

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Узловая *d*-волновая жидкость в недодопированном купрате *Bi-2212*

Высокотемпературная сверхпроводимость купратных ВТСП возникает при дырочном допировании родительского моттовского диэлектрика до уровня $\delta \approx 0.05$ дырок на атом меди в слоях CuO_2 . К настоящему времени характеристики антиферромагнитного ($\delta < 0.02$) и сверхпроводящего ($\delta > 0.05$) состояний достаточно хорошо изучены. Но между ними “вклинивается” загадочная псевдощелевая фаза. Занимаемая ею область на фазовой диаграмме $\delta - T$ увеличивается с ростом температуры (рис. 1). Именно из этой (а не из антиферромагнитной) фазы при дальнейшем допировании рождается сверхпроводимость. Поэтому так важно понять ее природу. Одна из сложностей исследования такого “промежуточного” состояния связана с тем, что при низкой температуре оно существует в очень узком диапазоне δ , когда антиферромагнетизма уже нет, а сверхпроводимости еще нет.

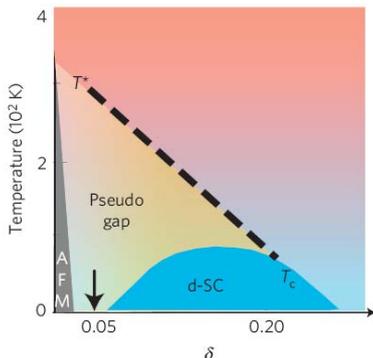


Рис. 1. Фазовая диаграмма ВТСП в “координатах температура – концентрация дырок”.

В работе [1] большая группа ученых из США, Швейцарии, Израиля, Японии, Франции и Германии представила результаты новых исследований электронной структуры монокристаллов и тонких пленок

Bi-2212 методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) в широком диапазоне δ . Упор был сделан на составы с $\delta \approx 0.04$, отвечающие зазору между антиферромагнитным участком фазовой диаграммы и “сверхпроводящим куполом” (стрелка на рис. 1). Если сильно недодопированные монокристаллы *Bi-2212* получить довольно трудно (для удаления кислорода требуются очень высокие температуры, что приводит к разложению образца), то с пленками все хорошо получается благодаря большой величине отношения поверхность/объем. Анализ данных ARPES показал, что в диэлектрическом состоянии спектральная щель Δ (псевдощель) анизотропна в импульсном пространстве и монотонно уменьшается от своей максимальной величины при $\theta = 0$ (импульс Ферми \mathbf{k}_F параллелен границе зоны Бриллюэна) до нуля при $\theta = 45^\circ$ (\mathbf{k}_F направлен по диагонали зоны Бриллюэна). При переходе (с ростом δ) из диэлектрического в сильно недодопированное, но уже сверхпроводящее состояние этот вид зависимости $\Delta(\theta)$ полностью сохраняется (рис. 2a), хотя на кривой распределения энергии (EDC) теперь появляются когерентные квазичастичные пики, интенсивность которых увеличивается по мере приближения к оптимальному допированию. Максимальная величина $\Delta_{\max} = \Delta(\theta = 0)$ при допировании уменьшается (рис. 2b).

И далее ...

- 2 Поверхностная сверхпроводимость на границе диэлектрика с ионной жидкостью

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Квантовый компьютер: когда же наконец?!

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 4 Игра в кубики

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Каждая примесь – знай свое место!

МАНГАНИТЫ

- Листочки клевера и тайны доменных границ

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Микрокапсулы с дистанционным управлением

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ, ОБЗОРЫ, ПУБЛИКАЦИИ

- 8 Обзоры актуальных проблем

КОНФЕРЕНЦИИ

Workshop on Principles and Design of Strongly Correlated Electronic Systems,
2 - 13 August 2010,
Miramare - Trieste, Italy

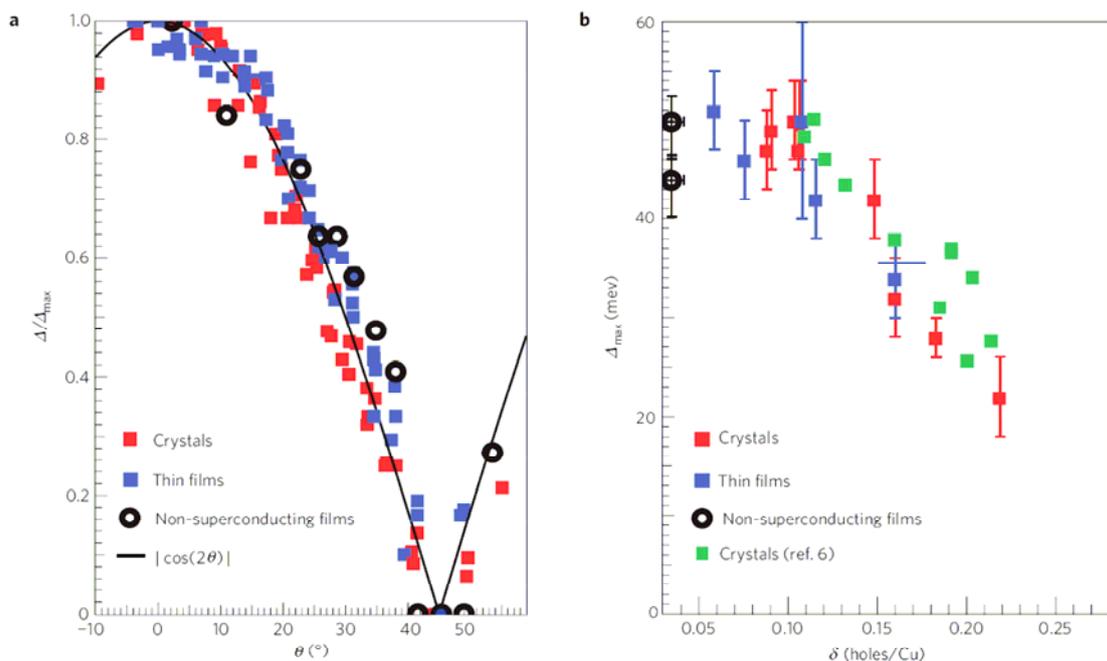


Рис. 2. *a* - Спектральная щель Δ как функция угла θ между импульсом Ферми и направлением $(0,0)-(\pi,0)$ зоны Бриллюэна. $\Delta_{\max} = \Delta(\theta=0)$. *b* - Зависимость Δ_{\max} от уровня допирования δ .

Универсальная d -волновая ($|\cos(2\theta)|$) форма зависимости $\Delta(\theta)$ и в сверхпроводящем, и в псевдощелевом состоянии, свидетельствует против “двухщелевой модели”, согласно которой сверхпроводящая щель и псевдощель имеют принципиально разную природу. Если даже предположить, что в [1] диэлектрические образцы были неоднородны по составу и содержали включения сверхпроводящей фазы, то все равно такие включения являются не просто поверхностным эффектом, а отражают свойства материала, поскольку результаты для тонких пленок и монокристаллов совпадают. Таким образом, простейшей картиной псевдощелевого состояния, согласующейся с данными работы [1], является “узловая жидкость” некогерентных куперовских пар, которая становится сверхпроводящей только при добавлении в нее новых носителей заряда.

Л. Опенов

1. *U. Chatterjee et al., Nature Phys. 6, 99 (2010).*

Поверхностная сверхпроводимость на границе диэлектрика с ионной жидкостью

Задача о переходе полупроводников и диэлектриков в металлическое (и даже в сверхпроводящее) состояние не нова. Для ее решения используются как химические методы (легирование гетеровалентными примесями, внедрение межузельных ионов, создание дефицита катионов или анионов), так и физические (сильное сжатие). Все это делается с целью увеличения концентрации свободных носителей заряда n до как можно более высокого уровня. Так, недавно [1] была продемонстрирована возможность контроля сверхпроводимости границы раздела двух диэлектриков $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ в структуре полевого

транзистора (field-effect transistor, FET): если к электроду приложить напряжение V (рис. 1a), то на поверхности полупроводника будет накапливаться заряд, и n увеличится. Недостатком такого устройства является ограничение на n : при $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ напряженность поля $E \sim 10^6 \text{ В/см}$, и происходит пробой диэлектрика.

Ситуацию удастся исправить [2] путем включения в архитектуру FET электрохимической ячейки и замены граничащего с полупроводником твердого диэлектрика на электролит, представляющий собой раствор ионного соединения в полимерной матрице (рис. 1b). Такое гибридное устройство получило название транзистора с двойным электрическим слоем (electric double-layer transistor, EDLT). В нем E может достигать $\sim 10^7 \text{ В/см}$. Принцип работы EDLT основан на том, что с ростом V присутствующие в органическом растворителе ионы скапливаются у поверхности полупроводникового канала и формируют двойной электрический слой, который действует как наноконденсатор на границе раздела твердой и жидкой фаз. Используя EDLT, удастся достичь величины n как минимум на порядок больше, чем в обычных FET. Так, например, в работе [3] с помощью EDLT концентрация n в диэлектрике SrTiO_3 была доведена до $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$, и этот диэлектрик стал сверхпроводником с $T_c = 0.4 \text{ К}$.

Эффект индуцирования сверхпроводимости диэлектрика электрическим полем (да еще с такой низкой T_c) многие считали не более, чем научным курьезом, не имеющим дальнейших перспектив.

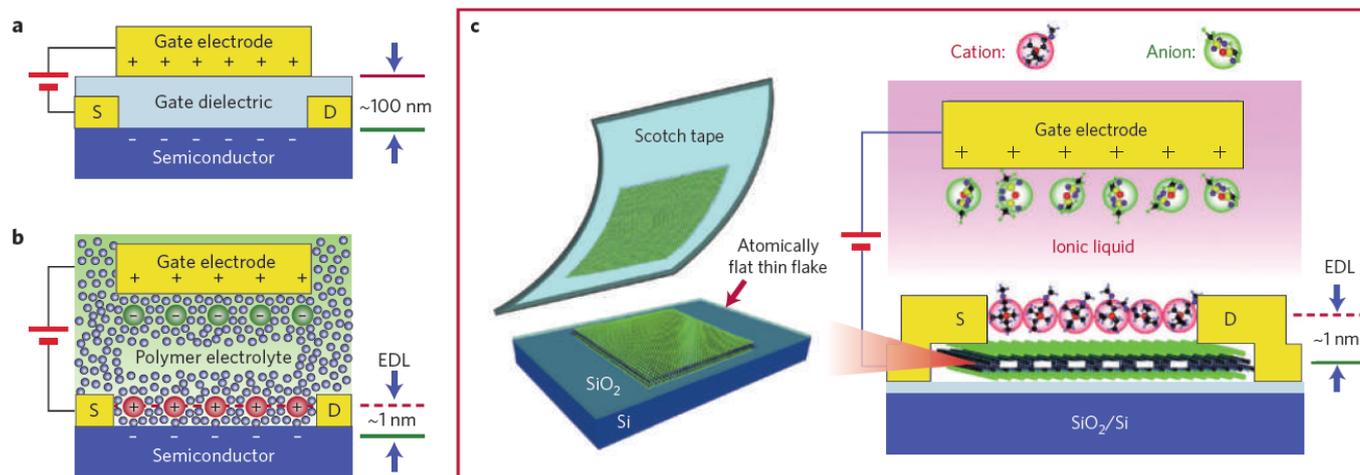


Рис. 1. *a* - Схематическое изображение обычного FET металл-диэлектрик-полупроводник. Символами +/- обозначены области с избытком/дефицитом электронов, образующиеся при подаче на структуру положительного напряжения. S – источник, D – сток. *b* - Устройство EDLT, в котором твердый диэлектрик заменен полиоксидэтиленом в органическом растворителе с добавленным в него LiClO_4 (красные сферы – ионы Li^+ , синие – ClO_4^-). *c* - Модификация EDLT в работе [4]: полимер заменен ионной жидкостью; при подаче напряжения заряд накапливается на атомарно плоской поверхности монокристаллического слоя ZrNCl , полученного путем микроотщепления с использованием обычной липкой ленты.

Но японские физики сделали новый шаг [4]: заменив в EDLT полимер на органическую ионную жидкость с гораздо меньшим, чем у растворенных в полимере, размером катионов (рис. 1с). Они уменьшили толщину двойного электрического слоя до субнанометровых размеров, тем самым существенно увеличив его емкость. Это позволило еще больше повысить n и индуцировать сверхпроводимость в диэлектрике ZrNCl при $T_c = 15.2$ К, практически совпадающей с максимальной T_c в Li_xZrNCl при химическом легировании. Интересно, что T_c поверхности ZrNCl монотонно увеличивается с ростом n (вплоть до максимальной достигнутой в [4] величины n), тогда как в объемных образцах Li_xZrNCl на зависимости T_c от x (то есть T_c от n) имеется максимум. Возможно, это связано с различием кристаллических структур ZrNCl и Li_xZrNCl . Тут надо разбираться.

Весьма заманчиво применить эту методику к недопированным слоистым купратам и пниктидам. Может быть, тогда наконец-то удастся достичь более высокой T_c , чем при химическом замещении атомов и/или изменении содержания кислорода?

Л. Опенов

1. A.D.Caviglia et al., *Nature* **456**, 624 (2008).
2. M.J.Panzer et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 103503 (2005).
3. K.Ueno et al., *Nature Mater.* **7**, 855 (2008).
4. J.T.Ye et al., *Nature Mater.* **9**, 125 (2010).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

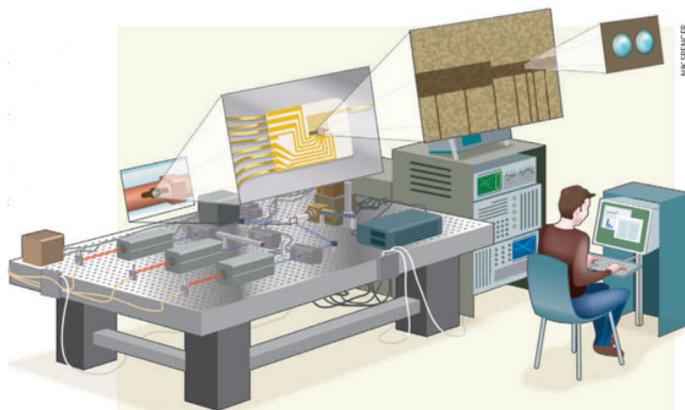
Квантовый компьютер: когда же наконец?!

Во второй половине XX века, как следствие огромных трудностей, с которыми сталкивались ученые при моделировании квантовых эффектов на класси-

ческих компьютерах, постепенно пришло осознание того, что для этих целей нужно использовать не классические, а квантовые системы. Так возник термин “квантовый компьютер” – устройство, которое обрабатывает информацию, представленную в виде набора не битов, а квантовых битов (кубитов) – суперпозиций 0 и 1. Физическими носителями кубитов могут быть, например, фотоны (продольная и поперечная поляризация), ядерные и электронные спины (“вверх” и “вниз”) и пр. Всплеск интереса к квантовым вычислениям в 1990-х годах связан с разработкой алгоритмов решения на квантовом компьютере некоторых математических задач (в том числе крайне важной для криптографии задачи о факторизации больших целых чисел) за времена, на много порядков меньше, чем для этого требуется обычным компьютерам. Тогда и стали всерьез обсуждать возможные пути создания реального квантового компьютера.

Основная проблема здесь заключается в том, как свести к минимуму нежелательное воздействие внешнего окружения на “нежные” суперпозиционные квантовые состояния. Такие воздействия приводят к декогеренции – потере когерентности состояния, в котором закодирована квантовая информация, а следовательно – к утрате этой информации. Но все кубиты не могут быть полностью изолированы от окружающей среды, ведь для операций с кубитами на них нужно как-то воздействовать. Однако делать это надо так, чтобы не затрагивать состояний других кубитов. Для борьбы с декогеренцией были разработаны специальные методы коррекции квантовых ошибок. Но, во-первых, любую такую ошибку можно исправить, во-вторых, для этого требуется, как правило, большое количество дополнительных кубитов и операций и, нако-

нец, в-третьих, вероятность ошибки каждой операции, чтобы ее можно было исправить, не должна превышать ~ 0.0001 . О такой точности пока остается только мечтать.



Современная экспериментальная установка для работы с двумя кубитами – ионами в магнитной ловушке (синие кружки) представляет собой довольно громоздкое сооружение. Ведь для квантовых операций (инициализации, контроля, измерения) требуются и лазеры, и оптические устройства, и разнообразное электронное оборудование, и обычный компьютер, и, конечно, грамотный специалист, который управляет всем этим хозяйством.

В идеале квантовый компьютер должен быть “масштабируемым” (scalable), то есть допускать принципиальную возможность практически неограниченно (если забыть про стоимость) увеличивать число кубитов. Но, несмотря на отсутствие фундаментальных запретов, добиться этого пока не удается: восемь кубитов – максимум на сегодняшний день, и еще неизвестно, через сколько лет удастся хотя бы разменять второй десяток. Не исключено также, что за неудачами с масштабируемостью кроется какая-то новая физика... Так давайте надеяться, что мы увидим работающий квантовый компьютер еще при нашей жизни, но при этом и не станем особо переживать, если вдруг встретим на этом пути непреодолимые препятствия, воздвигнутые самой Природой.

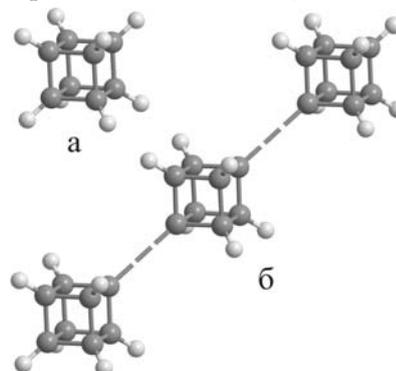
По материалам заметки: E.Knill, “Quantum computing”, *Nature* **463**, 441 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Игра в кубики

Повышенный интерес к созданию и исследованию современных наноматериалов вызван, прежде всего, их уникальными свойствами, зачастую радикально отличающимися от свойств уже известных “классических” материалов, а также перспективами практического использования. Обычно подобные соединения состоят из элементарных блоков особой геометрии (кластеров). Объединившись в ансамбли, эти блоки порождают целые классы веществ с новой архитектурой и необычными физико-химическими свойствами. Синтезированный около полувека назад кубан C_8H_8 (рис. а), наверное, наиболее известный кластер из ряда платоновых угле-

водородов, до сих пор привлекает внимание исследователей, равно как и производные от него соединения. Например, кубаны, лишенные одного или нескольких атомов водорода (дегидрированные кубаны) способны образовывать олигомеры, то есть квазиодномерные или квазидвумерные наноструктуры, построенные из небольшого числа одинаковых фрагментов (кубиленов), которые обладают интересными геометрическими и энергетическими свойствами. В работе [1] представлены результаты теоретического исследования линейных олигомеров (рис. б), которые предполагается использовать в качестве строительных блоков для жидкокристаллических соединений. Но помимо перспектив практического использования, исследование линейных олигомеров на основе кубана представляет еще и фундаментальный интерес. Компьютерное моделирование этих наносистем – первый шаг к анализу устойчивости макроскопических трехмерных кластерных структур на основе кубиленовых фрагментов (например, структуры суперкубана, который, возможно, является сверхплотным веществом, по плотности превосходящим алмаз).



Геометрические структуры молекулы кубана C_8H_8 (а) и линейного олигомера, построенного из кубиленовых фрагментов $C_8H_7-(C_8H_6)_N-C_8H_7$ (б). Большие темные шары – атомы углерода, маленькие светлые шары – атомы водорода.

Основной целью работы [1] являлось теоретическое исследование геометрических и энергетических характеристик линейных олигомеров, построенных из кубиленовых единиц, а также моделирование процессов распада и расчет энергий активации и частотных факторов в формуле Аррениуса для температурной зависимости времени жизни олигомеров, состоящих из двух, трех и четырех кубиленовых фрагментов. Авторы проанализировали термическую устойчивость этих наноструктур и выяснили, что при увеличении числа кубиленовых фрагментов в олигомере энергия активации сначала существенно уменьшается, а затем остается практически неизменной, другими словами, устойчивость олигомеров понижается с увеличением “длины”, но, тем не менее, остается достаточно высокой. Например, при комнатной температуре время жизни тетракубила (линейного олигомера, состоящего из четырех кубиленовых фрагментов) достигает $\tau \sim 10^5$ с. Детально проанализировав процесс распада исследуе-

мых наноструктур, авторы пришли к выводу, что он происходит по сценарию, схожему с распадом кубана. Среди основных продуктов распада доминируют соединения на основе молекул циклооктатетраена, значительно реже авторы обнаруживали различные квазиодномерные соединения на основе кубиленовых и бензолных фрагментов в совокупности с молекулами ацетилена или фенилацетилена.

Полученные результаты могут подсказать направление поиска новых способов получения линейных олигомеров, построенных из кубиленовых фрагментов, кроме того, знание зависимостей $\tau(T)$ необходимо для оптимизации условий синтеза этих наноструктур и материалов на их основе. Будем надеяться, что проведенные авторами “численные эксперименты” стимулируют дальнейшие исследования в физикохимии кубанов.

М. Маслов

1. Хим. физика 29, 92 (2010).

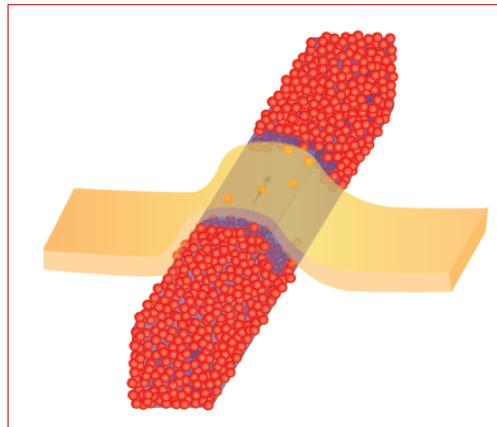
НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Каждая примесь – знай свое место!

Полевой транзистор – основа современной полупроводниковой электроники – представляет собой трехтерминальное устройство, включающее источник, сток и соединяющий их канал с управляющим электродом. Изменяя напряжение на электроде, можно регулировать концентрацию электронов в канале, а значит – его сопротивление и, соответственно, ток через него. Уменьшение размера транзисторов до нанометрового диапазона (с целью повышения быстродействия и плотности размещения на чипе) приводит к тому, что их свойства определяются всего лишь несколькими атомами легирующей примеси в канале. Сильные флуктуации числа этих атомов (даже во вроде бы совершенно идентичных устройствах) ведут к невоспроизводимости электронных характеристик и делают задачу массового производства нанотранзисторов весьма проблематичной.

В работе [1] группа французских физиков показала, что наличие в канале даже одного единственного примесного атома ведет к резкому увеличению проводимости канала при комнатной температуре и к соответствующему уменьшению порогового напряжения V_t для включения транзистора. При этом энергия ионизации примеси увеличивается в ≈ 2 раза, если последняя расположена вблизи слоя SiO_2 , разделяющего канал и электрод. Таким образом, работа нанотранзистора определяется не только количеством примесных атомов, но и их конкретным расположением. Чтобы избежать сильных флуктуаций V_t , нужно научиться размещать примеси с субнанометровой точностью. Это, кстати, может пригодиться и при конструировании квантовых информационных устройств, в которых донорные атомы используются для адресации ку-

битов и организации связи между ними. Заметим, что значительное влияние отдельных заряженных центров, случайно оказавшихся в канале, на ток транзистора (особенно, если они расположены вблизи контакта истока) было предсказано теоретически в работе [2].



Транзистор в работе [1] включает короткий кремниевый канал, расположенный между двумя контактами с большой концентрацией примесных атомов As (красные шарики), и управляющий электрод (бежевого цвета). В процессе изготовления отдельные примесные атомы могут попасть из контактов в канал, и тогда ток через него возрастет.

1. M. Pierre et al., *Nature Nanotech.* 5, 133 (2010).

2. V. Vyurkov et al., *Int. Conf. 'Micro- and Nanoelectronics' (ICMNE'2009)*, 5-9 Oct. 2009, Zvenigorod, Russia. Abstract O3-09.

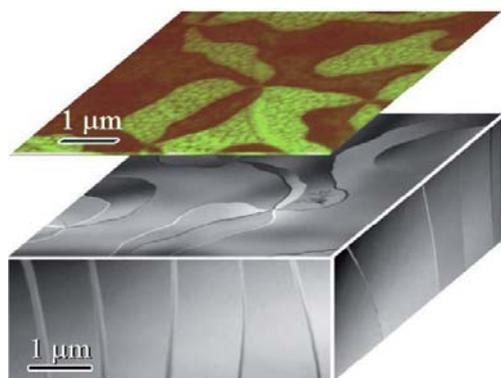
МАНГАНИТЫ

Листочки клевера и тайны доменных границ

Группа исследователей из Rutgers Univ. (США) обнаружила в необычные клеверообразные доменные структуры в гексагональном манганите YMnO_3 [1] (рис. 1). Эти структуры проливают свет на причины явления, обнаруженного еще в 2002 году [2]: границы между антиферромагнитными доменами в YMnO_3 имеют склонность “прикрепляться” к сегнетоэлектрическим доменным границам (магнитоэлектрический пиннинг). Это явление в свое время привлекло повышенное внимание научного сообщества к мультиферроикам (средам с магнитным и сегнетоэлектрическим упорядочением), и интерес к ним с каждым годом только нарастает.

Долгое время магнитоэлектрический пиннинг доменных границ оставался необъясненным. Было предложено несколько теоретических моделей явления, предполагавших возникновение механических напряжений в месте расположения стенки [3] или взаимодействие посредством неоднородного магнитоэлектрического эффекта [4]. Авторы [1], используя просвечивающую электронную микроскопию, выяснили, что наблюдаемая “клеверообразная” структура образована доменами не сегнетоэлектрическими, как предполагалось ранее, а структурными, представляющими собой области с раз-

личным искажением кристаллической решетки. Электрическая поляризация является здесь скорее побочным продуктом: из шести видов структурных доменов, соответствующих гексагональной симметрии, три имеют поляризацию, направленную вверх, остальные три — противоположную. Однако наименьшей энергией обладают только те конфигурации, в которых структурные доменные границы совпадают с сегнетоэлектрическими. Поскольку искажения кристаллической решетки задают определенное направление намагниченности магнитных подрешеток, то структурные домены ниже точки магнитного упорядочения становятся также и антиферромагнитными. Так что нет ничего удивительного в том, что сегнетоэлектрические и магнитные домены совпадают — просто причиной существования и тех и других является наличие структурных доменов. Такой механизм объясняет эффект магнитоэлектрического пиннинга в ряде веществ, впрочем, стоит отметить, он не является универсальным, и другие механизмы, предложенные ранее [3,4], могут вносить свой вклад в картину эффекта.



Клеверообразная доменная структура в манганите YMnO_3 : вверху — изображение сегнетоэлектрической структуры в сканирующем зондовом микроскопе, внизу — изображение структурных доменов (областей с различными искажениями кристаллической решетки) полученное методом просвечивающей электронной микроскопии.

Как отмечается в комментарии на статью [1], написанном Максимом Мостовым [5], клеверообразные структуры не только позволяют объяснить магнитоэлектрический пиннинг, но интересны сами по себе как необычные разновидности магнитных вихрей. Последние имеют большие перспективы практических приложений в устройствах магнитной памяти, и новые эффекты, с ними связанные, представляют несомненный интерес.

А.Пятаков

1. T. Choi et al., *Nature Mater.* **9**, 253 (2010).
2. M. Fiebig et al., *Nature* **419**, 818 (2002).
3. A. V. Goltsev et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 177204 (2003).
4. Z. V. Gareeva, A. K. Zvezdin, *Phys. Status Solidi, RRL* **3**, 79 (2009). ([Перст 16, вып. 6, с. 5 \(2009\)](#)).
5. M. Mostovoy, *Nature Mater.* **9**, 188 (2010).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Микрокапсулы с дистанционным управлением

Новые приборы и композиты, созданные на основе углеродных нанотрубок (УНТ), наглядно демонстрируют важность фундаментальных исследований — практическое применение этих уникальных материалов стало возможным только благодаря изучению структурных, электронных и других свойств. Конечно, на это требуется время. Вот уже почти 20 лет и теоретики, и экспериментаторы активно исследуют оптические явления в УНТ и, в частности, их связь с плотностью электронных состояний в квазиодномерных материалах, но на практике полученные результаты пока используются мало. Правда, в лабораторных масштабах достигнут значительный прогресс. Вот один из примеров. Используя оптический нагрев углеродных нанотрубок, исследователи из Univ. of California, Berkeley (США) [1] создали заполненные жидкостью микрокапсулы нового поколения — «с дистанционным управлением». Микрокапсулы с жидкостью внутри известны в фармацевтике (защита лекарственных препаратов, пролонгирование их действия и др.), в полиграфической промышленности («самокопирующая» бумага), в химической промышленности (самозалечивание полимеров [2]) и др. Как правило, оболочка таких микрокапсул или растворяется в определенной среде, или разрушается при механическом воздействии (рис. 1), что ограничивает возможность их применения.

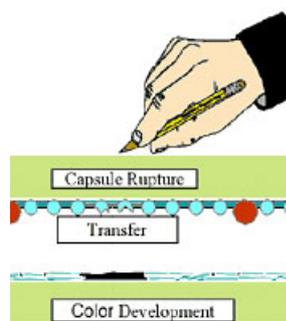


Рис. 1. «Самокопирующая» бумага. На нижней поверхности верхнего листа бумаги — микрокапсулы с невидимыми чернилами. Стенки микрокапсул разрушаются под механическим нажимом. Верх нижнего листа покрыт реагентами, которые при взаимодействии с «чернилами» дают цветную копию.

Новизна результатов калифорнийских ученых не в микрокапсулах как таковых, а в том, что они нашли способ управлять этими микрокапсулами на расстоянии, вскрывая оболочку в нужное время с помощью недорогого доступного лазера ближнего ИК-диапазона. Для этого и пригодились нанотрубки, которые поглощают свет в широком диапазоне длин волн, в том числе в видимом и ближнем ИК-диапазоне [3,4]. (Недавние эксперименты американских ученых [4], подтверждая теоретические результаты 1997 г. [5], показали, что из углеродных нанотрубок можно сделать почти идеальный черный поглотитель с коэффициентом отражения 0.045% для длины волны 633 нм). Кроме того, углеродные нанотрубки эффективно превращают свет в тепло [6]. По мнению авторов работы [1] оптический нагрев нанотрубок приводит к нагреву окру-

жающей их жидкости, быстрому набуханию микрокапсулы и разрыву ее оболочки.

Для создания микрокапсул ученые использовали химический метод, основанный на реакциях полимеризации и поликонденсации на границе раздела фаз вода – масло [7]. Были получены наполненные жидкостью микрокапсулы диаметром 100-1000 мкм (в зависимости от скорости перемешивания), с непроницаемыми полиамидными стенками толщиной 1 мкм (рис. 2). Суспензия многостенных нанотрубок, полученная с помощью ультразвуковой обработки, была добавлена в капсулируемую жидкость. Как видно из рис. 2b, большая часть нанотрубок оказалась внутри микрокапсул. Некоторое количество было обнаружено внутри стенок и на стенках (рис. 2d).

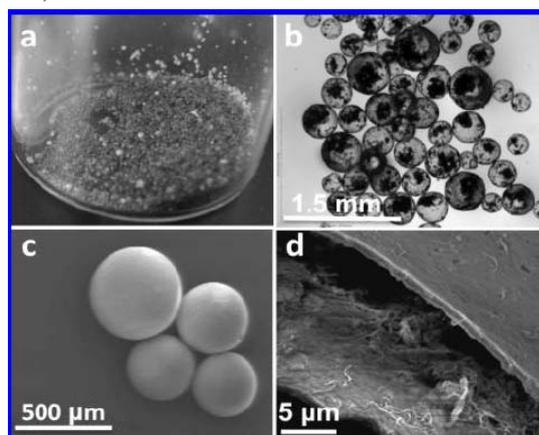


Рис. 2. Заполненные толуолом полиамидные микрокапсулы, содержащие 1 масс.% УНТ. (a) и (b) - Оптические изображения; (c) и (d) – SEM-изображения. d) - разрушенная микрокапсула – видны углеродные нанотрубки (белые связки).

Проверка, проведенная через 2 месяца, показала, что за это время из микрокапсул, находившихся на воздухе, практически ничего не выделилось. Содержимое также сохранялось, когда микрокапсулы помещали в растворители (не вызывающие набухание полиамидной оболочки). А вот облучение на воздухе с использованием полупроводникового лазера ближнего ИК-диапазона (400 мВт, 785 нм) привело к разрыву микрокапсул с толуолом/УНТ через 0.02 сек. Разрыву предшествовало набухание с увеличением объема примерно в 2.5 раза (рис. 3). Воздействие лазера на микрокапсулы без УНТ не вызывало никаких изменений.

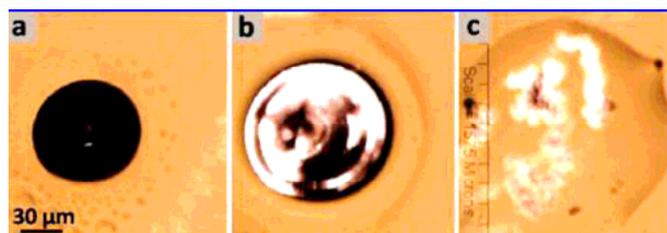


Рис. 3. Оптические изображения микрокапсулы с толуолом/УНТ до облучения (a), во время облучения (b) и после разрыва (c).

Для наглядной демонстрации своей концепции “дистанционного управления” авторы [1] использовали так называемую *click*-реакцию*. Микрокапсулы с фенилацетиленом/УНТ были погружены в раствор, содержащий бензил-азид. Также был добавлен Cu(I)-катализатор, в присутствии которого фенилацетилен и бензил-азид бурно реагируют, образуя триазол. По убыли азидов можно судить о ходе реакции. Рис. 4a демонстрирует мирное сосуществование реагентов в течение 24 ч – до лазерного вскрытия микрокапсул. В течение последующего часа в ходе реакции потребляется весь бензил-азид. На рис. 4b показано, как можно управлять реакцией, проводя ее поэтапно – вскрывая лазером порции распределенных в пространстве микрокапсул.

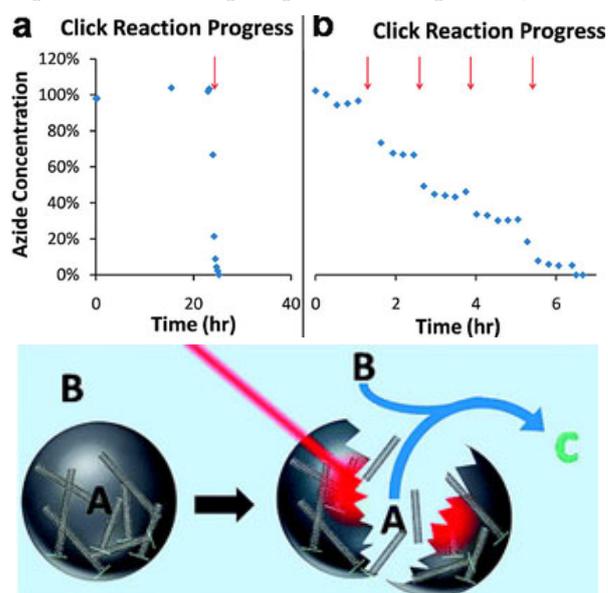


Рис. 4. Лазерное вскрытие микрокапсул с фенилацетиленом/УНТ приводит к *click*-реакции (экспериментальные результаты и схема процесса). Красные стрелки на рис. 4(a,b) указывают моменты лазерного воздействия.

Таким образом, реагирующие друг с другом вещества можно хранить в непосредственной близости друг от друга и выделять один из реагентов по мере необходимости, управляя реакцией.

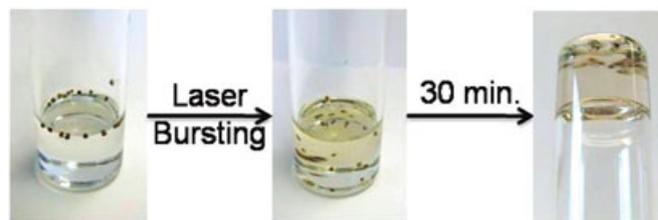


Рис. 5. Полимеризация ДЦПД после лазерного вскрытия микрокапсул с катализатором.

Еще один интересный эксперимент – “полимеризация по заказу”. Ученые поместили в микрокапсулу раствор катализатора полимеризации в толуоле (и, конечно, добавили УНТ). Эти микрокапсулы были диспергированы в дециклопентадиене (ДЦПД). В течение нескольких недель никаких изменений не происходило (вязкость заметно не менялась). Но разрыв микрокапсул под действием лазерного из-

лучения инициировал полимеризацию – в течение нескольких минут “желирование”, а примерно через полчаса – затвердевание (рис. 5). Важно, что катализатор при хранении в микрокапсулах не потерял свою активность.

Таким образом, ученые нашли способ обеспечить сосуществование несовместимых химических веществ “в одном сосуде” и проводить реакции “по заказу”. Используется недорогой доступный лазер с низким энергопотреблением. Такой подход позволяет вскрывать как отдельные микрокапсулы, так и все их количество сразу. Пока получены первые результаты, но они уже позволяют надеяться на расширение применения микрокапсул с углеродными нанотрубками, в том числе в электронике и медицине (для лечения опухолей). Дальнейшее изучение оптических свойств УНТ позволит обеспечить новый уровень контроля. Для выделения “по заказу” химических веществ, помещенных в разные микрокапсулы “в одном сосуде”, можно будет использовать лазеры, работающие в различных диапазонах длин волн, и нанотрубки определенного типа (в том числе модифицированные) с соответствующими спектрами поглощения.

* “click”-химия, или “click”-реакция - реакция циклоприсоединения конечных алкинов и азидов (катализатор - одновалентная медь), отличается эффективностью, избирательностью и широко используется в самых различных областях химии и биотехнологии, а также при создании наноматериалов.

О.Алексеева

1. S.J. Pastine et al., *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 13586 (2009).
2. [ПерсТ 16, вып. 21, с. 5 \(2009\).](#)
3. [ПерсТ 9, вып. 9, с. 5 \(2002\).](#)
4. Z.-P. Yang et al., *Nano Lett.* **8**, 446 (2008).
5. F.J. Garcia-Vidal et al., *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4289 (1997).
6. D. Okawa et al., *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 5396 (2009).
7. E. Mathiowitz et al., *J. Membr. Sci.* **40**, 1 (1989).

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ, ОБЗОРЫ, ПУБЛИКАЦИИ

Обзоры актуальных проблем

В январском номере журнала “Успехи физических наук” опубликован обзор “Квантовый фазовый переход сверхпроводник – изолятор” [1], посвященный электронным системам, в которых разрушение сверхпроводимости приводит к переходу не в металлическое, а в диэлектрическое состояние. Обсуждаются особенности сверхпроводимости материалов с пониженной электронной плотностью, островковых пленок, высокорезистивных материалов со сверхпроводящими гранулами, решеток джозефсоновских контактов и пр. Проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований таких систем. Намечены пути поиска ответов на остающиеся пока не решенными вопросы.

1. В.Ф.Гантмахер, В.Т.Долгополов, *УФН* **180**, 3 (2010).

КОНФЕРЕНЦИИ

Workshop on Principles and Design of Strongly Correlated Electronic Systems, 2 - 13 August 2010, Miramare - Trieste, Italy

Topics:

Materials design

New perspectives on electron localization

New developments in quantum magnetism

Interplay between magnetism and superconductivity

Deadline for application: **15 April 2010**

E-mail: smr2157@ictp.it

Web: <http://agenda.ictp.it/smr.php?2157>

Семинар по магнетизму

2 марта 2010 года (17.00)

(конференц-зал ИФП РАН, ул. Косыгина, 2)

К.И. Кугель, А.Л. Рахманов, А.О. Сбойчаков (ИТПЭ РАН) - Неоднородные спиновые состояния в допированных кобальтитах

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой ИФТТ РАН и РИЦ «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, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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