

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

О влиянии деформации на критическую температуру Sr_2RuO_4

Слоистый перовскит Sr_2RuO_4 относится к “необычным” сверхпроводникам с триплетным типом спаривания (спины электронов в куперовских парах сонаправлены). Предполагается, что параметр сверхпроводящего порядка является хиральным и имеет $p_x \pm ip_y$ симметрию. Для проверки этой гипотезы в работе [1] (Германия, Великобритания, Япония, Нидерланды, США) изучено влияние одноосного сжатия и растяжения (ε) на температуру сверхпроводящего перехода T_c . В отличие от теоретически ожидаемого излома $T_c(\varepsilon)$ при $\varepsilon = 0$ (рис. 1) авторы [1] наблюдали квадратичную зависимость T_c от ε (рис. 2).

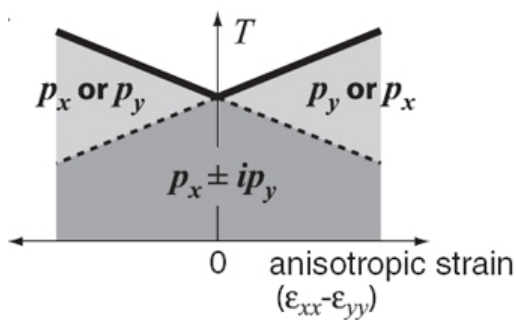


Рис.1. Фазовая диаграмма, ожидаемая для $p_x \pm ip_y$ сверхпроводимости в тетрагональном кристалле.

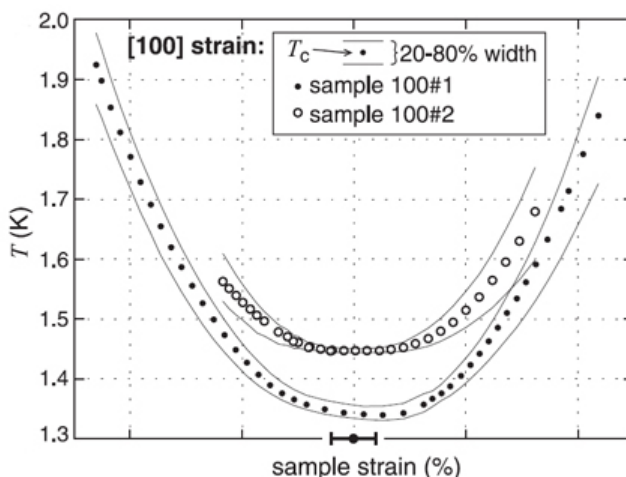


Рис. 2. Экспериментальная зависимость температуры сверхпроводящего перехода Sr_2RuO_4 от деформации.

Это может быть связано с “перемешиванием” почти вырожденных p_x и p_y параметров порядка. Увеличение ε на 0.2% приводит к росту T_c в полтора раза (по-видимому, из-за индуцированных деформацией изменений поверхности Ферми).

Л.Опенев

1. C.W.Hicks et al., *Science* **344**, 283 (2014).

И далее ...

- 2 Когерентное подавление квази-частичной диссипации в джозефсоновском контакте

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОСТРУКТУРЫ

Цитотоксичность графена и нанотрубок можно использовать для очистки воды

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 5 Пена как метаматериал для звука

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Тулий в клетке

Влияние параметров УНТ на живые клетки

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 7 Уникальные измерения фононных спектров в FeSi методом ядерного резонансного неупругого рассеяния рентгеновских лучей

КОНФЕРЕНЦИИ

- 9 XII Марковские чтения, 14 мая 2014

Когерентное подавление квазичастичной диссипации в джозефсоновском контакте

При достаточно низкой температуре постоянный электрический ток протекает по сверхпроводнику без сопротивления, поэтому тепло не выделяется, то есть диссипации нет. А вот переменный высокочастотный ток может быть диссипативным из-за возбуждения квазичастиц с энергией больше сверхпроводящей щели. Однако согласно теоретическому предсказанию, сделанному Брайаном Джозефсоном более 50 лет тому назад [1], такая “квазичастичная диссипация” должна отсутствовать в джозефсоновском контакте, образованном сверхпроводниками, у которых разность фаз параметра сверхпроводящего порядка $\varphi = \pi$ (величина φ контролируется потоком внешнего магнитного поля через площадь контакта). Экспериментально этот эффект был обнаружен лишь недавно в работе [2] (США, Германия). Он обусловлен деструктивной интерференцией электронного и дырочного каналов диссипации. Его предполагается использовать для ослабления декогерентизации в квантовых информационных устройствах на основе сверхпроводниковых кубитов.

1. B.D. Josephson, *Phys. Lett.* **1**, 251 (1962).
2. I.M. Pop et al., *Nature* **508**, 369 (2014).

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОСТРУКТУРЫ

Цитотоксичность графена и нанотрубок можно использовать для очистки воды

Чистая вода нужна в разных отраслях промышленности, для энергетики, медицины, сельского хозяйства, бытовых нужд. Очень важно обеспечить жителей нашей планеты качественной питьевой водой. Мембранная технология, которая широко используется для решения этих задач, имеет два существенных недостатка – высокое энергопотребление и обрастание мембран. Образование биообрастаний начинается с закрепления нескольких клеток на поверхности. Будучи адсорбированными на мембране они потребляют питательные вещества из воды и начинают активно размножаться. В результате формируется биопленка – колония микроорганизмов (в основном бактерий). Проницаемость и селективность мембран снижается, энергопотребление растет, а срок службы сокращается. Биообрастание мембран можно разделить на гидравлически обратимое и необратимое. Обратимое можно ликвидировать промывкой, но это увеличивает расходы на эксплуатацию. Необратимое обрастание можно удалить только химическими способами, что дополнительно усложняет технологию и снижает долговечность мембран.

Существуют различные способы борьбы с биообрастанием, например создание более гладких поверхностей или добавление наноматериалов, которые выделяют биоциды (вещества, убивающие живые организмы).

Однако со временем они теряют активность и к тому же загрязняют окружающую среду.

Производительные и необрастающие мембраны могут быть созданы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) или графена. Чрезвычайно быстрый (на несколько порядков выше, чем по закону Пуазейля) транспорт молекул воды через прямые УНТ открыт давно и обоснован теоретически [1]. Недавно была продемонстрирована необычайно высокая скорость пропускания воды через мембрану из оксида графена [2]. Оба типа мембран отличаются исключительной селективностью и в принципе перспективны для обессоливания воды (сейчас для этого используют мембраны, работающие по принципу обратного осмоса). Но их можно использовать и гораздо шире, например, вместо ультрафильтрационных (УФ) или нанофильтрационных мембран*. Углеродные нанотрубки, особенно короткие одностенные, цитотоксичны – они повреждают клеточные мембраны при прямом контакте, вызывают окислительный стресс [3]. Нанопластинки графена также вызывают структурные повреждения клеточных мембран [4]. Экспериментальные данные, недавно полученные в ряде лабораторий (например [5-8]), свидетельствуют о том, что эти свойства полезны для дезинфекции воды и позволяют подавить биообрастание. Южно-корейские ученые синтезировали мембрану из вертикальных прямых УНТ, промежутки между которыми заполнены эпоксидной смолой [5]. Тенденцию к биообрастанию изучали на примере синегнойной палочки (*Pseudomonas aeruginosa*), которая обитает в воде и почве, условно патогенна для человека и обладает высокой устойчивостью к антибиотикам. Для сравнения использовали коммерческую ультрафильтрационную мембрану с порами близкого размера (см. таблицу).

Характеристики	УНТ-мембрана	УФ-мембрана
Материал	УНТ+эпоксидная смола	Полисульфон
Средний диаметр пор (нм)	4.8 ± 0.9	5.7 ± 2.5
Плотность пор (см-2)	$6.8 \cdot 10^{10}$	$8.8 \cdot 10^{10}$
Толщина (мкм)	~ 200	~ 0.1
Модуль Юнга (МПа)	500	830

После десятичасовых испытаний в потоке, содержащем $1 \cdot 10^7$ КОЕ/мл (КОЕ – колониеобразующие единицы) *Pseudomonas aeruginosa*, концентрация бактерий на поверхности УНТ мембраны была $4 \cdot 10^5$ КОЕ/мл, а на поверхности УФ мембраны $8 \cdot 10^7$ КОЕ/мл, то есть в 200 раз больше (рис. 1). В пропущенных потоках бактерий не было. Авторы считают, что существенное снижение биообрастания УНТ мембраны может быть связано только с тем,

что бактерии, поврежденные в результате непосредственного контакта с нанотрубками или вызванного ими окислительного стресса, отцепляются от поверхности мембраны.

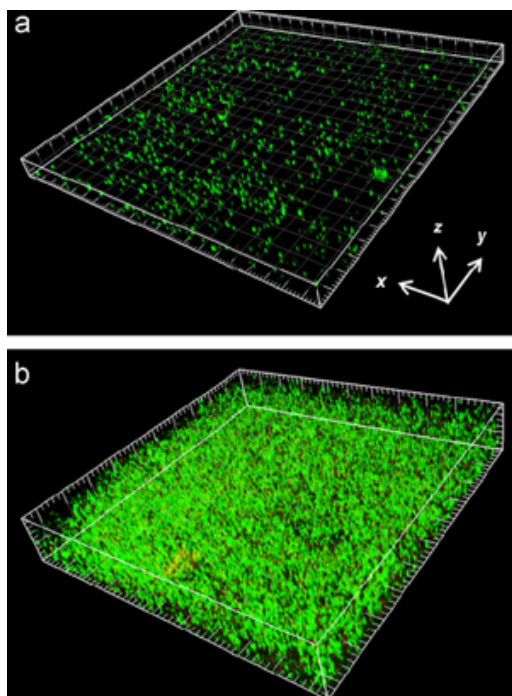


Рис. 1. Изображения био пленки, полученные с помощью лазерной сканирующей конфокальной микроскопии: а – УНТ мембрана, б – УФ мембрана. Зеленым цветом показаны живые клетки, красным – мертвые.

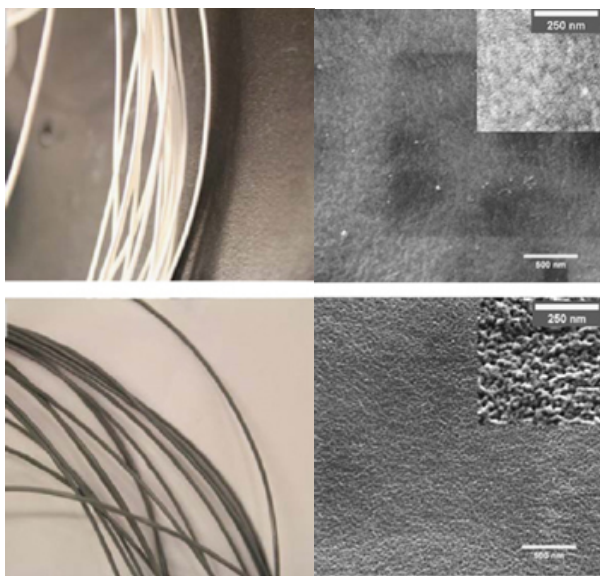


Рис.2. Внешний вид и морфология поверхности полволоконной мембраны из полисульфона с 0% (вверху) и 0.5 вес.% УНТ (внизу.)

Вертикальное “выравнивание” нанотрубок остается пока довольно дорогим процессом, и синтезированные мембраны имеют небольшие размеры. В ближайшем будущем более вероятно использование гибридных (mixed matrix) мембран из углеродных нанотрубок (дискретной фазы), включенных в полимерную матрицу (непрерывную фазу). Даже не-

большое количество УНТ приводит к снижению биообрастания. Это показали авторы работы [6], добавив 0.1-1 вес.% многостенных УНТ в полволоконные мембраны из полисульфона (рис. 2). Скорость потока воды выросла на 60-100% при неизменном качестве очистки, а стойкость к биообрастанию (проверенная с использованием бычьего сыровоточного альбумина) повысилась.

Мембраны из графена или оксида графена (ОГ) пока трудно получить в больших количествах. Но оказалось, что, как и углеродные нанотрубки, оксид графена можно эффективно использовать в виде малых добавок в коммерческие полимерные или керамические мембраны. Иранские ученые синтезировали mixed matrix полиэфирсульфоновые мембраны, добавив в исходный раствор 0.1-1 вес.% нанопластинок ОГ [7]. Оксид графена получали по методике Хаммерса. Для изготовления плоских мембран использовали метод инверсии фаз. На фотографии (рис. 3) видно, что верх мембраны более темный. Это связано с тем, что в процессе формирования верхняя поверхность больше находится в воде, и гидрофильные ОГ мигрируют к ней.

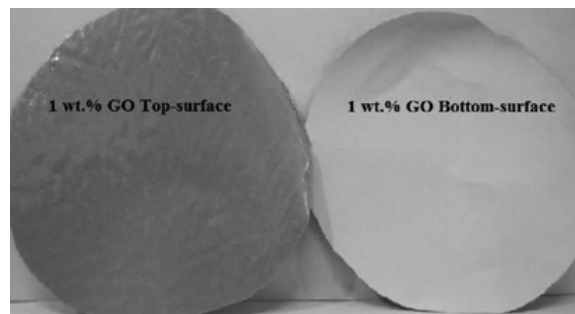


Рис. 3. Внешний вид верхней и нижней поверхностей мембраны, содержащей 1 вес.% нанопластинок ОГ (слева направо).

Все мембраны имеют асимметричную пористую структуру с тонким плотным поверхностным слоем и пористым нижним слоем. При добавлении ОГ пальцевидные поры становятся немного шире, а при 0.5 вес.% ОГ появляются поперечные поры, дополнительно увеличивающие поток воды через мембрану (рис. 4).

Биообрастание изучали, используя раствор порошкового молока. Сопротивление, обусловленное гидравлически необратимым биообрастанием, особенно существенно снизилось при добавлении 0.5 вес.% нанопластинок – с 66% до 9.5%. Нанопластины ОГ мигрировали к поверхности и повысили противомикробную активность мембран.

Ученые из США [8] впервые синтезировали тонкопленочные композитные поли-амидные мембраны, на поверхность которых добавлены нанопластины оксида графена. Связь нанопластинок с поверхностью обеспечена взаимодействием гидроксильных групп оксида графена с гидроксильными группами полиамидного активного слоя (рис. 5).

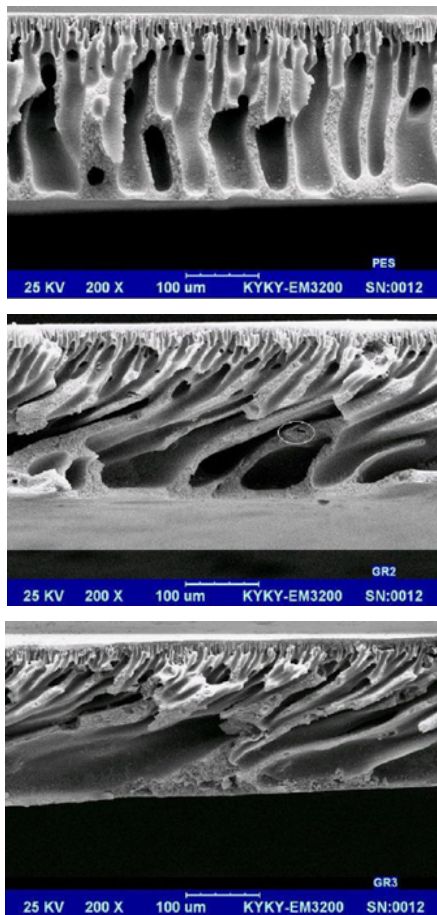


Рис. 4. Сечение полиэфирсульфоновой мембраны с 0 вес. %, 0,5 вес. % и 1 вес. % нанопластинок ОГ (сверху вниз). Поперечная пора при 0,5 вес.% ОГ обведена кружком.

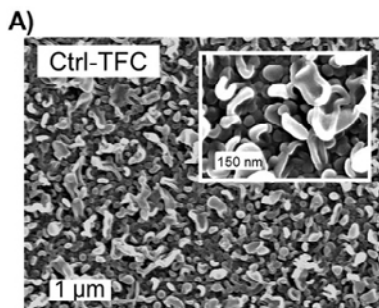
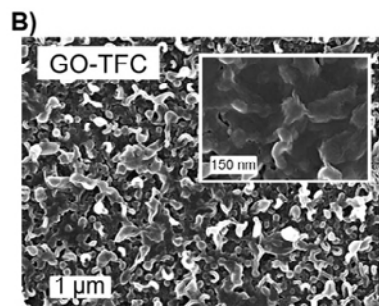


Рис.5. SEM изображения: полиамидного активного слоя мембраны (А) и полиамидного активного слоя мембраны с нанопластинками оксида графена на поверхности (В).



Эксперименты показали, что в результате прямого контакта бактерий кишечной палочки *E. coli* с нанопластинками оксида графена в течение 1

ч на поверхности мембраны погибает 65% бактерий (рис. 6), при этом транспортные свойства мембраны не ухудшаются.

Оксидированную форму графена получают, используя хорошо известные, относительно недорогие методы химического окисления графита. Поэтому композитные мембраны на основе полимеров

с добавлением оксида графена можно производить в промышленных масштабах.

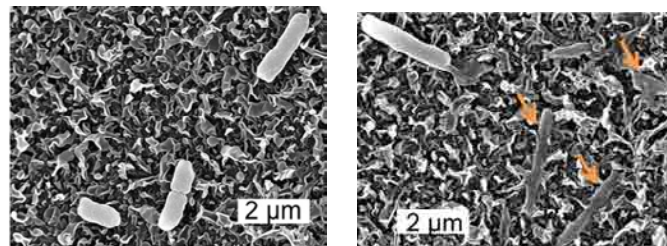


Рис. 6. Слева: SEM изображение нормальных бактерий на поверхности полиамидной мембраны. Справа: SEM изображение поврежденных бактерий на поверхности мембраны (показаны стрелками)

Заметим, что производство графена развивается бурными темпами. Нобелевский лауреат К. Новоселов опровергает мнение тех специалистов, которые считают, что до коммерциализации графена пройдут десятилетия [9]. Производственные мощности компании Bluestone Global Tech., основанной в США в 2011 г., сейчас составляют 20-200 м² графена в день; в 2013 г. Bluestone Global Tech. приняла решение открыть завод по производству графена в Великобритании; в конце 2013 г. запущен завод в Польше. Коммерциализацией графена активно занимаются компании и университеты Китая, Японии, Южной Кореи (в особенности Samsung), правда, в основном, для электроники. Тем не менее, компания Lockheed Martin Corp. недавно представила мембрану Perforene™ для использования в опреснителях морской воды (и не только). Perforene™ изготавливается из графена с нанометровыми отверстиями, пропускающими воду и задерживающими ионы натрия, хлора и др. По данным Lockheed Martin Corp. этот материал позволяет в 5 раз (по сравнению с коммерческими мембранами) повысить пропускную способность, снизить энергозатраты на 10-20% и подавить биообрастание на 80% [10].

**Ультрафильтрационные мембраны (поры 10-500 нм) очищают воду от вирусов, бактерий, крупных макромолекул. Обратноосмотические мембраны (поры 1-10 нм, по другой классификации менее 1 нм) позволяют удалять из растворов различные молекулы и ионы, включая одновалентные. Нанофильтрационные мембраны (поры несколько нм, по другой классификации до 100 нм) по степени очистки занимают промежуточное положение между ультрафильтрационными и обратноосмотическими – не пропускают большинство органических молекул, почти все вирусы, двухвалентные (и более) ионы.*

О.Алексеева

1. M.Majumder et al., *Nature* **438**, 44 (2005).
2. R.K.Joshi et al., *Science* **343**, 752 (2014).
3. [ПерсТ 18, вып. 5, с. 2 \(2011\).](#)
4. [ПерсТ 20, вып. 15/16, с. 4 \(2013\).](#)
5. Y.Baek et al., *J. Membr. Sci.* **460**, 171 (2014).
6. J.Yin et al. *J. Membrane Sci.*, **437**, 237 (2013).
7. S.Zinadini et al., *J. Membr. Sci.* **453**, 292 (2014).

ПерсТ, 2014, том 21, выпуск 8

8. *F.Perreault et al., Environ. Sci. Technol. Lett.* **1**, 71 (2014).
9. *K.S.Novoselov, Nature* **505**, 291 (2014).
10. www.lockheedmartin.com

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Пена как метаматериал для звука

Изучая структуру водяной пены с помощью ультразвука французские исследователи неожиданно обнаружили новое явление: в определенном диапазоне частот пена становится непроницаемой для ультразвукового излучения [1].

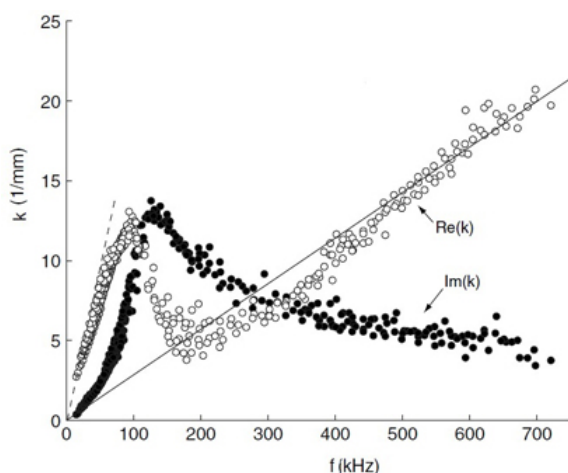
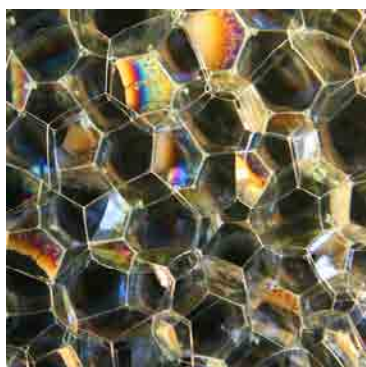


Рис. 1. Пена как метаматериал для ультразвука: а) – пузырьки пены, соединенные перемычками из жидкости, б) – зависимость действительной и мнимой частей волнового вектора от частоты для пузырьков с радиусом 40мкм.

Ученым удалось создать стабильную пену (время жизни больше 10 минут) из пузырьков размером 20-50 мкм. Каждый пузырек можно представить как осциллятор, включающий в себя упругую мембрану, закрепленную водяными перемычками (рис. 1а). Измерения распространения ультразвука сквозь полумиллиметровый слой пены позволили построить дисперсионную диаграмму (рис. 1б). В области низких и высоких частот зависимость действительной части волнового вектора от частоты описывается линейными зависимостями, соответствующими скоростям, отличающимся почти на порядок (32м/с и 220 м/с, соответственно). В промежуточной области частот 100-200кГц наблюдается аномальная дисперсионная зависимость с отрицательной груп-

повой скоростью, при этом мнимая часть волнового вектора достигает максимума (рис. 1б), что соответствует режиму нераспространения звука. Это объясняется тем, что колебания пены носят сложный характер: мембраны и перемычки колеблются при низких частотах синфазно, при высоких частотах колебаниями перемычек можно пренебречь, а в среднем диапазоне частот, в котором наблюдается аномалия дисперсионной зависимости, мембраны и перемычки колеблются в противофазе, что формально может быть описано непрерывной средой с отрицательной эффективной плотностью. Такие среды, принято называть метаматериалами, от греческого “мета” – “за пределами”.

Причисление пены к метаматериалам показывает насколько всеобъемлющим стало это понятие. Первоначально данный термин относился к квазиоднородным средам с необычными электромагнитными свойствами. Они состояли не из атомов и молекул, а из искусственных резонаторов – миниатюрных антенн, размеры которых были много меньше длины волны используемого электромагнитного излучения, что позволяло рассматривать их как среды с определенными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Наиболее экзотической разновидностью метаматериалов были левые среды Веселаго, в которых диэлектрическая и магнитная проницаемости одновременно становились меньше нуля, что приводило к отрицательному показателю преломления. Позднее термин метаматериалы стали употреблять и по отношению к фотонным кристаллам, в которых размер неоднородности уже сравним с длиной волны света, а также естественным образом обобщили и на другие виды волн (см. ПерсТ [2]). Однако вплоть до последнего времени этот термин предполагал наличие регулярных структур, что было подчас обусловлено чисто техническими причинами – такие материалы легче изготавливать. Теперь же мы видим, что и это вовсе необязательно: пена нерегулярна в силу своего происхождения. В защиту новичка в классе метаматериалов уже высказался создатель первых левых сред – Джон Пендри: “Метаматериал – это среда, свойства которой определяются не ее химическим составом, а ее структурой, поэтому пена прекрасно укладывается в это определение” [3]. Также стоит отметить, что отрицательная эффективная плотность пены сближает ее с самыми первыми метаматериалами, которые в определенном диапазоне частот характеризовались отрицательной магнитной проницаемостью. Сейчас команда французских исследователей работает над тем, чтобы проверить, распространяются ли найденные ими закономерности на твердые пеноматериалы, что важно для практических применений в области звукоизоляции.

А. Пятаков

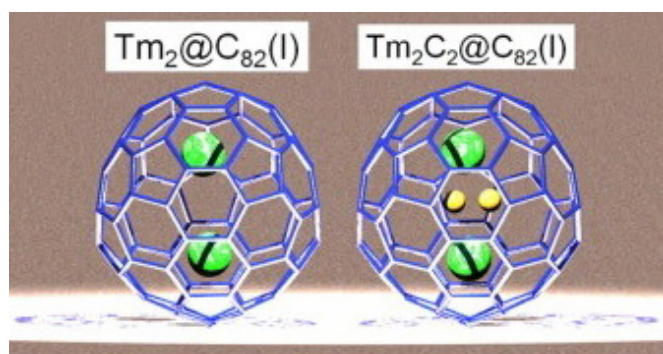
1. *J. Pierre et al., Phys. Rev. Lett.* **112**, 148307 (2014).

2. [ПерсТ 21, вып. 7, с. 5 \(2014\).](#)
3. A. Hellemans, *Physics* 7, 37 (2014).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Тулий в клетке

Какие только элементы не помещали исследователи внутрь фуллера. В недавнем выпуске ПерсТа мы уже рассказывали о “пропавших” металлофуллерах на основе иттербия $\text{Yb}@C_{72}$ [1], теперь настала очередь его соседа по таблице Менделеева – тулия – самого редкого (если не брать в расчет прометий) редкоземельного элемента. Фундаментальная работа японских ученых посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию структуры эндодральных комплексов на основе фуллеренов C_{82} с низкой симметрией и кластеров тулия, как чистых Tm_2 , так и в соединении с углеродом Tm_2C_2 [2]. Структурный анализ образцов авторы проводили с помощью рентгеновской дифракции, а затем рассчитывали геометрические характеристики металлофуллеренов в рамках теории функционала плотности на уровне теории V3LYP/SV(P) с помощью программного пакета Turbomol. Оказалось, что атомы углерода не влияют на пространственную ориентацию инкапсулированных кластеров, и расположение атомов тулия внутри фуллеренов идентично для обоих комплексов $\text{Tm}_2@C_{82}$ и $\text{Tm}_2C_2@C_{82}$ (см. рис.).



Структура металлофуллеренов $\text{Tm}_2@C_{82}(I)$ (слева) и $\text{Tm}_2C_2@C_{82}(I)$ (справа)

Более того, сравнивая полученные конфигурации с моно-металлофуллереном $\text{Tm}@C_{82}$, авторы обнаружили, что один из атомов в димере Tm_2 находится очень близко к соответствующему Tm -узлу в $\text{Tm}@C_{82}$. На основании полученных результатов исследователи решили, что расположение инкапсулированных атомов тулия зависит не от ближайшего окружения, а от типа фуллереновой клетки. Таким образом, правильный подбор углеродного каркаса может оказаться решающим при конструировании отдельных металлофуллеренов и функциональных материалов на их основе.

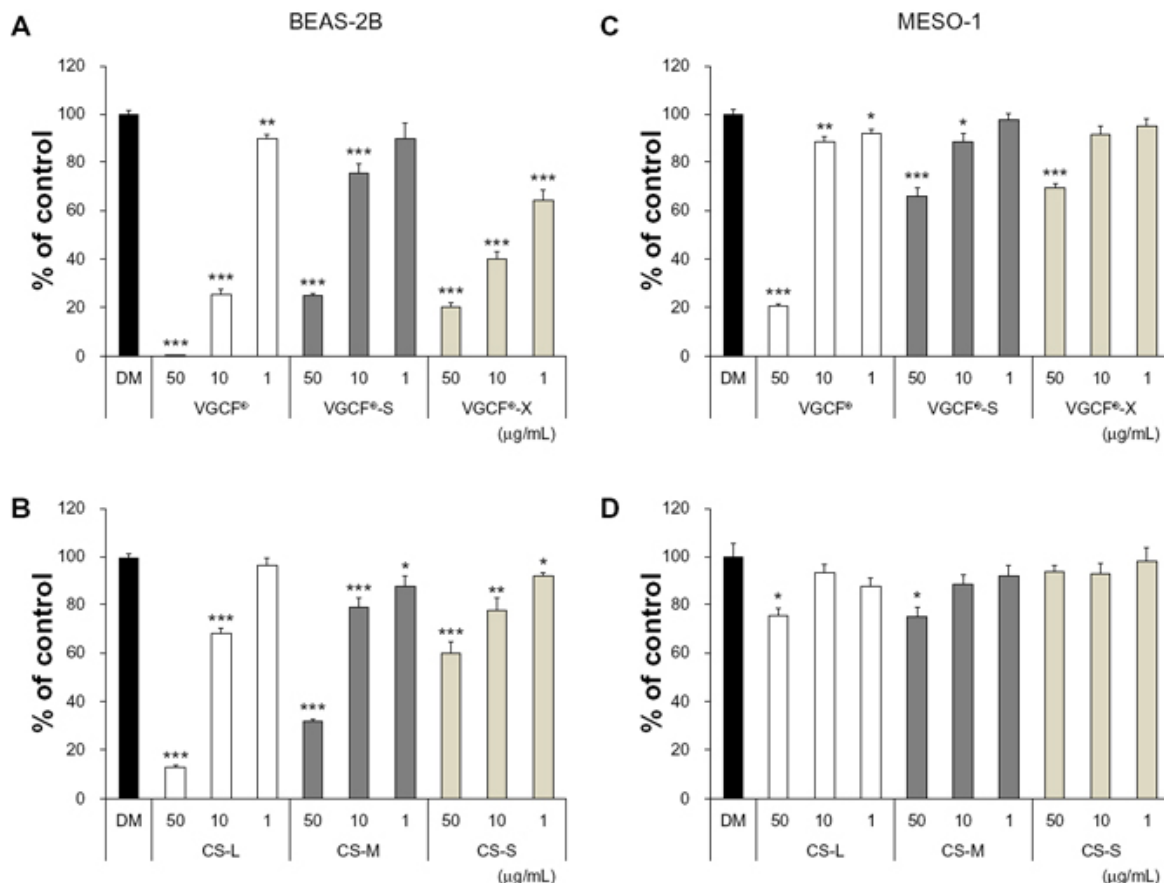
М. Маслов

1. [ПерсТ 20, вып. 20, с. 6 \(2013\).](#)
2. Y.Sado et al., *Chem. Phys. Lett.* 600, 38 (2014).

Влияние параметров УНТ на живые клетки

Возможность использования углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве носителя для доставки лекарственных препаратов привлекает многие исследовательские лаборатории, поскольку реализация подобной возможности могла бы привести к существенному увеличению времени, в течение которого больной может обходиться без инъекций необходимого лекарства. Однако прежде чем приступить к экспериментам на больных, необходимо убедиться в безопасности введения УНТ в организм человека. Вопрос о токсичности УНТ вызывает острые дискуссии на страницах специализированных журналов, что связано с противоречивым характером имеющихся экспериментальных данных. В такой ситуации требуется тщательное экспериментальное исследование влияния характеристик УНТ на степень воздействия нанотрубок на параметры и поведение живой клетки. Одно из исследований подобного рода, проведено большой группой ученых из университетов Японии [1]. В экспериментах использовали два типа образцов: многослойные УНТ и УНТ со структурой вложенных друг в друга чашечек. Многослойные УНТ имели длину 20–80 (VGSF), 10 (VGSF-S) и 3 (VGCF-X) мкм и диаметр 150, 80 и 15 нм, соответственно. Диаметр УНТ со структурой вложенных друг в друга чашечек составил 100 нм, а их длина для различных групп образцов составила 20–80 мкм (CS-L) и 0.5–20 мкм (CS-S). Имелась также группа УНТ подобной структуры промежуточной длины (CS-M). Все нанотрубки были агрегированы в кластеры размером порядка нескольких мкм. Нанотрубки очищали стерилизацией в автоклаве при температуре 121°C в течение 15 мин с последующим диспергированием в 0.1% растворе желатина и обработкой ультразвуком в водной бане в течение 30 мин.

В качестве объекта исследования были выбраны клетки бронхиального эпителия человека (BEAS-2B), а также пораженные раком плевральные клетки ACC-MESO-1. Перед каждым опытом клетки высаживали в соответствующую культуру с плотностью $2 \cdot 10^5$ или $5 \cdot 10^5$ клеток на миллилитр и выдерживали в течение 24 ч. Для исследования выживаемости клеток в присутствии УНТ, культуры клеток выдерживали в течение 24 ч при температуре 37°C в средах с концентрацией УНТ 1, 10 и 50 мг/мл. Наряду с этим, были высажены контрольные клетки в культуру с добавлением 0.001% желатина. Выжившие клетки метаболизировали краситель, что приводило к возрастанию интенсивности флюоресценции с длиной волны 550 нм при облучении светом с длиной волны 600 нм. Тем самым интенсивность сигнала флюоресценции служила индикатором количества выживших клеток.



Результаты измерений процента клеток, выживших в результате взаимодействия с УНТ, показаны на рисунке (данные сравниваются с соответствующими результатами для контрольных клеток, выдержанных в отсутствие УНТ). Последние данные приняты за 100%.

Результаты представленных измерений показывают, что при 24-часовой выдержке УНТ со структурой вложенных друг в друга чашечек менее токсичны по отношению к обоим типам исследованных клеток, чем многослойные УНТ. Уровень их цитотоксичности позволяет рассматривать такие нанотрубки как биосовместимый материал, пригодный для использования в качестве средства доставки лекарственных препаратов в нужную область организма больного.

А. Елецкий

1. H. Haniu et al., *Int. J. of Nanomedicine*: **9**, 1979 (2014).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Уникальные измерения фононных спектров в FeSi методом ядерного резонансного неупругого рассеяния рентгеновских лучей

Все знакомы с традиционным методом исследования фононных спектров – неупругим рассеянием нейтронов. Это – универсальный и апробированный метод, однако он дает информацию о полном спектре, а в случае многокомпонентных соединений часто представляет интерес парциальный вклад различных составляющих. В сочетании с техникой изотопического контраста неупругое рассеяние нейтронов в принципе позволяет получать и парциальные данные. Однако создание мощных источников синхротронного излучения (СИ) предлагает более привлекательную возможность получать элемент-чувствительную информацию о тепловых колебаниях соединений, куда входят мессбауэровские ионы. Силицид железа FeSi из этой группы. Новый метод ядерного резонансного неупругого рассеяния (ЯНР) рентгеновских лучей разработан сравнительно недавно и был применен авторами работы [1] для исследования колебаний ионов железа в FeSi и их изменений с температурой. Интерес к этому соединению связан с очень сильной зависимостью его электронной структуры и магнитных свойств от температуры. При низких температурах это немагнитный полупроводник с малой диэлектрической щелью порядка 30 мэВ. С нагревом выше 100К происходит плавный переход в металличе-

ское состояние и появляется температурно индуцированный парамагнетизм. Полной ясности в механизмах таких необычных свойств так и нет, несмотря на большое число фантазий по этому поводу. Поэтому независимое экспериментальное выяснение роли решетки в данном случае действительно важно, тем более с выделением отдельных вкладов колебаний только железа.

Авторами [1] исследованы поликристаллические образцы, полученные твердофазным синтезом из высокообогащенного ^{57}Fe и Si. Приведены доказательства однофазности образцов. Измеренные спектры ЯРНР содержат и упругий пик при нулевой переданной энергии. На рис. 1 показан только неупругий спектр, который получен вычитанием упругого из полного.

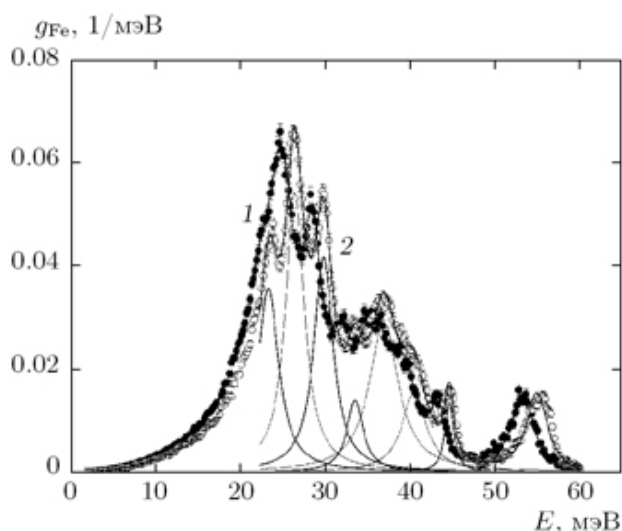


Рис.1. Парциальные спектры тепловых колебаний атомов железа в FeSi при 297К (1) и 46К (2). Сплошными линиями показаны результаты подгонки 8 лоренцианами.

Спектры на рис. 1 промоделированы разложением на несколько пиков лоренцевской формы; варьировалось число пиков, их энергия, амплитуда и полуширина. Примечательно, что при числе пиков меньше 8 метод наименьших квадратов не позволял получить достоверного минимума. Итак, каждый пик соответствует определенной оптической моде. О качестве данных говорит, например, обнаружение трех пиков в интервале от 22 до 32 мэВ, тогда как в нейтронных спектрах виден только один широкий пик на 26 мэВ [2]. Согласно расчетам динамики решетки, пики $E_1=22.97$ мэВ и $E_2=26.13$ мэВ связаны с продольными акустическими модами на границе зоны Бриллюэна. Низкочастотные длинноволновые акустические моды в модели Дебая дают квадратичный по энергии вклад в спектральную интенсивность, из выделения которого получена энергия Дебая E_D . Измерения при разных температурах показали смягчение и оптических, и акустических мод с ростом температуры. На рис. 2 показаны температурные зависимости энергии Дебая и средней энергии колебаний.

Из этого рисунка видно, что наибольшие изменения связаны с акустическими модами, причем резкое смягчение начинается выше 100К, где отмечаются и резкое уменьшение диэлектрической щели, и рост магнитной восприимчивости. При температуре выше 200К зависимости энергии Дебая и средней энергии практически совпадают, при этой же температуре закрывается щель в электронном спектре, концентрация носителей в металлическом состоянии перестает зависеть от температуры. Аналогичную корреляцию с изменением электронной структуры показывают и ширины линий. С ростом температуры нелинейно растет ширина пиков, особенно сильно для пика E_1 , достигая максимума при 200К.

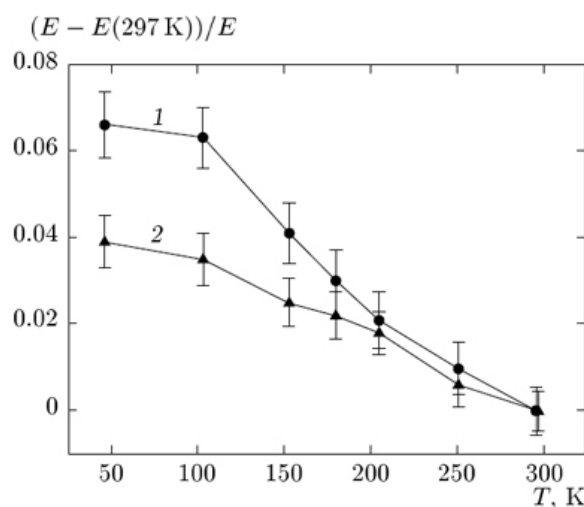


Рис. 2. Температурные зависимости относительных изменений энергии Дебая (1) и средней по спектру энергии (2).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о корреляции температурных изменений энергий и затухания низкоэнергетических акустических и оптических фононов с изменениями электронной структуры и переходом диэлектрик-металл в FeSi.

С.Овчинников

1. П.П.Паршин и др. *ЖЭТФ* **145**, 279 (2014).
2. O.Delaire et al., *PNAS* **108**, 4725 (2011).

КОНФЕРЕНЦИИ



Российская Академия Наук

Академик Моисей Александрович Марков (1908–1994)



XII Марковские чтения, посвященные памяти и научному наследию выдающегося российского учёного и организатора науки Моисея Александровича Маркова, 14 мая 2014

(конференц-зал ИЯИ РАН, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а)

Программа

11.00 – 11.15

Вступительное слово В.А. МАТВЕЕВА.

Вручение дипломов лауреатам премии имени академика М.А. МАРКОВА в 2014 году

Долгову Александру Дмитриевичу — профессору, доктору физико-математических наук (НГУ, ИТЭФ и университет Феррары, Италия),

Ткачёву Игорю Ивановичу — профессору, доктору физико-математических наук (ИЯИ РАН)

“За пионерские работы в области теоретической астрофизики и космологии”

11.15 – 12.00

Ткачёв Игорь Иванович (ИЯИ РАН)

“Разогрев Вселенной после инфляции”

12.00 – 12.45

Долгов Александр Дмитриевич (НГУ)

“Свойства плазмы с Бозе конденсатом заряженных частиц”

12.45 – 13.00. *Перерыв*

13.00 – 13.30

Гаврин Владимир Николаевич (ИЯИ РАН)

“Баксанский эксперимент по поиску стерильных нейтрино (проект BEST)”

13.30 – 14.00

Троицкий Сергей Вадимович (ИЯИ РАН)

“Астрофизические нейтрино высоких энергий: новые данные, интерпретации, перспективы”

14.00 – 14.30

Сажин Михаил Васильевич (ГАИШ МГУ)

“Открытие В-моды поляризации реликтового излучения и возможное открытие космологических гравитационных волн”

14.30 – 15.00

Красников Николай Валерьевич (ИЯИ РАН)

“Поиск взаимодействий тёмной материи в ЦЕРНе”

15.00

Фуршет для участников Чтений.

Для контактов:

Адрес: проспект 60-летия Октября, 7а,
Москва 117312

Телефон: +7(499)135-23-12

Факс: +7(499)135-22-68

Эл.почта: zhelezny@inr.ac.ru

Интернет: <http://www.inr.ru>; <http://www.inr.ac.ru>

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

Главный 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,
С.Овчинников, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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