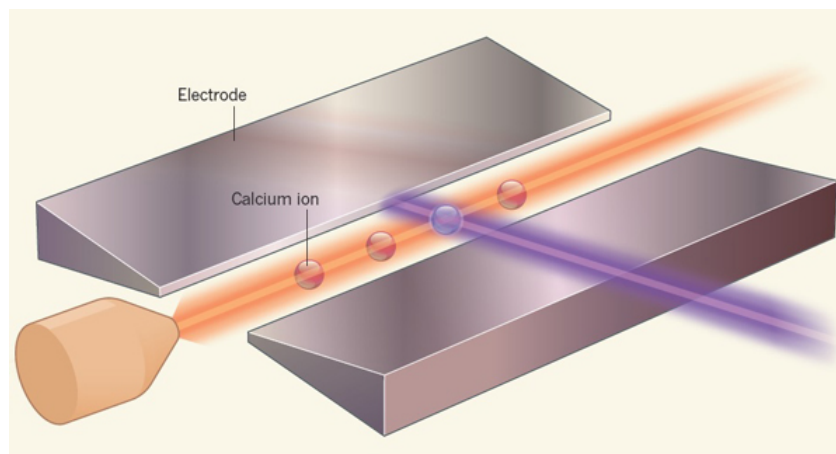


В этом выпуске:

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Квантовое моделирование в фундаментальной физике

Даже самым мощным многопроцессорным вычислительным устройствам не под силу решить многие задачи современной теоретической физики. Около 30 лет назад Ричард Фейнман предложил для моделирования сложных квантовых систем использовать другие квантовые системы, более простые и поддающиеся контролю. В работе [1] идея Фейнмана реализована на примере решеточной модели Швингера (квантовая электродинамика в одномерном пространстве). Для своих целей авторы использовали маленький квантовый компьютер из четырех ионов кальция (см. рис.).



Ионы кальция в электромагнитной ловушке. Оранжевым и лиловым цветом изображены лазерные лучи, контролирующие состояние каждого иона и взаимодействие между ионами.

Два энергетических уровня каждого иона формируют квантовый бит (кубит), состояние которого отвечает наличию или отсутствию элементарной частицы в соответствующей модели. Межкубитное взаимодействие моделирует калибровочные поля. В дальнейшем было бы интересно попробовать использовать квантовые системы для моделирования эффекта конфайнмента кварков в квантовой хромодинамике.

*По материалам заметки
“Quantum simulation of fundamental physics”,
E.Zohar, Nature 534, 480 (2016).*

I. E.A.Martinez et al., Nature 534, 516 (2016).

И далее ...

- 2 Дираковские узловые дуги
в $PtSn_4$

Квантовая спиновая жидкость
в хлориде рутения

- 3 Квантовый эффект Холла в
черном фосфоре

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 3 Германен на диэлектрике

- 4 Новый наноструктурный
фильтр для удаления вирусов
из воды

СНОВА К ОСНОВАМ

- 5 Преломление спиновых волн

ГРАФЕН

- 6 Сверхупорядоченная структура
на основе графена

КОНФЕРЕНЦИИ

- 7 XVIII Всероссийская молодеж-
ная конференция по физике
полупроводников и нанострук-
тур, полупроводниковой опти-
ки и наноэлектронике,
28 ноября - 2 декабря 2016 г.,
г. Санкт-Петербург, Россия

- 8 Asian Graphene Forum,
11-16 March 2017

Дираковские узловые дуги в $PtSn_4$

В импульсном пространстве топологических квантовых материалов зона проводимости и валентная зона имеют общие точки (дираковские точки) или даже протяженные участки (дираковские узловые линии). В работе [1] (США, Канада) сообщается об открытии в $PtSn_4$ (рис. 1) новой топологической структуры – дираковских узловых дуг (рис. 2).

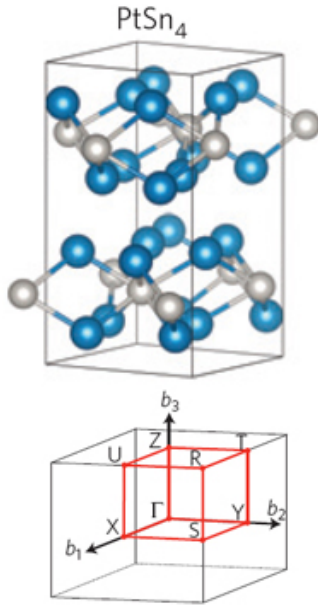


Рис. 1. Кристаллическая структура (вверху) и зона Бриллюэна (внизу) $PtSn_4$. Белые сферы – атомы Pt, синие сферы – атомы Sn.

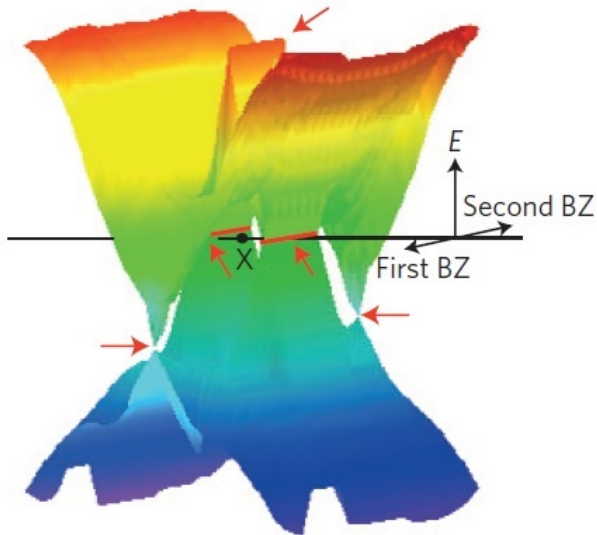


Рис. 2. Схематическое изображение дираковских узловых дуг. Красные стрелки указывают на отдельные узлы и узловые дуги.

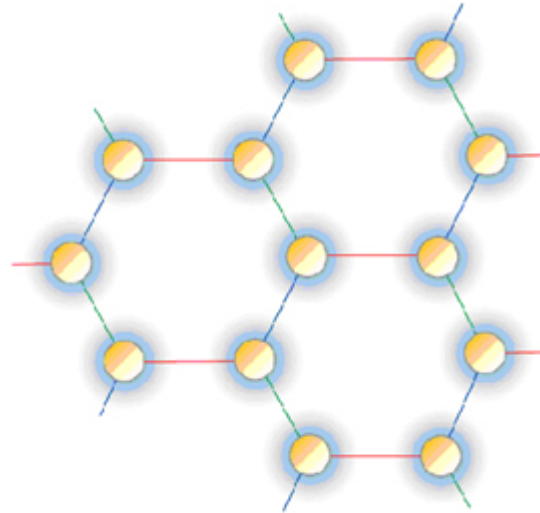
Данные фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением согласуются с расчетами из первых принципов. Интересно, что $PtSn_4$, подобно многим топологическим полуметаллам (Cd_3As_2 , NbP , WTe_2) имеет аномально высокое магнетосо-

противление $\sim 10^6$ %. Авторы [1] полагают, что при поиске новых соединений с дираковским или вейлевским типом зонной структуры надо в первую очередь обращать внимание на материалы с большим магнетосопротивлением.

1. Y.Wu et al., Nature Phys. 12, 667 (2016).

Квантовая спиновая жидкость в хлориде рутения

В 2006 г. А. Китаев предложил [1] точно решаемую модель квантовой спиновой жидкости на двумерной гексагональной решетке (см. рис.).



В модели Китаева спины $S=1/2$ расположены в узлах гексагональной решетки, причем в каждом из трех возможных направлений связи с ближайшими соседями взаимодействует только одна компонента спина (S_x – вдоль красных связей, S_y – вдоль зеленых и S_z – вдоль синих).

Оставалось лишь найти соединение с соответствующими (довольно экзотическими и на первый взгляд надуманными) межспиновыми взаимодействиями. После долгих поисков это вроде бы, наконец удалось авторам работы [2] (США, Великобритания, Германия, Индия). По крайней мере, исследуя неупругое рассеяние нейтронов на хлориде рутения α - $RuCl_3$, они обнаружили магнитные возбуждения, спектры которых очень близки к предсказаниям модели Китаева.

*По материалам заметки
“Kitaev’s exact solution approximated”,
N.P.Armitage, Nature Mater. 15, 701 (2016).*

1. A.Kitaev, Ann. Phys. 121, 2 (2006).

2. A.Banerjee et al., Nature Mater. 15, 733 (2016).

Квантовый эффект Холла в черном фосфоре

Квантовый эффект Холла (КЭХ) заключается в квантовании холловского сопротивления двумерной электронной системы (2DES) в сильном магнитном поле. Для наблюдения этого эффекта требуются образцы с низкой концентрацией дефектов и, соответственно, высокой холловской подвижностью носителей. В работе [1] (Китай, Япония) таким образом послужила вандерваальсовская гетероструктура из нескольких слоев черного фосфора, заключенных между двумя тонкими (~ 25 нм) пленками гексагонального нитрида бора (h-BN). Этот “бутерброд” размещали на графитовом электроде (рис. 1 a,b). Электроны графита экранировали потенциал заряженных примесей на границе раздела слоев черного фосфора и h-BN, что позволяло добиться высокой подвижности носителей в 2DES у этой границы (рис. 1c).

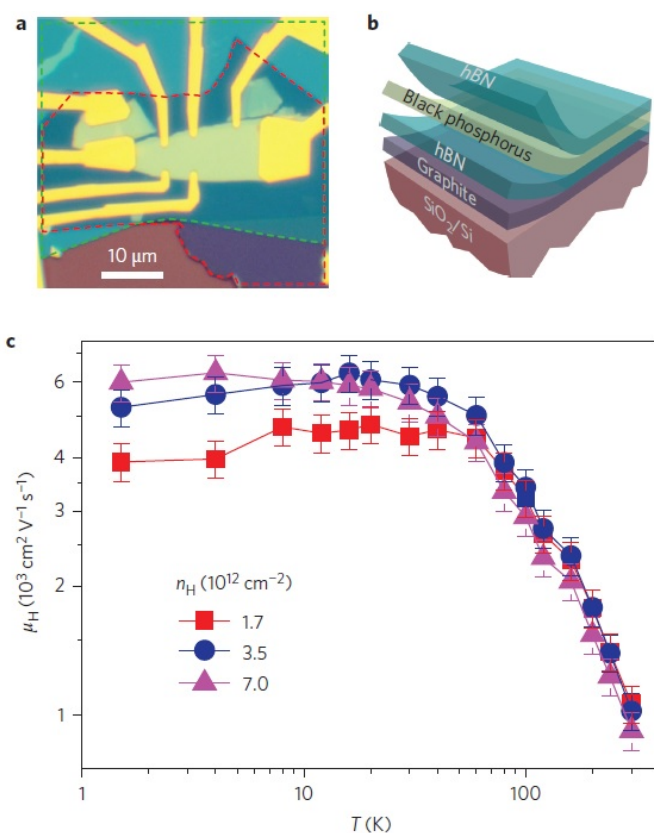


Рис. 1. а - Фотография гетероструктуры черной фосфор/h-BN/графит. Границы h-BN и графита отмечены, соответственно, зеленой и красной штриховыми линиями. б - Схематическое трехмерное изображение гетероструктуры. с - Температурные зависимости холловской подвижности при различных концентрациях носителей.

На зависимости холловского сопротивления R_{xy} от магнитного поля отчетливо видны плато при $R_{xy} = h/\nu e^2$ с $\nu = 2, 3, \dots, 8$ (рис. 2), что соответствует целочисленному КЭХ. Теперь на очереди – дробный КЭХ.

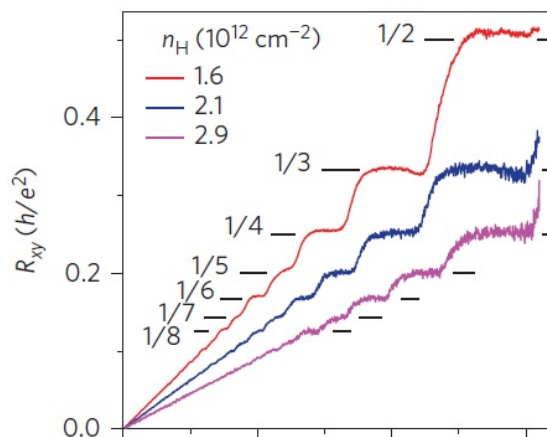


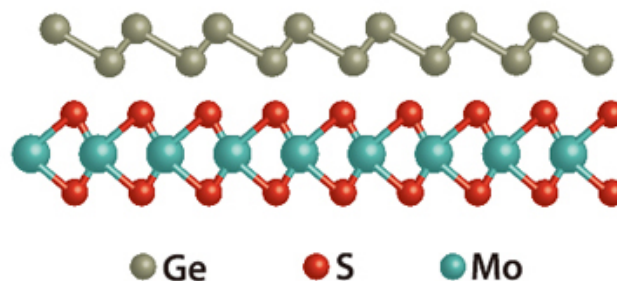
Рис. 2. Холловское сопротивление как функция магнитного поля при $T = 300$ мК.

1. L.Li et al., *Nature Nanotech.* **11**, 593 (2016).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Германен на диэлектрике

До недавнего времени германен (германиевый аналог графена) удавалось получать только на металлических подложках (Pt, Au, Ge₂Pt, Al). Гибридизация электронных состояний германена и металла приводит к искажению дираковских особенностей электронной структуры. В работе [1] голландские физики сообщают о приготовлении германена на диэлектрической подложке MoS₂ (см. рис.).



Германен на MoS₂. Вид сбоку.

Плотность электронных состояний такого германена имеет V-образную форму. Сканирующая электронная спектроскопия и расчеты из первых принципов показали, что наряду с конической зоной в точке К зоны Бриллюэна имеются еще и две параболические зоны, пересекающие уровень Ферми в точке Г. Не исключено, что германен найдет применение в нанoeлектронике.

Л.Опенев

1. L.Zhang et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 256804 (2016).

Новый наноструктурный фильтр для удаления вирусов из воды

Загрязнённая вода может служить переносчиком различных болезней, в том числе и очень серьёзных, – диареи, холеры, дизентерии, брюшного тифа, гепатита и др. По оценкам ВОЗ минимум 1,8 миллиардов человек пользуются источниками питьевой воды, загрязненной фекальными веществами. Только от диареи из-за небезопасной питьевой воды (и небезопасных санитарных условий) ежегодно умирают 842 000 человек [1]. Высокую опасность представляют переносимые водой вирусы* – аденовирусы, энтеровирусы, ротавирусы, вирусы гепатита и другие. Они хорошо выживают в системах водоснабжения. Для борьбы с ними используют химические и физические методы. Хлорирование воды, которое начали применять в конце XIX – начале XX века во время эпидемий холеры, и сейчас является наиболее распространенным химическим способом дезинфекции воды. Однако при хлорировании в воде образуются вредные побочные продукты и, кроме того, некоторые вирусы устойчивы к воздействию хлора. Для очистки воды также используют мембранные методы. Фильтрация способна создавать эффективные физические барьеры для всех микроорганизмов. К сожалению, коммерческие мембранные фильтры, которые производят из синтетических полимеров, не обеспечивают достаточный поток и не способны удалять парвовирусы**. Лишь несколько вариантов, например половолоконные фильтры Planova™, обладают нужными характеристиками, но их стоимость очень высока. Такие фильтры применяют в био-

фармацевтике, но не для очистки воды. Новым поколением мембран для фильтрации и дезинфекции воды являются мембраны на основе графена и углеродных нанотрубок. Они отличаются высокой скоростью пропускания воды, исключительной селективностью, сильными противомикробными свойствами. Однако говорить о внедрении пока рано – лишь малая часть таких мембран и фильтров находится на стадии пилотных испытаний [2].

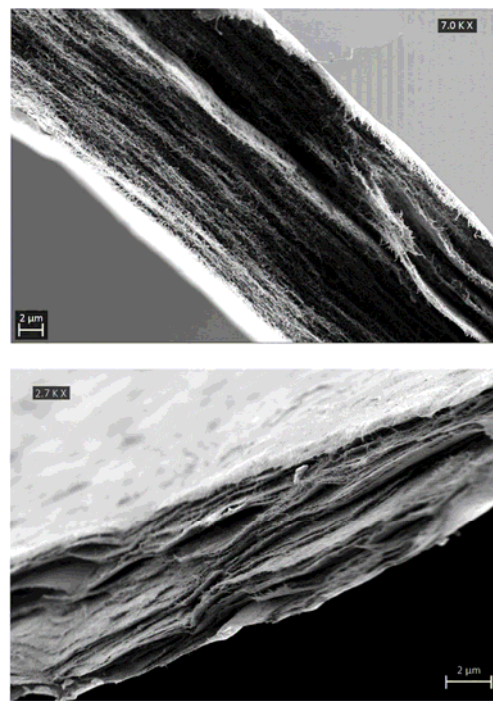


Рис. 1. Сечение целлюлозного фильтра при разном увеличении.

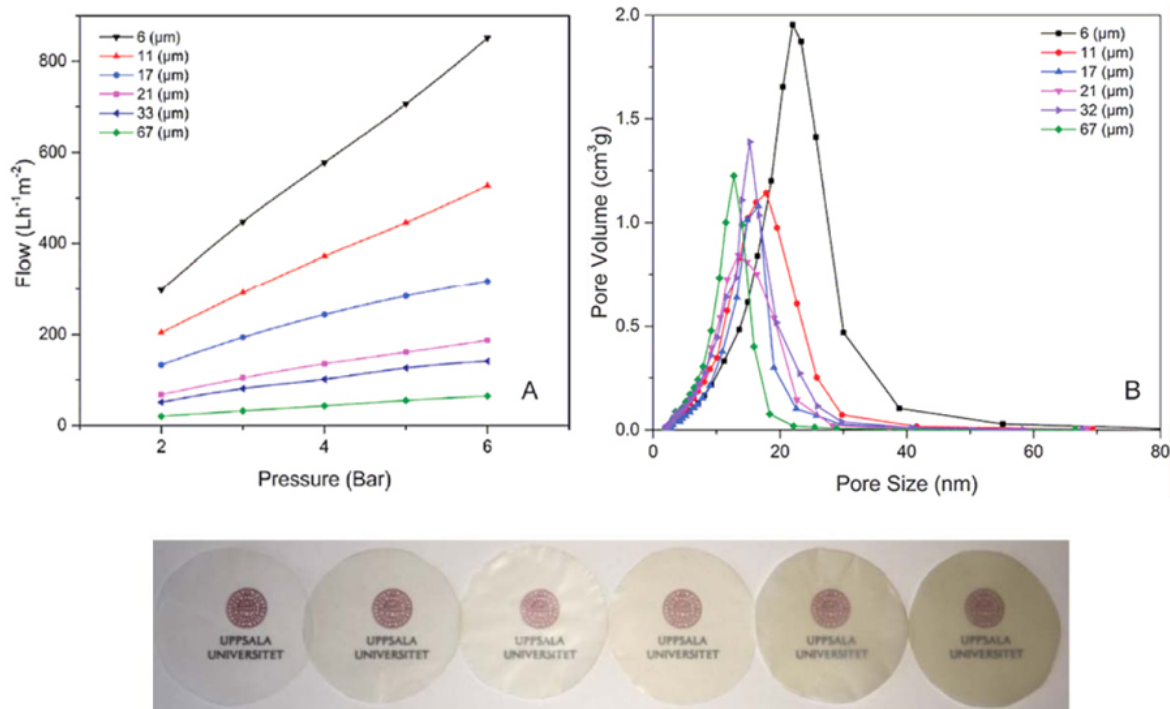


Рис. 2. А: зависимости величины потока от давления для фильтров разной толщины. В: распределение пор по размерам в зависимости от толщины фильтра. Внизу: фотографии фильтров разной толщины (слева направо 6, 10, 16, 21, 32 и 67 мкм).

Недавно ученые из Швеции и Германии предложили новый эффективный и недорогой фильтр для удаления вирусов из воды [3]. Фильтр изготовлен методом горячего прессования нановолокон целлюлозы (аналогично традиционному производству бумаги). Использовали целлюлозу, полученную из зеленых водорослей. У нового фильтра очень интересная слоистая структура (рис. 1).

Авторы [3] сравнивают свой фильтр со знаменитой французской слоёной выпечкой “Мильфей” (*фр. Millefeuille – тысяча листов*). Как известно, у нас в России это – “Наполеон” (название, скорее всего, не имеет отношения к французскому императору). Фильтр “Мильфей” состоит из нанопористых слоев целлюлозных нановолокон. Такая структура оказалась чрезвычайно эффективной для удаления не только крупных вирусов (гриппа, ретровирусов), но даже самых мелких, устойчивых к дезинфекции парвовирусов. Распределение пор по размерам и зависимость величины потока от давления для фильтров разной толщины представлены на рис. 2. Приведены также фотографии фильтров разной толщины. Все фильтры (кроме самого тонкого) имеют поры в нужном диапазоне размеров (14-24 нм). Целостность фильтров при повышении давления до 6 бар не нарушается, достаточно использовать в качестве опоры обычную фильтровальную бумагу (испытания при более высоких давлениях не проводили).

Стандартный тест с использованием раствора золотых наночастиц размером 20 и 50 нм подтвердил высокое качество фильтров – и те, и другие наночастицы были полностью задержаны фильтрами. Кроме того, ученые проверили эффективность фильтрации парвовирусов на примере мелкого вируса мышей МВМ (18-20 нм). Считается, что это “наихудший вариант” модельной системы, т.к. МВМ чрезвычайно устойчив к химической и физической инактивации. Впервые показано, что фильтр, на 100% состоящий из природной целлюлозы, удаляет парвовирусы МВМ. Остаточной инфективности нет. Для фильтров толщиной 32 и 67 мкм продемонстрирована эффективность более 99,999%, то есть на уровне лучших моделей, применяемых в биотехнологии. Стоимость последних высока – в диапазоне 2000-5000 \$/м², в то время как целлюлоза – недорогой, доступный, нетоксичный, инертный материал. Результаты работы [3] подсказывают новые пути решения проблемы очистки воды.

**Вирусы (лат. virus – яд) – внутриклеточные паразиты, состоящие из молекулы РНК (или ДНК), окруженной белковыми молекулами. Вне клетки они «неживые». Впервые их существование доказал в 1892 г. русский учёный Д.И. Ивановский, основоположник вирусологии.*

***Парвовирусы (от лат. parvus – маленький) – семейство самых мелких ДНК-содержащих сферических вирусов. Мелкий вирус мышей (МВМ) – первый вирус этого семейства, ДНК которого была детально охарактеризована.*

1. Вода. Инф.бюлл.ВОЗ № 391 (2015) Вода. Инф. бюлл. ВОЗ № 391 (2015), <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs392/ru/>
2. О.Алексеева, Вода Magazine №6(82), 30 (2014).
3. S.Gustafsson et al., Mater. Horiz. 3, 320 (2016).

СНОВА К ОСНОВАМ

Преломление спиновых волн

Со школьной скамьи нам известен закон преломления света (закон Снеллиуса–Декарта), согласно которому синусы углов падения и преломления обратно пропорциональны показателям преломления сред. Однако такое правило справедливо только для волн с линейным законом дисперсии и изотропных материалов. Для волн со сложным законом дисперсии таких, как спиновые волны, дисперсионное соотношение не сводится просто к пропорциональности между частотой и волновым вектором. Оно включает в себя несколько слагаемых различных степеней, каждое из которых зависит от разнообразных параметров, таких как толщина пленки, в которой распространяются волны, ее намагниченность, константа обменной жесткости, а также величина и направление внешнего магнитного поля. В этом случае отклонения от обычного закона преломления будут значительными, а его формулировка примет вид более общего условия равенства тангенциальных компонент волнового вектора на границе. Международной германо-японо-итальянской группе исследователей удалось не только продемонстрировать преломление спиновых волн, но и показать сходства и различия закона их преломления с классическим законом Снеллиуса–Декарта [1].

Спиновые волны возбуждались в пленке пермаллоя и распространялись под некоторым углом к границе-ступеньке (рис. 1а), после которой толщина пленки уменьшается в два раза: с 60 нанометров до 30 нанометров. Для визуализации волн использовалась керровская микроскопия с временным разрешением, позволявшая получить изображения волновых фронтов (рис. 1б), а также микрофокусированный метод рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.

В результате действительно наблюдалось изменение длины волны и, как следствие, преломление волн на границе [1]. Более того, “на мелководе”, в более тонкой части пленки, наблюдалось не только уменьшение длины волны, но и увеличение ее интенсивности, что связано с граничными условиями: для предотвращения образования на границе разде-

ла динамических магнитных зарядов угол прецессии спинов должен быть больше в тонкой пленке. Все вышеперечисленные эффекты представляют не только фундаментальный интерес, но и могут найти применение в магнетике: зависимость волнового вектора от толщины позволит получать более короткие спиновые волны нанометрового диапазона, преломление даст возможность контролировать направление распространения спиновых волн, а эффект роста амплитуды позволит противостоять естественному затуханию спиновых волн.

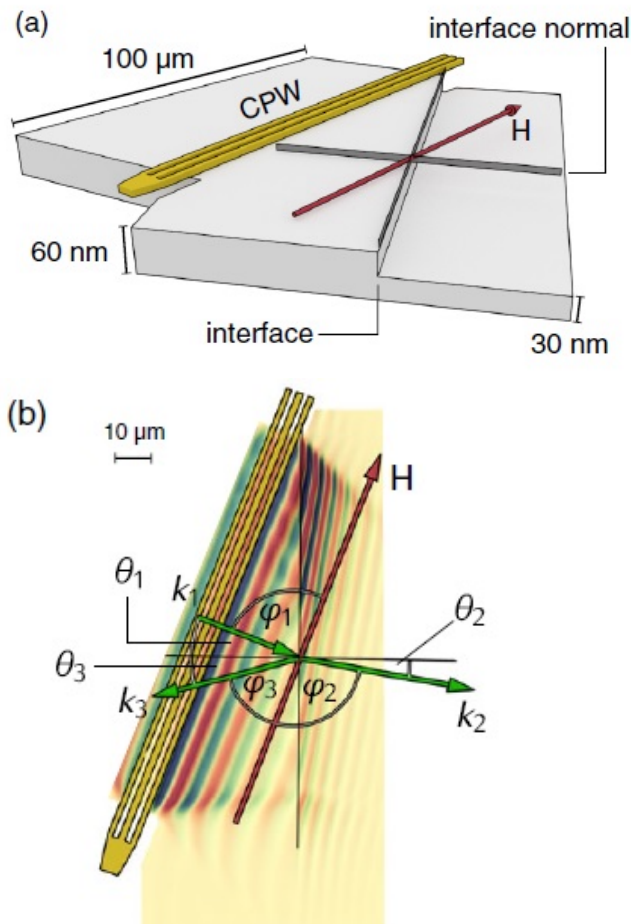


Рис. 1. Преломление спиновых волн [1]: а - геометрия структуры, CPW (coplanar wave guide) – волновод для возбуждения спиновых волн в пленке пермаллоя, Н – внешнее магнитное поле; б - изображение спиновых волн методом керровской микроскопии с временным разрешением, графические объекты показывают расположение волновода и направления падающей, отраженной и преломленных волн относительно поверхности раздела и вектора магнитного поля.

А. Пятаков

1. J. Stigloher et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 037204 (2016).

ГРАФЕН

Сверхупорядоченная структура на основе графена

Авторы работы [1] сообщают об успехе в получении так называемой двумерной сверхупорядоченной структуры на основе графена (GSOS). В основе методики синтеза лежит принцип самосборки отдельных монокристаллов графена за счет электростатических сил между соседними фрагментами и под действием гидродинамических сил, возникающих под действием набегающего газового потока, на поверхности жидкого металла (рис. 1).

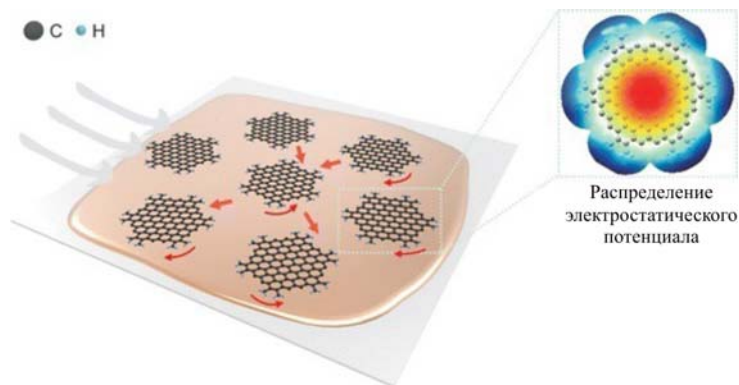


Рис. 1. Самоорганизация монокристаллов графена

В качестве источника твердого углерода, служащего центрами роста, использовали полиметилметакрилат (ПММА), который исследователи наносили на медную фольгу. По мере повышения температуры медная фольга в атмосфере водорода плавится, а ПММА разлагается и конденсируется, формируя указанные центры роста будущих графеновых монокристаллов, первоначальное распределение которых возможно реорганизовать с помощью направленного воздушного потока. Затем авторы вводили в систему CH_4 для дальнейшего роста графеновых фрагментов и образования GSOS. Полученный материал характеризуется периодичностью расположения отдельных графеновых единиц, а также высокой однородностью размеров и неизменной ориентацией монокристаллов, что подтверждается дополнительными исследованиями с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 2).

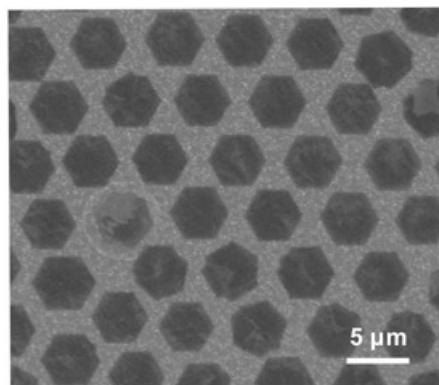


Рис. 2. Изображение GSOS, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Перст, 2016, том 23, выпуск 13/14

Авторы особо отмечают возможность настройки всех параметров GSOS, а именно размеров отдельных монокристаллов, их угла поворота и интервала между ними посредством изменения скорости газового потока, температуры и времени отжига. Кроме того, с целью азотного допирования исследователи использовали мочевины в качестве источника углерода для образования центров роста. Как и оригинальные образцы допированные структуры также характеризуются одинаковыми размерами монокристаллов, идентичностью углов поворота и интервалами между отдельными фрагментами. Авторы тестировали производительность GSOS на созданных на их основе обратносмещенных полевых транзисторах. Подвижность, достигнутая на таких приборах, составила около $4000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что сравнимо с аналогичными характеристиками для классических графеновых устройств. Подводя итоги, авторы считают, что предложенная ими методика создания сверхупорядоченных графеновых структур эффективна, экономична и масштабируема, поэтому вполне способна оказать существенное влияние на разработку новой элементной базы для нужд нанoeлектроники будущего.

М. Маслов

I. M.Zeng et al., J. Am. Chem. Soc. 138, 7812 (2016).

КОНФЕРЕНЦИИ

XVIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 28 ноября - 2 декабря 2016 г., г. Санкт-Петербург, Россия

Конференция проводится ежегодно и пользуется популярностью: в ней участвуют молодые ученые, аспиранты и студенты из 15–20 городов России. Конференция является одновременно конкурсом работ и докладов. За лучшие доклады присуждаются денежные премии (в 2015 г. присуждено 11 премий студентам и аспирантам). К началу конференции издается сборник тезисов (на русском языке).

Конференция обеспечивает возможность всем участникам опубликовать статьи (расширенные тезисы) на английском языке в журнале *Journal of Physics: Conference Series*, издаваемом в Великобритании издательством IOP Publishing. Эти публикации включаются в базы данных Scopus и Web of Science.

Тематика конференции

Конференция для молодых ученых посвящена таким активно развивающимся направлениям физики твердого тела и электроники, как физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковые нанотехнологии, опто- и наноэлектроника. На конференции будут заслушаны доклады по результатам как экспериментальных, так и теоретических исследований, сгруппированные по следующим основным разделам:

- Объемные свойства полупроводников
- Процессы роста, поверхность, границы раздела
- Гетероструктуры, сверхрешетки, квантовые ямы
- Квантовые точки, квантовые нити и другие низкоразмерные системы
- Приборы опто- и наноэлектроники
- Новые материалы

Основные даты:

Срок представления тезисов на русском языке (1 стр.) - до **12 октября 2016 г.**

E-mail: conference@semicond.spbstu.ru

Web: www.semicond.spbstu.ru/conf2016

***Asian Graphene Forum, 11-16 March 2017,
Cruise ship events sailing on the Strait of Malacca from Singapore - Kuala Lumpur (Malaysia) - Penang (Malaysia) - Phuket (Thailand) - Singapore by the Diamond Princess cruise ship***

Organised by the International Association of Advanced Materials (IAAM) with the collaboration of VBRI Press AB, Sweden as a part of the Asian Advanced Materials Congress.

Topics of Forum

- Fundamentals of graphene and 2D materials
- Growth, synthesis and integration methods
- Composites – characterization and properties
- Large scale production and characterization
- Applications in the
- Electronics/ flexible electronics
- Energy: photovoltaics, energy storage, fuel cells & hydrogen storage
- Photonics, spintronics and optoelectronics
- Biomedical, sensors and environmental research
- New technologies, commercialization and market

The deadline of Abstracts Submission is Saturday, 30 July 2016.

E-mail: secretarygeneral@iaamonline.org

Web: www.vbripress.com

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

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

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

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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