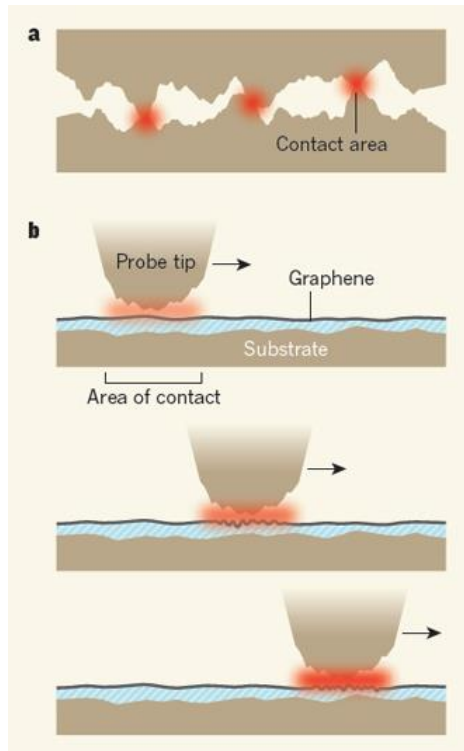


В этом выпуске:

## ГРАФЕН

### Графен и трение

Графитовый порошок широко используется в качестве твердой смазки или для добавления в жидкие смазочные материалы. Недавние эксперименты показали, что трение иглы атомного силового микроскопа о графитовый образец увеличивается по мере уменьшения числа графеновых слоев в этом образце, достигая максимума в пределе одного-единственного слоя. Выполненное в работе [1] (Китай, США, Германия) компьютерное моделирование позволило установить причину этого эффекта. Оказалось, что все дело – в гибкости монослоя графена. Изгибаясь при движении по нему зонда или иглы, он тем самым создает движущемуся объекту дополнительные препятствия. Вообще, на микроскопическом масштабе любая реальная поверхность является шероховатой (рис. 1а).



Именно такие шероховатости, задевая друг о друга, приводят к возникновению направленной против движения силы трения и к соответствующей диссипации энергии. В графене же к этому классическому механизму добавляется еще и взаимодействие с изгибными искажениями монослоя (рис. 1b). Пока не вполне понятно, какую роль здесь играет подложка.

Рис. 1. Трение о графен: а - контакт двух поверхностей осуществляется посредством взаимодействия между микроскопическими выступами; б - нанометровый зонд, скользя по графену, изгибает его.

Л.Опенев

1. S.Li et al., *Nature* 539, 541 (2016).

### Ловушки для дираковских фермионов

Релятивистские частицы могут проходить через потенциальные барьеры без отражения (туннелирование Клейна). Возникает вопрос: возможен ли квантовый конфайнмент дираковских фермионов в графене? И каковы будут при этом связанные состояния? В работах [1,2] методом сканирующей туннельной микроскопии получены изображения волновых функций безмассовых дираковских фермионов в графеновых квантовых точках с электростатическим

И далее ...

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Заслон квантовым ошибкам  
Нематическая квантово-холловская жидкость на поверхности висмута

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 3 Рост критической температуры при поверхностном электронном допировании  
 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1.94}\text{Co}_{0.06})_2\text{As}_2$

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Нанотехнологии создают “умный” текстиль

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 5 Разделение газовых смесей пористым фосфореном

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

- 6 Линейный датчик на нелинейном эффекте

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Фуллерен  $\text{C}_{720}$  как накопитель молекулярного водорода

## СНОВА К ОСНОВАМ

- 8 Химическое эхо

## ТОРЖЕСТВО

- 9 Виктору Анатольевичу Матвееву – 75!

ограничением. Потенциальные барьеры в этих точках имеют круглую форму (рис. 1), поэтому электронные состояния характеризуются определенным угловым моментом  $l$ .

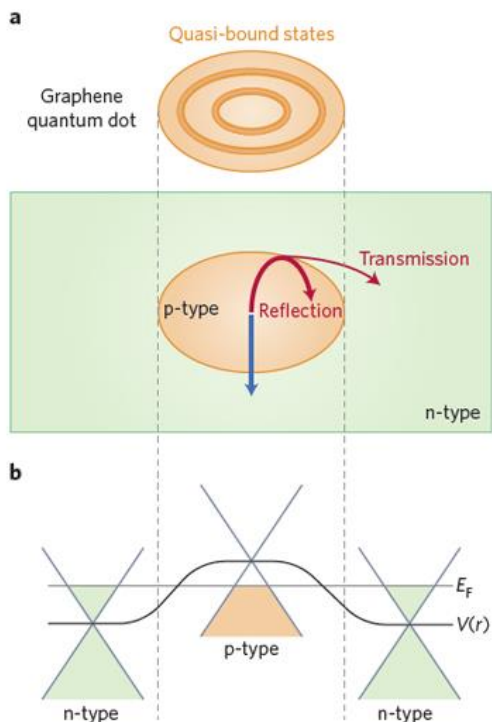


Рис. 1. Электростатические квантовые точки в графене.

а - Схематическое изображение квазисвязанных состояний в квантовых точках. Синяя стрелка иллюстрирует проникновение дырок, падающих на барьер под прямым углом. Красные стрелки показывают рассеяние дырок с большим угловым моментом.

б - Потенциальный барьер для выхода дырок из квантовой точки описывается непрерывной линией, соединяющей дираковские точки.  $E_F$  – уровень Ферми.  $V(r)$  – потенциальная энергия для дираковских фермионов.

Электроны с большими  $l$  попадают на границу барьера под большими углами и отражаются, оставаясь в квантовых точках и формируя в них квазисвязанные состояния. Изображения волновых функций этих состояний и были получены в работах [1,2] посредством СТМ.

По материалам заметки “Graphene traps”,  
H.Yang, *Nature Phys.* **12**, 994 (2016).

1. J.Lee et al., *Nature Phys.* **12**, 1032 (2016).
2. C.Gutierrez et al., *Nature Phys.* **12**, 1069 (2016).

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Заслон квантовым ошибкам

В самых продвинутых квантовых вычислительных устройствах на десять тысяч операций с кубитами приходится менее одного сбоя. Для устранения возникающих по ходу работы ошибок разработаны специальные корректирующие коды, требующие наличия большого числа дополнительных кубитов. В полномасштабном квантовом компьютере коли-

чество операций будет исчисляться миллионами, и тогда уже никаких вспомогательных кубитов для коррекции ошибок не хватит. А ведь одна единственная ошибка, передаваясь от кубита к кубиту, приводит в итоге к неправильному ответу. В работе [1] предложено разбивать кубиты на небольшие группы так, чтобы взаимодействовали между собой только кубиты в пределах одной группы.

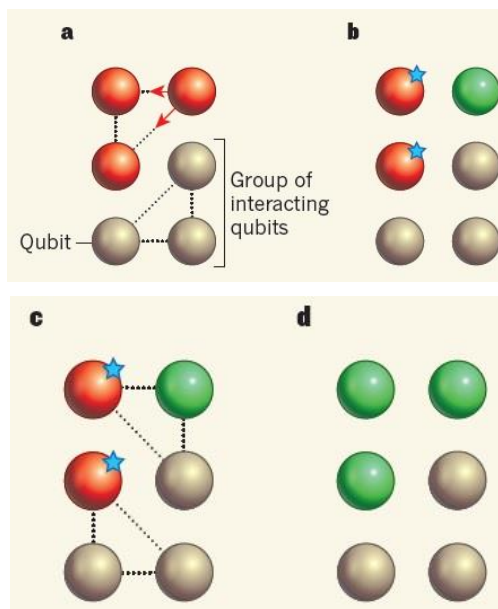


Рис. Борьба с квантовыми сбоями.

а - Ошибка в одном кубите (красный цвет) может распространиться только на те кубиты, с которыми “большой” кубит взаимодействует (стрелки).

б - Если заподозрен сбой, то все кубиты данной группы немедленно проверяются на предмет “инфекции”, источник ошибки определяется, ошибка устраняется (зеленый цвет), а все кубиты данной группы помечаются для последующей коррекции (звездочки).

с - Затем взаимодействуют кубиты разных групп.

д - В заключение все кубиты еще раз проверяются, а ранее помеченные корректируются.

Тогда ошибки остаются локализованными в своих группах, и их можно быстро исправить (см. рис.). Дополнительных кубитов для этого требуется меньше, чем в известных методиках.

Л.Опенев

1. T.J.Yoder et al., *Phys. Rev. X* **6**, 031039 (2016).

### Нематическая квантово-холловская жидкость на поверхности висмута

Нематические электронные состояния характеризуются более низкой, чем у кристаллической решетки, симметрией относительно поворота. Они могут спонтанно возникать в системах с сильными электронными корреляциями. Экспериментальные исследования таких состояний осложняются их чувствительностью к структурным несовершенствам. В работе [1] методом сканирующей туннельной микроскопии изучены локальные немати-

*ПерсТ*, 2016, том 23, выпуск 23/24

ческие домены в двумерном электронном газе на (111) поверхности очень чистых монокристаллов висмута (длина свободного пробега носителей  $\sim 1$  нм). Обнаружено, что в сильном магнитном поле (режим квантового эффекта Холла) комбинация одночастичных эффектов (например, деформации) и многочастичных взаимодействий приводит к снятию шестикратного вырождения дырочного уровня Ландау и появлению состояний с нарушенной симметрией (волновые функции этих состояний имеют форму эллипсов различной ориентации). Ожидается, что на границе между нематическими доменами низкоэнергетические краевые моды аналогичны топологически защищенным состояниям.

1. *B.E.Feldman et al., Science 354, 316 (2016).*

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Рост критической температуры при поверхностном электронном допировании $\text{Ba}(\text{Fe}_{1.94}\text{Co}_{0.06})_2\text{As}_2$

Независимо от типа носителей заряда (электроны или дырки), для каждого семейства сверхпроводящих пниктидов железа существует оптимальный уровень допирования, при котором критическая температура  $T_c$  данного семейства максимальна. Такое допирование отвечает нестингу поверхности Ферми между дырочными карманами в центре зоны Бриллюэна и электронными карманами в ее углах. По этой причине нестинг принято считать важным (а то и обязательным) условием возникновения сверхпроводимости. В халькогенидах  $\text{AFe}_2\text{Se}_2$  (А – щелочной металл) с  $T_c \approx 37$  К топология поверхности Ферми совершенно иная: дырочных карманов в центре нет, только электронные без нестинга. А между тем электронное допирование монослоя FeSe приводит к росту  $T_c$  до 65 К и выше.

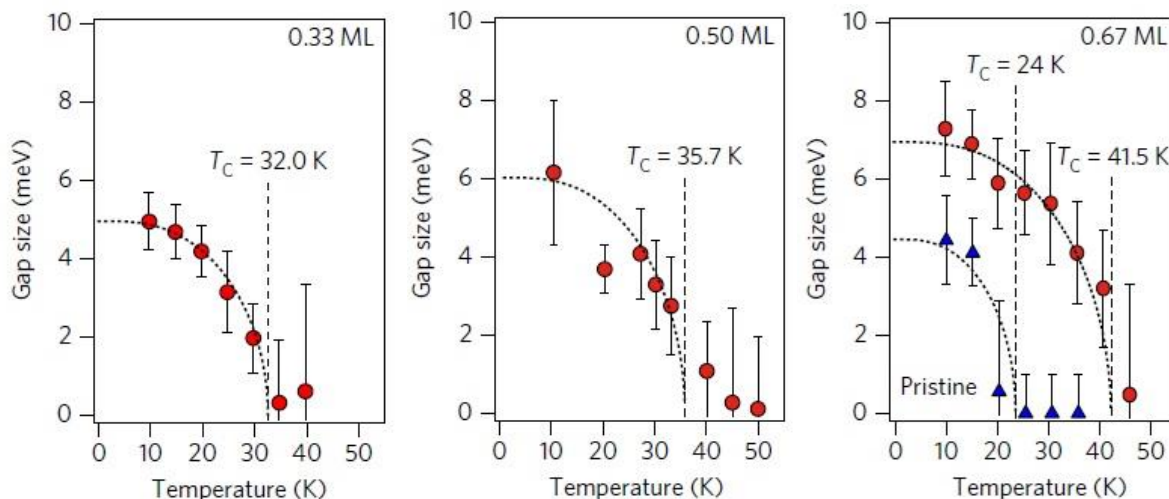


Рис. 1. Увеличение сверхпроводящей щели и критической температуры с ростом количества осажденных монослоев калия.

Чтобы лучше разобраться в сложных взаимоотношениях между допированием, формой поверхности Ферми и  $T_c$  безмедных ВТСП авторы работы [1] (Корея, Япония, США) изучили влияние электронного допирования на сверхпроводящие свойства и электронное строение оптимально допированного пниктида  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  с  $x = 0.06$ . С целью избежать нежелательного влияния примесей на локальную атомную структуру и другие существенные для сверхпроводимости параметры, допирование осуществляли путем осаждения на поверхность образца различного количества монослоев (ML) атомов калия. Выяснилось, что при увеличении числа монослоев до 0.67 сверхпроводящая щель возрастает от 4.5 до 6.8 мэВ, а  $T_c$  – от 24 до 41.5 К (рис. 1), существенно превышая  $T_c$  объемных образцов (рис. 2).

Исследование поверхности Ферми посредством фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) показало, что дырочный карман при допировании сжимается, а электронный, напротив, расширяется, и нестинг становится не так выражен. Сочетание высокой  $T_c$  с неполным нестингом указывает, по мнению авторов, на второстепенную роль нестинга в сверхпроводимости пниктидов железа, равно как и халькогенидов. Подавление сверхпроводимости примесями в передопированной области говорит о том, что сверхпроводящий параметр порядка имеет, скорее всего,  $s_{+-}$ -волновую, а не  $s_{++}$ -волновую симметрию.

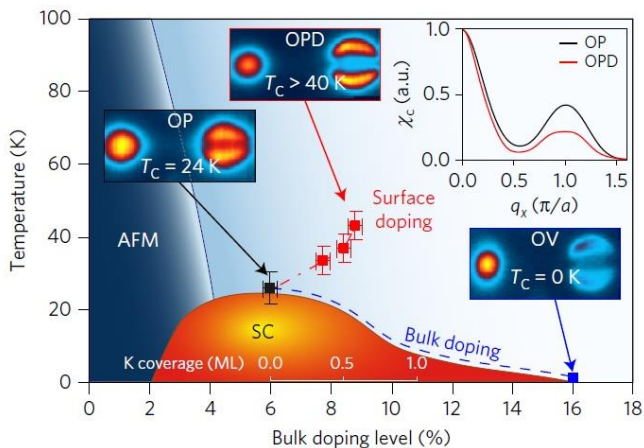


Рис. 2. Фазовая диаграмма и результаты поверхностного электронного допирования (красные квадраты) объемного пниктида  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ . На трех вставках изображены поверхности Ферми для исходного образца (OP), образца с поверхностным электронным допированием (OPD) и передопопированного образца (OV).

На вставке в правом верхнем углу показаны зарядовые восприимчивости, рассчитанные по интенсивности ARPES на уровне Ферми. Синяя и красная штриховые линии иллюстрируют различное поведение  $T_c$  при объемном и поверхностном допировании, соответственно.

Л.Опенев

1. W.S.Kyung et al., *Nature Mater.* 15, 1233 (2016).

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

### Нанотехнологии создают “умный” текстиль

За два последних десятилетия понятие “одежда” кардинально изменилось. Во все времена одежда предназначалась для защиты (от холода, солнца и т. п.) и для украшения, но теперь, благодаря развитию нанотехнологий, она приобрела новые важные функции. В первую очередь это относится к текстилю. В волокна легко вводить наноматериалы на стадии производства или модифицировать их при последующей обработке, не снижая при этом комфортность одежды. Исследователи из США, Канады, Саудовской Аравии, Великобритании и Республики Корея представили обзор применения нанотехнологий для создания “умного” функционального текстиля [1]. На рис. 1 показаны основные направления исследований и разработок.

**Водоотталкивающие свойства** текстилю придают, воспроизводя (в какой-то степени) неровную поверхность листа лотоса (известный эффект лотоса – супергидрофобность и способность к самоочистке – обусловлен специфической микроструктурой поверхности, см., например, ПерсТ [2]). Для создания неровностей на хлопковых и полимерных волокнах используют наночастицы  $\text{SiO}_2$  в комбинации с водоотталкивающими агентами, углеродные нанотрубки (УНТ), хитозан. **Антистатические свойства** обеспечивает добавление в синтетические

волокна наночастицы Ag, Au,  $\text{TiO}_2$ , ZnO и др. В мембранных тканях GORE-TEX антистатический эффект достигается путем внедрения электропроводящих наночастиц в волокна мембраны. **Устойчивость к сминанию** хлопка повышают добавлением наночастиц  $\text{TiO}_2$  с карбоновой кислотой в качестве катализатора. Эти добавки обеспечивают образование межмолекулярных связей между молекулами целлюлозы (основой хлопка) и кислотными группами (сминаемость объясняется слабыми связями между макромолекулами в целлюлозных волокнах). **Прочность** повышают чаще всего путем создания композитных волокон полимер/углеродные нанотрубки при формировании волокна из расплава, а также нанесением нанотрубок на поверхность волокна методом окунания. **Защита от ультрафиолетового излучения** достигается с помощью наноразмерных  $\text{TiO}_2$  или ZnO (например, тонкий слой наночастиц  $\text{TiO}_2$  наносили золь-гель методом на хлопковые волокна, а наностержни ZnO размером 20-50 нм выращивали на поверхности). Предложены различные способы ввода наночастиц Ag внутрь и на поверхность волокон для придания **антибактериальных свойств** (так, в продаже широко представлены разнообразные носки “с наночастицами серебра”). Наночастицы  $\text{TiO}_2$  благодаря фотокаталитическим свойствам также используют в текстиле для удаления микробов, вирусов, молекул веществ с неприятным запахом. Для создания одежды, защищающей от действия отравляющих веществ (ОВ) нервно-паралитического действия, был разработан композит полимер-УНТ с добавлением катализатора, разрушающего ОВ *in situ* [3].

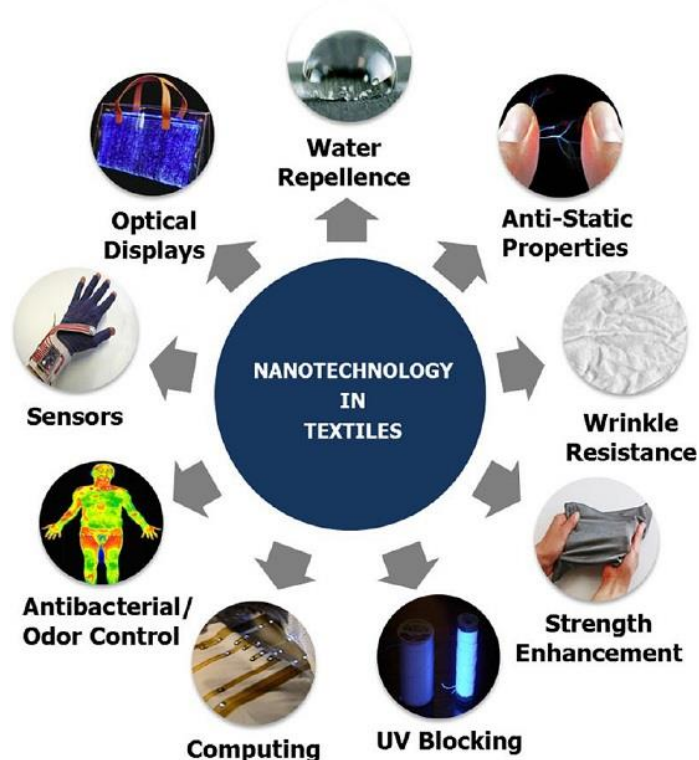


Рис. 1. Схема применения нанотехнологий в текстильной промышленности.

Важное направление исследований – создание “электронного текстиля”, например, с встроенными **сенсорами**. Для этого разработаны электропроводящие покрытия волокон из полимеров (например, полианилина) или композитные покрытия, включающие углеродные нанотрубки. Электропроводящий текстиль был также получен путем иммобилизации графена (при восстановлении оксида графена) на хлопковой ткани. Электропроводность выросла на 3 порядка величины. Для “умной” одежды разработаны гибкие суперконденсаторы на базе УНТ и графена; некоторые фирмы уже выпускают очень тонкие гибкие Li-ионные аккумуляторы с волокнистой структурой. Композиты из полимерных волокон и металлических нанопроволок уже используют для защиты от электромагнитных полей. ПерсТ рассказывал об интересном варианте ткани, покрытой сеткой из Ag нанопроволок [4]. Одежда из такой ткани может обеспечить персональное терморегулирование, отражая назад ИК излучение человека. Можно обеспечить дополнительный обогрев, если подсоединить источник электропитания: 0.9 В достаточно, чтобы повысить температуру до 38 °С.

**Фотонные материалы** и устройства, включая пленки, нанодобавки, оптические волокна не только обеспечивают необычные световые или цветовые эффекты тканей, одежды, но и добавляют новые функции. “Фотонный текстиль” можно использовать для освещения, в оптических дисплеях, для передачи данных, для детектирования изменения температуры, влажности, давления и др.



Рис. 2. Мировой рынок “умного” текстиля (%). CAGR – среднегодовой рост с учетом сложного процента (%).

В обзоре также представлена технология и продукция компаний, создающих “умный” текстиль. Активность очень высока. В развитых странах мира производство такого текстиля быстро растет. По данным за 2014 г. 41% рынка (с годовым ростом до 2020 г. 31%) приходилось на долю Америки (рис. 2). По мнению авторов [1] в ближайшее время движущей силой развития производства “умного” текстиля будут сенсорные технологии с доступом к интернету. Они позволяют передавать информацию о местоположении человека и о состоянии его здоровья (например, сердечный ритм).

*ПерсТ, 2016, том 23, выпуск 23/24*

В России, конечно, также проводят исследования в этой области. В ОАО “ЦКБ РМ” разработана технология изготовления тканей, экранирующих от воздействия электромагнитных полей различной частоты и интенсивности [5]. Основа материала – наноструктурный ферромагнитный микропровод (НФМП) в стеклянной изоляции. Он дублируется со стеклянной нитью, и полученная комплексная электропроводящая нить может быть переработана на ткацком оборудовании. ЦКБ РМ производит радиомаскировочные комплекты для Минобороны России. По заказу МВД России в ЦКБ разработали специальный материал для костюма оператора блокиатора радиоуправляемых взрывных устройств. Наличие в нём НФМП обеспечивает снижение уровня электромагнитного излучения до 100 раз.

А теперь немного о грустном. В 1990-ые годы в России начался кризис текстильной промышленности. Отрасль восстанавливается очень медленно. По данным СМИ в 2015 г. объем выпуска всех видов тканей не достиг и половины уровня 1990 г. [6]. При этом ткани изготавливают в основном из импортного сырья и на импортном оборудовании. Текстильные машины в РФ сегодня не выпускают. До недавнего времени Россия импортировала ~ 80% высокотехнологичной синтетической ткани. Единственный крупный проект, реализованный за последние годы в этой отрасли, – запуск в 2015 г. в Ростовской области группой компаний “БТК Холдинг” предприятия по производству текстиля из синтетических волокон (полиэфира и полиамида разных видов, в том числе нейлона высокого качества) [6]. Паспортная мощность – 12 млн погонных метров в год. Компания вложила в инфраструктуру и оборудование более 6 млрд руб. Хочется надеяться, что в России, имеющей высокий научный потенциал, развитую химическую промышленность, природные ресурсы, начнет развиваться собственное производство “умного” текстиля.

*О. Алексеева*

1. *A.K.Yetisen et al., ACS Nano 10, 3042 (2016).*
2. *ПерсТ 18, вып. 15/16, с. 5 (2011).*
3. *ПерсТ 21, вып. 13/14, с. 7 (2014).*
4. *ПерсТ 22, вып. 13/14, с. 3 (2015).*
5. *Е.Н.Хандогина и др., Оборонно-пром. потенциал №1, с.44 (2015).*
6. *А. Хазеева, “Коммерсантъ FM” от 05.04.2016.*

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Разделение газовых смесей пористым фосфореном

Эффективное использование такого возобновляемого и нетоксичного источника энергии как водород ставит перед исследователями задачу выделения чистого H<sub>2</sub> из газовой смеси, поскольку при его промышленном производстве получаемый “продукт” содержит не только непосредственно водо-

род, но и ряд ненужных примесей (например,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), от которых необходимо избавляться. Очень часто в качестве такого фильтра или разделительной мембраны предлагается использовать графен, в том числе колонный (pillared graphene). Однако авторы работы [1] предлагают двумерную альтернативу – пористый фосфорен (см. рис. 1).

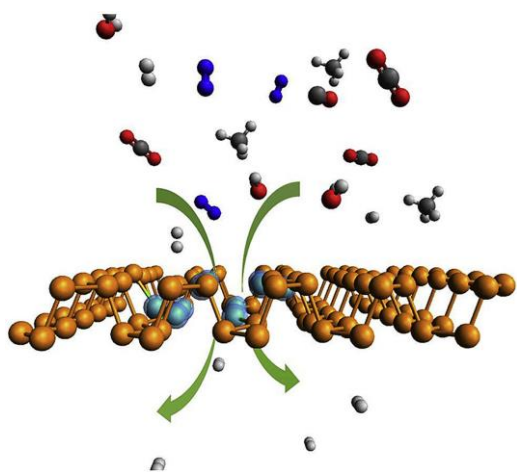


Рис. 1. Иллюстрация выделения водорода из газовой смеси с помощью мембраны из пористого фосфорена.

Фосфорен представляет собой монослой черного фосфора – слоистого материала, напоминающего графит. По аналогии с графеном, фосфорен состоит из шестиугольников, образованных атомами фосфора, но при этом не является абсолютно плоским (рис. 2).

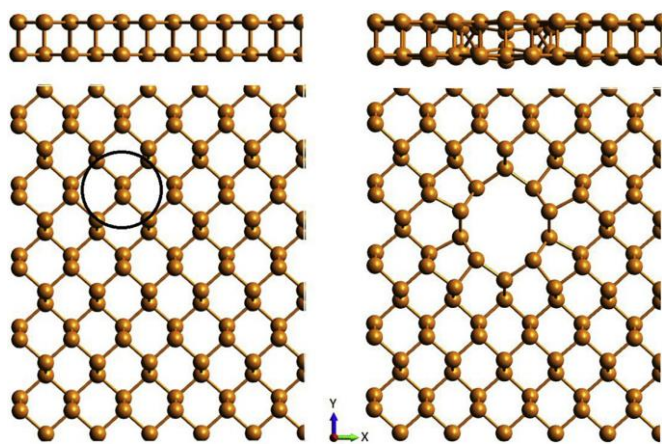


Рис. 2. Оптимизированные структуры идеального фосфорена (слева) и пористого фосфорена (справа).

Пористый же фосфорен получается посредством удаления шести атомов фосфора с последующим образованием ковалентных связей между краевыми атомами дефекта (см. рис. 2). По мнению авторов, именно эти “отверстия” и должны стать проводниками водорода сквозь мембрану. С помощью компьютерного моделирования, включающего молекулярно-динамические вычисления, исследователи оценили устойчивость пористого фосфорена и рассмотрели целесообразность его применения в качестве фильтра для выделения водорода из газовой

смеси. Расчеты авторы проводили в программе Quantum ESPRESSO в рамках теории функционала плотности с учетом дисперсионных поправок Гримме (ван-дер-ваальсового взаимодействия). Результаты свидетельствуют о том, что поры фосфорена химически инертны по отношению к газовым смесям, содержащим молекулы  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ , а сам пористый фосфорен демонстрирует более высокую селективность к водороду по отношению к другим молекулам, чем мембраны на основе графена или силицена. Селективность определялась авторами как отношение скоростей диффузии молекул водорода и молекул соответствующего газа  $r_{\text{H}_2}/r_{\text{Gas}}$ , которые в свою очередь оценивались согласно уравнению Аррениуса. Так, например, при комнатной температуре, используя пористый фосфорен, становится возможным добиться селективности к водороду  $10^{13}$ ,  $10^{12}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{13}$  и  $10^{21}$  по отношению к  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ , соответственно. В результате авторы придерживаются мнения, что полученные результаты открывают огромный потенциал пористого фосфорена в качестве мембраны для выделения водорода из газовых смесей. При этом исследователи дополнительно отмечают, что поры в фосфорене могут быть легко получены экспериментально без какой-либо дополнительной химической функционализации. Это предоставляет этому уникальному материалу дополнительное конкурентное преимущество по сравнению с графеновыми мембранами.

*М. Маслов*

*1. Y.Zhang et al., Int. J. Hydrogen Energy 41, 23067 (2016).*

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

### *Линейный датчик на нелинейном эффекте*

При поиске новых магнитоэлектрических материалов исследователи обычно охотятся за линейным эффектом, полагая, что именно его следует использовать в сенсорах постоянного магнитного поля. Однако ученые из Московского технологического университета МИРЭА пошли иным путем: воспользовались преимуществами, которые дает нелинейный эффект, для того чтобы создать чувствительный датчик магнитного поля [1,2].

Каждый, изучавший курс радиофизики знает, что использование нелинейных элементов приводит к образованию кратных гармоник в спектре сигнала. Это означает потери энергии сигнала на основной частоте, зато может дать преимущества при измерении постоянных и низкочастотных полей, так как сдвигает рабочий диапазон в область высоких частот, где мощность шумов  $1/f$  уже на порядок меньше. Кроме того, работа на более высоких частотах позволяет существенно уменьшить утечки в материале сенсора.

Исследователи из МИРЭА предложили новую разновидность датчика постоянных магнитных полей (рис.1), в котором источником нелинейности является полевая зависимость магнитострикции ферромагнитного материала-зонда, в отличие от известных феррозондовых датчиков, где используется нелинейная зависимость намагниченности от постоянного поля. Наличие постоянного поля смещения, действующего на нелинейный элемент с симметричной характеристикой, смещает рабочую точку. Это приводит к возникновению в спектре сигнала нечетных гармоник. Амплитуда первой гармоники линейно растет с амплитудой переменного поля, а амплитуда третьей - пропорциональна кубу амплитуды переменного поля, но обе линейно зависят от поля смещения. Таким образом, для измерения постоянного поля можно измерять амплитуду гармоник: линейность сохраняется в диапазоне до 1 Э, что вполне достаточно, учитывая назначение прибора – мерить малые магнитные поля.

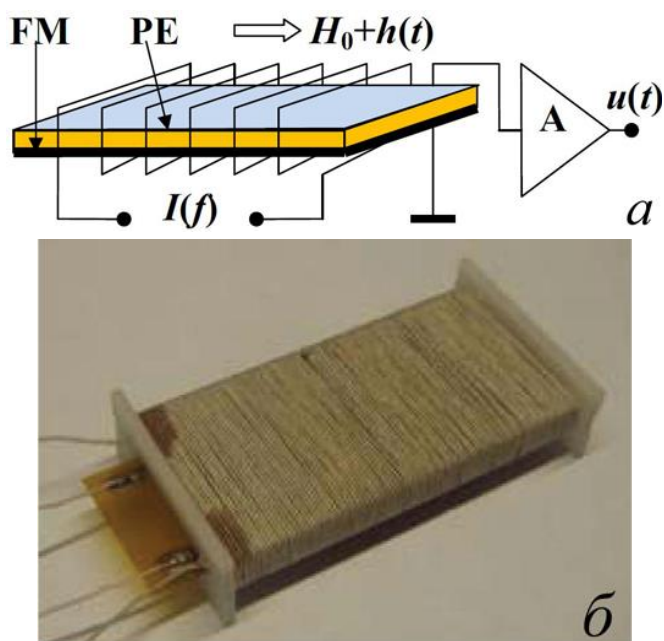


Рис. 1. Схематическое изображение магнитоэлектрического датчика постоянных полей [1]: а - катушка переменного тока ( $f \sim 1$ кГц) намотана на композиционную магнитоэлектрическую структуру (FM – ферромагнитный слой магнитостриктора FeBSiC, PE – пьезоэлектрический слой  $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ , А – узкополосный усилитель, настроенный на третью гармонику,  $h(t)$  – порождаемое катушкой переменное магнитное поле с амплитудой  $\sim 10$  Э,  $H_0$  – измеряемое постоянное поле смещения); б - фото прибора [2]

Другим отличием от традиционного феррозондового магнитометра является то, что считывание сигнала производится не индукционным методом, а с помощью пьезоэлектрической пластины, склеенной с магнитострикционным слоем (рис.1). Иными словами, исследователи создают композиционный магнитоэлектрический материал. Это дает возможность использовать акустический резонанс пластин, что позволяет на три порядка улучшить чувстви-

тельность. Авторами продемонстрирована чувствительность 1 В/Э (для сравнения, стандартный датчик Холла ДХК-0.5А, продающийся в магазинах радиодеталей, имеет чувствительность  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  В/Э). При соответствующей оптимизации параметров слоистой структуры данный датчик позволит измерять поля величиной в единицы микроэрстед.

А. Пятаков

1. D.A.Burdin et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **405**, 244 (2016).
2. D.A.Burdin et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 37502 (2016).

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Фуллерен $C_{720}$ как накопитель молекулярного водорода

Интерес к водородной энергетике не угасает. Однако до сих пор одним из основных препятствий на пути к ее повсеместному распространению является отсутствие доступных эффективных материалов для хранения водорода. К слову, Министерство энергетики США (DOE) считает эффективным такой водородосорбционный материал, который способен поглощать этот легкий бесцветный газ в количестве 6.5 масс. % и выше. На роль водородных топливных элементов многие исследователи предлагают углеродные наноструктуры и композиты: фуллерены, нанотрубки, колонный графен.

Авторы работы [1] в продолжение углеродной тематики решили выяснить, сколько молекулярного водорода может уместиться внутри очень большого, просто гигантского фуллерена  $C_{720}$  и оценить стабильность такой системы. В своей работе они использовали основанный на фейнмановской трактовке квантовой механики метод Монте-Карло интегралов по траекториям, а непосредственно устойчивость характеризовалась изменением свободной энергии Гельмгольца как функции количества молекул  $\text{H}_2$ , заключенных внутри фуллереновой клетки. Взаимодействие между водородом и атомами углерода авторы описывали с помощью особым образом параметризованного потенциала Леннард-Джонса. В итоге исследователи продемонстрировали, что даже при комнатной температуре  $C_{720}$  способен запастись более 9 масс. % молекулярного водорода, что превышает рекомендации DOE для эффективных топливных ячеек. При понижении температуры до 200 К число запасаемых  $\text{H}_2$  еще немного увеличивается. При этом водород образует внутри фуллерена концентрические слои (см. рис.), находясь в фазе так называемой молекулярной жидкости. В настоящее время авторы заняты расчетом внутренних давлений, оказываемых молекулами гостя на углеродные стенки. Вполне возможно, что они могут не выдержать и сломаться. Тем не менее, авторы убеждены, что высшие гигантские фуллерены обладают неплохим потенциалом для

того, чтобы стать основой топливных элементов водородной энергетики будущего.

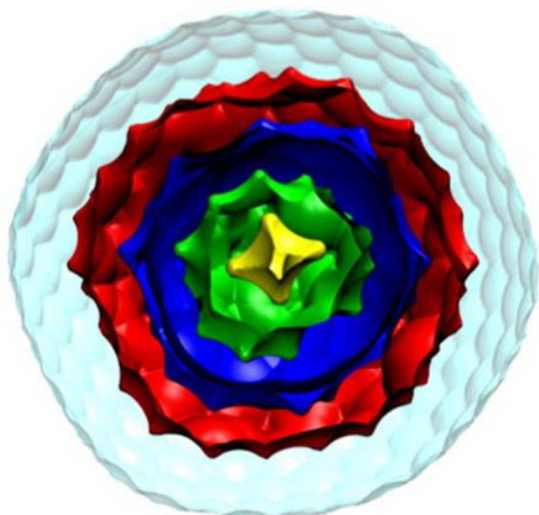


Иллюстрация концентрических слоев (в разрезе), которые образует молекулярный водород внутри фуллереновой клетки, находясь в фазе молекулярной жидкости

М. Маслов

1. B.Nguyen et al., *Phys. Lett. A* **381**, 298 (2017).

## СНОВА К ОСНОВАМ

### Химическое эхо

В физике слово “эхо” давно перестало означать лишь явление отражения звуковой волны. Например, в астрономии используют понятие “световое эхо” для отблесков сверхновой на облаках межзвездной пыли. *Спиновое эхо* – следующая степень абстракции, не предполагающая даже отражение волны: сигнал возникает после серии радиоимпульсов при повторной синхронизации (фазировке) прецессии спинов. Ученым из университетов Западной Вирджинии и Мэриленда удалось продемонстрировать похожее явление, но в химии [1].

В первый момент возникает недоумение: о какой фазировке может идти речь в однонаправленных химических процессах? Сама постановка вопроса дает ключ к решению – реакция должна быть колебательной! Поэтому вполне предсказуемо ученые обратились к реакции Белоусова-Жаботинского. Напомним, что реакцией Белоусова-Жаботинского называют класс химических процессов, при которых их параметры (концентрация компонентов, цвет, температура и т.п.) изменяются периодически.



Аллегория химического эха. “Снежинки” – комплексы рутения

В работе [1] использовали “оптическую” разновидность реакции, в которой колебания запускались с помощью импульсов света, а раствор периодически менял свою прозрачность. Химические осцилляторы представляли собой субмиллиметровые бусинки с катализатором, взаимодействие между которыми осуществлялась за счет оптической обратной связи, стремящейся синхронизовать их колебания. Полимерную пленку, “инкрустированную” тысячами бусинок, помещали в реактор с постоянно обновляющимся раствором (в качестве автокаталитического процесса исследовали превращение комплексов рутения  $Ru(bpy)_3^{2+} \leftrightarrow Ru(bpy)_3^{3+}$  под действием мягкого окислителя – бромноватистой кислоты).

Фазы колебаний осцилляторов, запускаемых оптическим возмущением, через несколько периодов расходились, как казалось, необратимо. Однако после повторного оптического импульса фазы химических осцилляторов снова синхронизировались спустя время, равное интервалу между импульсами. Это говорит о том, что информация о первоначальном возбуждении сохраняется в системе (по крайней мере, на масштабе десяти периодов колебаний), а быстрая дефазировка осцилляций обусловлена скорее дисперсией фазы, нежели диссипативными процессами.

А. Пятаков (худ. оформление З. Пятаковой)

1. T.Chen et al., *Phys. Rev. X* **6**, 041054 (2016).

*ПерсТ*, 2016, том 23, выпуск 23/24



## ТОРЖЕСТВО

### *Виктору Анатольевичу Матвееву – 75!*



11 декабря 2016 г. исполнилось 75 лет академику РАН Виктору Анатольевичу Матвееву, известному российскому физику, организатору науки и общественному деятелю, члену Президиума Российской академии наук, директору Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Виктор Анатольевич является ярким представителем школы Н. Н. Боголюбова, под руководством которого и раскрылся его талант исследователя.

Работая в Дубне, В.А. Матвеев внес важный вклад в развитие релятивистского подхода к описанию связанных систем частиц в квантовой теории поля, в создание квантово-полевых методов описания рассеяния частиц при высоких энергиях. В 1973 г. он с группой соавторов получил премию Ленинского комсомола за цикл работ “Приближенные методы квантовой теории поля в физике высоких энергий”.

В.А. Матвеева отличают высокое чувство ответственности, преданность науке, целеустремленность. Эти качества сочетаются в нем с интеллигентностью, добротой, теплым и внимательным отношением к людям.

В.А. Матвеева отличают высокое чувство ответственности, преданность науке, целеустремленность. Эти качества сочетаются в нем с интеллигентностью, добротой, теплым и внимательным отношением к людям.

***ПОЗДРАВЛЯЕМ*** Виктора Анатольевича с Юбилеем!  
*Желаем здоровья, благополучия, творческих успехов, новых свершений и открытий!*

*Авторы и редакция ПерсТа*

## ***ДОРОГИЕ НАШИ ЧИТАТЕЛИ!***

***Поздравляем Вас и ваших близких с наступающим Новым годом и Рождеством!***

***Сверкают снежинки, искрятся под светом Весёлых ночных фонарей, Деревья в пушистые шали одеты.***

***Походкой неслышной своей Легко и беспечно к нам праздник шагает, Включая обратный отсчёт, Секунды последние в такт отбивая,***

***Стучится к нам в дверь Новый год. Пускай принесёт этот гость вам в подарок Здоровье, любовь и успех, Пусть счастья наветет волшебные чары, Добра и удачи для всех!***



*Редакция и авторы ПерсТа*

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой  
ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, М. Маслов, Л. Опенов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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