

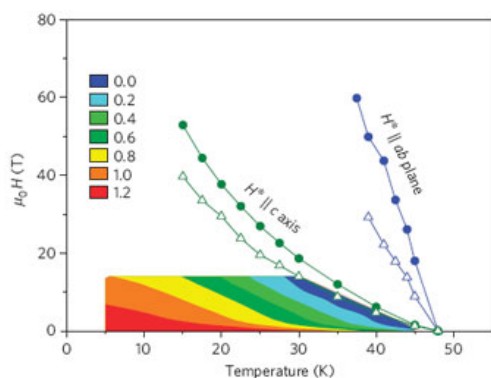
В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Большой изотропный критический ток в кристаллах $\text{SmFeAs}(\text{O},\text{F})$

Когда речь заходит о высокотемпературных сверхпроводниках (будь то купраты или пниктиды), то обычно разговор в итоге сводится к дискуссии о механизме их сверхпроводимости. Оно и понятно: физиков всегда привлекали фундаментальные вопросы. Со всем другим делом – практики, занимающиеся применением сверхпроводников. Для них главное – критические параметры того или иного материала (T_c , j_c , H_{c2}). Высокие – хорошо, низкие – плохо. Ведь непонимание природы куперовского спаривания в купратах отнюдь не помешало разработать технологию изготовления из них лент 2G, которые уже сейчас широко используются.

В работе [1] (Швейцария, Польша, США) измерен транспортный критический ток монокристаллов безмедного ВТСП $\text{SmFeAsO}_{0.7}\text{F}_{0.25}$ ($T_c = 48$ K) и изучена его зависимость от температуры, направления протекания (вдоль оси c или параллельно плоскости ab) и магнитного поля (опять же по-разному направленного). Установлено, что плотность критического тока j_c превышает 10^6 А/см² и практически изотропна (в отличие от купратов). Последнее обстоятельство весьма существенно для практического использования пниктидов (степень текстурированности образца уже не так важна). Но зато критток чувствителен к направлению магнитного поля: при $H \parallel ab$ он намного больше, чем при $H \parallel c$. Тем не менее даже при $H \parallel c$ поле H^* , при котором начинается диссипация (связанное со вторым критическим полем, но не тождественное ему), превышает 50 Тл при 15 К. Как известно, высокие значения j_c в сильных полях достигаются за счет эффективного пиннинга магнитных вихрей. Но в монокристаллах количество центров пиннинга невелико. Поэтому можно ожидать, что в неидеальных пниктидах j_c будет ещё выше.



Карта величин j_c в единицах 10^6 А/см², иллюстрирующая диапазон температур и полей для возможного применения $\text{SmFeAs}(\text{O},\text{F})$. Цветные области отвечают случаю $j \parallel ab$, $H \parallel c$ (зелёные треугольники), остальные кривые описывают поведение H^* при других взаимных ориентациях магнитного поля и транспортно-го тока.

Л. Опенов

1. P.J.W.Moll et al., Nature Mater. 9, 628 (2010).

Ах эти вредные границы...

Используемые на практике сверхпроводящие провода и ленты состоят из очень большого количества маленьких кристаллитов (зерен), на границе которых строгая периодичность в расположении атомов нарушена (см. рис.). Разориентация кристаллографических

И далее ...

- 2 Об электрон-дырочной асимметрии ВТСП

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Графен – в массы
- 4 Наноматериалы в строительстве. Проблемы безопасного использования

- 6 Нанопружины из золота

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 6 Томография квантовой системы
- 7 Квантовый фазовый переход на микроскопическом уровне

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- 8 Соседство поляризации и намагниченности: стресс или расселение

СПИНТРОНИКА

- 9 Новые возможности туннельной микроскопии

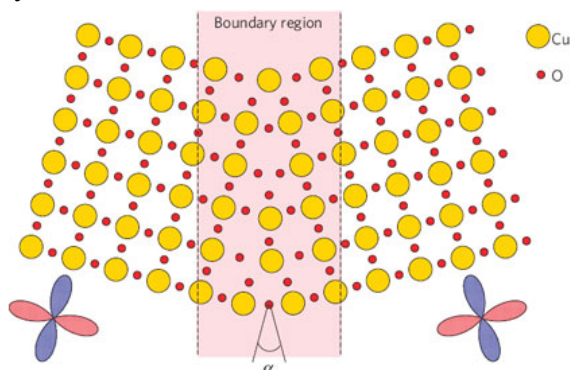
ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 9 Газовый сенсор на основе графена

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 10 О холоде – горячо!

осей соседних зерен приводит к резкому уменьшению плотности критического тока j_c через границу, что является одной из основных проблем для применения купратных ВТСП в сильноточных устройствах. Экспериментально установлено, что j_c экспоненциально падает с ростом угла разориентации α . Теоретики объясняли это либо формированием на стыке зерен диэлектрической прослойки, либо расогласованием фаз d -волнового сверхпроводящего параметра порядка в соседних зернах (см. рис.). Но добиться соответствия теории с экспериментом так и не удалось.



Схематическое изображение междолинной границы в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

В работе [1] сотрудники Univ. of Augsburg (Германия), Univ. of Florida, Gainesville (США) и Niels Bohr Institute (Дания) предложили новый микроскопический подход к расчету j_c как функции α , позволяющий количественно описать экспериментальные данные в очень широком диапазоне $0 < \alpha < 45^\circ$ (а не только для малоугловых границ) и, что самое главное, проливающий свет на суть эффекта. Сначала методом молекулярной динамики авторы [1] аккуратно рассчитали для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ атомные структуры границ с различными α , а затем, используя реалистичную модель сильной связи, определили электронные структуры этих границ и j_c . Было показано, что основной причиной падения j_c является не уменьшение вероятности перескока электронов через границу (как можно было бы ожидать), а обусловленное дефектностью границы неоднородное распределение электрического заряда на ней. Как с этим бороться? Один из предложенных в [1] путей — допирование кальцием. Впереди нас ждут новые расчеты, новые эксперименты и, возможно, новые технологии, но основанные уже не на интуиции, а на глубоком понимании фундаментальной физики.

Л. Опенов

1. S. Graser et al., *Nature Phys.* **6**, 609 (2010).

Об электрон-дырочной асимметрии ВТСП

Высокотемпературная сверхпроводимость возникает при допировании плоскости CuO_2 либо дырками, либо электронами. А в чем разница между ВТСП p -типа и n -типа? В работе [1], выполненной в Rutgers

Univ. США), представлен сравнительный теоретический анализ электронной структуры и магнетизма двух характерных представителей этих типов купратных ВТСП — $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) и $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (NCCO), каждый — с одним слоем CuO_2 в элементарной ячейке. Расчеты из первых принципов (приближение локальной плотности в комбинации с теорией динамического среднего поля, LDA+U) показали, что природа диэлектрического состояния соответствующих родительских фаз принципиально различна: La_2CuO_4 является моттовским диэлектриком (сильные межэлектронные корреляции), а Nd_2CuO_4 — слэтеровским (диэлектрическое поведение есть следствие дальнего магнитного порядка). Говоря другими словами, на фазовой диаграмме LSCO и NCCO находятся по разные стороны от границы, разделяющей металл и диэлектрик с переносом заряда. Основная (но не единственная) причина такой асимметрии заключается в различной величине зарядовой щели из-за отсутствия в NCCO апикальных атомов кислорода, что влечет за собой увеличение электростатического потенциала на медных узлах.

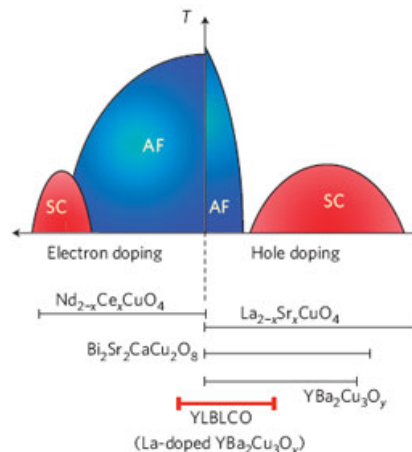


Рис. 1. Фазовая диаграмма купратных ВТСП с электронным и дырочным допированием.

Вопросу об электрон-дырочной асимметрии ВТСП посвящена также очень интересная экспериментальная работа [2] японских и американских физиков, исследовавших единственный из известных на сегодняшний день “амбиполярный” купрат $\text{Y}_{1-z}\text{La}_z(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YLBLCO) [3], в котором при $z = 0.62$ и $x = 0.13$ увеличение содержания кислорода y ведет не просто к изменению концентрации носителей, а к смене типа проводимости с электронной на дырочную (рис. 1). При этом $y = 6.32$ отвечает недопированному моттовскому состоянию. Таким образом, в YLBLCO и дырки, и электроны допируют заведомо одно и то же диэлектрическое состояние (а не разные, как в LSCO и NCCO). Нейтронная спектроскопия показала [2], что при переходе через “точку нулевого допирования” характер антиферромагнитного состояния резко изменяется. Различие заключается в том, что при трансляции бислоя CuO_2 на один период решетки вдоль оси c ориентация магнитных моментов ато-

мов меди остается такой же для дырочного допирования, но меняется на противоположную для электронного (при этом в обоих случаях магнитные моменты каждого слоя CuO_2 упорядочены между собой антиферромагнитно). Что касается спинов атомов меди в цепочках Cu-O , то при электронном допировании они упорядочены, а при дырочном – нет. Одним из неожиданных следствий различия магнитных состояний p -фазы и n -фазы является небольшой минимум температуры Нееля T_N в недопированном состоянии: при увеличении концентрации как дырок, так и электронов, величина T_N сначала несколько увеличивается и лишь затем начинает падать (рис. 2).

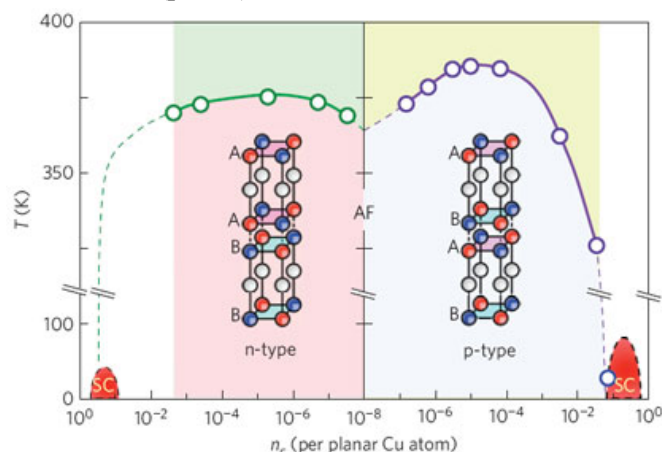


Рис. 2. Зависимость температуры Нееля от числа электронов (слева) и дырок (справа), приходящихся на один атом меди в плоскости CuO_2 .

По-видимому, это связано со своеобразной “конкуренцией” двух различных магнитных фаз в окрестности разделяющей их точки нулевого допирования. Как бы то ни было, мы еще далеки от полного понимания физики слабо допированного моттовского диэлектрика.

Л.Опенков

1. C.Weber et al., *Nature Phys.* **6**, 574 (2010).
2. K.Segawa et al., *Nature Phys.* **6**, 579 (2010).
3. K.Segawa, Y.Ando, *Phys. Rev. B* **74**, 100506 (2006).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Графен – в массы

По своим уникальным физическим характеристикам (хорошая электрическая проводимость, оптическая прозрачность, упругость) графен обладает огромным потенциалом для практического применения в самых различных сферах, включая сверхбыстродействующие транзисторы для компьютеров и мобильных устройств, солнечные батареи, экраны дисплеев, “электронные газеты” и пр. Долгое время все упиралось в отсутствие технологии массового производства графена. Теперь такая технология есть. Она предложена в работе [1] (Сингапур, Корея, Япония) и заключается в следующем. Сначала монослой графена наносят на медную фольгу, используя для этой цели химическое осаждение из паровой фазы. Потом, прокатывая фольгу между валиками, покрывают графен полимерной пленкой. Затем медь удаляют электрохимическим травлением и, наконец, переносят графен (опять же путем прокатки) на подложку из полиэтилентерефталата (рис. 1). Образцы имеют форму вытянутых прямоугольников с диагональю около 75 см (рис. 2). Никаких принципиальных ограничений на дальнейшее увеличение их размеров нет – были бы под рукой медная фольга соответствующего формата да достаточно вместительная камера для химического осаждения. О высочайшем качестве полученного в [1] графена говорит хотя бы факт наблюдения в нем квантового эффекта Холла. Сопротивление монослоя графена составило $R \approx 125 \text{ Ом}/\square$, что не намного превышает R пленок $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ (indium-tin oxide, ИТО) – промышленного стандарта для прозрачных электродов солнечных батарей и жидкокристаллических мониторов. Изготовив по той же методике 4-слойный графен (несколько раз повторяя описанную выше процедуру), авторы [1] понизили R до $\approx 30 \text{ Ом}/\square$ – в три раза меньше, чем у ИТО при коэффициенте пропускания оптического излучения $\approx 90 \%$ (как и у ИТО). При всем при этом графен значительно превосходит ИТО по своим механическим характеристикам (прочности и гибкости), да и производство ИТО не дешевое.

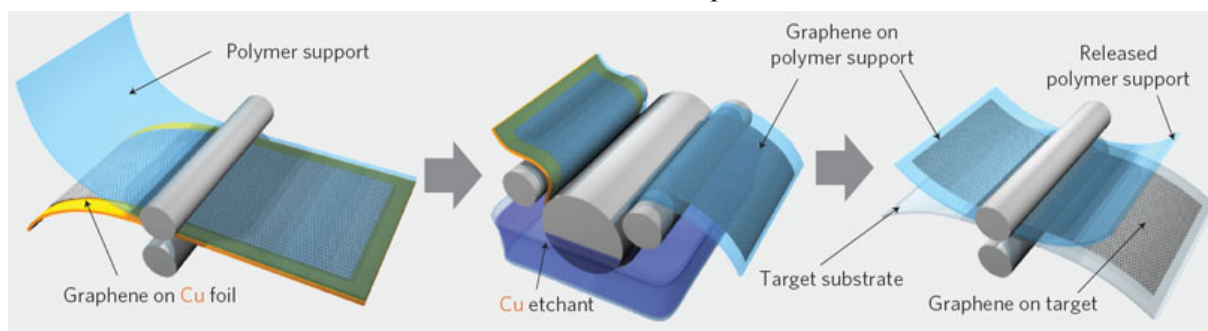


Рис. 1. Основные этапы изготовления графеновой пленки.

Если учесть чрезвычайно высокую производительность предложенной в [1] методики, ее сравнительную простоту и возможность быстрого внедрения, *ПерсТ*, 2010, том 17, выпуск 17

то в скором времени можно ожидать замены ИТО графеном в очень многих устройствах, некоторые из которых продемонстрированы в [1] (рис. 3).



Рис. 2. Теперь графен можно не только рассматривать в микроскоп, но и подержать в руках.

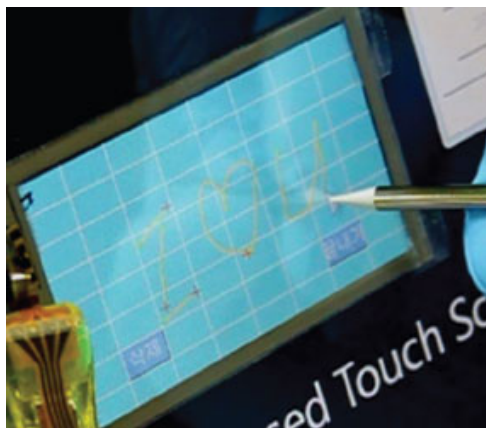


Рис. 3. Сенсорный экран из графена.

Заметим, что изготовленный в [1] графен не является монокристаллическим: в нем имеются дефекты упаковки, границы зерен и прочие дефекты структуры. Дальнейшее совершенствование технологии приведет, несомненно, к улучшению качества графена.

Л.Опенев

1. S.Bae et al., Nature Nanotech. 5, 574 (2010).

Наноматериалы в строительстве.

Проблемы безопасного использования

Вслед за электроникой и биомедициной наноматериалами (НМ) всерьез заинтересовалась строительная индустрия. Разнообразные синтезированные НМ могут значительно улучшить свойства конструкционных материалов. Например, наночастицы SiO_2 упрочняют бетон, а углеродные нанотрубки повышают прочность керамики и различных композитов, используются для создания огнезащитных покрытий [1]. Анализ рынка США показывает, что потребности в НМ для строительства достигнут к 2011 г. \$100 млн, а к 2025г. – \$1,75 млрд [2]. SiO_2 , TiO_2 , оксиды алюминия, нанотрубки будут применяться в основном в покрытиях, а также в композитах и как добавки к бетону и цементу. Продукция с НМ на рынке – краски, двери, окна, покрытия пола и крыш, дорожные покрытия. Конечно, тут же возникает вопрос – что произойдет, когда эти замечательные наноматериалы, синтезируемые в больших количествах, попадут в окружающую среду? Что нужно сделать для того, чтобы обеспечить их эф-

фективное и безопасное применение в строительстве? Этим проблемам посвящен обзор сотрудников Rice Univ. (США), опубликованный в июле этого года [3]. Авторы проанализировали более 140 работ, в которых продемонстрированы как перспективы НМ в строительстве, так и возможные неблагоприятные последствия. Некоторые примеры применения представлены на рис. 1 и в таблице 1.

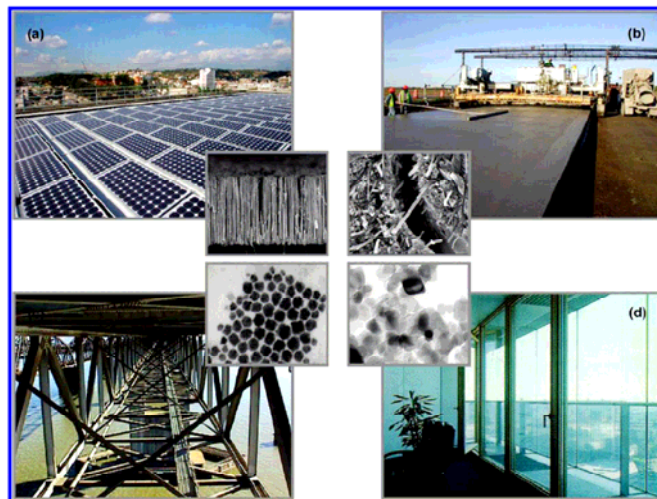


Рис. 1. Примеры использования наноматериалов в строительстве: *a* – солнечные батареи на крыше (вставка – Si/TiO_2 нанопроволока); *b* – бетонное дорожное покрытие (вставка – углеродные нановолокна); *c* – стальной мост (вставка – наночастицы Cu); *d* – окна здания (вставка – наночастицы TiO_2) [3].

НМ, используемые в строительной индустрии, за время жизненного цикла разными путями проникают в окружающую среду (рис.2). При производстве, обработке, упаковке часть наноматериалов может попадать в атмосферу и к воздействию на персонал. Необходимо обеспечивать работников индивидуальными средствами защиты (маски, перчатки и др.); создавать соответствующие системы вентиляции, пылеуловители; проводить мониторинг воздуха на рабочих местах и организовывать регулярный медицинский контроль (особенно это касается органов дыхания, зрения, кожи).

Различные восстановительные, ремонтные работы и особенно снос зданий могут привести к попаданию заметного количества НМ в атмосферу, и, соответственно, к воздействию как на работников отрасли, так и на жителей. Американские ученые [3] особенно выделяют проблему строительного мусора, ведь наноматериалы со свалок могут попасть в воду и почву. В обзоре приведены данные о токсичности НМ (тех, которые могут быть использованы в строительстве) в отношении различных организмов. (Подробнее об исследованиях токсичности углеродных нанотрубок см. Перст, [4]). Однако специальных регламентов по обращению с отходами - наноматериалами или содержащими наноматериалы - пока не существует.

Таблица 1. Некоторые примеры использования наноматериалов в строительстве.

Наноматериалы	Архитектурные/ строительные материалы	Ожидаемая польза
Углеродные нанотрубки	Бетон Керамика Сенсоры/актюаторы Солнечные батареи	Механическая прочность, предотвращение трещин Улучшение механических и тепловых свойств Мониторинг структуры в реальном времени Повышение эффективности
Наночастицы SiO ₂	Бетон Керамика Окна	Механическая прочность Хладагент, пропускание света, стойкость к огню Огнезащита, противоотражение
Наночастицы TiO ₂	Цемент Окна Солнечные батареи	Быстрая и более полная гидратация, самоочистка Супергидрофильность, самоочистка Повышение эффективности
Наночастицы Fe ₂ O ₃	Бетон	Повышение прочности на сжатие, стойкость к абразивному износу
Наночастицы Cu	Сталь	Свариваемость, стойкость к коррозии, формуемость
Наночастицы Ag	Покрывтия/краски	Биоцидная активность



Рис. 2. Схема воздействия строительных наноматериалов в течение жизненного цикла

Можно ли создать такие конструкционные наноматериалы, которые будут “безопасными”, но сохраняют свои полезные свойства? Авторы [3] считают, что в первую очередь необходимо следовать 12 принципам промышленной экологии и предотвращения загрязнений [5]. Вот некоторые из них:

- предупреждать, а не ликвидировать;
- максимизировать эффективность по массе, времени, энергии, объему (использование multifunctional НМ; качество > количество, необходимость > жадность, достаточно > больше, длительный срок работы > короткий срок;
- разработать методики выделения и очистки “наноотходов” (используя магнитные или специальные поверхностные свойства);
- найти возможность повторного использования безопасных НМ, например, для улучшения почвы;
- не больше, чем нужно (избегать “one size fits all”, не разрабатывать НМ на все случаи).

Авторы [3] опять и опять подчеркивают необходимость серьезных исследований структуры наноматериалов, их реакционной способности, связи их свойств с токсичностью – причем не только острой, но и хронической (как влияет хроническое воздействие на организмы). Следует учитывать, что изначально “безопасные” и эффективные “конструкционные” наноматериалы в течение жизненного цикла могут претерпеть физические, химические или биологические превращения (сорбция, агрегация, окисление, восстановление, биотрансформация), и их свойства изменятся. Важно принимать во внимание влияние факторов окружающей среды (таких как pH, микробы, солёность воды) на активность, токсичность; изучать стабильность НМ в конкретных условиях. Например, наночастицы, входящие в материалы дорожных покрытий, не должны вымываться сильными ливнями.

Использование наноматериалов в строительстве важно не только для улучшения свойств материалов, но и с точки зрения энергосбережения. В США око-

ло 41% энергии потребляется промышленными зданиями и жилыми домами (тепло, свет, кондиционирование). Наноматериалы, помимо использования в солнечных батареях и топливных элементах, могут применяться для улучшения термических свойств, повышения эффективности передачи энергии, освещенности. К энергосбережению косвенным путем приведет и увеличение срока службы за счет улучшения механических и других свойств.

Несмотря на все эти замечательные перспективы, приоритетом должна быть забота о здоровье и безопасности человека и окружающей среды. Провести полный мониторинг выделения НМ из строительных материалов (или мусора), их переноса в атмосферу (воду, почву), их трансформаций невозможно. Американские учёные надеются, что их публикация будет способствовать проведению оценок риска и разработке нормативов и регламентов, регулирующих использование и утилизацию НМ до их широкого внедрения в строительство.

О.Алексеева

1. *ПерсТ 16, вып. 24, с. 6 (2009).*
2. <http://www.freedoniagroup.com/Nanotechnology-In-Construction.html>
3. J.Lee et al., *ACS Nano* **4**, 3580 (2010).
4. *ПерсТ 16, вып. 23, с.3 (2009).*
5. P.T.Anastas et al., *Environ. Sci. Technol.* **37**, 94A (2003).

Нанопружины из золота

Интересные результаты опубликованы научным коллективом из Сингапура. Авторы работы [1] на основе золотых нанопроводов (AuNW) изготовили настоящие пружины! Подход, предложенный исследователями, позволяет свертывать олеиламин-стабилизированные AuNW особым образом, так что на выходе получаются наноструктуры, аналогичные классическим стальным пружинам кручения (рис. 1).

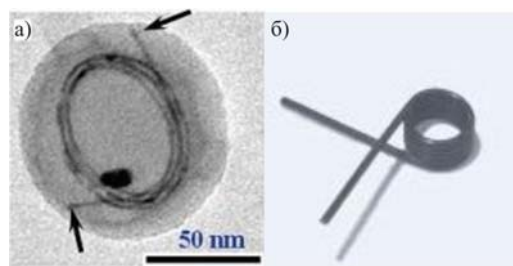


Рис. 1. Изображение золотой нанопружины (стрелками обозначены ее концы), полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии (а). Стальная пружина кручения (б).

Методика основана на инкапсуляции золотых нанопроводов в полимерную оболочку из полистирол-*b*-полиакриловой кислоты (PS-*b*-PAA) и последующего сжатия полимера (рис. 2). В результате изначально “прямые” AuNW (рис. 3а) трансформируются в упорядоченный ансамбль мицелл, представляющий собой сложный комплекс нанокатушек AuNW@PSPAA из 5–10 витков (рис. 3б). Диаметр такой “пружины” составляет всего 100–110 нм, а суммарная длина всех ее витков, разумеется, соот-

ветствует длине исходного золотого нанопровода, из которого пружинка была сделана. Обращает на себя внимание также тот факт, что процесс образования этих наносоединений полностью обратим, то есть при удалении или набухании полимерной оболочки механическая энергия, запасенная в напряженной пружине, может быть с легкостью высвобождена.

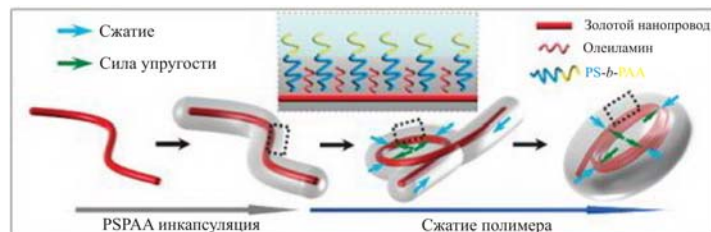


Рис. 2. Схематическое изображение методики получения золотых нанопружин.

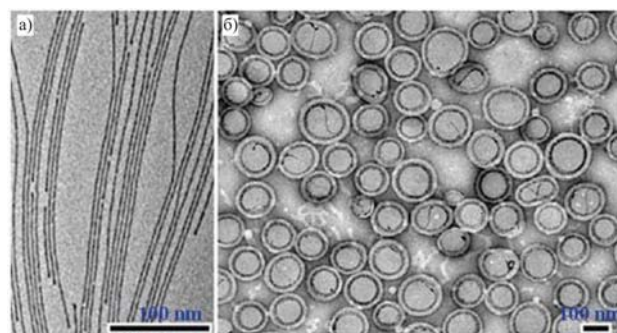


Рис. 3. Изображения, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии: олеиламин-стабилизированные золотые нанопровода (а), золотые нанопружины, внедренные в PS₁₅₄-*b*-PAA₄₉ полимерную оболочку (б).

Авторы надеются, что их открытие окажется полезным в различных нанотехнологических приложениях, а предложенную несложную методику “скручивания” в дальнейшем можно будет расширить и на другие классы наноструктур, в том числе и на углеродные нанотрубки.

М. Маслов

1. J.Xu et al., *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 11920 (2010).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Томография квантовой системы

Процесс измерения квантовой системы, действительно, может быть назван томографией, поскольку он является решением обратной задачи. Однократное измерение проектирует вектор чистого состояния квантовой системы в гильбертовом пространстве на базисные состояния измерителя. При этом состояние квантовой системы разрушается. Для следующего измерения необходимо снова приготовить квантовую систему в исходном состоянии. После множества подобных измерений мы получаем кратность появления того или иного базисного состояния в качестве исхода измерения. Задача томографии состоит в том, чтобы на основе этой информации определить состояние системы с максимальной достоверностью. Для смешанного состояния необходимо восстанавливать матрицу плотности.

ПерсТ, 2010, том 17, выпуск 17

Методики измерения (называемые протоколами), в частности выбор соответствующего базиса, могут быть различными. Это зависит от имеющихся в распоряжении элементов и их точности. Современные компьютеры позволяют моделировать простейшие квантовые системы, поэтому свойства того или иного протокола могут быть определены из расчета. Это позволяет избежать больших затрат времени и средств на экспериментальный выбор подходящего протокола.

Однако хотелось бы проводить и экспресс-анализ различных протоколов. Эта задача решена в работе Ю. Богданова (ФТИАН) совместно с сотрудниками МГУ и институтов Турина [1]. Качество протокола определяется неким числом K (condition number), которое по своей математической природе характеризует устойчивость решения задачи томографии. Чем меньше это число, тем протокол лучше. Идеальному протоколу соответствует $K=1$. Авторы проанализировали различные протоколы измерения поляризационно запутанного состояния двух фотонов. На рисунке представлена рассчитанная средняя точность восстановления (fidelity) для различных протоколов в зависимости от количества измерений. Если при большой выборке все протоколы сходятся друг к другу, то при малой выборке между ними имеются существенные отличия. Соответствующие показатели равны $K_{R16}=3$, $K_{J16}=10$, $K_{B144}=60$. Видно, что эти числа, действительно, характеризуют качество протокола.

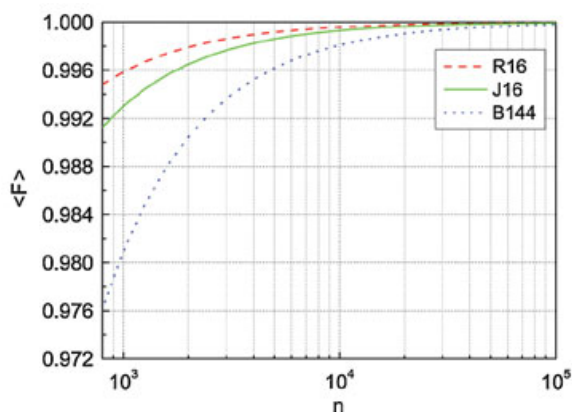


Рис. Средняя точность восстановления $\langle F \rangle$ (fidelity) для различных протоколов в зависимости от количества измерений n .

Экспериментальная часть работы включает измерение запутанного состояния двух фотонов, получаемого из нелинейного кристалла в результате параметрической неустойчивости (down-conversion).

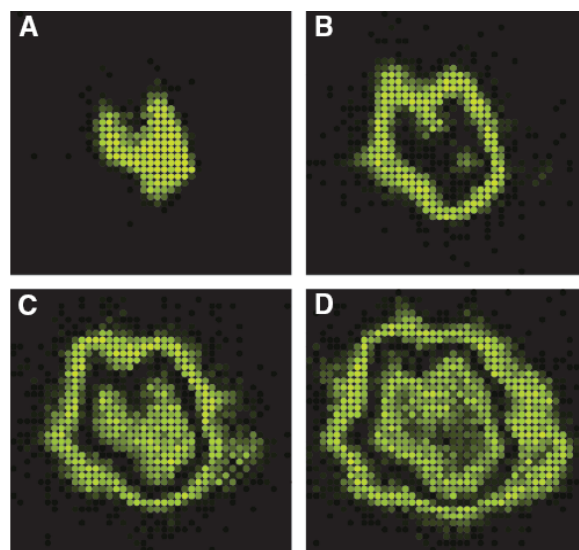
Представленные результаты имеют прямое отношение к системам квантовой коммуникации и квантовым компьютерам, поскольку и те и другие перед работой наверняка потребуют отладки, а, значит, проведения квантовых измерений.

В.Вьюрков

1. Yu.I.Bogdanov et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 010404 (2010).

Квантовый фазовый переход на микроскопическом уровне

Сильные межэлектронные взаимодействия ответственны за многие необычные (и пока не до конца понятые) свойства твердых тел. Корректный учет этих взаимодействий для теоретиков – крайне сложная задача. Даже самая простая из моделей сильнокоррелированных частиц, модель Хаббарда (включающая всего два параметра – энергию U отталкивания частиц на узлах и энергию t их перескока между соседними узлами) – и та допускает точное решение лишь для некоторых специфических (например, одномерных) систем. А численные расчеты удастся выполнить только для нескольких десятков частиц, даже на самых мощных суперкомпьютерах. В последние годы пришло понимание того, что ответы на многие вопросы можно получить, не прибегая к услугам компьютеров, а исследуя искусственные физические системы – охлажденные до нанокельвинных температур атомы в оптических решетках, созданных лазерными пучками. Если атомы имеют полуцелый спин, то такие рукотворные твердые тела описываются фермионной моделью Хаббарда, а если целый – то бозонной. При этом параметры модели (величины U и t) можно легко изменять путем соответствующей настройки интенсивностей лазеров (делая узлы оптической решетки глубже или мельче, меняя расстояние между узлами и т.п.).



Сверхтекучие (темные) и моттовские (светлые) области в квадратной оптической решетке с 120 ± 10 (A), 460 ± 20 (B), 870 ± 40 (C) и 1350 ± 70 (D) атомами Rb.

В работе [1] для изучения бозонной модели Хаббарда была использована квадратная оптическая решетка с бозе-атомами ^{87}Rb . Увеличивая отношение U/t и наблюдая в микроскоп, как атомы заполняют отдельные узлы решетки, авторы [1] проследили квантовый фазовый переход из сверхтекучего состояния (четное число атомов на узле) в моттовское (нечетное число атомов на узле) просто по изменению заполнения узлов решетки атомами. Ин-

интересно, что увеличение количества атомов в решетке приводило к фазовому расслоению и формированию у моттовской фазы оболочечной структуры (см. рис.). Крайне интересно было бы посмотреть, что происходит при изменении U/t с коллективом ферми-атомов. Ведь для них можно ожидать перехода из моттовского состояния в сверхпроводящее, причем с d -волновым параметром порядка.

1. W.S.Bakr et al., *Science* **329**, 547 (2010).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Соседство поляризации и намагниченности: стресс или расселение

Начало осени отмечено двумя работами в журналах серии Nature, посвященными созданию материалов–мультиферроиков, в которых большая электрическая поляризация сосуществовала бы со значительной величиной намагниченности [1,2]. Напомним, что мультиферроиками называют вещества, в которых одновременно присутствуют несколько видов упорядочения, как правило, магнитное и сегнетоэлектрическое. Помимо чисто научного интереса, вызванного самим фактом такого сосуществования, внимание к мультиферроикам связано с ожиданием конкретных приложений в электронике с низким энергопотреблением.

Практическое значение мультиферроиков несколько снижается из-за того, что материалы с большой электрической поляризацией и, одновременно, со значительной величиной намагниченности практически не встречаются в природе: сегнетоэлектрики с магнитными свойствами, как правило, упорядочиваются антиферромагнитно, так что намагниченности антиферромагнитных подрешеток компенсируют друг друга. И потому в последнее время усилия ученых направлены на то, чтобы создать сегнетоэлектрики с сильными магнитными свойствами [1,2].

Одна из стратегий, позволяющая уживаться намагниченности и электрической поляризации в одном материале заключается в том, чтобы воспользоваться “третьей силой” – механическим напряжением. Несколькими годами ранее было теоретически показано [3], что в определенном диапазоне деформаций ферромагнитная сегнетоэлектрическая фаза в некоторых материалах оказывается более выгодной, чем антиферромагнитная. В качестве вероятного кандидата на роль такого материала был предложен титанат европия EuTiO_3 . Вот только величины деформаций, необходимые для стабилизации ферромагнитной фазы, с относительным удлинением $\sim 1\%$ превышали предел прочности материала. Выйти из этого тупика позволили методы эпитаксиального выращивания пленок: при толщине пленки в десятки нанометров она может выдерживать натяжения, намного больше предела прочности объемных материалов (рис. 1а). Таким способом был получен материал с электрической поляризацией, по величине сравнимой с классическими

сегнетоэлектриками, и, в то же время, с намагниченностью как у ферромагнитных материалов [1].

Другая стратегия заключается в том, чтобы магнетизм и электричество “расселить по разным квартирам”: в слоях ферромагнитного и антиферромагнитного материалов. В этом случае, удается превратить антиферромагнитное упорядочение в ферромагнитное, пусть не в объеме сегнетоэлектрика, так хотя бы на его границе с магнитным материалом: спины атомов, находящихся по разные стороны от границы раздела, взаимодействуют друг с другом посредством обмена.

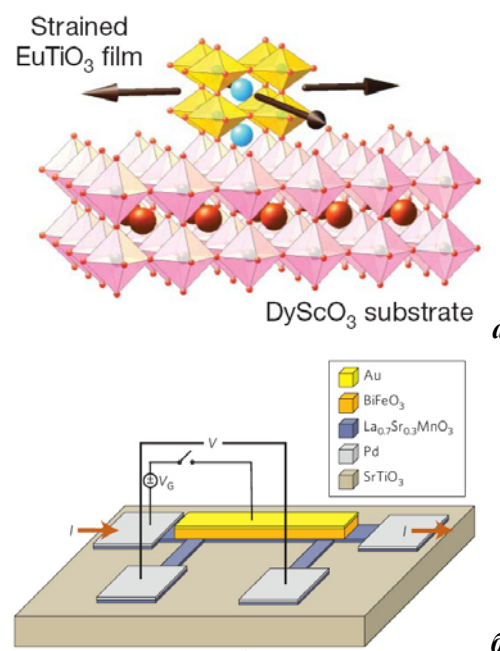


Рис. 1. а - Механическое растяжение пленки EuTiO_3 , возникающее при ее эпитаксиальном росте на подложке с немного отличающимся периодом, приводит к изменению ее магнитных и сегнетоэлектрических свойств [1]; б - принципиальная схема полевого транзистора на обменно-связанных слоях мультиферроика BiFeO_3 и магнитного проводника $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$: приложение напряжения к затвору приводит к изменению проводимости канала. [2].

На рисунке изображена принципиальная схема спинтронного транзистора на такой структуре, созданной с помощью импульсного лазерного осаждения [2]. Слой мультиферроика феррита висмута, находящийся под золотым электродом затвора, обменно связан со слоем ферромагнитного проводящего материала $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Приложение электрического напряжения к затвору вызывает переключение электрической поляризации мультиферроика, что приводит к одновременной перестройке его антиферромагнитной структуры, которая, в свою очередь, конвертируется в переключение намагниченности нижележащего магнитного слоя. Последнее приводит к изменению его проводящих свойств, что может найти свое применение в спинновой электронике.

А.Пятаков

1. J.H.Lee et. al., *Nature* **466**, 954 (2010).
2. S.-M.Wu et. al., *Nature Mater.* **9**, 756 (2010).

ПерсТ, 2010, том 17, выпуск 17

СПИНТРОНИКА

Новые возможности

туннельной микроскопии

Сканирующая туннельная микроскопия – метод, уникальный во многих отношениях. Он мог быть изобретен и за десятилетия до своего реального появления – в нем нет ничего запредельно сложного, но результат его появления был фантастический – появилась возможность разглядывать, а точнее – ощупывать – материю в мельчайших деталях, вплоть до отдельных атомов.

Вторая особенность – это быстрая “мутация” метода: следом за прародительской туннельной появились атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая, методики наноиндентирования, рамановская микроскопия в области туннельного контакта и т.д. Одновременно где-то за десятилетие метод прошел путь от уникальной разработки, удостоенной Нобелевской награды, до не очень дорогого прибора, который позволяют себе даже некоторые школьные лаборатории.

И вот – новый и очень серьезный шаг вперед там, где, казалось, придумано все, что только можно придумать [1].

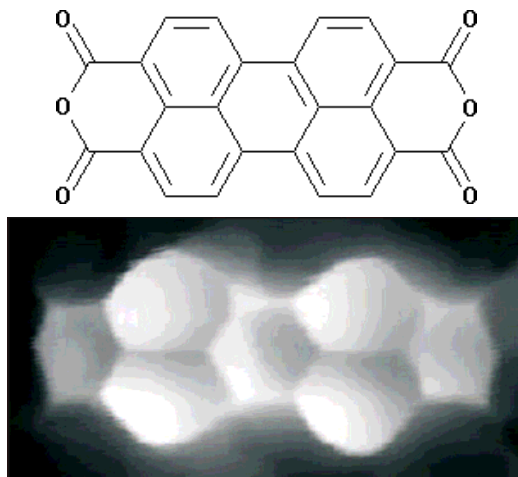
В исходной методике сканирующей туннельной микроскопии основным источником информации является туннельный ток. Чтобы он протекал, проводящей должна быть не только игла, но и объект исследования. Хорошо ли, плохо ли, но электропроводящей является лишь часть окружающего нас мира – а как исследовать другую? Частично этот вопрос был решен при изобретении атомно-силовой микроскопии. Но игла атомно-силового микроскопа лишь оглаживает поверхность – а что под ней? Если материал не проводит ток, это не значит, что в нем нет электронов. Они есть даже в тараканах. Можно ли получать информацию об электронной подструктуре, если электроны локализованы, например, во внутренних оболочках атомов?

Работа [1] говорит, – да, можно, – и даже говорит как. К тому же, как следует из публикации, вроде бы это уже иногда получалось и раньше, но исследователи совершенно не понимали, почему получалось и как.

И вот теперь выяснилось, что если при достаточно низких температурах кантилевер находится в атмосфере газообразного водорода, то молекула водорода садится на острие кантилевера. Электроны молекулы не участвуют в переносе тока, но у них в данном случае оказывается другая функция. Электроны молекулы – квантовые объекты, фермионы, и обязаны подчиняться принципу Паули. При перемещении острия кантилевера на постоянной высоте над поверхностью они испытывают отталкивание от электронов исследуемого объекта. Причем – не только от электронов проводимости, а от всех элек-

тронов, т.е. они реагируют на полную электронную плотность в данной точке материала. Под действием этого отталкивания молекула “вжимается” в острие и изменяется его проводимость. Вот это-то изменение проводимости контакта и регистрируется установкой как сигнал, пропорциональный электронной плотности.

Ясно, что первыми от преимуществ нового метода выиграют химики. Уже в первой публикации авторы приводят портрет довольно симпатичной молекулы диангидрида 3,4,9,10-перилентетракар-боновой кислоты – во всей красе ее полной электронной плотности. Какие формы – залюбуешься!



М.Компан

1. C.Weiss et al., *Phys.Rev.Lett.* **105**, 086103 (2010).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Газовый сенсор на основе графена

Высокая чувствительность электронных характеристик графена к присутствию сорбированных на его поверхности молекул делает этот материал потенциально эффективным элементом газовых сенсоров, используемых для детектирования и определения содержания различных примесей в атмосфере. Развитие этого направления стимулируется также миниатюрными размерами графенов и относительной простотой их получения. Поэтому во многих лабораториях мира проводится исследование зависимости электрических свойств графенов и материалов на их основе от состава окружающего газа. Так, в работе [1], выполненной в Univ. of South Florida (США), сообщается об использовании графеновых полосок и пленок для детектирования и измерения содержания CO и NO₂ в синтетическом воздухе. Для синтеза графенов применялась стандартная процедура химического осаждения паров в плазме. В качестве подложки использовали кремниевые пластины с никелевым покрытием. Синтез графенов проводили в потоке CH₄/H₂ (1:8) при полном давлении газа 50 Торр и температуре 700°C. Мощность, вкладываемая в СВЧ плазму, составляла 2.5 кВт. В зависимости от длительности синтеза, были получены образцы графенов двух типов. При длительности синтеза 5 мин на поверхности под-

ложки возникала графеновая пленка толщиной до 600 нм. Увеличение времени синтеза до 10 мин приводило к образованию графеновых полосок толщиной около 2 мкм, которые осаждались на стенках камеры и на подложке. Полученные образцы графенов исследовали методами спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеновской дифрактометрии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Как показали измерения, среднее число слоев в графеновых пленках варьируется в диапазоне от 6 до 8. Наряду с этим, были измерены температурные зависимости электросопротивления образцов в диапазоне температур 25–200°C в присутствии различных газов. В этих измерениях использовались образцы площадью 2x3 мм². Сенсорные характеристики образцов исследовали в присутствии примесей СО и NO₂ к синтетическому воздуху. Измерения, выполненные по четырехконтактной схеме, показали, что чувствительность графеновых пленок к примесям примерно вдвое превышает соответствующий показатель для графеновых полосок. Сигнал сенсора, определяемый как относительное изменение электросопротивления образца при введении примеси, уверенно регистрируется при содержании примесных газов на уровне 100 ppm. Согласно предположению авторов, сорбция СО и NO₂ поверхностью графенов связана с процессом передачи заряда от сорбированной молекулы графену или в обратном направлении. При этом молекула СО, которая обладает свойствами восстановителя, является акцептором электронов, и ее сорбция приводит к образованию дополнительных дырок. С другой стороны, сорбция молекул NO₂, которые являются электронным донором, приводит к появлению в графене дополнительных электронов. Тем самым, электрический сигнал прибора, обусловленный сорбцией указанных молекул, имеет противоположный знак. Испытания показали, что сенсоры на основе графена обладают обратимыми свойствами и выдерживают более трех циклов сорбции-десорбции на обоих газах.

А.Елецкий

1. R.K.Joshi et al., *J. Phys. Chem. C* **114**, 6610 (2010).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

О холоде – горячо!

Сорокоградусная жара в Черногоровке не помешала физикам активно обсуждать тему низких температур. В ИФТТ РАН с 27 по 31 июля проходила 8-я между-

народная конференция по крио- и квантовым кристаллам. Организаторы – ИФТТ РАН, Совет РАН по физике низких температур, Совет РАН по физике конденсированных сред. Председатель Оргкомитета – академик А. Ф. Андреев, заместители председателя – профессор Л. П. Межов-Деглин, д.ф.-м.н. А.А. Левченко. История конференции уходит в советские времена, на Украину. Слово “криокристалл” ввела в обиход украинский академик Антонина Федоровна Прихотько, и конференция изначально была организована еще в советские годы как всесоюзное совещание, посвященное криокристаллам. Главным организатором был ФТИНТ, но конференции проводились в различных городах СССР: Вильянди в Эстонии, Алма-Ата, Донецк, Харьков.

Новая история совещания началась в начале 90-х, причем конференция стала международной, с широким представительством ученых разных стран. Нынешняя не исключение. Достаточно сказать, что в день открытия, который был полностью посвящен школе молодых ученых, первую лекцию прочитал нобелевский лауреат Дэвид Ли из США. С лекциями для молодых ученых выступили – директор геофизической лаборатории института Карнеги в Вашингтоне Рассел Хэмли, сотрудник ИТФ им. Л.Д.Ландау РАН и Хельсинкского технологического университета (Helsinki University of Technology) профессор Г.Е. Воловик, М.А. Стржмечный с Украины, Валерий Несвижевский из Франции. Открывал конференцию один из ее идеологов, профессор Л.П. Межов-Деглин.

Школа молодых ученых, состоявшаяся в рамках мероприятия – главное отличие сегодняшней конференции от предыдущих. “С самого начала одной из главных задач, которая стояла перед тогда еще совещанием, было замкнуть горизонтальные связи между физиками, занимающимися близкими темами, - пояснил А.А.Левченко. - Организаторы науки регулярно общаются, но ведь основная работа идет по горизонтальным связям, в небольших научных группах. А молодежь, которая занимается физикой криокристаллов, друг друга знает мало. Поэтому мы решили собрать их вместе, чтобы они пообщались”.

Физики выступали с докладами, обменивались новостями, обсуждали перспективы сотрудничества. Подробную информацию можно посмотреть на сайте: <http://issp3.issp.ac.ru/cc2010/>.

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, В.Вьюрков, А.Елецкий,
М.Компан, М.Маслов, Л.Опенов, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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