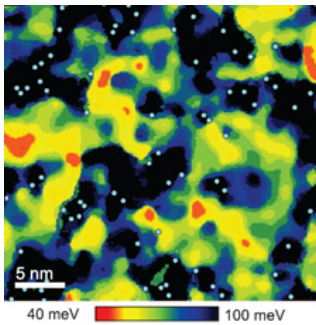


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Псевдощель и кислородные вакансии в ВТСП

Одной из отличительных особенностей купратных ВТСП является наномасштабная неоднородность их электронной структуры. Теоретические объяснения этой неоднородности варьируются от химического беспорядка до спонтанного фазового расслоения. В работе [1] сканирующая электронная спектроскопия с атомарным разрешением использована для изучения взаимосвязи между локальной величиной псевдощели E_{pg} и распределением атомов кислорода в ВТСП $Bi_{2+y}Sr_{2-y}CaCu_2O_{8+x}$ с различными x и $T_c = (55 \div 91)$ К. Оказалось, что E_{pg} максимальна в окрестности 1) межузельных атомов кислорода А-типа (расположенных вблизи слоев Sr-O) и 2) апикальных кислородных вакансий (см. рис.).



Корреляция локальной псевдощели с положением вакансий апикальных атомов кислорода в образце с $T_c = 55$ К.

Отсюда можно заключить, что эти два типа кислородных дефектов приводят к уменьшению локальной концентрации дырок. Основываясь на полученных результатах, авторы [1] предлагают следующий путь увеличения критической температуры: недодопировать образец, чтобы увеличить силу спаривающего потенциала, но при этом так подобрать режим отжига, чтобы межузельный кислород удалить, а апикальные вакансии не создавать.

Л. Оленов

1. I. Zeljkovic et al., Science 337, 320 (2012).

Высокая критическая плотность тока в нетекстурированном проводе ($Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$)

В купратных ВТСП, таких как $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, мезеренные границы играют роль слабых связей, которые приводят к уменьшению критической плотности тока J_c и тем самым существенно ограничивают диапазон практического использования объемных керамических образцов и проводов. Аналогичная картина имеет место и в безмедных ВТСП (железосодержащих пниктидах и халькогенидах), где J_c поликристаллов обычно намного меньше 10^4 А/см², тогда как локальная внутризеренная $J_c \sim 10^5 - 10^6$ А/см². Резкого повышения J_c нетекстурированных поликристаллических образцов и проводов ферропниктида ($Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$) удалось добиться сотрудникам Florida State Univ. [1]. Это стало возможным благодаря низкой температуре синтеза (600°C), в результате чего границы зерен оказались свободными от блокирующих протекание сверхтока примесей (которые присутствуют в фазах Fe-As при высоких температурах), а сами зерна имели очень малые размеры (~ 200 нм). Кроме того, в процессе синтеза поддерживалось высокое давление (около 200 МПа). Как следствие, мезеренные связи значительно усиливались,

И далее ...

- 2 Нематический переход в безмедных ВТСП

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Уведомление о запутанности

- 3 Квантовая телепортация на 100 километров в открытом пространстве

Гигантский спиновый эффект Зеебека в немагнитном материале

ГРАФЕН

- 4 Границы раздела между обычным и полностью гидрогенизированным графеном

- 5 Дислокации в графене

Обработка графена с помощью фемтосекундного лазера

ФОТОНИКА

- 6 Фотонный изолятор: по течению и против него

МАГНИТЫ

- 7 Мушки в магните лучше лягушки

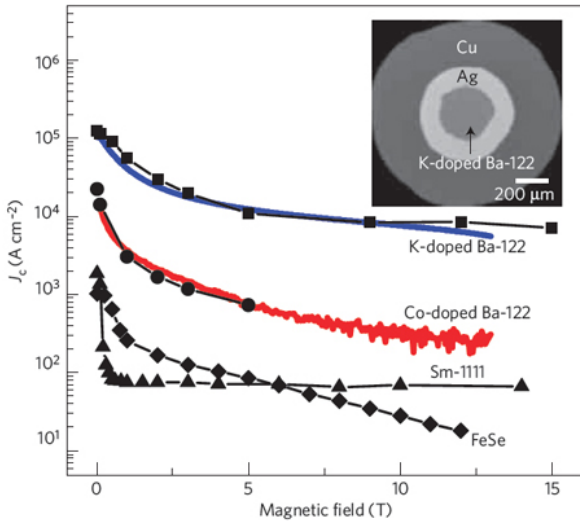
ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 8 Насос из углеродной нанотрубки, фуллерена и графена

Тонкая пленка из нанокompозита на основе УНТ поглощает СВЧ излучение

- 9 Селективный нагрев углеродных нанотрубок СВЧ-облучением

чему способствовала и низкая анизотропия пниктидов (коэффициент анизотропии $\gamma = 1 \div 2$ в отличие от $\gamma \sim 5$ в купратах). При $T = 4.2$ К и $H = 0$ транспортная J_c превысила 10^5 А/см² и не сильно уменьшалась с ростом H до 12 Тл (см. рис.).



Полевые зависимости J_c нетекстурированных проводов (Ba,K)-122, (Ba,Co)-122, Sm-1111 и FeSe при $T = 4.2$ К. Символы и сплошные линии – результаты резистивных и магнитных измерений соответственно. На вставке – поперечное сечение провода (Ba,K)-122 в оболочке Ag/Cu.

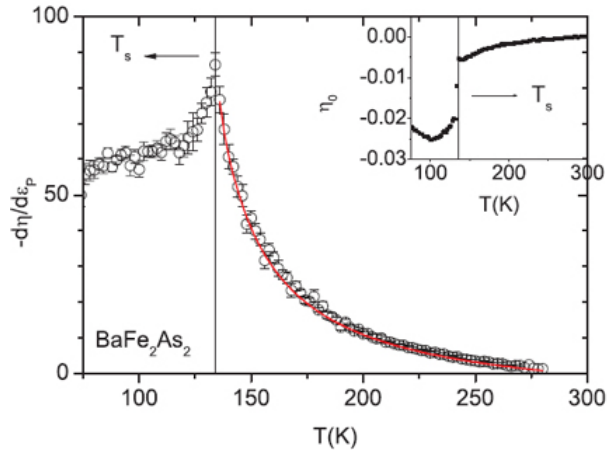
Этого вполне достаточно для сильноточных приложений.

Л. Опенов

I. J.D. Weiss et al., Nature Mater. II, 682 (2012).

Нематический переход в безмедных ВТСП

При фазовом переходе электронной подсистемы в нематическую фазу имеет место нарушение дискретной вращательной симметрии кристаллической решетки, тогда как трансляционная симметрия сохраняется. Недавно было высказано предположение, что в купратных и безмедных ВТСП сверхпроводящий порядок сосуществует с нематическим. В работе [1] выполнены детальные исследования нематического отклика кристаллов пниктида $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$. Измерив зависимость удельного сопротивления ρ от одноосной деформации $\varepsilon = \Delta L/L$ в направлении протекания тока, авторы [1] определили нематическую восприимчивость $d\eta/d\varepsilon$, где $\eta = \Delta\rho/\rho_0$, и обнаружили, что она имеет резкий пик строго при температуре структурного перехода (см. рис.), то есть структурный переход вызван нематической электронной неустойчивостью. Кроме того, в [1] показано, что температура нематического перехода обращается в нуль при оптимальной (отвечающей максимуму T_c) концентрации носителей. Значит, при этой концентрации происходит квантовый ($T = 0$) фазовый переход в нематическую фазу. Не исключено, что именно сопутствующие такому переходу флуктуации приводят к росту T_c . В любом случае эти флуктуации надо учитывать при описании нормального состояния пниктидов.



Температурная зависимость нематической восприимчивости BaFe_2As_2 . Красная линия – подгоночная теоретическая кривая в модели среднего поля. Вертикальной линией отмечена температура структурного перехода.

Л. Опенов

I. J.-H. Chu et al., Science 337, 710 (2012).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Уведомление о запутанности

Для квантовой связи требуются запутанные состояния удаленных друг от друга кубитов. Если кубиты кодируются в атомные спины, то такие состояния можно приготовить, используя фотоны, распространяющиеся по оптоволокну от кубита к кубиту. Однако на практике неизбежны оптические потери, поэтому попытка перепутывания может оказаться как успешной, так и неудачной. Для надежной работы квантового канала нужно, чтобы запутанное состояние “сигнализировало” о своем приготовлении. Один из вариантов такого “перепутывания с уведомлением” реализован в работе немецких физиков [1].

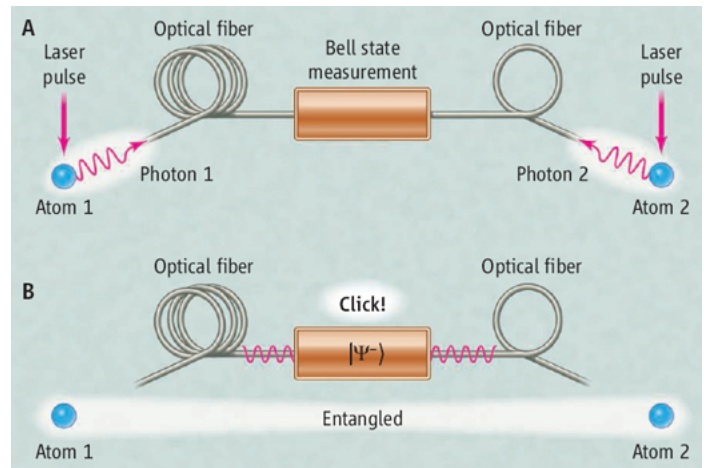


Схема эксперимента из работы [1]

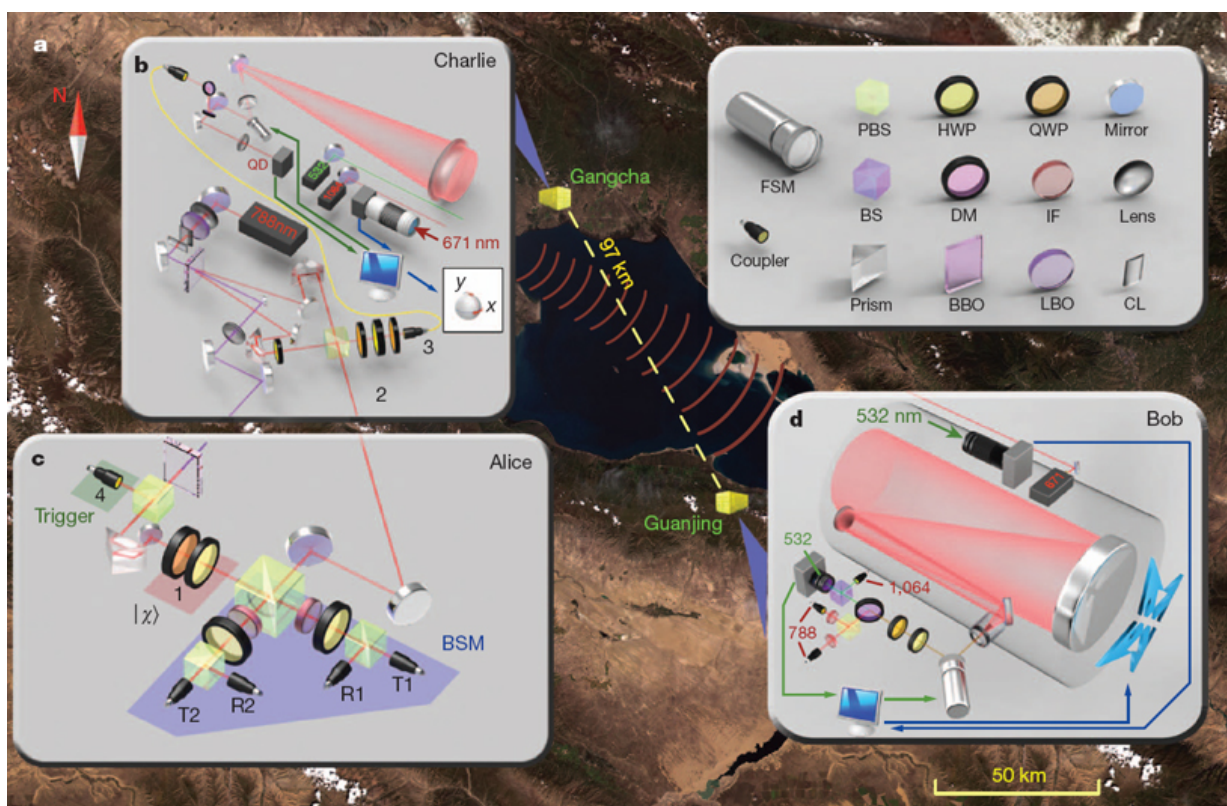
Атомы ^{87}Rb помещались в оптические дипольные ловушки, находящиеся в разных лабораториях на расстоянии 20 м. При синхронном возбуждении атомов короткими лазерными импульсами испускались два фотона, поляризационные состояния каждого из которых были перепутаны со спиновыми состояниями “своих” атомов. При выполнении над фотонами так называемого белловского измерения

состояние фотонной пары проектируется на одно из четырех запутанных белловских состояний. Наличие квантовой корреляции между фотонами и атомами приводит к тому, что и атомы при этом тоже оказываются в соответствующем запутанном состоянии. Таким образом, срабатывание белловского детектора извещает нас о перепутывании спиновых состояний удаленных атомов. Полученные в [1] результаты – важный шаг на пути к практическому осуществлению протоколов квантовой связи.

1. J.Hofmann et al., *Science* 337, 72 (2012).

Квантовая телепортация на 100 километров в открытом пространстве

Для осуществления квантовой связи нужно уметь передавать неизвестные квантовые состояния между удаленными пунктами. Это достигается посредством квантовой телепортации и распределения запутанности. В известных экспериментах телепортация фотонных кубитов была реализована посредством оптоволоконных линий. Но оптические потери и быстрая декогерентизация фотонов в оптоволокне существенно ограничивают расстояния, на которые можно передавать квантовую информацию. А использование квантовых репитеров, хотя и возможно в принципе, сопряжено со значительными техническими трудностями. В работе [1] китайские ученые успешно телепортировали фотонные кубиты в открытом пространстве на 97 км (см. рис.).



Квантовая телепортация в открытом пространстве.

Схема эксперимента: Чарли генерирует пару запутанных фотонов, один из которых пересылает Алисе для белловского измерения, а другой направляет Бобу. Фотография местности, где проходил эксперимент, сделана со спутника.

В атмосфере потери фотонов и их декогерентизация пренебрежимо малы, что позволило достичь точности около 80% (среднее по шести различным телепортированным состояниям). Авторами [1] продемонстрировано также распределение пары запутанных фотонов между получателями, находящимися на расстоянии 102 км друг от друга. Результаты работы [1] говорят о том, что эпоха лабораторных экспериментов подходит к концу, и не за горами создание спутниковых систем квантовой связи.

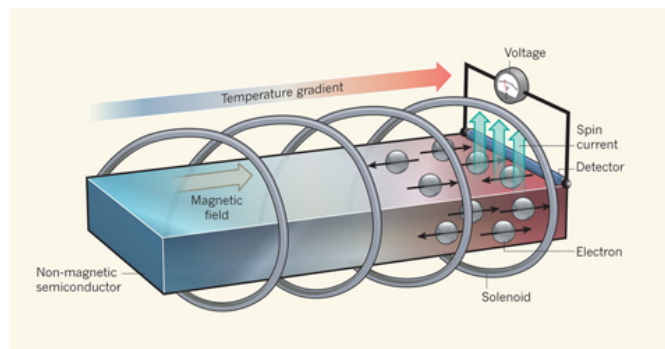
1. J.Yin et al., *Nature* 488, 185 (2012).

Гигантский спиновый эффект Зеебека в немагнитном материале

Несколько лет назад был открыт спиновый эффект Зеебека (СЭЗ): в магнитных материалах градиент температуры приводит к возникновению спинового тока, когда электроны с разными проекциями спина двигаются в противоположных направлениях. Спиновый ток регистрируется по электрическому напряжению, которое он генерирует за счет обратного спинового эффекта Холла, так что количественной мерой СЭЗ является коэффициент S с размерностью В/К. Обычно он составляет около 1 мкВ/К. В работе

[1] американские физики из Ohio State Univ. показали, что СЭЗ может иметь место и в немагнитных материалах, причем величина S оказывается на три порядка больше и достигает ~ 1 мВ/К, как для классического термоэлектрического эффекта.

Для поляризации электронов по спину авторы [1] помещали провод из InSb в сильное (2.7 Тл) магнитное поле (см. рис.), что приводило к зеемановскому расщеплению электронных уровней ΔE_Z , усиленному в ~ 25 раз за счет спин-орбитального взаимодействия.



Спиновый эффект Зеебека в магнитном поле.

При повышении температуры до 40 К величина ΔE_Z становилась сравнима с тепловой энергией, и СЭЗ практически полностью исчезал. Неожиданным результатом работы [1] стало отсутствие изменения знака зеебековского напряжения при изменении направления магнитного поля. Возможно, это как-то связано с кристаллографической ориентацией образца. Не исключено, что СЭЗ в немагнитных материалах можно наблюдать и без магнитного поля (например, в топологических диэлектриках, на поверхности которых ориентация спина электрона связана с направлением его движения).

1. C.M.Jaworski et al., *Nature* **487**, 210 (2012).

ГРАФЕН

Границы раздела между обычным и полностью гидрогенизированным графеном

Мезоскопические структуры на основе графена считаются перспективными кандидатами для применения в наноэлектронике и спинтронике. Так, например, узкие графеновые полоски (наноленты) могут использоваться в качестве подводящих проводов, баллистических структур, элементов полевых транзисторов и пр. Однако свойства графеновых нанолент чрезвычайно чувствительны к их ширине и конкретной атомной структуре границ, поэтому изготовление нанолент с заданными характеристиками представляет собой сложную технологическую задачу. Вместо того, чтобы “отрезать” наноленты от графена (механическими или химическими методами) было предложено [1] получать их путем селективного удаления водорода из графана – монослоя графена, полностью насыщенного водородом, таким образом, что адсорбированные на разных углеродных подрешетках атомы водорода

расположены по разные стороны от плоскости монослоя (полная двусторонняя гидрогенизация). Поскольку графан является диэлектриком ($E_g \approx 5$ эВ), то графеновые области играют роль потенциальных барьеров для электронов графена.

В работе [2] на примере простой модели показано, что натяжение границы раздела графен/графан положительно для границ как зигзагообразного, так и кресельного типа (рис. 1a, b), и поэтому такие границы устойчивы относительно расслоения графен-графановой системы на малые кластеры (при заданном числе атомов водорода энергия минимальна в случае прямой границы). Эти результаты подтверждены в работе [3] путем численных расчетов, учитывающих релаксацию атомов в окрестности границы. В [3] рассмотрена также “бородатая” (bearded) граница (рис. 1c). Она оказалась неустойчивой: ее энергия понижается при перескоках атомов водорода из графана в графен.

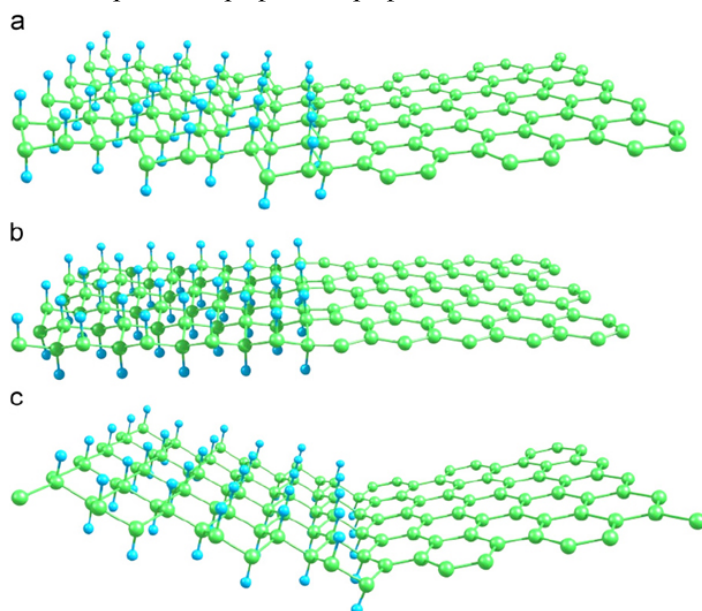


Рис. 1. Зигзагообразная (a), кресельная (b) и “бородатая” (c) границы раздела графен/графан. Большие зеленые сферы – атомы углерода, маленькие синие сферы – атомы водорода.

С практической точки зрения недостаток графана заключается в том, что он может существовать только в “подвешенном” (suspended) виде, но не на подложке, препятствующей доступу водорода к одной из сторон монослоя. Альтернативой является графен с полной односторонней гидрогенизацией (single-side hydrogenated graphene, SSHG). Как и графан, SSHG является диэлектриком, хотя и с несколько меньшей величиной E_g . В принципе графеновые наноленты можно было бы попытаться изготовить, селективно удаляя водород не из графана, а из SSHG. Однако, как показано в [3], границы раздела графен/SSHG оказываются неустойчивыми либо из-за перескоков атомов из SSHG в графен, либо из-за индуцированного границей “слипания” атомов водорода в молекулы H_2 и их последующей десорбции. В дальнейшем представляет интерес

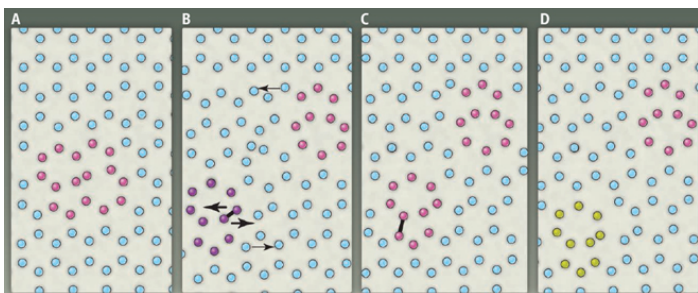
рассмотреть также границы графан/ SSHG. Они могут оказаться достаточно устойчивыми по причине отсутствия с обеих сторон вакантных мест для перескоков атомов водорода.

Л.Опенев

1. *Nano Lett.* **9**, 1540 (2009).
2. *Phys. Rev. B* **85**, 035408 (2012).
3. *Physica E* **44**, 1894 (2012).

Дислокации в графене

Механические свойства кристаллов определяются дефектами их структуры, главным образом – дислокациями. В графене создаваемая дефектами деформация квазидвумерной решетки может индуцировать сильные псевдомагнитные поля, способствовать появлению новых уровней Ландау, парамагнитных центров и пр., что оказывает существенное влияние на электронные характеристики. В работе [1] формирование и движение дислокаций в графене изучено в режиме реального времени методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM). При ускоряющем напряжении менее 90 кВ максимальная энергия, передаваемая от электронного пучка атомам углерода, не превышает 17 эВ, что недостаточно для выбивания атомов из графена. Но этой энергии хватает, чтобы создать в решетке дефекты. В [1] установлено, что источником дислокаций в графене являются так называемые дефекты Стоуна-Уэльса, которые образуются в результате поворота связи C–C на угол 90° , в результате чего в гексагональной решетке возникают два 5-угольника и два 7-угольника. Передвигаются дислокации путем скольжения или переползания (см. рис.) со скоростью ~ 0.1 нм/мин.



- (A) Дефект Стоуна-Уэльса в графене.
- (B) Дислокации в графене. Тонкие стрелки – векторы Бюргерса. Толстые стрелки показывают направления смещения атомов при скольжении дислокации вправо.
- (C) Атомная конфигурация, возникающая в результате скольжения. Если электронный пучок выбивает два помеченных атома, то дислокация переползает вниз.
- (D) Атомная конфигурация после переползания.

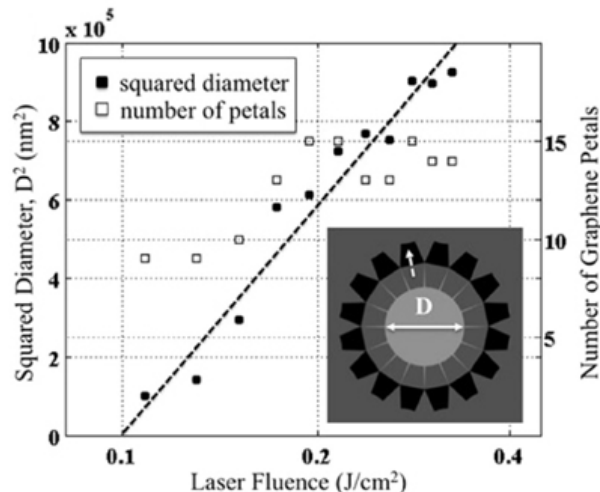
Каждая дислокация создает в своей окрестности поле деформаций, которое распространяется на ~ 1 нм. Контролируемое создание дефектов в графене представляет интерес для ряда возможных применений этого уникального материала в наноэлектронике и спинтронике.

1. *J.H. Warner et al., Science* **337**, 209 (2012).

Обработка графена с помощью фемтосекундного лазера

Как известно, графен, сочетающий необычные электронные свойства, высокую теплопроводность, термическую, механическую и химическую стабильность с миниатюрными размерами, обладает значительным потенциалом прикладного использования. Необходимым этапом на пути практической реализации этого потенциала является разработка достаточно простых и недорогих методов обработки отдельных образцов графена, позволяющих придать образцу необходимую структуру. Наиболее естественным подходом к решению этой проблемы представляется использование лазерного излучения, которое позволяет вырезать образцы графена произвольной формы. Исследователи из Univ. of California, Berkeley (США) в работе [1] сообщают о возможностях подобного подхода и сопровождающих его трудностях.

Однослойные графеновые листы получали стандартным методом химического осаждения паров (CVD) на поверхности медной фольги, после чего с помощью промежуточной подложки из полиметилметакрилата (PMMA), расположенной на графитовой пленке, переносили на подложку из желаемого материала. После удаления пленки PMMA с помощью диметилэтилена при температуре 60°C образец графена облучали импульсами Ti-сапфирового лазера ($\lambda \approx 800$ нм). Импульсы длительностью около 100 фс с частотой повторения 1 кГц фокусировали с помощью линзы 100X. Образец, облучаемый лазерными импульсами, передвигали со скоростью 2 мм/с, так, что расстояние между центрами пятен, создаваемых лазерным лучом на поверхности графена, составляло 2 мкм. Для управления энергией импульса использовали полуволновую пластинку и поляризационный расщепитель луча. Плотность энергии лазерного луча, падающего на поверхность графена, не превышала долей Дж/см². В качестве подложки использовали, в частности, кремниевую пластину, покрытую слоем SiO₂ толщиной 285 нм.



Изображения облученных образцов графена, полученные с помощью сканирующего электронного

микроскопа (SEM), указывают на образование в плоскости графена отверстий, края которых изогнуты напоподобие цветочных лепестков и представляют собой участки двухслойного графена. Подобные структуры хорошо различимы в силу различия электронных свойств графена, двухслойного графена и подложки. Характерная форма таких образований показана на вставке к рисунку, на котором также приведены зависимости площади отверстия и числа лепестков от плотности энергии лазерного луча, падающего на поверхность образца. Лепестковые структуры, подобные той, что показаны на рисунке, наблюдали не только при использовании в качестве подложки пластины Si/SiO₂, но также таких материалов как кварц, кремний и Au/Si/SiO₂. При этом наблюдается зависимость характерного размера лепестковой структуры от материала подложки.

Наряду с графеном, расположенным на подложке, облучали также образцы свободно подвешенного графена. С этой целью однослойные образцы с помощью капли изопропилового спирта помещали на золотую сетку просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ), покрытую пористой пленкой из аморфного углерода. Таким образом, лист графена находился в подвешенном состоянии над одним из отверстий в этой пленке. При облучении листа лазерным импульсом с плотностью энергии около 100 мДж/см² в графене возникало отверстие диаметром 540 нм, который превышал соответствующую величину для графена на подложке Si/SiO₂ (314 нм). При этом, в отличие от ситуации с подложкой, в случае с подвешенным графеном лепестковые структуры не наблюдались. Данные эксперимента указывает на возможность использования фемтосекундных лазеров для целенаправленного воздействия на структуру графеновых листов.

А.Елецкий

I. J.-H. Yoo et al., Appl. Phys. Lett. 100, 233124 (2012).

ФОТОНИКА

Фотонный изолятор: по течению и против него

Заветной целью интегральной оптики (или фотоники, как принято ее называть в настоящее время) является переход к полностью оптическим сопряжениям в микросхемах, что обещает большую скорость вычисления и меньшие энергетические потери. В богатом арсенале уже созданных интегрально-оптических устройств зияет одна брешь – оптический изолятор или невзаимный волновод, в котором бы фотоны могли двигаться только в одном направлении. Такие устройства необходимы для изоляции источников излучения – чтобы отраженный сигнал, попадая в оптический резонатор лазера, не приводил бы к дестабилизации его излучения.

Невзаимность эквивалентна нарушению симметрии относительно направления отсчета времени (Т-нечетность), поэтому наиболее распространенным способом создания невзаимных оптических устройств является использование магнито-оптического эффекта Фарадея. Направление вращения плоскости поляризации света в магнитных материалах (Т-нечетных средах) зависит от направления распространения света. Однако существует проблема миниатюризации таких устройств, так как с уменьшением размеров уменьшается и набираемая волной разность фаз. Другой возможностью является использование нелинейно-оптических эффектов, однако они требуют больших интенсивностей излучения.

Тем временем, наиболее естественное решение проблемы создания невзаимного волновода – пустить по нему дополнительную волну. В недавней публикации исследователей из Cornell Univ. и Stanford Univ. (США) [1] была продемонстрирована возможность создания такого фотонного устройства.

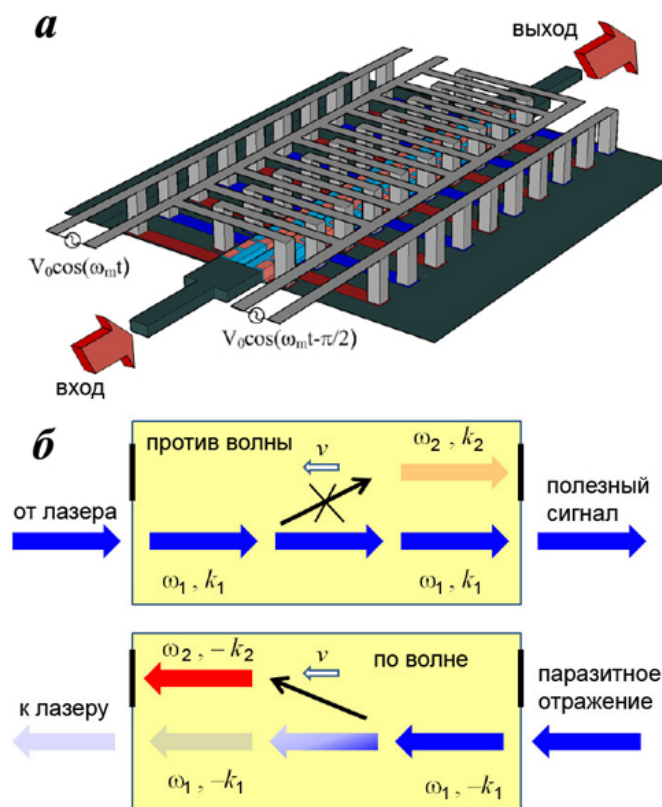


Рис. 1. Оптический “ниппель” [1]: а – устройство невзаимного оптического волновода (система электродов создает дополнительную волну изменения показателя преломления, бегущую навстречу входному сигналу); б – преобразование отраженного сигнала в волну с другой частотой и волновым вектором. (Иллюстрации взяты из комментария [2]).

Созданное ими устройство представляло собой кремниевый волновод, зажатый во встречно-штыревой системе электродов, которая соответствовала периодической структуре областей с *p*- и *n*-проводимостью в кремниевом волноводе (рис. 1а). Электрическое напряжение на электроде локально

изменяет концентрацию свободных носителей и, следовательно, показатель преломления волновода. Подавая переменное напряжение на частоте 10 ГГц, исследователям удавалось создать волну электрического напряжения, бегущую вдоль системы электродов, причем период структуры соответствовал четверти длины волны. Волновое число K и частота Ω этой дополнительной волны подбирались таким образом, чтобы выполнялись условия синхронизма для двух оптических мод волновода с частотами ω_1 и ω_2 и волновыми числами k_1 и k_2 , соответственно: $K = k_2 - k_1$, $\Omega = \omega_1 - \omega_2$. В результате для волны k_1 (ω_1), бегущей “по течению” выполнялось условие фазового синхронизма, и она трансформировалась в волну k_2 (ω_2) (рис. 16), “безопасную” для лазера, в то время как световая волна, идущая “против течения”, вопреки бытовым представлениям, беспрепятственно проходила волновод. Стоит отметить, что роль дополнительной волны может так же играть звуковая волна – невязанные устройства хорошо известны акустооптикам [3], однако относительно низкая частота звука (мегагерцы) не позволяет получить большую отстройку по частоте, а низкая эффективность дифракции требует большой длины взаимодействия, что не позволяет создавать миниатюрные устройства.

А.Пятаков

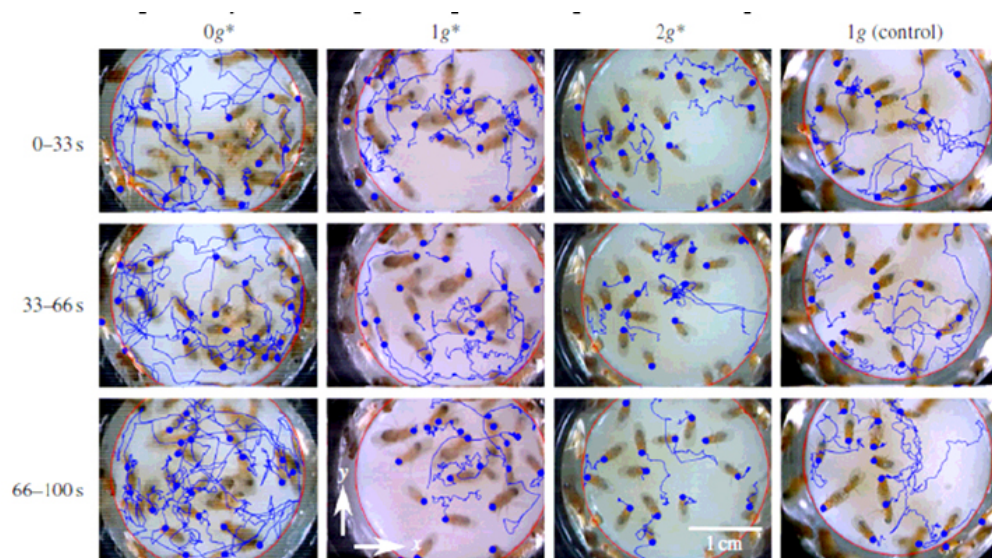
1. *H.Lira et al., Phys. Rev. Lett.* **109**, 033901 (2012).
2. *G.Shvets, Physics* **5**, 78 (2012).
3. *В.И.Балакиев, В.Н.Парыгин, Л.Е.Чирков, “Физические основы акустооптики”. М.: Радио и связь, 1985.*

МАГНИТЫ

Мушки в магните лучше лягушки

Существует предание, что когда-то давно пророк Магомет приказал сделать гроб, который висел бы в пространстве безо всякой поддержки. Магнитное поле по замыслу создателей этого чуда должно было удерживать гроб, противодействуя гравитации. Позднее этот опыт стал научно-популярным и получил название “Гроб Магомета”. В [1] эту “классику” соединили с другим “классическим” объектом – мушкой *Drosophila melanogaster*, которая, без сомнения, самая известная муха в научном мире. Даниил Гранин любовно заметил: “Если бы я писал научно-популярную книгу, я бы, прежде всего, воспел дрозофилу, сочинил бы нечто вроде оды этому насекомому, верному помощнику тысяч генетиков начиная с 1909 года. Оду за ее откровенность. Или за ее болтливость. Болтливый объект, который хорош тем, что так плохо хранит тайны природы. Трудно оценить, какую большую службу сослужила дрозофила науке. Если сочли возможным поставить памятник павловской собаке, то следовало бы увековечить и нашу благодарность моргановской мухе дрозофиле...” [2] И вот прошло сто с лишним лет, а эта трехмиллиметровая мушка с тигровым брюшком продолжает открывать тайны.

Drosophila melanogaster является идеальной моделью организма для изучения влияния гравитации и магнитного поля на биологические объекты. В [1], чтобы уменьшить вес мушки, был использован тот же эффект, за который А.К. Гейм получил Шнобелевскую премию – левитация диамагнитного тела в магнитном поле. Отметим, что в ПерсТе мы писали о левитации лягушек в сверхпроводящем магните [3].



Траектории движения мушек при различных эффективных ускорениях свободного падения g^* , являющихся результатом сложения гравитационных и магнитных сил.

Новые претенденты на премию [1] обнаружили, что по мере увеличения эффективного ускорения свободного падения, траектории мушек становятся все короче и прямолинейнее – результат предсказуемый, поскольку бедным мушкам становится просто

трудно лететь (см. рис.). (Тут вспоминается еще один классический эксперимент про петуха и магнит, который подвижными полюсами зажимал петуху голову, заставляя его громко кукарекать, а не-

задачливых исследователей – делать вывод о влиянии магнитного поля на поведение петуха).

Главным результатом исследований [1] стала аналогия между опытами, проведенными в реальной невесомости на околоземной орбите и опытами в магнитном поле. Оказалось, что эти виды невесомости (обычная и магнитная) ничем друг от друга не отличаются в плане поведения мушек. Следовательно, дорогие эксперименты на околоземной орбите вполне можно заменить левитацией в сверхпроводящем магните, в котором, в отличие от орбитальной станции, отсутствуют высокочастотные вибрации, что делает сверхпроводящий магнит даже предпочтительнее, чем опыты в реальной невесомости.

О.Коплак

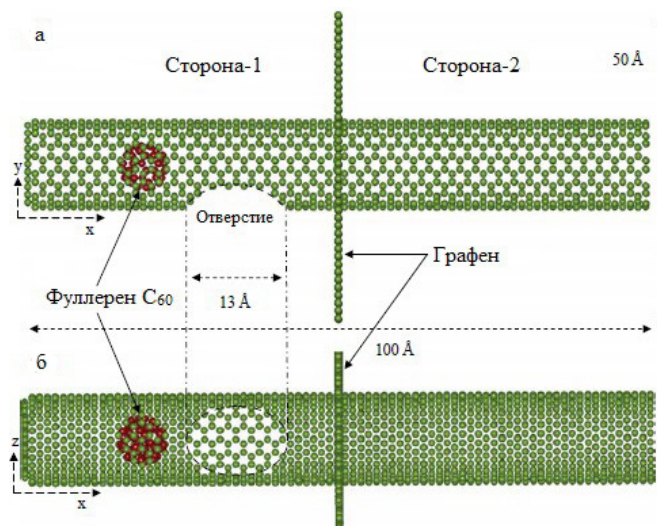
1. R.Hill et al., *J. Roy. Soc. Interface* **9**, 1438 (2012).
2. Д. Гранин. *Зубр*, <http://lib.ru/PROZA/GRANIN/zubr.txt>
3. *ПерсТ* **10**, вып. 18, с. 5 (2003).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Насос из углеродной нанотрубки, фуллерена и графена

Чем накачивать спущенные наношины? Ответ очевиден: конечно же нанонасосом! Одну из возможных концепций подобного устройства в своей работе [1] детально рассмотрели иранские исследователи. Предложенная авторами конструкция состоит из графена, (10,10) углеродной нанотрубки длиной 100 Å и фуллерена C₆₀ (см. рис.). Фрагмент графена разделяет систему на две части, при этом нанотрубка протянута сквозь отверстие в центре графенового листа. Один из ее концов наглухо закрыт, но на поверхности имеется входное отверстие для атомов рабочего газа. Молекула C₆₀, которой отведена роль поршня, находится между закрытым концом нанотрубки и входным отверстием. Рабочим газом выступали неон или гелий. В итоге исходная система состояла из 2775 атомов углерода и 700 атомов инертного газа. Для ее моделирования авторы применили стандартный молекулярно-динамический подход с использованием классических потенциалов межатомного взаимодействия: Бреннера и Леннарда-Джонса с соответствующими параметрами. Чтобы заставить фуллерен двигаться вдоль оси нанотрубки, исследователи сделали его положительно заряженным, допировав молекулу атомом калия, а затем включили внешнее электрическое поле. Основной целью работы было определение влияния различных параметров, таких как температура, частота электрического поля и длина нанотрубки на функциональную способность устройства создавать градиент плотности газа между двумя его концами. В результате авторы показали, что при увеличении длины нанотрубки отношение концентрации газа на

стороне-2 к концентрации на стороне-1 (см. рис.) уменьшается.



Общий вид нанонасоса в плоскостях xy (а) и xz (б).

Также удалось выяснить, что для каждой температуры существует оптимальная частота электрического поля, при которой соотношение концентраций по разные стороны графенового листа максимально. Более того, авторы предложили простую аналитическую формулу для вычисления этой частоты, как функции температуры и атомных масс. Поскольку оптимальная частота электрического поля для разных газов при одинаковой температуре оказывается различной, авторы считают целесообразным использовать предложенную модель нанонасоса в процессах газовой очистки.

М. Маслов

1. A.Lohrasebi et al., *Molecular Simulation* **38**, 850 (2012).

Тонкая пленка из нанокompозита на основе УНТ поглощает СВЧ излучение

Повсеместное распространение телекоммуникационных систем беспроводной связи порождает проблему защиты электронного оборудования от электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне. Материал, используемый для этой цели, должен сочетать высокий коэффициент поглощения СВЧ-излучения с низким коэффициентом отражения. Указанным требованиям не отвечают металлические пленки, которые характеризуются высокой проводимостью и, как следствие, высоким коэффициентом отражения СВЧ-излучения. Достоинства альтернативного подхода к решению проблемы экранирования СВЧ-излучения были продемонстрированы группой исследователей из Univ. Catholique de Louvain (Бельгия). В соответствии с данным подходом, авторы [1] использовали искусственный метаматериал, представляющий собой многослойную пленку из композитного материала на основе поликарбоната с небольшой добавкой углеродных нанотрубок (УНТ). При этом с целью снижения коэффициента отражения пленки содержание УНТ в композите возрастало по мере движения вглубь

пленки. Это приводило к возникновению градиента коэффициента излучения, что сопровождалось снижением коэффициента отражения. Указанный эффект иллюстрируется результатами расчетов, представленными на рис. 1, где показаны частотные зависимости коэффициента поглощения пленки, составленной из 9 проводящих слоев, которые разделены слоями диэлектрика. Как видно, наличие градиента проводимости в пленке обеспечивает более эффективное поглощение СВЧ-излучения.

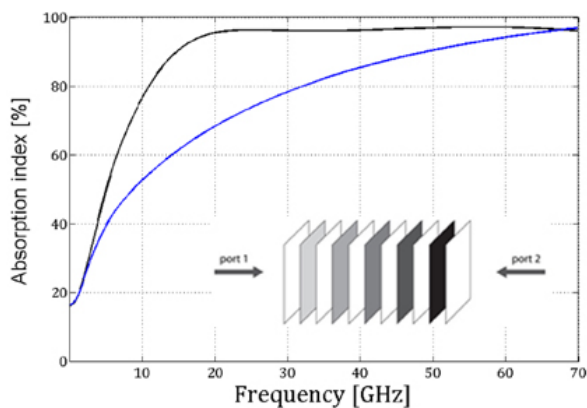


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента поглощения многослойной пленки с градиентом проводимости (черная линия) и с постоянной проводимостью (синяя линия). Толщина проводящих слоев составляет 150 мкм, толщина диэлектрических слоев – 500 мкм, проводимость однородной пленки – 40 См/м. Проводимость диэлектрического слоя составляет 10^{-13} См/м, проводимость неоднородной пленки возрастает от 1 до 90 См/м.

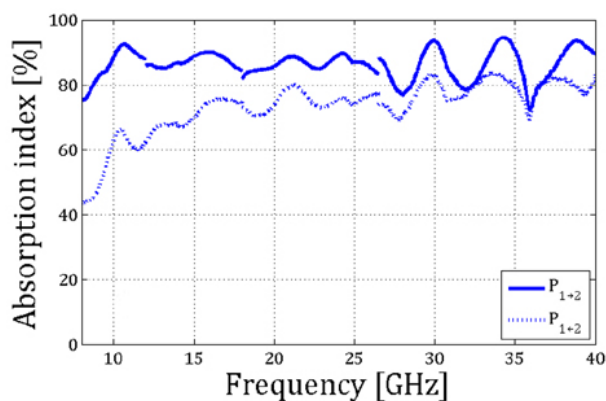


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента поглощения многослойных пленок с градиентом проводимости, ориентированным по (сплошная линия) и против (пунктир) направления распространения излучения.

Для практической реализации пленки с градиентом проводимости оказалось удобным использование композитного материала на основе полимера от содержания УНТ. В качестве матрицы использовали поликарбонат (PC), который характеризуется величиной диэлектрической постоянной в СВЧ-диапазоне $\epsilon = 2.8$. Многослойная пленка общей толщиной 2.7 мм содержала 8 слоев композита PC толщиной 175 мкм с добавлением УНТ. Возрастание проводимости слоев от 2 См/м для внешнего слоя до 94 См/м для внутреннего слоя обеспечивалось увеличением concentra-

ции УНТ в композите. Проводящие слои были разделены диэлектрическими слоями чистого PC толщиной 110 мкм. Результаты измерений частотной зависимости проводимости пленки, полученные для двух различных ориентаций пленки, приведены на рис. 2. Как видно, наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Кроме того, результаты указывают на предпочтительную ориентацию пленки, соответствующую увеличению проводимости по мере удаления от внешней границы.

А.Елецкий

I. Y. Danlée et al., Appl. Phys. Lett. 100, 213105 (2012).

Селективный нагрев углеродных нанотрубок СВЧ-облучением

Одно из важных направлений использования углеродных нанотрубок (УНТ) в наноэлектронике основано на эффектах взаимодействия электромагнитного излучения с УНТ. Эти эффекты определяют, в частности, возможность использования УНТ в качестве датчика ИК и СВЧ излучений. Действие электромагнитного излучения на УНТ вызывает нагрев электронного газа, что, в свою очередь, приводит к изменению проводимости и других электронных характеристик нанотрубки. Степень отклонения состояния электронного газа от равновесия определяется соотношением между интенсивностью его нагрева и скоростью релаксации, которая, в свою очередь, зависит от свойств решетки. Исследователи из Delft Univ. of Technology (Нидерланды) [1] измерили проводимость подвешенной нанотрубки в зависимости от интенсивности СВЧ-облучения на частоте 108 ГГц. Исследуемый образец показан схематически на рис. 1.

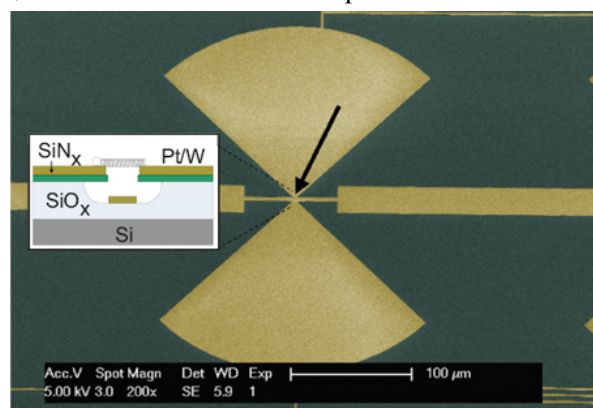


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению проводимости подвешенной УНТ при СВЧ облучении. Нанотрубка подвешена на Pt/W слое широкополосной антенны (жёлтая окраска); подложка SiN_x окрашена темно-зеленым. Стрелкой показано положение частицы Fe-Мо катализатора. Затвор помещен в паз глубиной 250 нм. На вставке представлена конфигурация подложки в разрезе.

В качестве подложки использовали кремниевую пластину, покрытую слоем SiO_2 толщиной 490 нм и слоем SiN_x толщиной 38 нм. В слое SiO_2 протравлен паз глубиной 250 нм и шириной 2 мкм. На поверхность SiN_x напылены слой платины толщиной 30

нм и слой вольфрама толщиной 10 нм, которые одновременно играют роль контактов и антенны. УНТ синтезировали методом CVD с использованием в качестве катализатора частиц Fe-Мо. Измерительное устройство показано схематически на нижней вставке рис. 2.

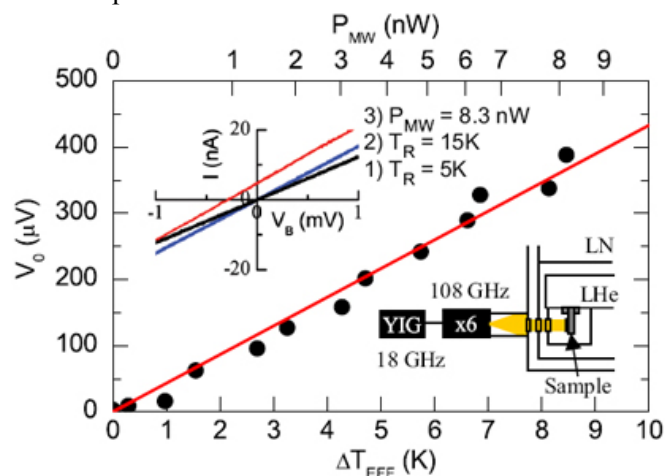


Рис. 2. Зависимость напряжения холостого хода на УНТ от мощности СВЧ облучения (верхняя шкала) и эффективного повышения температуры (нижняя шкала). На вставке вверху слева показаны зависимости тока от напряжения смещения. На вставке внизу справа показана схема устройства для измерения эффекта СВЧ облучения на УНТ.

Образец помещали в криостат, температура которого могла варьироваться от 5 до 20 К. В качестве источника СВЧ излучения использовали генератор, работающий на частоте 18 ГГц, которую шестикратно умножали. Мощность излучения регулировали изменением напряжения смещения на усилителе, встроенном в устройство умножения частоты. Максимальный поток мощности на образец составлял 83 нВт/мм^2 . СВЧ излучение проходило последовательно через полиэтиленовые окна, находящиеся при комнатной температуре, 77 К и 4.2 К,

соответственно. Коэффициент пропускания окон для СВЧ излучения составлял $\approx 90 \%$. Измерения показали, что лишь небольшая часть падающего СВЧ излучения поглощается нанотрубкой. На левой вставке рис. 2 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ) УНТ, измеренные при разных температурах криостата, при наличии и отсутствии облучения. Измерения указывают на увеличение наклона ВАХ при возрастании температуры. Наряду с этим, наблюдается появление напряжения смещения при нулевом токе в результате СВЧ облучения. Величина этого смещения возрастает с ростом интенсивности облучения. Полученные зависимости электронных характеристик УНТ от интенсивности СВЧ облучения обусловлены эффектом увеличения электронной температуры с ростом интенсивности облучения. Это следует из результатов измерения зависимостей дифференциальной проводимости образцов от интенсивности облучения. Тем самым наблюдаемый эффект может быть отнесен к области термоэлектричества, причем обработка экспериментальных данных дает величину термо-эдс для подвешенной нанотрубки $43 \pm 1 \text{ В/К}$, которая примерно на порядок выше, чем у УНТ на подложке.

А.Елецкий

1. H.L.Hortensius et al., Appl. Phys. Lett. 100, 223112 (2012).

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается 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 А.Елецкий, О.Коплак,

М.Маслов, Л.Опенов, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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