

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Коллективные магнитные возбуждения в псевдощелевой фазе купратных ВТСП

При концентрации дырок ниже оптимальной (для сверхпроводимости) величины и при $T_c < T < T^*$ в купратных ВТСП имеет место так называемая псевдощелевая фаза, граничащая с диэлектрической (антиферромагнитной) и сверхпроводящей фазами, а также с нефермижидкостной фазой “странного металла” (рис. 1).

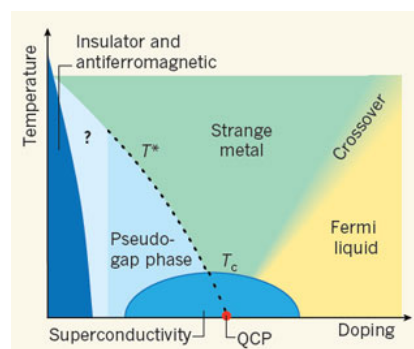


Рис. 1. Фазовая диаграмма купратных ВТСП.

Исследование коллективных возбуждений в псевдощелевом и странно-металлическом состояниях представляет интерес по той причине, что взаимодействие электронов именно с этими возбуждениями и приводит, по-видимому, к сверхпроводящему

переходу при понижении температуры до T_c . В работе [1] (США, Германия, Франция, Китай, Хорватия) методом неупругого рассеяния нейтронов изучены магнитные возбуждения в монокристаллах $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$. Экспериментальные данные согласуются с моделью упорядоченных токовых контуров [2]: в каждой элементарной ячейке CuO_2 имеется два таких локальных контура, создающих противоположно направленные магнитные моменты (рис. 2).

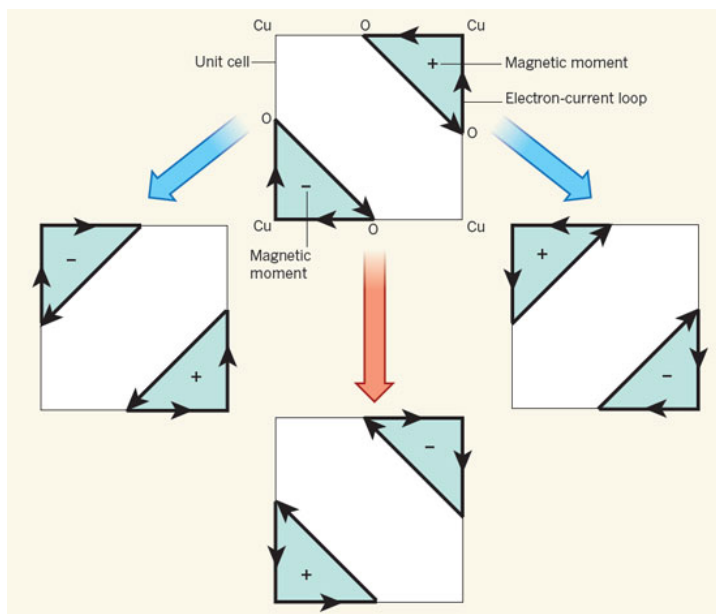


Рис. 2. Четыре возможные конфигурации токовых контуров.

Из этой модели, в частности, следует, что при переходе в псевдощелевую фазу термодинамические (удельная теплоемкость) и транспортные (электросопротивление) характеристики меняются

И далее ...

СНОВА К ОСНОВАМ

- 2 Карбин

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 2 Хром плюс кремний:
закручены по-новому

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- 3 Как закалялась сталь или
магнитоэлектрический эффект
в металлах

СПИНТРОНИКА

- 4 Термическая инжекция спинов
в немагнитный металл

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Углеродные нанотрубки
против стафилококков

- 6 Получение и исследование
свойств эпитаксиального
графена

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 7 Графен познается в сравнении

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 Семинар по физике
конденсированного состояния
1 декабря 2010 г.

плавно. Поскольку основное состояние четырехкратно вырождено (рис. 2), то возможны три типа коллективных возбуждений, обусловленных квантовыми осцилляциями между этими состояниями. Два из них и были обнаружены в [1]. Чтобы зарегистрировать третье, нужно использовать другие методики.

Л.Опенюв

1. Y.Li et al., *Nature* **468**, 283 (2010).

2. C.M.Varma, *Phys. Rev. B* **55**, 14554 (1997).

СНОВА К ОСНОВАМ

Карбин

Когда говорят об одномерных (точнее – квазиодномерных) углеродных материалах, то обычно имеют в виду нанотрубки, забывая при этом про карбин – цепочки из атомов углерода. Если в алмазе каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя ближайшими соседями (sp^3 -гибридизация атомных орбиталей), в графене, нанотрубках и фуллеренах – с тремя (sp^2 -гибридизация), то в карбине – только с двумя (sp -гибридизация). Сложность изготовления карбина и низкое качество образцов затрудняют определение его кристаллической и электронной структуры. В частности, нет единого мнения о том, имеет ли карбин полииновую или кумуленовую структуру (см. рис.). В работе [1], основываясь на данных УФ-спектроскопии и ЯМР, сделан вывод о полииновой структуре если и не макроскопического (в одном направлении) карбина, то, по крайней мере, его 44-атомных фрагментов (более длинных цепочек в [1] получить, по-видимому, не удалось).

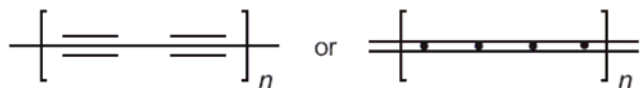


Рис. 1. Полииновая (слева) и кумуленовая (справа) модификации карбина. В первой одинарные ковалентные связи С-С чередуются с тройными, и межатомные расстояния вдоль цепочки “мигают”, а во второй все связи двойные, и поэтому длины связей одинаковы для любой пары соседних атомов.

Первое желание, которое возникает после прочтения статьи [1] и комментария [2] к ней – это поискать информацию о карбине в Интернете. Вот что про него написано в Википедии [3]. Оказывается, карбин был открыт на рубеже 50-х и 60-х годов прошлого века в Советском Союзе, а именно – в Институте элементоорганических соединений (ИНЭОС) РАН, в лаборатории высокомолекулярных соединений, возглавлявшейся академиком В.В. Коршаком (публикация в 1961 г., диплом на открытие в 1971 г. с приоритетом от 1960 г.). Тогда же были изучены основные свойства карбина и показано, что он существует в двух модификациях, о которых шла речь выше: α -карбин с полииновой структурой и β -карбин с кумуленовой структурой. При этом β -карбин метастабилен, то есть α -карбин

– более устойчивая модификация. Углеродные цепочки в карбине не являются прямолинейными, о чем свидетельствует большой (значительно превышающий длину связи С-С) период решетки вдоль цепочки. Более того, этот период изменяется от образца к образцу, что говорит о множестве карбиновых форм углерода. За более подробной информацией мы отсылаем читателя к источнику [3]. А в заключение заметим, что если бы авторы открытия опубликовали свою статью не в Докладах АН СССР, а в Science, то, возможно, получили бы Нобелевскую премию...

1. W.A.Chalifoux, R.R.Tykwinski, *Nature Chem.* **2**, 967 (2010).

2. M.M.Haley, *Nature Chem.* **2**, 912 (2010).

3. <http://him.1september.ru/articlef.php?ID=200701301>

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Хром плюс кремний: закручены по-новому

Контролируемый синтез наноструктур определенного состава и морфологии является одной из приоритетных задач современной нанотехнологии. Силициды переходных металлов представляют достаточно интересный класс соединений с потенциальными возможностями использования, например, в электронике и фотоэлектрохимии. Одно из этих функциональных соединений, CrSi_2 (известный узкозонный полупроводник), может оказаться перспективным материалом не только, для термоэлектрических приложений и приложений солнечной энергетики, но и для аэрокосмической промышленности благодаря высокой температуре плавления и стойкости к окислению.

К настоящему времени некоторые исследования CrSi_2 в форме нанопроволок уже проведены [1]. Однако исследователям из Сингапура впервые удалось получить монокристаллические CrSi_2 “нанопутинки”, обладающие удивительной архитектурой и уникальным механизмом формирования [2]. Наноструктуры CrSi_2 выращивали на кремниевых подложках в горизонтальной трубчатой печи методом переноса пара. Резкое увеличение скорости потока газа-носителя (Ar) во время роста привело к образованию уникальной структуры гексагональной формы, напоминающей паутинку (рис. 1а). Морфология полученных образцов подтвердилась рентгеновской дифракцией. Характерные размеры таких “нанопутинок” лежат в диапазоне 150–200 нм, а состоят они из сегментов нанопроволок CrSi_2 толщиной 10–30 нм (рис. 1б). Авторы идентифицировали образцы, закрученные как по, так и против часовой стрелки (рис. 1а). В результате дополнительных исследований, проведенных с помощью сканирующей электронной микроскопии, удалось установить, что каждая из полученных “нанопутинок” сформирована и поддерживается на индивидуальной ножке, перпендикулярной плоскости паутинки (рис. 1б, в). При ближайшем рассмотрении

(рис. 1г) видно, что сегменты нанопроволок, образующих закрученную структуру, обладают прямоугольным поперечным сечением.

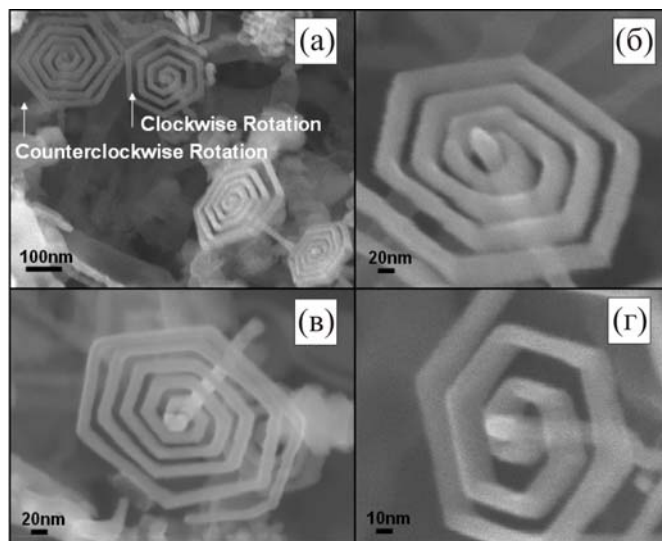


Рис. 1. Изображения CrSi₂ “нанопаутинок”, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии.

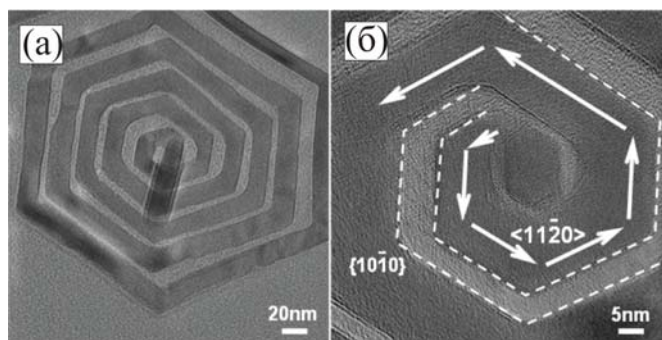


Рис. 2. Изображения CrSi₂ “нанопаутинок”, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

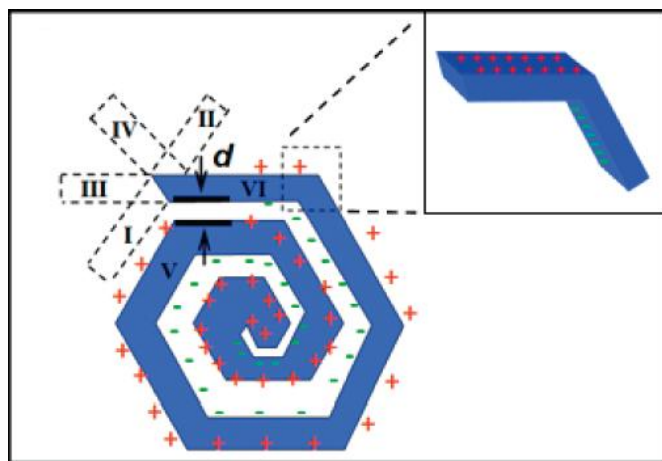


Рис. 3. Схематическая иллюстрация возможных направлений изгиба. На вставке изображена угловая часть “нанопаутинки”.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) показала, что “нанопаутинки” обладают гексагональной симметрией (рис. 2а) и растут вдоль $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ направления, боковые грани сегментов нанопроволок представляют $\{10\bar{1}0\}$ плоскости (рис. 2б). Кроме того ПЭМ высокого разрешения под-
Перст, 2010, том 17, выпуск 22

твердила отсутствие дефектов в синтезированных образцах.

Авторы также предложили механизм образования шестиугольников из нанопроволок. По их мнению, закручивание в процессе роста обусловлено электростатическим взаимодействием, так как противоположные грани каждого фрагмента нанопроволоки имеют различный поверхностный заряд. При этом особая роль отводится расстоянию d между параллельными сегментами “нанопаутинки” (рис. 3). Именно от величины d и зависит дальнейшее направление изгиба CrSi₂ проволоки. Если d меньше некоторой критической величины, которая оценивается авторами в 16–25 нм, приоритетным направлением изгиба является направление I, в обратном случае – направление II (рис. 3). Направления III и IV, отвечающие соответственно прямолинейному и зигзагообразному росту, реализуются гораздо реже. Данная модель полностью нашла свое подтверждение в эксперименте. Авторы надеются, что полученные ими “нанопаутинки” займут достойную нишу среди функциональных материалов и окажутся полезными при проектировании новых устройств.

М.Маслов

1. L.Yu et al., *J. Phys. Chem. C*. **112**, 5865 (2008).

2. H.Wang et al., *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 15875 (2010).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Как закалялась сталь или

магнитоэлектрический эффект в металлах

Закалять сталь люди научились с незапамятных времен, но долгое время это умение был сродни искусству. Настоящее понимание процесса пришло только в первой половине 20-го столетия с выяснением его микроскопической картины, благодаря работам академика Г.В. Курдюмова. Оказалось, что закаленная сталь отличается от своего менее прочного аналога наличием структуры, в которой соседствуют две фазы – с гранецентрированной и объемноцентрированной решеткой. Работа [1] знаменует новый этап в этой давней истории: теперь процесс фазового превращения можно контролировать на микроуровне с помощью электрического нанозонда.

Исследователи с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии получали островки железа толщиной в два атомных слоя на подложке из меди. Внутри островка, как правило, присутствуют обе фазы, хорошо различимые в сканирующий туннельный микроскоп, благодаря разности высот расположения атомов, соответствующих различным видам кристаллографической упаковки (рис. 1а). Эта же разница позволяет воздействовать на структуру электрическим полем: положительный заряд отталкивает ионы железа, делая более энергетически выгодной гранецентрированную фазу с меньшей толщиной слоя, и наоборот – отрицательный заряд вызывает переключение в объемноцентрированную фазу.

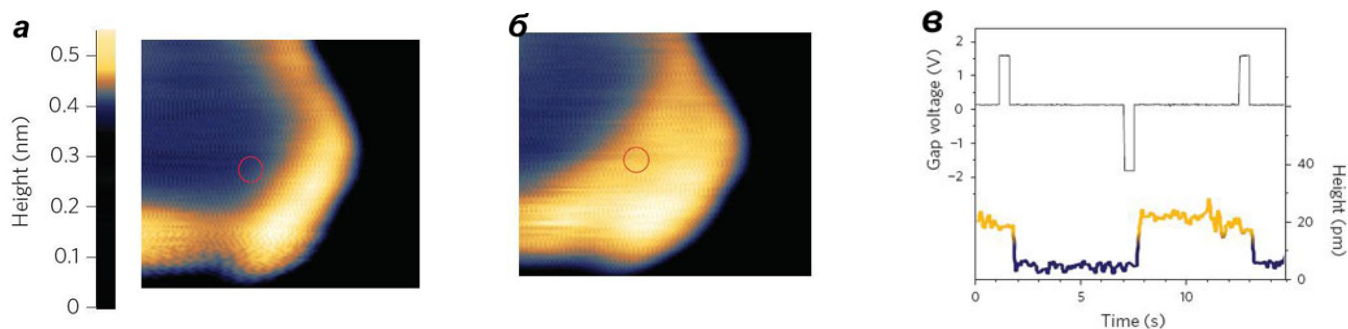


Рис. 1. *a* - Изображение островка Fe на подложке из Cu в сканирующем туннельном микроскопе (желтый цвет соответствует объемноцентрированной решетке, синий – гранецентрированной); *б* - приложение импульса напряжения в области, обозначенной красным кругом, смещает границу между фазами; *в* - импульсы положительного напряжения индуцируют переход от объемноцентрированной решетки к гранецентрированной, импульсы отрицательного напряжения – обратный переход [1].

Если раньше исследователь мог только пассивно наблюдать за движением границы при изменении температуры, то теперь с помощью электрических импульсов, подаваемых с зонда туннельного микроскопа, он может управлять положением доменной границы (рис. 1б). При напряжении всего в несколько десятых вольт и величине зазора между зондом и поверхностью в несколько ангстрем удавалось получать внушительные $\sim 50 \text{ MB/cm}$, соответствующие критической величине электрического поля, при которой наблюдался эффект. Линейная зависимость критического напряжения от величины зазора между зондом и поверхностью позволяла исключить предположение о других механизмах явления (воздействие тока или механическое давление).

Приятным дополнением к этому эффекту является тот факт, что две эти фазы имеют различные магнитные свойства: гранецентрированная – антиферромагнитно упорядочена, в то время как объемноцентрированная является ферромагнитной. Таким образом, имеет место магнитоэлектрический эффект: статическое электрическое поле вызывает изменение магнитного состояния вещества. Примечательно, что ранее магнитоэлектрический эффект наблюдался только в диэлектриках. Контролируемый характер переключения фаз и устойчивость каждого из состояний позволяет говорить о практическом использовании этого принципа в устройствах магнитной памяти.

А.Пятаков

1. L.Gerhard et al., *Nature Nanotech.* **5**, 792 (2010).

СПИНТРОНИКА

Термическая инжекция спинов в немагнитный металл

В прошлом номере ПерсТа [1] мы рассказывали о последних исследованиях спинового эффекта Зеебека – возникновении в магнитных веществах “спинового напряжения” (то есть по сути – спинового тока) при наличии градиента температуры. В работе

[2] голландских физиков из Univ. of Groningen показано, что этот эффект может быть использован для инжекции чисто спинового (не сопровождаемого зарядовым) тока из ферромагнетика в немагнитный металл.

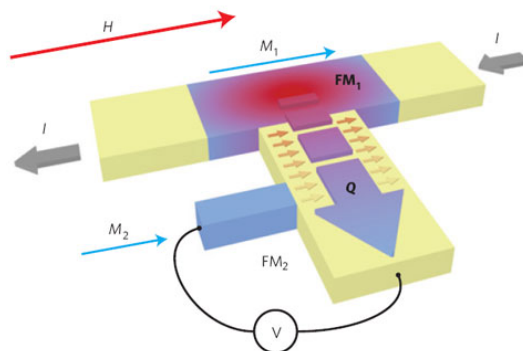


Рис. Схема эксперимента из работы [2].

При токовом нагреве ферромагнетика FM₁ обычным электрическим током (см. рис.) возникает поток тепла через поверхность его контакта FM₁/NM с немагнитным металлом NM. В силу спинового эффекта Зеебека этот поток тепла сопровождается спиновым током, определяемым намагниченностью M_1 . Спины диффундируют к границе раздела NM с другим ферромагнетиком (FM₂) и создают в нем потенциал, зависящий от направления намагниченности M_2 последнего. Для некоторых конкретных приложений термическая инжекция спинов может оказаться значительно удобнее и эффективнее электрической.

1. [ПерсТ 17, вып. 21, с. 9 \(2010\).](#)

2. A.Slachter et al., *Nature Phys.* **6**, 879 (2010).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Углеродные нанотрубки против стафилококков

Вот так красиво выглядит под микроскопом *Staphylococcus aureus*, грамположительная бактерия из группы стафилококков (рис.1). Слово “стафило-

кокк” сразу вызывает неприятные ассоциации, хотя происходит оно от греческого *staphylos* – гроздь винограда, *kokkos* – зёрнышко, ягода; (**Стафил** – бог виноградной лозы в греческой мифологии).

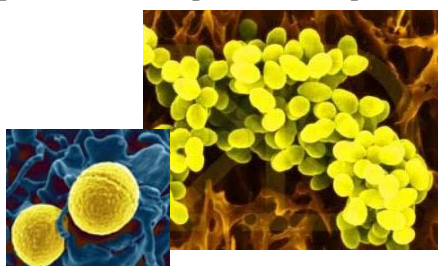


Рис. 1. *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus (*S.aureus*), или стафилококк золотистый, названный так за его способность вырабатывать соответствующий пигмент, особенно опасен. Он может вызывать у человека заболевания почти во всех органах и тканях – от сравнительно лёгких кожных (например, фурункул, флегмона) до таких опасных как пневмония, менингит, токсический шок и сепсис (многие со смертельным исходом). *S. aureus* имеется в полости носа и на коже у 20-30% здоровых взрослых людей и у 30–50% детей 4–6 лет. Он возглавляет список бактерий, которыми наиболее часто заражаются в медицинских учреждениях. Для борьбы с *S. aureus* широко применяют антибиотик метициллин, однако сейчас уже встречаются метициллин-устойчивые штаммы (MRSA). Из 2 миллиардов людей – носителей *S. aureus* во всём мире, почти 53 млн. инфицированы MRSA. Эффективной вакцины против него не существует. Поскольку любая поверхность, до которой дотрагивается инфицированный человек, может служить благоприятной средой для размножения бактерий, очень важно использовать антимикробные покрытия. Конечно, некоторые варианты уже были предложены – например, с применением нано-Ag. Однако наночастицы серебра могут попадать в окружающую среду и организм человека [1], вызывая нежелательные последствия. Кроме того, выделение наночастиц снижает защитные свойства. Для того чтобы избежать распространения бактерий, покрытие должно сохранять эффективность длительное время.

Используя многостенные углеродные нанотрубки (МСНТ) и фермент лизостафин американские учёные недавно разработали новое эффективное стабильное антистафилококковое покрытие [2].

Сначала исследователи получили комплексы, образованные функционализированными МСНТ и лизостафином (Lst). Лизостафин (греч. *lysis* – разложение, распад), природный фермент, выделяемый из непатогенных штаммов стафилококков, способен разрушать клеточную стенку *S.aureus*, но безопасен для других бактерий и человека. Учёные проверили, как меняется эффективность бактерицидного действия лизостафина при присоединении к нанотрубке. Оказалось, что за первую минуту воздействия она достигает всего 35% (если за 100% принять

эффективность свободного Lst). Потребовалось почти 30 мин, чтобы эффективности сравнялись (рис. 2). Учёные предположили, что снижение активности обусловлено недостаточной гибкостью фермента, присоединённого к нанотрубке, и решили устранить этот пробел с помощью короткой гибкой “вставки” между Lst и МСНТ. В предшествующей работе тех же авторов было показано, что использование полимера полиэтиленгликоля (PEG) в качестве гибкого соединения способно повысить активность фермента гидролазы, ковалентно присоединённого к нанотрубке [3]. PEG помог и в новых исследованиях - при его добавлении активность Lst на МСНТ повысилась. Через минуту она составила 60% от активности свободного Lst, а через 10 мин сравнялась с ней (рис. 2). Дополнительные эксперименты показали, что комплексы Lst-МСНТ не действуют на нестафилококковые клетки, то есть проявляют избирательную бактерицидную активность.

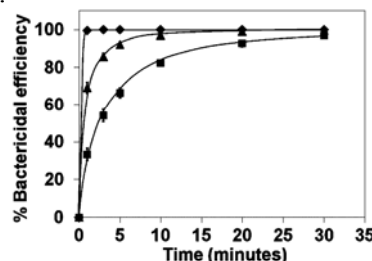


Рис.2 Сравнение бактерицидной активности свободного Lst (♦), Lst-МСНТ (■), Lst-PEG-МСНТ (▲).

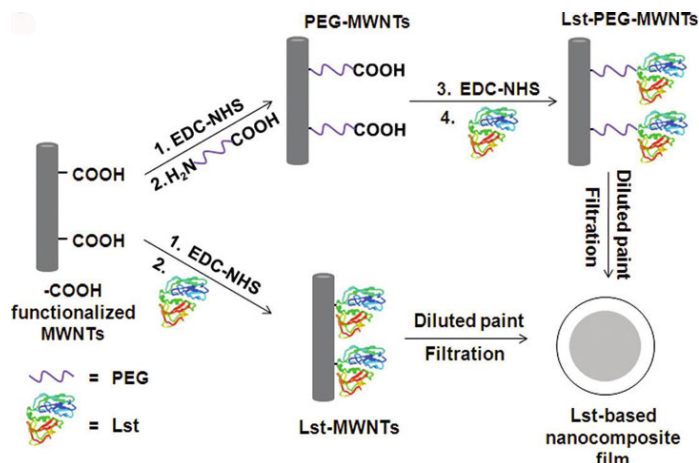


Рис. 3. Схема изготовления антимикробных нанокompозитных плёнок, содержащих комплексы МСНТ-Lst. Показано два варианта – без использования гибкой связи (внизу) и с применением PEG (вверху). EDC, NHS – химические соединения, используемые для иммобилизации Lst.

Следующим шагом на пути создания антимикробных покрытий стало внедрение этих комплексов в краску, которую можно наносить на требуемую поверхность. Комплексы (с разной концентрацией Lst) смешивали с обычной латексной краской, разбавленной дистиллированной водой. Смесь фильтровали через поликарбонатные мембранные фильтры, полученные плёнки сушили и отделяли от фильтра для исследований. Процесс изготовления схематично показан на рис. 3.

Латексные плёнки с МСНТ, но без Lst, как и ожидалось, не проявили антимикробной активности, а содержащие ≥ 2 масс.% Lst на PEG-МСНТ оказались чрезвычайно эффективными – эксперимент показал практически 100% гибель клеток *S. aureus* (рис. 4).

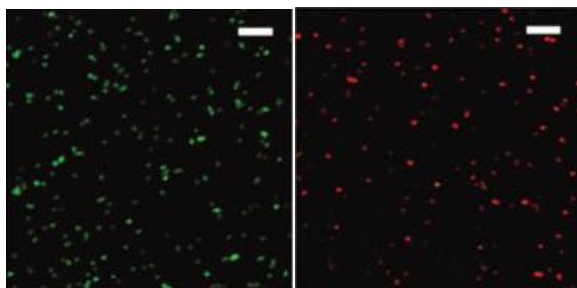


Рис. 4. Флуоресцентное изображение клеток *S. aureus*. Слева – живые клетки на плёнке с 0 масс.% Lst, справа – мёртвые клетки на плёнке с 4 масс.% Lst. Показано деление 10 мкм.

Но если лизостафин так активен, нельзя ли непосредственно вводить в краску свободный фермент? Зачем нужны нанотрубки? Для практического применения антимикробных покрытий важны стабильность и возможность повторного использования. Контрольные эксперименты показали, что без МСНТ покрытие с такими свойствами получить невозможно. Плёнки с Lst, но без МСНТ, после первого промывания потеряли 52% фермента! Латексная нанокompозитная плёнка Lst-PEG-МСНТ оказалась стойкой к “мытью”. Выделение ферментов или их конъюгатов с МСНТ в водный раствор после одночасовой выдержки оказалось незначительным. Даже после того, как плёнки промыли 6 раз, антимикробной активности у моющего раствора не появилось.

Возможно, роль нанотрубок этим не ограничивается. Авторы предполагают, что они облегчают доступ фермента к бактериям, т.к. выступают из поверхности плёнки. Как показывает электронная микроскопия, конъюгаты и компоненты краски образуют однородную смесь, и фермент равномерно распределён на поверхности плёнки (рис. 5).

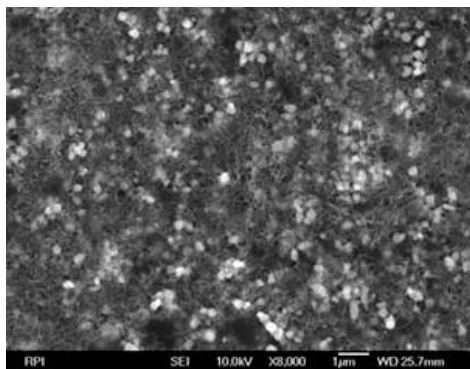


Рис. 5. SEM изображение нанокompозитной плёнки с 4 масс.% Lst. (x 8 000). Деление – 1 мкм

В последующих экспериментах учёные установили, что нанокompозитная краска эффективно борется даже с метициллин-устойчивыми штаммами

S. aureus. На рис. 6 показано количество (в процентном отношении) живых клеток для 4 самых опасных штаммов MRSA после двухчасового контакта с Lst-PEG-МСНТ плёнкой.

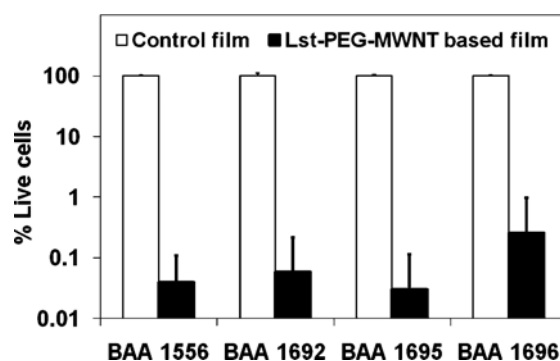


Рис. 6. (■) – процент живых клеток после 2 ч воздействия 4% Lst – плёнки на суспензию MRSA; (□) – воздействие контрольной плёнки с 0% Lst.

Полученные нанокompозитные плёнки можно использовать неоднократно. Исследователи тестировали их через каждые 5 дней в течение месяца, при этом каждое испытание в среде с *S. aureus* длилось 6 ч. Даже после этого активность сохранилась на уровне 50%. В сухом виде при комнатной температуре плёнки, не теряя своих свойств, могут храниться полгода. Эти антистафилококковые покрытия способны предотвратить рост бактерий на самых различных поверхностях, что особенно важно для медицинских учреждений.

Авторы [2] убеждены, что в нано-био-композитных плёнках можно использовать не только лизостафин. Развитие этого направления позволит снизить риск инфекций от других патогенных и устойчивых к антибиотикам микроорганизмов.

О.Алексеева

1. [ПерсТ 17, вып. 21, с. 4 \(2010\).](#)

2. R.C.Pangule et al., *ACS Nano* **4**, 3993 (2010).

3. C.Z.Dinu et al., *Adv. Func. Mater.* **20**, 392 (2010).

Получение и исследование свойств эпитаксиального графена

Среди различных способов получения графена, разработанных и описанных в последние годы, важное место занимает подход, основанный на эпитаксиальном синтезе графена в результате термического разложения карбида кремния SiC. Интерес к этому подходу связан с тем обстоятельством, что синтезируемые графеновые листы находятся на непроводящей подложке. Это открывает возможность непосредственного их использования в нанoeлектронных устройствах без необходимости переноса графена с проводящей подложки на изолятор, как это имеет место в случае CVD синтеза графена на медной пленке. К недостаткам эпитаксиального синтеза графена относится непостоянство числа графеновых слоев, распределенных по поверхности образца, следствием которого является относительно низкая подвижность носителей. Недавно в Исследовательском центре NTT Corporation (Япония) бы-

ла выполнена работа, направленная на установление причины указанной неоднородности и выяснение возможности преодоления этой проблемы [1].

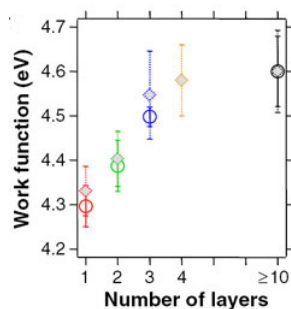
Для синтеза графена использовали пластины 6H-SiC(0001), 4H-SiC(0001) и 4H-SiC(0001). Пластины первых двух типов представляли собой полупроводник *n*-типа, легированный азотом и имеющий удельное сопротивление менее 1 Ом·см, а пластина третьего типа была либо полупроводником *n*-типа, либо полуизолятором с удельным сопротивлением более 10^5 Ом·см. Графен синтезировали при отжиге пластин в камере электронного микроскопа при вакууме 5×10^{-11} Торр. Пластины 6H-SiC(0001) и 4H-SiC(0001) перед проведением синтеза подвергали химической обработке, а пластину 4H-SiC(0001) отжигали в атмосфере H_2 при высокой температуре.

Для определения числа слоев в образцах графена использовали подход, основанный на обработке энергетических зависимостей изображений, полученных с помощью электронного микроскопа малых энергий. Если энергия налетающих электронов совпадает с положением одного из дискретных уровней энергии в графене, эти электроны резонансным образом проходят сквозь графеновую пленку, что приводит к появлению минимума в спектре отражения пленки. При этом число графеновых слоев в пленке определяется непосредственно как число таких минимумов. Наряду с описанным способом определения числа слоев в графеновой пленке для этой цели использовали также другой подход, основанный на использовании атомного силового микроскопа. В этом методе измеряли высоту пленки над поверхностью подложки, которая определяется числом слоев графена. Измерения показали, что островки однослойного и двухслойного графена сосредоточены преимущественно вблизи границ графеновой пленки. Образцы графена, выращенные на 4H-SiC(0001) поверхности, исследовали методом дифракции медленных электронов (энергия 3 эВ), а также (после термообработки при температуре 1100°C) с помощью атомно-силового микроскопа. Результаты измерений указывают на различную ориентацию графеновых слоев размером менее 100 нм относительно плоскости кристалла.

Еще один подход к решению проблемы определения числа слоев в образцах графеновых пленок основан на зависимости работы выхода электрона от числа слоев. Такая зависимость, полученная на основании результатов измерений различных авторов, показана на рисунке.

При построении этой зависимости предполагалось, что работа выхода графена с числом слоев более 10 должна совпадать с соответствующей величиной для кристаллического графита (4.6 эВ). Для определения числа слоев в графене использовали величины работы выхода электрона, установленные при обработке спектров вторичных фотоэлектронов.

Исследования показали, что при контроле числа слоев удается вырастить однородные по поверхности однослойные и двухслойные образцы эпитаксиальных графенов размером в несколько микрон.



Работа выхода электрона из плёнки графена в зависимости от числа графеновых слоёв.

А.Елецкий

1. H.Hibino et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 374005 (2010).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Графен познается в сравнении

27-29 октября в Tohoku Univ. (Сендай, Япония) состоялся Международный симпозиум по приборам на графене (ISGD'2010). Сопредседатели - Т. Otsuji (Tohoku Univ.) и В. Рыжий (Aizu Univ.). В работе симпозиума приняли участие представители ведущих исследовательских центров Европы, Америки и Японии. Начавшийся сезон алых листьев (Момиджи) придал этому событию еще большую яркость. Симпозиум предоставил возможность увидеть общую картину состояния дел в исследовании графена и увидеть перспективу его практического использования в приборах.

Большая часть докладов была посвящена эпитаксиальному выращиванию графена: С. Berger (CNRS, France), Y.-M. Lin (IBM T.J.Watson Research Center, USA), Н. Hibino (NTT Corporation, Japan), Т. Seyller (Friedrich-Alexander Univ., Germany) и др. Многие считают, что именно такой метод роста способен приблизить эпоху практического применения графена. Графен формируют на слое SiC, который имеет хорошее согласование кристаллических решеток с графеном. Сам слой SiC формируется на кремниевой подложке, а значит, совместим с существующей кремниевой технологией. К сожалению, достигнуть рекордных значений подвижности, как в подвешенном графене ($250000 \text{ см}^2/\text{В с}$) не удастся в одиночном слое графена из-за дефектов, обусловленных границами образца. В результате подвижность оказывается на порядок ниже. Выход из создавшейся ситуации может дать многослойный графен, количество слоев в котором доходит до сотни. Это особый материал, совсем не похожий на графит. Каждый последующий слой слегка развернут по отношению к предыдущему. В результате этого все слои в стопке ведут себя как отдельные слои графена. В такой структуре удастся получить подвижность такую же, как и в подвешенном графене.

Если мы стремимся сделать полевой транзистор, то тут же возникает проблема создания хорошего кон-

такта металла с графеном. Исследования показали, что таким металлом является никель (K. Nagashio, Univ. of Tokyo). Решив проблемы с контактами, можно приступить к формированию транзистора. Было представлено несколько докладов, касающихся транзисторов, однако даже статические характеристики этих приборов оказались далекими от совершенства. Они значительно уступают кремниевым транзисторам. Авторы двух докладов продвинулись ещё дальше, представив инвертор на основе графеновых транзисторов (R. Sordan, Politecnico di Milano, Italy; A. El Moutaouakil, Tohoku Univ.). Как известно, это главный элемент цифровых схем. Вопрос состоит в том, где они могут применяться. Имеется в виду неизбежное сравнение с кремниевыми микросхемами. Действительно, для цифровых микросхем очень важно отношение токов открытого состояния транзистора к току его закрытого состояния. Из-за отсутствия запрещенной зоны в графене это отношение на эксперименте достигает 10, теория для идеальных структур дает 100. В то же время в кремниевых полевых транзисторах это отношение превосходит 10^6 при комнатной температуре. Постепенно крепнет уверенность, что графен может найти применение в аналоговых схемах, например, в усилителях, поскольку транзисторы на графене обладают потенциально высоким быстродействием и крутизной вольт-амперной характеристики. К сожалению, на конференции не были представлены экспериментальные результаты.

Отсутствие запрещенной зоны открывает интересные возможности оптоэлектронных применений графена. Пожалуй, самым ярким явилось сообщение о наблюдении стимулированной эмиссии терагерцового излучения из графена после лазерной накачки, представленное группой под руководством Т. Otsuji (RIEC, Tohoku Univ.). Эффект основан на идее В. Рыжия (Aizu Univ.): после оптической генерации электрон-дырочных пар электроны и дырки в результате каскадного испускания оптических фононов сваливаются на дно зоны, где возникает инверсная заселенность. Отсутствие запрещенной зоны в графене может привести к генерации терагерцового излучения вследствие межзонной рекомбинации электрон-дырочных пар. Естественно, сле-

дующим этапом работы станет создание терагерцового лазера.

Самой затейливой конструкцией, представленной на конференции, оказались подвешенные наноленты графена (В.Г. Лейман, МФТИ). Сочетание в ней плазменного и механического резонансов позволяет осуществлять детектирование терагерцового излучения.

Поскольку конференция была посвящена приборным применениям графена, мало было физических эффектов. Пожалуй, только доклад Д. Свинцова (МФТИ, ФТИАН) продемонстрировал возможность существования нового физического эффекта: скачка проводимости в двумерном канале при низких температурах. Ранее скачки проводимости наблюдались только в одномерных каналах. Эффект обусловлен нетривиальной зонной структурой двухслойного графена, напоминающей сомbrero.

В.Вьюрков

Подробности на сайте

<http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp/CREST/ISGD2010/>

КОНФЕРЕНЦИИ

Семинар по физике конденсированного состояния, 1 декабря 2010 г. (17.00)

(многофункциональный зал библиотеки физического факультета МГУ, 5 этаж)

Dmitri Golberg (National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, Japan) "Nanotube properties studied in TEM"

Пропуск на физический факультет слушателей семинара, будет осуществляться по предъявлению паспорта. Предварительная запись на семинар на сайте <http://nano.msu.ru/education/seminars> (до 15:00 дня семинара).

Для расширения возможностей участия в семинаре предполагается обеспечить прямую он-лайн трансляцию заседаний через сайт <http://nano.msu.ru/video.php>

Дополнительная информация:

тел. +7(495)939-1151

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, В.Вьюрков, А.Елецкий, М.Маслов, Л.Опенков, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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