

В этом выпуске:

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Гиперзапутанные фотоны для квантовой связи

Квантовая запутанность (специфическая неклассическая корреляция между квантовыми системами) делает возможным так называемое “сверхплотное кодирование информации”: один квантовый бит может переносить до двух обычных битов [1], что позволяет увеличить пропускную способность канала квантовой связи (роль логических состояний кубита 0 и 1 при этом играют состояния фотона с продольной и поперечной поляризацией). Основная идея состоит в следующем (рис. 1а). Допустим, что Боб хочет послать Алисе двухкубитное сообщение, но имеет возможность отправлять ей только по одному фотону в день. Так как каждый фотон переносит лишь один бит, то на первый взгляд кажется, что в этой ситуации скорость передачи информации от Боба к Алисе не может превышать 1 бит/день. Но допустим, что накануне Боб приготовил пару запутанных фотонов, один из которых отправил Алисе, а второй оставил себе. Тогда, поворачивая поляризацию оставшегося у него фотона, Боб может “переключать” состояния запутанной пары между четырьмя различными (так называемыми “белловскими”) состояниями. А выбор одного из четырех возможных состояний соответствует двухкубитному сообщению. Выполнив надлежащий поворот, Боб посылает второй фотон Алисе, которая теперь обладает парой запутанных фотонов, проводит над ней “совместное измерение”, определяет, в каком из белловских состояний эта пара находится и читает сообщение. Но почему такое кодирование можно считать “сверхплотным”? Ведь для передачи двух битов Бобу потребовалось два фотона, а не один. Дело в том, что вся информация переносится только одним (вторым) фотоном. После отправки Алисе первого фотона Боб может даже не знать, какое сообщение он захочет послать ей на следующий день.

Для определения состояния запутанной пары Алисе требуется наличие взаимодействия между фотонами, которое в принципе можно организовать, используя нелинейную оптическую среду. Однако это взаимодействие очень слабое, поэтому эффективность такого измерительного устройства оказывается чрезвычайно низкой. Если же Алиса будет использовать для измерения обычную линейную оптику, то ей удастся определить не более трех состояний из четырех, так что Боб сможет передать только $\log_2 3 = 1.58$ бита, и заложенный в запутанности ресурс будет задействован не полностью. В работе [2] группа американских и канадских физиков использовала для передачи информации не просто запутанные, а так называемые “гиперзапутанные” фотоны (рис. 1б), а именно – такие фотоны, у которых перепутаны не только их поляризационные, но и орбитальные (отвечающие разным проекциям орбитального углового момента) состояния. При этом первые по-прежнему служат для кодирования информации, а последние требуются исключительно для того, чтобы Алиса смогла, оставаясь в рамках линейной оптики, распознать каждое из четырех белловских состояний запутанной пары. Теоретически гиперзапутанность позволяет передавать по два бита с каждым фотоном. Шумы и неизбежные экспериментальные погрешности приво-

И далее ...

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 2 Оптическая проводимость и электронные корреляции в высокотемпературных сверхпроводниках

Сверхпроводимость легированных полупроводников

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 3 Вигнеровский кристалл в углеродной нанотрубке

Измеряем намагниченность отдельных атомов

Электронная структура туннельно-связанных квантовых точек

- 4 Атомный карандаш. Он же ластик

СПИНТРОНИКА

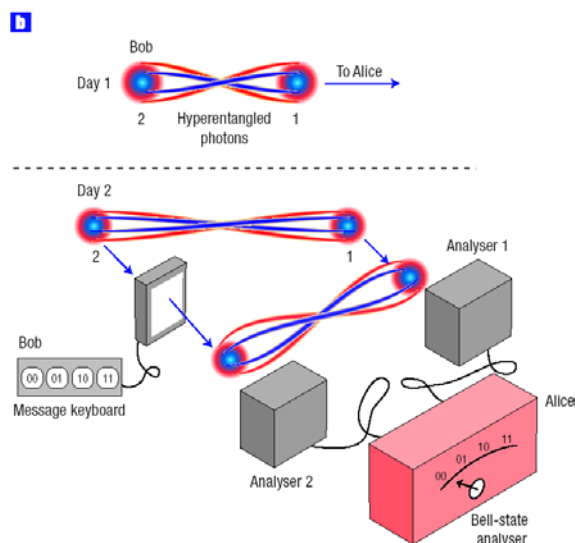
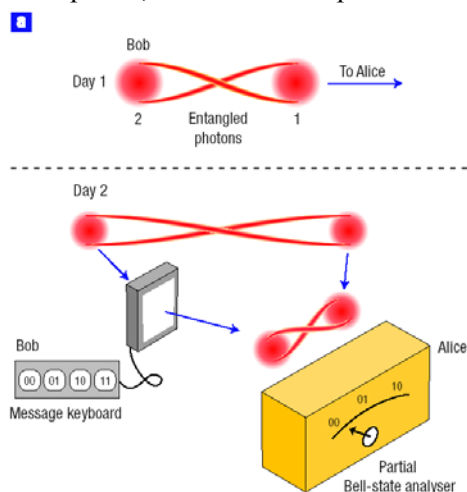
- 4 “Электрошок” для магнитных доменов: управление доменной структурой с помощью электрического поля

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Селективное обратимое окисление однослойных углеродных нанотрубок

- 7 Сортировка однослойных углеродных нанотрубок с помощью УФ облучения

дят, конечно, к уменьшению этой теоретической величины. И тем не менее, даже с учетом такой неидеальности, достигнутая в [2] пропускная способность квантового канала составила 1.63 бит/фотон и превысила, таким образом, “линейный предел” 1.58.



Два сценария квантового сверхплотного кодирования информации с использованием запутанных (а) и гиперзапутанных (б) фотонов.

1. C.H.Bennett, S.J.Wiesner, *Phys.Rev. Lett.* **69**, 2881 (1992).
2. J.T.Barreiro et al., *Nature Phys.* **4**, 282 (2008).

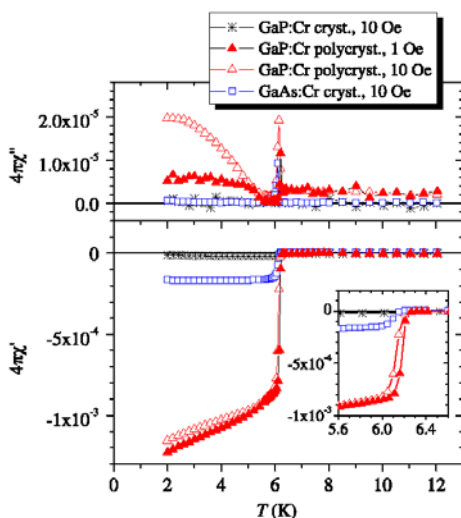
СВЕРХПРОВОДНИКИ

Оптическая проводимость и электронные корреляции в высокотемпературных сверхпроводниках

Высокотемпературная сверхпроводимость возникает при добавлении носителей заряда в “родительские” диэлектрики. С легкой руки P.W.Anderson'a [1] принято считать, что эти диэлектрики (например, La_2CuO_4) являются “мottовскими”, то есть отсутствие у них электрической проводимости связано с сильным кулоновским отталкиванием электронов, препятствующим их перескокам с атома на атом, если на каждый атом приходится ровно один электрон. Более того, в литературе распространено мнение, что необычные свойства ВТСП обусловлены именно их близостью к состоянию мottовского диэлектрика. Однако выполненный американскими и итальянскими физиками анализ [2] опубликованных экспериментальных данных по оптической проводимости ВТСП показал, что электронные корреляции в ВТСП недостаточно сильны для мottовского состояния, и недопированные ВТСП являются обычными антиферромагнитными диэлектриками. С этой позиции надо подходить и к описанию псевдощелевой (недопированной), сверхпроводящей (оптимально допированной) и металлической (передопированной) фаз ВТСП.

1. P.W.Anderson, *Science* **235**, 1196 (1987).
2. A.Comanac et al., *Nature Phys.* **4**, 287 (2008).

Сверхпроводимость легированных полупроводников



Температурные зависимости действительной (внизу) и мнимой (вверху) частей динамической магнитной восприимчивости GaP и GaAs.

Польские физики сообщили о наблюдении сверхпроводимости в полупроводниках GaP и GaAs, сильно легированных хромом. Величина T_c составила 6.2 K (рисунок) как для поликристаллических образцов, так и для монокристаллов, выращенных методом Чохральского. $H_c \approx 600$ Э. Причина кроется, по-видимому, в выделении фазы $\beta\text{-Ga}$ при охлаждении образцов после синтеза. Но требуются дополнительные исследования.

Л.Опенков

1. J.B.Gosk et al., *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 065019 (2008).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Вигнеровский кристалл в углеродной нанотрубке

Даже при близкой к абсолютному нулю температуре большинство электронов в твердом теле имеют очень большую кинетическую энергию. Это связано с тем, что электроны, будучи фермионами, подчиняются статистике Ферми-Дирака и поэтому не конденсируются на одном уровне с минимальной энергией, а в соответствии с принципом Паули попарно (“спин вверх”, “спин вниз”) занимают много энергетических уровней вплоть до уровня Ферми $E_F \sim 1$ эВ. При большой концентрации электронов их средняя кинетическая энергия значительно превышает среднюю энергию межэлектронного взаимодействия, и именно она определяет электронное строение твердых тел. Однако при низкой концентрации электронов основную роль начинает играть кулоновское отталкивание между ними. В 1934г. Вигнер показал [1], что электроны при этом образуют упорядоченное состояние – так называемый вигнеровский кристалл, в котором каждый электрон локализован в окрестности определенной точки пространства. Этот “электронный кристалл” формируется спонтанно, и его структура не зависит от расположения положительных ионов в “атомном кристалле”. Для образования вигнеровского кристалла требуется исключительно чистая, с минимальным количеством дефектов система. До настоящего времени экспериментально он наблюдался только на поверхности жидкого гелия [2] (двумерный вигнеровский кристалл).

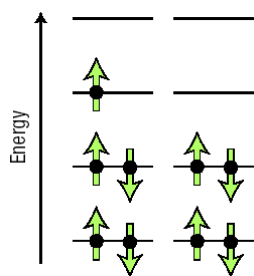


Рис. 1. Ожидаемое заполнение дискретных энергетических уровней короткой нанотрубки электронами (стрелки указывают направления электронных спинов).

Недавно в Калифорнийском технологическом институте в ходе работ по исследованию бездефектных углеродных нанотрубок был обнаружен удивительный эффект [3]: при добавлении в нанотрубку нескольких (в пределах 10) электронов все они имели одинаковое направление спина, вопреки ожидаемой картине заполнения энергетических уровней электронами с противоположно направленными спинами (рис. 1). Выполненный авторами [3] анализ показал, что причиной этого является формирование в нанотрубке одномерного вигнеровского кристалла, причем не обычного, а спин-поляризованного (рис. 2). Расстояние между электронами в таком кристалле составляет около 100 нм – достаточно много, чтобы попытаться организовать операции со спинами отдельных

электронов путем воздействия на них внешними управляющими сигналами. Пока не ясно, выживет ли вигнеровский кристалл в результате такого воздействия. Если да, то его можно будет использовать в качестве регистра для хранения спиновых кубитов и операций с ними.

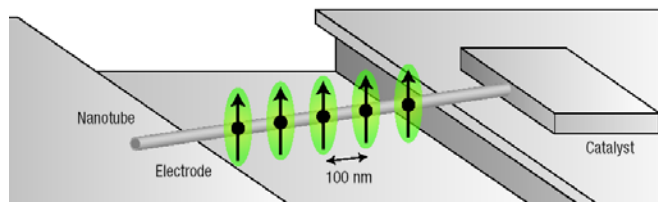


Рис. 2. Одномерный вигнеровский кристалл в углеродной нанотрубке (все электроны поляризованы по спину).

Л.Опенков

1. F.Wigner, *Phys. Rev.* **46**, 1002 (1934).
2. C.Grimes, G.Adams, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 795 (1979).
3. V.Deshpande, M.Bockrath, *Nature Phys.* **4**, 314 (2008).

Измеряем намагниченность отдельных атомов

Ожидается, что магнитные наноструктуры, состоящие из нескольких магнитных атомов на немагнитной подложке (адаомов), позволят существенно уменьшить размеры устройств хранения информации, а также найдут применение в спинтронике и квантовых вычислениях. Кроме того, они представляют интерес с точки зрения фундаментальных исследований магнитных взаимодействий на атомном масштабе. Для определения характеристик таких наноструктур требуется разработка соответствующих экспериментальных методик. В работе [1] представлены результаты измерения намагниченности M_A отдельных адаомов Co на поверхности Pt(111). Для этой цели был использован сканирующий туннельный микроскоп со спинполяризованной иглой. Дифференциальная проводимость контакта игла-адам зависит от M_A , что в конечном итоге и позволило авторам [1] найти зависимость M_A от индукции магнитного поля B .

1. F.Meier et al., *Science* **320**, 82 (2008).

Электронная структура туннельно-связанных квантовых точек

В отличие от “естественных атомов”, не существует двух абсолютно идентичных “искусственных атомов” – квантовых точек. Поэтому после их изготовления необходимо детально исследовать как свойства каждой из них по отдельности, так и коллективные электронные характеристики всей системы туннельно-связанных квантовых точек (например, так называемых “квантово-точечных молекул”). Для этого сотрудники Naval Research Laboratory (США) разработали методику, названную ими “спектроскопия антипересечения уровней” (“level anti-crossing spectroscopy”, LACS) [1]. Она основана на изменении оптического спектра экситона при наличии вблизи квантовой точки еще одной, распо-

ложенной в направлении поляризации электрического поля. Авторы [1] использовали эту методику для определения электронной структуры “молекулы” из двух вертикальных квантовых точек InAs/GaAs. В сочетании с микроскопией атомарного разрешения и теоретическими расчетами она позволит получать важную информацию об электронных характеристиках различных наноструктур.

1. M. Scheibner et al., *Nature Phys.* 4, 291 (2008).

Атомный карандаш. Он же ластик

Оксиды со структурой перовскита демонстрируют самые разнообразные свойства, включая сегнетоэлектричество, колоссальное магнитосопротивление, высокотемпературную сверхпроводимость и пр. Граница раздела между двумя такими оксидами может быть как проводящей, так и диэлектрической – в зависимости от типа формирующих ее атомных слоев [1]. В работе [2] ученые из США (University of Pittsburgh; Naval Research Laboratory) и Германии (University of Augsburg) показали, что на такой границе можно “рисовать” проводящие участки, а затем при необходимости “стирать” их, как ластиком. В качестве “бумаги” они использовали границу раздела между диэлектриками SrTiO_3 и LaAlO_3 , тогда как функцию “карандаша” выполняла игла атомного силового микроскопа (AFM). При этом подложка SrTiO_3 заканчивалась слоем TiO_2 , а толщина пленки LaAlO_3 составляла ровно три периода элементарной ячейки c (вставка к рисунку).

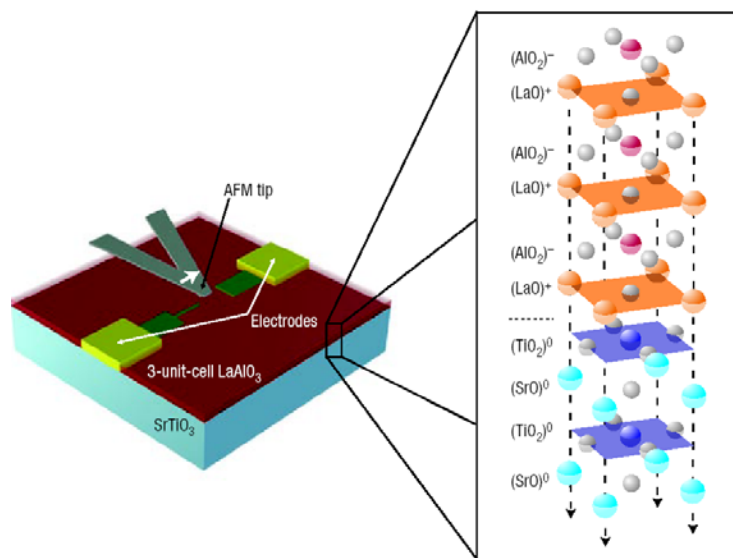


Схема устройства для рисования проводящих проводов [2]. Стрелка показывает направление движения иглы AFM. На вставке изображена последовательность чередования атомных слоев вблизи границы раздела $\text{SrTiO}_3/\text{LaAlO}_3$.

Такая граница практически не проводит электрический ток. Но при подаче положительного напряжения на иглу AFM и движении этой иглы вдоль поверхности пленки от одного электрода к другому (см. рисунок) между этими электродами начинает протекать ток, что говорит о формировании прово-

дящей дорожки. Если теперь подать на иглу отрицательное напряжение и пересечь ею дорожку в перпендикулярном направлении, то проводимость вновь исчезает – дорожка оказывается “разрезанной”. Это происходит при перемещении иглы всего на ~ 3 нм, что дает оценку характерной ширины проводящей дорожки. Причиной обнаруженного в [2] эффекта является, по-видимому, инжекция электронов из иглы и/или смещение электрического заряда при ее воздействии. Возможно, определенную роль играет и адсорбция кислорода или других анионов. Интересно, что эксперименты с пленками LaAlO_3 толщиной в две и четыре элементарные ячейки дали отрицательный результат. Развита методика очень пригодится при разработке новых наноэлектронных устройств.

Л. Оленов

1. A. Ohtomo, H. Y. Hwang, *Nature* 427, 423 (2006).

2. C. Cen et al., *Nature Mater.* 7, 298 (2008).

СПИНТРОНИКА

“Электрошок” для магнитных доменов: управление доменной структурой с помощью электрического поля

Хорошо известно, что в магнитных материалах возникает доменная структура, и этой структурой можно управлять с помощью магнитного поля – на данном принципе основаны все виды магнитной записи информации. Однако в последнее время стали появляться сообщения [1-3], что доменами можно управлять и электрическим полем. В настоящее время для магнитной записи информации используются магнитные поля, создаваемые электрическими токами в катушках магнитных головок жестких дисков или в проводящих шинах магнитной памяти произвольного доступа MRAM. С одной стороны, повышение плотности записи информации требует уменьшения размеров доменов, но чем меньше размер доменов, тем более они подвержены тепловым флуктуациям, и чтобы избежать случайного перемагничивания, необходимо использовать материалы с большими пороговыми магнитными полями переключения, а значит, нужны большие токи в проводниках. С другой стороны, при миниатюризации устройств необходимо уменьшать и поперечные размеры проводников. Оба этих фактора, взятые вместе, приводят к недопустимому увеличению плотности электрического тока в материале проводника, и, как следствие, перегреву и деградации устройства. Всех этих проблем можно избежать в схемах, не привлекающих электрические токи, используя непосредственное действие электрического поля на магнитные свойства материала, как это происходит в магнитоэлектриках. Препятствием на пути практического использования магнитоэлектриков являются низкие температуры, при которых проявляются магнитоэлектрические свойства, поэтому приведенные ниже сообще-

ния примечательны еще и тем, что все эффекты наблюдаются при комнатных температурах.

На рис. 1 показано действие на магнитную структуру электрического поля, создаваемого электродом (заостренной медной проволокой), касающимся диэлектрической поверхности эпитаксиальных пленок ферритов со структурой граната (далее гранат) (рис.1а) [1]. Положительный относительно подложки пленки потенциал на игле электрода вызывает притяжение доменной стенки к электроду (рис. 1b), отрицательный – отталкивание. При снятии напряжения доменная граница, подобно оттянутой струне, возвращается в исходное положение равновесия. Впрочем, далеко не всегда изменения, вызываемые таким «электрическим иглоукалыванием» обратимы – в некоторых случаях доменные границы застывают в новых положениях, подтверждая возможность записи информации с помощью электрического поля. Хотя явление наблюдается при высоких напряжениях (~1.5 кВ), эффект заметен уже при сотне вольт. Также ожидается, что при уменьшении радиуса кривизны электрода до нанометровых размеров управляющие напряжения уменьшатся до величин порядка одного вольт.

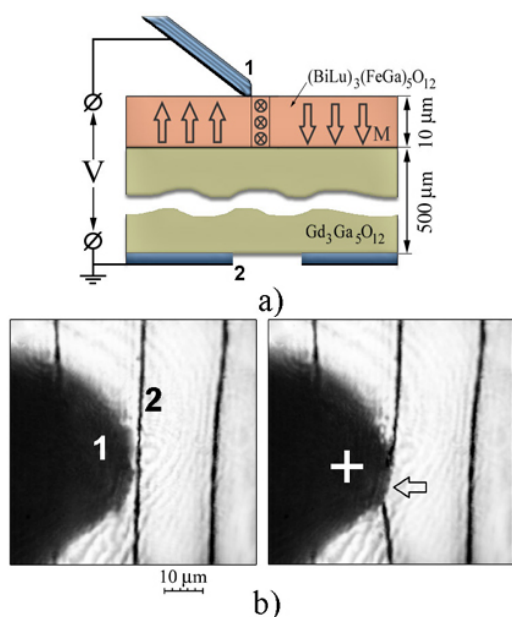


Рис. 1. а) Геометрия эксперимента: электрическое напряжение прикладывается между заостренным электродом 1 и контактом на подложке 2 (в слое граната показана микромагнитная конфигурация: два домена разделены доменной границей); б) притяжение доменной границы к положительно заряженному электроду (магнитооптическое изображение пленки граната в проходящем свете: темные линии – границы между доменами) 1- электрод, 2 - доменная граница [1].

Меньших управляющих напряжений (~10 В) удалось достичь в композитных материалах, представляющих собой «сэндвичи» из множества слоев (рис.2а), включающих кремниевую подложку, платиновые электроды, пластинку пьезоэлектрика и магнитную пленку поверх всей структуры. При подаче напряжения 10 В между электродами пластин-

ка пьезоэлектрика деформировалась, и в магнитной пленке возникали механические напряжения, которые вследствие явления магнитострикции приводили к перестройке микромагнитной структуры образца (рис. 2б). При снятии напряжения доменный узор возвращался к исходной конфигурации.

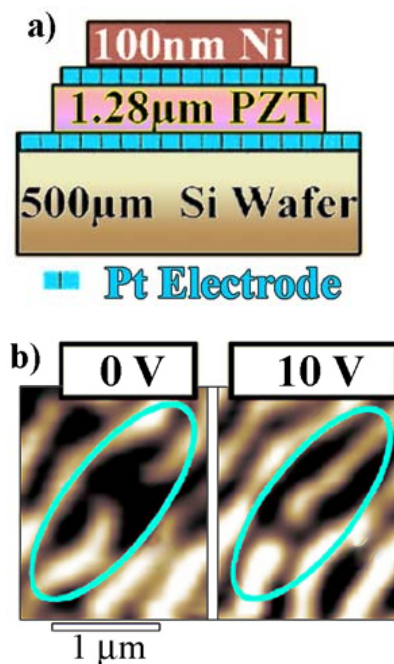


Рис. 2. Действие электрического поля на магнитные домены в композитном материале [2]:

а) поперечный разрез структуры – слой пьезоэлектрика (цирконат-титанат свинца (PZT)), зажатый между двумя платиновыми электродами, расположен на пластинке кремния (Si wafer), на верхний платиновый электрод осаждена 100-нанометровая пленка никеля; б)

изменение микромагнитной структуры пленки Ni под действием электрического напряжения 10 В, приложенного между электродами (изображение получено с помощью магнитного силового микроскопа, темные и светлые области – домены различной полярности).

В отличие от первого случая, в котором магнитными и электрическими свойствами обладал один и тот же кристалл, в случае композитного материала электрическая и магнитная подсистемы пространственно разделены, а их взаимодействие определяется качеством поверхностей раздела слоев. Шероховатая поверхность приводит к довольно сложной конфигурации магнитных полей рассеяния. Этим и объясняется замысловатый характер доменных структур в магнитной пленке композита (рис. 2б), а также тот факт, что в различных областях образца магнитная структура изменяется по-разному. Поэтому было сложно предсказать заранее, как именно она себя поведет.

Значительно лучших результатов в плане контроля поверхностей удалось достичь при изготовлении гетероструктур на основе магнитоэлектрика феррита висмута BiFeO_3 (BFO) и ферромагнитного сплава $\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$ (CoFe) [3]. В них удастся управлять намагниченностью CoFe с помощью электрического поля, приложенного к BFO (рис. 3а). К этому результату исследователи шли не один год (см. ПерсТ 13, вып.10, 2006), поскольку феррит висмута давно известен как материал, обладающий сегнетоэлектрическим и антиферромагнитным упорядочением при комнатных температурах. Проблема состоит в

том, что магнитные моменты антиферромагнитных подрешеток практически полностью компенсируют друг друга и суммарная намагниченность ВФО невелика (~5Гс). Усилить ее можно путем напыления поверх кристалла феррита висмута слоя ферромагнетика CoFe, обменно-связанного с ним: переключая электрическим полем электрическую поляризацию феррита висмута и меняя, тем самым, оси анизотропии, можно поворачивать спины антиферромагнитных подрешеток, а значит, посредством обменной связи слоев управлять большой намагниченностью (1500Гс) в слое CoFe. На рис. 3а показано действие электрического поля на микромагнитную структуру CoFe: после воздействия электрического поля преобладающий контраст меняется с темного на светлый, что означает поворот в плоскости пленки средней намагниченности на 90 градусов. Можно видеть, что полного контроля не удается добиться и здесь: слой ферромагнетика разбит на мелкие домены неправильной формы, и можно говорить лишь о переключении средней намагниченности. Кроме того, поля переключения достаточно велики (порядка 100кВ/см).

концепция магнитной записи претерпит существенные изменения.

А. Пятаков

1. A.C. Логгинов и др., *Письма в ЖЭТФ* **86**, 124 (2007).
2. Tien-Kan Chung et al, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 112509 (2008).
3. Ying-Hao Chu et al, *Nature Mater.*, *Adv. Online Publication* (27 April 2008).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Селективное обратимое окисление однослойных углеродных нанотрубок

Углеродная нанотрубка (УНТ) представляет собой сверхминиатюрное электронное устройство, которое может быть использовано в качестве элемента интегральной схемы. Параметры такого устройства (ширина запрещенной зоны, проводимость и другие) зависят от структурных характеристик нанотрубки, таких как диаметр и хиральность (угол между осью нанотрубки и гексагональной плоскостью, из которой эта нанотрубка составлена). Таким образом, некоторые из синтезируемых нанотрубок обладают металлической проводимостью, а другие характеризуется полупроводниковыми свойствами, причем ширина запрещенной зоны этих полупроводников изменяется в зависимости от диаметра и хиральности в довольно широких пределах. Поскольку при массовом синтезе нанотрубок их параметры характеризуются значительным разбросом, основная проблема, которая должна быть решена на пути практического использования УНТ в нанoeлектронике, состоит в необходимости селективного отбора УНТ с заданными электронными характеристиками.

В настоящее время проблема разделения УНТ, обладающих различными электронными характеристиками, исследуется во многих лабораториях мира. Среди различных подходов, предлагаемых для решения этой проблемы, наиболее перспективным представляется метод, основанный на селективном проведении химических реакций. Возможности этого метода были, в частности, продемонстрированы недавно авторами работы, выполненной в одном из колледжей штата Массачусетс (США) [1]. В качестве окислителя использовали синглетный кислород, присоединение которого к однослойным УНТ проводили в суспензии тетрагидрофурана (ТГФ) под воздействием излучения вольфрамогалогенной лампы. Для получения синглетного кислорода использовали реакцию молекулярного кислорода с тетрафенилпорфином, под воздействием УФ облучения. После завершения реакции окисления нанотрубки промывали этанолом, в течение 10 минут центрифугировали и четырежды профильтровывали для удаления тетрафенилпорфина. Факт окисления нанотрубок регистрировали по изменению спектров поглощения в видимой области, на которых в результате окисления исчезали извест-

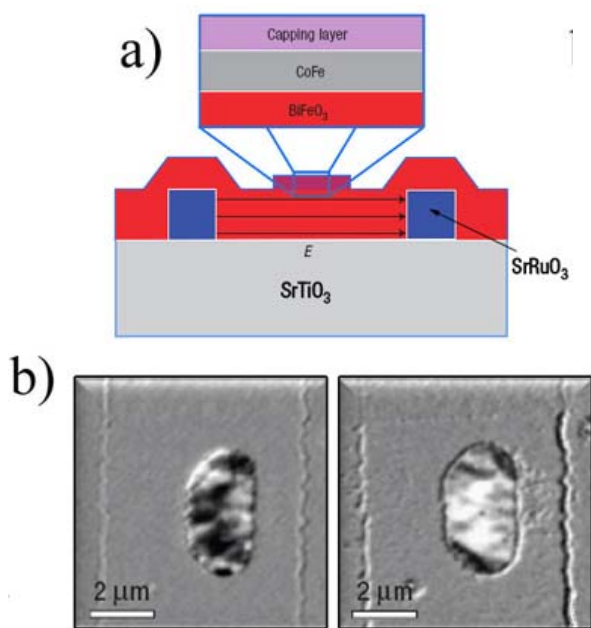


Рис. 3. а) Поперечный разрез структуры: электрическое поле в феррите висмута BiFeO_3 создается между электродами из SrRuO_3 , на кристалле BiFeO_3 располагается слой ферромагнетика CoFe и защитный слой (capping layer); б) магнитооптические изображения в рентгеновских лучах начального состояния и микромагнитной конфигурации после воздействия электрического поля: намагниченность в плоскости пленки CoFe поворачивается на 90 градусов [3].

В этой заметке были приведены результаты первых опытов в области управления микромагнитной структурой с помощью электрического поля. Несомненно, за ними последуют и другие, в которых будут достигнуты меньшие управляющие напряжения в однофазных кристаллах или лучшая воспроизводимость результатов в композитах и гетероструктурах, и, возможно, в недалеком будущем сама

ные особенности, связанные с сингулярностями Ван Хофа. В результате отжига окисленных образцов УНТ в вакууме при температуре 200°C в течение 2 часов указанные особенности восстанавливались, что свидетельствовало об обратимом характере окисления.

Обработка спектральных данных показывает, что скорость реакции окисления для УНТ, обладающих металлической проводимостью, существенно превышает соответствующую величину для полупроводниковых нанотрубок. Так, окисление полупроводниковых нанотрубок было зарегистрировано только через 15 часов наблюдений, в то время как металлические нанотрубки окислялись уже на первом часу эксперимента. Тем самым можно заключить, что окисление УНТ синглетным кислородом имеет обратимый характер, причем реакция характеризуется селективностью по отношению к металлическим УНТ. Этот результат может быть положен в основу процесса отделения нанотрубок, обладающих полупроводниковыми свойствами, от металлических УНТ, что открывает перспективы использования УНТ в нанoeлектронике.

А.В.Елецкий

1. *M.A.Hammon et al., Chem. Phys. Lett. 447, 1, (2007).*

Сортировка однослойных углеродных нанотрубок с помощью УФ облучения

ПерсТ неоднократно освещал проблему разделения углеродных нанотрубок (УНТ) по их характеристикам. От успешного решения этой проблемы зависит возможность реализации перспектив использования УНТ в нанoeлектронике. В частности, для работы полевого транзистора пригодны только нанотрубки, обладающие полупроводниковыми характеристиками, в то время как использование для этой цели нанотрубок с металлическими характеристиками приведет к короткому замыканию и разрушению цепи. В настоящее время разработано уже несколько подходов к селекции нанотрубок. Эти подходы основаны главным образом на проведении химических реакций, скорость которых зависит от электронных свойств нанотрубки.

Недавно в результате исследований, выполненных в Пекинском университете (Китай) было установ-

лено, что селекция может быть произведена благодаря различному характеру взаимодействия однослойных УНТ разного типа с ультрафиолетовым излучением. Нанотрубки со средним диаметром 1,2 нм были выращены на сапфировой подложке при температуре 850°C в присутствии катализатора на основе железа в результате пропускания смеси аргона с парами этанола и небольшим количеством (на уровне 3%) паров воды. Полученную таким образом матрицу из высокоупорядоченных однослойных УНТ облучали светом электродуговой ксеноновой лампы мощностью 500 Вт, имеющей широкополосный спектр и широко используемой в качестве симулятора солнечного излучения. Интенсивность облучения в спектральном диапазоне от 0,18 до 11 мкм составляла около 75 мВт/см². Наблюдения, выполненные с помощью атомного силового микроскопа, показали, что облучение образцов привело к разрушению части УНТ. При этом оказалось, что в наибольшей степени подвержены разрушению нанотрубки меньшего диаметра ($d < 1,3$ нм). Эти выводы нашли свое подтверждение в спектрах КР образцов, измеренных до и после облучения. Кроме того, анализ спектров КР образцов облученных и необлученных нанотрубок позволил сделать вывод о преимущественном разрушении нанотрубок с металлической проводимостью в результате облучения образцов. Так, облучение в течение 30 мин. образца, содержащего 370 нанотрубок с металлической проводимостью и 327 нанотрубок с полупроводниковыми свойствами, привело к разрушению 221 металлической нанотрубки (59,7%) и лишь 17 (5,2%) полупроводниковых нанотрубок. Таким образом, скорость разрушения металлических нанотрубок в 13 раз превосходит этот параметр для полупроводниковых УНТ. Сформулированные выводы о преимущественном разрушении УНТ с металлическими характеристиками подтверждаются результатами сравнительных измерений транспортных характеристик образцов.

А.В.Елецкий

1. *Y.Zhang et al., J. Phys. Chem. 112, 3849 (2008).*

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: А.В.Елецкий, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64