

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Слабая сверхпроводящая связь на поверхности титаната стронция

Двумерные системы электронов на границах раздела и поверхностях оксидов представляют интерес, как для фундаментальной физики, так и для практических приложений. Значительное внимание здесь уделяется титанату стронция – зонному диэлектрику, который при допировании становится сначала металлом, а затем – сверхпроводником. В работе [1] для создания слабой сверхпроводящей связи на монокристаллической подложке SrTiO₃ использован следующий прием. Образец помещали в ионную жидкость (электролит), предварительно “закранировав” часть поверхности диэлектрической полоской Al₂O₃ с нанесенным на нее металлическим электродом (рис. 1).

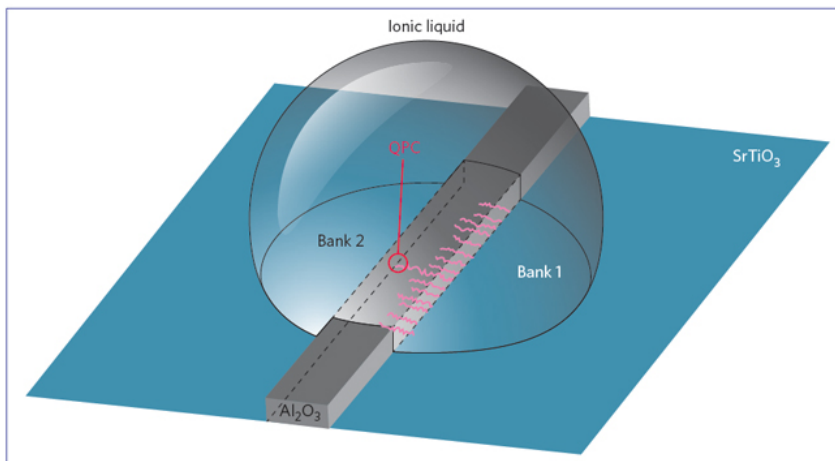


Рис. 1. Полоска Al₂O₃ (2 мкм × 50 нм × 5 нм) экранирует часть поверхности SrTiO₃ от ионной жидкости и разделяет ее на сверхпроводящие “берега”. Розовым цветом показаны проводящие каналы, образующиеся при увеличении напряжения на электроде. Красный кружок – квантовый точечный контакт (канал с максимальной проводимостью).

В электрическом поле ионы жидкости формируют на незаэкранированных “берегах” двойной электрический слой, что приводит к увеличению приповерхностной концентрации носителей заряда и переходу “берегов” в сверхпроводящее состояние с $T_c = 0.3$ К. Электронная структура расположенного под полоской участка поверхности не изменяется. Этот участок остается диэлектрическим и играет роль слабой связи для двух окружающих его сверхпроводящих “берегов”. Концентрацию носителей в нем можно, однако, тоже изменять, подавая напряжение V_{TG} на металлический электрод (top gate). С ростом V_{TG} в полоске Al₂O₃ формируются проводящие каналы, один из которых (с максимальной проводимостью) фактически представляет собой квантовый точечный контакт (рис. 1). При малых V_{TG} полоска не пропускает ток, при промежуточных V_{TG} вольт-амперные характеристики имеют такой же вид, как у туннельных контактов, а при больших – как у сверхпроводников (рис. 2).

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Сверхбыстрый оптический контроль орбитальной и спиновой динамики твердотельного дефекта

В погоне за релятивистскими электронами

- 3 Взаимодействие электрического тока с ядерными спинами в органическом полупроводнике

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Озоновые детекторы на основе каркасных соединений бора

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Молография

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Углеродные нанотрубки помогут в лечении рака поджелудочной железы

ТОРЖЕСТВО

- 6 Нобелевская премия 2014

КОНФЕРЕНЦИИ

- 7 XIX Симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника”, 10 - 14 марта 2015 г., Нижний Новгород, Россия

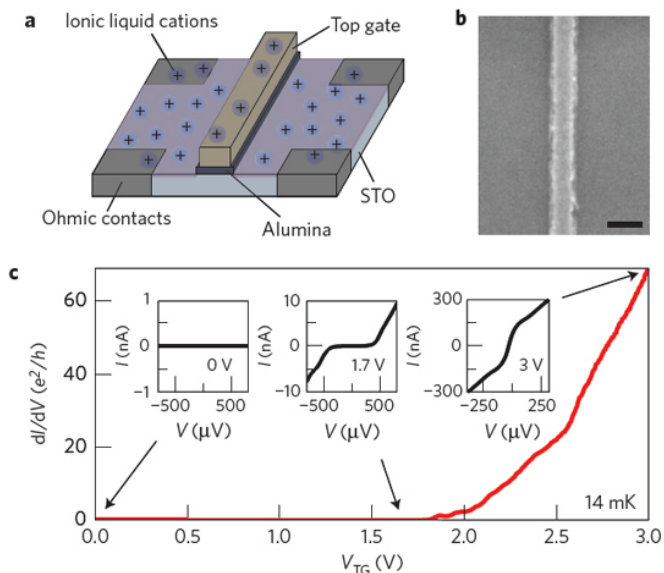


Рис. 2. а – Схема устройства [1]; б – СТМ-изображение металлического электрода (длина масштабной линейки 100 нм); с – дифференциальная проводимость при нулевом смещении источник-сток ($T = 14$ мК, V_{TG} – напряжение на металлическом электроде). На вставках – вольт-амперные характеристики в диэлектрическом, туннельном и сверхпроводящем режимах (слева направо).

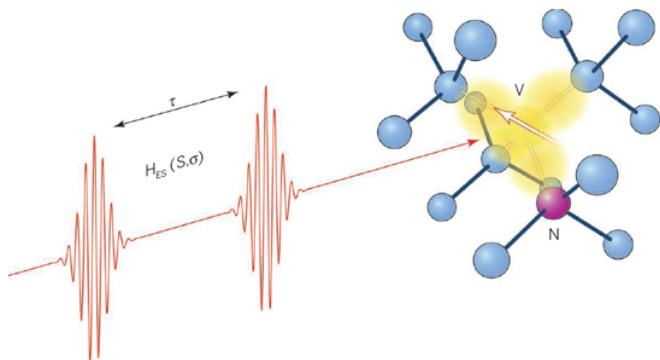
Интересно, что минимальная проводимость равна e^2/h – в два раза меньше, чем для вырожденных по спину электронов. Это может быть связано с ферромагнетизмом SrTiO_3 .

Л. Опенов

I. P. Gallagher et al., Nature Phys. 10, 748 (2014).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Сверхбыстрый оптический контроль орбитальной и спиновой динамики твердотельного дефекта



Дефекты азот-вакансия в алмазе (NV-центры) – кандидаты в физические носители твердотельных спиновых кубитов. В работе [1] (США, Германия) для перевода NV-центра из одного орбитального состояния в другое использована пара резонансных субпикосекундных лазерных импульсов. Поскольку спин-спиновое и спин-орбитальное взаимодействия зависят от структуры координатной волновой функции электрона, то они различны в основном и возбужденном состояниях. Это дало авторам возможность провести сверхбыстрые операции со спиновым кубитом, используя исключительно оптиче-

ские средства. Развитый подход позволяет осуществлять индивидуальную адресацию кубитов в спиновых цепочках и фотонных сетях, а также допускает обобщение на многокубитные операции с запутанными состояниями.

I. L. C. Bassett et al., Science 345, 1333 (2014).

В погоне за релятивистскими электронами

В классической механике Ньютона энергия частицы E квадратично зависит от ее скорости v и импульса p (рис. 1а). При этом $v = p/m$, где m – масса частицы. Согласно теории относительности Эйнштейна, энергия быстрых (релятивистских) частиц линейна по импульсу, $E = pv$, а их скорость от импульса не зависит (например, для фотонов v – это скорость света c). После открытия графена выяснилось, что электроны с релятивистским законом дисперсии могут существовать и в двумерных (2D) твердых телах, хотя их скорость, конечно, гораздо меньше c (в графене – на 3-4 порядка), причем этот закон дисперсии имеет место только в двух направлениях (рис. 1б). Такие электроны называют 2D безмассовыми дираковскими фермионами (их поведение описывается знаменитым уравнением Дирака).

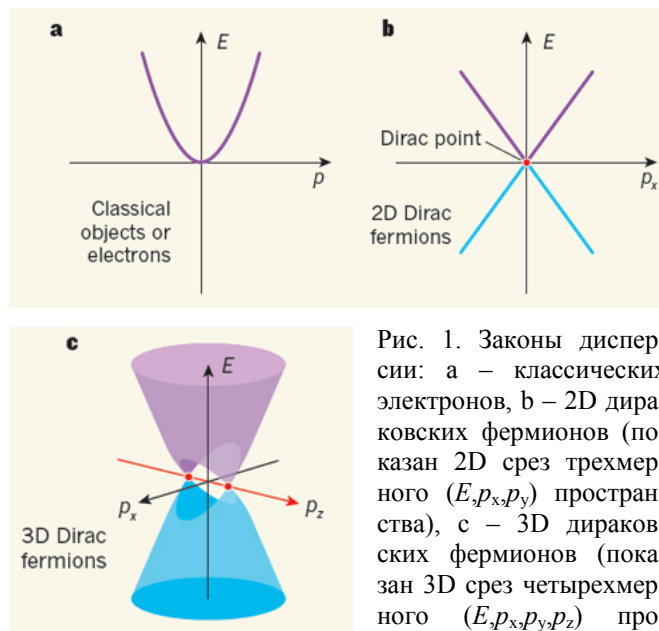


Рис. 1. Законы дисперсии: а – классических электронов, б – 2D дираковских фермионов (показан 2D срез трехмерного (E, p_x, p_y) пространства), с – 3D дираковских фермионов (показан 3D срез четырехмерного (E, p_x, p_y, p_z) пространства).

Графен представляет собой полуметалл: его энергия Ферми находится в точке касания зоны проводимости и валентной зоны – дираковской точке. Второй сорт 2D дираковских полуметаллов обязан своим существованием другому релятивистскому эффекту – спин-орбитальному взаимодействию (взаимодействию спина электрона с магнитным полем, индуцированным его орбитальным движением). В материалах из легких химических элементов (таких как углерод) это взаимодействие очень слабое, но для тяжелых (висмут, кадмий) резко возрастает и иногда даже служит причиной инверсии разрешенных энергетических зон. Такая инверсия может, в свою очередь, приводить к появлению дира-

ковских фермионов на поверхности топологических диэлектриков.

Недавно методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением [1-3] и сканирующей туннельной микроскопии [4] было продемонстрировано существование 3D дираковских фермионов (рис. 1с) в арсениде кадмия Cd_3As_2 (недавно об этом мы уже кое что писали в ПерсТе [5]) Cd_3As_2 – полуметалл, известный уже более 50 лет и славящийся чрезвычайно высокой подвижностью носителей заряда (больше, чем в графене). Теперь стало понятно, что такая исключительная подвижность связана с 3D дираковскими состояниями. Скорость носителей $v \sim 10^6$ м/с. Их концентрацию можно регулировать за счет допирования калием. К сожалению, несмотря на интересную новую физику, практическое использование Cd_3As_2 ограничено низкой (сравнимой с тепловой) энергией инверсии зон и токсичностью этого материала. Но надо полагать, что существуют и другие дираковские 3D полуметаллы, которые пока ждут своего открытия. Может быть, именно в них удастся, наконец, обнаружить экзотические хиральные фермионы Вейля, которые должны возникать из-за расщепления дираковской точки на две копии вследствие нарушения симметрии относительно обращения времени или координат при воздействии, соответственно, магнитного поля или давления.

По материалам заметки
“Catching relativistic electrons”,

Z.Zhu, J.E.Hoffman, *Nature* **513**, 319 (2014).

1. S.Borisenko et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 027603 (2014).
2. M.Neupane et al., *Nature Commun.* **5**, 3786 (2014).
3. Z.K.Liu et al., *Nature Mater.* **13**, 677 (2014).
4. S.Jeon. et al., *Nature Mater.* **13**, 851 (2014).
5. [ПерсТ 21, вып. 13/14, с.5 \(2014\).](#)

Взаимодействие электрического тока с ядерными спинами в органическом полупроводнике

Органические полупроводники демонстрируют очень большое магнетосопротивление в сравнительно слабых магнитных полях (несколько мТл) [1]. Предварительные данные электронного спинового резонанса указывают на то, что микроскопический механизм спин-зависимого транспорта обусловлен сверхтонким взаимодействием спинов носителей заряда (электронов и дырок) с ядерными спинами атомов водорода. В работе [2] (США, Австралия, Германия) установлено, что это действительно так. Авторы [2] использовали ЯМР-спектроскопию и методику спинового эха. Они показали также, что ориентацией ядерных спинов и электрическим током можно управлять синхронно, используя комбинацию СВЧ и ВЧ импульсов.

1. R.N.Nahato et al., *Science* **341**, 257 (2013).

2. H.Malissa et al., *Science* **345**, 1487 (2014).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Озоновые детекторы на основе каркасных соединений бора

Использование современных функциональных наноматериалов при создании сенсоров нового поколения уже перестало быть редкостью. Лидером в этой области пока является графен и его производные. Например, датчики давления и газоанализаторы на его основе уже активно разрабатываются во многих лабораториях мира. Однако в настоящее время все чаще появляются достойные альтернативы. Так, авторы работы [1] предлагают новый тип перспективных детекторов озона на основе каркасных соединений бора или, так называемых, “борных фуллеренов”. В рамках теории функционала плотности (DFT/PBE/6-31G(d)) с помощью программного пакета Gaussian03 исследователи рассмотрели процессы адсорбции молекулы озона на поверхность чистого B_{80} и эндоэдрального комплекса – “металлофуллерена” $Be@B_{80}$ (рис. 1).

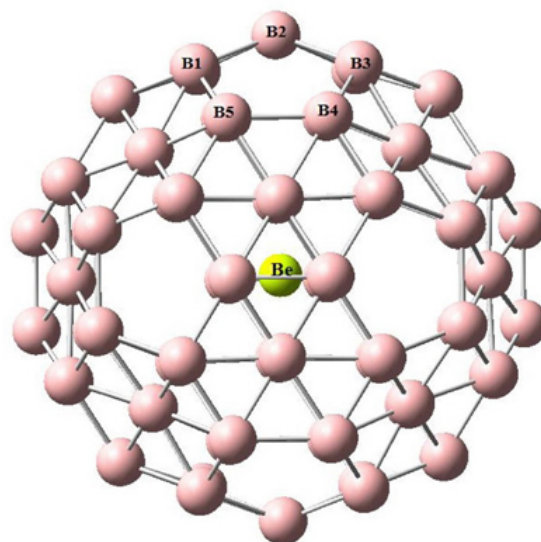


Рис. 1. Эндоэдральный комплекс $Be@B_{80}$

Оказалось, что озон очень хорошо “прилипает” к поверхности борного каркаса, а присутствие бериллия только улучшает процесс ковалентного связывания. При этом атом металла смещается из центра на периферию и прикрепляется к внутренней поверхности кластера B_{80} (рис. 2).

Авторы отмечают, что наблюдаемые структурные изменения далеко не единственны. Расчет плотности состояний для B_{80}/O_3 и $Be@B_{80}/O_3$ показал, что присутствие озона значительно влияет на электронные свойства борных соединений. Присоединению озона сопутствует увеличение электропроводности. Таким образом, наличие молекулы O_3 на поверхности B_{80} или $Be@B_{80}$ можно однозначно конвертировать в электрический сигнал, что позволит, по мнению авторов, в будущем использовать каркасные борные кластеры в качестве эффективных озоновых сенсоров.

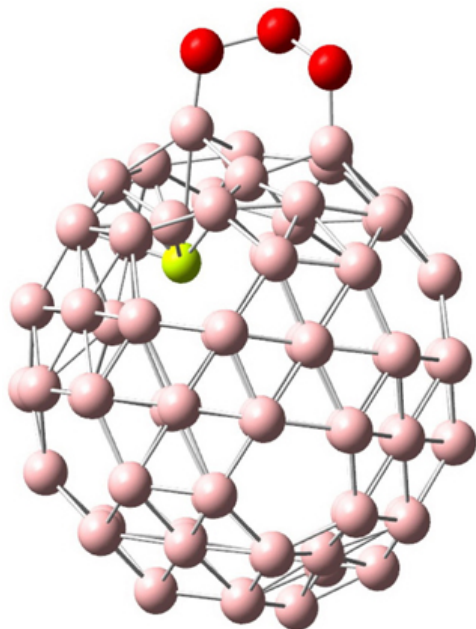


Рис. 2. Эндоздральный комплекс Be@B₈₀ с адсорбированной на поверхности молекулой озона

М. Маслов

I. Z. Mahdaviifar and M. Poulad, Sensors and Actuators B 205, 26 (2014).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Молография

Нет, это не опечатка в слове “монография”. Так называется статья в междисциплинарном журнале *Physical Review X*, написанная Кристофом Фаттингером – исследователем из Инновационного центра фармацевтической компании Рош в Базеле [1]. Данный термин получен путем скрещивания “молекулы” и “голографии” и означает не технологию изготовления голограмм из молекул, а новый метод исследования нековалентных связей органических молекул. Разнообразные нековалентные связи (водородные, гидрофобные, ионные) играют важнейшую роль в биологии: они отвечают за образование третичной структуры биополимеров, за репликацию ДНК, иммунную реакцию и обменные процессы в организме. При этом они намного слабее ковалентных связей, и по своей хрупкости и непостоянству представляют трудный объект для спектроскопического исследования.

Основная идея фокальной молекулярной голографии состоит в конструировании конфигурации молекул, в которой молекулярные связи пространственно упорядочены, что позволяет использовать при их исследовании сверхчувствительные дифракционные методики. В такой “молограмме” молекулы белков оседают в изготовленных фотолитографическим образом канавках на расстоянии, меньшем длины волны света, но много большем размера молекул, чтобы межмолекулярное взаимодействие не нарушало третичную структуру каждой молекулы в отдельности. Для увеличения эффективности

взаимодействия излучения с анализируемым веществом Фаттингер предлагает локализовать оптическое излучение внутри тонкопленочного волноводного слоя на поверхности анализатора. За счет изменения показателя преломления при образовании нековалентных связей излучение рассеивается на молограмме, что позволяет анализировать полученную дифракционную картину (рис.1). Благодаря когерентному наложению сигналов от упорядоченно расположенных молекул удастся исключить эффект от неспецифичных связей, не образующих подобного порядка. При увеличении размеров молограммы чувствительность метода возрастает по квадратичному закону: для диаметра молограммы в сотни микрон оценки минимального количества пробы дают всего 100 фемтограмм.

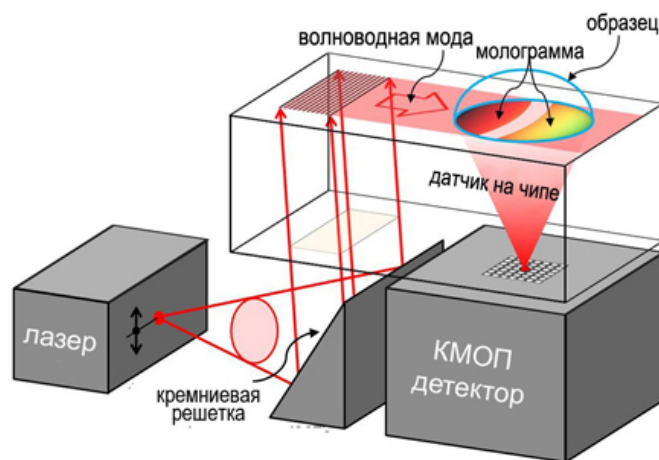


Схема молографического чипа: луч лазера, распространяющийся по тонкопленочному волноводу, рассеивается на “молограмме” – пространственно упорядоченных органических молекулах-рецепторах. Результатом когерентного рассеяния на молограмме является фокусировка света на детекторе. Когда молекулы рецептора связываются с молекулами анализируемого вещества, меняется показатель преломления, что влияет на дифракционную картину. Размер молограммы около полумиллиметра, что соответствует миллиарду осажденных молекул рецептора. Рисунок из статьи-комментария нобелевского лауреата Г. Биннига [2].

Компактное устройство, представленное на рисунке, позволит осуществлять экспресс-анализ белков в полевых условиях, а также наблюдать изменение молекулярных связей в реальном времени, что важно для фармакокинетических исследований. Впрочем, стоит оговориться, что статья [1] сугубо теоретическая, так что с вирусом Эбола придется бороться пока без использования молографии.

А. Пятаков

1. C.Fattinger, *Phys. Rev. X* 4, 031024 (2014).
2. G.Binnig, *Physics* 7, 84 (2014).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Углеродные нанотрубки помогут в лечении рака поджелудочной железы

Большинство противоопухолевых препаратов очень токсичны, поэтому необходимо найти такие контейнеры, которые смогут доставить их точно в болезнетворную мишень, не причинив вреда здоровым клеткам. Немецкий учёный Пауль Эрлих (Paul Ehrlich), лауреат Нобелевской премии, основатель химиотерапии, предложил концепцию “магической пули”, и вот уже более 100 лет ученые в разных лабораториях пытаются создать такие “пули”. Обнадёживающие результаты были получены при использовании углеродных нанотрубок, которые способны преодолеть биологические барьеры [1,2]. К сожалению, остаются вопросы, связанные с их возможной токсичностью. Недавно американские ученые предложили новый способ синтеза систем доставки лекарств на основе нанотрубок, существенно снижающий вредное воздействие [3]. Короткие (~ 50 нм) одностенные нанотрубки (ОСНТ) высокого качества они получили, используя очистку в газообразном Cl_2 при высокой температуре. При этом практически все частицы катализаторов были удалены в виде летучих хлоридов (по результатам ТГА после очистки количество наночастиц катализаторов снизилось до ~ 1.8%). Интересно, что по данным ПЭМ оставшиеся на поверхности ОСНТ наночастицы металлов заключены в оболочку из графитизированного углерода (рис. 1), что защитило их от действия хлора, но с другой стороны снизило их цитотоксичность. Благодаря новому способу очистки при высокой температуре также улучшилась графитизация нанотрубок, выросла их термостабильность.

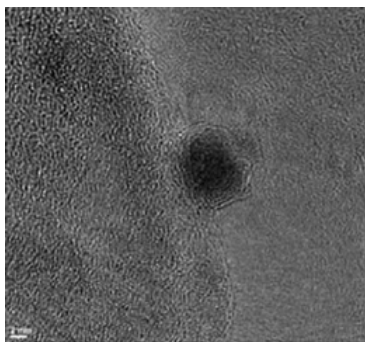


Рис. 1. Оставшаяся после очистки наночастица катализатора на поверхности ОСНТ заключена в оболочку из графитизированного углерода.

Полученные ОСНТ фторировали и модифицировали полиэтиленимином (ПЭИ) – синтезировали конъюгат ОСНТ–ПЭИ. ПЭИ является одним из лучших полимеров, улучшающих растворимость, дисперсность, биосовместимость ОСНТ и конъюгатов на их основе. В предыдущей работе ученые показали, что к ОСНТ–ПЭИ можно присоединить достаточное количество лекарства (аналога гемцитабина, основного препарата в химиотерапии рака

поджелудочной железы), а затем выделить его с помощью ультразвуковой обработки [4].

Рак поджелудочной железы – одно из самых распространенных и самых опасных онкологических заболеваний. Целевая доставка гемцитабина может повысить эффективность химиотерапии. Известно, что наночастицы с лекарством не в состоянии преодолеть биологический барьер здоровых кровеносных сосудов – существующие поры слишком малы (рис. 2а). Однако вокруг раковых клеток биологические барьеры меняются, появляются поры большего размера, и это можно использовать для доставки препаратов (рис. 2б). Целью работы [3] было не только создание нетоксичных ОСНТ–ПЭИ, но и изучение возможности преодоления барьера вокруг раковых клеток.

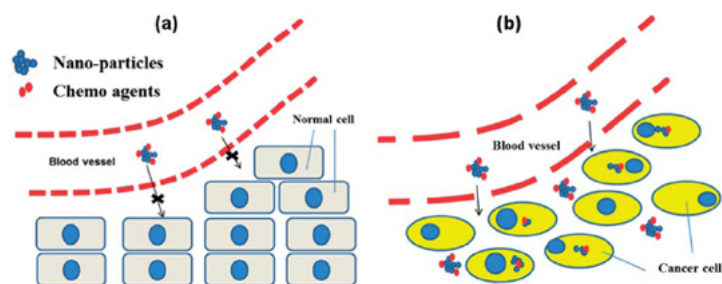


Рис. 2. Эндотелиальные клетки, выстилающие кровеносные сосуды, имеют поры. Лекарства с наночастицами не могут проникнуть через малые поры нормальных сосудов (а), но при появлении раковых клеток поры увеличиваются, и лекарства могут быть доставлены в раковые клетки (б).

Цитотоксичность ОСНТ–ПЭИ проверили *in vitro* (на клетках рака поджелудочной железы человека линии ВхРС-3 и нормальных эпителиальных клетках поджелудочной железы человека линии HPNE) и *in vivo* (ВхРС-3) на мышах. Авторы [3] выяснили, что токсичность ОСНТ–ПЭИ зависит от молекулярной массы ПЭИ и нашли оптимальный вариант ОСНТ–ПЭИ (1800 ДА)*, сочетающий низкую токсичность (рис. 3) и хорошую дисперсность.

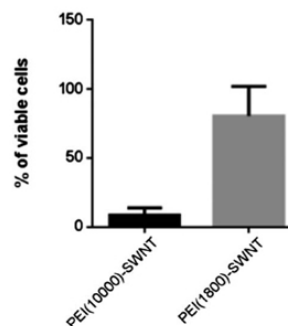


Рис. 3. Оценка жизнеспособности клеток ВхРС-3 (%) при воздействии конъюгата ОСНТ–ПЭИ с разной молекулярной массой.

Далее авторы проверили способность синтезированной “пули” пробить барьер вокруг раковой клетки. Изображения, полученные с помощью лазерной конфокальной микроскопии, показали, что

ОСНТ–ПЭИ (1800 ДА) проникают и в цитоплазму, и в ядра раковых клеток поджелудочной железы (рис. 4).

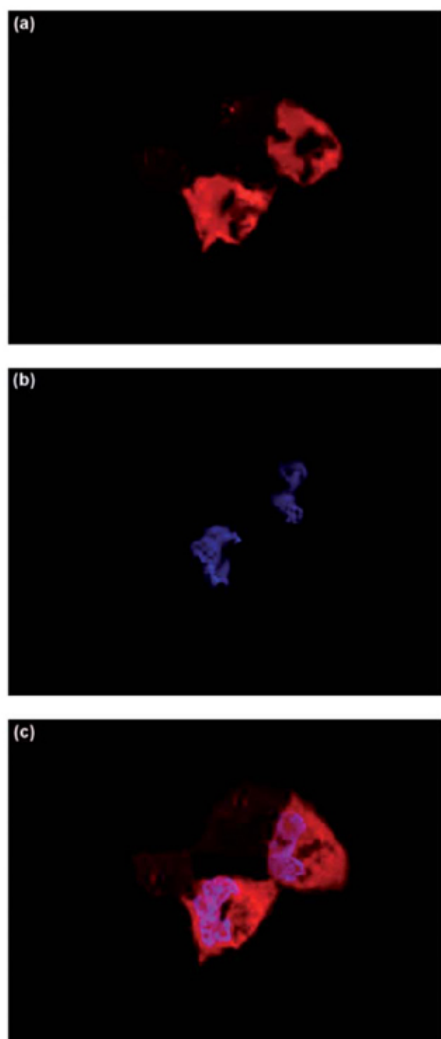


Рис. 4. Результаты исследований с использованием лазерной конфокальной микроскопии: а – раковые клетки, окрашенные родамином В, который был ковалентно присоединен к ОСНТ–ПЭИ (1800 ДА); б – клеточные ядра, окрашенные DAPI; с – суперпозиция двух изображений (а) и (б).

В дальнейшем ученым предстоит объединить результаты работ [3,4] и доказать, что эффективные нетоксичные “пули” могут и доставить лекарство, и выделить его в нужной клетке.

О. Алексеева

* – ДА (DA) – акроним для названия одного из режимов химиотерапии при остром миелоидном лейкозе, сочетающего применение даунорубицина (Daunorubicin) (3 дня) и цитарабина (Ara-C) (7 дней).

1. [Перст 17, вып. 13/14, с.6 \(2010\).](#)
2. [Перст 18, вып. 4, с.6 \(2011\).](#)
3. E.Andreoli et al., J. Mater. Chem. B 2, 4740 (2014).
4. E.Dillon et al., J. Mater. Chem. B 1, 1461 (2013).

ТОРЖЕСТВО

Нобелевская премия 2014



Лауреатами Нобелевской премии в области физики в 2014 г. стали японские ученые Исаму Акасаки (Isamu Akasaki), Хироши Аmano (Hiroshi Amano) и Сюдзи Накамура (Shuji Nakamura). Премия присуждена им “за

изобретение эффективных синих светодиодов, которые позволили создать яркие и энергосберегающие источники белого света”, - говорится в пресс-релизе Нобелевского комитета Королевской шведской академии наук.

Исаму Акасаки (1929 г.р.) - профессор Нагойского университета с 1964 г. Хироши Аmano (1960 г.р.) работает в Нагойском университете и университете Мэйдзи. Сюдзи Накамура родился в Японии в 1954 г., в настоящее время является гражданином США и работает в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре.

Работы ученых позволили создать и начать в начале 1990-х годов коммерческое использование синих светодиодов. Существовавшие до тех пор красные и зеленые диоды не позволяли в комбинации воспроизвести все оттенки цветовой гаммы, в том числе дать свет, воспринимаемый человеческим глазом как белый. Изобретение же синего светодиода на основе нитрида галлия позволило в дальнейшем улучшить качество и объем информации, которую можно разместить на единицу площади компактных дисков, создать LED-экраны телевизоров, экраны смартфонов, светодиодные проекторы и фонарики и что наиболее актуально повсеместно внедрить энергосберегающие светодиодные осветительные лампы, которые стали альтернативой традиционным источникам света.

Нобелевская премия по химии за 2014 г. присуждена американским ученым Эрику Бетцигу (Eric Betzig), Уильяму Морнеру (William E. Moerner) и немцу Штефану Хеллю (Stefan W. Hell) “за создание высокоразрешающей флуоресцентной микроскопии”, благодаря которой стало возможно изучать строение разных объектов на очень малых масштабах с рекордно высоким разрешением.

Эрик Бетциг (1960 г.р.) возглавляет исследовательскую группу в Медицинском институте Говарда Хьюза (шт. Мэриленд). Уильям Мёрнер (1953 г.р.) возглавляет химический факультет Стэндфордского университета. Штефан Хелль (1962 г.р.) является директором Института М. Планка по биофизической химии и главой отдела в Немецком центре по изучению рака.

Границу разрешения или физический предел для максимального разрешения в традиционной оптической микроскопии предсказал в 1873 г. Эрнст

Перст, 2014, том 21, выпуск 19

Аббе, он составляет 0.2 мкм. Лауреаты обошли эту границу разрешения с использованием флуоресцентных молекул, в результате чего их работа подняла световую микроскопию на уровень наноразмеров и позволила вести наблюдение через микроскоп за предметами с размерами около 10 нм. С помощью флуоресцентной микроскопии можно, в частности, изучать живые клетки и процессы внутри них в реальном времени, устанавливать структуру отдельных живых клеток и молекул в них, что важно с точки зрения создания новых лекарств.

КОНФЕРЕНЦИИ

XIX Симпозиум

**“Нанопизика и нанозлектроника”,
10 - 14 марта 2015 г.,
Нижний Новгород, Россия**

Формат симпозиума, официальные языки

Предполагается заслушать около 50 приглашенных докладов по ключевым разделам программы и около 100 устных сообщений, отобранных Программным комитетом. Стенды будут основной формой представления докладов на Симпозиуме (около 200 докладов).

Основной язык Симпозиума — русский, возможно представление докладов на английском языке. В связи с участием в Симпозиуме зарубежных ученых рекомендуется докладчикам приводить иллюстрации на английском языке.

Основные разделы программы

1. Сверхпроводящие наносистемы
2. Магнитные наноструктуры
3. Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования
4. Зондовая микроскопия: измерения и технологии атомарного и нанометрового масштаба
5. Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

Важные даты

03.11.2014 Регистрация, представление тезисов докладов

19.01.2015 Представление материалов для публикации в сборнике

02.03.2015 Представление статей для публикаций в журналах

Контакты

Андрей Леонидович Панкратов, Елена Сергеевна Мотова, Зорина Марина Владимировна

тел: (831) 417-94-86+155, (831) 417-94-65,
(831) 417-94-76+122

факс: (831) 417-94-64,

e-mail: symp@nanosymp.ru

Сайт: nanosymp.ru

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, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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