

В этом выпуске:

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Год Вейля

Вслед за первым сообщением [1] об открытии вейлевского полуметалла TaAs (см. Перст, том 22, вып.17) публикации посыпались как из рога изобилия. В работе [2] (Китай, Швейцария) методом рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением подтверждено наличие в TaAs (рис. 1) вейлевских узлов, в которых объемные зона проводимости и валентная зона, образованные преимущественно 5d-орбиталями атомов Ta и имеющие форму конусов во всех трех направлениях, касаются друг друга (рис. 2).

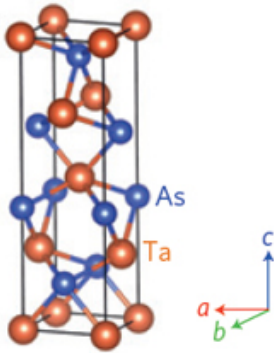


Рис. 1. Кристаллическая структура TaAs.

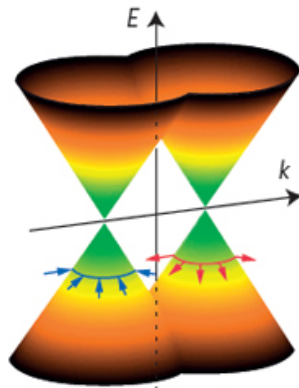


Рис. 2. Схематическое изображение закона дисперсии в плоскости  $k_x$ - $k_y$  для пары вейлевских узлов.

Положение этих узлов в зоне Бриллюэна совпадает с предсказаниями на основе расчетов из первых принципов. Электронные состояния пары вейлевских узлов имеют противоположную спиральность (проекцию спина частицы на направление ее скорости). Объемные вейлевские конусы связаны друг с другом фермиевскими дугами, которые образованы поверхностными топологическими состояниями (рис. 3).

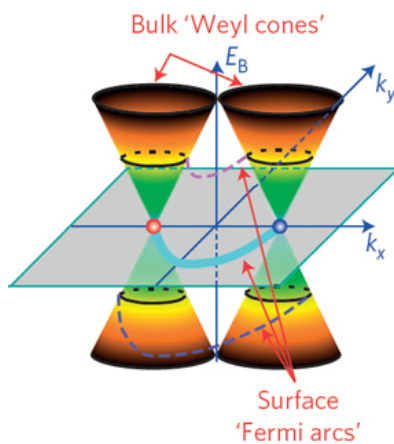


Рис. 3. Связь объемных вейлевских узлов с поверхностными фермиевскими дугами.

Используя такую же экспериментальную методику, авторы [3] (Китай, Великобритания, США, Германия) особое внимание уделили фермиевским дугам. Они показали, что кроме дуг, соединяющих вейлевские точки, у поверхности Ферми есть еще два сегмента (рис. 4) – в соответствии

И далее ...

### СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 2 Зарядовая топология в купратных ВТСП

### ГРАФЕН

- 3 Графеновые покрытия для химиотерапии
- 4 Структура и энергетика двухслойного графена

### НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 4 Легирование нанокристаллических сверхрешеток

### ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Борный фуллерен – ловушка для углекислого газа
- 5 Прозрачная проводящая пленка на основе УНТ для светодиодов

### КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 Семинар по физике конденсированного состояния, 30 сентября 2015 г.
- 7 XVII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 23-27 ноября 2015 г., г. Санкт-Петербург, Россия

с данными *ab initio* вычислений. Кроме того, они подтвердили линейную дисперсию объемных зон.

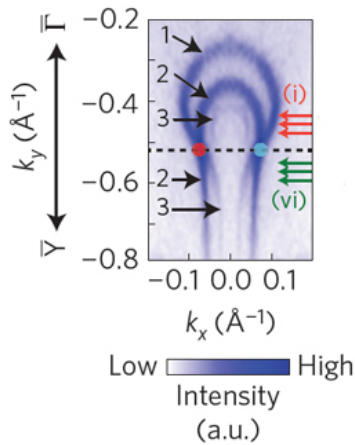


Рис. 4. Данные ARPES для поверхности Ферми TaAs. Штриховая линия соединяет две вейлевские точки.

А тем временем международный коллектив авторов пионерской работы [1] (США, Китай, Тайвань, Швейцария, Сингапур) пошел дальше и открыл еще один вейлевский полуметалл – арсенид ниобия [4]. Использование, как и в [1], комбинации рентгеновской и ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением позволило продемонстрировать наличие у NbAs главных атрибутов такого полуметалла: дираковских конусов в объеме (рис. 5) и связывающих эти конусы фермиевских дуг на поверхности (рис. 6).

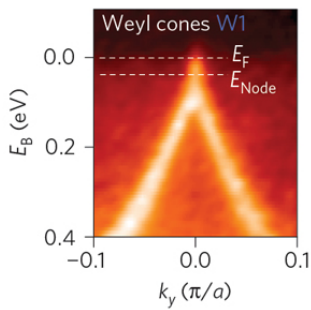


Рис. 5. Вейлевский конус в NbAs.

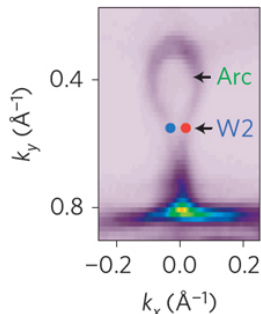


Рис. 6. Фермиевская дуга в NbAs.

При этом расстояние между вейлевскими узлами в *k*-пространстве оказалось примерно в 3 раза меньше, чем в TaAs, а соединяющих узлы дуг не две, как в TaAs, а одна. В дальнейшем представляет интерес изучить электронную структуру соединений Nb<sub>1-x</sub>Ta<sub>x</sub>As с различными *x*. Необычные свойства вейлевских фермионов могут привести к появлению у электроники новой ветки – вейльтроники.

Л.Опенюв

1. S.-Y.Xu et al., *Science* **349**, 613 (2015).
2. B.Q.Lv et al., *Nature Phys.* **11**, 724 (2015).
3. L.X.Yang et al., *Nature Phys.* **11**, 728 (2015).
4. S.-Y.Xu et al., *Nature Phys.* **11**, 748 (2015).

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Зарядовая топология в купратных ВТСП

Известно, что в некоторых купратных ВТСП области с волной зарядовой плотности (ВЗП) организованы в виде полосок (страйпов). В работе [1] (Италия, Великобритания, Швейцария, Россия, Франция, Бельгия, Германия) обнаружено, что в однослойном ВТСП HgBa<sub>2</sub>CuO<sub>4+y</sub> с *T<sub>c</sub>* = 95 К участки ВЗП представляют собой нанометровые “лужи” различной формы. Сканируя образец рентгеновским лучом микронной толщины, авторы [1] определили функцию распределения этих “луж” по размерам (рис. 1) и показали, что она имеет степенной вид, типичный для фракталов.

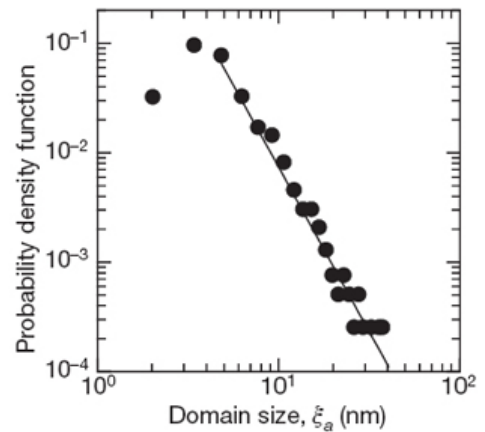


Рис. 1. Функция распределения “луж” ВЗП по размерам.

Мы пока мало знаем о поведении электронов и куперовских пар в средах с фрактальной размерностью. Такая необычная “зарядовая топология” ведет к усилению роли атомного беспорядка: одна единственная примесь может перекрыть проводящий канал и направить сверхток по другому пути (рис.2).

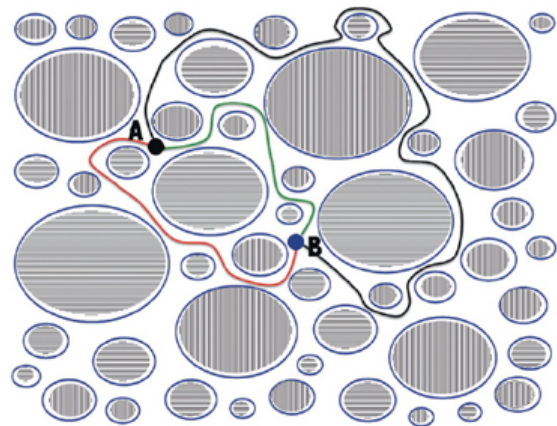


Рис. 2. Схематическое изображение различных путей протекания сверхтока между “лужами” ВЗП.

По материалам заметки “Charge topology in superconductors”, E.W.Carlson, *Nature* **525**, 329 (2015).

1. G.Campi et al., *Nature* **525**, 359 (2015).

## ГРАФЕН

### Графеновые покрытия для химиотерапии

Флуороурацил 5-Fu (5-фторурацил) является одним из основных противоопухолевых препаратов. Брутто-формула фторурацила  $C_4H_3FN_2O_2$ . Этот препарат нарушает синтез ДНК и ингибирует процесс деления опухолевых клеток. Вводят 5-Fu в организм через центральные венозные катетеры из силикона или полиуретана. В последнее время стали использовать катетеры с защитными антимикробными покрытиями, обычно из серебра или его соединений. К сожалению, эти катетеры довольно часто повреждаются или ломаются, что снижает эффективность лечения и доставляет дополнительные страдания больным. Авторы работы [1] (Норвегия, Швеция, Великобритания, Ирландия) выяснили, что причиной этого может быть образование HF при каталитическом разложении 5-Fu на серебре. С помощью XPS они исследовали тонкие (0.7 нм) пленки 5-Fu, нанесенные на Ag подложку, а также толстые пленки 5-Fu (“объемный” образец). Анализ пиков F1s и N1s показал, что при 35°C и даже при отрицательных температурах происходит взаимодействие 5-Fu с Ag. Спектры существенно отличаются от исходных (для “объемного” образца) (рис. 1а). Присутствие Ag приводит к уходу фтора с поверхности – интенсивность пика F1s снижается. При низкой температуре потеря фтора составляет ~ 57%, при температуре тела ~ 90% (рис. 1б). Также происходит разрыв связей N–H и удаление водорода из молекулы. Возникает второй пик N1s (рис. 1а); по оценкам около 80% молекул 5-Fu содержат атомы азота в новом состоянии (рис. 1с). Авторы считают, что полученные данные соответствуют реакции  $5-Fu \rightarrow HF + C_4H_2N_2O_2$ .

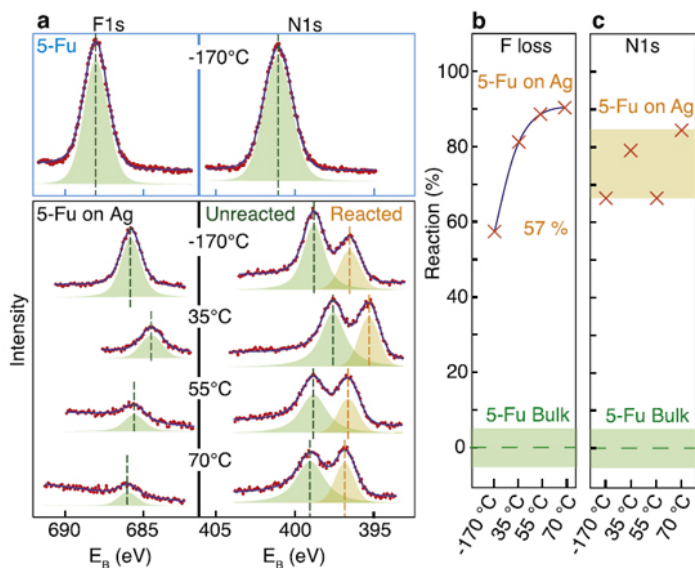


Рис.1. Реакция 5-Fu с Ag подложкой: а - XPS измерения пиков F1s (слева) и N1s (справа) при разных температурах (вверху – пики для объемного образца); б - потеря F из образца (%); в - доля молекул 5-Fu, содержащих вступивший в реакцию атом N.

Образование HF может вредить и больному, и катетеру. В качестве альтернативы исследователи предложили вместо серебра использовать для покрытия инертный биосовместимый графен, который уже отлично зарекомендовал себя в медицине (ПерсТ [2,3]). Случайное попадание в организм малых количеств графена принесет меньше вреда, чем попадание других материалов. Авторы [1] нанесли на графеновые подложки такие же пленки 5-Fu, какие наносили на Ag основу. Исследования XPS показали, что молекулы 5-Fu ни при каких температурах не вступали в реакцию с графеном (рис. 2). При повышенных температурах (55°C) они просто десорбируются с поверхности (пики F1s и N1s отсутствуют). Это подтверждает слабое взаимодействие 5-Fu с графеном.

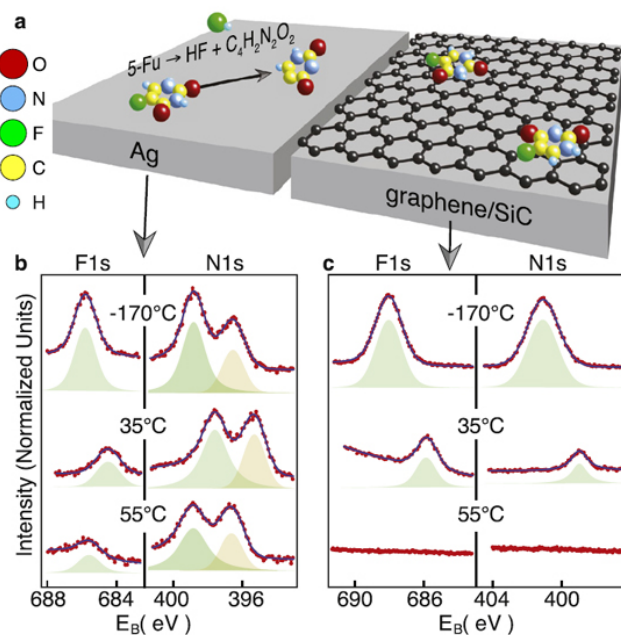


Рис. 2. Взаимодействие молекул 5-Fu с подложками из серебра и графена: а - схематическое представление молекулы 5-Fu на поверхности Ag и графена; б - температурная зависимость пиков F1s и N1s XPS для 5-Fu на Ag; в - аналогичная зависимость для 5-Fu на графене (при 55°C происходит десорбция молекул).

Авторы уверены, что их исследования – первый важный шаг в изучении взаимодействия препаратов химиотерапии с различными поверхностями. Конечно, эксперименты пока были проведены на модельных образцах в условиях высокого вакуума. Тем не менее, результаты показывают, что графеновые нанопокрывтия подавляют нежелательные реакции и могут быть эффективно использованы при лечении раковых заболеваний.

О.Алексеева

1. F.Mazolla et al., *2D Mater.* **2**, 025004 (2015).
2. [ПерсТ 22, вып. 6, с.3 \(2015\).](#)
3. [ПерсТ 21, вып. 13/14, с.3 \(2014\).](#)



## Структура и энергетика двухслойного графена

Известно, что в графите графеновые слои взаимодействуют друг с другом посредством слабого ван-дер-ваальсовского взаимодействия, поэтому энергия их взаимодействия  $E_b$  значительно меньше энергии ковалентной связи C–C в слоях, а расстояние  $d$  между ними гораздо больше длины этой связи. Такая же картина имеет место и в двухслойном графене. В работе [1] его структура и энергия межслоевого взаимодействия рассчитаны диффузионным квантовым методом Монте-Карло. Для упаковок AA и AB получено  $E_b = 11.5(9)$  и  $17.7(9)$  мэВ/атом и  $d = 3.495$  и  $3.384$  Å, соответственно, что не сильно отличается от этих величин в графите.

1. E. Mostaani et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 115501 (2015).

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

### Легирование нанокристаллических сверхрешеток

Легированием называется добавление в материал примесных атомов замещения с целью изменения его свойств. Таким образом удастся целенаправленно модифицировать электронные, магнитные, оптические, каталитические и пр. характеристики вещества, особенно полупроводников. В работе исследователей из США [1] концепция легирования распространена на сверхрешетки из коллоидных нанокристаллов. Показано, что нанокристаллы Au могут замещать нанокристаллы CdSe в соответствующих самоорганизованных сверхрешетках (рис. 1).

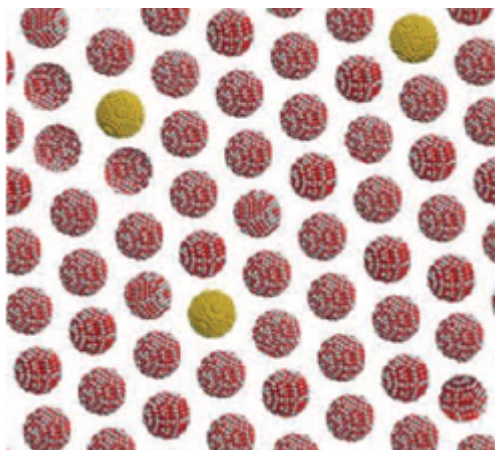


Рис. 1. Схематическое изображение сверхрешетки нанокристаллов CdSe (красный и серый цвета), легированной нанокристаллами Au (желтый цвет).

Для этого необходимо, чтобы размеры всех нанокристаллов были близки друг к другу. В работе [1] они составляли 5.5 нм или чуть более при разбросе не более 6%. Концентрация легирующих нанокристаллов легко контролируется изменением их доли в исходной смеси. При легировании пленок нанок-

ристаллов PbSe нанокристаллами Au/Ag их проводимость увеличивается более чем на шесть порядков (рис. 2). Этот эффект объяснен в рамках теории перколяции.

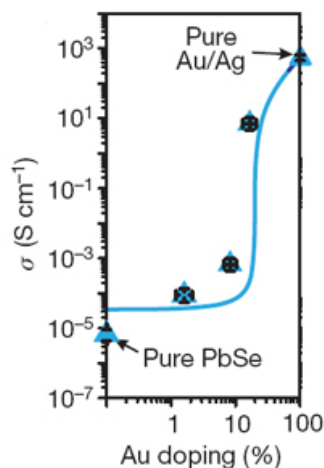


Рис. 2. Проводимость пленок из нанокристаллов PbSe, легированных нанокристаллами Au/Ag. Синяя кривая – предсказание теории Эфроса-Шкловского.

Авторы полагают, что “нанокристаллическое легирование” позволит изготовить новые материалы с уникальными свойствами.

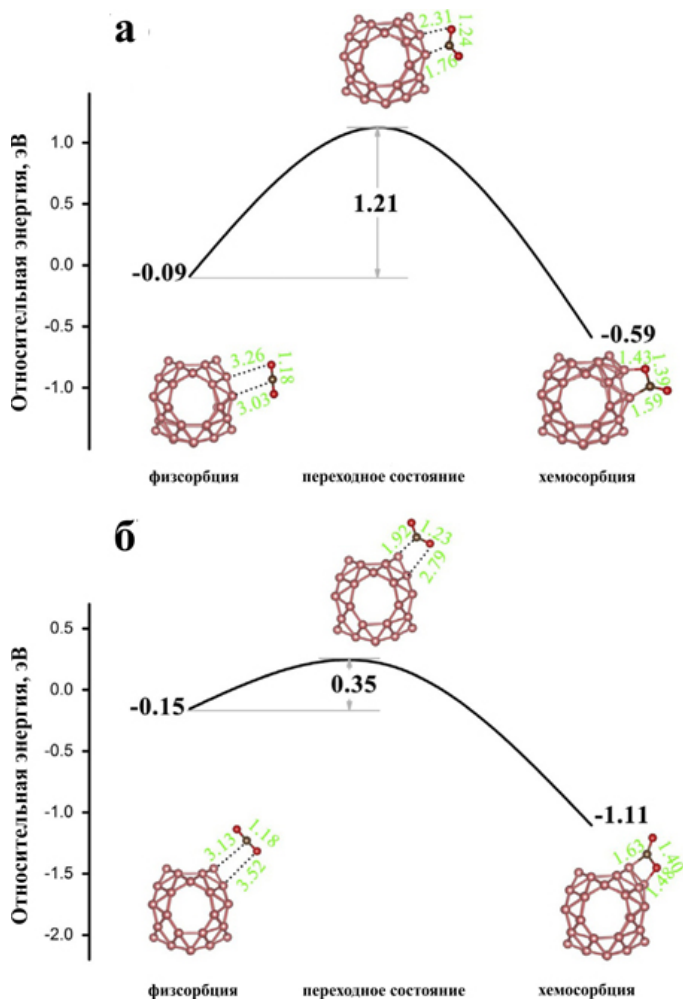
1. M. Cargnello et al., *Nature* **524**, 450 (2015).

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Борный фуллерен – ловушка для углекислого газа

Считается, что основными парниковыми газами являются водяной пар, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ) и закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Однако ключевым фактором изменения климата на Земле является именно  $\text{CO}_2$ . Углекислый газ составляет около двух третей от всех парниковых газов, производимых в результате человеческой деятельности: от сжигания ископаемого топлива до интенсивного сельского хозяйства. Поэтому задача поиска материалов, способных эффективно захватывать  $\text{CO}_2$ , всегда будет актуальной. Критериями идеального  $\text{CO}_2$ -сорбента являются высокие емкость и селективность, высокая скорость процессов адсорбции/десорбции, высокая химическая устойчивость, стабильность механических свойств и низкая стоимость синтеза. По мнению авторов работы [1] (Австралия, Китай), вышеперечисленными критериями вполне может обладать борный “фуллерен”  $\text{B}_{40}$ , который совсем недавно был получен экспериментально [2]. Исследователи выполнили ряд численных расчетов в рамках теории функционала плотности с учетом слабого ван-дер-ваальсовского взаимодействия и обнаружили, что адсорбции  $\text{CO}_2$  на чистом  $\text{B}_{40}$  препятствует достаточно высокий энергетический барьер, который, однако, может быть значительно снижен путем ионизации (см. рис.). Практическую реализацию идеи получения отрицательно заряженного фуллерена авторы видят во внедрении внутрь борной клетки атома лития через семичленное кольцо, эффективный радиус которого состав-

ляет около 2 Å (подобные операции достаточно успешно проводятся для традиционных углеродных фуллеренов). При этом часть заряда переносится с атома лития на поверхность фуллереновой клетки. Полученный эндофуллерен  $\text{Li}@B_{40}$  согласно дополнительным расчетам оказывается весьма устойчив и способен повысить кинетику адсорбции  $\text{CO}_2$  аналогично заряженному  $B_{40}^-$ . Авторы особо подчеркивают, что адсорбция на  $\text{Li}@B_{40}$  других газов, таких как  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ , остается при этом очень слабой, что позволит использовать этот эндоэдральный комплекс не только для захвата углекислого газа, но и выделения  $\text{CO}_2$  из газовой смеси.



Минимальные энергетические пути от физсорбции до хемосорбции углекислого газа на поверхности нейтрального и заряженного борных фуллеренов  $B_{40}$  (а) и  $B_{40}^-$  (б). Соответствующие оптимизированные молекулярные конфигурации показаны на вставках. Все энергии указаны по отношению к полной энергии фуллерена  $B_{40}/B_{40}^-$  и одной изолированной молекулы  $\text{CO}_2$ . Атомы бора обозначены розовым цветом, атомы углерода – коричневым, атомы кислорода – красным.

М. Маслов

1. G.Gao et al., *Comput. Mater. Sci.* **108**, 38 (2015).
2. H.J.Zhai et al., *Nature Chem.* **6**, 727 (2014).

## Прозрачная проводящая пленка на основе УНТ для светодиодов

Прозрачный проводящий слой (ППС), который используется для транспортировки инжектируемых носителей тока от электродов к области эмиссии, является важным элементом светодиодов. Традиционно в качестве материала для такого слоя используют оксид индия-олова (ИТО), однако вследствие истощения запасов индия на Земле возникает потребность создания ППС из других, более доступных материалов, обладающих достаточно высокой проводимостью и прозрачностью. Наиболее привлекательными кандидатами на замену ИТО являются графен, углеродные нанотрубки (УНТ) и серебряные нанопроволоки (AgNWs), которые обладают хорошей электропроводностью в сочетании с высокой химической и механической стабильностью. Особенно эффективным оказывается использование комбинации указанных материалов, поскольку в этом случае удается преодолеть проблемы, связанные с существенным различием работ выхода графена и УНТ (~ 4.5 эВ) и подложки типа p-GaN (~7.5 eV), а также связанные с необходимостью обеспечения надежного электрического контакта между УНТ. Подобный гибридный материал, разработанный недавно в Beijing Univ. of Technology, Beijing Univ. Chem. Technology и Tsinghua Univ. (Китай) [1], проявил себя как один из наиболее перспективных кандидатов на замену ИТО.

Структура прозрачного проводящего электрода с гибридной пленкой светодиода показана на рис. 1. Пленка состоит из массива параллельно расположенных УНТ, покрытого сетью серебряных нанопроволок AgNWs. Нанопроволоки обеспечивают хороший контакт между нанотрубками, способствуя равномерному распределению носителей по поверхности пленки.

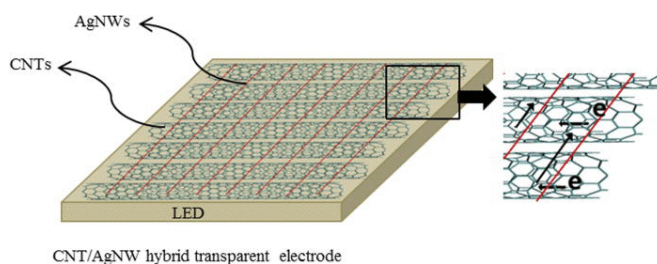


Рис. 1. Схематическое изображение структуры светодиода с гибридной пленкой.

Гибридные пленки использовали в светодиодах на основе AlGaInP. Для изготовления электрода р-типа на поверхность светодиода напыляли слой Au/BeAu/Au (50/150/200 нм), на которые затем наносили слой многостенных высокоориентированных УНТ, фиксируемый пленкой Ti/Au (150/300 нм). В качестве электрода n-типа использовали напыленную на подложку GaAs пленку AuGeNi/Au. Размер каждого светодиода составлял 300×300 мкм. Прозрачность исходного слоя высокоориентиро-

ванных УНТ на  $\lambda = 550$  нм составила около 86%. Его последующая плазменная обработка (мощность плазменного источника 300 Вт) в течение 30 с в токе кислорода ( $40 \text{ см}^3/\text{с}$ ) повысила прозрачность пленки до 96% и снизила оптические потери. Осуществлялось плазменное травление слоя в кислороде при потоке (в пересчете на нормальные условия) и. После плазменной обработки на поверхность УНТ наносили серебряные нанопроволоки диаметром около 40 нм и полученные пленки отжигали в течение 10 мин при  $200^\circ\text{C}$ . Поверхностное сопротивление гибридных пленок варьировалось от 500 до 1000 Ом ( $\Omega/\text{sq}$ ).

На рис. 2 представлена имеющая типичный перколяционный характер зависимость прозрачности гибридной пленки от ее удельного сопротивления, определяемого концентрацией серебряных нанопроволок.

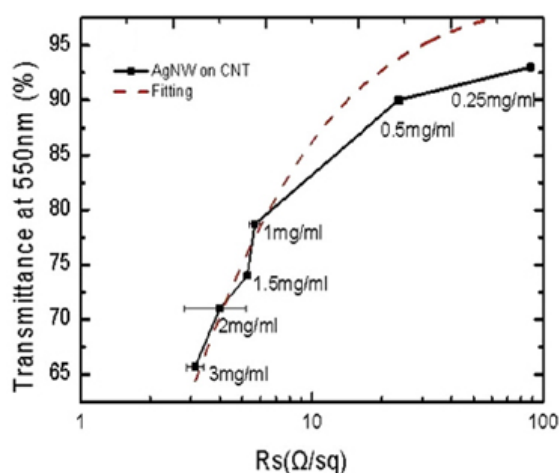


Рис. 2. Зависимость прозрачности гибридных пленок на стеклянной подложке от удельного сопротивления, измеренная на  $\lambda = 550$  нм для пленок с различным содержанием AgNW. Штриховой линией показаны результаты модельных расчетов.

Результаты детальных исследований поведения светодиода с гибридной пленкой показывают, что оптимальные условия использования такой пленки соответствуют прозрачности 94.2% при поверхностном сопротивлении Ом ( $\Omega/\text{sq}$ ). При этом интенсивность излучения при токе 20 мА примерно вдвое выше соответствующего параметра, измеренного при отсутствии такой пленки.

А.В. Елецкий

*I. B.Liu et al., Appl. Phys. Lett. 106, 033101 (2015).*

## КОНФЕРЕНЦИИ

### Семинар по физике конденсированного состояния, 30 сентября 2015 г.

(17.00, многофункциональный зал библиотеки физического факультета МГУ, 5 этаж)

**Эдуард Валентинович Девятков** (Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка) – “Транспорт между двумерным топологическим изолятором и металлом с макроскопическим параметром порядка (сверхпроводником или ферромагнетиком)”.

Доклад посвящён экспериментальным исследованиям электронного транспорта между ферромагнитными или сверхпроводящими контактами к краю двумерной электронной системы с инверсией зон, которая реализуется в узкой (8 нм) HgTe квантовой яме. В таких системах, представляющих собой двумерную реализацию топологического изолятора, в нулевом магнитном поле транспорт определяется спин-расщеплёнными краевыми состояниями. С помощью ферромагнитного контакта, было продемонстрировано, что этот транспорт чувствителен к взаимной ориентации направлений намагниченности контактов, находящихся на расстоянии 200 мкм. Таким образом, получено прямое экспериментальное подтверждение спиновой когерентности краевого тока на макроскопических расстояниях. Использование сверхпроводящего контакта позволяет пронаблюдать эквидистантные по энергии осцилляции, модулирующие андреевское сопротивление такого контакта. Эти осцилляции вызваны интерференцией в краевом состоянии, возникающей вблизи сверхпроводника и являются косвенным подтверждением геликоидальной природы краевого состояния.

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>

Видеозапись семинара впоследствии будет доступна на сайтах <http://cm.phys.msu.ru/?q=seminar> или <http://nano.msu.ru/research/seminars/condensed/seminars>

Дополнительная информация:

тел. +7(495)939-1151

E-mail: [khokhlov@mig.phys.msu.ru](mailto:khokhlov@mig.phys.msu.ru)

**XVII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 23-27 ноября 2015 г., г. Санкт-Петербург, Россия**

XVII конференция для молодых ученых посвящена таким активно развивающимся направлениям физики твердого тела и электроники, как физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковые нанотехнологии, опто- и наноэлектроника. На конференции будут заслушаны доклады по результатам как экспериментальных, так и теоретических исследований, сгруппированные по следующим основным разделам:

- Объемные свойства полупроводников
- Процессы роста, поверхность, границы раздела
- Гетероструктуры, сверхрешетки, квантовые ямы
- Квантовые точки, квантовые нити и другие низкоразмерные системы
- Приборы опто- и наноэлектроники
- Новые материалы

**Основные даты:**

Срок представления тезисов на русском языке (1 стр.) - до **12 октября 2015 г.**

Для авторов, желающих опубликовать статьи (расширенные тезисы) на английском языке в журнале *Journal of Physics: Conference Series*, срок представления рукописей (3 - 6 стр.) - до 12 октября

E-mail: [conference@semicond.spbstu.ru](mailto:conference@semicond.spbstu.ru)

Сайт: [www.semicond.spbstu.ru/conf2015](http://www.semicond.spbstu.ru/conf2015)

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, М. Маслов, Л. Опенов

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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