

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Аномально резкий сверхпроводящий переход в передопированных пленках $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

Если критическая температура сверхпроводника T_c является мерой силы спаривающего взаимодействия, то ширина перехода (резистивного или диамагнитного) ΔT_c определяется, как правило, качеством образца: чем он однороднее, тем меньше ΔT_c . В купратных ВТСП, помимо структурной (химической) неоднородности, обусловленной в конечном счете сложным составом (в том числе отклонениями от стехиометрии по кислороду и/или наличием атомов замещения), имеется еще и электронная неоднородность на масштабе ~ 1 нм, связанная с сильными межэлектронными взаимодействиями. Это приводит к увеличению ΔT_c , причем иногда весьма существенному, особенно в недодопированных образцах, где бывает даже $\Delta T_c \sim T_c$ (~ 10 К). А вот для передопированных составов все оказалось иначе. Выполненные в работе [1] измерения температурной зависимости удельного сопротивления ρ_{ab} пленок $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ показали, что при увеличении x (то есть концентрации дырок в слоях CuO_2) от 0.18 ($T_c = 41$ К) до 0.30 ($T_c = 9.0$ К) величина ΔT_c уменьшается от 6 К аж до 0.2 К (см. рис.).

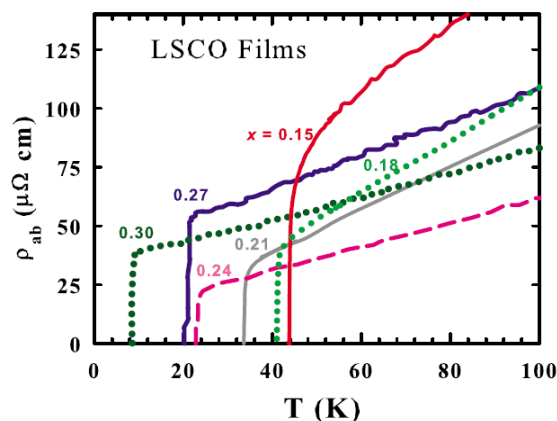


Рис. 1. Резистивные сверхпроводящие переходы в пленках $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ с различными x .

Авторы [1] связывают это с усилением взаимодействия между слоями CuO_2 и, как следствие, ослаблением электронных корреляций из-за “трехмеризации” системы, что согласуется с экспериментальными данными по зависимости сверхтекучей плотности от x и T . Альтернативное объяснение – фазовое расслоение на области с избытком и дефицитом дырок – они считают маловероятным.

Л. Оленов

1. T.R.Lemberger et al., Phys.Rev.B **82**, 214513 (2010).

Новый взгляд на псевдощель

Около 40 лет назад Н. Мотт ввел в физический обиход термин “псевдощель” [1]. Он использовал его при обсуждении минимума плотности электронных состояний на уровне Ферми, который либо возникает в результате кулоновского отталкивания электронов на узлах решетки, либо является предвестником формирования заперщенной энергетической зоны в системах с беспорядком,

И далее ...

2 Фононы набирают силу

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

3 Спин-орбитальные кубиты

4 Спиновые кубиты в твердом теле: наука о выживании

НАНОМАТЕРИАЛЫ

4 Углеродные нановолокнистые мембраны для фильтрации и сепарации наночастиц

ГРАФЕН

6 Графен: крутой поворот в магнитооптике

На краю графена

СПИНТРОНИКА

7 Транзистор на спиновом эффекте Холла

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

7 Новые мечты о настольном синхротроне

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

8 Ионная диффузия в плотноупакованном комплексе из углеродных нанотрубок

9 Электроды для газового разряда на основе углеродных нанотрубок

КОНФЕРЕНЦИИ

либо есть следствие комбинации этих двух факторов. Позже было замечено, что псевдощель может также быть и признаком наличия в сверхпроводнике при $T > T_c$ некоррелированных по фазе куперовских пар. После открытия псевдощели в купратных ВТСП именно этот механизм ее образования многие считали наиболее вероятным, что косвенно подтверждалось наблюдениями флуктуационной сверхпроводимости ВТСП гораздо выше T_c . Позже возобладала точка зрения, что псевдощелевая фаза не предшествует сверхпроводящей, а конкурирует с ней. Но по существу вопрос остался открытым.

Результаты, полученные в работе [2], говорят о том, что правы, возможно, и те, и другие, и что в псевдощелевой фазе сосуществуют два различных состояния: в одном из них (при $T_c < T < T_{\text{pair}}$) есть некогерентные куперовские пары, а другое реализуется в более широком диапазоне температур (при $T_c < T < T^*$, где $T^* > T_{\text{pair}}$ – температура появления псевдощели) и имеет несверхпроводящую природу. К такому выводу авторы [2] пришли, исследуя ARPES-спектры монокристаллов Bi2212 и Bi2201 с различным уровнем допирования и анализируя температурные зависимости формы спектральных линий, измеренных в антиузловом направлении зоны Бриллюэна: спектральный вес $W(E_F)$ в окрестности энергии Ферми при охлаждении ниже T^* уменьшается сначала линейно по T , а начиная с некоторой температуры T_{pair} быстро падает (см. рис.).

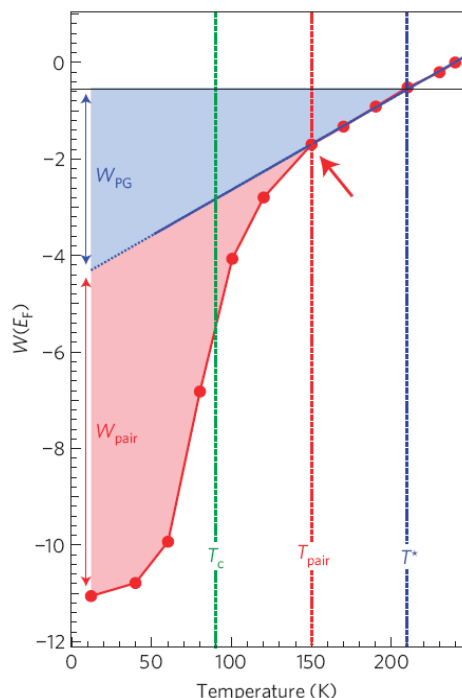


Рис. 1. Температурная зависимость спектрального веса $W(E_F)$, определяемого путем интегрирования спектральной интенсивности ARPES в антиузловом направлении по интервалу $\delta E = 10$ мэВ около энергии Ферми. За начало отсчета принята величина $W(E_F)$ при $T = 240$ К. Данные для оптимально допированного монокристалла Bi2212 с $T_c = 90$ К.

Это послужило авторам [2] основанием для гипотезы о формировании при $T = T_{\text{pair}}$ еще одного псевдощелевого состояния, сосуществующего при $T < T_{\text{pair}}$ с тем, которое уже было при $T_{\text{pair}} < T < T^*$, и обусловленного предположительно образованием некогерентных куперовских пар. Аргументом в пользу своей гипотезы авторы [2] считают почти идеальный скейлинг величины W_{pair} (ее определение см. на рис.) как функции T/T_{pair} для образцов с различной концентрацией дырок p . Выходит так, что на фазовой диаграмме купратов кривые $T_c(p)$ и $T^*(p)$ нужно дополнить еще и кривой $T_{\text{pair}}(p)$. Согласно [2], при уменьшении p температура спаривания T_{pair} сначала возрастает, а при концентрации дырок меньше оптимальной не падает, как T_c , и не продолжает увеличиваться, как T^* : она выходит на константу (120 ÷ 150) К, которая, по-видимому, и есть предельно возможная T_c купратов (ведь для того, чтобы сконденсироваться, куперовские пары должны сперва сформироваться). Что же касается природы “настоящей” (не имеющей отношения к спариванию) псевдощели, она пока так и остается невыясненной.

Л. Опенов

1. N.Mott, *Rev. Mod. Phys.* **40**, 677 (1968).
2. T.Kondo et al., *Nature Phys.* **7**, 21 (2011).

Фононы набирают силу

Дискуссии о том, что же выполняет функцию “спаривающего клея”, связывающего электроны в куперовские пары в высокотемпературных сверхпроводниках не стихают со времени их открытия. Основные претенденты на роль “клея” – это фононы и спиновые флуктуации. Без фононов, в общем-то, обойтись трудно, но общественное мнение все больше склоняется в сторону нефононных механизмов и главный аргумент здесь – возможная d -симметрия волновой функции сверхпроводящего состояния, которую трудно уложить в рамки фононного механизма. Впрочем, как мы уже писали в ПерсТе [1], существует и другая точка зрения – спиновые флуктуации для спаривания вообще не нужны. Она, в частности, была изложена в работе [2], где в рамках модели Хаббарда-Фрелиха было продемонстрировано, что необходимыми ингредиентами высокотемпературной сверхпроводимости являются: 1) большая энергия хаббардовского отталкивания электронов на узлах решетки и 2) электрон-фононное взаимодействие – не очень сильное, но дальнodelствующее (из-за слабой экранировки). При этом оказывается, что даже в отсутствие спиновых флуктуаций сверхпроводящее состояние имеет d -волновую симметрию. Все бы хорошо, но где же взять слабую экранировку. Казалось бы, носителей тока в сверхпроводнике много, и они надежно заэкранируют электрон-фононное взаимодействие уже при невысоких уровнях допирования. И это действительно так, если полагать, что из-за

ПерсТ, 2011, том 18, выпуск 1/2

высокой фермиевской скорости электроны успевают “оперативно реагировать” на любые перемещения ионов или, иными словами, справедливо адиабатическое приближение. Но как выясняется, именно в купратах, особенно недодопированных, адиабатическое приближение не работает. Условие применимости этого приближения можно записать как $\hbar\omega_0/E_F < 1$, где E_F – энергия Ферми, которая в купратах оказывается аномально малой, в частности, в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ при малых x она меньше 40 мэВ. В то же время, характерная энергия колебаний решетки $\hbar\omega_0$ составляет примерно 80 мэВ. Поэтому даже, если константа электрон-фононного взаимодействия λ сравнительно мала, $\lambda \leq 0.5$, адиабатическое приближение работает плохо и уж совсем отказывает при $\lambda > 0.5$, когда E_F еще больше снижается из-за поляронного сужения зоны. На это обстоятельство обратили внимание авторы статьи [3], уже в названии которой декларируется, что электрон-фононное взаимодействие – ключ к сверхпроводящему спариванию в допированных ионных диэлектриках. Используя методы теории поляронов, авторы рассмотрели, по сути дела, антиадиабатическую ситуацию и получили, что для слоистых купратов $\lambda \geq 0.86$. Конечно, с ростом допирования электрон-фононное взаимодействие ослабляется за счет экранировки, но из-за неадиабатичности остается достаточно большим даже при оптимальном допировании.

Но, как любил говорить Ландау, физика – наука экспериментальная. И что же нам говорит по этому поводу эксперимент? Наиболее прямой метод определить величину электрон-фононной связи – это измерить время релаксации для фононов, взаимодействующих с электронами, τ_{e-ph} , которое обратно пропорционально $\lambda\langle\omega^2\rangle$, где $\langle\omega^2\rangle$ – средний квадрат фононных частот. Но τ_{e-ph} – это очень короткое время, меньшее 100 фс, поэтому длительность измерительных импульсов должна быть еще меньше. До сих пор типичное время импульса составляло 50-80 фс, что не обеспечивало нужного разрешения. Экспериментаторам из J. Stefan Inst. (Словения) удалось построить установку, где измерительное время меньше – 10 фс [4]. А это уже кое-что. Были взяты монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ и $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ и на них с хорошей точностью было промерено τ_{e-ph} . Но тут возникает некоторое затруднение: коэффициент пропорциональности между $\lambda\langle\omega^2\rangle$ и τ_{e-ph}^{-1} зависит от температуры. Но от какой, электронной или решеточной? При таких коротких временах они разные. Авторам работы [4] удалось убедительно показать, что надо брать именно температуру решетки, которая к тому же не зависит от частоты следования импульсов, что дополнительно повышает точность измерений. Некую неопределенность вносит необходимость независимого определения $\langle\omega^2\rangle$, но эта величина известна из других экспериментов, в частности, туннельных и нейтронных. В

результате таких фемтосекундных измерений получилось, что $\lambda \geq 0.5$ для $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ и ≥ 0.25 для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$. То есть, эксперименты дали парадоксальный с точки зрения теории БКШ результат – константа электрон-фононной связи оказалась меньшей в монокристалле с более высокой температурой сверхпроводящего перехода, но именно такой результат естественным образом получается в рамках поляронной теории сверхпроводимости [2,3], что является еще одним аргументом в пользу определяющей роли фононов в сверхпроводимости купратов. Все точки над i тут, естественно, не поставлены, но ясно, что к фононам в высокотемпературных сверхпроводниках стоит относиться с почтением.

1. [ПерсТ 16, вып. 11/12, с. 1 \(2009\).](#)
2. T.M.Hardy et al., *Phys. Rev. B* **79**, 212501 (2009).
3. A.S.Alexandrov, A.M.Bratkovsky, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 226408 (2010).
4. C.Gadermaier et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 257001 (2010).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Спин-орбитальные кубиты

Хотя возможность управления электронными спиновыми кубитами с помощью локальных переменных магнитных полей и была продемонстрирована экспериментально, такой способ контроля кубитов оказался не очень эффективным как из-за сложности его технической реализации, так и по причине сравнительно большого времени, требующегося при этом для “поворота” кубита (не намного меньшего времени декогерентизации). В работе [1] сильное спин-орбитальное взаимодействие в квантовых точках InAs (см. рис.) использовано для операций со спиновыми кубитами посредством только электрических полей.

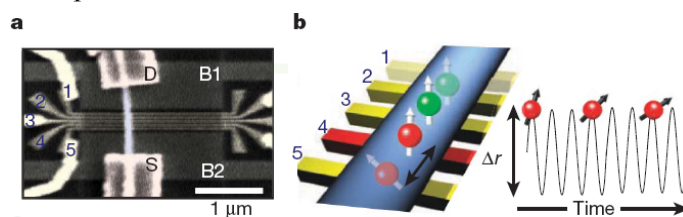


Рис. 1. *a* – Микрофотография устройства, *b* – две квантовые точки формируются между контактами 2 и 5.

Дело в том, что из-за наличия такого взаимодействия ни спиновые, ни орбитальные состояния электрона в квантовой точке нельзя рассматривать по отдельности: они “перемешаны”. Воздействие электрического поля на орбитальную компоненту полной спин-орбитальной волновой функции электрона приводит к соответствующему изменению ее спиновой составляющей. Время сохранения спиновой когерентности оказалось, к сожалению, не очень велико (несколько десятков наносекунд), что авторы [1] связывают с взаимодействием электронных и ядерных спинов и/или влиянием парамагнитных примесей. Тем не менее, этого времени вполне

достаточно для, например, преобразования электронного кубита в фотонный “летающий” кубит и передачи таким образом квантовой информации на большие расстояния.

I. S.Nadj-Perge et al., Nature 468, 1084 (2011).

Спиновые кубиты в твердом теле: наука о выживании

В долгосрочной перспективе твердотельные квантовые компьютеры представляются гораздо более перспективными, чем, например, устройства на основе фотонов или атомов/ионов в магнитной ловушке, главным образом – из-за их масштабируемости. Но квантовые биты (кубиты) в твердом теле так сильно взаимодействуют со своим окружением, что управлять ими становится чрезвычайно сложно. Более того, это взаимодействие приводит к очень быстрой потере когерентности (для спиновых кубитов – за времена $\tau = 10 \div 100$ нс, а для зарядовых – еще быстрее). В принципе, с декогерентизацией можно бороться, используя известные методы коррекции квантовых ошибок. Однако и они не панацея, поскольку работают лишь в том случае, когда вероятность ошибки при выполнении одной операции не превышает 10^{-4} , то есть величина τ должна быть достаточно велика. Оказывается, что эффекты декогерентизации можно если и не полностью подавить, то существенно ослабить, используя методику, аналогичную спиновому эхо в ЯМР и заключающуюся в воздействии на кубиты последовательностью π -импульсов – так называемое “динамическое расцепление” (dynamical decoupling). Сразу четыре группы [1-4] независимо друг от друга реализовали эту методику в экспериментах со спиновыми кубитами в квантовых точках GaAs [1,2] и NV-центрах в алмазе [3,4]. Результаты, прямо скажем, впечатляют. Так, например, в [1] удалось повысить τ сразу от ~ 20 нс до ~ 200 мкс. Точность осуществления квантовых операций (пока – однокубитных) при этом резко возросла. На очереди – двухкубитные операции, без которых при квантовых вычислениях не обойтись. Пока для них вероятность ошибки недопустимо велика ($\sim 10^{-1}$), даже с динамическим расцеплением. Борьба за жизнь спиновых кубитов в твердом теле продолжается....

*По материалам заметки
M.J.Reilly, Nature Nanotech. 6, 9 (2011).*

1. H.Bluhm et al., <http://arxiv.org/abs/1005.2995> (2010).
2. C.Barthel et al., <http://arxiv.org/abs/1007.4255> (2010).
3. C.A. Ryan et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 200402 (2010).
4. G. de Lange et al., Science **330**, 60 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Углеродные нановолокнистые мембраны для фильтрации и сепарации наночастиц

Мембраны из волокнистых материалов имеют высокую удельную поверхность и пористость, обладают гибкостью и могут эффективно использовать

ся для фильтрации и сепарации газов и жидкостей, в том числе для очистки воды. Наиболее часто волокна получают с помощью электроспиннинга, то есть вытягивания волокна из жидкости под действием электрического поля (см., например, [1]). Такие волокнистые материалы могут обеспечить удаление микрочастиц, но не наноразмерных примесей, поскольку поры в них довольно больших размеров.

Недавно исследователи из Univ. of Science and Technology, Hefei (Китай) создали новые фильтрационные мембраны из углеродных нановолокон (УНВ) [2]. Эти мембраны отличаются очень узким распределением пор по размерам и способны эффективно удалять наночастицы из растворов. Мембраны достаточно прочные и гибкие (рис.1).



Рис.1. Фотография, демонстрирующая гибкость мембраны

Меняя диаметр волокон, можно с высокой точностью регулировать пороговый размер пропускаемых частиц. Следовательно, такие мембраны годятся не только для очистки воды. Их можно применять для выделения из смеси частицы одного определённого размера (в диапазоне от десяти до нескольких сотен нм). А это очень важно для применения наночастиц в электронике, биомедицине и др.

Для получения УНВ исследователи с небольшими изменениями использовали методики [3,4], использующие нанопроволочки теллура. Схему синтеза можно упрощенно представить следующим образом:



На первом этапе синтезируют ультратонкие длинные Те-нанопроволочки [3]. В процессе так называемой гидротермальной карбонизации из них и глюкозы образуются нанокабели Te@C [4]. При протравливании в 5% растворе H₂O₂ удаляется Те сердцевина, и формируются длинные углеродные волокна определённого диаметра. Так, из 0.03 ммоль Те-проволочек и 1.5 г глюкозы при 160°C авторы [2] получили волокна диаметром 37, 50, 71, 98, 132 и 195 нм при длительности синтеза 12, 18, 24, 36, 48 и 60 часов, соответственно. Изображения некоторых из них представлены на рис. 2.

Мембраны получали в процессе самосборки волокон при испарении растворителя (суспензию волокон в этаноле наносили на тефлоновую подложку методом полива и высушивали при комнатной температуре). Материал легко отделяется от подложки; он очень гибкий и достаточно прочный. При диаметре волокна > 40 нм мембрана выдерживает высокое давление. Изображения поверхности одного из образцов, полученные на сканирующем элек-

ПерсТ, 2011, том 18, выпуск 1/2

тронном микроскопе (SEM) при двух разных увеличениях приведены на рис. 3. Толщина мембраны зависит от концентрации и объема УНВ-сuspензии. Для испытаний авторы [2] сделали круглые мембраны диаметром 5 см и толщиной 10 мкм.

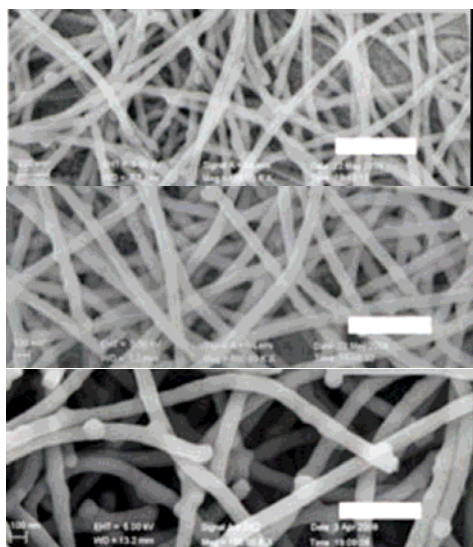


Рис. 2. SEM-изображения нановолокон, синтезированных в процессе гидротермальной карбонизации. Сверху вниз: время синтеза 18, 24 и 36 часов. Диаметр волокон 37, 50 и 71 нм, соответственно. Масштабная шкала 400 нм.

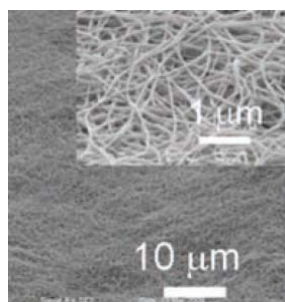


Рис. 3. Поверхность мембраны УНВ-50 (диаметр волокон 50 нм).

Эффективность фильтрации исследователи проверяли на растворах, содержащих разные наночастицы. Приведём некоторые примеры. Через мембрану УНВ-50 (диаметр волокон 50 нм) свободно

проходил раствор 5 нм частиц Au, а 25 нм частицы (как Au, так и Ag) УНВ-50 не пропускала. Мембрана УНВ-71 (диаметр волокон 71 нм) пропускала частицы 25 нм, но отсекала 60 нм частицы Au. Однако эти частицы свободно проходили через мембрану УНВ-98 (диаметр волокон 98 нм), которая, в свою очередь, не пропускала 150 нм частицы SiO₂ (рис.4).

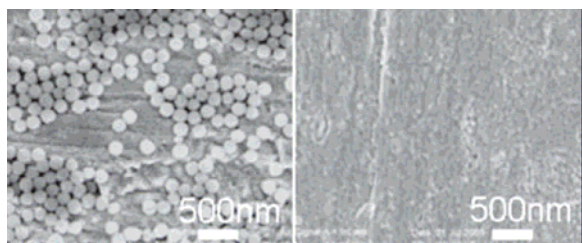


Рис. 4. Фильтрация наночастиц SiO₂ через мембрану УНВ-98. Слева – поток на входе, справа – фильтрат

Все полученные мембраны обладают гидрофильностью, что обеспечивает высокий поток. Например, при перепаде давлений 80 кПа поток для УНВ-71 равен 5500 л/ч·м², а для коммерческой мембраны Isopore™ с близким пороговым размером (50 нм),

Перст, 2011, том 18, выпуск 1/2

которую исследователи тестировали для сравнения, поток на порядок ниже - 480 л/ч·м². Более того, мембрана Isopore™, в отличие от УНВ-71, не способна эффективно разделять 25 и 60 нм частицы Au. Новые мембраны обеспечивают высокий поток в сочетании с высокой селективностью. Авторы проверили, можно ли с их помощью разделять наночастицы разного размера. Водный раствор со смесью 5 нм (93.6%) и 25 нм частиц (6.4%) Au они пропустили через УНВ-50 и получили на выходе раствор, содержащий более 99% 5 нм частиц! Концентрация 25 нм частиц в отсечённой фракции выросла до 65.5%, а после повторной фильтрации достигла 91.4% (рис. 5).

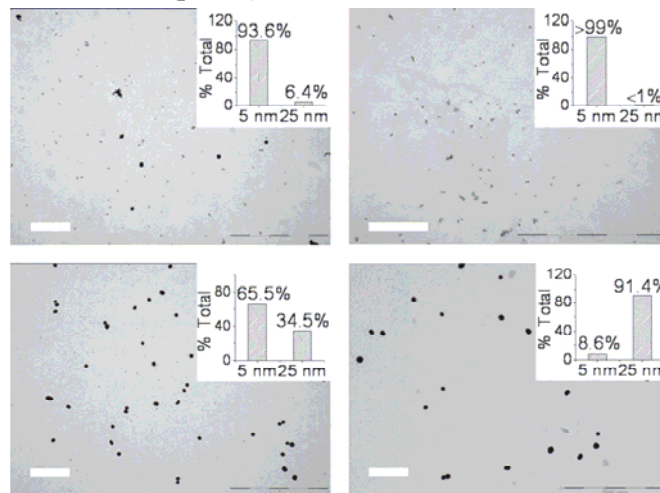


Рис. 5. Изображения, полученные на просвечивающем электронном микроскопе, демонстрирующие сепарацию 5 нм и 25 нм частиц в растворе.

Вверху: слева – исходная смесь, справа – фракция, прошедшая через УНВ-50.

Внизу: слева – задержанная фракция, справа – то же после повторной фильтрации. Шкала 200 нм.

Исследователи успешно разделили и другие бинарные смеси наночастиц и провели первые опыты по разделению тройных смесей.

Эксперименты убедительно доказали, что новые мембраны способны фильтровать и сепарировать наночастицы в растворах. Мембраны – очень гибкие, механически прочные и могут применяться даже при высоких давлениях. Пористая структура нановолокнистого материала и гидрофильность обеспечивают высокий поток, очень узкое распределение нанопор по размерам даёт высокую селективность. Пороговый размер легко регулировать, меняя диаметр волокна. Вполне вероятно, что такие мембраны найдут применение для сепарации других микро- и нанообъектов, например вирусов, бактерий, полимеров. Пожалуй, единственным недостатком, как признают и сами авторы, является использование в синтезе Те-нанопроволочек. Если не найти им более дешёвой замены, вряд ли можно будет ожидать массового производства мембран. Перспективные кандидаты – природные нановолокна, например, длинные, тонкие, прочные микрофибрилы целлюлозы, которые находятся в кле-

точных стенках растений. Их можно выделять из биомассы, из древесины [5]. Авторы статьи [2] начали работу над таким вариантом синтеза УНВ.

О.Алексеева

1. *ПерсТ. 15, вып. 23, с. 5 (2008).*
2. H.-W. Liang et al., *Adv. Mater.* **22**, 4691 (2010).
3. H.-S. Qian et al., *Langmuir* **22**, 3830 (2006).
4. H.-S. Qian et al., *Chem. Mater.* **18**, 2102 (2006).
5. K. Abe et al., *Biomacromolecules* **8**, 3276 (2007).

ГРАФЕН

Графен: крутой поворот в магнитооптике

Графен не перестает удивлять исследователей своими свойствами, опровергая устоявшиеся представления в физике твердого тела. Такой сюрприз ожидал группу ученых из Швейцарии и Германии, изучавшую с помощью оптических методов особенности динамики электронов и дырок в графене, помещенном в магнитное поле [1]. В качестве измеряемой характеристики они выбрали угол вращения плоскости поляризации света (магнитооптический эффект Фарадея). В обычных магнитооптических материалах, угол фарадеевского вращения пропорционален оптическому пути и составляет единицы градусов на длине порядка десяти микрон. Каково же было изумление ученых, когда обнаружилось, что поворот плоскости поляризации инфракрасного излучения на одном лишь атомном слое графена составляет внушительные 6 градусов!

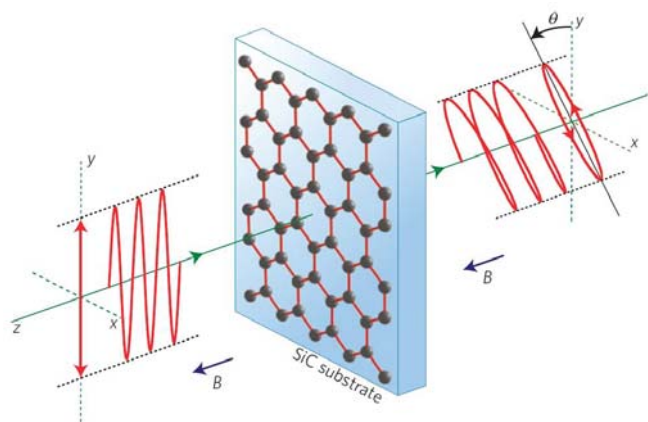


Рис. 1. Магнитооптический эффект Фарадея на одном слое графена: поворот плоскости поляризации около 6 градусов в магнитном поле 7 Тесла

Гигантский эффект Фарадея авторы работы [1] связывают с циклотронным резонансом: в магнитном поле электроны начинают двигаться по круговым орбитам. Подобное явление наблюдается в двумерных электронных газах, реализующихся в полупроводниковых гетероструктурах, однако те же углы фарадеевского вращения набираются светом при прохождении сквозь слои, в десятки раз превышающих по толщине графен. Здесь сказывается специфика дисперсионных свойств электронов в графене: они ведут себя как безмассовые частицы (дираковские фермионы), скорость которых не зависит от энергии, что проявляется и в неэквидистантном рас-

положении уровней Ландау, переходы между которыми определяют частоты циклотронного резонанса и влияют на прохождение поляризованного света.

У графена есть еще одно преимущество перед полупроводниковыми конкурентами - его степень легирования и даже тип проводимости могут изменяться под действием электрического поля, что позволяет не только перестраивать частоту циклотронного резонанса, но и переключать знак эффекта. Это позволит создавать миниатюрные невзаимные оптические элементы (устройства, пропускающие свет в одном направлении и не пропускающие в противоположном). Они будут переключаться с частотой, недостижимой для ныне используемых ячеек Фарадея, управляемых инерционными и громоздкими катушками индуктивности. Возможность управления с помощью электрического поля компенсирует также и тот недостаток, что углы вращения в несколько градусов наблюдаются в графене при достаточно больших полях (единицы и десятки Тесла). Теперь для создания магнитного поля можно использовать не потребляющие энергию постоянные магниты, а перестройку характеристик элемента осуществлять электрическим полем.

Однако проблемы еще остаются. В частности, для создания дисплеев желательно получать угол вращения 90 градусов. Эффект Фарадея от многослойного графена, как показано все в той же работе [1], не является простой суммой эффектов в каждом слое и может быть даже меньше, чем в монослое.

А.Пятаков

1. I. Crassee et al., *Nature Phys.* **7**, 48 (2011).

На краю графена

Характеристики многих наноразмерных устройств очень чувствительны к локальной конфигурации атомов, поэтому чрезвычайно важным становится анализ электронных состояний наноструктур на атомном масштабе. Так, например, электрические свойства графеновых нанолент определяются не только их шириной, но и формой границ ("кресельные" или зигзагообразные). Информацию о структуре этих границ дают просвечивающая электронная и сканирующая туннельная микроскопия, тогда как их электронные свойства до сих пор не удавалось изучить с атомарным разрешением. В работе японских физиков [1] этот пробел удалось восполнить, используя сканирующую просвечивающую электронную спектроскопию и анализ тонкой структуры спектров поглощения электронов отдельными атомами. Исследование монослоя графена показало, что спектры атомов, расположенных вдали от границы (имеющих по три ближайших соседа и sp^2 -гибридизованные орбитали), отличаются от спектров граничных атомов, которые, в свою очередь, тоже имеют разный вид для атомов с одним и двумя соседями (см. рис.).

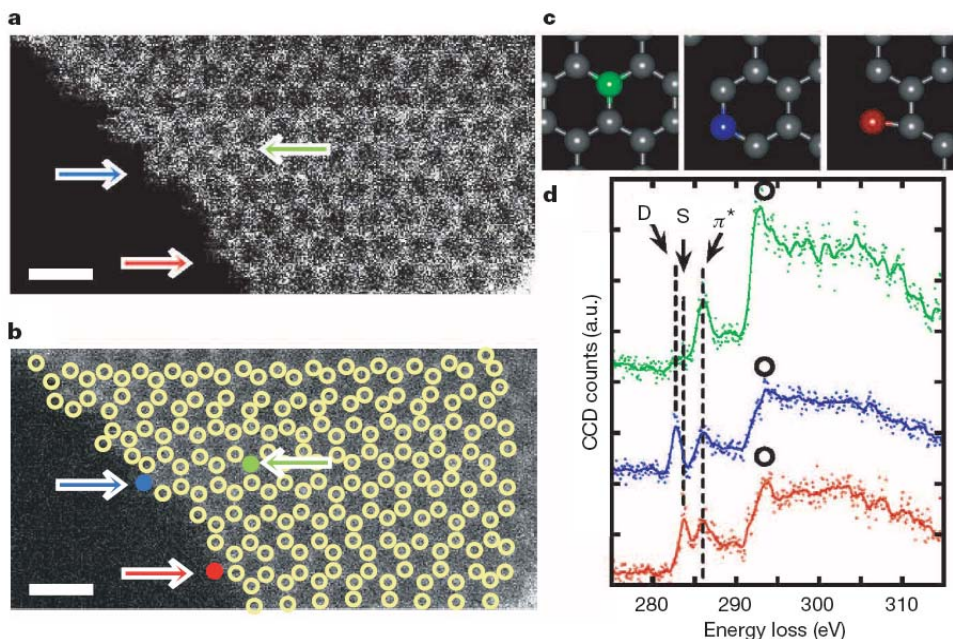


Рис. 1. Спектроскопическое изображение монослоя графена вблизи его границы: *a* – без обработки, *b* – положения атомов помечены кружками (стрелки указывают на однократно, двукратно и трехкратно координированные атомы, длина масштабной линейки 0.5 нм), *c* – атомные конфигурации, *d* – спектры атомов с различными координационными числами.

Интересно, что при отходе от границы спектры меняются не резко: существует переходная область шириной около 1.5 нм, в которой наличие границы еще сказывается на электронных состояниях (а значит – и на межатомных связях). Это важно для понимания свойств очень узких графеновых нанолент. Используемая в [1] методика пригодна для изучения локальных электронных характеристик не только твердотельных наноструктур, но и отдельных молекул.

1. K.Suenaga, M.Koshino, *Nature* **468**, 1088 (2010).

СПИНТРОНИКА

Транзистор на спиновом эффекте Холла

Исследования по таким направлениям полупроводниковой спинтроники, как спиновый транзистор и спиновый эффект Холла до сих пор проводились независимо друг от друга [1]. В работе [2] (Великобритания, Чехия, США) они объединены воедино: из гетероструктуры AlGaAs/GaAs изготовлен спиновый транзистор, в котором для регистрации спинового тока использован эффект Холла, опять же спиновый. Инжекция спинов осуществлялась путем воздействия сфокусированного поляризованного лазерного излучения (то есть без ферромагнитных контактов), а их прецессия, индуцированная спин-орбитальным взаимодействием, контролировалась электрически посредством управляющих электродов. Открытие и закрытие канала для спинового тока имело место при напряжении менее 1 В. Для канала с двумя электродами была, в частности, реализована логическая операция AND. Хотя в [2] представлены результаты, полученные при $T = 4$ К, авторы утверждают, что их устройство работает и при более высоких температурах.

1. I. Žutić et al., *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).

2. J.Wunderlich et al., *Science* **330**, 180 (2010).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Новые мечты о настольном синхротроне

Рентгеновское синхротронное излучение (СИ) однозначно доказало свое преимущество перед излучением из рентгеновских трубок по своим возможностям в многочисленных областях науки и производства. Однако необходимость строить специальные ускорители для получения СИ резко ограничивает число потенциальных пользователей по сравнению с достаточно дешевыми рентгеновскими трубками. Попытки заполнить диапазоны между трубками и ускорителями в виде создания компактного и относительно недорогого “настольного” синхротрона предпринимались не один раз (см. ПерсТ [1]). Благодаря прогрессу ускорительной и лазерной техники возникла реальная возможность создания лазерно-электронного генератора СИ, в котором используется компактный сильноточный электронный ускоритель и лазер, испускающий интенсивные световые импульсы (см. обзор [2]). Само излучение возникает вследствие рассеяния фотонов на электронном пучке (комптоновское или томсоновское рассеяние). В недавней работе [3] международная группа из Англии, Франции, Португалии и США продемонстрировала работу подобного источника с перестройкой СИ в диапазоне 1-100 кЭВ с яркостью в 1000 раз большей, чем у предшественников. Правда, чтобы назвать такую машину настольной, требуется ну очень большой стол (~100 м²). Сравнительные характеристики различных источников СИ приведены в таблице.

Согласно [2], характеристики излучения лазерно-ускорительного генератора создают хорошую перспективу для его оснащения многофункциональным оборудованием, позволяющим реализовать в одном центре многие методы по исследованию рентгеновских спектров и рентгеновского рассеяния.

Характеристики различных источников рентгеновского излучения
(все числа приближительные)

Источник	Яркост источника рентгеновского излучения, фот/(с·мм ² ·мрад ²)	Возможность перестройки по энергии	Колимированность и поляризация излучения	Площадь, занимаемая установкой, м ²	Количество станций на установке, шт.	Стоимость (порядок величины), Млн. \$
Рентгеновская трубка	10 ⁸	нет	нет	1	1	0.01-0.1
Лазерно-электронный генератор	10 ¹²	есть	есть	100	1-3	1-10
Источник СИ третьего поколения	10 ¹⁸ – 10 ²⁰	есть	есть	10000	20-50	100

С.Овчинников

1. [Перст II, вып. 9, с. 5 \(2004\).](#)
2. И.А.Артюков и др., *Препринт НИИЯФ МГУ № 7/806 (2006);* <http://dbserv.sinp.msu.ru:8080/sinp/files/pp-806.pdf>
3. S.Kneip et al., *Nature Phys.* **6**, 980 (2010).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Ионная диффузия в плотноупакованном комплексе из углеродных нанотрубок

В этом году исполняется двадцать лет с момента открытия новой аллотропной формы углерода – столь популярных теперь углеродных нанотрубок. В ноябре далекого 1991 в *Nature* появилась статья S. Iijima о первом синтезе этих уникальных объектов наномира [1]. И с тех пор интерес к углеродным нанотрубкам не угасает, а Iijima, теперь уже возглавляя целый исследовательский центр в Цукубе (Nanotube Research Center), продолжает публиковать интересные работы. В центре внимания одной из последних статей [2], где он выступает соавтором, оказался пористый наноматериал, полученный из распрямленных одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Из него были изготовлены электроды электрохимических конденсаторов, т.е. устройств, где накопление заряда происходит в двойном электрическом слое на границе электронного проводника и электролита. За счет улучшенного ионного транспорта такие электроды оказываются гораздо более эффективными, чем, ставшие уже традиционными, электроды из активированного углеродного волокна (АУ-электроды).

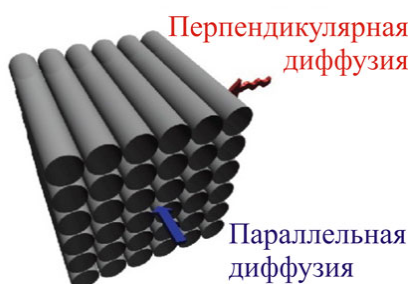


Рис. 1. Схематическое изображение плотноупакованного комплекса из одностенных углеродных нанотрубок.

Сами образцы представляли собой плотноупакованный комплекс (плотность = 0.5 г/см³), состоящий из одностенных нанотрубок со средним диаметром 2.6 нм (рис. 1), выстроенных вдоль выделенного направления. Расстояние между нанотрубками по результатам рентгеновской дифракции варьировалось от 4 до 16 нм, а эффективный диаметр пор между упакованными ОУНТ составил около 3 нм. Данные комплексы использовались авторами в качестве мембран между отсеками электролита и растворителя (см. вставку на рис. 2), а ионная проводимость измеряли на отсеке растворителя и переводили в концентрацию с помощью калибровочной кривой. Для расчета коэффициента диффузии использовали первый закон Фика. Для сравнения, авторы провели соответствующие измерения для коммерческих АУ-электродов, отметив, что их плотность соответствует плотности ОУНТ комплексов.

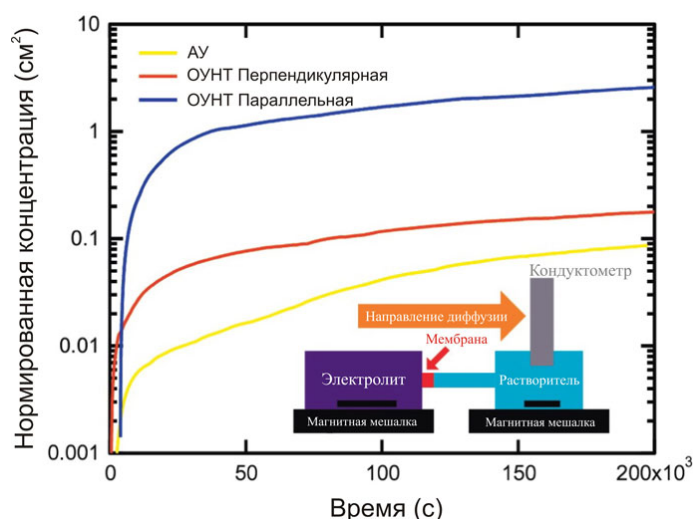


Рис. 2. Зависимости “концентрация-время” для ОУНТ комплексов в параллельной (отмечены синим цветом) и перпендикулярной (отмечены красным) конфигурации и для АУ-электродов (отмечены желтым).

На рис. 2 показаны полученные зависимости нормированной концентрации от времени для ОУНТ образцов с параллельной и перпендикулярной ориентацией, а также для АУ-электродов. В результате

оказалось, что коэффициент диффузии в параллельном направлении в 12 раз выше, чем в перпендикулярном (1×10^{-5} см²/с против 8×10^{-7} см²/с) и в 20 раз выше, чем у коммерческих образцов (5×10^{-7} см²/с). В дальнейшем авторы исследовали влияние анизотропии диффузии непосредственно на электрохимическом конденсаторе: в качестве электродов использовали ОУНТ образцы, как в параллельной, так и в перпендикулярной конфигурации. Как и ожидалось, более высокий максимум мощности достигался при параллельной конфигурации образца: 3 кВт/кг против 1.85 кВт/кг для перпендикулярной. Авторы уверены, что проведенные ими исследования доказывают, что дальнейшее наращивание мощности электрохимических конденсаторов возможно при правильном выборе конфигурации электродов, т.е. выровненные УНТ электроды должны быть ориентированы параллельно основному направлению ионного транспорта. Вполне возможно, что в скором времени электроды на основе углеродных нанотрубок составят достойную конкуренцию уже существующим альтернативам.

М. Маслов

1. S.Iijima, *Nature* **354**, 56 (1991).
2. A.Izadi-Najafabadi et al., *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 18017 (2010).

Электроды для газового разряда на основе углеродных нанотрубок

Электроды на основе углеродных нанотрубок (УНТ) хорошо себя зарекомендовали в вакуумных приборах с холодными полевыми катодами. Это связано с хорошей электропроводностью УНТ, а также с их высоким аспектным отношением (отношение длины к диаметру), благодаря которому достигается значительное усиление электрического поля вблизи наконечника нанотрубки. Использование катодов на основе УНТ в газоразрядных устройствах наталкивается на проблему, связанную с ионной бомбардировкой поверхности нанотрубок, приводящей к их быстрому разрушению. Однако прежде чем приступить к преодолению этой трудности, необходимо располагать количественными данными о преимуществах использования катода на основе УНТ перед стандартным вольфрамовым катодом, имеющим форму конуса. Такие данные были получены в Shizuoka Univ. (Япония) [1].

В качестве исходного катода использовался W конус в форме заточенного карандаша, полученный в результате химического травления W проволоки диаметром 30 мкм. Радиус кривизны наконечника конуса составлял 100 нм. На вершину этого конуса с помощью магнетронной напылительной установки в течение 40с напыляли частицы никеля, используемые в качестве катализатора роста УНТ. Синтез многослойных УНТ проводили на подготовленной таким образом поверхности с использованием метода CVD в потоке NH₃ и C₂H₂ (соотношение 3:1 при полном давлении 30 Торр и температуре

900°C). С целью обеспечения вертикальной ориентации УНТ относительно поверхности подложки синтез проводился под действием электрического напряжения (100 В), прикладываемого к вспомогательному титановому электроду, расположенному на расстоянии 2 мм от катода. При продолжительности синтеза от 5 до 15 мин от поверхности катода отрастали нанотрубки диаметром 50 – 100 нм и длиной около 15 мкм. В качестве анода использовали плоскую стальную пластину, отстоящую от катода на расстоянии 80 мкм. Для оценки коэффициента усиления электрического поля для W катода и катода на основе УНТ в условиях вакуума (10^{-6} Торр) были измерены эмиссионные вольт-амперные характеристики катодов. Обработка результатов этих измерений позволила определить значения коэффициента усиления поля β , оказавшиеся равными 60 и 960, соответственно. Такая большая разница обусловлена различием в величинах аспектного отношения для двух структур катода.

Затем измеряли вольт-амперные характеристики разряда в атмосфере различных газов (He, Ar, H₂, N₂, воздух, O₂, NH₃) при давлении 10 Торр. Результаты измерений указывают на существенное улучшение характеристик разряда в случае покрытия поверхности катода нанотрубками. Так, в атмосфере He такая модификация сопровождается снижением напряжения зажигания разряда с 230 до 181 В и увеличением разрядного тока с 12 до 20 мкА. Аналогичная закономерность наблюдается в случае заполнения межэлектродного промежутка другими газами, хотя абсолютные величины напряжения зажигания и величины разрядного тока зависят от типа газа.

Характер деградации катода на основе УНТ изучали в циклическом режиме при наложении на анод пилообразного напряжения. Результаты выполненных измерений указывают на незначительное (на уровне 4%) увеличение напряжения зажигания разряда в аргоне после 300 импульсов длительностью в несколько десятков секунд каждый. Наряду с этим отмечается примерно 10%-ное снижение разрядного тока. Несмотря на указанные тенденции, параметры разряда с УНТ катодом остаются существенно более высокими по сравнению с чисто W катодом, что указывает на высокую эффективность использования нанотрубок в катоде газового разряда.

А. Елецкий

1. D.Liang et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 275202 (2010).

КОНФЕРЕНЦИИ

Двенадцатая международная конференция “Физика диэлектриков”, 23 – 26 мая 2011, Санкт-Петербург, Россия

Секции конференции:

1. Процессы переноса, накопления и релаксации заряда в диэлектриках.

2. Оптика и спектроскопия диэлектриков.
3. Электрофизика структур, содержащих диэлектрические слои.
4. Электронные и оптические явления в наноструктурированных диэлектриках.
5. Аморфные и стеклообразные диэлектрики.
6. Полимерные композиционные диэлектрики.
7. Электретный эффект и его применения.
8. Диэлектрики в экстремальных условиях.
9. Физические основы и методы диагностики и технологии изготовления диэлектриков.

E-mail: psme@herzen.spb.ru

Web: <http://www.herzen.spb.ru>

XIX Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС – XIX) 20 –23 июня 2011 г., г. Москва, Россия

Программа конференции:

1. Фазовые переходы, критические явления.
2. Теоретические модели.
3. Структура и динамика кристаллической решетки.
4. Физические свойства сегнетоэлектриков (монокристаллы, керамика, композиты, жидкие кристаллы, новые материалы).
5. Сегнетоэлектрики-релаксоры.
6. Мультиферроики.
7. Доменная структура и процессы переключения.
8. Сегнетоэлектрические пленки, сверхрешетки и наноструктуры, размерные эффекты в сегнетоэлектриках.
9. Оптические свойства сегнетоэлектриков (фоторефракция, нелинейная оптика, оптические волноводы).
10. Сегнетоэлектрики на сверхвысоких частотах.
11. Практические применения (сегнетоэлектрическая память, пиро- и пьезоэлектрические устройства).

Контрольные даты:

20 февраля 2011 г. – последний день поступления тезисов и регистрационной формы

Web: <http://www1.mirea.ru/conf/vks/>

19th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, 20 - 25 June 2011, Ekaterinburg, Russia

Main Topics

1. Technology of Nanostructures: Growth, Self-Organization and Nanopatterning
2. Atomic-scale Characterization of Nanostructures
3. Electrical and Optical Properties of Nanostructures (including Spin-related Phenomena, Many Particle Effects, Infrared and THz Phenomena)
4. Nanostructure Device Applications in Opto-Ultrafast Electronics and Computing
5. Nanophotonics, Microcavity and Photonic Crystals: Properties, Characterization and Applications
6. Emerging Materials in Nanostructures (including Wide-bandgap Semiconductors, Oxides, Ferromagnetics, Carbon-based, Polymer and Biomaterials)
7. Nanostructures and Life Sciences
8. Metamaterials

Web: <http://www.ioffe.ru/NANO2011/>

International Conference “Resonances in Condensed Matter” devoted to the centenary of S.A. Altshuler, 21-25 June 2011, Kazan, Russia

Main Topics

1. Electron paramagnetic resonance (EPR), nuclear magnetic resonance (NMR), acoustic magnetic resonance (AcMR), ferromagnetic resonance (FMR) and antiferromagnetic resonance (AFMR) in condensed matter
2. Enhanced nuclear magnetic resonance in Van-Vleck paramagnets
3. Magnetic relaxation
4. Optical spectroscopy of paramagnetic crystals
5. Magnetic resonance in high magnetic fields
6. Magnetic resonance in medicine, informational and nanotechnologies

Important dates

Deadline for the registration, receiving of Abstracts and visa applications - **April 1 2011**

Web: <http://Alt100.ksu.ru>

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, М.Маслов,
С.Овчинников, Л.Опенков, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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