

разование пор в структуре мембраны фиксировали с помощью люминесцирующего красителя, проникающего в мембрану в результате действия вращающегося магнитного поля. Согласно результатам этого эксперимента, в отсутствие УНТ действие вращающегося магнитного поля с индукцией 75 мТ практически не вызывает проникновения красителя в клетки, в то время как введение УНТ приводит к окрашиванию примерно 20 % клеток. Количественный рост проницаемости клеточных мембран коррелирует с наблюдаемым влиянием вращающегося магнитного поля на выживаемость клеток. Тем самым результаты выполненных экспериментов указывают на возможность стимулирования проницаемости клеточных мембран для различных лекарственных препаратов и разрушения раковых клеток в результате воздействия вращающегося магнитного поля в присутствии УНТ.

А.Елецкий

1. D.Liu et al., Nano Lett. 12, 5117 (2012).

Обратимое фторирование углеродных нанотрубок

Химическая функционализация углеродных нанотрубок (УНТ) приводит к значительному изменению их физико-химических характеристик, а, следовательно, к расширению области использования этого нового материала. Одним из первых радикалов, присоединение которых к УНТ оказалось возможным без существенного изменения их структуры, являются атомы фтора, образующие с атомами углерода ковалентную химическую связь. Фторирование УНТ приводит к снижению их электропроводности и к увеличению их диаметра, что привлекает исследователей, заинтересованных в прикладном использовании нанотрубок. Несмотря на интерес ученых к проблеме фторирования УНТ, процесс фторирования до сих пор до конца не изучен, что связано с трудностью фиксации фторированных атомов углерода на поверхности нанотрубки. Некоторого прогресса в этом направлении удалось достигнуть группе исследователей из Rice Univ. (США) [1], которые провели не только фторирование УНТ, но также обратную процедуру – восстановление однослойных и двухслойных УНТ.

Фторирование однослойных и двухслойных УНТ проводили в течение двух часов в потоке F_2+He (1:4) при температурах 150 и 200°C, соответственно. Полученные образцы исследовали с помощью сканирующего туннельного электронного микроскопа (STM), рентгеновского фотоэлектронного спектрометра, ИК Фурье-спектрометра и спектрометра комбинационного рассеяния (КРС). Как следует из измерений методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, степень фторирования образцов однослойных и двухслойных УНТ соответствует отношению $C/F = 2/1$ и $3/1$. Такое соотношение показывает, что в двухслойных УНТ фторированию под-

вергается только внешний слой нанотрубок, причем степень фторирования этого внешнего слоя совпадает со степенью фторирования однослойных УНТ. Анализ ТЕМ изображений указывает на значительное увеличение диаметра УНТ в результате фторирования (с 1.2–1.5 нм до ~ 3 нм). Это наблюдение согласуется с опубликованным ранее сообщением об увеличении в результате фторирования длины C–C связи с 0.142 нм до 0.156 нм. Анализ ТЕМ изображений указывает также на явление укорачивания УНТ в результате фторирования. При этом фторирование двухслойных УНТ приводит к уменьшению длины внешней нанотрубки.

Восстановление фторированных УНТ проводили в результате термообработки при температуре 400°C в течение часа. ТЕМ измерения показывают, что в результате восстановления нанотрубок их диаметр уменьшался до исходного. Фторирование и последующее восстановление образцов УНТ было подтверждено анализом спектров КР. На этих спектрах ясно видно, что присоединение относительно тяжелых атомов фтора к гексагональной решетке углерода сопровождается исчезновением радиальных дышащих мод.

А.Елецкий

1. J.H.Kang et al., Chem. Phys. Lett. 534, 43 (2012).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Гигантское спин-орбитальное расщепление в интерфейсе графен/Au/Ni

Многочисленные попытки интегрировать графен в спинтронику пока что не привели к существенным успехам. Его применению как активного элемента мешает слабое спин-орбитальное взаимодействие в графене (расщепление 0.05 мэВ). Группа исследователей из Германии, США и России [1] сообщает об обнаружении гигантского (100 мэВ) спин-орбитального расщепления в интерфейсе графен/Au/Ni по данным фотоэлектронной спектроскопии с угловым (ARPES) и спиновым разрешением. ARPES измерения были выполнены с помощью установки UE112-PGM на синхротроне BESSY II в Берлинском исследовательском центре им. Гельмгольца (Германия). Разрешение по спину получено с применением спинового поляриметра моттовского типа. На подложку W(110) наносили слой размагнитченного Ni(111) толщиной 15-20 монослоев, который покрывали сверху монослоем графена. Интеркаляцию золотом проводили напылением на графен одного монослоя Au с последующим отжигом при 750 К, в результате чего атомы золота проникали под слой графена и формировали интерфейс графен/Au/Ni. Структуру интерфейса контролировали методами сканирующей туннельной микроскопии (STM) и дифракции медленных электронов (LEED) (рис. 1a, b). Зонная структура, полученная методом ARPES, показана на рис. 1c, на котором видна линейная зависимость от волнового вектора

вблизи конической точки К и гибридизация p - d состояний графена и золота. Спировое расщепление показано на рис. 1d.

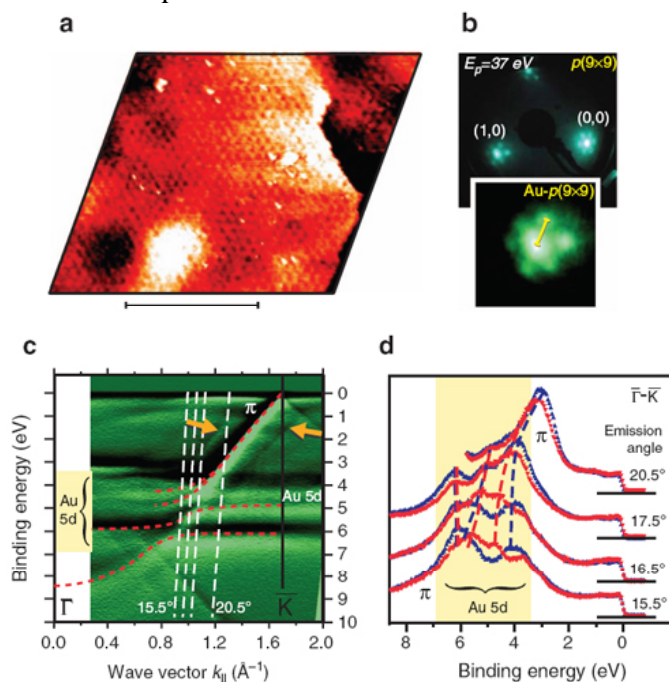


Рис. 1. Сверхструктура 9x9 для 1.1 моно слоя Au под графеном по данным STM (a) и LEED (b); отрезок, иллюстрирующий масштаб изображения, имеет длину 40 нм. Гибридизация p - d состояний графена и золота обозначена красными пунктирными линиями (c), оранжевые стрелки показывают реплики зон вследствие сверхструктуры 9x9. Белые штриховые линии показывают величины волновых векторов, для которых спин-зависимые спектры приведены на (d). Красным и синим цветом выделены противоположные направления спина электрона, желтым показаны 5d состояния Au.

Авторы также выполнили моделирование атомной и электронной структуры в рамках теории функционала плотности в обобщенном градиентном приближении (GGA), рис. 2. Расчет выявил сильную гибридизацию p_z -состояний графена и d_{z^2} , d_{yz} состояний золота.

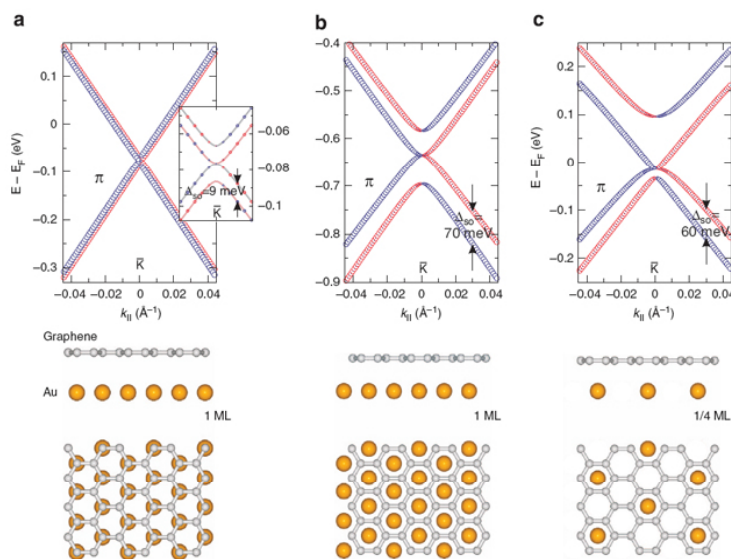


Рис. 2. Геометрия интерфейса и расщепление Рашбы для дираковского конуса. Внизу показана геометрия адатомов золота под монослоем графена – вид сверху и сбоку; вверху – закон дисперсии электронов с расщеплением по спину. Монослой Au над углеродом (a) нарушает псевдоспиновую симметрию подрешеток A, B и приводит к расщеплению 9 мэВ, показанному на вставке вверху, расстояние Au–C – 0.33 нм. Монослой Au над центрами углеродных 6-угольников (b) приводит к сближению Au–C до 0.25 нм и увеличению расщепления Рашбы, но эта структура неустойчива. Частичное заполнение центров углеродных 6-угольников (c) стабилизирует сверхструктуру адатомов Au и сохраняет большое спин-орбитальное взаимодействие.

С.Овчинников

1. D.Marchenko et.al., *Nature Commun.* **3**, 1232 (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 О.Алексеева, А.Елецкий, О.Коплак,

М.Маслов, С.Овчинников, Л.Опенков, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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