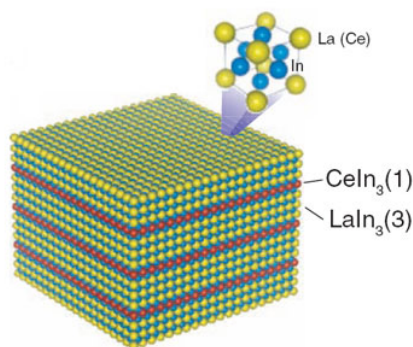


В этом выпуске:

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Регулировка размерности тяжелофермионного соединения $CeIn_3$

Одной из задач физики конденсированного состояния вещества является поиск и всестороннее исследование новых материалов с сильным кулоновским взаимодействием между электронами. Такие материалы представляют огромный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения (например, вещества с гигантским магнитосопротивлением сейчас очень широко используются в устройствах магнитной записи). Необычные свойства этих материалов обусловлены тем, что электронная подсистема, стремясь понизить свою энергию, перестраивается таким образом, чтобы минимизировать электрон-электронное отталкивание, в результате чего возникают различные, зачастую весьма экзотичные “коллективные” состояния. Так как в низкоразмерных (например, слоистых) соединениях кулоновское отталкивание играет гораздо более существенную роль, чем в трехмерных, то именно они привлекают к себе повышенное внимание.



Гетероструктура $CeIn_3/(LaIn_3)_3$.

В работе [1] японские физики продемонстрировали способ контроля эффективной размерности одного из типичных представителей сильнокоррелированных систем – антиферромагнетика $CeIn_3$, в котором носителями тока являются так называемые тяжелые фермионы с большой

эффективной массой. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии они вырастили сверхрешетки из чередующихся слоев $CeIn_3$ и немагнитного металла $LaIn_3$ (см. рис.). При уменьшении числа n слоев $CeIn_3$ в элементарной ячейке наблюдалось уменьшение температуры T_N антиферромагнитного упорядочения спинов f -электронов, а при $n = 2$ антиферромагнетизм вообще исчезал. По-видимому, система с $n = 2$ находится в непосредственной близости к точке квантового фазового перехода. Об этом говорит, во-первых, очень сильная чувствительность удельного сопротивления ρ к магнитному полю (признак рассеяния электронов на длинноволновых магнитных флуктуациях) и, во-вторых, линейная зависимость ρ от температуры. Таким образом, если обычно квантовый фазовый переход имеет место при изменении какого-либо “внешнего” параметра (магнитного поля, давления и т.д.), то в [1] он наблюдался при понижении размерности системы. Заметим, что взаимная диффузия атомов La и Ce между слоями приводит к образованию структурных дефектов. Чтобы избежать этого, можно попробовать заменить La на переходный металл с меньшим ионным радиусом. Не исключено, что тогда в квантовой критической точке обнаружится сверхпроводимость.

1. H.Shishido et al., *Science* **327**, 980 (2010).

И далее ...

- 2 Ультрахолодный газ ферми-атомов: сюрприз в режиме сильного взаимодействия

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Тончайшие сверхпроводники

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Новые свойства пористого графена

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Лазер для фононов

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Влияние многочастичных эффектов на диэлектрическую щель в углеродных нанотрубках

- 5 Нанотрубки для садоводов и огородников
- 6 Газовый сенсор на основе однослойной нанотрубки
- 7 Теплопроводность графеновых полосок

ТОРЖЕСТВО

- 8 80-летие Ж.И. Алферова

КОНФЕРЕНЦИИ

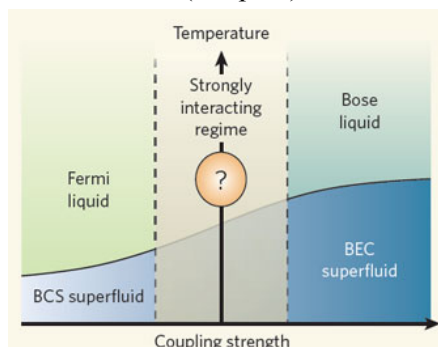
Научная сессия ОФН РАН, посвященная 90-летию со дня рождения А.С.Боровика-Романова 24 марта 2010 г.

International conference on High Pressure Research, 25-29 July 2010, Uppsala, Sweden

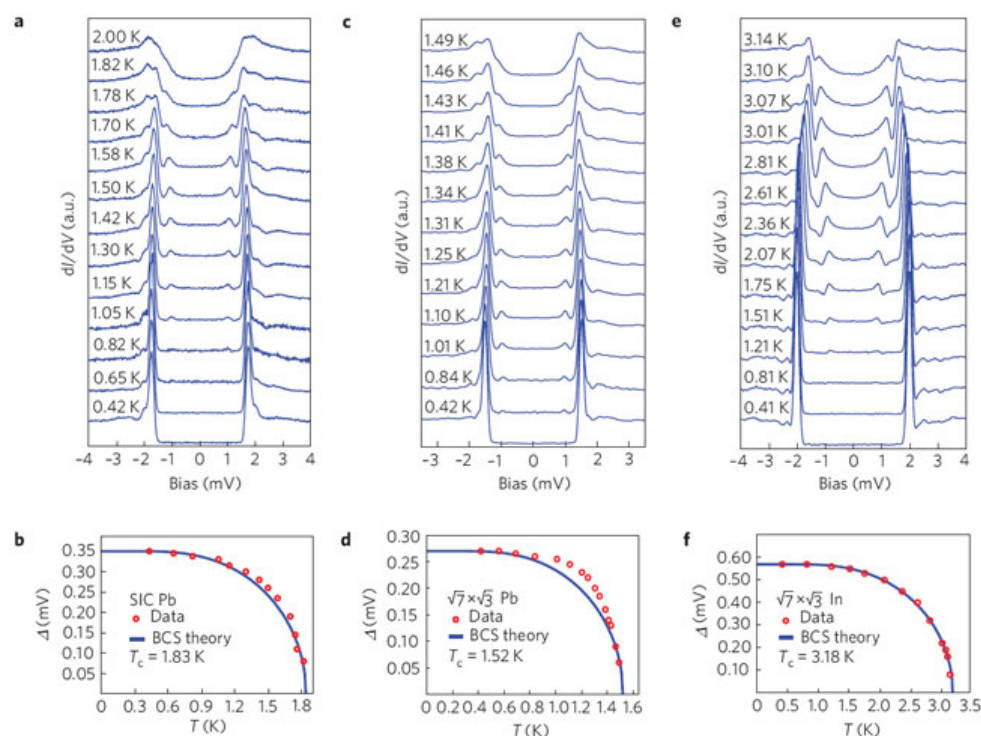
International Conference on Quantum Phenomena in Complex Matter (Superstripes 2010), 19-25 July 2010, Erice – Italy

Ультрахолодный газ ферми-атомов: сюрприз в режиме сильного взаимодействия

В последние годы большое внимание привлекают к себе охлажденные до сверхнизких температур газы ферми-атомов. В окрестности резонанса Фешбаха сила межчастичного взаимодействия в них легко контролируется путем изменения внешнего магнитного поля. При этом можно достичь и так называемого “унитарного предела”, в котором взаимодействие максимально, а термодинамические свойства системы не зависят от его конкретной природы, то есть являются универсальными (одинаковыми и в конденсированном веществе, и в нейтронной звезде). Такие атомные ферми-газы рассматриваются, в частности, как модельные физические системы для изучения перехода от БКШ-состояния (слабое взаимодействие) к сверхтекучему состоянию, когда сильно взаимодействующие фермионы объединяются в пары – бозоны, которые образуют бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК). А какая фаза разделяет БКШ и БЭК (см. рис.)?



Увеличение силы межчастичного взаимодействия ведет к переходу от БКШ-сверхпроводимости к сверхтекучести локальных пар. А что посередине?



Температурные зависимости дифференциальных ВАХ и сверхпроводящей щели Δ эпитаксиальных монослоев Pb/Si(111), имеющих разную структуру, и In/Si(111).

Согласно современным теоретическим воззрениям, нормальное состояние этой фазы не является ферми-жидкостью. Но эксперименты с газом атомов Li показали, что это не так: отличия от ферми-жидкостного поведения если и есть, то весьма незначительные. Какие из этого можно сделать выводы? Ну, например, такой: многочисленные отклонения от предсказаний теории ферми-жидкости в купратных ВТСП говорят о неприменимости к ним модели унитарного ферми-газа.

1. S.Nascimbene et al., *Nature* **463**, 1057 (2010).

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Тончайшие сверхпроводники

Вопрос о влиянии размеров сверхпроводника на его критическую температуру T_c имеет давнюю историю. Так, например, в ультратонких пленках термические и/или квантовые флуктуации могут приводить к разрушению когерентного сверхпроводящего состояния. А как при этом T_c зависит от толщины пленки d ? И какова минимальная величина d , при которой сверхпроводимость еще сохраняется? Много работ на эту тему посвящено пленкам свинца на кремниевых подложках, что обусловлено хорошим соответствием решеток Pb и Si и возможностью контролировать d с точностью до одного монослоя (monolayer, ML). В частности, были обнаружены осцилляции T_c как функции d [1] и установлено, что пленки с $d = 2$ ML еще сверхпроводят [2]. Высказывались предположения, что 2 ML – это предел, когда электроны еще сохраняют хоть какую-то способность двигаться в поперечном направлении.

И вот появилось сообщение [3] о регистрации сверхпроводимости пленок Pb и In с $d = 1$ ML. Для этой цели авторы [3] использовали сканирующую туннельную спектроскопию (СТС). При $T < T_c$ они наблюдали на туннельных спектрах когерентные пики и по расстоянию между ними определили температурную зависимость сверхпроводящей щели Δ (см. рис.). В пленках Pb величина $T_c = (1.5 \div 1.8)$ К оказалась существенно ниже, чем T_c в объеме (7.2 К), а в пленках In – лишь не намного меньше (3.2 К и 3.4 К). Отношение $2\Delta/k_B T_c$ во всех пленках превышает 4. Это больше БКШ-значения 3.5 и говорит о сильном электрон-фононном взаимодействии. Интересно, что в объемных образцах индия $2\Delta/k_B T_c = 3.6$, то есть понижение размерности системы ведет к усилению электрон-фононной связи. При увеличении перпендикулярного пленкам магнитного поля авторы [3] наблюдали (опять же с помощью СТС) проникновение в них все новых и новых магнитных вихрей – вплоть до полного покрытия вихрями всей пленки и исчезновения сверхпроводимости.

Заметим, что изученные в [3] пленки все же были не “свободными”, а размещались на поверхности подложки. Поэтому об их сверхпроводимости было бы, наверное, правильнее говорить как о поверхностной, а не о двумерной. Какую роль здесь играет взаимодействие между атомами пленки и подложки, пока не вполне ясно.

Л.Опенков

1. Y.Guo et al., *Science* **306**, 1915 (2004).
2. S.Qin et al., *Science* **324**, 1314 (2009).
3. T.Zhang et al., *Nature Phys.* **6**, 104 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Новые свойства пористого графена

Высокая популярность графена или, по-другому, моноатомного графитового слоя обусловлена не только его необычными физико-химическими свойствами, но и перспективами практического применения. Многие исследователи сходятся во мнении, что графен может сыграть ключевую роль в элегантном решении многих прикладных задач. Сегодня, среди наиболее смелых предложений можно услышать о постепенной замене кремния в элементах нанoeлектроники, а также активном использовании графена в энергетике в качестве водородозапасающего материала. Более того, графен является “прародителем” не менее интересных и многообещающих наноматериалов, таких как графан [1] и, так называемый, пористый графен (PG). Пористый графен представляет собой двумерную структуру, образованную фенильными кольцами (рис. 1). Постоянная решетки такой двумерной системы составляет около 7.5 Å. Несомненно, наличие полостей в графене существенно повлияет на его характеристики. Однако в некоторых приложениях использование модифицированного графена наверняка будет более предпочтительным. Собственно моделированию свойств PG и

ПерсТ, 2010, том 17, выпуск 5

посвящена работа [2]. Авторы выполнили ряд *ab initio* расчетов, в том числе с помощью довольно популярного программного пакета VASP, и показали что “пористость” графена приводит к образованию у последнего запрещенной зоны (напомним, что в зонной структуре обыкновенного графена запрещенная зона отсутствует).

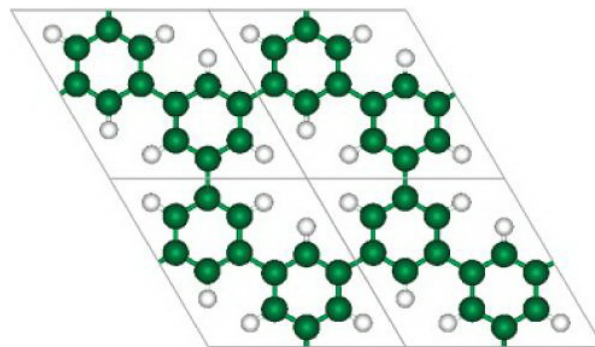


Рис. 1. Общий вид пористого графена (зеленые шары соответствуют атомам углерода, белые шары – атомам водорода).

Исходя из результатов расчета, ее ширина составила 3.2 эВ, что вполне сопоставимо, например, с шириной запрещенной зоны диоксида титана, находящего широкое применение в фотокатализе. Авторы предполагают, что кроме приложений нанoeлектроники пористый графен мог бы стать прекрасным кандидатом для решения актуальной проблемы поиска фотокаталитических систем на основе широкозонных полупроводников. Еще одним не менее важным результатом стало то, что Li-PG способен запасть гораздо больше молекулярного водорода, чем допированный литием традиционный графен. Содержание водорода в таком соединении, по прогнозам авторов, составит до двенадцати массовых процентов (рис. 2).

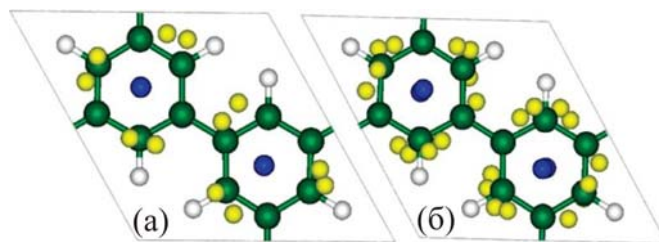


Рис. 2. Молекулы водорода адсорбированные на поверхности пористого графена (вид сверху): шесть молекул водорода, адсорбированных на поверхности пористого графена, допированного двумя атомами лития (а), двенадцать молекул водорода, адсорбированных на поверхности пористого графена, допированного четырьмя атомами лития (б). Зеленые шары – атомы углерода, белые шары – атомам водорода, синие шары – атомам лития и желтые шары соответствуют физически адсорбированным молекулам водорода.

Будем надеяться, что представленные результаты окажутся полезными для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований пористого графена, тем более что его непосредственный синтез уже успешно осуществлен [3].

М. Маслов

1. [ПерсТ 16, вып. 4, с. 8 \(2009\).](#)
2. A.Du et al., *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 2876 (2010).
3. M.Bieri et al., *Chem. Commun. No.* 45,6919 (2009).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Лазер для фононов

В конце февраля в *Physical Review Letters* появилось сразу два сообщения о квантовых генераторах звука: под действием оптической накачки возникает излучение когерентных фононов [1,2] (см. также их популярное изложение в [3]).

В первом виде устройств, реализованных сотрудниками California Inst. of Technology, Pasadena (США) [1], двухуровневая система возникла в так называемой “оптической молекуле” – двух связанных диэлектрических микрорезонаторах с оптическими модами типа шепчущей галереи (рис.1). Регулируя величину зазора между резонаторами, можно создать расщепление между собственными частотами системы двух связанных осцилляторов, совпадающее с частотой акустического резонанса этой системы. При этом фотоны излучения накачки, поступающего по оптическому волокну, распадаются на фонон и фотон более низкой частоты (см. рис. 1а) – явление, известное как вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

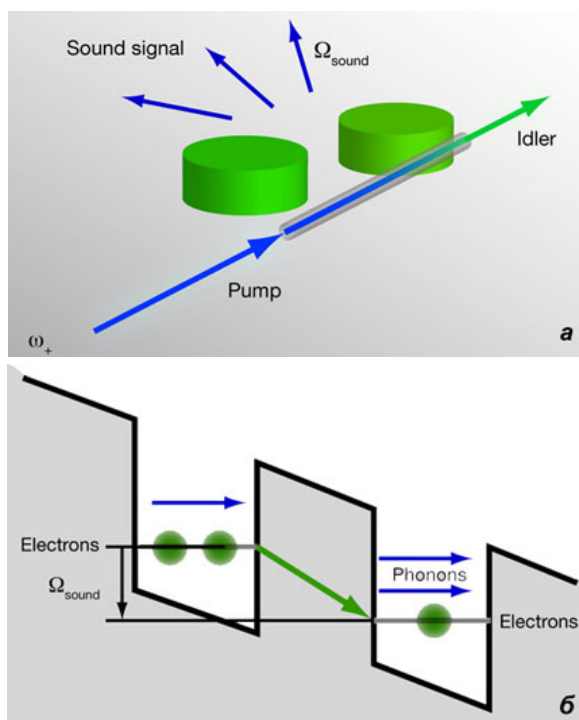


Рис. 1. *а* - Фононный лазер на “оптической молекуле” (размеры дисков ~ 60 мкм), pump – оптическое излучение с частотой накачки, idler – оптическое излучение на холостой частоте; *б* - усиление звука в системе квантовых ям во внешнем электрическом поле: расстояние между соответствующими электронными уровнями в соседних ямах соответствует частоте фононов [3].

Авторам [1] удалось продемонстрировать все характерные признаки установления режима генерации: пороговую зависимость интенсивности звукового излучения от мощности накачки и сужение

спектра звуковых волн в режиме выше порога генерации. Любопытно, что если сравнить эту ситуацию с обыкновенным лазером, то вещество и электромагнитное поле как бы меняются местами: энергетические уровни возникают не для электронов, а для фотонов, а порождаемое излучение представляет собой колебания частиц вещества, а не электромагнитного поля.

Второй подход, использованный учеными из Univ. of Nottingham (Великобритания), [2] более традиционен и напоминает принцип генерации терагерцового электромагнитного излучения в каскадном лазере (см. ПерсТ [4]). Оптической накачкой от фемтосекундного лазера достигается инверсная населенность электронных уровней в полупроводниковых гетероструктурах на основе GaAs/AlAs. Под действием приложенного электрического напряжения электроны туннелируют от одной квантовой ямы к другой, испуская при каждом переходе фонон (рис. 1б). И хотя авторам [2] не удалось продемонстрировать режим генерации, а лишь только усиление звука, частота звуковых фононов составляет половину терагерца. Это является существенным шагом на пути к терагерцовому фононному лазеру, создание которого предоставит уникальные возможности по концентрации звуковой энергии в субмикронных областях, а также откроет новую область звуковой микроскопии с субмикронным разрешением.

А.Пятаков

1. I.S.Grudin et. al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 083901 (2010).
2. R.P.Beardsley, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 085501 (2010).
3. J.B.Khurgin, *Physics* **3**, 16 (2010).
4. [ПерсТ 15, вып. 15/16, с. 3 \(2008\).](#)

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Влияние многочастичных эффектов на диэлектрическую щель в углеродных нанотрубках

Одностенные углеродные нанотрубки получают путем сворачивания графитовых листов (монослоев графена) в узкие полые цилиндры диаметром $d \approx 1$ нм и длиной ~ 1 мкм. В зависимости от своей хиральности (определяемой конкретным типом сворачивания графена) нанотрубки могут быть либо металлическими (плотность электронных состояний на уровне Ферми отлична от нуля), либо полупроводниковыми (уровень Ферми находится в запрещенной энергетической зоне – диэлектрической щели, ширина E_g которой уменьшается с ростом d по закону $E_g \sim 1/d$), что первоначально было предсказано путем простых расчетов одночастичной электронной структуры нанотрубок, а затем подтверждено экспериментально сканирующей туннельной спектроскопией (СТС). При этом теория и эксперимент для нанотрубок различного диаметра практически совпадали. Но поскольку нанотрубки

представляют собой квазиодномерные объекты, то электрон-электронное взаимодействие в них должно быть гораздо более существенно, чем, например, в графене (и тем более – в трехмерных углеродных структурах). Поэтому большой интерес представляет исследование влияния многочастичных эффектов на электронное строение нанотрубок, в том числе на величину E_g .

В работе [1] французские физики измерили СТС-спектры отдельных нанотрубок в жгутах, полученных на подложках Au(111) дуговым разрядом (рис. 1а). Оказалось, что в полупроводниковых нанотрубках одинакового диаметра и хиральности щель E_g существенно зависит от положения нанотрубки в жгуте: для нанотрубки, непосредственно контактирующей с подложкой, величина E_g совпадает с одночастичными расчетами, но при этом на 20÷30 % меньше, чем для нанотрубок, расположенных на вершине жгута (рис. 1б).

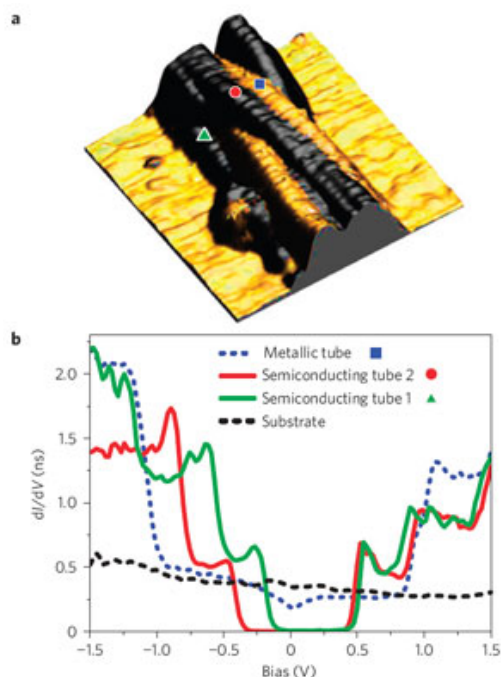


Рис. 1. *a* – Топографическое изображение ($40 \times 40 \text{ нм}^2$) жгута из нанотрубок на поверхности Au(111); *b* – локальные дифференциальные ВАХ подложки, металлической нанотрубки и двух полупроводниковых нанотрубок, измеренные в указанных на рис. *a* точках.

Для последней же, напротив, экспериментальная величина E_g близка к расчетной с учетом кулоновского отталкивания электронов. Причиной уменьшения E_g в нанотрубках, лежащих на металлической подложке, является эффект экранирования, обусловленный потенциалом изображения. Ранее применительно к нанотрубкам этот эффект не учитывался (хотя и был известен из экспериментов по адсорбированным на металле молекулам), что приводило к заниженным (но согласующимся с одночастичной моделью!) величинам E_g . По мере удаления нанотрубки от подложки потенциал изображения ослабевает, и E_g выходит на константу, опреде-

ляемую в значительной мере межэлектронными многочастичными взаимодействиями. Их вклад в E_g составляет $\approx 0.5 \text{ эВ}$ – около 50 %. Отметим, что знание истинных величин E_g в изолированных углеродных нанотрубках, а также понимание влияющих на E_g факторов чрезвычайно важно для практического использования нанотрубок в молекулярной электронике и спинтронике.

Л.Опенков

1. H.Lin et al., *Nature Mater.* **9**, 235 (2010).

Нанотрубки для садоводов и огородников

Ученые продолжают изучать воздействие наноматериалов на растения. В ПерсТе [1] уже сообщалось об исследованиях, результаты которых показали (на примере культуры табака), что одностенные углеродные нанотрубки могут проходить через прочные клеточные стенки растений. В другой работе [2] представлено свидетельство того, что углеродные наночастицы (фуллерены и многостенные нанотрубки) поглощаются и накапливаются в рисе, одном из самых важных сельскохозяйственных растений. В результате они замедляют развитие растений, мешая поступлению воды и питательных веществ. Однако недавно американские ученые показали, что углеродные нанотрубки (УНТ) могут и положительно влиять на прорастание семян и развитие рассады [3].

Для экспериментов исследователи использовали семена томатов сорта *Micro-Tom* (рис. 1). Семена проращивали в стандартной питательной среде.



Рис. 1. Томаты *Micro-Tom* – маленькие кустики высотой до 20 см, с небольшими красными помидорчиками. Как уверяет реклама, “идеальный выбор садоводов для выращивания на подоконнике круглый год”.

Добавление в питательную среду многостенных углеродных нанотрубок (10, 20, 40 мкг/мл) привело к тому, что семена стали прорастать уже на третий день – гораздо быстрее, чем обычно (рис. 2). И развивались растения лучше (рис. 3).



Рис. 2. Семена томатов на третий день проращивания в среде без УНТ (слева) и с УНТ (справа).

Гипотеза авторов такова. Углеродные нанотрубки проникают через оболочки семян и способствуют поступлению воды, которая важна для прорастания. Для подтверждения этого с помощью термогравиметрического анализа был определен уровень влажности семян томата (определяли потерю массы при нагреве от комнатной температуры до 250°C с последующей выдержкой 120 минут). Сначала измеряли уровень влажности сухих семян, затем семян, нахо-

дившихся 2 суток в питательной среде с УНТ и без УНТ. Результаты таковы: 18,4 % для исходных сухих семян, 57,6% для семян в среде с УНТ и 38,9% - без УНТ.



Рис. 3. 27-дневная рассада томатов, выращенная на среде без УНТ (слева) и с добавками 10 мкг/мл УНТ (в центре) и 40 мкг/мл УНТ (справа).

Углеродные нанотрубки действительно проникли через толстую оболочку семян. Это подтвердили исследования с помощью рамановской спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии (рис. 4). Но как они помогают поступлению воды, не ясно. Напомним, что по другим данным [2], УНТ как раз мешают этому.

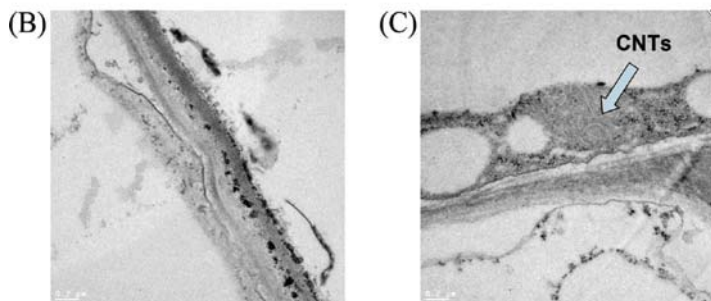
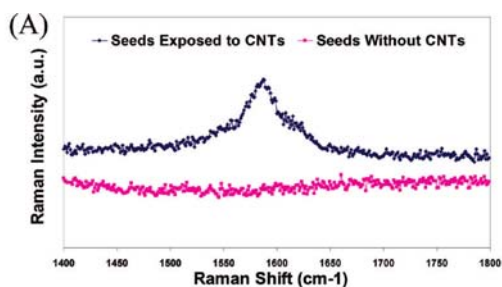


Рис. 4. Обнаружение УНТ внутри семян с помощью рамановской спектроскопии (А); ТЕМ изображения корней 25-дневной рассады, выращенной на среде без УНТ (В) и с УНТ (С).

Различные предположения авторов (возникновение в оболочке семян новых пор; влияние УНТ на существующие водные каналы - аквапорины*) пока ничем не подтверждены. Ученые понимают, что впереди новые исследования. Тем не менее, полученные результаты могут оказаться полезными для развития сельского хозяйства, садоводства и даже энергетики (производство биотоплива). Возможно также, что на основе углеродных нанотрубок, проникающих сквозь клеточные стенки растений, плотные оболочки семян, удастся создать системы доставки питательных веществ в растения, то есть разработать наноудобрения [4]. Пока еще в этой области нанотехнологии применяются слабо, гораз-

до меньше, чем, например, в фармацевтике. Авторы [4] рассуждают о том, как было бы замечательно создать такие наносистемы доставки основного питательного элемента растений - азота. Сейчас коэффициент его использования растениями очень мал – редко достигает 50% из-за выноса легкорасстворимых нитратов и солей аммония из почвы, из-за газообразных потерь и др. А вот если удобрение поместить в нанотрубки, они будут защищать его от воды, почвы, микроорганизмов, пока не доставят внутрь растения. В идеале будет обеспечен контроль над выделением нужного количества азота в нужном месте растения. При этом, безусловно, очень важными остаются вопросы потенциальной опасности воздействия наноматериалов на окружающую среду и организм человека.

* Аквапорины - мембранные белки, формирующие поры в мембранах клеток человека, бактерий и др. Выполняют незаменимую роль в системе водного транспорта растений. За открытие и исследование аквапорина американский ученый Питер Эгр (Peter Agre) получил в 2003 г. Нобелевскую премию по химии.

О.Алексеева

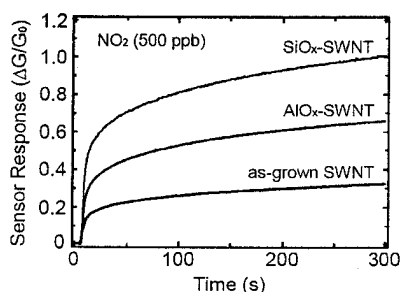
1. [ПерсТ 16, вып. 9, с. 6 \(2009\).](#)
2. [ПерсТ 16, вып. 19, с. 4 \(2009\).](#)
3. M.Khodakovskaya et al., ACS Nano 3, 3221 (2009).
4. M.C.DeRosa et al., Nature Nanotech. 5, 91 (2010).

Газовый сенсор на основе однослойной нанотрубки

Высокая чувствительность электронных характеристик углеродных нанотрубок (УНТ) к наличию присоединенных или сорбированных на их поверхности функциональных химических групп открывает возможность разработки сверхминиатюрных сенсоров на основе УНТ. Однако многочисленные усилия исследователей, направленные на решение этой задачи, не привели до сих пор к существенным практическим успехам. Это связано с трудно устранимым влиянием различных атмосферных загрязнений, паров воды, атомов и молекул кислорода и т.п. на электронные свойства УНТ. Кроме того, стабильность характеристик сенсоров на основе УНТ существенно снижается в результате образования структурных дефектов, обусловленных многократными актами адсорбции/десорбции. Один из эффективных подходов к преодолению указанных трудностей, предложенный в Osaka Univ. (Япония), [1] заключается в покрытии УНТ защитным слоем металл/оксид, предохраняющим ее поверхность от образования дефектов. Сенсорное устройство включает в себя Pt электрод шириной 50 мкм и толщиной 1 мкм, изолирующий слой оксида алюминия и Pt нагреватель.

Тонкую пленку однослойных УНТ выращивали методом химического осаждения (CVD), после чего на нанотрубки методом импульсного лазерного осаж-

дения при комнатной температуре, давлении 10^{-4} Торр и слабом потоке кислорода наносили слой SiO_x и AlO_x толщиной 2 – 5 нм. В качестве мишеней для лазерного осаждения использовали монокристаллический кремний и таблетку Al чистотой 99.999 %. Последующий отжиг УНТ пленки с защитным слоем в атмосфере Ar/H_2 (20:1) в течение 30 мин при температуре 400°C приводил к образованию кислород-дефицитного покрытия. Структура, состав и электрические свойства полученных образцов исследовали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Изготовленный на основе полученных образцов сенсор испытывали при комнатной температуре в отношении регистрации NO_2 , разбавленного азотом. Зависимости сигнала сенсора от времени, полученные для исходных образцов УНТ, а также для образцов УНТ с покрытием SiO_x и AlO_x показаны на рисунке.



Зависимости отклика (отн. ед.) от времени для сенсоров на основе УНТ и образцов УНТ с покрытием SiO_x и AlO_x .

Как следует из результатов измерений, разработанный сенсор позволяет надежно регистрировать содержание NO_2 в газовой смеси на уровне 10^{-4} % и ниже. Результаты проведенных тестов показали, что, в то время как разброс показаний сенсора на основе исходных УНТ составляла порядка 40%, покрытие нанотрубок оксидами приводила к снижению этого показателя до 7–8 %; а зависимость сигнала сенсора (S) от концентрации (NO_2 C) при фиксированной длительности измерения (300 с) описывается классическим соотношением Фрумкина-Темкина $S = a \ln(bC) + a \ln C$, где a и b – эмпирические параметры.

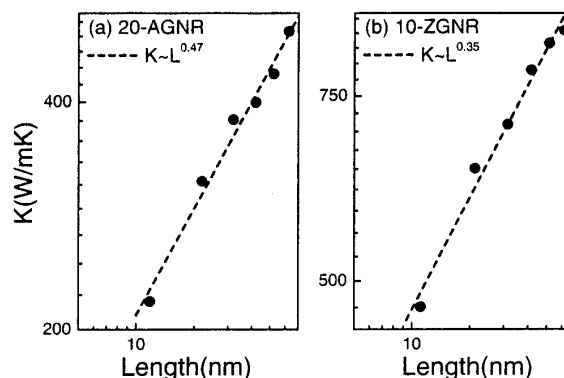
А.Елецкий

1. W.Wongwiriyan et al., *Appl. Phys. Express* 2, 095008 (2009).

Теплопроводность графеновых полосок

Интерес к исследованию графенов, которые представляют собой регулярные двумерные структуры, выложенные атомами углерода, существенно возрос после их успешного синтеза в 2004 г. А такие свойства графенов, как высокая электропроводность и теплопроводность, в сочетании с химической, термической и механической стабильностью делают графены потенциальным элементом буду-

щих нанoeлектронных устройств и систем. Особый интерес вызывает рекордно высокая теплопроводность графенов, поскольку это свойство в сочетании с миниатюрными размерами позволяет в принципе решать проблему теплоотвода из быстродействующих информационных систем. Анализ показывает, что теплопроводность графенов является монотонно возрастающей функцией их размера, что связано с фоновым механизмом теплопроводности. Чем больше размер образца, тем больше фононов различной длины волны, способных переносить тепловую энергию. Как следует из результатов косвенных измерений, коэффициент теплопроводности графенов большой площади может достигать величин порядка 5000 Вт/мК, что более чем вдвое превышает соответствующую величину для графита и является рекордной для всех известных материалов. Высокая теплопроводность графенов обусловлена их структурным совершенством, степень которого, однако, снижается при увеличении их размеров. В связи с трудностью прямых измерений теплопроводности графенов, представляется целесообразным осуществление последовательных расчетов теплопроводности графенов различного размера, с тем чтобы установить размерный эффект коэффициента теплопроводности. Подобные расчеты выполнены группой исследователей из Fudan Univ., Shanghai (Китай) [1], которые использовали для этой цели неравновесный метод молекулярной динамики. Согласно указанному методу, на основании интегрирования уравнений движения частиц с интервалом времени 0.5 фс проводится вычисление теплового потока через графеновую полоску, помещенную между двумя термостатами с температурами 290 и 310 К. Результаты вычислений усредняются по временам 10^7 нс. Коэффициент теплопроводности определяется как отношение вычисленного теплового потока к градиенту температуры. Вычисления проводили для графеновых полосок различной длины и различной структуры боковой границы. Результаты приведены на рисунке.



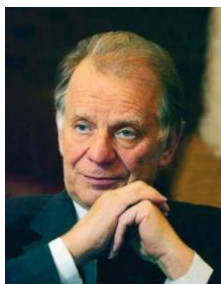
Зависимость коэффициента теплопроводности графеновых полосок от длины: а - кресельная структура боковой границы полоски, ширина полоски составляет 20 элементарных ячеек; б - зигзаговая структура боковой границы полоски, ширина полоски составляет 10 элементарных ячеек.

Обращает на себя внимание существенная зависимость коэффициента теплопроводности графеновых полосок не только от их длины, но также и от структуры их боковой границы (хиральности). Экстраполяция полученных данных на длину 2 мкм приводит к величинам теплопроводности двух типов графенов – 2400 и 3000 Вт/мК, что хорошо согласуется с результатами измерений [2], согласно которым коэффициент теплопроводности графенов длиной от 1 до 5 мкм находится в диапазоне от 3000 до 5000 Вт/мК.

А.Елецкий

1. Z. Guo et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**, 163103 (2009).
2. Ghosh et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 151911 (2008).

ТОРЖЕСТВО



15 марта 2010 г. исполняется **80 лет** лауреату Нобелевской премии по физике Жоресу Ивановичу Алфёрову. Его исследования заложили основы принципиально новой электроники. Он является автором 50 изобретений, 500 научных работ. Без разработанных им технологий такие привычные

сегодня вещи, как мобильный телефон или скоростной Интернет, просто не могли бы существовать. “Это человек, работы которого останутся в истории мировой цивилизации, - считает академик Владимир Фортов. – Эти работы из тех, что определяют направления научного развития на десятилетия”. Накануне своего юбилея, в интервью СМИ, Жорес Иванович говорил о том, что самым главным подарком к своему юбилею, он считает доклады молодых ученых, отмеченных премией Алферовского фонда. Они соберутся со всей страны. “Слушать их - самое большое удовольствие для меня”, - признался академик Алфёров.

ПОЗДРАВЛЯЕМ Жореса Ивановича Алфёрова с ЮБИЛЕЕМ! Желаем здоровья, благополучия, творческих успехов, новых свершений и открытий!

Авторы и редакция ПерсТа

КОНФЕРЕНЦИИ



Научная сессия ОФН РАН, посвященная 90-летию со дня рождения А.С.Боровика-Романова, 24 марта 2010 г. (15:00) (ИФП им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина, д.2)

ПОВЕСТКА

1. Академик **А.Ф. Андреев** – вступительное слово
2. **А.И. Смирнов**, **Л.Е. Свистов**, **Л.А. Прозорова** (ИФП им. П.Л. Капицы РАН), **О.А. Петренко** (University of Warwick, Coventry, Великобритания), **М. Hagiwara** (Osaka University, Япония)
Квазидвумерный антиферромагнетик на треугольной решетке
3. **Ю.М. Буньков** (Institut Néel, CNRS, Grenoble, Франция)
Бозе-эйнштейновская конденсация магновов в сверхтекучем ^3He
4. **С.О. Демокритов** (University of Münster, Германия)
Кинетика и бозе-эйнштейновская конденсация магновов при комнатной температуре

Web: <http://www.gpad.ac.ru/>

International conference on High Pressure Research, 25-29 July, 2010, Uppsala, Sweden

Abstract submission - 31st March 2010

E-mail: rajeev.ahuja@fysik.uu.se

Web: <http://ehprg2010.fysik.uu.se>

International Conference on Quantum Phenomena in Complex Matter (Superstripes 2010), 19 - 25 July 2010, Erice – Italy

Abstract submission - 30 March 2010

E-mail: Conf.Stripes@roma1.infn.it

Web: <http://superstripes.com>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «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