

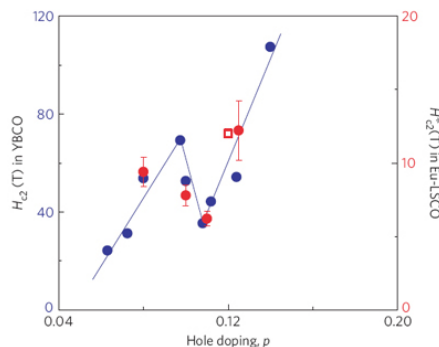
В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Уменьшение верхнего критического поля в недодопированных купратных ВТСП

Для объяснения куполообразной зависимости критической температуры  $T_c$  купратных ВТСП от концентрации дырочных носителей заряда  $p$  было предложено два различных сценария. Согласно одному из них, при уменьшении  $p$  ниже оптимальной (отвечающей максимуму  $T_c$ ) величины  $p_{\max} \approx 0.16$  сверхпроводимость подавляется из-за флуктуаций фазы параметра порядка  $\Delta$ , тогда как абсолютная величина  $|\Delta|$  (сверхпроводящая щель) при этом монотонно возрастает. Альтернативой флуктуационному варианту является гипотеза о том, что  $T_c$  недодопированных купратов понижается из-за конкуренции сверхпроводящего порядка с каким-то несверхпроводящим (например, страйповым). Если это так, то  $|\Delta|$  и верхнее критическое поле  $H_{c2}$  должны уменьшаться при уменьшении  $p$ . Что касается щели, то определение ее зависимости от  $p$  осложняется неоднозначностью интерпретации данных фотоэлектронной спектроскопии. А вот для  $H_{c2}$  в работе [1] (Канада, Япония, Швейцария, Франция) получены результаты, свидетельствующие в пользу второго сценария. При этом оказалось, что  $H_{c2}$  недодопированных образцов уменьшается не монотонно, а имеет минимум при концентрации дырок, отвечающий максимальному страйповому порядку (см. рис.).

Зависимость верхнего критического поля  $H_{c2}$  от концентрации дырок  $p$  в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (синие символы, левая ось) и  $\text{La}_{1.8-x}\text{Eu}_{0.2}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (красные символы, правая ось).



Помимо страйпов, конкурировать со сверхпроводимостью могут также антиферромагнитная фаза или волна спиновой плотности.

Л.Опенев

1. J.Chang et al., Nature Phys. 8, 751 (2012).

## ГРАФЕН

### Оптическая микроскопия для границ зерен в графене

Границы зерен в графене формируются на начальной стадии его роста при слиянии воедино исходно изолированных островков. Эти границы оказывают существенное влияние на транспортные свойства графена, а значит — и на характеристики изготовленных из него нанoeлектронных устройств. Информацию об атомной структуре межзеренных границ дают просвечивающая электронная и сканирующая туннельная микроскопии. Однако эти методики плохо применимы для исследования распределения границ зерен по графеновому образцу большой площади. В работе [1] корейские физи-

И далее ...

- 2 Фотоприемник на основе графена
- 3 Поврежденная структура графена способна к самовосстановлению

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАОЭЛЕКТРОНИКА

- 3 Наноструктуры в природе. Секреты синей птицы
- 5 Наночастицы в трехмерии

## МАГНИТЫ

- 6 Магниты управляют ростом кремния

## СНОВА К ОСНОВАМ

- 7 Азотный алмаз

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

- 7 Карбид кремния из фуллеренов

## СПИНТРОНИКА

- 8 Ферромагнитный резонанс под действием электрического поля

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 9 Семинар по физике конденсированного состояния, 21 ноября 2012 г.

Совместное заседание научной сессии ОФН РАН и ученых советов ФИАН и НИИЯФ МГУ, посвященное 120-летию со дня рождения Д.В. Скобельцына, 28 ноября 2012 г.

ки приспособили для этой цели обычную оптическую микроскопию. Они помещали графен вместе с медной подложкой во влажную атмосферу при комнатной температуре и воздействовали на него ультрафиолетовым излучением. Образующиеся при облучении радикалы  $O$  и  $OH$  проникали через границы зерен и селективно окисляли медь. Окисленные участки, повторяющие узор межзеренных границ, и видны в микроскоп (см. рис.).

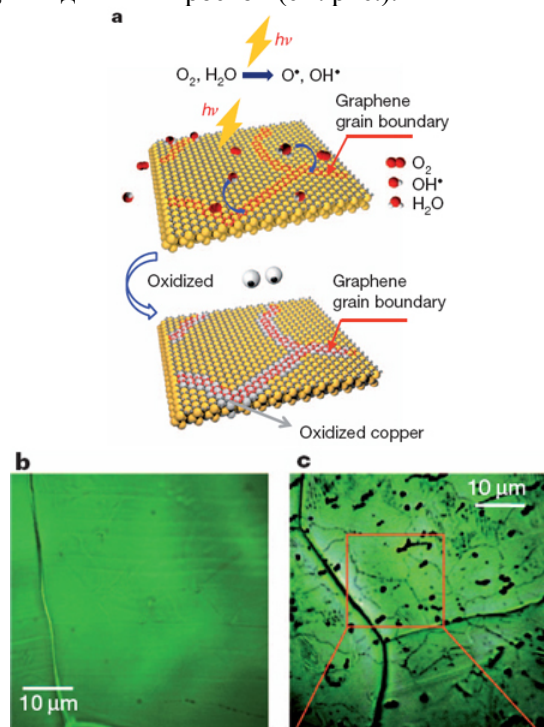


Схема механизма селективного окисления медной подложки при УФ облучении осажденного на нее графена (а). Оптическое изображение графена на подложке до (b) и после (c) облучения.

Анализ показал, что электросопротивление графенового образца уменьшается при увеличении размера зерен (то есть при уменьшении количества границ). Помимо прочего, развитая в [1] методика позволила визуализировать динамику растрескивания графена при изгибе и выявить роль границ зерен в этом процессе. Она может использоваться и для других квазидвумерных материалов, таких как, например, нитрид бора.

*I. D.L.Duong et al., Nature 490, 235 (2012).*

### Фотоприемник на основе графена

Уникальные свойства графена, сочетающего миниатюрные размеры с хорошей электрической проводимостью, а также с высокой механической, термической и химической стабильностью, открывают широкий простор для прикладных разработок электронных, электрохимических, электромеханических и других наносистем на основе графена. Удачный пример подобных разработок представлен группой из Rice Univ. (США) совместно с исследователями из Peking Univ. (Китай) [1]. В работе описано антенное устройство на основе графена, преобразующее

оптическое излучение в видимой области в электрическую энергию. Схема устройства показана на рис. 1.

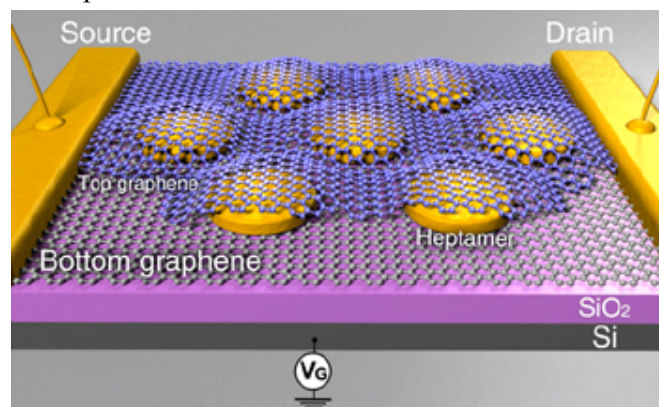


Рис. 1. Иллюстрация принципа действия фотоприемника на основе графена.

Золотые электроды наносили на графеновую подложку методом двухступенчатой электроннолучевой литографии, после чего полученную структуру покрывали вторым графеновым слоем, образуя сэндвич. Элементами плазмонной антенны служили нанодиски золота диаметром 130 нм, расположенные либо попарно, либо по 7 штук в виде гептамера (правильного шестиугольника с одним диском в центре) на расстоянии 15 нм друг от друга, (см. рис. 1). Измерения, выполненные в режиме полевого транзистора при давлении остаточного газа  $10^{-5}$  Торр, показали, что дираковская точка достигается при затворном напряжении  $V_G \approx 30$  В. При этом напряжение источник-сток составляло 1 мВ. Подвижность носителей, оцененная на основании измерений, оказалась в диапазоне между  $350$  и  $1300$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ .

На рис. 2 показаны зависимости фототока от положения лазерного луча на поверхности антенны. При измерениях использовали луч лазера с  $\lambda = 785$  нм, сфокусированный в пятно диаметром 1 мкм. Как видно, в случае гептамерной конфигурации антенны фототок втрое превышает соответствующую величину для димерной системы и в 8 раз превышает величину, наблюдаемую в отсутствие золотых дисков. Еще более высокий ток достигается при использовании нонамерной конфигурации (из 9 дисков). Параметры устройства регулируются путем подачи напряжения смещения, в результате чего смещается положение уровня Ферми графена. Максимальный фототок наблюдается в случае отрицательного смещения при освещении областей, прилегающих к электродам. В случае же положительного смещения фототок практически не наблюдается. Указанные особенности прибора находят свое объяснение исходя из анализа зонной структуры графена с учетом поступления электронов в результате действия напряжения смещения. Квантовая эффективность преобразователя изменяется в пределах от 5% до 20%, в зависимости от спектрального диа-

пазона. Величина этого параметра возрастает по мере движения от инфракрасного к видимому свету.

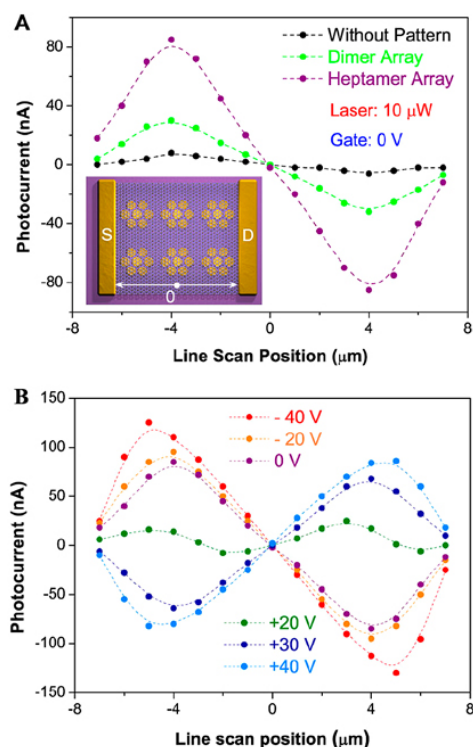


Рис. 2. А - Зависимости фототока от положения облучаемой точки, измеренные при нулевом затворном напряжении (нулевое положение указано на вставке, черными точками показан фототок, полученный без плазменной антенны); В - зависимости фототока от положения облучаемой точки, измеренные при различных затворных напряжениях.

*А.Елецкий*

*1. Z.Fang et al., Nano Lett. 12, 3808 (2012).*

### **Поврежденная структура графена способна к самовосстановлению**

Зависимость электронных характеристик графена и, в частности, ширины запрещенной зоны, от размеров образца позволяет рассматривать этот материал как будущий возможный элемент наноэлектронных систем. Достаточно нарезать графеновый лист на полоски различной ширины, и вы получаете набор полупроводниковых диодов с различной шириной запрещенной зоны. Соединение двух таких полосок различной ширины приводит к созданию гетероперехода, который можно использовать для создания более сложных электронных схем. Таким образом, применение графена в наноэлектронике зависит от возможности изготовления графеновых полосок различной ширины и формирования более сложной цепи из таких полосок. Наиболее распространенный метод обработки графеновых листов, позволяющий вырезать из них полоски требуемой геометрии, основан на использовании электронных пучков. При такой обработке, однако, в структуре графена образуются нежелательные дефекты, наличие которых искажает электронные характеристики образца. Результаты недавних исследований, вы-

полненных группой ученых из Univ. of Manchester (Великобритания) и нескольких английских технологических центров при участии Нобелевского лауреата К. Новоселова, указывают на способность графена к самовосстановлению своей поврежденной структуры. Такое свойство графена имеет существенное значение для развития направлений прикладного использования этого материала в наноэлектронике.

Образцы графена были выращены на медной подложке стандартным методом CVD, после чего на них наносили металлические пленки методом электроннолучевого напыления (Pd) и термического испарения (Ni). В результате облучения образцов электронным пучком в структуре графена возникали дефекты в виде нанометровых отверстий. Для исследования динамики образования и “залечивания” дефектов использовали сканирующий просвечивающий электронный микроскоп, работающий в условиях глубокого ( $5 \times 10^{-9}$  Торр) вакуума (энергия электронного пучка – 60 кэВ, ток – 45 пА, пространственное разрешение – 1.1 Å). Размер изображаемой области графена составляет 2-3 нм. Изображения, полученные с помощью этого микроскопа, позволяют не только проследить за эволюцией размера и формы отверстий в структуре графена, образованных под воздействием электронного пучка, но и установить детальную структуру областей графена, образовавшихся в результате “залечивания”. Как показывают наблюдения, проводимые в течение 40 мин, эти области вначале заполняются комбинациями углеродных колец 5-7 и 5-8, которые вскоре перераспределяются с образованием исключительно колец 5-7. В случае, когда поверхность графена не имеет углеродосодержащих загрязнений, в результате самовосстановления образуется правильная гексагональная структура, присущая графеновой поверхности. При этом длительность восстановления небольших отверстий (диаметром 1 – 1.5 нм) составляет порядка 10 с. В качестве механизма восстановления авторы рассматривают каталитический процесс, происходящий при участии металлических частиц катализатора и атомов углерода, отделяющихся от краевых областей графенового листа.

*А.Елецкий*

*1. R.Zan et al., Nano Lett. 12, 3936 (2012).*

## **НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

### **Наноструктуры в природе. Секреты синей птицы**

Биологические пигменты, которые избирательно рассеивают, поглощают и отражают свет определённых длин волн, создают разнообразную окраску птичьих перьев. Например, каротиноиды дают яркие жёлтые, оранжевые, красные цвета, а меланин – коричневые, чёрные. Но синего пигмента у птиц нет!

Герои знаменитой пьесы Метерлинка так и не смогли найти настоящую “Синюю птицу”... И всё же оперение такого цвета существует. Исследователи из Yale Univ. (США) [1] показали, что яркая синяя, голубая, бирюзовая окраски обусловлены 3D биофотонными наноструктурами, состоящими из белка  $\beta$ -кератина и воздуха (рис. 1). Эти губчатые наноструктуры находятся в центральной части боронок, отходящих от стержня пера (рис. 2 и рис. 5 В,С).

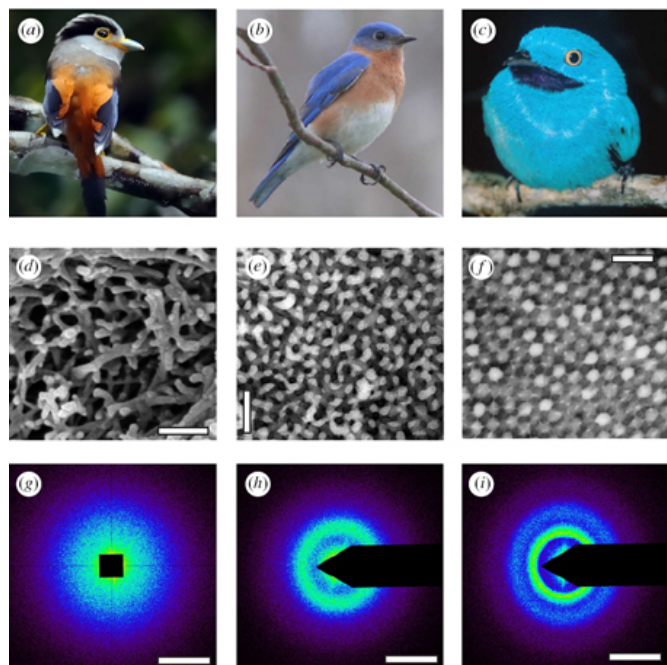


Рис. 1. *a* – Ширококлюв серогрудый; *b* – голубая саялия; *c* – котинга сливогорлая. *d-f* – Соответствующие ТЕМ фотографии наноструктур боронок (светлые изображения – воздух, тёмные – кератин): *d* – серо-голубых перьев, *e* – синих, *f* – бирюзовых. *g-i* – Данные SAXS. Шкала: *d* – 250нм; *e,f* – 500нм, *g-i* – 0.05 нм<sup>-1</sup>.



Рис. 2. Структура птичьего пера. От центрального стержня отходят бородки (от них, в свою очередь, бородачки) из кератина.

В природе существуют различные кристаллоподобные и аморфные биофотонные наноструктуры – одно-, двух- и трёхмерные (рис. 3). Интерференция, дифракция и рассеяние света на элементах этих наноструктур приводят к появлению так называемой “структурной” окраски (см., например, [2]). Один из наиболее известных примеров подобных структур – опал. В опале сферы SiO<sub>2</sub> (размерами от 200 до 1000 нм) образуют ГЦК-решетку. Она и создаёт великолепную радужную окраску. В отличие от этого примера синяя окраска птичьих перьев, вызванная аморфными наноструктурами, имеющими ближний порядок, не радужная. Цвета не меняются в зависимости от угла наблюдения (при естественном освещении). Яркие не радужные структурные краски оперения – важная часть фенотипа птиц.

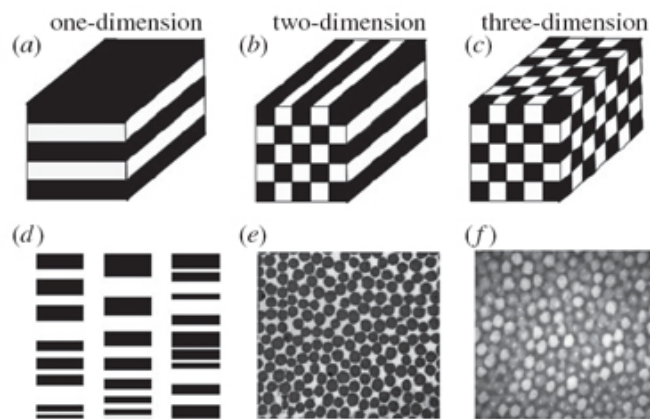


Рис. 3. Классификация биофотонных наноструктур [1]: *a, b, c* – кристаллоподобные (биофотонные кристаллы), дальний порядок; разные цвета соответствуют областям с разными показателями преломления  $n$ ; *d, e, f* – аморфные биофотонные наноструктуры, ближний порядок (*d* – для птиц пока не обнаружено); ТЕМ изображения: *e* – сечения параллельных коллагеновых волокон зелёного языка великолепной райской птицы, *f* – наноструктуры из  $\beta$ -кератина и сферических включений воздуха лазурного пера пипры синеголовой.

Авторы [1] с помощью методов малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (SAXS) с использованием синхротронного излучения, электронной микроскопии и спектрофотометрии охарактеризовали наноструктуры и оптические свойства 297 синих перьев разного оттенка (230 птиц из 163 родов, принадлежащих 51 семейству). Образцы были взяты из музеев США и Великобритании. Измерения SAXS позволили получить количественную информацию о двух основных типах аморфных биофотонных наноструктур и подтвердили существование изотропного ближнего порядка. Пространственное варьирование показателя преломления  $n$  приводит к значительному усилению узкой полосы длин волн.

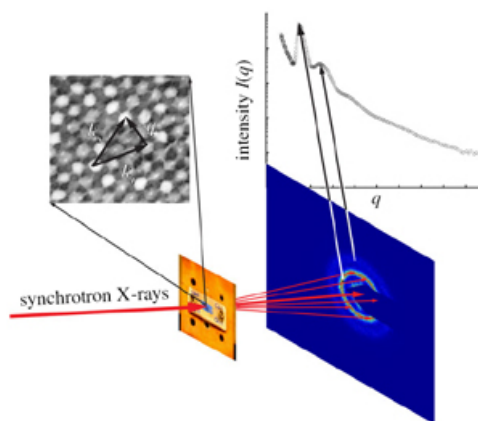


Рис. 4. Схема SAXS экспериментов (размер образца ~ 50 мм<sup>2</sup>).

Наноструктура первого типа состоит из сложного переплетения палочек кератина и каналов, заполненных воздухом (рис. 1e). Структура второго типа – квазиупорядоченная плотная упаковка заполненных воздухом сферических полостей, разделённых стенками из кератина (рис. 1f, 3f). Кроме того, с помощью SAXS авторы [1] идентифицировали новый класс рудиментарной наноструктуры, создаю-

щей синевато-серый и серо-голубой структурные цвета (рис. 1d).

Исследователи выдвинули гипотезу о формировании наноструктур путём самосборки при разделении фаз в процессе образования пера. При полимеризации  $\beta$ -кератин начинает отделяться от цитоплазмы клетки, цитоплазма постепенно высыхает, и пустоты заполняются воздухом. Но почему этот процесс прекращается именно тогда, когда формируется “нужная” для яркой окраски наноструктура? Для выяснения механизма самосборки потребуются дальнейшие исследования.

Авторы работы также изучили случаи комбинированной окраски, когда наряду с наноструктурой присутствует пигмент. Благодаря их взаимодействию возникают новые цвета, которые не могут быть объяснены наличием только пигмента или только определённой наноструктуры.

Конечно, механизмы возникновения структурных цветов изучают не только для того, чтобы разобраться в эволюции птиц. Это важно для разработки новых фотонных материалов. Учёные из Китая и США (в том числе Э. Яблонович, создатель первого искусственного фотонного кристалла “яблонович”), сумели раскрыть некоторые секреты синей птицы [3]. Они изучили структурные и оптические свойства синего пера попугая *Ara macao* (алого макао) и выяснили, что губчатая структура бородки очень похожа на структуру “аморфных алмазоподобных фотонных кристаллов” (то есть фотонных материалов с тетраэдрической координацией элементов как в решетке алмаза, но имеющих только ближний порядок), рис. 5.

По данным SEM бородка состоит из соединённых на концах цилиндрических палочек кератина длиной около 170 нм и диаметром 85 нм (в местах соединений диаметр равен 120 нм). Авторы сконструировали модель на базе идеального аморфного кремния с тетраэдрической структурой ближнего порядка, заменив атомы на “палочки” реальных размеров. Изображение модельной структуры приведено на рис. 5E. Видно, что структура кератина (рис. 5D) поразительно на неё похожа. Рассчитанный для модели и экспериментальный спектры отражения тоже практически совпали (рис. 5).

По данным SEM объёмная доля кератина в бородке составляет 38%. Оказывается, это не случайность, а удивительная структурная оптимизация, достигнутая в процессе эволюции! Модельные расчёты [3] подтверждают, что отражательная способность максимальна именно при этой величине и быстро падает как при росте, так и при снижении доли кератина. Наноструктура бородки пера попугая приводит к возникновению изотропной фотонной псевдо-запрещённой зоны с центром 478 нм, которая даёт яркую, не радужную синюю окраску.

По мнению учёных [3], разгаданная ими наноструктура может послужить основой для синтеза различных фотонных материалов. Действительно, их расчёты показывают, что замена кератина ( $n = 1.58$ ) на материалы с показателями преломления  $n > 2.3$  (при оптимизации объёмной доли “палочек” для каждого  $n$ ) приводит к переходу от изотропной псевдо-запрещённой зоны к изотропной полной запрещённой зоне в видимом или ИК-диапазонах. У аморфных фотонных наноструктур обоих типов может оказаться много интересных, даже необычных оптических свойств, важных для создания новых приборов.

О.Алексеева

1. V.Saranathan et al., *J. R. Soc. Interface* **9**, 2563 (2012).
2. Г.Е. Кричевский, *Химия и жизнь* №11, с. 15 (2010).
3. H.Yin et al., *PNAS* **109**, 10798 (2012).

### Наночастицы в трехмерии

Глаза и мозг человека обладают способностью воссоздавать 3D картину окружающего мира на основании информации, которую даёт нам видимый свет. Для того чтобы получить 3D изображение нанообъекта приходится, во-первых, использовать вместо фотонов быстрые электроны (у них меньше длина волны, и поэтому выше разрешение), а, во-вторых, “смотреть” на этот объект с разных сторон, реконструируя затем его 3D структуру на основании анализа большого (около сотни) числа 2D проекций. С одной стороны, чем больше снято 2D электронограмм, тем точнее можно определить 3D координаты всех атомов, а с другой – платой за каждую 2D проекцию может стать повреждение об-

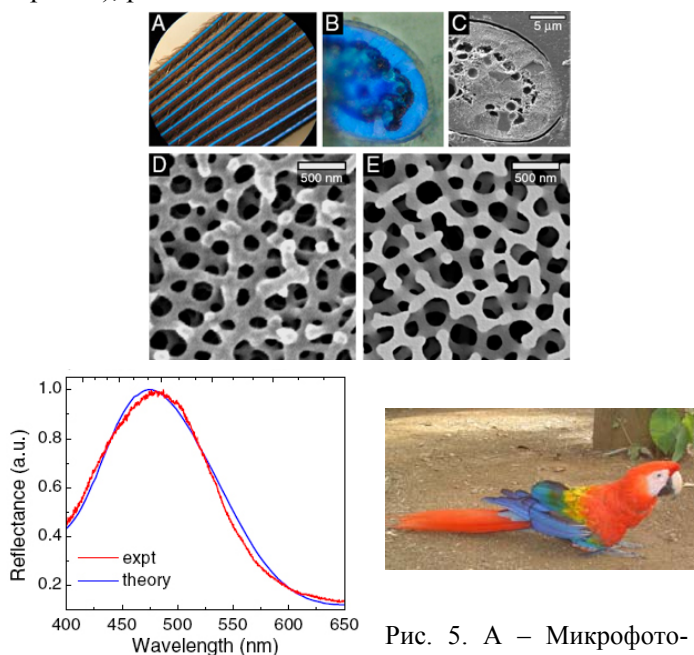


Рис. 5. А – Микрофотография бородок синего пера алого макао. В – Сечение бородки (x100). С – SEM изображение сечения бородки. D – SEM изображение губчатой структуры кератина. Е – изображение модельной структуры. Экспериментальный и теоретический спектры отражения. Фотография алого макао.

разца электронным пучком. В работе [1] (Бельгия, Испания, Германия) разработан алгоритм, позволяющий реконструировать объемную атомную структуру наночастицы на основании всего четырех 2D снимков. Этот алгоритм использован авторами для определения структуры нанопрутиков золота (ГЦК решетка). А вообще он применим к широкому классу нанокристаллов. Более того, теперь перед исследователями открывается заманчивая перспектива мониторинга изменения морфологии наночастиц непосредственно в процессе термообработки или химического воздействия (то есть не только *in situ*, но еще и *in operando*).

*I. B. Goris et al., Nature Mater. 11, 930 (2012).*

## МАГНИТЫ

### Магниты управляют ростом кремния

Монокристаллы кремния являются главным материалом современной промышленной электроники. Их получение – тонкое искусство, развивавшееся много лет. Выращивание огромных кристаллов (диаметром 300 – 500 мм) само по себе нелегкая задача (рис.1). Но вот требование получить бездислокационные кристаллы, не содержащие макродефектов и неоднородностей, причем по всему объему, выполнить совсем нелегко. Это необходимо для экономии материала, чтобы из слитка получалось как можно больше электронных приборов. Для решения этой проблемы было придумано множество приспособлений управления температурным режимом и градиентом. Кремний, получаемый методом Чохральского (т.е. вращением зародыша и постепенным его вытягиванием из расплава на воздух) получил всеобщее признание и был усовершенствован еще и добавлением магнитного поля в процессе роста.

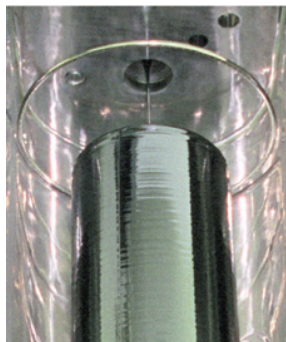


Рис. 1. Фотография слитка кремния, выращенного методом Чохральского Si-Cz при его вытягивании из расплава. Диаметр слитка 300 мм.

Магнитное поле давно и успешно используется для подавления конвективных потоков при выращивании крупных монокристаллов

Si-Cz. Схема типичной промышленной установки с катушками для создания импульсного магнитного поля показана на рис. 2. Кристаллы, выращенные в магнитном поле специальной конфигурации более совершенны, содержат меньше дефектов, чем при использовании традиционного “немагнитного” метода Чохральского. Поэтому такие кристаллы иногда называют М-кремний. Каков же механизм действия магнитного поля? В работе [1] были подробно описаны механизмы изменений, индуцированных магнитным полем в расплаве кремния. О них

красноречиво говорит распределение конвекционных потоков в расплаве при наличии магнитного поля, направленного вверх (против силы тяжести) и вниз (рис. 3). Теоретические расчеты показывают, что возникающие пондермоторные силы сильно подавляют конвекцию потоков жидкого кремния, стабилизируя однородное стационарное распределение материала по объему. Существенные проблемы возникают в том, что индукционный способ получения магнитного поля очень энергозатратный, а само поле получается сильно неоднородным, создавая преимущества стабильного роста лишь на краях слитка, и практически оставляя их теми же вблизи оси его вращения (рис. 3). Кроме того, импульсный характер поля приводит к значительным вибрациям установки и образца, что к пространственной неоднородности добавляет еще и трудноустраняемую качку во времени.

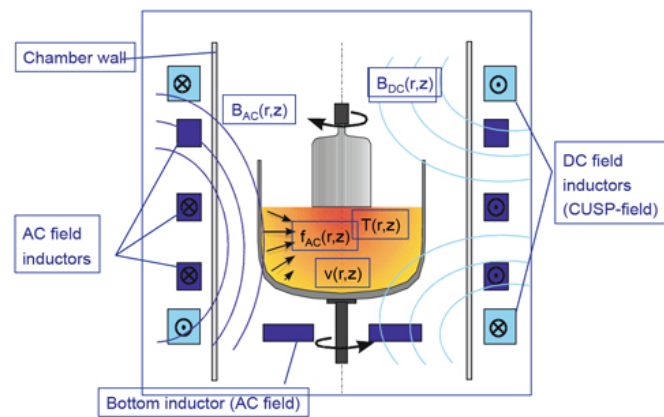
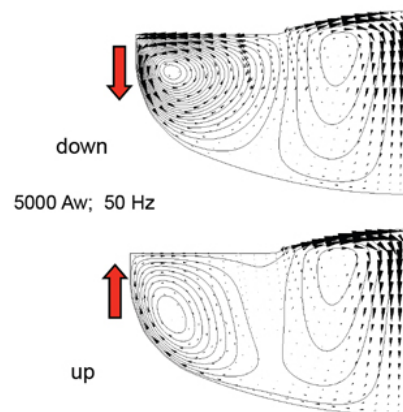


Рис. 2. Промышленная установка для получения М-кремния с помощью импульсного (АС) магнитного поля.

Рис. 3. Распределение конвективных потоков в расплаве кремния, в присутствии импульсного магнитного поля с частотой 50 Гц в двух ориентациях поля вверх и вниз. Магнитное поле, направленное вверх, эффективно подавляет конвекцию на краю образца вдали от оси вращения.



Чтобы преодолеть все эти недостатки, авторы [2] “магнитный” кремний стали получать не в промышленных, а в лабораторных масштабах, предложив свою методику его кристаллизации и роста в магнитном поле. Уменьшение размеров установки позволило им заменить катушки для создания импульсного магнитного поля на сверхпроводящий магнит, который создавал магнитное поле 5 Тл в области роста образца (рис. 4). При этом капля расплавленного кремния могла левитировать, парить, не касаясь стенок. Ее температура поддерживалась

лазером, а сам процесс происходил в атмосфере водорода.

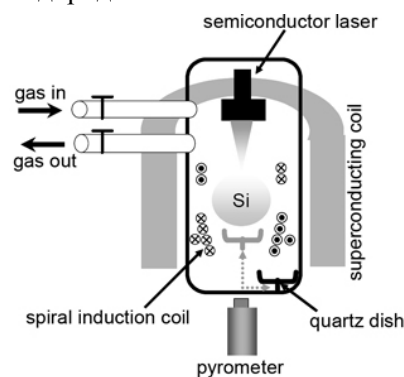


Рис. 4. Установка для выращивания кремния в магнитном поле в условиях левитации в магнитном поле сверхпроводящего магнита 5 Тл.

Выяснилось, что кремний, выращенный в условиях магнитной левитации, практически не изменял размеров зерен, и границы зерен были нечувствительны к наличию магнитного поля, поскольку оно не влияет на режим переохлаждения расплава. Однако, микроструктурные исследования показали, что морфология поверхности такого кремния сильно зависит от величины магнитного поля (рис. 5).

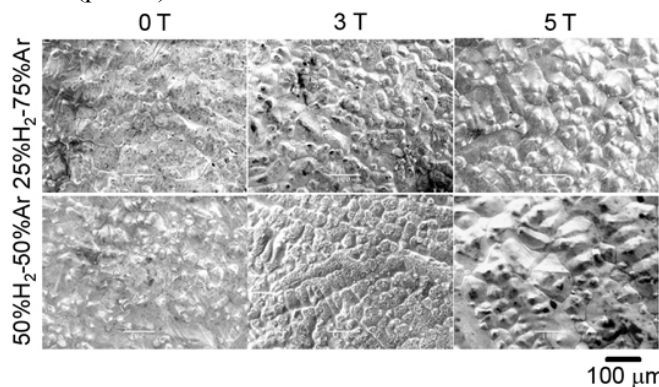


Рис. 5. Морфология поверхности левитирующего кремния после его отверждения в магнитном поле: 0 Тл, 3 Тл и 5 Тл.

В целом, как это видно из рис. 5, авторы [2] не ставили перед собой задачу получения столь же совершенного слитка, как и в промышленных установках. Они лишь нашли путь, с помощью которого существующая “магнитная” методика может быть улучшена.

*О.Коплак*

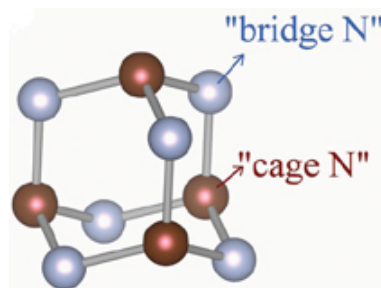
1. B.Nacke, *Use of magnetic fields in industrial silicon crystal growth*, [http://www.uie.org/webfm\\_send/111](http://www.uie.org/webfm_send/111)
2. S.Ueno et al., *J. Phys.: Conf. Series* **165**, 012020 (2009).

## СНОВА К ОСНОВАМ

### Азотный алмаз

При нормальных условиях азот существует в природе в виде двухатомных молекул  $N_2$ , атомы которых прочно связаны друг с другом тройными ковалентными связями  $N \equiv N$ . При большом давлении и высокой температуре эти связи разрываются, что может приводить к образованию различных немолькулярных фаз с одинарными межатомными свя-

зями N-N. Некоторые из таких немолькулярных (полимерных) фаз наблюдались экспериментально [1]. В работе [2] (Китай, США, Великобритания) на основании расчетов из первых принципов предсказано существование новой полимерной фазы азота. Авторы [2] называют ее “алмазоидной” (diamondoid), поскольку в узлах ОЦК решетки находятся “клетки”  $N_{10}$  с алмазоподобным расположением атомов (см. рис.).



Алмазоид  $N_{10}$

Все фононные частоты действительные; это говорит о том, что алмазоидная фаза соответствует локальному

минимуму потенциальной энергии, то есть является метастабильной. Согласно теории, эта фаза стабилизируется при давлении 263 ГПа, что вполне доступно современному эксперименту.

*Л.Опенев*

1. M.I.Eremets et al., *Nature* **411**, 170 (2001).
2. X.Wang et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 175502 (2012).

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Карбид кремния из фуллеренов

Уникальные физико-химические свойства карбида кремния (SiC) хорошо известны. Катализ, электроника, медицина, новые конструкционные компоненты, производство графена и машиностроение – лишь малая часть направлений, где может использоваться или уже активно используется этот функциональный материал. Однако, несмотря на широкое возможное применение, проблема синтеза высококачественных, с низким содержанием дефектов, тонких кристаллических пленок SiC до сих пор остается неразрешенной. Казалось бы, молекулярно-лучевая эпитаксия вполне может стать приемлемым способом получения нанокристаллов карбида кремния, однако высокие температуры ( $\sim 1200$  K), при которых протекают процессы синтеза, отрицательно сказываются на качестве конечных образцов. Поэтому авторы [1] поставили перед собой цель существенно снизить рабочие температуры вплоть до комнатных, что им, в итоге, и удалось сделать. Здесь необходимо отметить, что существует более сотни различных кристаллических форм карбида кремния. В своей работе исследователи остановились на  $\beta$ -модификации или на структуре 3C-SiC, которая обладает наиболее привлекательными электронными свойствами. Авторы успешно провели эпитаксию 3C-SiC на кремниевую подложку с помощью сверхзвукового пучка фуллеренов  $C_{60}$ , которые использовались в качестве прекурсоров углерода и активировали химические процессы

на поверхности кремния. Кинетическая энергия бакиболов в процессе эксперимента достигала 30–35 эВ. Разрушение молекул фуллерена и формирование карбидов, а также непосредственное присутствие образцов 3C-SiC контролировалось рядом экспериментальных методик, таких как рентгеновская и УФ фотоэлектронная спектроскопии, атомно-силовая и просвечивающая микроскопии. Кроме того, исследователи выполнили детальное молекулярно-динамическое моделирование процессов синтеза карбидокремниевых структур, подтверждающее полученные ранее результаты. В перспективе предложенная авторами методика могла бы помочь синтезировать SiC на подложках, которые не в состоянии выдерживать высокие температуры, в том числе различные пластмассы или полимеры, используемые, например, в биомедицине.

*М.Маслов*

*I. R. Verucchi et al., J. Am. Chem. Soc. 134, 17400 (2012).*

## СПИНТРОНИКА

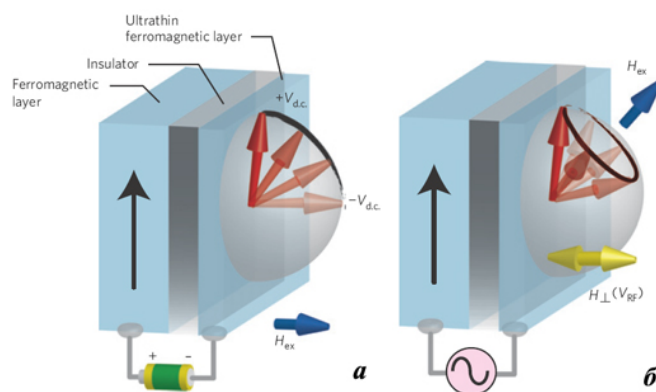
### *Ферромагнитный резонанс под действием электрического поля*

Коллективные спиновые возбуждения в ферромагнетиках рассматривают как перспективный способ для переключения магнитного состояния устройств спинтроники и возбуждения спиновых волн в магнонных устройствах. Однако традиционный способ возбуждения колебаний с помощью магнитного поля не позволяет воздействовать на отдельные элементы памяти, не затрагивая остальных. Локализация воздействия может быть достигнута с помощью спин-поляризованного тока, однако требуемые для этого сверхвысокие плотности тока  $\sim 10^6$  А/см<sup>2</sup> приводят к деградации элементов. Поэтому взгляды разработчиков устройств спинтроники все чаще обращаются в сторону магнитоэлектрических эффектов, которые позволяют управлять намагниченностью посредством электрического поля. Одной из разновидностей магнитоэлектрического эффекта является индуцированное электрическим полем изменение магнитной анизотропии. Этому принципу управления посвящены две недавние работы японских исследователей в журналах семейства Nature [1,2].

В статье [1] с помощью электрического поля воздействуют на многослойную структуру типа “спиновый вентиль”, в котором намагниченность в одном слое остается фиксированной, а в другом – переключается внешним воздействием. От относительной ориентации намагниченностей в слоях зависит сопротивление структуры. Прикладывая электрическое поле около 1 В (что создает в тонких слоях магнитного материала напряженность в десятки мегавольт на сантиметр) авторам [1] удавалось вызвать изменение типа анизотропии от легкой плоскости к легкой оси, что приводило к пре-

цессии магнитных моментов и переключению элемента за время равное полупериоду прецессии – 0.4 нс. Характерная энергия переключения составляла порядка  $10^4$  к<sub>B</sub>T (измерения вели при комнатных температурах), что сравнимо с лучшими результатами для полевых транзисторов.

На схожем принципе основано действие устройства, предложенного в [2], однако возбуждение колебаний осуществляется не импульсом ступенчатого электрического напряжения, а гармоническим сигналом с частотой 1-10 ГГц, соответствующей ферромагнитному резонансу, что позволит сэкономить энергию. Правда, пока характерные мощности, поглощаемые устройством, составляют немалые для устройств спинтроники величины  $\sim 1$  мкВт, но авторы [2] утверждают, что эту величину можно снизить как минимум на два порядка.



Электрическое воздействие на намагниченность в спиновом вентиле: а – под действием импульса электрического напряжения анизотропия магнитной пленки меняется от легкоплоскостной (вектор намагниченности, показанный красным, лежит в плоскости пленки) к легкоосной (вектор намагниченности, перпендикулярен плоскости пленки); б – под действием гармонического электрического сигнала возбуждаются колебания намагниченности на резонансной частоте [2] (желтым показано эффективное магнитное поле анизотропии, порожденное электрическим полем, синим – результирующее магнитное поле, вокруг которого совершается прецессия спинов).

В заключение отметим, что на схожем принципе электрически индуцированного изменения магнитной анизотропии ранее предлагалось создать усилитель спиновых волн (см. ПерсТ [3]).

*А.Пятаков*

1. *Y. Shiota et al, Nature Mater. 11, 39 (2012).*
2. *T. Nozaki et al, Nature Phys. 8, 491 (2012).*
3. [ПерсТ 17, вып. 3, с.4 \(2010\).](#)



## КОНФЕРЕНЦИИ

### *Семинар по физике конденсированного состояния, 21 ноября 2012 г.*

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

Maurice Skolnick -University of Sheffield, UK  
Иностраный член РАН

“The Polariton Condensate in Semiconductor Microcavities” (Поляритонный конденсат в полупроводниковых микрорезонаторах)

Recent work on the polariton high density states which form in semiconductor microcavities will be reviewed. The talk will begin with a general introduction, emphasising features of the polariton system which lead to new physics. Specific physics areas which will be described include pattern formation, namely vortices and solitons, coherence properties and behaviour of the polariton system in applied periodic lattices. Where appropriate, similarities and differences to cold atom systems will be discussed.

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

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

Дополнительная информация:  
тел. +7(495)939-1151

E-mail: [khokhlov@mig.phys.msu.ru](mailto:khokhlov@mig.phys.msu.ru)



*Совместное заседание научной сессии ОФН РАН и ученых советов ФИАН и НИИЯФ МГУ, посвященное 120-летию со дня рождения Д.В. Скобельцына, 28 ноября 2012 г.*

(14-00, конференц-зал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, Главное здание, 3-й этаж)

1. д.ф.-м.н. академик **Г.А. Месяц**  
Вступительное слово
  2. д.ф.-м.н. **О.Д. Далькаров** (ФИАН)  
“Исследования космических лучей в ФИАНе”
  3. д.ф.-м.н. **М.И. Панасюк**, д.ф.-м.н. **Е.А. Романовский** (НИИЯФ МГУ)  
“Академик Д.В. Скобельцын – основатель школы ядерной физики в МГУ”
  4. д.ф.-м.н. **В.В. Михайлин** (НИИЯФ МГУ)  
“Синхротронные ондуляторные излучения и их применение в спектроскопии”
  5. д.ф.-м.н. **И.Н. Топтыгин** (СПбГПУ)  
“О петербургском периоде жизни Д.В. Скобельцына”
- Web: [www.gpad.ac.ru](http://www.gpad.ac.ru)

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой ИФТТ РАН и НИЦ “Курчатовский институт”

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)  
Научные редакторы: К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, О.Коплак,  
М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>