

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Увеличение критической температуры двумерных сверхпроводников в магнитном поле

Согласно микроскопической теории сверхпроводимости БКШ, критическая температура T_c уменьшается при увеличении магнитного поля H . Это обусловлено двумя обстоятельствами: 1) повышением кинетической энергии сверхпроводящих электронов (орбитальное распаривание) и 2) ориентацией спинов электронов в одном направлении (парамагнитное распаривание). В работе [1] американские физики сообщили о наблюдавшемся ими в параллельном магнитном поле увеличении T_c ультратонких аморфных пленок свинца (α -Pb) и двумерного электронного газа на границе раздела $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$. Эффект хоть и небольшой, но выражен достаточно четко (рис. 1 и рис. 2).

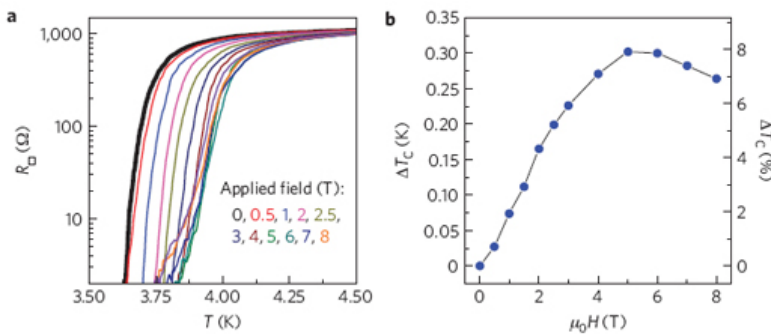


Рис. 1. Резистивные сверхпроводящие переходы пленки α -Pb толщиной 2.11 нм в магнитном поле $H = 0 \div 8$ Тл (а) и изменение T_c как функция H (б).

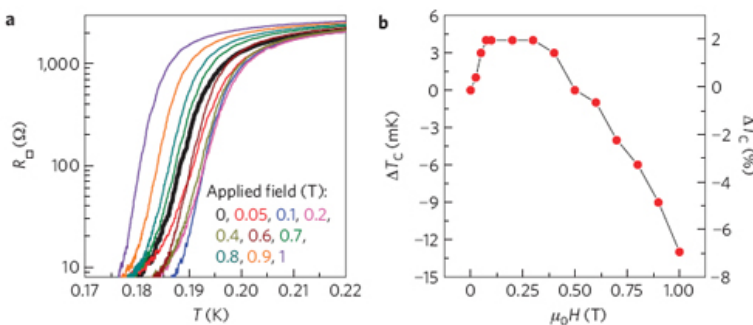


Рис. 2. Резистивные сверхпроводящие переходы гетероструктуры $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ в магнитном поле $H = 0 \div 1$ Тл (а) и изменение T_c как функция H (б).

При добавлении магнитных примесей он сначала ослабевает, а затем полностью исчезает. Зависимость T_c от H является немонотонной и имеет максимум. Авторы [1] обсуждают различные возможные причины этого феномена, но к окончательному выводу так и не приходят. А вот в перпендикулярном поле T_c уменьшается, как ей и положено.

Л.Опенев

1. H.J.Gardner et al., Nature Phys. 7, 895 (2011).

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Динамический эффект Казимира в сверхпроводниковой цепи

Спиновые кубиты в карбиде кремния

ОБЗОРЫ

- 2 Электромагнотны – электрические и магнитные волны снова в одной упряжке

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Дефектные сверхструктуры на межзеренных границах

Наночастицы с редкоземельными ионами открывают новые возможности для биологии

МАНГАНИТЫ

- 6 Как увидеть механизмы электрической поляризации в мультиферроиках

ГРАФЕН

- 7 Электрическая емкость однослойного графена

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 8 К вопросу о стабильности фуллеренов C_{82}

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 8 Исследования спинов: от фундаментальной науки к новейшим технологиям

КОНФЕРЕНЦИИ

- 9 Семинар по физике конденсированного состояния
7 декабря 2011 г.

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Динамический эффект Казимира в сверхпроводниковой цепи

Современная квантовая теория предсказывает, что вакуум на самом деле не пустой, а буквально кишит виртуальными частицами, возникающими из ничего и тут же исчезающими. Флуктуации вакуума приводят к ряду наблюдаемых эффектов: лэмбовскому сдвигу атомных уровней, перенормировке магнитного момента электрона и пр. Но все это – лишь косвенные проявления таких флуктуаций. А можно ли наблюдать виртуальные частицы непосредственно? Сорок лет назад было математически показано [1], что движущееся с релятивистской скоростью зеркало (идеально проводящая металлическая пластинка) может преобразовывать виртуальные фотоны в реальные, поскольку вакуумные флуктуации индуцируют в зеркале экранирующие токи, которые, в свою очередь, порождают электромагнитное излучение. Однако экспериментально существование этого эффекта (названного динамическим эффектом Казимира) долгое время подтвердить не удавалось.

В работе [2] (Швеция, Япония, Австралия, США) вместо релятивистского зеркала использована альтернативная конструкция: сверхпроводниковая цепь из линии передачи (ЛП) и СКВИДа, индуктивность которого может изменяться внешним магнитным потоком с высокой частотой (> 10 ГГц). Изменение индуктивности СКВИДа эквивалентно изменению “электрической длины” ЛП. При этом зависящие от времени граничные условия оказываются такими же, как и в случае движущегося зеркала, а максимальная скорость движения границы (то есть скорость изменения “электрической длины” ЛП) достигает 0.25 от скорости света в ЛП. Для уменьшения количества обычных тепловых фотонов эксперимент проводили при очень низкой температуре $T < 50$ мК. И “вакуумные фотоны” действительно были обнаружены, причем плотность их потока оказалась в точности такой, как предсказывает теория.

Л.Опенев

1. G.Moore Z., *J.Math.Phys.* **11**, 2679 (1970).
2. C.M.Wilson et al., *Nature* **479**, 376 (2011).

Спиновые кубиты в карбиде кремния

При обсуждении возможности создания твердотельного квантового компьютера внимание обычно концентрируют на спиновых кубитах. Они гораздо менее подвержены влиянию внешнего окружения, чем зарядовые, и по этой причине способны долго сохранять свою когерентность. Особую роль здесь играют кубиты на основе элементов IV группы Периодической таблицы (углерод, кремний, германий) и их соединений, у которых ядерные спины равны нулю, то есть “декогерентизирующий фон” для

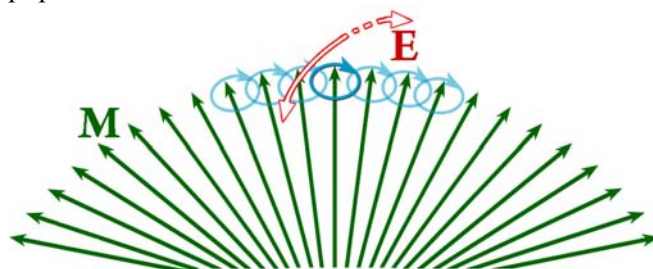
электронных спиновых кубитов отсутствует (или же может быть сведен к минимуму путем изотопической очистки). Так, в последние годы много усилий было затрачено на исследования спиновых состояний центров азот-вакансия в алмазе (NV-центров), включая их инициализацию, когерентный контроль, перепутывание и измерение. В работе [1] сотрудники Univ. of California at Santa Barbara (США) предлагают альтернативу NV-центрам: бивакансии кремний/углерод в политипе карбида кремния 4H-SiC. Для операций с электронными спинами этих кубитов подходят оптические и СВЧ-методики, разработанные ранее для NV-центров. Время декогерентизации при комнатной температуре у них очень велико: ~ 0.1 с – более чем достаточно для квантовых вычислений. Заметим, однако, что все результаты в [1] получены для большого “ансамбля” бивакансий, изначально присутствующих в образце. Следующим шагом должна стать попытка адресного управления спином одной отдельно взятой бивакансии. Если она окажется успешной, то можно будет приступать к двухкубитным операциям с парой соседних бивакансий. До квантового компьютера пока еще очень далеко...

1. W.F.Koehl et al., Nature **479**, 84 (2011).

ОБЗОРЫ

Электромагнотны – электрические и магнитные волны снова в одной упряжке

В электронном журнале *Physics* опубликован небольшой, но емкий обзор-ретроспектива [1] новой быстроразвивающейся области – науки об электромагнотах, которой в этом году исполнилось пять лет. Электромагнотны представляют собой спиновые волны, возбуждаемые высокочастотным электрическим полем. Подобно электромагнитным волнам они представляют собой результат “совместного творчества” переменных электрических и магнитных полей, но это волны совершенно другой природы.



Существование элементарных возбуждений в магнитных сегнетоэлектриках было предсказано в теоретической работе В.Г. Барьяхтара и И.Е. Чупис еще в 1970 г. [2]. Однако происхождение электроактивных и магнитоактивных возбуждений настолько различно, и связь между ними, как правило, настолько слаба, что экспериментальное подтверждение существования гибридных возбуждений заставляло ждать больше тридцати лет.

В 2006 г. появилась экспериментальная работа сотрудников научной группы из Института общей физики РАН под руководством А.А. Мухина, сделанная совместно с А.М. Балбашовым и коллегами из Augsburg Univ. (Германия) [3]. Используя терагерцовое излучение, им удалось генерировать в $TbMnO_3$ электроактивные спиновые возбуждения, которые они назвали электромагнонами. Была также продемонстрирована возможность управления этими электроактивными возбуждениями с помощью магнитного поля.

Чуть позже электромагноны были обнаружены в других магнитоэлектрических соединениях: манганитах YMn_2O_5 [4], феррите висмута $BiFeO_3$ [5], гексаферритах $Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$ [6] и др. Несмотря на большое различие этих соединений как в химическом составе, так и в сегнетоэлектрических свойствах (феррит висмута, в отличие от манганитов, электрическая поляризация которых магнитного происхождения, является собственным сегнетоэлектриком, а гексаферрит – и вовсе параэлектрик) общим для всех этих магнитных диэлектриков является наличие неколлинеарной магнитной структуры.

Динамические магнитоэлектрические эффекты, в основе которых лежит изотропный гейзенберговский обмен [7] могут превышать статические, вызванные спин-орбитальным взаимодействием. Так, в недавней теоретической работе [8] предсказывается даже возможность переключения электрической поляризации на пикосекундных временных масштабах с помощью импульсов терагерцового излучения.

Миниобзор [1] может быть полезен для тех, кто только начинает знакомиться с этой новой интересной областью.

А.Пятаков

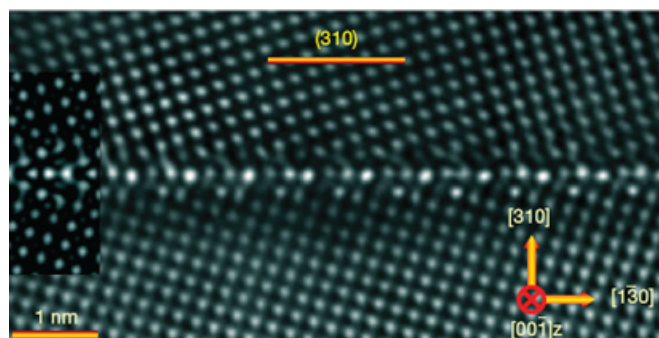
1. M.Kenzelmann, *Physics* **4**, 88 (2011) (<http://physics.aps.org/articles/v4/88>)
2. В.Г.Барьяхтар, И.Е.Чунис, *ФТТ* **11**, 2628 (1970).
3. A.Pimenov et al., *Nature Phys.* **2**, 97 (2006).
4. A.B.Sushkov et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 027202 (2007).
5. M.Cazayous et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 037601 (2008).
6. N.Kida et al, *Phys. Rev B* **80**, 220406 (2009).
7. A.B.Sushkov et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 434210 (2008).
8. M.Mochizuki, N.Nagaosa, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 147202 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Дефектные сверхструктуры на межзеренных границах

Физические свойства и диапазон возможных применений поликристаллических материалов во многом определяются структурой и химическим составом межзеренных границ. Экспериментальные ис-

следования этих границ на атомном уровне сопряжены со значительными трудностями (как техническими, так и связанными с интерпретацией данных), поэтому часто ограничиваются простыми теоретическими моделями, применимость которых не очевидна. В работе [1] на примере бикристалла MgO показано, что детальную информацию о межзеренной границе (см. рис.) можно получить путем комбинации просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, спектроскопии потерь энергии быстрыми электронами и расчетов из первых принципов.



Изображение межзеренной границы в бикристалле MgO , полученное методом просвечивающей электронной микроскопии.

Было установлено, что примеси Ca и Ti , присутствующие в образце в незначительном количестве, скапливаются вблизи границы и образуют (вместе с вакансиями Ca и Mg) сложные упорядоченные сверхструктуры. Такие сверхструктуры играют роль электронных ловушек и индуцируют появление энергетических уровней в запрещенной зоне, что существенно изменяет электронные характеристики. Такая методология может быть использована для изучения строения и элементного состава границ зерен в самых разнообразных материалах.

1. Z.Wang et al., *Nature* **479**, 380 (2011).

Наночастицы с редкоземельными ионами открывают новые возможности для биологии

Развитие молекулярной и клеточной биологии требует совершенствования аналитических методов. Серьезной проблемой остается пространственное и временное разрешение при изучении откликов клетки. В последние годы для детектирования биомолекул и получения биоизображений исследователи стали активно использовать наночастицы, легированные ионами редкоземельных металлов (РЗМ). Эти материалы обладают уникальными оптическими свойствами и биосовместимостью. В недавно опубликованном обширном обзоре французских учёных обсуждаются различные варианты применения РЗ-наночастиц *in vitro*, а также в живых клетках и мелких животных [1].

Материалы с добавками ионов редкоземельных металлов уже довольно давно применяются в оптоэлектронике и светотехнике. Редкоземельные ионы,

испускающие свет, являются активаторами, а матрица (чаще всего оксид) – сенсibilизатором. Спектроскопические свойства материала (абсорбция, длина волны излучения, эффективность перехода) главным образом определяются природой РЗМ. Для синтеза РЗ-наночастиц существуют разные подходы, но наилучшими пока остаются методы коллоидной химии. В зависимости от условий синтеза наночастицы могут иметь размеры от 3 до 50 нм. К сожалению, достаточно низкие температуры синтеза не всегда позволяют получить необходимую кристалличность. Чаще всего изучают наночастицы YVO_4 , Gd_2O_3 (с добавками Eu); LaF_3 (с добавками Ce, Tb); Y_2O_3 , Y_2O_2S , $NaYF_4$, YVO_4 (с добавками Yb, Er); $MgSiO_3$ (с добавками Eu, Dy, Mn) и др. Тем не менее, можно надеяться на расширение их ассортимента в ближайшем будущем благодаря использованию гидро- и сольвотермального синтеза и других методов.

Ключевым моментом для биологических применений является функционализация. Во-первых, необходимо обеспечить достаточно однородное распределение наночастиц в биологической среде; во-вторых, создать на поверхности функциональные группы (аминные, карбоксильные и др.) и присоединить к ним биомолекулы, необходимые для детектирования нужных объектов-мишеней. При использовании *in vivo* наночастицы обычно покрывают биосовместимыми молекулами декстрана (бактериальными полисахаридами) или полиэтиленгликолем.

Оптические свойства РЗ-наночастиц (поглощение света и люминесценция) в большинстве случаев обусловлены переходами между глуболежащими энергетическими уровнями 4f-электронов редкоземельных ионов. При введении этих ионов в матрицу заметной перестройки энергетического спектра не происходит, поскольку незаполненные внутренние электронные оболочки РЗМ хорошо экранированы валентными электронами от внешнего окружения. Воздействие кристаллического поля приводит к незначительному расщеплению энергетических уровней. Вследствие этого энергия перехода мало зависит от материала матрицы и от размера наночастицы. Линии поглощения и испускания достаточно узкие (1-5 нм и ~10 нм, соответственно) по сравнению с линиями органических красителей или квантовых точек. Люминесценция ионов РЗМ может происходить в результате воздействия излучения (обычно УФ) на матрицу и последующей передачи энергии РЗ-иону или непосредственно путём возбуждения иона РЗМ. Заметим, что УФ-излучение – не лучший выбор при исследованиях живых клеток и организмов; альтернативой является прямое возбуждение лазером. Спектр люминесценции, как правило, заметно сдвинут относительно спектра поглощения в сторону длинных волн (сдвиг Стокса). Для наночастиц $YVO_4:Eu$ величина сдвига составляет ~ 150 нм, т. е. гораздо больше, чем для

обычно используемых органических флуорофоров. Это облегчает проведение исследований.

Оптические свойства ионов РЗМ, внедренных в матрицу основного материала, также позволяют получать излучение с повышением частоты (upconversion). Это возможно благодаря многократному поглощению фотонов или передаче энергии РЗ-иону одного типа от РЗ-иона другого типа. Эффект используется, например, в коротковолновых лазерах. В биомедицинских исследованиях уже успешно применили РЗ-наночастицы состава $NaYF_4:Yb,Er$ и $NaGdF_4:Yb,Er$. Поскольку происходит антистоксовский сдвиг спектра люминесценции, для возбуждения наночастиц подходит излучение в ближнем ИК-диапазоне, а это позволяет проникать глубже в ткани. Можно применять недорогие лазеры непрерывного действия, т.к. в процессе вовлечены долгоживущие метастабильные состояния (времена жизни на уровне микросекунд).

Авторы обзора [1] сравнивают характеристики различных материалов, применяемых в биомедицинских исследованиях. В таблице ниже представлены некоторые свойства Alexa 488 (одного из самых эффективных органических флуорофоров), квантовых точек и РЗ-наночастиц.

Оптические свойства различных биоизондов.

Излучатель	Квантовый выход	Ширина линии (нм)	Время до фотообесцвечивания	Время жизни
Alexa 488	0.92	~40	неск. секунд	~4 нс
Квантовые точки	0.3-0.5	~30	>1000 с	~10 нс
30 нм $Y_{0.6}Eu_{0.4}VO_4$	0.16	~10	>1000 с	~300 мкс

Время жизни возбужденных состояний для РЗ-ионов гораздо больше, чем для органических флуорофоров, поэтому и число испускаемых фотонов в единицу времени для одного излучательного центра намного меньше. Однако в каждой наночастице находятся сотни или тысячи ионов, дающих вклад в излучение, поэтому можно детектировать отдельную наночастицу. РЗ-наночастицы отличаются высокой фотостабильностью (быстрое фотообесцвечивание – один из основных недостатков органических красителей), отсутствием мерцания (недостаток квантовых точек), очень узкими линиями излучения, большими стоксовскими (или антистоксовскими) сдвигами, длительной люминесценцией. Всё это вместе с возможностью функционализации позволяет использовать такие наночастицы для детектирования ДНК; обнаружения белков и изучения их взаимодействий; формирования биоизображений *in vivo*; количественного определения концентрации H_2O_2 и др. Авторы обзора [1] приводят множество

примеров успешных биомедицинских исследований с РЗ-наночастицами.

Так, использование функционализированных $Gd_2O_3:Eu$ и $Y_2O_3:Yb,Er$ позволило обнаружить очень малые концентрации ДНК – 1нг/мл (в 5 раз ниже, чем при использовании флуорофора). В другой работе показано, что с помощью наночастиц $Fe_3O_4/Gd_2O_3:Eu$, состоящих из ядра Fe_3O_4 и оболочки $Gd_2O_3:Eu$, можно быстро и количественно определить полиморфизм отдельного нуклеотида (это важно для диагностики поликистоза почек, т.к. сейчас применяется длительная и дорогая процедура). Для получения биоизображений *in vivo* особенно интересны *upconversion* - наночастицы. Например, было получено изображение пищеварительной системы нематоды (круглого червя) при возбуждении наночастиц $Y_2O_3:Yb,Er$ в ИК-диапазоне (рис. 1). Наночастицы просто добавляли в пищу (кстати, без всякого вреда для червя) [2].

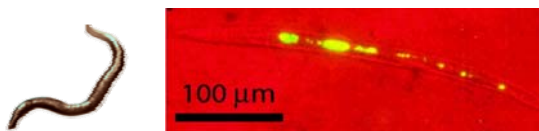
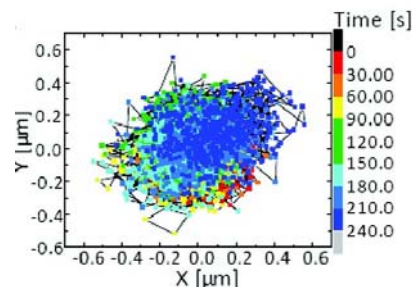


Рис. 1. Слева – нематода. Справа – $Y_2O_3:Yb,Er$ наночастицы в пищеварительной системе червя через 24 ч после приема внутрь с пищей.

В клеточной и молекулярной биологии, в иммуноцитохимии для изучения белков широко применяются флуоресцентные метки. Фотостабильные РЗ-наночастицы можно функционализировать антителами или лигандами, специфичными к определенным белкам, и тем самым заменить органические красители, быстро теряющие яркость. Так, наночастицы $YVO_4:Eu$ с присоединенными гуанидиновыми группами способны связываться с потенциал-управляемыми Na -каналами (транспортными белками) клеточных мембран около входа в канал и позволяют получать изображение каналов *in vivo*. (Гуанидиновые группы используют, поскольку они имеют сильное сходство с Na -каналами нервных волокон. Нейропаралитический яд тетродотоксин, содержащийся в рыбах, из которых делают знаменитое блюдо “фугу” японской кухни, блокирует Na -каналы мембран нервных и мышечных клеток именно из-за того, что в его состав входят эти группы).

Использование немерцающих РЗ-наночастиц дает возможность реконструировать траекторию единичных белков, особенно это важно для белков клеточных мембран. Траекторию такого белка с помощью наночастиц $YVO_4:Eu$ удалось проследить в течение нескольких минут с разрешением 20-50 мкс и локализацией до 20 нм [3] (рис. 2). Для этого была проведена функционализация наночастиц $YVO_4:Eu$ аминными группами. Последующее присоединение к ним токсина привело к связыванию наночастицы с мембранным белком – рецептором этого токсина.

Рис. 2. Траектория белка (рецептора токсина), полученная с помощью наночастиц $YVO_4:Eu$.



Для клеточной биологии чрезвычайно важно детектировать внутриклеточные сигнальные молекулы. Эти промежуточные химические соединения образуются в клетке в результате активации мембранных рецепторов, принимающих сигналы из окружающей среды, и передают информацию дальше на эффекторы (исполнительные молекулы). Одно из таких соединений, перекись водорода H_2O_2 , подает сигналы при миграции, делении, дифференцировке клеток и их гибели (апоптозе). Детектирование H_2O_2 необходимо для поиска причин возникновения и методов лечения атеросклероза, нейродегенеративных и злокачественных заболеваний. Однако для изучения и измерения сигналов H_2O_2 не хватает точных и динамических методов. Значительный прогресс недавно был достигнут благодаря РЗ-наночастицам. Авторы [4] использовали наночастицы $YVO_4:Eu$, люминесценция которых обусловлена ионами Eu^{3+} . С помощью лазерного облучения наночастиц можно вызвать фотоиндуцированный переход Eu^{3+} в Eu^{2+} . При этом, естественно, интенсивность люминесценции уменьшается, однако, добавление окислителя H_2O_2 вызывает обратный переход Eu^{2+} в Eu^{3+} и восстановление люминесценции. Скорость и степень восстановления люминесценции зависят от концентрации H_2O_2 . Исследователи провели много циклов фотовосстановления – химического окисления *in vitro*; старения наночастиц не наблюдалось, отклики были идентичны. Таким образом, разработан динамический количественный метод, который дает возможность не только определить концентрацию H_2O_2 , но и изучить ее зависимость от времени. Другие методы не дают этой информации, необходимой для распознавания разных сигналов.

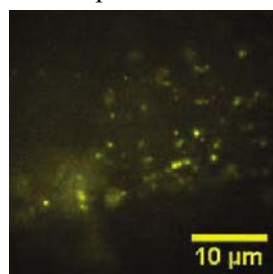


Рис. 3. Флуоресцентное изображение наночастиц $YVO_4:Eu$ в сосудистой гладкой мышечной клетке

Ученые провели исследования и в живых клетках. Наночастицы были внедрены в сосудистые гладкие мышечные клетки мыши (рис. 3). Образование H_2O_2 происходило в результате добавления специального стимулятора. Важно, что никакой цитотоксичности не наблюдали. Через 18 ч количество живых клеток было таким же, как и для контрольного образца без наночастиц. Возможно, наночастицы $YVO_4:Eu$ го-

дятся для определения концентрации и других физиологических окислителей, например ClO^- или NO . Gd-наночастицы обладают магнитными свойствами и перспективны для использования в качестве контрастных агентов магниторезонансной томографии (МРТ). Сейчас в МРТ широко применяют хелаты гадолиния (комплексные соединения). Использование наночастиц (Gd_2O_3 , GdPO_4 и др.) позволяет значительно усилить ЯМР-сигналы (рис. 4). На поверхность наночастиц можно наносить различные покрытия, присоединять группы, распознающие нужную мишень *in vivo*. Например, нанесение на Gd_2O_3 -наночастицы флуорофора позволило дополнительно получить флуоресцентное изображение [5] (рис. 5). Наночастицы GdPO_4 с покрытием из биосовместимого декстрана использовали для обнаружения опухоли – наночастицы достаточно долго оставались в крови, проникали в сосуды опухоли и задерживались в них.

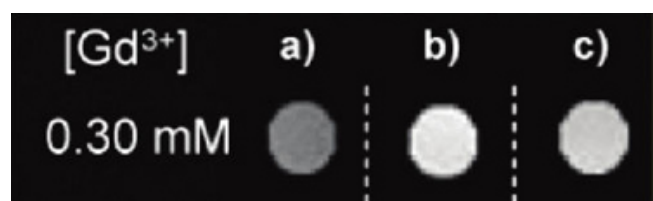


Рис. 4. ЯМР-изображения: а - раствор стандартного Gd-препарата; б - 2.2 нм наночастицы Gd_2O_3 ; с - 3.8 нм наночастицы Gd_2O_3 .

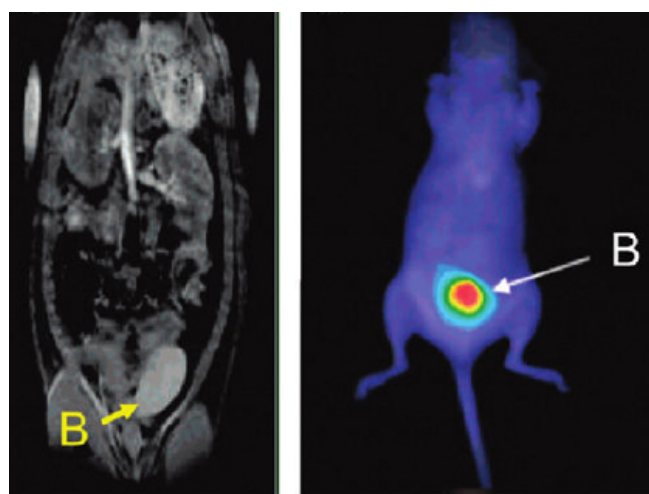


Рис. 5. Слева: ЯМР-изображение живой крысы через час после инъекции наночастиц Gd_2O_3 ; справа: флуоресцентное изображение. Стрелкой показан мочевого пузыря.

Авторы обзора [1] продемонстрировав возможности и перспективы использования в биологии РЗ-наночастиц, уверены – наночастицы с добавлением редкоземельных металлов обеспечат новые прорывы в биологии.

О.Алексеева

1. C.Bouzigues et al., *ACS Nano* **5**, 8488 (2011).
2. S.F.Lim et al., *Nano Lett.* **6**, 169 (2006).
3. J.-B.Masson et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 048103 (2009).

4. D.Casanova et al., *Nature Nanotech.* **4**, 581 (2009).

5. J.-L.Bridot et al., *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 5076 (2007).

МАНГАНИТЫ

Как увидеть механизмы электрической поляризации в мультиферроиках

В большом числе магнитных сегнетоэлектриков (мультиферроиков) электрическая поляризация имеет несобственный характер, т.е. наведена магнитным упорядочением. И хотя в этом случае взаимосвязь магнитных и электрических свойств в веществе ярко выражена, сами величины электрической поляризации составляют тысячные доли от величин, характерных для классических сегнетоэлектриков, таких как титанат бария или цирконат-титанат свинца. Соответственно, смещения атомов становятся настолько малыми, что их не удастся зафиксировать обычными рентгенографическими или нейтронографическими методами. В связи с этим часто выдвигаются гипотезы об электронном механизме электрической поляризации, не требующего, в отличие от ионного, смещения положений ионов в кристаллической решетке.

В работе [1] развита методика, которая позволяет детектировать смещения ионов на масштабах десятков и даже единиц фемтометров.

В качестве объекта исследования были выбраны орторомбические манганиты TbMnO_3 . Они являются типичными представителями так называемых спиральных мультиферроиков, в которых электрическая поляризация возникает вследствие наличия пространственно модулированной спиновой структуры (циклоиды), понижающей симметрию кристалла [1]. При измерениях использовалось явление интерференции двух вкладов: первый, “зарядовый”, является результатом дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке (рис. 1а), второй, “магнитный”, появляется в результате рассеяния лучей на спиновой циклоиде (рис. 1б).

Магнитное рассеяние зависит от круговой поляризации света. Каждый из вкладов по отдельности не позволяет зафиксировать незначительные смещения ионов, однако при их сложении зависимости от угла падения позволяют это сделать (рис. 1в). Авторами [1] проведены измерения смещений ионов под действием магнитного поля, вызванные магнитоупругим взаимодействием, характерные величины которых составляют десятки фемтометров на тесла. По этим данным, зная внутренние эффективные магнитные поля обмена, авторы оценили смещения ионов, обусловленные спонтанной электрической поляризацией, как 20 ± 3 фм, что позволяет говорить об ионном механизме сегнетоэлектричества в этом классе мультиферроиков.

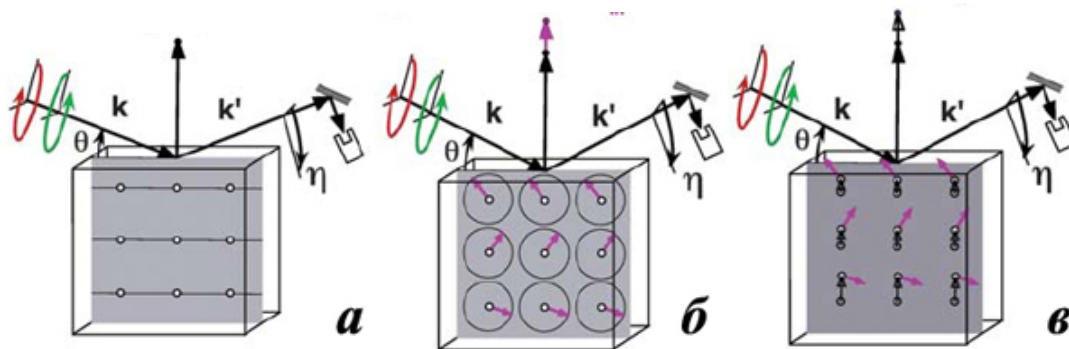


Рис. 1. Рентгенографическое наблюдение смещений ионов в мультиферроиках:
а - наблюдение рассеяния на зарядах, не зависящего от направления круговой поляризации падающего излучения;
б - нерезонансное магнитное рассеяние на пространственно модулированной спиновой структуре (циклоиде) зависит от направления вращения намагниченности материала и круговой поляризации излучения;
в - интерференция зарядового и магнитного вкладов, позволяющая детектировать малые смещения ионов (показаны вертикальными стрелками).

А.Пятаков

I. H.C.Walker et al., Science 333, 1273 (2011).

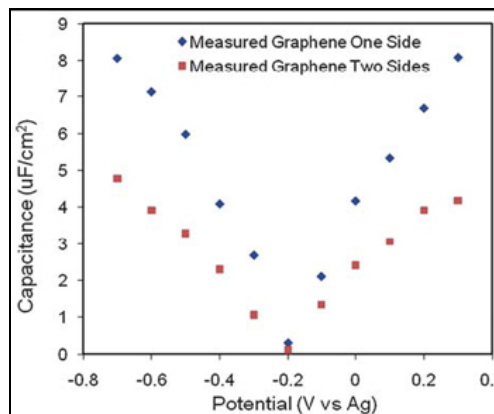
ГРАФЕН

Электрическая емкость однослойного графена

Одно из наиболее интересных применений графена связано с разработкой на его основе суперконденсаторов. В устройствах такого типа накопление энергии происходит в результате разделения зарядов различного знака в небольшом слое, разделяющем электрод и электролит. При этом плотность энергии, которая может быть накоплена в суперконденсаторе, определяется удельной электрической емкостью двойного слоя. Графен, сочетающий хорошую электропроводность с рекордной удельной поверхностью, является идеальным кандидатом на использование в качестве материала электрода в подобных системах. Для реализации этой возможности необходимо понимание факторов, определяющих электрическую емкость двумерных систем атомной толщины, к которым относится графен. Результаты эксперимента, проведенного группой исследователей из Univ. of Texas at Austin (США) под руководством проф. Р. Руофа [1], указывают на квантовую природу явлений, определяющих предельную величину удельной электрической емкости такой системы.

Листы графена большой площади были выращены стандартным методом химического осаждения паров (CVD). В качестве подложки использовали медную фольгу толщиной 25 мкм, которую помещали в цилиндрическую трубку диаметром 22 мм из оксида кремния. Синтез графена происходил в течение 30 мин в потоке CH_4 ($35 \text{ см}^3/\text{мин}$) при давлении 0.5 Торр и температуре 1000°C , после чего печь охлаждали до комнатной температуры. Заключение об однослойной структуре образцов графена было сделано на основании результатов измерений спектров комбинационного рассеяния. Для измерения электрической емкости графена использовали

две различные конфигурации. В первой из конфигураций только одна сторона графенового слоя была доступна для электролита ($4\text{M H}_2\text{SO}_4$), в то время как во второй конфигурации электролит мог поступать к обеим сторонам графенового листа. В первом случае графеновый лист стандартным способом переносили с медной фольги на подложку из полиметилметакрилата. Во втором случае электродом служил однослойный лист графена, подвешенный над кремниевой подложкой с помощью разделительных устройств из алюминиевой фольги. В качестве опорного электрода использовали серебряный контакт. Электрическую емкость образцов измеряли методом импедансной спектроскопии при подаче на электроды переменного напряжения с амплитудой 10 мВ на частотах от 1 Гц до 100 кГц.



На рисунке показаны результаты измерений зависимости удельной электрической емкости образца графена от приложенного напряжения, полученные в односторонней и двухсторонней конфигурациях.

Эти результаты соответствуют представлениям о квантовой природе емкости двумерных структур атомарной толщины. Как видно, емкость образца графена с двухсторонним доступом электролита примерно вдвое ниже, чем образца с односторонним доступом. Эксперимент показывает, что величина квантовой емкости графена не зависит от площади образца и определяется исключительно

электронными свойствами графена, такими как фермиевская скорость и концентрация носителей тока. Таким образом, при разработке суперконденсаторов на основе графена следует ориентироваться не столько на увеличение удельной поверхности электрода, сколько на улучшение электронных свойств материала. Это может быть достигнуто в результате разработки методов синтеза графена с минимальным содержанием дефектов.

А.Елецкий

1. M.D.Stoller et al., Energy Environ. Sci. 4, 4685 (2011).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

К вопросу о стабильности фуллеренов C_{82}

Наши соотечественники из Института органической и физической химии им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН [1] рассмотрели ряд изомеров фуллерена C_{82} , подчиняющихся правилу изолированных пентагонов, с целью определить связь между их молекулярной стабильностью и электронными и геометрическими характеристиками и объяснить, почему некоторые из фуллеренов семейства могут быть получены лишь в виде эндо- или экзоэдральных комплексов. Правило изолированных пентагонов гласит, что наиболее стабильными являются те фуллерены, в которых ни одна пара образованных атомами углерода пятиугольников не имеет смежных ребер. Известно, что фуллерен C_{82} имеет девять таких изомеров: три изомера с симметрией C_2 , три – с симметрией C_s , два – с симметрией C_{3v} и один – с симметрией C_{2v} . Термодинамическая и кинетическая устойчивость всех этих изомеров была исследована авторами в рамках теории функционала плотности с помощью программного пакета GAUSSIAN03. В результате нестабильными оказались молекулы, содержащие на поверхности фуллереновой сферы субструктуры радикалов, например, феналенил-радикала (рис. 1). Согласно заключению исследователей именно они не могут быть получены в виде изолированных соединений. Однако эти изомеры C_{82} становятся более устойчивыми в виде экзоэдральных производных или эндоэдральных металофуллеренов по причине передачи появляющихся дополнительных электронов в обедненную электронами субструктуру фуллереновой клетки.

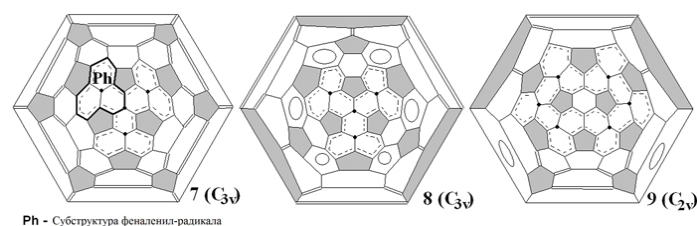


Рис. 1. Диаграммы Шлегеля нестабильных C_{82} -изомеров: 7 (C_{3v}), 8 (C_{3v}), 9 (C_{2v}). Субструктуры радикалов выделены пунктиром.

Изомеры же с закрытыми электронными оболочками (рис. 2), по мнению авторов, должны быть ста-

бильными и могут быть синтезированы в чистом виде. К слову, один из них был успешно получен в далеком 1992 г. [2]. Осталось лишь дожидаться синтеза остальных.

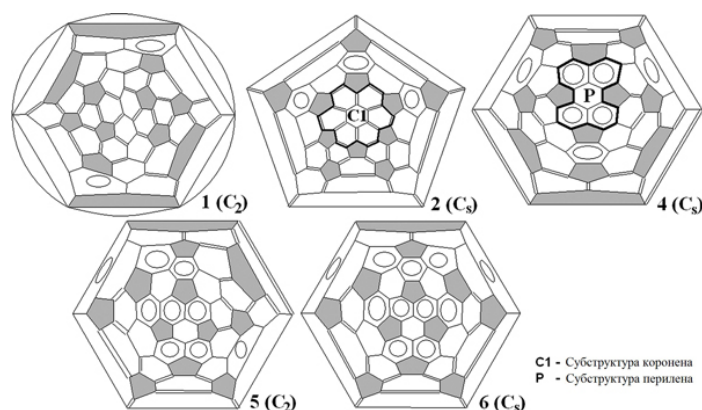


Рис. 2. Диаграммы Шлегеля изомеров фуллерена C_{82} , подчиняющихся правилу изолированных пентагонов: 1 (C_2), 2 (C_s), 4 (C_s), 5 (C_2), 6 (C_s).

М. Маслов

1. A.R.Khamatgalimov et al., J. Phys. Chem. A 115, 12315 (2011).

2. K.Kikuchi et al., Nature 357, 142 (1992).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Исследования спинов: от фундаментальной науки к новейшим технологиям

Спиновая наука и спиновые технологии стали в последние годы активно развивающейся отраслью. С 1 по 5 ноября в Казани состоялась Международная конференция “Спиновая физика, спиновая химия, спиновые технологии”, которую организовал Казанский физико-технический институт им Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Более ста двадцати участников конференции из России, Германии, США, Японии, Англии, Италии, Израиля, Турции и др. встретились в Казани, городе, где в 1944 г. был открыт электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) – мощнейший метод в исследовании спиновых свойств. Тематика конференции включала в себя такие области науки, как магнитный резонанс, химическая физика, фотоника, электронные процессы в полупроводниках, молекулярная электроника и молекулярные магнетики, спинтроника, нанотехнологии, спиновая химия и материаловедение, квантовый компьютеринг на основе спиновых технологий, низкоразмерные спиновые системы, спиновые технологии в исследовании биологических объектов и др.

Конференция открылась церемонией вручения Международной Премии им. Е. К. Завойского, ежегодно присуждаемой за выдающийся вклад в применение или развитие электронного парамагнитного резонанса в любой области науки. В этом году двадцать первым лауреатом премии стал японский ученый S. Yamauchi, который выступил с лекцией “Time-resolved EPR studies in the electronically

ПерсТ, 2011, том 18, выпуск 22

excited states”. С докладами на конференции выступали В. Büchner, J. Freed, D. Gatteschi, D. Goldfarb, R. Klingeler, W. Lubitz, K. Möbius, H. Ohta, T. Prisner, А. Ведяев, И. Гарифуллин, А. Двуреченский, С. Дзюба, В. Катаев, И. Коптюг, Ю. Кусраев, М. Миляев, В. Рязанов, К. Салихов, Л. Тагиров, М. Тагиров многие другие известные физики, химики и материаловеды. Примечательным было также большое количество российских и зарубежных молодых ученых, принявших активное участие в устных и постерных сессиях конференции.

В рамках конференции проходило несколько мероприятий: симпозиум “Modern development of magnetic resonance”, конкурс “У.М.Н.И.К.”, а также российско-германский семинар “Functional spin materials: from fundamental research towards novel applications”. Вечером третьего ноября участники конференции стали гостями на праздновании юбилея директора КФТИ им. Е.К. Завойского профессора К.М. Салихова.

Организаторы конференции надеются, что она станет стартовым пунктом для серии междисциплинарных конференций, семинаров и молодежных школ, сфокусированных на проблемах спиновой физики и химии, а также на разработке новых материалов и технологий, оперирующих спиновыми степенями свободы.

Более подробную информацию о конференции можно посмотреть на сайте: <http://kazan.spin2011.kfti.knc.ru/>

Е.Вавилова

КОНФЕРЕНЦИИ

Семинар по физике конденсированного состояния 7 декабря 2011 г.

(17.00, многофункциональный зал библиотеки физического факультета МГУ, 5 этаж)

Владимир Дмитриевич Кулаковский (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка) “Экситонные поляритоны в планарных полупроводниковых микрорезонаторах: параметрическое рассеяние и неравновесная бозе-конденсация”

Пропуск на физический факультет слушателей семинара будет осуществляться по предъявлению паспорта. Предварительная запись на семинар на сайте <http://nano.msu.ru/education/seminars> (до 15:00 дня семинара).

Для расширения возможностей участия в семинаре предполагается обеспечить прямую он-лайн трансляцию заседаний через сайт <http://nano.msu.ru/video.php>

Дополнительная информация:

тел. +7(495)939-1151

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Лекция профессора Дитера Бимберга

5 декабря (18:45) в Центральной физической аудитории им. Р.В. Хохлова физического факультета МГУ состоится лекция исполнительного директора Института твердого тела Берлинского технического университета, члена Консультативного научного Совета Фонда “Сколково” профессора Дитера Бимберга “Энергоэффективность в электронике и фотонике. Как заставить квантовые точки работать” (Energy Efficient Electronics and Photonics. Bringing Quantum Dots to Work).

На лекцию приглашаются все желающие. Для пропуска слушателей, не являющихся студентами или сотрудниками МГУ, открыта предварительная запись на сайте <http://nano.msu.ru/news/guests>; ознакомиться с краткой аннотацией лекции можно по ссылке <http://nano.msu.ru/node/398>.

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, Е.Вавилова, А.Елецкий, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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