

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сюрприз от передопированных купратов или куда пропали электроны?

“Передопированными” называют сверхпроводники, в которых концентрация носителей заряда больше оптимальной (отвечающей максимуму критической температуры T_c) величины. Долгое время считалось, что к передопированным купратным ВТСП применима обычная теория БКШ, согласно которой слабое притяжение между электронами вблизи поверхности Ферми (например, за счет их взаимодействия с фононами) приводит к образованию куперовских пар, формирующих сверхпроводящий бозе-конденсат. На первый взгляд, в сверхпроводимости участвует лишь малая доля электронов. Однако на самом деле это не так: концентрация “сверхпроводящих электронов” (так называемая сверхтекучая плотность) близка к полной концентрации электронов проводимости в образце, что экспериментально доказано для обычных низкотемпературных сверхпроводников. Но в купратных ВТСП дела обстоят по-другому. Детальные исследования передопированных купратов $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ с различными x (всего было изучено более 2000 образцов) [1] показали, что в них сверхтекучая плотность гораздо меньше, чем предсказывает теория БКШ (рис. 1а). Впечатление такое, что большинство электронов куда-то исчезло. Еще один интересный результат работы [1] – обнаружение линейной зависимости сверхтекучей плотности от T_c почти во всем диапазоне допирования (рис. 1б) – опять же в противоречии с теорией БКШ.

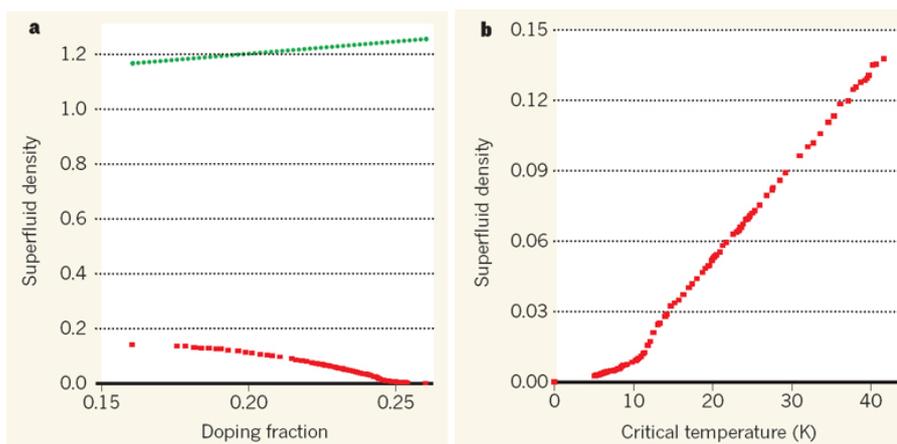


Рис. 1. Сверхтекучая плотность в расчете на элементарную ячейку $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ как функция уровня допирования (а) и критической температуры (б). Красный цвет – эксперимент [1], зеленый цвет – теория БКШ.

Таким образом, приходится констатировать, что мы пока далеки от понимания физики не только недодопированных ВТСП (с чем все вроде бы уже свыклись), но и передопированных тоже (что оказалось полной неожиданностью). Одна радость – надежных экспери-

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 2 Уроки природы.
Скопированные у бабочек
гибридные наноструктуры
лучше оригинала!

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Высокотемпературный
сверхпроводник и
топологический диэлектрик
“в одном флаконе”

ГРАФЕН

- 4 Эффективная очистка
эпитаксиального графена от
полимеров

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 5 Шестой Евро-азиатский
симпозиум “Тенденции в
магнетизме” EASTMAG-2016

КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 Week of Science “Horizons of
Magnetic Resonance”,
31 October - 4 November 2016
including the annual International
Conference “Modern Develop-
ment of Magnetic Resonance
2016” and the anniversary
Zavoisky Award 2016 ceremony,
Kazan, Russia

ментальных данных становится все больше, хотя и не так быстро, как нам бы того хотелось. Остается только хорошенько подумать и все эти данные скопом объяснить. Нужны мозги...

По материалам заметки
 “Superconducting electrons go missing”, J.Zaanen,
Nature **536**, 282 (2016).

I. I.Bozovic et al., *Nature* **536**, 309 (2016).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Уроки природы. Скопированные у бабочек гироидные наноструктуры лучше оригинала!

Изучение природных наноструктур и связанных с ними функциональных свойств живых организмов помогает ученым создавать интересные биомиметические аналоги. Бабочки со структурной окраской являются одними из наиболее важных и популярных объектов исследований. Копируя микро/наноструктуру хитиновых чешуек, которыми покрыты крылья, можно синтезировать полимерные пленки, сочетающие свойства фотонного кристалла и супергидрофобность, или лёгкие светоотражающие покрытия для солнечных концентраторов (подробнее см. ПерсГ [1,2]). Как показали недавние исследования [3,4], чешуйки некоторых видов бабочек, в том числе зеленой бабочки *Callophrus rubi*

(рис. 1А), состоят из гироидных фотонных наноструктур (рис. 1В). Гироид – непрерывная (без самопересечений) бесконечно повторяющаяся в трёх измерениях структура с минимальной поверхностью*. Материалы с такой структурой демонстрируют интересные оптические эффекты, например, круговой дихроизм (различие поглощения для света правой и левой круговых поляризаций). Однако синтезировать 3D гироидные структуры, аналогичные природным, чрезвычайно сложно. Существующие технологии либо не обеспечивают нужного разрешения (< 100 нм), либо не позволяют создать объёмные наноструктуры. Ученым из Австралии впервые удалось воспроизвести гироидные наноструктуры чешуек бабочки *Callophrus rubi* и даже улучшить их оптические свойства (рис. 1С,Д,Е) [4]. Они разработали метод оптической двухлучевой литографии высокого разрешения для создания 3D структур (рис. 2) [5].

Используя свой метод, исследователи получили гироидные структуры в виде усеченных пирамидок с постоянной решетки от 300 до 550 нм (рис. 1С), механическая прочность которых выше, чем у структур, полученных методом однолучевой литографии (кстати, у природных гироидных структур в чешуйках прочность обеспечивают дополнительные соединения (рис. 1В).

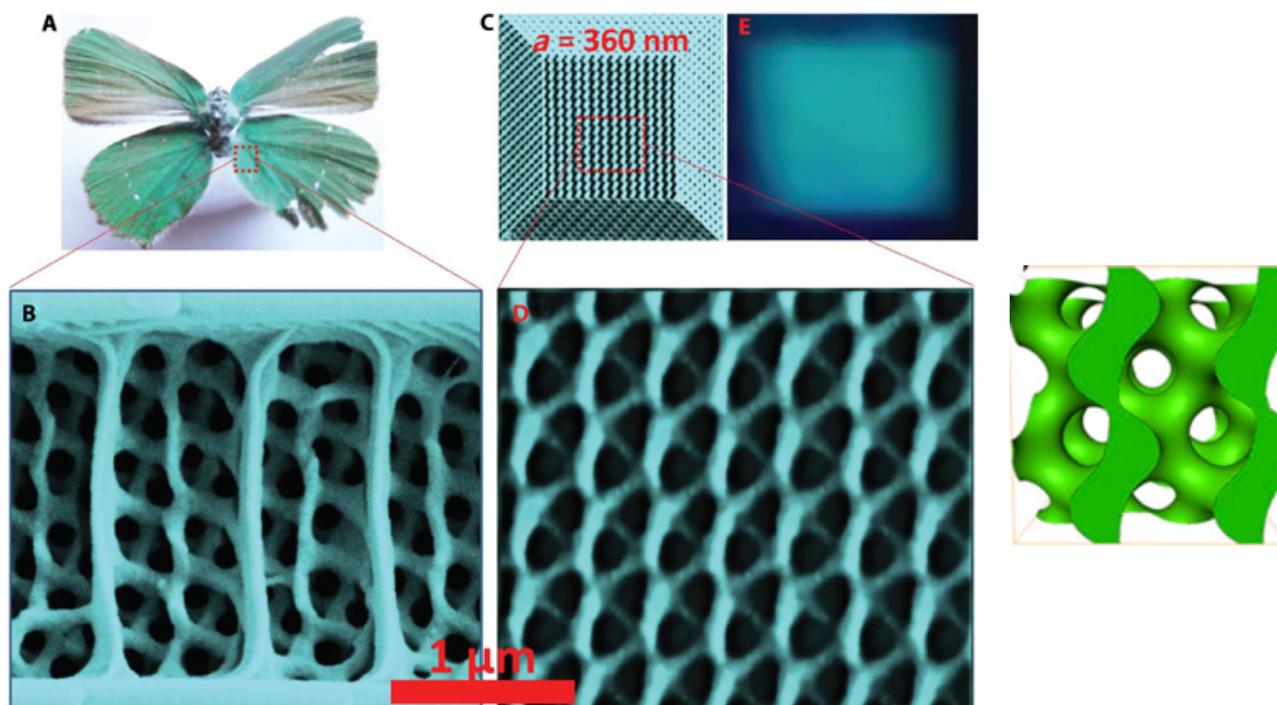


Рис. 1. А - Фотография бабочки *Callophrus rubi*. В - SEM изображение наноструктуры, обнаруженной в крыле (периодичность ~ 350 нм). С, D - Искусственная гироидная структура, созданная авторами [4]. Постоянная решетки 360 нм, размеры 20x20x4 мкм. Е - Микроскопическое изображение искусственного гироида в отраженном белом свете. Справа приведена модель хитиновой гироидной структуры чешуйки крыла бабочки *Callophrus rubi* (2x2x2 элементарные ячейки) [3].

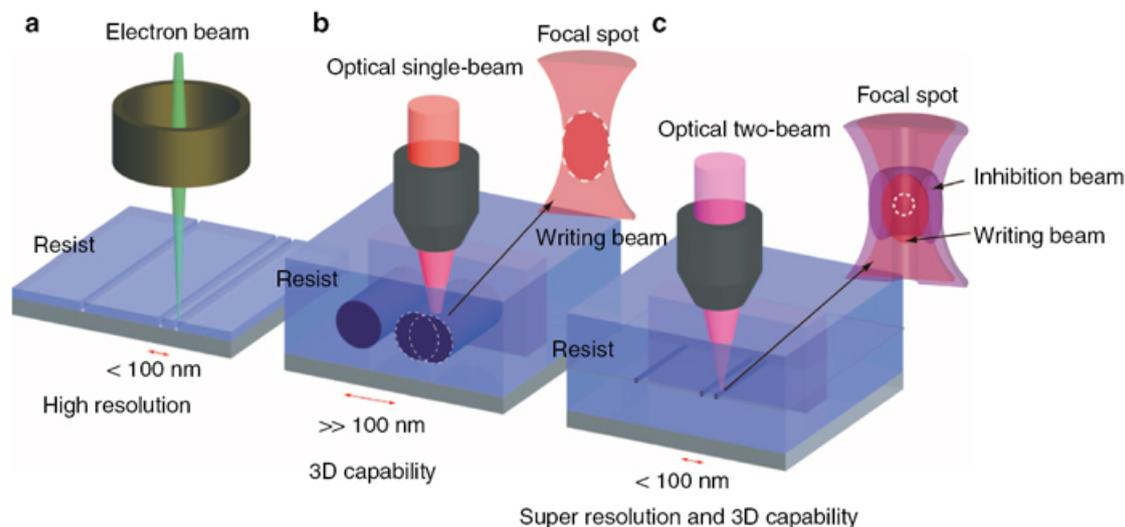


Рис. 2. Сравнение различных видов литографии: а - электронно-лучевая обеспечивает высокое разрешение, но не годится для создания 3D структур; б - однолучевая оптическая литография способна создать 3D структуры любой геометрии, но дифракция света ограничивает разрешение; в - двухлучевая оптическая литография создает 3D структуры с высоким разрешением благодаря ингибирующему лучу [5].

Сине-зеленый цвет биомиметической структуры такой же, как и у крыльев бабочки (рис. 1Е). Это говорит о высоком качестве искусственных гироидов. Более того, они проявляют заметный круговой дихроизм в отличие от природных, оптические свойства которых хуже из-за структурной неоднородности. Спектры пропускания для двух гироидных структур приведены на рис. 3. Результаты экспериментов и моделирования хорошо согласуются и показывают наличие запрещенных зон и кругового дихроизма в видимом диапазоне. При изменении постоянной решетки от 360 до 300 нм структурная окраска меняется от сине-зеленой до синей.

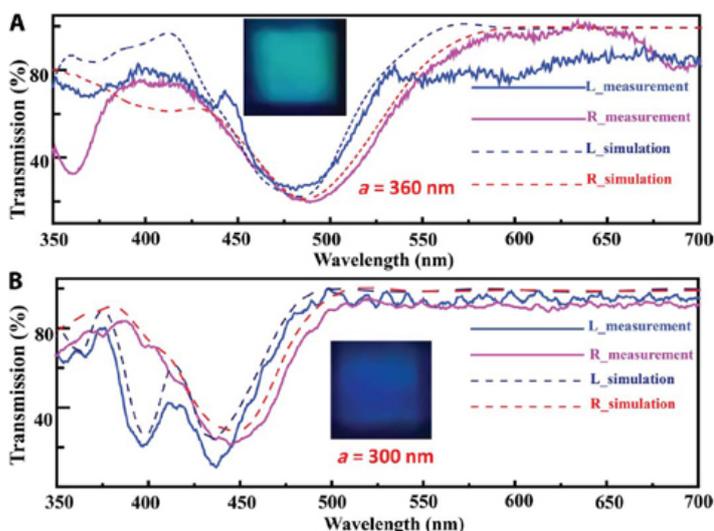


Рис. 3. Результаты моделирования и экспериментальные спектры пропускания гироидных структур с постоянной решетки 360 нм (А) и 300 нм (В).

Таким образом, австралийские ученые не просто скопировали гироиды бабочек, но разработали метод получения более прочных лёгких структур с регулируемыми оптическими свойствами. Они мо-

гут быть использованы в оптоэлектронных устройствах, работающих в видимом и ближнем УФ диапазоне.

О.Алексеева

* Впервые гироиды были описаны в 1970 г американским ученым Аланом Шоэном, когда он работал в NASA. (A.H. Schoen "Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections" Technical Notes TN D-5541, NASA, 1970).

1. [ПерсТ 19, вып. 24, с. 3 \(2012\).](#)
2. [ПерсТ 22, вып. 21, с. 5 \(2015\).](#)
3. B. Winter et al., PNAS 112, 12911 (2015).
4. Z. Gan et al., Science Adv. 2, e1600084 (2016).
5. Z. Gan et al., Nature Commun. 4, 2061 (2013).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Высокотемпературный сверхпроводник и топологический диэлектрик "в одном флаконе"

Однослойные пленки FeSe представляют собой высокотемпературные сверхпроводники с критической температурой $T_c \approx 70$ К (на порядок больше T_c объемных образцов FeSe). В работе [1] (Китай, США) теоретически (расчеты из первых принципов) и экспериментально (сканирующая туннельная и фотоэмиссионная спектроскопия) показано, что монослой FeSe на подложке SrTiO₃ (рис. 1) является не только сверхпроводником (при электронном допировании), но еще и (при дырочном допировании) антиферромагнитным топологическим диэлектриком: в нем имеются как краевые топологические состояния, так и диэлектрическая щель шириной ~ 40 мэВ (рис. 2), которая открывается на фоне антиферромагнитного порядка (рис. 3) за счет спин-орбитального взаимодействия.

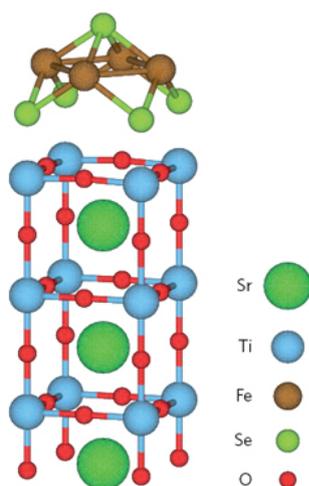


Рис. 1. Кристаллическая структура монослоя FeSe на подложке SrTiO₃ (001).

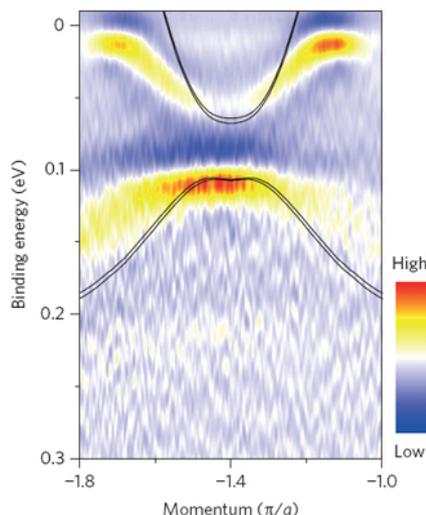


Рис. 2. Зонная структура FeSe/SrTiO₃ в окрестности точки М зоны Бриллюэна. Теоретические расчеты (черные линии) и данные фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением.

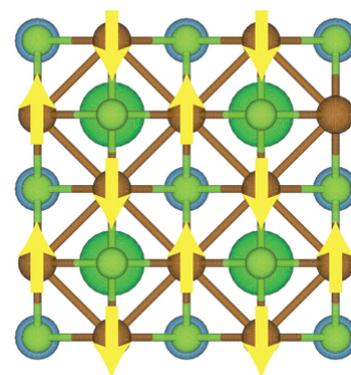


Рис. 3. Шахматный антиферромагнитный порядок в FeSe. Желтые стрелки – магнитные моменты атомов железа. Показаны также атомы подложки: Sr (большие зелёные кружки) и Ti (синие кружки).

“Перепутывание” топологического диэлектрического состояния со сверхпроводящим может привести к новым интересным эффектам.

Л.Опенюв

1. Z.F.Wang et al., Nature Mater. 15, 968 (2016).

ГРАФЕН

Эффективная очистка эпитаксиального графена от полимеров

Получение графена высокотемпературной сублимацией карбида кремния (SiC) демонстрирует хорошую воспроизводимость и масштабируемость, в отличие от микромеханического отшелушивания. Однако дальнейшее его применение, например, при создании приборов и устройств нанoeлектроники, зачастую требует использования различных полимеров (полиметилметакрилат, pLOF и др.), что приводит к ухудшению ряда характеристик графена, таких как подвижность носителей заряда. Одной из причин этого является его сильная восприимчивость к загрязнению молекулами полимеров: так называемые остаточные полимеры задерживаются на графене, создавая различные эффекты допирования, в частности, изменяя его зонную структуру. Поэтому в научной периодике регулярно поднимается вопрос о важности процедуры очистки с целью восстановления его первоначальных электронных характеристик.

Авторы работы [1] экспериментально, с помощью электронотранспортных измерений и резонансной микро-рамановской спектроскопии, доказали эффективность очищения эпитаксиального графена на SiC подложке от остаточных полимеров озонированием. При этом данная процедура не только значи-

тельно снижает содержание допантов на графене, но и улучшает подвижность носителей заряда, исключая появление дефектов кристаллической решетки графенового листа. Кроме того, авторы установили, что эпитаксиальный графен на SiC чрезвычайно устойчив к воздействию агрессивных радикалов кислорода. Они связывают этот эффект с рельефом подложки, поскольку дополнительное компьютерное моделирование показало, что шероховатость графенового листа способна значительно (на несколько десятых электронвольт) изменять энергию образования эпоксигруппы. Такие вариации достаточны для переключения между двумя процессами в зависимости от локальной кривизны графена: формированию эпоксигрупп и образованию молекул кислорода.

Таким образом, кривизна графена существенно влияет на его устойчивость при обработке озоном. Оказывается, “неплоский” графен менее устойчив к очистке озоном, чем идеальный из-за наличия выпуклых областей, более химически активных к образованию эпоксигрупп. Таким образом, одной из причин повышенной устойчивости эпитаксиального графена на SiC к озонированию является его низкая шероховатость по сравнению, например, с графеном, выращенным методом химического газофазного осаждения на медной фольге и перенесенным в дальнейшем на соответствующую подложку. Авторы считают, что полученные ими результаты можно рассматривать как важный технологический шаг на пути к созданию электронных устройств, содержащих графеновые элементы.

М. Маслов

1. V.S.Prudkovskiy et al., Carbon 109, 221 (2016).

ПерТ, 2016, том 23, выпуск 17

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Шестой Евро-азиатский симпозиум “Тенденции в магнетизме” EASTMAG-2016

С 15 по 19 августа 2016 г. в Красноярске состоялась крупная международная конференция Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”, EASTMAG-2016. Она продолжила серию проводимых каждые три года научных симпозиумов, собирающих специалистов по магнетизму в одном из городов евразийского пространства России от Казани (самое западное место проведения EASTMAG) до Владивостока. Красноярск и Екатеринбург, в которых чаще всего проводится конференция, организаторы называют своеобразной “осью” EASTMAG. В работе симпозиума приняло участие 332 ученых из 18 стран мира (среди иностранных участников традиционно сильно представительство Японии и Тайваня).

Симпозиум открыл пленарный доклад Садамичи Маекавы (Sadamichi Maekawa) “Спиновая мехатроника”. Начав с классических опытов Эйнштейна-де Гааза, он развернул обширную панораму механомагнитных явлений, в которых проявляется связь между вращением и магнетизмом. В конце доклада проф. Маекава представил свою идею “спингидродинамического генератора”. Подобно МГД генератору, электрическое напряжение в нем возникает при протекании проводящей жидкости (в данном случае жидкого металла), но природа эффекта не имеет ничего общего с силой Лоренца. Градиент скорости, естественным образом возникающий в любом русле за счет трения, вызывает вихревое движение, усиливающееся по мере приближения к краям трубки. Это неоднородное поле угловых скоростей вращения жидкости порождает за счет магнитомеханической связи градиент спиновой концентрации и, как следствие, спиновый ток в поперечном направлении. Наконец, за счет обратного спинового эффекта Холла возникает электрическое напряжение вдоль трубки тока жидкости. Так механическое движение при посредничестве спинтроники порождает электрический ток.

Актуальная скирмионная тематика была отражена в пленарном докладе проф. Михаэля Фарле (Michael Farle), из Университета Дуйсбурга. Видеопрезентация позволила публике лишней раз убедиться, насколько похожа картина формирования скирмионов в магнитном поле на процесс образования решетки цилиндрических магнитных доменов. Междисциплинарный характер носил доклад Рассела Коубёрна (Russell Cowburn) из британского Кембриджа, в котором он рассказывал о том, как вращение магнитных наночастиц в форме дисков в низкочастотном магнитном поле можно использовать в борьбе со злокачественными опухолями мозга.

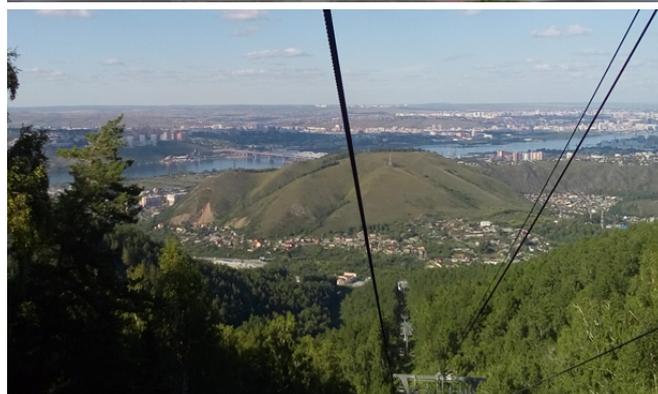


Рис. 1. Открытие конференции в Конгресс-холле Красноярского университета (а); Конгресс-холл Сибирского федерального университета (б); вид на Красноярск с фуникулера (с).

Культурная программа конференции включала в себя дневные туры по городу и вечернюю экскурсию “Огни Красноярска”, а также поездку в заповедник “Красноярские Столбы”. Для желающих уже после завершения конференции предлагался двухдневный водный тур вдоль живописных берегов реки Бирюсы.

А. Пятаков

КОНФЕРЕНЦИИ

Week of Science “Horizons of Magnetic Resonance”, 31 October - 4 November 2016 including the annual International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance 2016” and the anniversary Zavoisky Award 2016 ceremony, Kazan, Russia

For the first time the International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance 2016” hosts the section “Perspectives of magnetic resonance in science and spin technology” and the workshop “Quantum information processing with spins”, to which outstanding scientists are to be invited.

Zavoisky Awardees 2016 are Michael Bowman (University of Alabama, Tuscaloosa, USA) and Arnold Raitsimring (University of Arizona, Tucson, USA).

Topics

- Perspectives of magnetic resonance in science and spin technology
- Theory of magnetic resonance
- Low-dimensional systems and nano-systems
- Electron spin based methods for electronic and spatial structure determination in physics, chemistry and biology
- Molecular magnets and liquid crystals
- Spin-based information processing
- Strongly correlated electron systems
- Chemical and biological systems
- Medical physics
- Magnetic resonance imaging
- Other applications of magnetic resonance
- Modern methods of magnetic resonance
- Magnetic resonance instrumentation
- Related phenomena

Website: www.kfti.knc.ru/mdmr/2016

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

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, М. Маслов, Л. Опенов, А. Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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