

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Возбужденные андреевские пары в сверхпроводящем контакте

Стационарный эффект Джозефсона – это бездиссипативное протекание тока между двумя сверхпроводниками, разделенными тонким слоем металлического или диэлектрического материала. Обычный джозефсоновский контакт можно рассматривать как параллельное соединение большого числа слабых связей (рис. 1а).

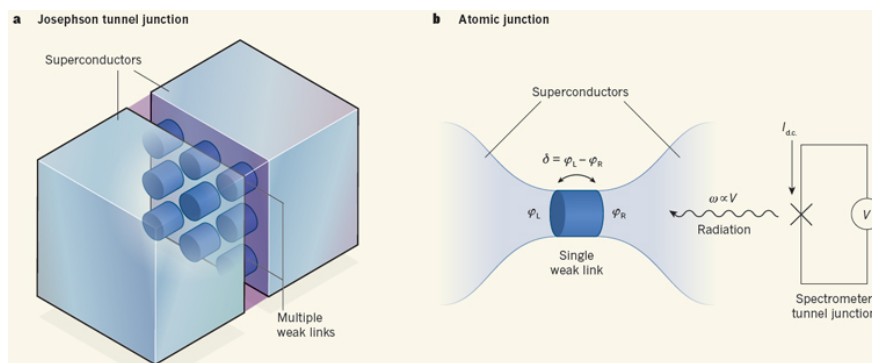


Рис. 1. Обычный (а) и атомный (б) туннельные контакты.

Согласно теории, в каждой такой связи имеются два андреевских состояния (так называемый андреевский дублет), энергии которых находятся внутри сверхпроводящей щели и зависят как от разности фаз между сверхпроводниками, так и от коэффициента прохождения электронов через данную связь (рис. 2).

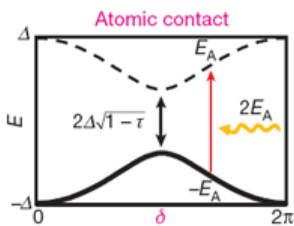


Рис. 2. Зависимости энергий андреевских уровней в одной слабой связи с вероятностью прохождения  $\tau$  от разности фаз между сверхпроводниками  $\delta$ .

В переносе сверхтока (куперовских пар) участвуют нижние андреевские состояния всех слабых связей. Возбужденные состояния андреевских дублетов никогда непосредственно не регистрировались (хотя при интерпретации некоторых экспериментов без них было не обойтись). Впервые это сделано французскими физиками [1], которым удалось изготовить туннельный контакт с одной-единственной слабой связью (рис. 1б). Эксперименты по поглощению электромагнитного излучения таким контактом позволили определить зависимость расстояния между андреевскими уровнями от разности фаз. Она совпала с теоретической (рис. 2). Авторы [1] полагают, что андреевские дублеты можно использовать в квантовых информационных устройствах.

Л.Опенев

1. L. Bretheau et al., Nature 499, 312 (2013).

И далее ...

## ГРАФЕН

2 Луковые кольца из графена

Громкоговоритель на основе графена

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

3 Наноградусник

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

Дефектность границ нанодвойников в металлах

4 Новые исследования токсичности графена

## МАГНИТЫ

6 Магниты могут быть сильнее, чем казалось...

## ФОТОНИКА

7 Просветление в магнитном поле

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Термоэдс цепей, содержащих молекулы фуллерена C<sub>60</sub>

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

8 Почему жемчужины круглые?

9 Гравитация – убийца когерентности

## КОНФЕРЕНЦИИ

10 Научная сессия ОФН РАН 2-3 сентября 2013 г

## ГРАФЕН

### Луковые кольца из графена

Любопытный нанообъект удалось получить авторам работы [1]. Исследователи разработали методику синтеза, так называемых, “луковых колец” – концентрических шестиугольников, состоящих из замкнутых графеновых нанолент (см. рис. 1).

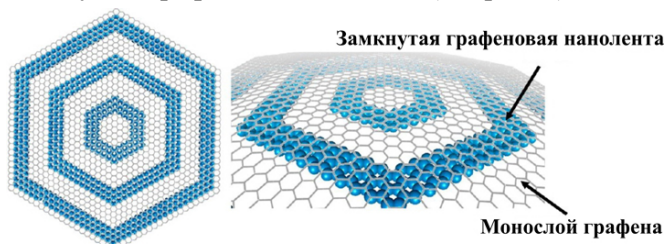


Рис. 1. Структура графеновых луковых колец: вид сверху (слева) и сбоку (справа). Графеновый монослой изображен серым цветом, графеновые наноленты – синим.

Технология получения оказалась достаточно несложной. Предварительно очищенную медную фольгу помещали в устройство парофазного химического осаждения (CVD-камера) и отжигали в потоке водорода при температуре 1074°C и давлении 500 Торр в течение получаса. Рост концентрических нанолент начинался после того, как вместе с водородом в CVD-камеру в течение 35 минут поступал метан. Затем фольгу быстро извлекали из камеры и оставляли остывать при комнатной температуре. Полученные образцы исследовали обширным набором экспериментальных (атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия, рамановская спектроскопия, просвечивающая электронная микроскопия) и теоретических методик (*ab initio* моделирование). На основе полученных результатов авторы постарались воспроизвести механизм формирования концентрических шестиугольных колец.

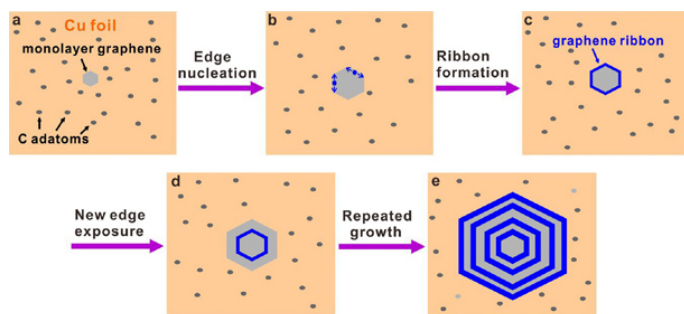


Рис. 2. Схематическое изображение процесса роста графеновых луковых колец.

Согласно их гипотезе весь процесс состоит из следующих основных этапов (см. рис. 2): 1) формирование домена монослойного графена на поверхности медной фольги; 2) образование новых графеновых слоев на краю сформированного домена; 3) формирование графеновой наноленты по краю домена; 4) появление нового края домена, поскольку сам монослой растет быстрее наноленты; и, наконец, 5) простое повторение предыдущих шагов. Однако, несмотря на успешный синтез, никаких

конкретных способов применения нового наноматериала авторы пока не предлагают, но надеются, что луковые кольца окажутся полезными для приложений в области электроники и энергетики, а метод их получения в дальнейшем может быть легко обобщен на родственные системы, например, на гексагональный нитрид бора.

М. Маслов

I. Z. Yan et al., *J. Am. Chem. Soc.* **135**, 10755 (2013).

### Громкоговоритель на основе графена

Разработка миниатюрных преобразователей электрического сигнала в звуковые колебания является частью общей проблемы миниатюризации современной электронной аппаратуры. Основная трудность, стоящая на пути решения этой проблемы, связана с необходимостью обеспечения условий, при которых основным механизмом затухания колебаний мембраны, создающей механические вибрации, является взаимодействие с окружающим воздухом. Идеальным материалом для такой мембраны может стать графен, сочетающий миниатюрные размеры и хорошую электропроводность с необходимыми механическими свойствами. Эффективное преобразование электрических колебаний в звуковые с помощью мембраны на основе графена продемонстрировано недавно учеными из Univ. of California, Berkeley (США) [1]. При этом, поскольку упругая константа мембраны обратно пропорциональна квадрату ее диаметра, для работы в звуковом, килогерцовом диапазоне частот необходимо использование графеновых листов большого диаметра.

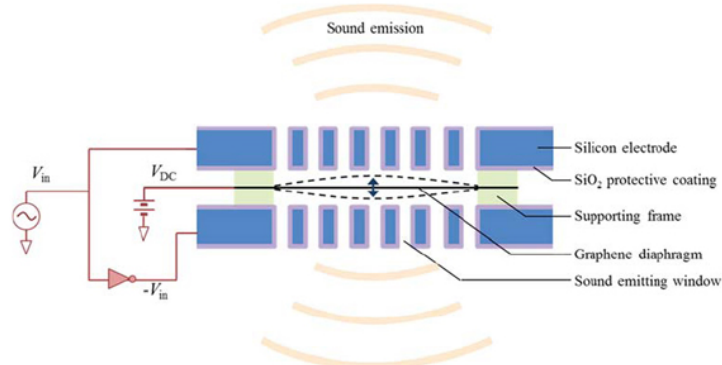


Схема громкоговорителя на основе графена

Устройство громкоговорителя на основе графена представлено схематически на рисунке. В основу устройства положена пленка из многослойного графена, синтезированная на поверхности никелевой фольги толщиной 25 мкм методом химического осаждения паров (CVD) при температуре 1000°C. Синтез проводили в течение 20 мин в потоке водорода (100 см<sup>3</sup>/мин) и метана (5 см<sup>3</sup>/мин) при полном давлении 2 Торр. По окончании синтеза фольга вместе с графеновой пленкой толщиной ≈ 35 нм вставляется в круговую рамку, диаметром 7 мм, после чего никелевая подложка стравливается с по-

мощью водного раствора  $\text{FeCl}_3$  (0.1 г/мл). Полученная мембрана, соединенная с источником постоянного напряжения, подвешивается между двумя перфорированными кремниевыми электродами, на которые подается переменное напряжение противоположной полярности. Колебания диафрагмы, обусловленные этим переменным напряжением, передаются окружающему воздуху и вызывают звук, распространяющийся через прорезы в электродах. Для предотвращения короткого замыкания цепи при больших амплитудах колебаний мембраны поверхность электродов покрыта защитным слоем  $\text{SiO}_2$ .

Испытание устройства проводили при постоянном напряжении на мембране 100 В и максимальной амплитуде переменного сигнала 10 В. Рабочий ток прибора обычно не превышал нескольких нА, что соответствует уровню потребляемой мощности  $\sim 1$  мкВт. Звук, испускаемый громкоговорителем, легко воспринимается человеческим ухом. Частотные характеристики прибора, измеренные в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц, сопоставимы с соответствующими показателями серийно выпускаемых устройств аналогичного размера. При этом в отличие от обычных серийных изделий, энергетическая эффективность которых находится на уровне 10%, эффективность данного прибора приближается к 100%.

А. Елецкий

1. Q.Zhou, A.Zettl, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 223109 (2013).

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

### Наноградусник

Для многих явлений и процессов в окружающем мире и в нас самих важнейшим фактором является величина и распределение температуры. Например, локальные изменения температуры земли могут приводить к штормам, наводнениям, засухе и прочим бедствиям, а отклонение температуры человеческого тела от нормы всего лишь на доли процента (по абсолютной шкале) сигнализирует о болезни. Температура определяет кинетику химических реакций и равновесное состояние их продуктов. Для измерения температуры что только не используют: от спутников до ИК-камер и обычных термометров – в зависимости от природы и масштаба объекта. А можно ли измерить распределение температуры с нанометровым разрешением? В работе [1] (США, Китай) для этой цели использованы нанокристаллы алмаза, содержащие дефекты азот-вакансия (NV-центры). Расщепление  $\Delta$  спиновых уровней NV-центра (рис. 1) зависит от температуры. Возбуждая электроны СВЧ-импульсами и изучая последующую флуоресценцию, удастся зарегистрировать малейшие изменения  $\Delta$ , а значит – и температуры (до 1.8 мК). С помощью такого “наноградусника” авторы [1] следили за изменением локальной тем-

пературы живой клетки при ее нагреве (рис. 2). Если удастся повысить временное разрешение метода (сейчас – десятки секунд), то его можно будет использовать для изучения нестационарных субклеточных процессов, играющих важную роль в биологических и медицинских приложениях.

Рис. 1. Упрощенная диаграмма энергетических уровней NV-центра. В отсутствие магнитного поля триплетное основное состояние расщепляется на величину  $\Delta$ , зависящую от температуры ( $\delta$  – отстройка СВЧ-импульса от резонанса).

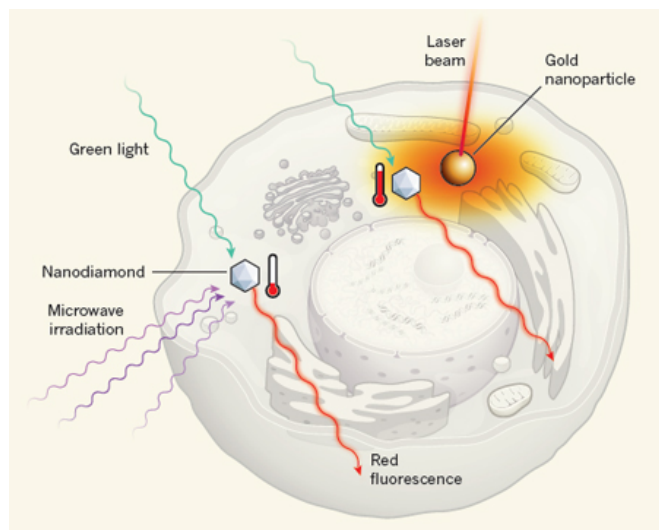
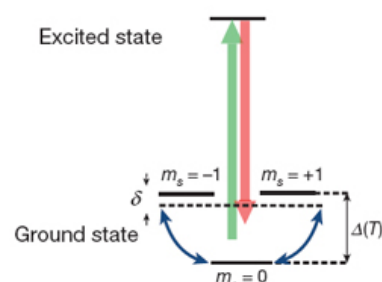


Рис. 2. Измерение температуры живой клетки при нагреве внедренной в нее наночастицы Au лазерным излучением.

1. G.Kuesko et al., *Nature* **500**, 54 (2013).

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Дефектность границ нанодвойников в металлах

Чарльз Франк, известный своими работами по теории дислокаций, как-то заметил, что кристаллы похожи на людей: они интересны не столько своей идеальной структурой, сколько разнообразными отклонениями от нее. Действительно, механические, электрические и оптические свойства кристаллов в значительной степени определяются их неоднородностями и дефектами, такими как зерна, межфазные границы, вакансии и пр. Например, границы зерен (рис. 1а), с одной стороны, приводят к сильному рассеянию электронов, а с другой – из-за их низкой симметрии прочность реальных металлов оказывается значительно ниже теоретической (рис. 1с). Для практических целей особенно привлекательны металлы, содержащие большое число параллельных когерентных границ между двойниками (coherent twin boundaries, CTBs) – кри-

сталлографических плоскостей, разделяющих области с зеркальной симметрией (рис. 1b) и отстоящих друг от друга на  $10 \div 100$  нм. Такие металлы сочетают в себе пластичность (выдерживая деформацию до  $\sim 10\%$ ) с высокой прочностью ( $\sim 1$  ГПа). Все теоретические модели СТВ основаны на предположении об их идеальной структуре. Однако в работе [1] показано, что это не так: на СТВ имеются некогерентные участки, возникающие из-за локального искривления СТВ и наличия на них многочисленных кинкообразных дефектов и частичных дислокаций. Именно дефекты такого рода играют определяющую роль в механизме деформации нанодвойникованной меди [1]. Миграция кинков по СТВ может приводить к неустойчивости СТВ и “раздвойникованию”. Так что прав был старина Франк: хотите лучше понять кристаллы – шерше дефекты!

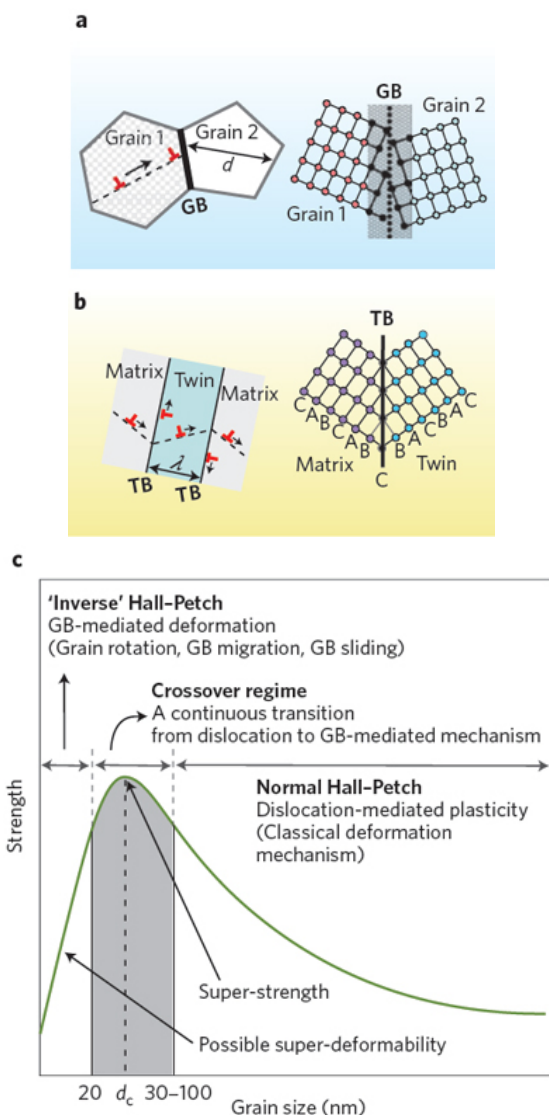


Рис. 1. а – Схематические изображения типичной межзеренной границы; б – когерентные границы между двойниками; с – зависимость прочности от размера зерен.

Л.Опенев

1. Y.M.Wang et al., *Nature Mater.* **12**, 697 (2013).

## Новые исследования токсичности графена

Благодаря уникальным физико-химическим свойствам графен и графеновые материалы находят все новые области применения. Недавно *ПерсТ* рассказал о перспективах использования графена в биомедицине [1]. Важные направления – биосенсоры для диагностики раковых заболеваний, системы адресной доставки диагностических и лекарственных средств, фототермическая терапия, лечение нейродегенеративных заболеваний (например, болезни Альцгеймера), использование в качестве субстрата культуры стволовых клеток и др. В связи с этим, конечно, возрастает важность исследований токсичности. Первые результаты, полученные на клетках PC12 (используемых в качестве модели нейронов мозга) показали, что в малых дозах (0.01 мкг/мл) графен не опасен [2]. В новой работе испанские ученые оценили цитотоксичность графеновых нанопластинок (НП) с разной химией поверхности в отношении клеток гепатомы\* человека линии Нер G2 [3]. Эти клетки были выбраны, поскольку при попадании в организм наноматериалы могут накапливаться в печени.

Исследователи приготовили суспензии нанопластинок оксида графена (GO) и графена с карбоксильными группами (СХУГ) в воде и в среде культивирования. Размеры и формы НП определяли с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии (рис. 1).

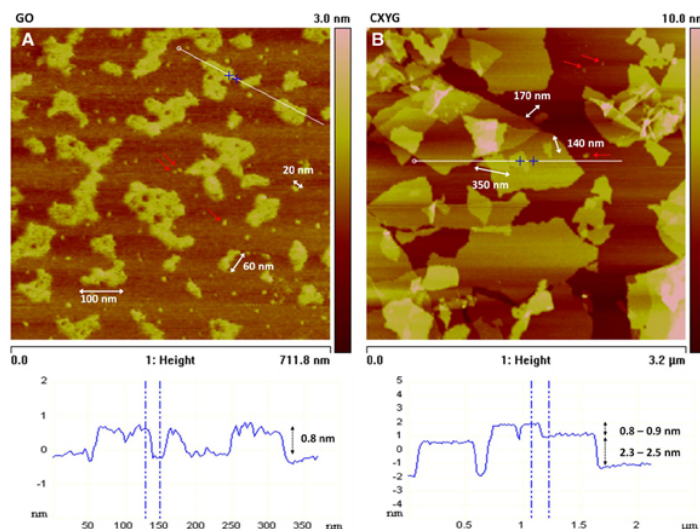


Рис. 1. Изображения нанопластинок GO (A) и СХУГ (B), полученные с помощью атомно-силовой микроскопии. Профиль высоты соответствует области вдоль белой линии.

Клетки Нер G2 до воздействия нанопластинок представлены на рис. 2А и 2В. Видно, что с их поверхности выступают многочисленные микроворсинки. Воздействие GO (16 мкг/мл) и СХУГ (32 мкг/мл) в течение 24 ч приводит к тому, что поверхность полностью покрывается нанопластинками (рис. 2С и 2D). При концентрациях меньших 8 мкг/мл поверхность покрыта частично.

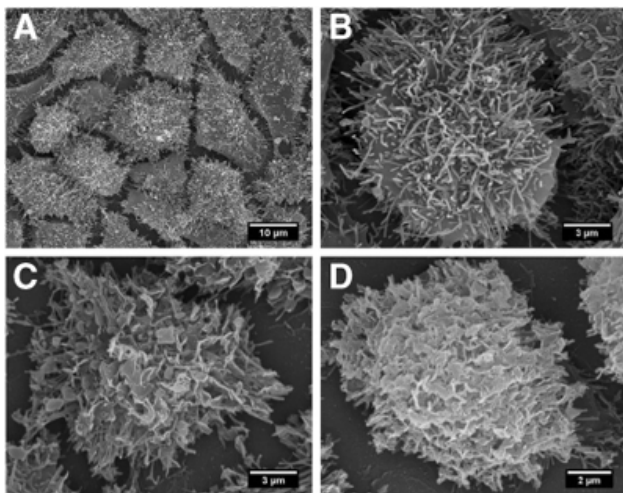


Рис. 2. SEM изображения клеток Нер G2 до (А, В) и после 24 ч воздействия нанопластинок в концентрации 16 мкг/мл GO (С) и 32 мкг/мл СХУГ (D).

Шкала 10мкм (А), 3 мкм (В, С) и 2 мкм (D).

Используя сканирующую (SEM) и просвечивающую (ТЕМ) электронные микроскопии, флуоресцентные и некоторые другие методы, авторы [3] показали, что, начиная с концентраций 4 мкг/мл, НП вызывают структурные повреждения клеточных мембран. Нанопластины проникают через мембрану во внутриклеточную жидкость цитозоль (рис. 3). Интересно, что клетка распознает их как чужеродные частицы, концентрирует в определенных областях цитозоля и “упаковывает” во внутриклеточные пузырьки, тем самым защищая себя от дальнейших повреждений (рис. 4).

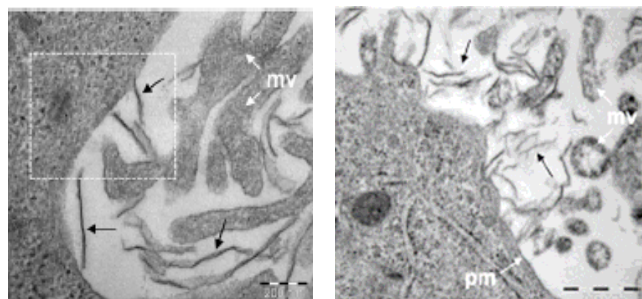


Рис. 3. Взаимодействие GO (слева) и СХУГ (справа) с мембраной (pm) и микроворсинками (mv). Черные стрелки указывают на нанопластины. Шкала 500 нм.

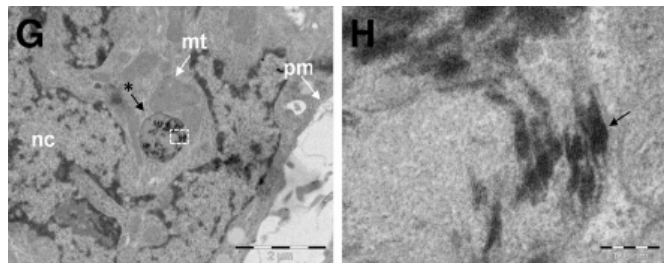


Рис. 4. Слева – пузырек с агрегатами нанопластинок GO (стрелка со звездочкой) рядом с митохондрией (mt). Справа – увеличенное изображение пластинок внутри пузырька. Шкала 2 мкм и 100 нм, соответственно (nc – ядро, pm – мембрана).

Однако на начальной стадии процесса интернализации нанопластины GO и СХУГ и их агрегаты

свободно локализованы в цитозоле и могут воздействовать на органеллы клетки, включая митохондрии. Действительно, на некоторых ТЕМ изображениях авторы [3] идентифицировали поврежденные митохондрии и в цитозоле, и в пузырьках.

Также по данным [3] при воздействии нанопластинок внутри клетки растут уровни активных форм кислорода (АФК), причем по-разному для GO и СХУГ. Для GO уровни АФК максимальны через 24 ч после воздействия 16 мкг/мл. При концентрациях 1-8 мкг/мл такие уровни достигаются через 72 ч. Воздействие СХУГ в концентрации <8 мкг/мл не приводит к росту АФК даже через 72 ч, однако при концентрации > 8 мкг/мл уровни АФК заметно повышаются между 24 и 72 часами воздействия. Конкретные механизмы еще предстоит выяснить.

Гипотетическая модель интернализации и взаимодействия GO и СХУГ с клеткой представлена на рис. 5. Нанопластины проникают через клеточную мембрану в цитозоль и концентрируются в пузырьках. Включаются механизмы восстановления, растет метаболическая активность. Воздействие НП приводит к повышению уровня активных форм кислорода, нарушению структуры и функций митохондрий, появлению дополнительных аутофагосом\*\*.

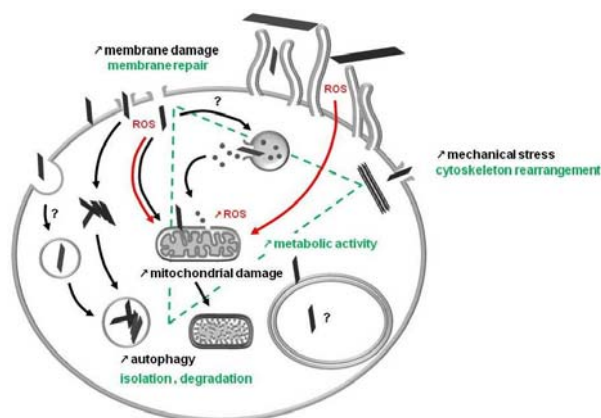


Рис. 5. Гипотетическая модель интернализации и взаимодействия НП с клеткой (ROS – АФК).

Данные электронной микроскопии (напр., рис.2) показывают, что GO и СХУГ имеют достаточно высокое сродство к биологическим мембранам. Авторы рекомендуют другим исследователям при оценке токсичности не превышать концентрации, при которых клетки сплошь покрываются наноматериалами. Это может привести к повреждению клетки из-за механических напряжений и исказить результаты.

Графеновые наноматериалы, по мнению авторов [3], особенно перспективны для доставки лекарственных средств – вредное воздействие не наблюдается при малых концентрациях (ниже 4 мкг/мл). Тем не менее, нужны дальнейшие исследования, чтобы выяснить, какие физико-химические свойства этих материалов определяют токсичность, и найти пути повышения биосовместимости.

\* Гепатома (гепатоцеллюлярная карцинома) - злокачественная опухоль, которая развивается из клеток печени.

\*\* В аутофагосоме происходит разрушение отмирающих внутриклеточных структур

О. Алексеева

1. ПерсТ 20, вып.7, с. 2 (2013).
2. ПерсТ 18, вып.5, с. 2 (2011).
3. T.Lammel et al., Particle and Fibre Toxicology, 10, 27 (2013); <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/10/1/27>

## МАГНИТЫ

**Магниты могут быть сильнее, чем казалось...**

Поиски сильных магнитов сегодня ведутся по пути подбора их химического состава и атомной структуры. На этом пути регулярно добиваются некоторых успехов (как в случае редкоземельных магнитов, кажущихся непревзойденными). Однако реальность оказывается сложнее и интереснее, чем наши представления. В [1] дан краткий обзор “сильных” магнитов. Под “сильными” понимается не величина магнитного поля, а тот факт, что напряженность поля, создаваемого этим магнитом, превышает индукцию насыщения материала магнита. Может показаться, что такого не бывает... Однако есть экспериментальные доказательства: в Гренобле изготовлена система магнитов, создающая в узком зазоре поле до 5 Тл [2]. В [1] перечислены и другие эксперименты в этой области.

Но, как известно, чудес действительно не бывает. Главным условием существования “сильных” магнитов является не только большая коэрцитивная сила, но и сильная магнитная анизотропия, которую раньше не брали в расчет. Спин-орбитальное взаимодействие d-электронов – главный источник кристаллической анизотропии. Из учебника Ч. Киттеля каждый хорошо знает, что сумма диагональных компонент тензора размагничивающего фактора дает поле насыщения. Это строго доказано для тел эллипсоидальной формы. Применение этой оценки для тел другой формы вносит небольшую поправку в коэффициент и с точностью до 10% совпадает с оценками для эллипсоида. Отсюда делался вывод, что создаваемое поле не может превышать поле насыщения. Но для тел неэллипсоидальной формы с неоднородной намагниченностью, индуцированной анизотропией, эти оценки оказываются неверными. В анизотропных магнетиках тензор размагничивающего фактора нельзя привести к диагональному виду, а недиагональные компоненты весьма велики. Такие ситуации в течение многих десятков лет просто не рассматривались и поэтому не считались возможными.

Пригодность магнитов для создания “сильных” полей определяется фактором качества:  $Q = K_1/2\pi M_s^2$ ,

где  $K_1$  – магнитокристаллическая анизотропия,  $M_s$  намагниченность насыщения. Например,  $\text{SmCo}_5$  имеет  $Q \sim 50$  и может, поэтому, считаться сильно анизотропным, в то время как для  $\text{NdFeB}$  фактор качества  $Q \sim 10$ , что уже позволяет его отнести к переходной области.

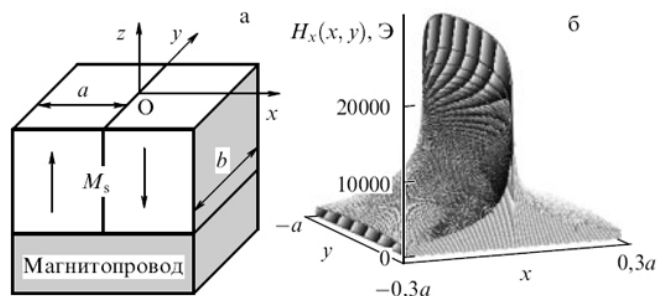


Рис. 1. а – Система из двух противоположно намагниченных магнитов с магнитопроводом; б – зависимость компонент поля рассеяния от пространственных координат  $x, y$ .

В качестве примера можно привести систему двух магнитов, намагниченных в противоположные стороны и имеющих общий магнитопровод (рис. 1). Вблизи места соприкосновения магнитов (в узкой щели между ними) наблюдается магнитное поле, значительно превышающее поле насыщения намагниченности, которое в данном примере составляет 1000 Гс.

В качестве доказательства существования сильных полей в обзоре [1] приводятся три независимых экспериментальных метода. Один из них использует магнитооптические измерения. Авторы воспользовались тем фактом, что лабиринтная доменная структура (рис. 2) может возникать в зазоре между двумя магнитами только в определенном узком диапазоне “сильных магнитных полей”. Таким образом, доказательство наличия таких полей удастся просто сфотографировать.

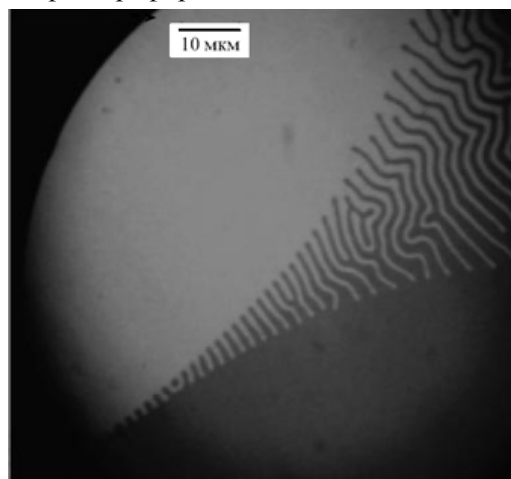


Рис. 2. Доменная структура феррит-гранатовой пленки у края границы между магнитами.

Если в качестве магнита взять коническую структуру, то оценки показывают, что максимально возможное поле, которое в такой системе можно создать, достигает 10 Тл. Это, по-видимому, предельная

величина магнитного поля, которой можно добиться, меняя форму сильно анизотропных магнитов.

В технических приложениях важную роль может играть не само магнитное поле, а его градиент, создание которого также является тонким искусством. Расчеты показывают, что в системе постоянных магнитов можно достичь градиента поля до  $10^7$  Э/см.

В обзоре предложены самые разнообразные технические применения “сильных” магнитов: ЭПР микроскопия, наномасштабные головки магнитной записи, холодильные установки, сепараторы слабомагнитных веществ и т.д. и т.п.

Таким образом, для реализации очень сильного магнитного поля (как в сверхпроводящих магнитах) оказывается достаточно сильно анизотропного магнита, напильника (для его обработки) и немного терпения и знаний, чтобы получить желаемые результаты, превышающие самые смелые прогнозы.

О.Коплак

1. В.Н.Самофалов и др., УФН **183**, 287(2013).
2. F.Bloch et al., Eur.Phys. J. Appl.Phys. **5**, 85 (1999).

## ФОТОНИКА

### Просветление в магнитном поле

Наноструктурированные среды, известные под именем фотонных и плазмонных кристаллов, широко используются в оптике для усиления всевозможных эффектов: электрооптических, магнитооптических, нелинейных оптических и др. Намного реже приходится слышать о принципиально новых эффектах, которые вообще бы отсутствовали в материале, не будь в нем наноструктуры. Как раз такой эффект продемонстрирован в недавней статье [1] коллектива с обширным международным представительством (Россия, Германия, Индия, Швеция и Австралия): благодаря нанесенной на магнитооптический материал металлической решетке магнитное поле способно значительно увеличивать прозрачность материала.

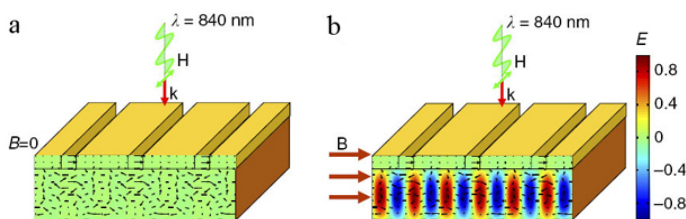


Рис. 1. Рассчитанное распределение амплитуды электрического поля  $E$  электромагнитной волны: а – в размагниченном состоянии; б – в магнитном поле  $B$  (стрелками показаны компоненты электрического поля в плоскости рисунка, цветом – в направлении перпендикулярно рисунку).

В качестве магнитооптического материала использовали пленки висмут-замещенного редкоземельного феррита-граната, прозрачного для длинноволно-

вого видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. На него наносили металлическое покрытие в виде тонких (меньше 100 нм) полосок золота с субмикронным периодом. Инфракрасное излучение, падающее по нормали к пленке, возбуждает гибридную плазмонно-волноводную моду (рис. 1). Приложение магнитного поля в плоскости пленки перпендикулярно щелям решетки позволяет возбудить дополнительную волноводную моду, ортогональную первой, что приводит к изменению оптических спектров магнитоплазмонного кристалла и увеличивает его коэффициент оптического пропускания (рис. 1б). Авторами [1] продемонстрирована модуляция интенсивности света 24% и это далеко не предел.

Здесь следует отметить, что магнитная модуляция интенсивности, и весьма значительная, наблюдается также в магнитных жидкостях, за счет образования цепочек из частичек ферромагнетика во внешнем поле. Однако характерные времена такого процесса – десятки или сотни секунд. В этом аспекте наблюдаемый магнитооптический эффект с характерными временами переключения в пикосекундном диапазоне и меньше, намного перспективнее для использования в фотонике, главным достоинством которой является как раз быстродействие.

А. Пятаков

1. V.I.Belotelov et al, Nature Commun. **4**, 2128 (2013).

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Термоэдс цепей, содержащих молекулы фуллерепа $C_{60}$

Как известно, возрастание скорости обработки информации в современных компьютерных и других информационных системах, а также непрерывное увеличение числа таких систем сопровождается соответствующим ростом интенсивности выделения тепловой энергии, которая выбрасывается в окружающее пространство. В настоящее время объем таких выбросов сопоставим с энергией, достаточной для поддержания жизнеобеспечения крупного города, а в будущем это станет значительной нагрузкой на мировую энергетику. В такой ситуации становится актуальной проблема разработки миниатюрных устройств, преобразующих тепловую энергию в электрическую, с тем чтобы хотя бы частично снизить потери энергии от работы информационных систем. Одна из возможных схем подобного устройства, основанная на использовании электрических цепей с участием молекул фуллерепа  $C_{60}$ , предложена и проанализирована группой исследователей из Univ. Autónoma de Madrid (Испания) и Lancaster Univ. (Великобритания) [1]. Согласно этому подходу (см. рис.), на поверхность золотой подложки наносится крайне разбавленный раствор фуллерепа  $C_{60}$ , после высушивания которо-

го на поверхности остаются островки, содержащие одну или несколько молекул.

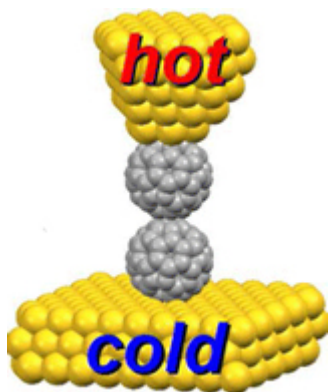


Схема устройства для проведения измерений термоэдс.

С целью проведения электрических измерений зонд сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), к которому приложено базовое напряжение, передвигался по поверхности образца. При этом, во избежание контакта между зондом СТМ и подложкой направление движения менялось на противоположное в момент, когда проводимость цепи опускалась ниже пороговой величины  $G_0 = 2e^2/h$ , соответствующей квантовой баллистической проводимости (здесь  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка). При наличии разности температур  $\Delta T$  между подложкой и наконечником СТМ в цепи возникает дополнительная разность потенциалов  $\Delta V$ , величина которой пропорциональна  $\Delta T$ , причем коэффициент пропорциональности представляет собой термоэдс рассматриваемого перехода. Измерения термоэдс проводили при двух перепадах температуры (12 и 25 К) на нескольких десятках образцов, примерно половина из которых содержала одну молекулу  $C_{60}$ , а другая половина содержала димеры  $(C_{60})_2$ . Согласно измерениям, термоэдс контакта, содержащего единичную молекулу  $C_{60}$ , варьируется от 18 до 23 мкВ/К, что является рекордом для контактного термоэдс. В случае контактов, содержащих димеры  $(C_{60})_2$ , величина термоэдс варьируется в диапазоне от 25 до 50 мкВ/К. При этом величина термоэдс, усредненная по нескольким десяткам образцов, составляет 33 мкВ/К. Обнаруженная в эксперименте растущая зависимость термоэдс контакта от числа содержащихся в нем молекул  $C_{60}$  подтверждается результатами квантовомеханических расчетов, проведенных на основе теории функционала плотности с использованием техники функций Грина. Согласно этим расчетам, контакт, содержащий цепочку из трех молекул  $C_{60}$ , должен иметь термоэдс, в 4 раза превышающий соответствующую величину для контакта на основе единичной молекулы.

А. Елецкий

1. C.Evangeli et al., *Nano Lett.* **13**, 2141 (2013).

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

### Почему жемчужины круглые?

Люди издавна ценили жемчуг не только за богатство оттенков перламутра, но и за совершенство формы (рис. 1а). Даже те из жемчужин, что отклоняются от идеала, имеют форму фигуры вращения, словно их вылепил на гончарном круге неведомый мастер (рис. 1б). Справедливости ради надо отметить, что бывают и так называемые “барочные жемчужины” неправильной формы (рис. 1с), но это явление из разряда “сиамских близнецов” – результат одновременного роста нескольких жемчужин.

Ученые из Univ. de Granada (Испания) и Univ. Nancy (Франция) провели исследование, в котором обосновывается физический механизм, приводящий к вращению жемчужины в процессе роста [1], тем самым подтверждая давние подозрения производителей жемчуга. Тщательно исследовав перламутровую поверхность, они пришли к выводу, что ее профиль представляет собой аналог храповика – колеса с односторонним вращением (рис. 2), причем форма жемчужины и профиль поверхности взаимосвязаны: ось вращения жемчужины совпадает с осью храповика. Зубчики имеют высоту в полмикрона и скорость такого вращения невелика: один оборот жемчужина делает почти целый месяц.

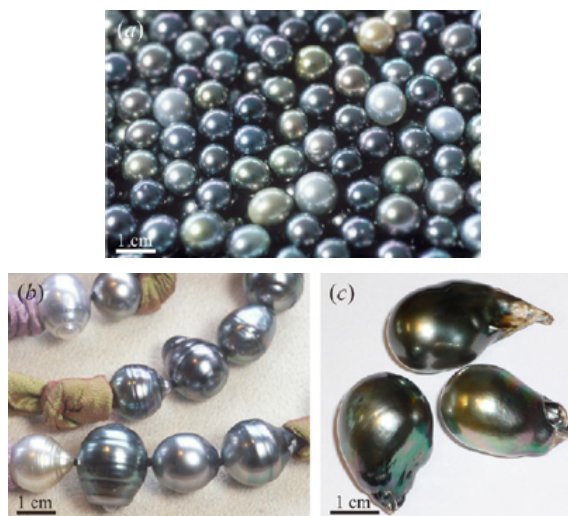


Рис. 1. Три категории жемчуга: а – высшая категория, б – ожерелье из жемчужин каплевидной формы с симметрией фигур вращения, с – жемчужины барокко [1].

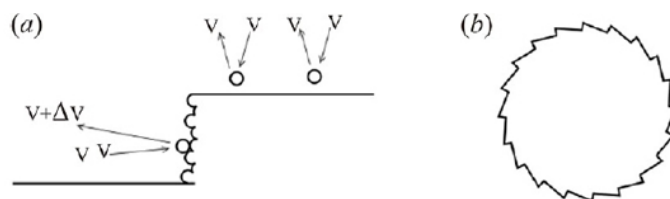


Рис. 2. Механизм вращения: а – несбалансированность давлений молекул вещества-растворителя, отскакивающих от крутой и пологой части зуба; б – профиль поверхности жемчужины (размер зубцов в целях наглядности увеличен в тысячи раз). [1].



Далее авторы задаются вопросом из серии “что появилось раньше – курица или яйцо?”: означает ли корреляция видимой формы жемчужины с микроскопическим рельефом ее поверхности, что зубчики являются причиной вращения жемчужины или, наоборот? И дают вполне ожидаемый ответ: эти два процесса взаимообусловлены. Если на поверхности жемчужины появился выступ, то молекулы растворенного вещества будут с большей вероятностью оседать на его стенке. Поскольку кристаллизация идет с выделением тепла, это приводит к нагреву стенки, в результате чего молекулы растворителя отскакивают от нее с большей скоростью, чем подлетали (рис. 2 а), сообщая стенке избыточный импульс и раскручивая жемчужину (механизм вращения, напоминающий тот, что имеет место в радиометре Крукса). Вращение приводит к развитию морфологической неустойчивости, заставляя выравниваться фронт кристаллизации параллельно оси вращения. Таким образом, замыкается круг причинно-следственной связи, оставляя нас лишь восхищаться причудливой игрой сил в природе.

*А. Пятаков*

1. J.H.E. Cartwright et al., *Langmuir* **29**, 8370 (2013);  
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la4014202>.

### **Гравитация – убийца когерентности**

Макроскопический мир возникает из микроскопического в результате декогерентизации квантовых суперпозиционных состояний и их превращения в классические (смешанные). Причиной потери когерентности является неизбежное взаимодействие квантовых систем со своим окружением. Чем сильнее взаимодействие, тем быстрее пропадает когерентность. В каждом конкретном случае влияние среды можно до определенной степени ослабить: понизить температуру, чтобы было поменьше фононов; отгородиться от электромагнитных волн специальным экраном и т.п. Но существует источник декогерентизации, устранить который нельзя в принципе. Это – фоновое гравитационное излучение, доставшееся нам в наследство от Большого Взрыва. От него ни за каким экраном не спрячешься. С математической точки зрения воздействие такого гравитационного окружения на физическую систему следует из уравнений Эйнштейна, согласно которым метрика пространства-времени влияет на систему посредством тензора энергии-импульса последней. Из теории эффективного поля в приближении Борна-Маркова следует простая формула для скорости гравитационно-индуцированной декогерентизации суперпозиции двух квантовых состояний:  $\Gamma = (k_B T / \hbar) [(E_1 - E_2) / E_P]^2$ , где  $E_1$  и  $E_2$  – энергии этих состояний,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $T \sim 1$  К – температура космического гравитационного фона,  $E_P = (\hbar c^5 / G)^{1/2} \sim 10^{28}$  эВ – планковская энергия (здесь  $c$  – скорость

света,  $G$  – постоянная всемирного тяготения). Например, если мы рассмотрим систему массой  $\sim 1$  г, состоящую из атомов с разницей между энергиями возбужденного и основного уровней  $\sim 1$  эВ, то для суперпозиции состояний “все атомы невозбужденные” и “все атомы возбужденные” получим  $\Gamma \sim 10^2$  сек<sup>-1</sup>, то есть декогерентизация такой системы происходит за время  $\tau \sim 10^{-2}$  сек. С ростом числа атомов  $N$  величина  $\tau$  уменьшается пропорционально  $N^{-2}$ . Если же взять суперпозицию основного и возбужденного состояний одного-единственного атома, то для нее скорость гравитационной декогерентизации оказывается чрезвычайно низкой,  $\Gamma \sim 10^{-45}$  сек<sup>-1</sup>. Таким образом, даже если по маговому волшебной палочки исчезнут все другие декогерентизирующие факторы, вездесущая гравитация не допустит существования макроскопического Шредингерова Кота, а вот для когерентности наномасштабных объектов гравитационное поле большой угрозы не представляет.

*По материалам статьи M.P. Blencowe,  
 Phys. Rev. Lett. **111**, 021302 (2013).*

## КОНФЕРЕНЦИИ

**Научная сессия ОФН РАН  
“Перспективы исследований  
в области нейтринной физи-  
ки частиц и астрофизики”,  
посвященная 100-летию со  
дня рождения академика  
Б.М. Понтекорво, 2-3 сен-  
тября 2013 г, в Доме между-  
народных совещаний (ДМС), г. Дубна**



Бруно Понтекорво

### Программа

#### 2 сентября (14-30)

1. **Ю.Г. Куденко** - Нейтринные ускорительные эксперименты с длинной базой: результаты и перспективы
2. **К. Шпиринг** - Результаты ICESUBE и перспективы нейтринной астрономии
3. **А.С. Барабаш** - Безнейтринный двойной бета распад
4. **С.М. Биленький** - О научном наследии Б.М. Понтекорво

#### 3 сентября (09-30)

1. **А.Г. Ольшевский** - Результаты и перспективы нейтринных реакторных экспериментов
2. **В.Н. Гаврин** - Исследования низкоэнергетических нейтрино в Баксанской нейтринной лаборатории
3. **Д.С. Горбунов** - Стерильные нейтрино и их возможная роль в физике частиц и космологии
4. **А.В. Дербин** - Эксперименты с солнечными антинейтрино
5. **В.А. Рубаков** - Перспективы исследований в нейтринной физике частиц и астрофизике

Web: [www.gpad.ac.ru](http://www.gpad.ac.ru)

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

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

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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