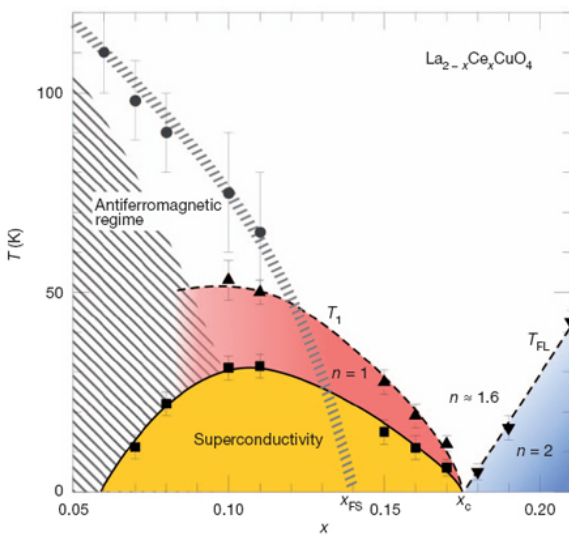


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Спиновые флуктуации и высокотемпературная сверхпроводимость

В купратных ВТСП p -типа (с дырочным допированием) исследования механизма куперовского спаривания осложняются наличием псевдощелевого, страйпового и других сопутствующих сверхпроводимости состояний. Фазовая диаграмма купратов n -типа гораздо проще: при увеличении концентрации электронов x антиферромагнитная фаза сменяется сначала сверхпроводящей, а затем нормальной (см. рис.).



Фазовая диаграмма $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$. Здесь n – показатель степени в температурной зависимости сопротивления $\rho(T) = \rho_0 + AT^n$; T_1 и T_{FL} – границы областей с $n=1$ и $n=2$ (ферми-жидкость) соответственно; $x_c=0.17$ – критическая концентрация электронов, при которой сверхпроводимость исчезает; $x_{FS}=0.14$ – квантовая критическая точка, в которой имеет место SDW-реконструкция поверхности Ферми.

В работе [1] группа из Univ. of Maryland (США) детально исследовала температурную зависимость удельного сопротивления ρ тонких пленок $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ с различными x . Обнаружено, что в пленках с $0.11 < x < x_c = 0.17$ “сверхпроводящий купол” $T_c(x)$ окаймлен областью, в которой ρ линейно по температуре: $\rho(T) = \rho_0 + AT$ при $T_c < T < T_1$ (в сильных магнитных полях, когда сверхпроводимость подавлена, линейность $\rho(T)$ наблюдается вплоть до ~ 10 мК). При увеличении x коэффициент A уменьшается синхронно с T_c и обращается в нуль при $x=x_c$ одновременно с исчезновением сверхпроводимости. Поскольку величина A определяется интенсивностью неупругого рассеяния носителей, приводящего к линейному $\rho(T)$, то, значит, ответственное за это рассеяние взаимодействие имеет отношение и к сверхпроводящему спариванию. Что же это за взаимодействие? Известно, что в сильнокоррелированных органических материалах и системах с тяжелыми фермионами линейность $\rho(T)$ обусловлена близостью антиферромагнитной критической точки. Поэтому авторы [1] полагают, что причиной линейного $\rho(T)$ в $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ является взаимодействие электронов со спиновыми флуктуациями. Интересно, что точно такая же корреляция между A и T_c имеет место и в другом ВТСП n -типа, $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ [1]. Более того, ранее она наблюдалась в различных дырочных ВТСП и в органическом сверхпроводнике $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Может статься, что во

И далее ...

ГРАФЕН

- 2 Термические свойства графена и других нанокуглеродных материалов

Графен и кремний

Зернистая структура больших листов графена

- 3 Искажение дираковского конуса в графене

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 4 Регулировка спин-орбитального взаимодействия в квантовой точке

Квантовые операции с ионами в ловушке: от лазеров к микроволнам

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 4 Новый нанокompозит для хранения водорода

- 6 Загадка углеводородной пирамиды

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 7 Суэта в кофейной капле

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 8 Электрический пробой в плотных массивах углеродных нанотрубок

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 9 Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2011)

всех этих соединениях реализуется спин-флуктуационный механизм спаривания.

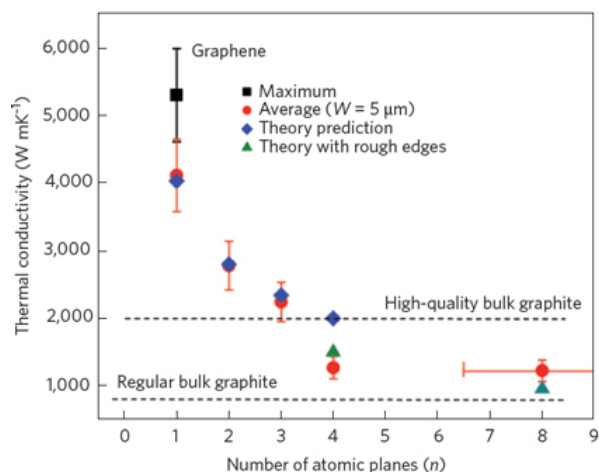
Л.Опенков

I. K.Jin et al., Nature 476, 73 (2011).

ГРАФЕН

Термические свойства графена и других наноуглеродных материалов

Способность того или иного вещества проводить тепло количественно характеризуется удельной теплопроводностью K . Согласно закону Фурье, поток тепла $q = -K\nabla T$, где ∇T – градиент температуры. В различных аллотропах углерода значения K при комнатной температуре различаются на пять порядков, от ~ 0.01 Вт/мК в аморфном углероде до 2000 – 3000 Вт/мК и более в алмазе, пиролитическом графите (параллельно слоям), графене и нанотрубках. При этом основной вклад в K дают фононы. “Наноструктурирование” алмаза (уменьшение размера зерен до нескольких нанометров) приводит к падению K до 1 – 10 Вт/мК, что связано с уменьшением длины свободного пробега фононов из-за рассеяния на межзеренных границах. Сравнивая K в n -слойном графене ($n > 1$) и графите (рис 1), можно проследить эволюцию K при увеличении мерности (2D \rightarrow 3D). Увеличение K при $n < 4$ обусловлено отсутствием поперечной компоненты у групповой скорости фононов и, как следствие, ослаблением рассеяния на границах. Пока не решен вопрос, какие именно фононные моды дают основной вклад в K графена. Благодаря сочетанию уникальных электрических и тепловых характеристик графен рассматривается как перспективный материал для гибридной Si-C электроники.

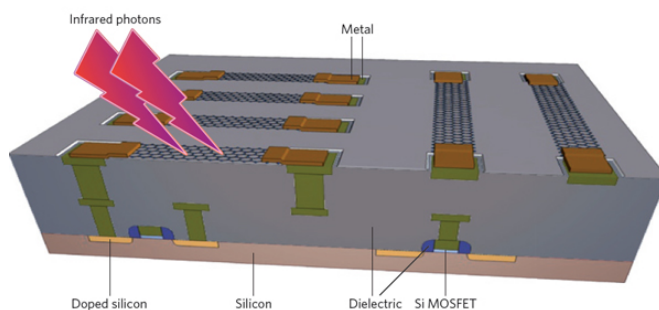


Теплопроводность n -слойного графена уменьшается с ростом n .

По материалам обзора A.A.Balandin, "Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials", Nature Mater. 10, 569 (2011).

Графен и кремний

В электронном спектре графена нет запрещенной зоны, поэтому графеновые транзисторы не могут конкурировать с кремниевыми. Чтобы индуцировать в графене диэлектрическую щель, используют различные приемы: гидрогенизацию, разрезание на узкие наноленты и пр. Но стоит ли это делать? Может быть, лучше не “подгонять” графен под кремний, а использовать его уникальные характеристики в каких-то других приложениях? Например, специфическая зонная структура графена (наличие дираковской точки, в которой зона проводимости смыкается с валентной зоной) делает перспективным его использование в амбиполярной электронике: за счет управляющего напряжения можно смещать уровень Ферми, изменяя проводимость с дырочной на электронную и обратно. Это открывает путь к новым нелинейным высокочастотным устройствам, таким как умножители частоты, цифровые модуляторы и др., прототипы которых уже продемонстрированы. Фотодетекторы из графена – еще один пример, когда отсутствие щели в спектре не мешает, а помогает (графен одинаково хорошо поглощает и инфракрасное, и ультрафиолетовое излучение). Ожидается, что графеновые фотодетекторы сыграют важную роль при разработке приборов ночного видения нового поколения, в оптической связи и химическом анализе. С точки зрения технологии, неоспоримым преимуществом графена является возможность его интеграции с почти любой подложкой, в том числе с кремниевой (см. рис.).



Детектор инфракрасного излучения из кремния и графена.

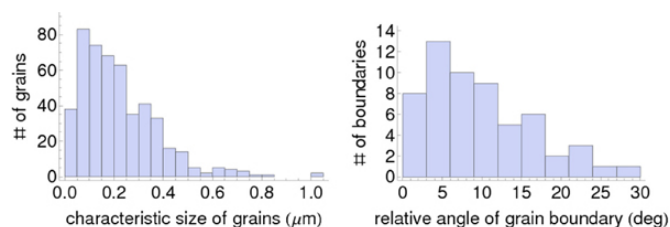
Так что кремниевая электроника не исчезнет, но дополнится графеновой и кремний-графеновой.

По материалам заметки T.Palacios, "Thinking outside the silicon box", Nature Nanotech. 6, 464 (2011).

Зернистая структура больших листов графена

Перспективы использования графена для создания нового класса прозрачных экранов, обусловленные уникальным сочетанием механических, оптических и электрических характеристик этого материала, стимулируют усилия исследователей и разработчиков, направленные на получение листов графена большой площади. Первые образцы графена, подходящие для исследования физико-химических

свойств этого материала, были получены в результате микромеханического расслоения кристаллического графита. Однако размеры таких образцов, которые характеризуются относительно невысоким содержанием дефектов, не превышают несколько десятков микрон, что недостаточно для использования в гибких прозрачных проводящих экранах. Существенно более крупные листы графена (до 70 см в поперечнике) [1] удается получить при использовании метода химического осаждения паров (CVD) на поверхности металла. Однако такие образцы также не подходят для создания гибких прозрачных проводящих экранов, поскольку присущие подобным образцам дефекты ухудшают их оптические, механические и электрические характеристики. Детальное исследование природы таких дефектов выполнено недавно большой группой исследователей из Кореи и Венгрии [2]. Используемый авторами подход к изучению структуры зерен в графеновых листах, выращенных стандартным CVD методом, основан на том, что окисление графена при взаимодействии с молекулярным кислородом при повышенных температурах происходит преимущественно по структурным дефектам, таким как дислокации и границы зерен. Согласно этому подходу, медную подложку на которой были выращены листы графена, удаляли с помощью раствора CuCl_2 , после чего листы графена переносили на подложку из слюды. Обработку образцов проводили в атмосферном воздухе при температуре 500°C . Микрофотографии образцов графена получали с использованием атомного силового микроскопа в процессе термообработки каждые 5 минут. Анализ этих фотографий показал, что границы зерен становятся видимыми через 30 минут термообработки. При этом размер зерен достигает значения порядка 500 нм, а ширина границ – 20 нм. Структура зерен, составляющих графеновые листы, приведена на рисунке гистограмм, показывающих распределение зерен по размерам, а также углов многоугольника, представляющего индивидуальное зерно. Эти данные являются результатом статистической обработки большого количества микрофотографий, полученных для различных образцов с использованием атомного силового микроскопа.



А. Елецкий

1. S.Bae et al., *Nature Nanotech.* **5**, 574 (2010).
2. P.Nemes-Incze et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 023104 (2011).

Искажение дираковского конуса в графене

Как первые эксперименты, так и одночастичные (не учитывающие электрон-электронного взаимодействия) модели свидетельствуют о том, что электроны в графене ведут себя подобно безмассовым релятивистским частицам: их закон дисперсии имеет коническую форму $E = \hbar v_F k$, где скорость Ферми v_F играет роль эффективной скорости света (такие электроны называют дираковскими фермионами). Теория предсказывает, что межэлектронное кулоновское взаимодействие должно приводить к искажению дираковского конуса, а именно – к отклонению от линейной дисперсии в окрестности дираковской точки (точки нейтральности) $E=0$, где зона проводимости касается валентной зоны, и даже, возможно, к формированию около этой точки небольшой запрещенной зоны. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные получены для графена с концентрацией носителей $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что отвечает энергии $E \sim 100 \text{ мэВ}$ – довольно далеко от дираковской точки. При таких энергиях наклон $E(k)$ определяется величиной $v_F \approx 10^6 \text{ м/с}$. Если при малых E зависимость E от k действительно изменяется, то это должно приводить к изменению v_F .

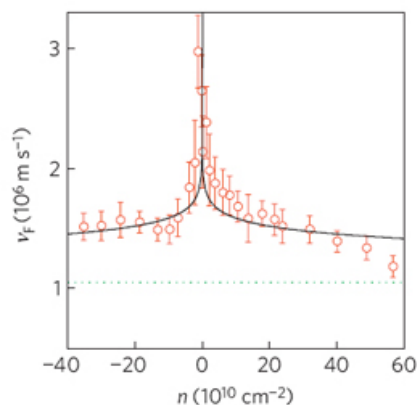
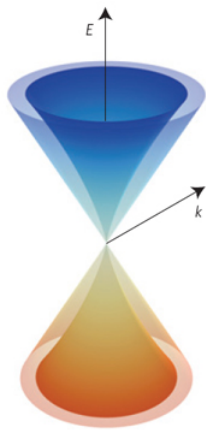


Рис. 1. Скорость Ферми v_F в графене как функция концентрации носителей n (отрицательные значения n отвечают дыркам)

В очередной работе [1] группы Новоселова-Гейма диапазон концентраций носителей в графене расширен до $n \sim 10^9 \text{ см}^{-2}$ ($E \sim 3 \text{ мэВ}$). Выяснилось, что скорость Ферми (определенная на основании данных по осцилляциям Шубникова – де Гааза) существенно возрастает при уменьшении n (рис. 1). Это согласуется с теорией ренормгруппы, которая предсказывает логарифмическую расходимость v_F при $n \rightarrow 0$ и связано с перенормировкой эффективной константы взаимодействия $e^2/\hbar v_F$. Здесь прослеживается аналогия с квантовой электродинамикой, за тем отличием, что в ней изменение константы $e^2/\hbar c$ обусловлено перенормировкой электрического заряда e , а не скорости света c . Таким образом, дираковский конус искажается тем сильнее, чем меньше энергия квазичастиц (рис. 2). Что касается предсказанных некоторыми авторами новых многочастичных электронных фаз, включая диэлектрическую,



то они (по крайней мере, при $E > 0.1$ мэВ) в [1] не были обнаружены. Это связано, по видимому, с уменьшением константы $e^2/\hbar v_F$ по мере приближения к дираковской точке.

Рис. 2. Схематическое изображение электронного и дырочного спектра в графене. Внешний конус – одночастичная картина, внутренний – с учетом многочастичного взаимодействия (согласно теории ренормгруппы и эксперименту).

Л.Опенев

1. D.C.Elias et al., *Nature Phys.* 7, 701 (2011).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Регулировка спин-орбитального взаимодействия в квантовой точке

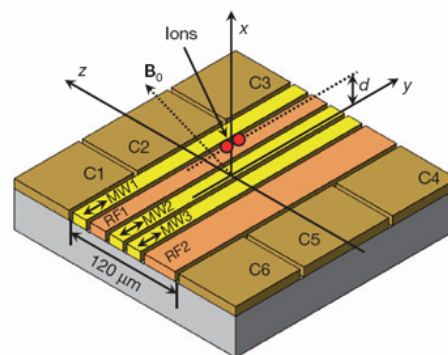
Взаимосвязь спиновых и орбитальных степеней свободы электрона (спин-орбитальное взаимодействие) позволяет управлять спиновыми состояниями посредством изменения орбитальных состояний, что имеет большое значение для спинтроники и операций со спиновыми кубитами. Ранее было показано, что в двумерном электронном газе энергию Δ этого взаимодействия можно изменять электрическим полем. Согласно работе [1], величину Δ в квантовых точках также можно регулировать (в диапазоне 50-150 мкэВ), просто прикладывая небольшое (~ 1 В) напряжение к расположенному вблизи квантовой точки электроду. Для определения Δ авторы [1] изучали расщепление особенности Кондо в сильном магнитном поле. Причиной изменения Δ является влияние электрического поля на потенциал конфайнмента электронов в квантовой точке, что влечет за собой изменение их координатных волновых функций.

1. Y.Kanai et al., *Nature Nanotech.* 6, 511 (2009).

Квантовые операции с ионами в ловушке: от лазеров к микроволнам

Для управления квантовыми состояниями ионов в ловушке используются лазеры. Лазерные установки сложные и громоздкие. Генерировать и контролировать микроволновое излучение гораздо проще, чем лазерное, но градиент магнитного поля на ионах при этом оказывается слишком мал и не обеспечивает требуемого взаимодействия между внутренними (спиновыми) и колебательными степенями свободы ионов. В работе [1] (США, Германия) вместо свободно распространяющихся микроволн использованы поля от локальных СВЧ-токов (см. рис.).

Авторы [1] показали, что таким образом можно, не прибегая к услугам лазеров, осуществлять операции с кубитами – ядерными спинами ионов $^{25}\text{Mg}^+$, в том числе создавать перепутанные состояния двух ионов.



Центральная часть ионной ловушки с поверхностными электродами (C1, C2, C3, C4, C5, C6, RF1, RF2 – электроды, создающие и контролируемые потенциал конфайнмента для ионов; MW1, MW2, MW3 – СВЧ-электроды).

В работе немецких физиков [2] микроволны использованы для другой цели – чтобы из “голых” состояний ядерных спинов $^{171}\text{Yb}^+$ создать “одетые” состояния, формирующиеся при взаимодействии спинов с микроволновым излучением. Такие состояния почти не чувствительны к флуктуациям магнитного поля, и поэтому сконструированные из них кубиты сохраняют когерентность в течение макроскопического (по атомным меркам) времени – более секунды. Эта методика применима и к другим квантовым системам, в которых декогерентизация обусловлена влиянием внешних возмущений: к нейтральным атомам, NV-центрам в алмазе и пр.

Может статься, что именно микроволны помогут решить проблему масштабируемости твердотельных устройств хранения и обработки квантовой информации.

1. C.Ospelkaus et al., *Nature* 476, 181 (2011).
2. N.Timoney et al., *Nature* 476, 185 (2011).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Новый наноккомпозит для хранения водорода

ПерсТ регулярно знакомит своих читателей с наиболее интересными системами хранения водорода на основе наноструктур. В последнее время только теоретики предлагали пути создания высокоемких сорбентов [1]. И вот, наконец, успех экспериментаторов! Ученые из Lawrence Berkeley Natl. Lab. (США) синтезировали новый наноматериал на основе Mg [2].

Перспективные сорбенты должны иметь емкость 4-6 масс.% и 40г/л водорода при нормальной температуре. Хотя гидрид магния теоретически может “хранить” 7.6 масс.% H_2 , его применение на практике ограничено из-за плохой кинетики. Более эффективным считается использование нанокристаллического магния. Чаще всего его получают измельчением в шаровой мельнице, но этот способ, к сожалению, не позволяет в нужной степени контролировать состав и микроструктуру. Кроме того, наночастицы не защищены от воздействия кислорода

ПерсТ, 2011, том 18, выпуск 17

и паров воды. Американским учёным [2] удалось создать стабильный на воздухе композитный материал, состоящий из нанокристаллов магния в полимерной матрице. Новый материал обеспечивает высокую емкость по водороду (6 масс.% от Mg, или 4 масс.% от композита в целом, и 55 г/л) и хорошую кинетику (сорбция < 30 мин при 200°C) без использования катализаторов.

Синтез проводили при комнатной температуре из раствора тетрагидрофурана THF, содержащего металлоорганический прекурсор магния (бис(циклопентадиенил)магний), восстановитель (нафталид лития) и газоселективный полимер полиметилметакрилат PMMA (в быту – оргстекло, плексиглас). Схема синтеза показана на рис. 1. Образование нанокристаллов магния происходило по механизму взрывной нуклеации и последующего роста (эту модель подтверждают данные просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ)). Авторы выбрали полимер PMMA, потому что он хорошо пропускает водород, но защищает нанокристаллы магния от кислорода и воды и препятствует образованию “мертвых” слоев MgO и Mg(OH)₂. При 35°C отношение проницаемостей H₂/O₂ составляет ~ 43, это гораздо выше, чем для других полимеров (например, для полидиметилсилоксана это отношение равно 1.03). Кроме того, PMMA достаточно эластичный, и можно оптимизировать объемную емкость системы хранения.

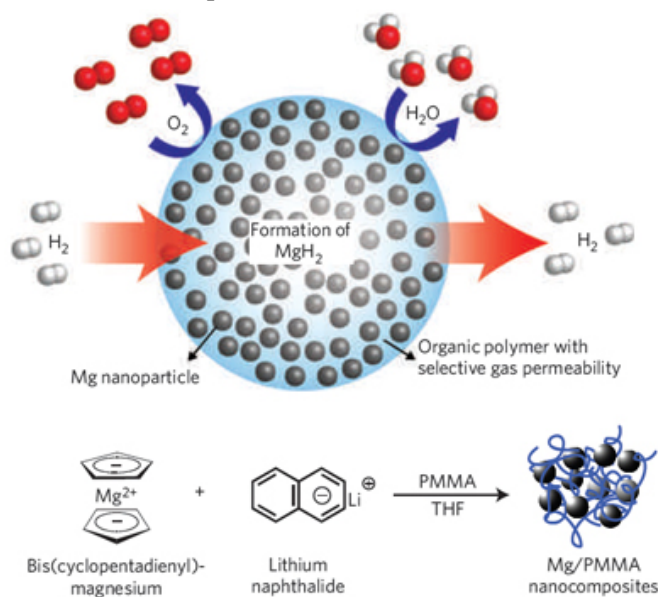


Рис. 1. Схематичное изображение нанокompозита Mg/PMMA. Нанокристаллы Mg инкапсулированы в газоселективный полимер. Внизу – схема синтеза.

Нанокристаллы магния в PMMA имеют почти сферическую форму (средний размер 4.9 ± 2.1 нм), равномерно распределены в матрице без признаков агломерации (рис. 2). Рентгеновские дифрактограммы указывают на высокую стабильность композита на воздухе – после 3 дней экспозиции нет заметного образования оксидов и гидроксидов (рис. 3). Использование в синтезе вместо PMMA других орга-

нических веществ, например, гексадециламина, приводит к быстрому окислению магния.

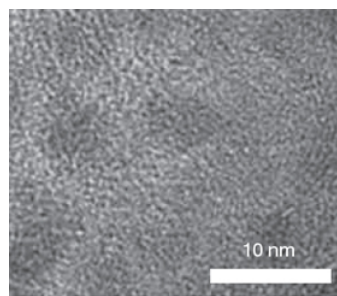


Рис. 2. ТЕМ изображение композита.

Измерения сорбции проводили на аппарате Сивергса при 200°C и 35 ат H₂. Для сравнения был также изучен порошок магния (44 мкм).

Кривые сорбции приведены на рис.4. Расчеты показали, что сорбционная емкость достигает 5.97% от массы магния или 4% от массы композита в целом; объемная емкость достигает 55 г/л. Эти цифры постоянны для трех циклов сорбции-десорбции. Новый материал перспективен даже для транспортных средств! Правда, после третьего цикла видно небольшое ухудшение кинетики – слегка меняется наклон кривой десорбции (см. врезку на рис. 4). Этот эффект (возможно, связанный с релаксацией структурных дефектов), безусловно, требует дальнейшего изучения.

Чтобы убедиться, что водород идет на образование гидрида магния, а не адсорбируется в полимере, ученые использовали EELS (спектроскопию характеристических потерь энергии электронов). В начальный момент времени наблюдали два четких пика, соответствующих Mg и MgH₂ (пик MgO отсутствует, что дополнительно подтверждает стойкость композита к окислению). Через 5 мин экспозиции интенсивность пика MgH₂ упала до нуля вследствие потери водорода из гидридной фазы.

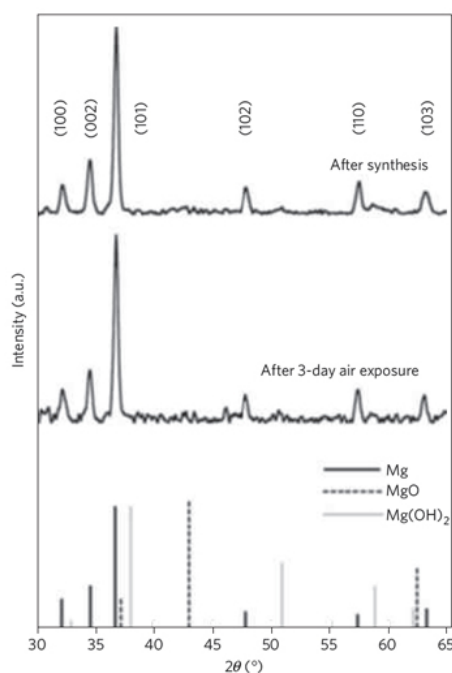


Рис. 3. Дифрактограммы Mg/PMMA композита сразу после синтеза (вверху) и через 3 дня на воздухе. Внизу – справочные данные.

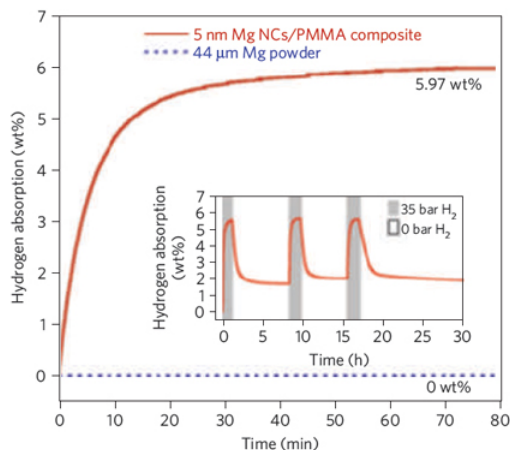


Рис. 4. Сорбция водорода в композите Mg/PMMA (сплошная линия) и в чистом Mg (пунктир) при ~ 35 ат водорода и 200°C. На врезке показаны 3 цикла сорбции-десорбции.

Проанализировав кривые сорбции-десорбции, снятые при трёх различных температурах, авторы работы получили значения энергии активации, равные 25 и 79 кДж/моль для сорбции и десорбции водорода, соответственно. Это сравнимо со значениями, достигнутыми при использовании катализаторов, а в некоторых случаях даже ниже [3].

Для дальнейшей оптимизации нового материала необходимо разобраться в механизме образования гидрида. Результаты моделирования, проведённого с использованием экспериментальных данных, указывают на одномерность роста MgH_2 . Авторы [2] считают, что гидриды образуются и растут вдоль линии дефектов в нанокристаллах магния. Дефекты видны на ТЕМ изображениях, полученных при высоком разрешении (рис. 5).

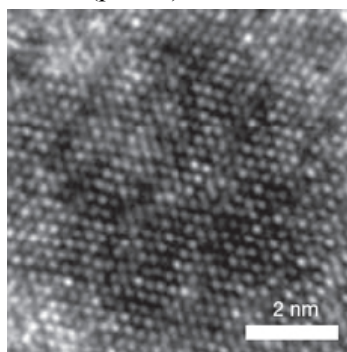


Рис. 5. Изображение отдельного Mg нанокристалла на атомном уровне.

Используя сочетание уникальных свойств газоселективного полимера и наночастиц магния, исследователи добились замечательного успеха. Если подтвердится циклическая стабильность, новый материал, безусловно, поможет решить проблему хранения водорода на борту транспортных средств.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 18, вып. 6, с. 6 \(2011\).](#)
2. [K.-J. Jeon et al., Nature Mater. 10, 286 \(2011\).](#)
3. [ПерсТ 16, вып. 15/16, с. 5 \(2009\).](#)

Загадка углеводородной пирамиды

Еще в 60–50-е годы IV века до н. э. великий древнегреческий мыслитель Платон создал теорию мироздания, поставив в соответствие четырем правильным многогранникам основные стихии: Огню соответствовал тетраэдр, Земле – куб, Воздуху – октаэдр и Воде – икосаэдр. Оставшийся, пятый правильный многогранник, додекаэдр, он назвал образцом для Вселенной. В настоящее время данные многогранники широко известны под названием платоновых тел. Проводя соответствующие аналогии с физикохимией углеводородов и отдавая дань уважения великому философу, углеводородные кластеры, состава C_nH_m , остов которых представляет собой правильный многогранник, принято называть платоновыми углеводородами. Из правил валентности следует, что только три из пяти платоновых тел могут быть построены из фрагментов CH , как единственного типа элементарных строительных блоков.

Этими соединениями являются тетраэдр C_4H_4 , кубан C_8H_8 и додекаэдр $C_{20}H_{20}$. И если кубан и додекаэдр уже успешно получены, то синтез тетраэдрана до сих пор остается для исследователей нерешенной проблемой. Тем более открытым остается вопрос его термической устойчивости, хотя сама молекула довольно часто оказывается в центре внимания теоретических работ. В статье [1] методом молекулярной динамики с потенциалом сильной связи исследована эволюция тетраэдрана (рис. 1) в широком температурном диапазоне.

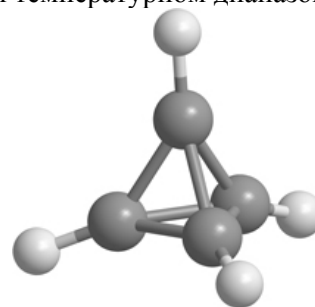


Рис. 1. Тетраэдран C_4H_4

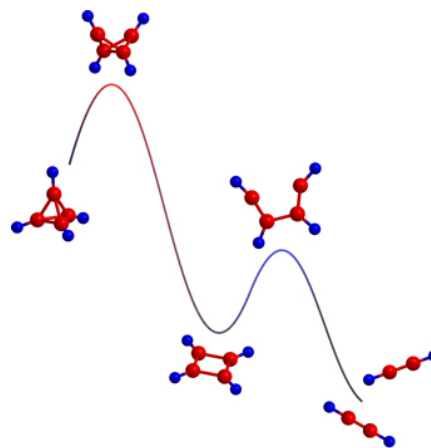


Рис. 2. Схематическое изображение распада молекулы тетраэдрана

Авторы не только детально рассмотрели возможные каналы и окончательные продукты распада тетраэдрана (рис. 2) и определили минимальный энергетический барьер, препятствующий распаду этого метастабильного кластера (0.46 эВ), но и нашли температурную зависимость времени жизни молекулы, которая, как оказалось, отличается от классической аррениусовской. Рассчитанные при этом значения энергии активации и частотного фактора позволили оценить время жизни тетраэдрана при комнатной температуре. Согласно предсказаниям авторов тетраэдран сможет “прожить” не менее пяти минут при 300 К, что делает возможным его получение и регистрацию с помощью различных экспериментальных методик уже при “комнатной”. И хотя из результатов работы [1] не следует прямых рецептов синтеза углеводородной пирамиды, тем не менее, они окажутся полезными при дальнейшем исследовании как самого тетраэдрана, так и новых высокоэнергетических материалов, основанных, например, на его нитрозамещенных производных.

М. Маслов

1. *Chem. Phys.* **387**, 66 (2011).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Суэта в кофейной капле

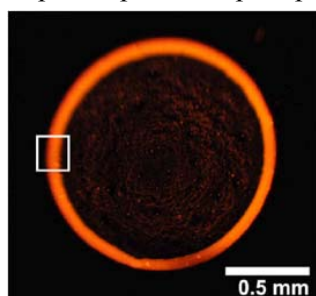
За всякое удовольствие часто приходится платить. Так, чашечка ароматного кофе может обернуться совсем неаппетитными пятнами на окружающих предметах. Голландские ученые подошли к этой проблеме философски, а, точнее, натурфилософски: исследовали подобного типа образования под лупой и микроскопом, сначала оптически, потом – электронным [1]. Почерпнутые ими сведения имеют прямое отношение к высокотехнологичным процессам, используемым в фотонике и биотехнологиях.

В качестве модели кофейной капли был взят коллоидный раствор, в котором роль частичек молотого

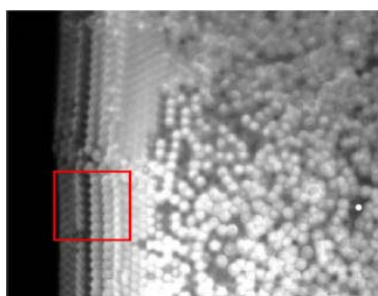
кофе исполняли флюоресцирующие шарики из полистирола. Их гораздо удобнее наблюдать в микроскоп, а высыхание капли происходит так же, как и в случае кофе – с образованием круглого ободка (рис. 1а). Вот почему все процессы, связанные с осаждением коллоидных частиц на неподвижном краю капли жидкости при ее высыхании относят к общему классу явлений типа “кофейные пятна”.

Разумеется, данная проблема имеет свою предысторию, которая описана в популярном комментарии [2]. Так было показано, что для замещения жидкости, испаряемой с краев, в капле возникает поток жидкости от центра к периферии. Этот поток выносит коллоидные частицы к краям капли, где они оседают, образуя ободок.

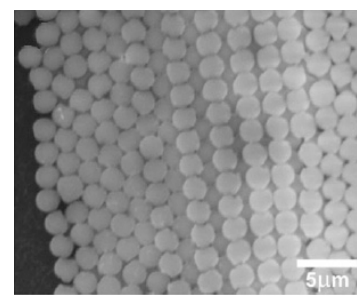
Авторы статьи [1] сосредоточились на структурах, возникающих при осаждении частиц, которые оказались не менее интересным объектом для изучения. В оптический микроскоп хорошо видно, что у края капли частицы образуют упорядоченную кристаллоподобную структуру, которая на расстоянии десятка микрометров от края переходит в неупорядоченную (рис. 1 б). Для объяснения наблюдаемой картины голландцами была разработана модель, учитывающая поле распределения скоростей жидкости капле и его изменение во времени [1]. Процесс осаждения напоминает известную электронную игру “Тетрис”: частицы, выносимые потоком к краям капли, пытаются расположиться максимально плотно, но по мере высыхания капли скорость, с которой они прибывают, возрастает, и у них оказывается все меньше времени на нахождение наилучшего положения, соответствующего плотной упаковке. В момент, непосредственно предшествующий полному высыханию капли, названный авторами [1] “часом пик” скорость потока настолько возрастает, что вместо упорядоченной структуры возникает беспорядок, наблюдаемый в области, отдаленной от границы.



a



b



c

Рис. 1: а) Круговой ободок, остающийся после высыхания коллоидного раствора (“кофейное пятно”); б) изображение в микроскопе участка, выделенного на рисунке (а) на котором видны зоны упорядоченного и неупорядоченного осаждения коллоидных частиц; в) изображение участка, выделенного на рисунке (б), в сканирующем электронном микроскопе: видны сменяющие друг друга гексагонально и кубически упорядоченные решетки из частиц осадка [1].

Однако, на этом голландские исследователи не успокоились: при рассматривании в электронный микроскоп упорядоченных структур становится замет-

ным, что частицы на самом краю образуют гексагональную решетку, которая при движении к центру капли сменяется кубической, а потом снова гексаго-

нальной. Авторы [1] объясняют это явление следующим образом: периферийные участки капли имеют в разрезе клиновидную форму, благодаря чему у самого края возможно существование только одного слоя частиц, и они упорядочиваются оптимальным образом – в гексагональную решетку, а при отдалении от края капли появляется возможность для образования нового кристаллического слоя – ступеньки. Этот новый слой зажат между нижележащим слоем и поверхностью жидкости, и в таком случае более плотной упаковке соответствует кубическая решетка. При отдалении от края ступеньки пространственное ограничение в вертикальном направлении снимается, и упорядочение становится снова гексагональным до появления следующей ступеньки, когда оно сменяется кубическим и т.д.

Эти наблюдения позволили авторам объяснить, почему в субмикронных каплях частицы образуют строго упорядоченные структуры, в то время как в каплях микронного диапазона наблюдаются как упорядоченные, так и аморфные структуры, а в крупных каплях – только неупорядоченные. Ими также выработан ряд рекомендаций, как предотвратить возникновение “часа пик”, что позволит контролировать рост решеток из коллоидных частиц: фотонных кристаллов, сред записи информации и белковых структур.

Вот такие полезные следствия вытекают из чашечки кофе...

А. Пятаков

1. A.G.Marin et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 085502 (2011).
2. G.Huber, *Physics* **4**, 65 (2011).

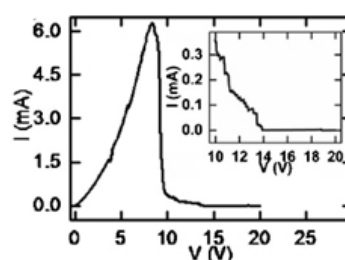
ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Электрический пробой в плотных массивах углеродных нанотрубок

Особый интерес в качестве потенциального элемента будущих нанoeлектронных устройств, отличающихся повышенной информационной емкостью и скоростью обработки информации представляют однослойные УНТ, которые обладают рекордными механическими и теплофизическими характеристиками. Нанотрубки, производимые стандартными методами, обладают значительным неконтролируемым разбросом электронных параметров, что затрудняет их использование в электронных схемах в качестве индивидуальных элементов. В связи с этим внимание научного сообщества сосредоточено главным образом на использовании массивов УНТ, в которых, во-первых, происходит сглаживание указанного разброса параметров индивидуальных нанотрубок, а во-вторых, достигается значительно более высокий ток по сравнению с индивидуальными УНТ. Такие массивы найдут свое применение в экранах для защиты от ВЧ излучения, в качестве полевых транзисторов, в качестве основы гибких мониторов, в сенсорах и т. п. При этом возникает

проблема установления физических факторов, ограничивающих предельно достижимую плотность массива. Пытаясь решить эту проблему, исследователи из Univ. of Central Florida (США) [1] обнаружили связь между предельным током, пропускаемым через массив УНТ, и плотностью массива. Оказалось, что при достаточно высокой плотности массива УНТ электрический пробой одной из нанотрубок в массиве сопровождается лавинообразным ростом тока, который, в конечном счете, приводит к разрушению всего массива.

Массивы продольно ориентированных УНТ со средним расстоянием между нанотрубками от 0.03 до 1 мкм были образованы между Pd и Si/SiO₂ электродами, играющими роль источника и стока. Для ориентации нанотрубок в массиве использовали стандартный метод диэлектрофореза в водном растворе.



Типичная ВАХ массива со средним расстоянием между УНТ ~ 0.03 мкм. Высота нанотрубок – 2 мкм, ширина массива – 25 мкм. На вставке показана ВАХ на последней стадии пробоя.

На рисунке показана типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) массива со средним расстоянием между УНТ ~ 0.03 мкм. Высота нанотрубок – 2 мкм, ширина массива – 25 мкм. Как видно, при повышении приложенного напряжения происходит резкий рост тока, который при достижении определенного значения (около 6 мА) сменяется резким спадом, который имеет характер электрического пробоя и свидетельствует о лавинообразном разрушении массива. Детальные исследования, выполненные на основании анализа микрофотографий, показывают, что причиной пробоя массива является термическое разрушение одной из составляющих его нанотрубок вследствие омического нагрева. В результате этого электрическое поле в окрестности разрушенной нанотрубки превышает среднее значение поля в образце, что способствует разрушению одной из соседних нанотрубок. Процесс разрушения нанотрубок происходит лавинообразно и завершается образованием трещины в массиве, которая препятствует прохождению тока. Подобный механизм пробоя реализуется в случае, если плотность массива достаточно велика. Так, при расстоянии между нанотрубками более 0.12 мкм термическое разрушение нанотрубок при больших токах носит случайный характер, так что вероятность разрушения определенной нанотрубки не зависит от наличия в ее окрестности уже разрушенных УНТ, то есть трещины образуются только в случае достаточно плотных массивов. Таким образом, обнаруженное явление лавинообразного электрического пробоя УНТ в массиве накла-

дывает естественные ограничения на плотность УНТ в массиве.

А. Елецкий

I. S. Shekhar et al., Appl. Phys. Lett. 98, 243121 (2011).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2011)

С 21 по 25 августа 2011 года в Москве на физическом факультете МГУ проходил Московский международный симпозиум по Магнетизму (MISM 2011), на протяжении более десятка лет являющийся крупнейшей конференцией по магнетизму в России. Уже пятый по счету, симпозиум 2011 года, посвященный столетию со дня рождения К.П. Белова и восьмидесятилетию кафедры магнетизма физфака МГУ, собрал 756 человек, из них более трети – гости из дальнего зарубежья.

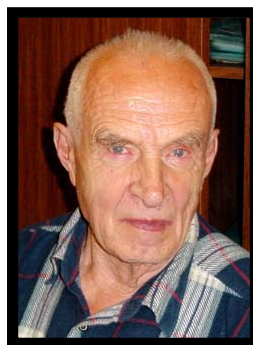
На открытии конференции с лекцией об электронных свойствах графена выступил лауреат Нобелевской премии по физике 2010г. К.С. Новоселов. Хорошо известно, что проводимость и зонная структура этого уникального материала зависят от его формы и механических деформаций. Однако, довольно неожиданным оказался сообщенный Константином Новоселовым факт, что в графене, подвергнутом изгибному сжатию в собственной плоскости, возникает эффективное поле, которое по влиянию на электронную структуру похоже на действие магнитного поля. Оно может, например, привести к возникновению аналога квантового эффекта Холла. Сжатие 10% соответствует псевдомагнитному полю величиной порядка 10Тл, и это не предел – наблюдение электронных спектров в графене дает величины эффективного поля свыше 300 Тесла.

На конференции работало 16 секций с самой разнообразной тематикой, как традиционные (микромагнетизм, магнетизм и сверхпроводимость, магнитомягкие и магнитожесткие материалы), так и появившиеся относительно недавно: спинтроника, метаматериалы, мультиферроики. Также работала мемориальная секция, на заседаниях которой вспоминали выдающихся отечественных ученых К.П. Белова, А.С. Боровика-Романова, С.В. Вонсовского, Ю.А. Изюмова, С.В. Тябликова и Е.А. Турова.

По тематике пленарных докладов, представляемых на MISM, можно судить о наиболее актуальных направлениях в магнетизме: спиновая электроника, магнитофотоника, магнитоэлектрические материалы и мультиферроики, магнитные наноструктуры и низкоразмерный магнетизм, магнетизм и сверхпроводимость, магнетизм в биологии и медицине.

Наконец, нельзя не отметить богатую культурную программу конференции: поход на балет, многочисленные экскурсии, в том числе – по Музею земледелия и Ботаническому саду МГУ.

Узнать более подробную информацию, а также ознакомиться с тезисами конференции можно на сайте <http://mism.magn.ru>.



Памяти Ю.К. Мухина

1 сентября 2011 г. ушел из жизни наш родной ЮК - Юрий Константинович Мухин, который с основания ПерсТа и до самых последних лет брал на себя всю самую тяжелую и зачастую неприятную часть работы по изданию и распространению нашего бюллетеня. ЮК был истинной душой ПерсТа: без его фантастической добросовестности, трудолюбия и отеческой заботы ПерсТ вряд ли просуществовал бы так долго. И вот ЮК больше нет с нами... Мы разделяем скорбь о тяжелой утрате с его родными и близкими, а также с множеством людей, его знавших и ценивших.

Редакция и авторы ПерсТа

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

Ответственный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

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

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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