, например, квантовая запутанность. Сохранят ли они ореол таинственности, если нам удастся на них посмотреть? Для визуализации запутанных поляризационных состояний двух фотонов в работе [1] использован следующий прием. Один из фотонов запутанной пары пропускали через специальную интерферометрическую установку, в которой его поляризация преобразовывалась в пространственную оптическую моду. После измерения поля-

ризации второго фотона наблюдавшийся на экране узор изменялся (см. рис., а также фильм [2]).



Запутанные состояния большого количества частиц устроены значительно сложнее, и с ними такой фокус проделать не удастся. Зато здесь может помочь наличие соответствия между различными классами запутанных состояний и специфическими геометрическими объектами – политопами, которые содержат все возможные локальные собственные значения состояний данного класса [3]. А это – тоже в некотором роде визуализация.

По материалам заметки  
J.Georgescu, “Now you see it”,  
*Nature Phys.* **9**, 394 (2013).

1. R.Fickler et al., *Sci. Rep.* **3**, 1914 (2013).
2. <http://go.nature.com/84ppZp>
3. M.Walter et al., *Science* **340**, 1205 (2013).

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### Ферромагнетизм в тонких пленках $\text{LaCoO}_3$ , индуцированный напряжениями на границе раздела с подложкой

Кобальтит лантана  $\text{LaCoO}_3$  – материал с необычными магнитными и электронными свойствами, которые были предметом долгих дискуссий более 50 лет. В объемных кристаллах  $\text{LaCoO}_3$  ион  $\text{Co}^{3+}$  находится при низких температурах в низкоспиновом состоянии с нулевым спином  $S=0$ , но энергия термического возбуждения в высокоспиновое  $S=2$  состояние невелика, порядка 100 К. Поэтому парамагнитные свойства появляются постепенно при температуре более 100 К. В тонких пленках  $\text{LaCoO}_3$  уже несколько лет наблюдают ферромагнетизм [1], связываемый либо с напряжениями, либо с кислородными вакансиями. В недавней работе [2] выполнен комплекс исследований эпитаксиальных монокристаллических пленок  $\text{LaCoO}_3$ , напыленных методом лазерной абляции на различные изоструктурные монокристаллические подложки, различающиеся степенью рассогласования по параметру решетки с пленкой – это  $\text{LaAlO}_3$  (LAO),  $(\text{LaAlO}_3)_{0.29}(\text{SrAl}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_{0.71}$  (LSAT) и  $\text{SrTiO}_3$  (STO) (в последнем случае на границе раздела возникают самые большие механические напряжения). Измерения рентгеновских спектров поглощения (XAS), выполненные на установке RSRS, использующей пучок REIXS синхротрона Canadian Light Source in

Saskatoon, установили отсутствие заметных количеств кислородных вакансий (другими словами, стехиометричность образцов).

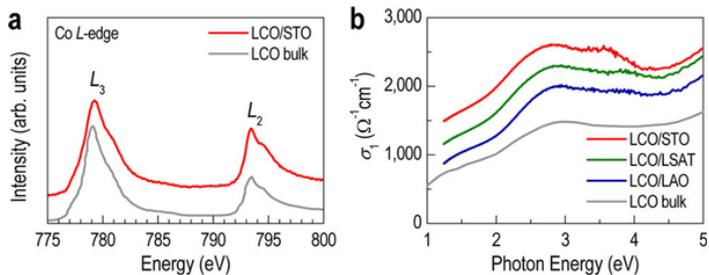


Рис. 1.

На рис. 1 видно, что спектры XAS пленок практически идентичны спектрам объемного образца. Наличие кислородных вакансий и индуцированных ими состояний  $\text{Co}^{2+}$  проявилось бы как низкоэнергетический спутник в спектре. Авторы [2] оценивают число таких состояний менее 5%. Этот вывод подтверждается также измерениями спектров эллипсометрии (рис. 1b). Анализ микроструктуры с помощью сканирующего просвечивающего электронного микроскопа выявил однородно напряженные участки интерфейса вблизи подложки и структуру с поперечными страйпами (темные полосы на рис. 2), которые в случае подложки STO (с наибольшим рассогласованием параметров ячейки пленки и подложки) формируют сверхструктуру с утроенным периодом.

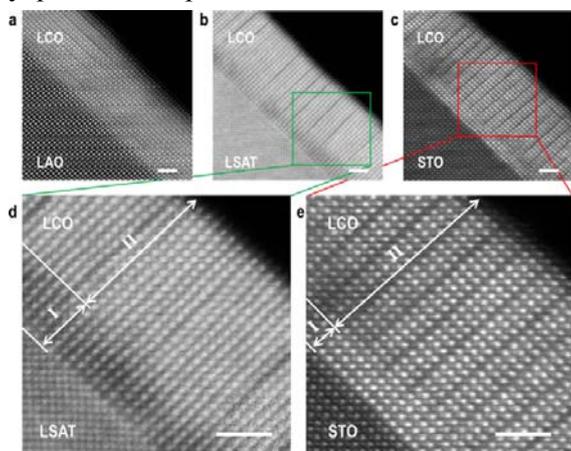


Рис. 2.

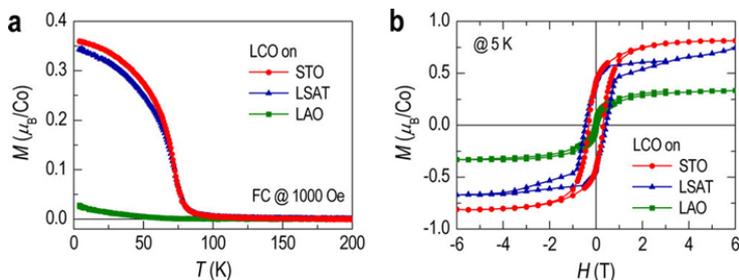


Рис. 3.

Межатомные расстояния La–La, Co–O также модулируются. Внутри страйпа имеется сильное тетрагональное искажение октаэдра  $\text{CoO}_6$ . Магнитные свойства показаны на рис. 3 в виде температурной и

полевой зависимостей намагниченности, характерных для ферромагнетика. Температура Кюри (80 K) соответствует данным предыдущей работы [1]. Ферромагнетизм не проявляется для подложки LAO, для которой на рис. 2 также не видно и поперечных страйпов. Необычное индуцирование ферромагнетизма напряжениями в интерфейсе авторы [2] связывают с возможной стабилизацией магнитных состояний  $\text{Co}^{3+}$  либо высокоспиновых ( $S=2$ ), либо с промежуточным спином  $S=1$  за счет локальных удлинений связей Co–O. Возможность настолько сильно изменять свойства слоев за счет интерфейса представляется очень интересной с технологической точки зрения.

С.Овчинников

1. D.Fuchs et al., *Phys. Rev. B* **75**, 144402 (2007).
2. W.S.Choi et al., *Nano Letters* **12**, 4966 (2012).

## КОНФЕРЕНЦИИ

### XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14), 20 - 26 ноября 2013 г., г. Екатеринбург

На протяжении двенадцати лет основным организатором Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС) выступает Институт физики металлов УрО РАН. Участниками СПФКС являются молодые ученые, кандидаты и доктора наук, аспиранты и студенты из институтов РАН, высших учебных заведений России и стран СНГ. В программу школы-семинара, помимо устных и стендовых докладов участников, входят приглашенные лекции известных ученых, специализирующихся в различных областях физики конденсированного состояния вещества. На семинаре существует традиция приглашать докладчиков из смежных областей науки, представителей различных высокотехнологичных отраслей промышленности, а также биологии и медицины. Такая политика способствует расширению кругозора молодых специалистов и представляется полезной в плане развития междисциплинарного научно-сотрудничества.

## Тематика

1. Магнитные явления
2. Фазовые переходы и критические явления
3. Проводимость и транспортные явления
4. Резонансные явления
5. Структурные и механические свойства твёрдых тел
6. Неразрушающий контроль
7. Теплофизика
8. Электрофизика
9. Наноматериалы
10. Физика низких температур

11. Оптика и спектроскопия
12. Теория конденсированного состояния
13. Биофизика

Последний срок подачи заявок и тезисов -  
**20 сентября 2013 г.**

Е-mail: [spfks@imp.uran.ru](mailto:spfks@imp.uran.ru)

Сайт: [http://smu.imp.uran.ru/?q=spfks\\_main](http://smu.imp.uran.ru/?q=spfks_main)



**10th International Workshop On  
Low Temperatures Electronics  
(WOLTE 10), October 14-17,  
2013 Paris, France**

The International Workshop On Low Temperature Electronics (WOLTE) is a biannual conference devoted to the presentation and exchange of the most recent advances in the field of low temperature electronics and its applications. This international forum is open to everyone in the field. The 10th edition will take place at *the Amphithéâtre Buffon*, Université Paris Diderot in Paris.

#### **Topics**

All contributions are encouraged in the main topics selected by the program committee, including, but not restricted to:

- Low-temperature device physics
- Semiconductor and superconductor devices at low temperatures
- Low-temperature detectors and frontend readouts
- Optoelectronics at low temperatures
- Cryogenic MEMS and NEMS and coupling to electronic readouts
- Cryogenic systems
- Cryoelectronics applications
- Packaging and interconnects

#### **Important dates:**

**September 02** - Abstract submission deadline

Е-mail: [wolte10@lpn.cnrs.fr](mailto:wolte10@lpn.cnrs.fr)

Website : <http://wolte10.lpn.cnrs.fr>

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto: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

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>