

В этом выпуске:

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Силицен – кремниевый эквивалент графена

После открытия графена значительные усилия были затрачены на теоретические исследования и попытки экспериментального синтеза аналогичных двумерных материалов из других элементов IV группы, в том числе кремния. Гипотетический гексагональный монослой атомов кремния получил название силицена [1, 2]. Теория предсказывает, что силицен, в отличие от графена, не является абсолютно плоским, а межатомное расстояние ( $2.25 \text{ \AA}$ ) не намного меньше, чем в объемном кремнии ( $2.35 \text{ \AA}$ ). Поскольку кремниевого аналога графита не существует, то нельзя, следуя Гейму и Новоселову, получить силицен с помощью обычного скотча. Поэтому был избран другой путь: осаждение кремния на поверхности металлов, с которыми он взаимодействует очень слабо и не образует химических соединений. Таким путем удалось вырастить любопытные кремниевые сверхструктуры на подложке  $\text{Ag}(001)$  и изготовить кремниевые наноленты с гексагональной структурой на поверхности  $\text{Ag}(110)$  [3]. Но редкие сообщения о синтезе собственно силицена оставались неподтвержденными.

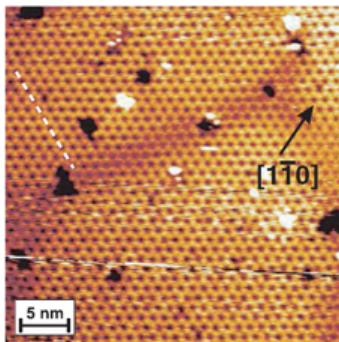


Рис. 1. СТМ-изображение монослоя Si на поверхности  $\text{Ag}(111)$

В работе [4] (Италия, Франция, Германия) силицен был наконец-то изготовлен. Гексагональный монослой кремния (рис. 1) формировался на поверхности (111) монокристалла серебра при термическом испарении кремниевой мишени. Росту именно такого монослоя способствовало наличие у

$\text{Ag}(111)$  оси симметрии шестого порядка. Фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением показала, что закон дисперсии квазичастиц в силицене, как и в графене, является линейным –  $E = \hbar k v_F$  со скоростью Ферми  $v_F = 1.3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . Между вершинами двух дираковских конусов имеется щель шириной  $0.6 \text{ эВ}$  (рис. 2), которая появляется вследствие взаимодействия силицена с подложкой и должна отсутствовать в “свободном” силицене.

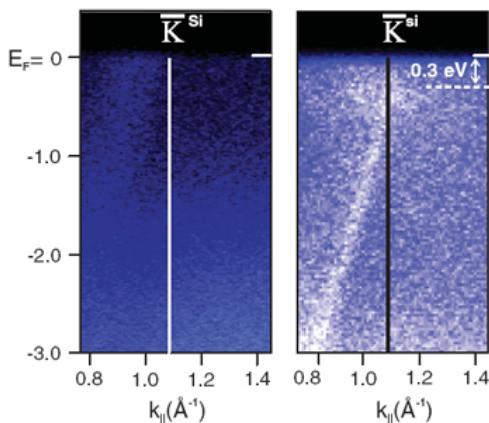


Рис. 2. Карта интенсивности ARPES до (слева) и после (справа) осаждения Si на  $\text{Ag}(111)$ .

Расчеты, выполненные авторами [4] в рамках теории функционала плотности, показали, что энергетическая выгодность адсорбции силицена на  $\text{Ag}(111)$  составляет  $0.48 \text{ эВ/атом}$ .

И далее ...

- 2 Иридиевые ловушки для водорода

Наночастицы в воде влияют на поведение рыб

- 4 СВЕРХПРОВОДНИКИ  
Электроны и фононы: кто более для купратов ценен?

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ  
Туннелирование магнитного потока через сверхпроводящий нанопровод

- 5 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
Когда “маленькие по три” лучше, чем “большие по пять”...

- 6 МУЛЬТИФЕРРОИКИ  
Скирмионы в мультиферроиках

- 7 СПИНТРОНИКА  
Кремниевая спинтроника

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ  
Удаленный нагрев материала с помощью УНТ

- 8 ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА  
Квантовые симулянты

- 9 КОНФЕРЕНЦИИ  
Семинар по физике конденсированного состояния  
16 мая 2012 г.

XV Международный, междисциплинарный симпозиум “Порядок, беспорядок и свойства оксидов”, 7-12 сентября 2012 г., п. Лоо, Краснодарский край, Россия

XV Международный, междисциплинарный симпозиум “Упорядочение в минералах и сплавах”, 13-18 сентября 2012 г., п. Лоо, Краснодарский край, Россия

Будучи почти полным структурным и электронным аналогом графена, силицен представляет громадный интерес и для фундаментальной физики (гораздо более сильное, чем в графене, спин-орбитальное взаимодействие позволит наблюдать спиновый эффект Холла при не слишком низких температурах), и для практических применений (силицен гораздо легче интегрировать в современную кремниевую электронику, чем графен).

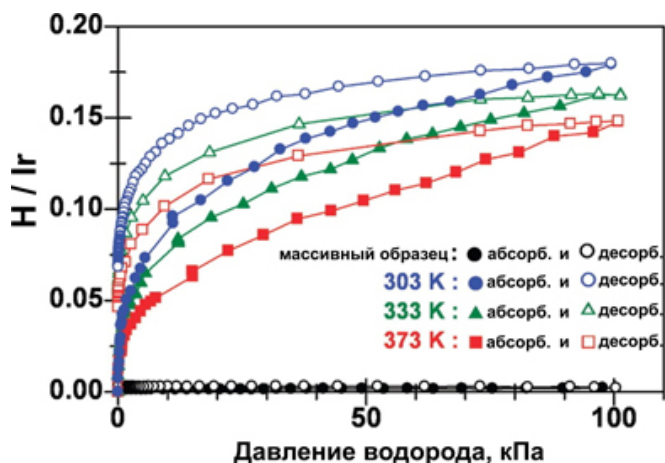
Л. Опенов

1. K. Takeda, S. Shiraishi, *Phys. Rev. B* **50**, 14916 (1994).
2. G. G. Guzman-Verri, L. C. Lew Yan Voon, *Phys. Rev. B* **76**, 075131 (2007).
3. P. De Padova et al., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 261905 (2010).
4. P. Vogt et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 155501 (2012).

### Иридиевые ловушки для водорода

В последнее время, затрагивая проблему запасаения и транспортировки водорода, многие исследователи часто делают акцент на известных углеродных наноструктурах: фуллеренах, нанотрубках, графене. Однако авторы работы [1] предположили, что в будущем сохранять водород, возможно, помогут наночастицы иридия. Наряду с остальными металлами платиновой группы они обладают высокой каталитической активностью в реакциях гидрирования, в отличие от массивных иридиевых образцов, которые плохо абсорбируют водород. Наночастицы иридия были получены восстановлением в спиртовой среде хлорида иридия ( $\text{IrCl}_3$ ) в присутствии поливинилпирролидона. Средний диаметр синтезированных частиц по данным просвечивающей электронной микроскопии составил  $1.5 \pm 0.5$  нм. Для оценки количества водорода, которое способны запасть иридиевые наночастицы, авторы построили изотермы абсорбции, измерив концентрацию газа (отношение числа атомов водорода к полному числу атомов иридия) в зависимости от его давления при различных температурах (см. рис.). Выяснилось, что отношение  $\text{H/Ir}$  для наночастиц при комнатной температуре возрастает с ростом давления, в то время как массивный образец совершенно не абсорбирует водород. Этот результат отражает влияние размеров частиц на принципиальную возможность сохранения водорода в иридии. Кроме того, авторы выяснили, что концентрация абсорбированного водорода падает с ростом температуры, при которой происходит измерение. Например, отношение  $\text{H/Ir}$  при 101.3 кПа составило 0.18, 0.16 и 0.15 при 303, 333 и 373 К, соответственно. К сожалению, авторам пока не удалось найти тот критический размер наночастиц, при котором иридий становится аккумулятором водорода. Этот вопрос требует дополнительного изучения. Однако авторы надеются, что проведенные ими исследования не только помогут в создании новых наноструктури-

рованных материалов для водородной энергетики, но и прояснят механизмы катализа в реакциях, так или иначе, связанных с водородом.



Изотермы абсорбции/десорбции водорода для массивного образца иридия при 303 К (черная линия) и иридиевых наночастиц при 303 К (синяя линия), 333 К (зеленая линия) и 373 К (красная линия).

М. Маслов

1. H. Kobayashi et al., *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 6893 (2012).

### Наночастицы в воде влияют на поведение рыб



Синтезированные наночастицы всё шире используются в продуктах питания, бытовых товарах, фармацевтических препаратах и потому в больших количествах попадают в сточные воды, а потом и в реки, моря... Исследователи активно изучают их влияние на живые организмы. Например, недавно были получены данные о вредном воздействии наночастиц диоксида титана на морской фитопланктон, который является основой практически всех пищевых цепочек и экосистем в океане [1]. Однако в большинстве экспериментах на рыбах изучаемые наночастицы просто помещают в водную среду, и эффекты могут быть вызваны их проникновением через кожу или жабры. В природе более естественный путь — попадание внутрь с кормом (в виде комплексов с водорослями, зоопланктоном).

Исследователи из Lund Univ. (Швеция) [2] изучили именно такой транспорт наночастиц из воды в пищу рыб и пришли к нерадостному выводу: наночастицы влияют на поведение рыб и метаболизм жиров в их организме. Исследователи в своих экспериментах использовали коммерческие наночастицы полистирола (их применяют в медицине, фармацевтике, биотехнологии и др.), зоопланктон *Daphnia magna* (рачки дафнии, то есть обычный корм для рыб) и золотых карасей *Carassius carassius* (4 группы по 4 карася). Наночастицы добавляли в воду во время роста зелёных водорослей. На следующий

день этими водорослями кормили дафний, и ещё через день зоопланктон давали рыбам. Эту 3-дневную процедуру повторяли в течение 6 недель. Рыб не меняли, но на 14, 21, 27 и 29 день жертвовали по одной из группы для исследований крови и тканей. Схема эксперимента приведена на рис. 1. В контрольной группе наночастицы к водорослям не добавляли. Чтобы убедиться в том, что наночастицы попали в корм, авторы работы [2] провели дополнительные эксперименты. Они инкапсулировали в наночастицы флуоресцентные молекулы и наблюдали флуоресценцию водорослей через сутки, а дафний еще через следующие 24 ч.

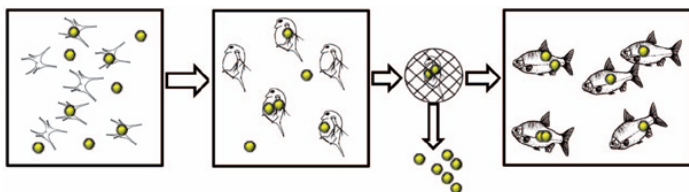


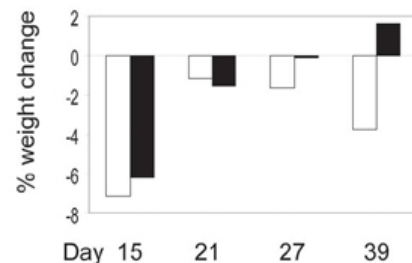
Рис. 1. Схема эксперимента. Сферические наночастицы полистирола (диаметр 24 нм) добавляли к культуре водорослей, через 24 ч фильтровали и использовали как корм для дафний. Ещё через 24 ч зоопланктон промывали (удаляли свободные наночастицы из раствора) и кормили им рыб.

Исследователи обнаружили изменение в поведении подопытных рыб. Постепенно рыбы, которые с кормом получали наночастицы, стали двигаться медленнее, чем контрольные, и перестали охотиться за кормом. Поразительно, но они даже не пытались съесть дафний, которые всплывали к ним в рот! Дафнии спокойно всплывали обратно...

Исследователи [2] предположили, что у рыб нарушился метаболизм жиров, основных источников энергии в организме животных. Жиры (триглицериды) и холестерин (структурный компонент мембран), поступающие в организм с пищей или синтезированные в печени, транспортируются в органы, где они используются посредством образования транспортных частиц – липопротеинов. В состав липопротеинов входит белок аполипопротеин. Известно, что в биологической жидкости (крови, лимфе и др.) поверхность различных наночастиц покрывается слоем адсорбированных белков – “белковой короной” [3]. Специальные эксперименты *in vitro* [2], в которых учёные смешали сыворотку крови карася и нескольких других рыб с наночастицами полистирола, показали, что действительно с поверхностью этих наночастиц связывается белок аполипопротеин. В результате рыбы не могут должным образом использовать свои резервы жира.

Одним из параметров, характеризующих метаболизм, является вес. И контрольные, и подопытные рыбы, которых кормили ограниченным количеством зоопланктона, сначала теряли вес, т.к. использовали резервы энергии (рис. 2). Однако, начиная с 22 дня подопытные рыбы, в отличие от контрольных, стали вес набирать!

Рис. 2. Изменение веса по отношению к предыдущему измерению (на 15 день – по отношению к измерению за 4 дня до начала эксперимента). Чёрный столбик – опыт, белый – контроль.



Авторы [2] обнаружили различия ещё в двух параметрах, характеризующих метаболизм жиров. Отношение триглицериды/холестерин в сыворотке крови и распределение холестерина между печенью и мышцами отличались у подопытных и контрольных карасей. Интересно, что изменения возникали примерно через 22 дня от начала эксперимента. Это говорит о том, что нарушение метаболизма жиров, связанное с наночастицами, является медленным процессом.

Наночастицы, попадающие внутрь организма с пищей или лекарствами, могут вызвать и другие вредные эффекты. Некоторые учёные связывают с ними возникновение хронического воспалительного заболевания желудочно-кишечного тракта (болезни Крона). Недавние исследования учёных из США показали, что наночастицы полистирола влияют на транспорт железа в организме [4]. Авторы работы отмечают, что у большинства пациентов с болезнью Крона наблюдается дефицит железа, то есть, возможно, действительно имеется связь между воздействием наночастиц на желудочно-кишечный тракт, транспортом железа и этим заболеванием. Эксперименты [4] были проведены *in vitro* на клеточных культурах, моделирующих кишечный эпителий, и *in vivo* на курицах корнуэльской породы, которым наночастицы вводили с помощью пипетки. Дозировки наночастиц полистирола подбирали так, чтобы они соответствовали возможным дозам, получаемым с лекарствами в развитых странах взрослым человеком весом 70 кг. Всасывание и транспорт железа определяли по количеству  $^{58}\text{Fe}$ , абсорбированного и прошедшего через монослой клеток модельного эпителия, а также по количеству  $^{58}\text{Fe}$  в образцах крови, взятых из вены двенадцатиперстной кишки кур.

Эксперименты *in vivo* показали, что острое (однократное) воздействие карбоксилированных частиц размером 50 нм привело к снижению всасывания железа эпителиальными клетками кишечника. При хроническом воздействии (наночастицы вводили курам каждое утро в течение 14 дней) абсорбция железа была выше, чем у контрольных экземпляров (рис. 3). Учёные выяснили, что произошла трансформация специальных органов всасывания – ворсинок, и площадь поверхности, доступная для абсорбции железа, заметно выросла (рис. 4). Это скомпенсировало нарушение транспорта железа, вызванное наночастицами. Результаты, полученные

*in vitro*, соответствуют данным *in vivo* – таким образом, модель, предложенная учёными, может быть использована для дальнейших исследований токсичности наночастиц.

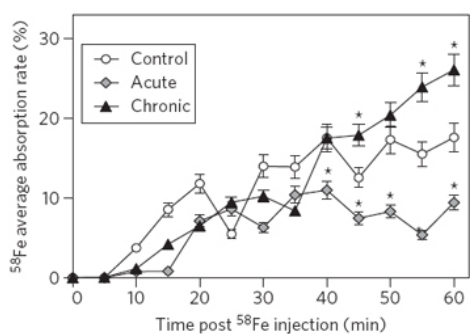


Рис. 3. Скорость абсорбции железа в петле двенадцатиперстной кишки для контрольной группы кур, а также после острого и хронического воздействия наночастиц. Образцы крови взяты перед введением изотопа железа, а затем каждые 5 мин.

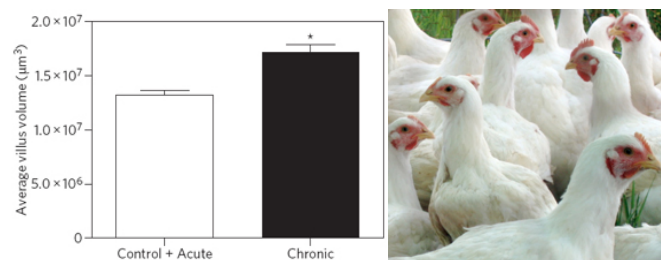


Рис. 4. Средний объем ворсинок кишечника, измеренный после острого и хронического воздействия наночастиц полистирола, а также для кур из контрольной группы. Справа – корнуэльские куры.

Авторы работы [4] выбрали в качестве примера одно из важнейших питательных веществ – железо, транспорт которого через эпителий кишечника происходит при участии белков. Аналогичные нарушения могут возникать для кальция, меди, цинка, прохождение которых через эпителий тоже происходит с помощью транспортных систем. Возможно, это относится и к абсорбции витаминов А, D, Е и К. Хотя частицы полистирола обычно считаются нетоксичными, результаты [2,4] показали, что их вмешательство в нормальные физиологические процессы может приводить к вредным последствиям.

О.Алексеева

1. [ПерсТ 19, вып. 7, с. 5 \(2012\).](#)
2. T.Cedervall et al., *PLoS ONE* 7(2), e32254 (2012).
3. [ПерсТ 19, вып. 8, с. 6 \(2012\).](#)
4. G.J.Mahler et al., *Nature Nanotechn.* 7, 264 (2012).

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Электроны и фононы: кто более для купратов ценен?

Для понимания феномена высокотемпературной сверхпроводимости ключевым является вопрос о природе бозонных возбуждений, обмениваясь которыми носители заряда объединяются в куперовские пары. В качестве кандидатов на роль спаривающих бозонов в ВТСП рассматриваются колебания ре-

шетки (фононы) и электронные возбуждения различного типа. Взаимодействие фермиевских квазичастиц (ФК) с “бозонным клеем” описывается функцией  $\Pi(\Omega)$ , которая зависит от плотности состояний бозонных возбуждений и силы их связи с ФК. Поскольку это взаимодействие существенно влияет на дисперсию ФК и время их жизни, то оно проявляется в самых различных экспериментах, таких как фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением, неупругое рассеяние нейтронов и рентгеновских лучей, оптическая спектроскопия и др. Но при этом не удастся однозначно отделить электронный вклад в  $\Pi(\Omega)$  от фононного.

В работе [1] (Италия, Япония, США, Канада, Швейцария) для выяснения происхождения спаривающих бозонов использована неравновесная оптическая спектроскопия с фемтосекундным разрешением по времени. После воздействия на образец (монокристалл  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{0.92}\text{Y}_{0.08}\text{Cu}_2\text{O}_8$  с  $T_c = 96$  К) коротким лазерным импульсом эффективная электронная температура скачком возросла, а затем релаксировала к своему равновесному значению за счет передачи энергии от электронов другим степеням свободы. При этом оказалось, что с некоторыми бозонными возбуждениями электроны термализуются гораздо быстрее ( $\ll 100$  фс), чем с фононами (100 - 200 фс), что говорит, во-первых, о нефононной (а значит – электронной) природе этих возбуждений, а во-вторых – о сильном взаимодействии с ними. Разделив фононную и электронную составляющие  $\Pi(\Omega)$ , авторы [1] нашли соответствующие безразмерные константы взаимодействия, которые оказались равными  $\lambda_\phi = 0.4 \pm 0.2$  и  $\lambda_s = 1.1 \pm 0.2$ . С одной стороны, тот факт, что  $\lambda_s$  значительно больше  $\lambda_\phi$ , свидетельствует о главенствующей роли “электронных бозонов” (спиновых флуктуаций или петлевых токов) в сверхпроводимости купратных ВТСП. С другой стороны, непренебрежимо малая величина  $\lambda_\phi$  позволяет объяснить наличие изотопического эффекта в дисперсии узловых ФК.

Л.Опенев

I. S. Dal Conte et al., *Science* 335, 1600 (2012).

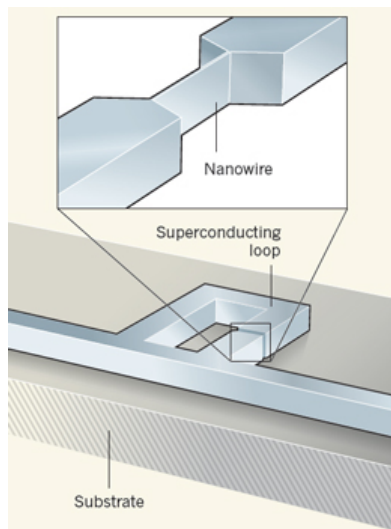
## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Туннелирование магнитного потока через сверхпроводящий нанопровод

Использование принципов квантовой механики для описания макроскопических объектов приводит к парадоксам, таким как, например, шредингеровский кот, живой и мертвый одновременно. Принято считать, что невозможность существования столь удивительных суперпозиционных состояний в реальной жизни обусловлена спонтанным коллапсом волновой функции. Еще один чисто квантовый эффект – туннелирование через потенциальный барьер – тоже считается прерогативой микроскопических частиц (электронов и т.п.). Недавно, однако, одно из проявлений этого эффекта на макроуровне

ПерсТ, 2012, том 19, выпуск 9

было обнаружено в работе [1] (Япония, США, Великобритания, Финляндия, Россия, Израиль), авторы которой зарегистрировали давно предсказанное, но до сей поры не наблюдавшееся когерентное квантовое проскальзывание фазы (coherent quantum phase slip, CQPS) (см. рис).



Кубит Муиджи-Харманса [2]. Базисные состояния этого кубита отвечают различным направлениям циркуляции электронов по замкнутому сверхпроводниковому контуру, то есть различным направлениям потока магнитного поля. В контуре имеется сужение (нанопровод) шириной 40 нм, через которое и происходит туннелирование магнитного потока.

По сути дела CQPS представляет собой не что иное, как когерентное туннелирование магнитного потока через ребро сверхпроводящего контура. Поскольку магнитное поле создается огромным количеством циркулирующих по контуру электронов, то явление CQPS можно считать макроскопическим (ну, как минимум, мезоскопическим). Эффект CQPS дуален эффекту Джозефсона (когерентному туннелированию куперовских пар) и наравне с ним может использоваться в сверхпроводниковой электронике и квантовой метрологии.

*По материалам заметки A. Bezryadin, "Tunneling across a nanowire", Nature 484, 324 (2012).*

1. O.V. Astafiev et al., *Nature* **484**, 355 (2012).
2. J.E. Moij, C.J.P.M. Harmans, *New J. Phys.* **7**, 219 (2006).

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Когда "маленькие по три" лучше, чем "большие по пять"...**

Землетрясение кажется неуправляемым бедствием, которое можно только пережить, но им нельзя управлять. Огромные силы потрачены на раннюю диагностику и поиск предвестников землетрясений. От изощренных физических методов до суеверных признаков – все было пущено в ход. Однако, увы, до настоящего времени нет не только способа повлиять на протекание разрушительного природного явления, но даже и предсказать его наступление.

В работе [1] предложен оригинальный способ, как можно "разменять одно крупное землетрясение на много мелких". Главная идея автора основана на том, что землетрясение – это сброс механических напряжений, накопленных в деформированных по-

родах под действием гигантских механических напряжений. Обычно в материаловедении с внутренними напряжениями борются с помощью нагрева образца. Но как нагреть Землю?

Нужен другой способ воздействия на породы земной коры, позволяющий улучшить пластичность пород, облегчить их деформацию без растрескивания (т.е. без гигантских катастроф). Главная идея управления землетрясениями заключается в том, чтобы сделать породы более пластичными, податливыми, способными не трескаться, а изменять свою форму путем медленного плавного течения. Это возможно благодаря движению дислокаций, которые обычно тормозятся различными дефектами (препятствиями) в кристаллах. Пластическая деформация обеспечивается подвижными дислокациями; когда они лишаются движения, "замораживаются" упругими полями дефектов или других дислокаций и сами создают упругие локальные поля, тогда они становятся источником и причиной дислокационного упрочнения очага землетрясения. Чтобы избежать катастрофы, нужно стимулировать движение дислокаций и деформационную пластичность очага.

В [2] теоретически показано, что движение дислокаций в диамагнитных кристаллах зависит от обменного (кулоновского) взаимодействия частиц, обладающих магнитными моментами (спинами). Ориентация спинов в паре частиц может быть изменена в магнитном поле. В результате, вместо образования связанной пары (дислокация + препятствие) происходит свободное движение дислокаций и развитие пластической деформации кристаллов и горных пород, состоящих из них. Таким образом, приложение магнитного поля способно пластифицировать кристаллические твердые тела. Первоначально подобные эксперименты проводили в относительно высоких магнитных полях (~ 0.1-1 Тл), в которых было первоначально обнаружено магниторезонансное разупрочнение кристаллов [3]. Однако, совсем недавно в [4, 5] было установлено, что даже в магнитном поле Земли в присутствии радиочастотного магнитного поля, отвечающего радиодиапазону, в кристаллах возбуждается электронный парамагнитный резонанс, стимулирующий изменение мультиплетности пар частиц в нанореакторе "дислокация – примесный атом". Резонансными называют поля, совпадающие по частоте с электронно-спиновыми (зеemanовскими) переходами в спиновом нанореакторе; они прямо действуют на электронный спин, изменяя спиновые состояния нанореактора и управляя магнитопластичностью через кулоновское взаимодействие. Резонансное микроволновое поле производит переориентацию электронных спинов, переводя спиновый нанореактор из состояния  $S$  в триплетное, долгоживущее состояние. Другими словами, резонансная микроволновая накачка зеemanовских переходов увеличивает

время жизни нанореактора с выключенным кулоновским потенциалом, увеличивая вероятность депининга (открепления) дислокации; как результат,

на этих частотах накачки возрастают и пробег дислокаций, и пластичность (рис. 1).

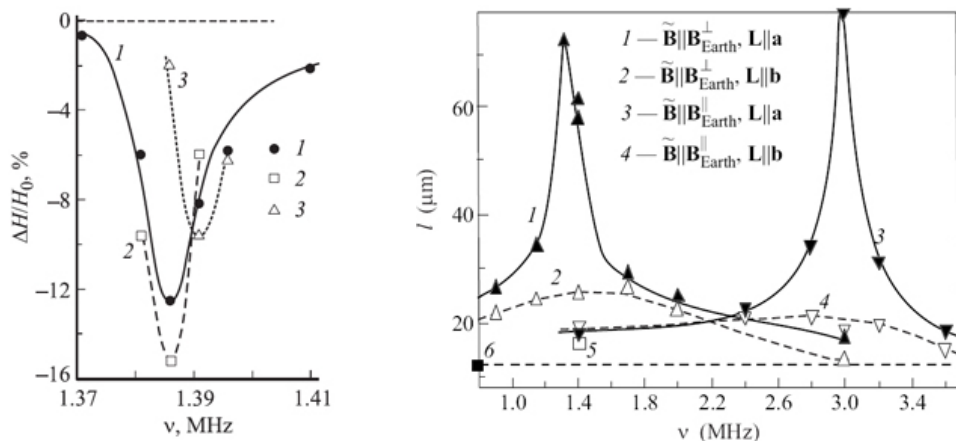


Рис. 1. Зависимость относительного уменьшения микротвердости кристаллов гидрофталата калия (слева) [4] и NaCl (справа) [5] от частоты радиочастотного магнитного поля в присутствии земного магнитного поля при различных взаимных ориентациях.

Этот необычный эффект находится в рамках представлений, развитых в [2] и послуживших ранее основой для целого направления науки – спиновой химии. Теперь же оказалось, что спиновая химия проявляет себя в твердых телах, в которых взаимодействие дефектов между собой вполне аналогично химической реакции. В результате, постоянное магнитное поле, его сочетание с резонансным радиочастотным магнитным полем, а также магнитные поля ядер (сверхтонкое взаимодействие) – все эти факторы приводят к пластификации кристаллов.

Поскольку описанные выше магнитоэлектрические эффекты наблюдались и в диэлектриках (NaCl, KCl, CsI, LiF и др.), и в полупроводниках (ZnS, Si, GaAs и др.), а также в металлах (Zn, Cu, Al и др.), можно предполагать, что большинство типов горных пород, содержащих микро- и макрокристаллы упомянутых типов, могут размягчаться в магнитном поле.

Таким образом, имеются и теоретические разработки и экспериментальные данные для реализации новых возможностей управления землетрясениями с помощью магнитного поля Земли, а также при возбуждении парамагнитного резонанса радиочастотным полем в присутствии перпендикулярного ему постоянного магнитного поля Земли.

О. Коплак

1. А.Л.Бучаченко, *Хим. физика* **29**, № 9, 9 (2010).
2. А.Л.Бучаченко, *ЖЭТФ* **132**, 827 (2007).
3. *Chem. Rev.* **23**, pt. 2, 22 (1998).
4. В.И.Альшиц и др., *ФТТ* **54**, 305 (2012).
5. В.И.Альшиц и др., *Письма в ЖЭТФ* **91**, 97 (2010).

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

### Скирмионы в мультиферроиках

О скирмионах – новом виде магнитных вихрей (рис. 1а), наблюдающихся в магнитных кристаллах на масштабах, меньших 100 нм, рассказывалось ранее в ПерсТе [1]. В магнитных проводниках скирмионы могут служить причиной возникновения гигантского эффекта Холла. Однако не менее интересны свойства скирмионов в магнитных диэлек-

триках, поскольку как показала группа японских исследователей [2], они могут быть электрически поляризованы, что позволит управлять ими с помощью электрического поля.

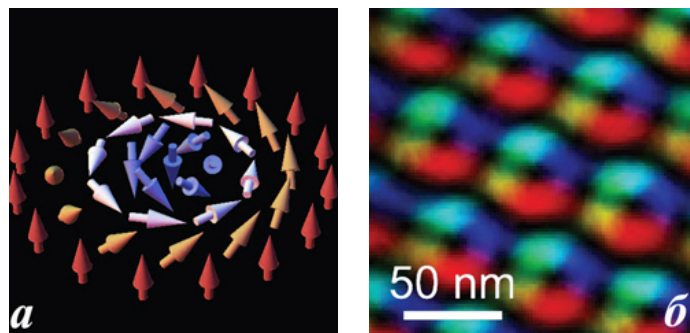


Рис. 1. Скирмионы: а - распределение намагниченности в уединенном скирмионе; б - решетка скирмионов в мультиферроике  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ : цветом показано направление намагниченности в плоскости рисунка (результаты дешифровки изображений, полученных с помощью лоренцевской просвечивающей электронной микроскопии) [2].

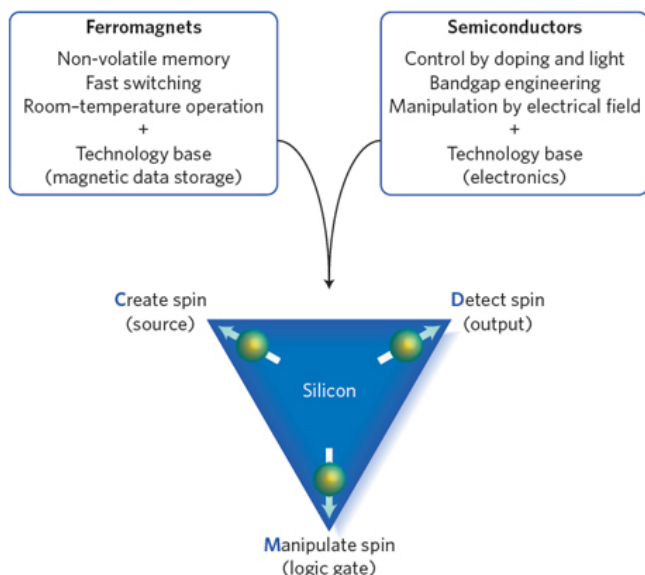
Скирмионы с магнитоэлектрическими свойствами наблюдались в кристаллах магнитных диэлектриков  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  с помощью лоренцевской просвечивающей электронной микроскопии. В поле  $H \sim 800$  Э при температуре 5 К на месте магнитной спирали в кристалле образовывалась гексагональная решетка скирмионов, подобная той, что образуют цилиндрические магнитные домены (рис. 1б). В полях около 2 кЭ скирмионная решетка коллапсирует в однородное ферромагнитное состояние. Поскольку  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  является мультиферроиком, то все три магнитных состояния (геликоидальное, скирмионное и однородное) характеризуются различными величинами электрической поляризации.

Вблизи поля коллапса скирмионы могут существовать не только в виде решетки, но и в уединенном состоянии. Уединенный скирмион в мультиферроиках имеет электрическую поляризацию, отличную от окружения, что в принципе может позволить управлять его перемещением, используя градиентное электрическое поле (подобным образом наблю-

далось движение магнитных доменных границ в поле заряженной иглы [3]). Это, возможно, позволит построить на движущихся скирмионах элементы магнитной памяти, работающие на тех же принципах, что и память на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД), использовавшаяся во второй половине прошлого века. В отличие от своего предшественника, она будет не только более емкой (характерные размеры скирмионов на несколько порядков меньше ЦМД), но и будет характеризоваться меньшими энергозатратами, в силу электрического, а не магнитного механизма записи информации.

А. Пятаков

1. [ПерсТ 17, вып. 13/14, с. 4 \(2010\).](#)
2. *S.Seki et al., Science* **336**, 198 (2012).
3. *A.S.Logginov et al., Appl. Phys. Lett.* **93**, 182510 (2008).



Слева: В кремниевой спинтронике специфические свойства ферромагнетиков и полупроводников дополняют друг друга.

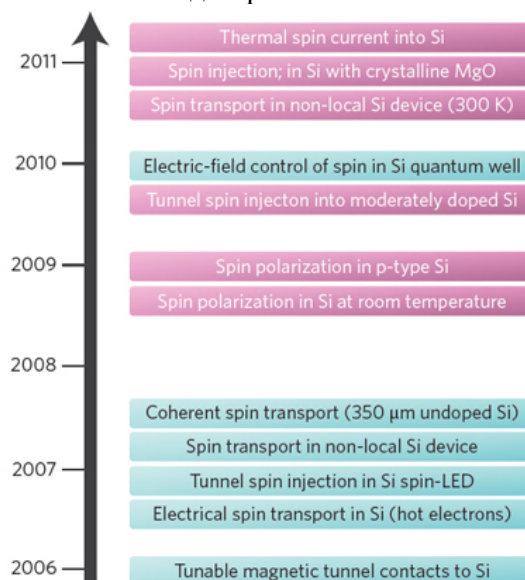
К приоритетным технологическим задачам относится совершенствование конструкции и качества контактов кремния с ферромагнетиками. Дел в кремниевой спинтронике еще непочатый край, но уж больно заманчива конечная цель: новая информационная технология, в которой цифровые данные кодируются электронными спинами, а не зарядами, и поэтому потребление мощности столь ничтожно, что “спиновый процессор” сможет работать без кулера.

1. *R.Jansen, Nature Mater.* **11**, 400 (2012).

## СПИНТРОНИКА

### Кремниевая спинтроника

Недавно был опубликован обзор [1], посвященный современному состоянию и перспективам развития так называемой кремниевой спинтроники – раздела спинтроники, который связан с вопросами создания спиновых токов в кремнии, управления ими и их измерениями. Ожидается, что комбинация полупроводника (кремния) с ферромагнетиками позволит найти оптимальные ответы на эти вопросы. Многие задачи здесь уже решены, причем не только при криогенных температурах, но и при комнатной (см. рис.). Особо стоит отметить разработку методики контроля спинового тока электрическим полем, а также способов инжекции спинового тока с использованием “горячих” носителей и спинового эффекта Зеебека. Пока не вполне ясны все факторы, влияющие на время жизни спинов в кремнии, а поэтому нет и четкой стратегии увеличения этого времени. Здесь требуются как новые эксперименты, так и модификация теории. Большую роль в этом играет также численное моделирование.



Справа: Экспериментальные достижения последних лет. Синий цвет – низкие температуры (4-150 К); розовый цвет – комнатная температура.

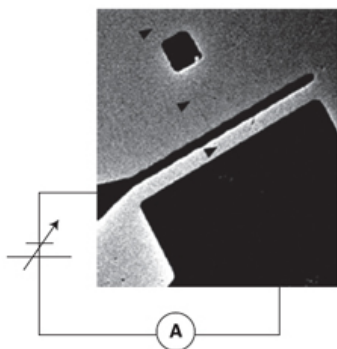
## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Удаленный нагрев материала с помощью УНТ

Одна из ключевых проблем, стоящих на пути дальнейшего повышения плотности записи и скорости обработки информации в современных электронных системах, связана с необходимостью отвода тепла из области плотного расположения элементов нанoeлектронных устройств. По мере увеличения объемной плотности микро- (нано-) чипов, а также увеличения базовой частоты процессора растет удельная интенсивность тепловыделения, что требует дополнительных усилий для обеспечения теп-

лоотвода. Один из подходов к решению этой проблемы продемонстрирован в работе, выполненной в Univ. of Maryland (США). Авторы [1] обнаружили, что значительная часть тепловой энергии (около 84%), выделяемой при прохождении электрического тока через углеродную нанотрубку (УНТ), бесконтактным образом передается диэлектрической подложке. Тем самым оказывается возможным использовать УНТ в качестве элемента наноэлектронной схемы при повышенной интенсивности теплоотвода. Используемая в работе индивидуальная УНТ была извлечена из суспензии материала, синтезированного стандартным электродуговым методом, в изопропиловом спирте и нанесена на мембрану SiN толщиной 50 нм. Конфигурация прибора представлена на рис. 1, где стрелками обозначено положение нанотрубки. Контакты изготовлены из тонкой палладиевой пленки толщиной 27 нм методом электронно-лучевой литографии. Для оценки температуры области, прилегающей к нанотрубке, на тыльную поверхность подложки методом термического испарения были нанесены островки индия, имеющего весьма низкую температуру плавления (156.4 °С), размером около 200 нм.

Рис. 1. Конфигурация устройства для определения теплового баланса нанотрубки при прохождении электрического тока (изображение получено с помощью туннельного электронного микроскопа). Стрелки указывают на расположение нанотрубки. Поперечный размер изображенного участка составляет около 2 мкм.



Для установления распределения температуры по поверхности подложки использовали новый подход, называемый “электронная термомикроскопия” (ЭТМ). В рамках этого подхода с помощью просвечивающего электронного микроскопа определяли распределение расплавленных островков индия по поверхности подложки, что позволило судить о распределении температуры. Подобные распределения, полученные при различных величинах приложенного к УНТ напряжения, сравнивали с результатами расчетов, основанных на решении уравнения теплопроводности в различных модельных условиях. Характер указанного распределения противоречит той картине, которая следует из предположения, что джоулево тепло при прохождении тока через УНТ выделяется в самой нанотрубке. Значительная часть этого тепла (до 84%) выделяется в подложке и идет на нагрев и плавление металла, и только 16% выделяется внутри нанотрубки. При этом основное выделение тепла наблюдается не вблизи электрических контактов, как это имело бы место в случае баллистического механизма переноса заряда, а в некото-

рой области, удаленной от нанотрубки на расстояние в несколько десятых долей микрона. Тем самым результаты описанного эксперимента указывают, что джоулево тепло, выделяемое при прохождении тока через нанотрубку, диссипируется в области, размер которой значительно превышает размер самой нанотрубки. Этот эффект может быть использован в наноэлектронных устройствах, элементом которых являются УНТ.

*А.Елецкий*

*1. K.H.Baloch et al., Nature Nanotechn. 7,316 (2012).*

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

### Квантовые симулянты

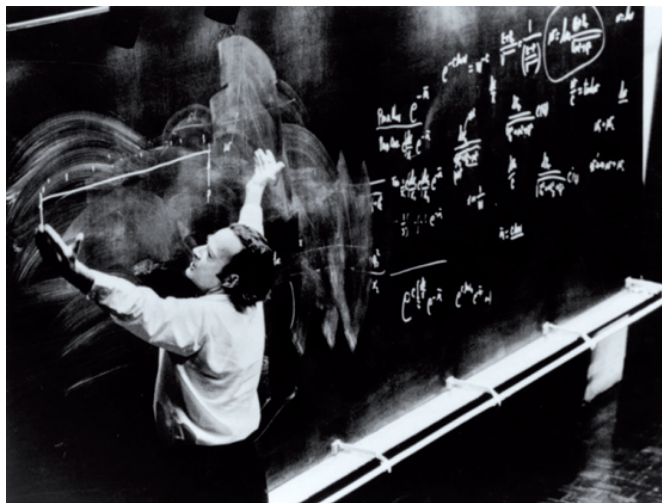
Главная проблема, с которой мы сталкиваемся при моделировании той или иной квантовой системы на классическом компьютере, заключается в экспоненциальном росте числа базисных состояний такой системы при увеличении количества частиц в ней. Например, чтобы описать систему из  $N$  частиц со спином  $1/2$ , мы должны хранить в памяти нашего компьютера  $2^N$  комплексных коэффициентов, что практически невозможно уже при  $N \sim 50$ . А ведь для предсказания значений измеряемых физических величин все эти числа нужно еще и складывать, перемножать или осуществлять с ними какие-то другие математические операции. В итоге время расчетов тоже становится экспоненциальным по  $N$ , то есть, помимо конечного объема памяти современных ЭВМ, мы упираемся еще и в их ограниченное быстродействие (так называемая “экспоненциальная стенка”).

Выход из ситуации многим видится в замене классических компьютеров квантовыми, использующими в своей работе суперпозицию и запутанность квантовых состояний. К сожалению, быстрое развитие теоретических основ квантовой информатики (quantum software) не сопровождается соответствующим прогрессом ее “приборной базы” (quantum hardware): полный контроль квантового состояния многокубитной (читай – многочастичной) системы, включая коррекцию квантовых ошибок, остается пока голубой мечтой. Что делать? Сидеть, сложа руки и ждать, когда будет изготовлен универсальный квантовый процессор? Или, основываясь на имеющихся экспериментальных данных, попытаться смастерить устройства, которые, пусть и уступая по своим возможностям настоящему квантовому компьютеру, будут, тем не менее, способны решать задачи, недоступные обычным ЭВМ?

Такие устройства были впервые упомянуты Р.Фейнманом 30 лет назад и названы им квантовыми моделирующими устройствами (quantum simulators) [1]. Суть идеи Фейнмана заключалась в том, чтобы имитировать моделируемую квантовую систему другой системой, тоже квантовой, но такой, параметры которой (например, межчастичное взаимодействие) мы можем изменять по своему усмот-



рению. Тогда “расчет” требуемой физической величины в моделируемой системе сведется к ее изменению в системе моделирующей. На словах все очень красиво, но как это реализовать на практике? К системам, претендующим на роль “квантовых симулянтов”, предъявляются следующие требования: 1) наличие достаточно большого числа степеней свободы; 2) возможность инициализации в заданном начальном состоянии; 3) возможность регуляции гамильтониана (то есть взаимодействий частиц между собой и с внешними полями); 4) возможность измерения характеристик как совокупной системы, так и отдельных групп составляющих ее частиц; 5) возможность проверки правильности результатов или хотя бы повышения степени их достоверности (например, путем проведения расчетов для задачи с известным решением). Поиск физических систем, удовлетворяющих перечисленным критериям, и составляет одну из краткосрочных целей на данном этапе развития науки о квантовых вычислениях.



Фейнмановская лекция (1970 год)

По материалам заметки  
*J.I.Cirac, P.Zoller, “Goals and opportunities in quantum simulation”, Nature Phys. 8, 264 (2012).*  
 1. *R.P.Feynman, J.Theor.Phys. 21, 467 (1982).*

## КОНФЕРЕНЦИИ

### Семинар по физике конденсированного состояния 16 мая 2012 г.

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

Владимир Петрович Кочерешко (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН) “Магнитооптика движущихся экситонов”

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)

### XV Международный, междисциплинарный симпозиум “Порядок, беспорядок и свойства оксидов” (ODPO-15), 7-12 сентября 2012 г., п. Лоо, Краснодарский край, Россия

Контрольные даты:

1 июня 2011 г. – последний день поступления тезисов и регистрационной формы

E-mail: [org.oma.odpo@gmail.com](mailto:org.oma.odpo@gmail.com)

Web: <http://odpo-conference.ru/questions>

### XV Международный, междисциплинарный симпозиум “Упорядочение в минералах и сплавах” (OMA-15), 13-18 сентября 2012 г., п. Лоо, Краснодарский край, Россия

Контрольные даты:

1 июня 2011 г. – последний день поступления тезисов и регистрационной формы

E-mail: [org.oma.odpo@gmail.com](mailto:org.oma.odpo@gmail.com)

Web: <http://oma-conference.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>