

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Спиральное куперовское спаривание в дираковском топологическом сверхпроводнике

Во всех известных сверхпроводниках (включая купраты, пниктиды, тяжелофермионные соединения и пр.) куперовские пары образованы электронами с противоположными импульсами ($\pm k$), причем состояние с определенным импульсом может быть занято как электроном со спином “вверх”, так и электроном со спином “вниз”. Совершенно другая картина имеет место в газе дираковских фермионов на поверхности топологического диэлектрика: здесь направление спина электрона “привязано” к направлению его импульса. Например, у электрона с импульсом k спин может быть направлен только “вверх”, а у электрона с импульсом $-k$ – только “вниз”, то есть спин “отслеживает” направление импульса, поворачиваясь вместе с ним как бы по спирали. Теория предсказывает, что такие “спин-спиральные” электроны могут объединяться в куперовские пары (спиральное куперовское спаривание, рис. 1).

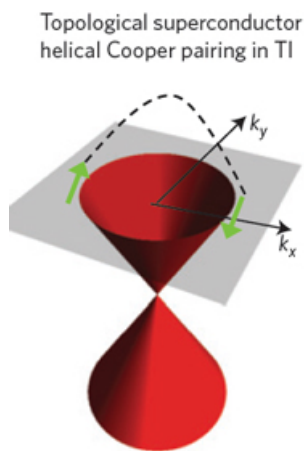


Рис. 1. Иллюстрация спирального куперовского спаривания. Стрелки показывают направление поляризации электронных спинов на уровне Ферми.

Спиральные топологические сверхпроводники представляют интерес и для фундаментальной физики (низкоэнергетический вариант майорановских фермионов, которые никак не удается обнаружить в экспериментах с элементарными частицами), и для приложений (квантовые компьютеры с топологическими кубитами). Остается “только” найти эти экзотические сверхпроводники. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные пока выглядят неубедительными.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные пока выглядят неубедительными.

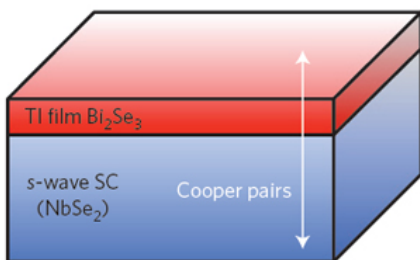


Рис. 2. Ультратонкая (≈ 3 нм) пленка топологического диэлектрика Bi_2Se_3 , выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности монокристалла s -волнового сверхпроводника 2H-NbSe_2 с $T_c = 7.2$ К.

В работе [1] (США, Тайвань) представлены результаты исследования гетероструктур $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NbSe}_2$ (рис. 2) методом фотоэмиссионной спектроскопии с разрешением не только по углам (ARPES), но и по спинам. Сверхпроводимость топологического диэлектрика Bi_2Se_3 индуцируется за счет эффекта близости к сверхпроводнику NbSe_2 . Продемонстрирован спиральный характер дираковских поверхностных состояний в Bi_2Se_3 (рис. 3).

И далее ...

- 2 Неравновесная структура $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ подозревается в комнатнотемпературной сверхпроводимости
 - 3 Андреевские связанные состояния в k -(BEDT-TTF) $_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ как признак фазы Фулде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова
- Почему у монослоя FeSe на подложке SrTiO_3 такая высокая T_c ?

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 3 Низкоомные контакты для транзисторов с ультратонкими каналами MoS_2

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Из углеродных нанотрубок можно сделать транспортные каналы в клеточных мембранах
- 6 Спицевая конструкция молекулярного колеса

ОБЗОРЫ

- 6 “Мультиферроики спинового происхождения”

КОНФЕРЕНЦИИ

- 7 23rd International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, June 22-26, 2015, Saint Petersburg, Russia

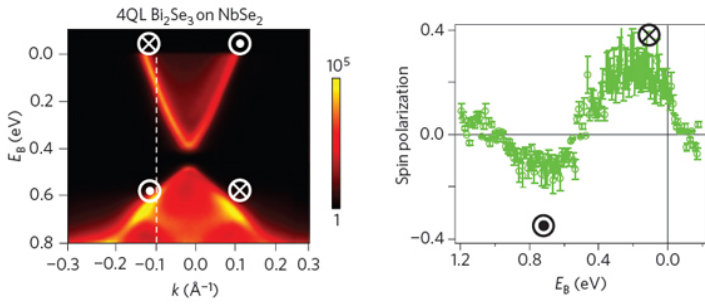


Рис. 3. Слева – дисперсия квазичастиц в пленке Bi_2Se_3 по данным ARPES. Белые кружки и крестики схематически показывают экспериментально определенное направление спиновой текстуры на поверхности пленки. Справа – данные ARPES с разрешением по спинам для зависимости спиновой поляризации от энергии при импульсе, отмеченном слева белой пунктирной линией.

При низких (1÷4 К) температурах наблюдались четко выраженные когерентные пики и почти изотропная сверхпроводящая щель, уменьшающаяся по мере нагревания до 7 К. Экспериментальные данные по угловой зависимости щели согласуются с модельными расчетами для $(p_x \pm ip_y)$ -волнового параметра сверхпроводящего порядка (рис. 4), что подтверждает спиральную природу куперовского спаривания в Bi_2Se_3 .

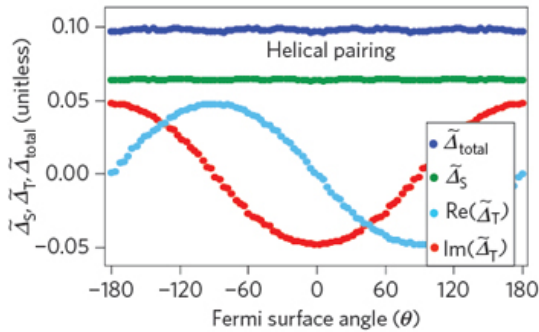


Рис. 4. Результаты модельных расчетов угловой зависимости параметра сверхпроводящего порядка Δ в пленке Bi_2Se_3 (Δ_S – синглетная компонента, Δ_T – триплетная компонента).

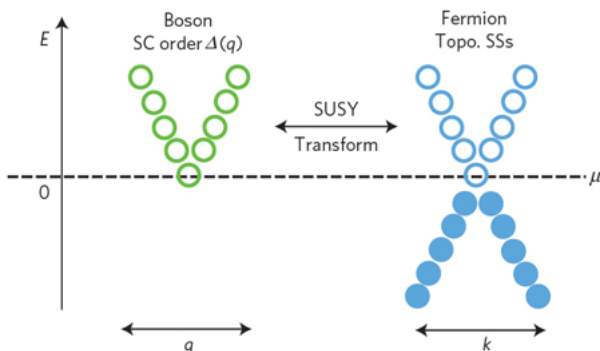


Рис. 5. Иллюстрация предполагаемой фермион-бозонной суперсимметрии в топологических дираковских сверхпроводниках.

В дальнейшем представляет интерес проверить наличие в топологических сверхпроводниках предсказанной теоретиками суперсимметрии, проявляющейся в данном случае как симметрия между

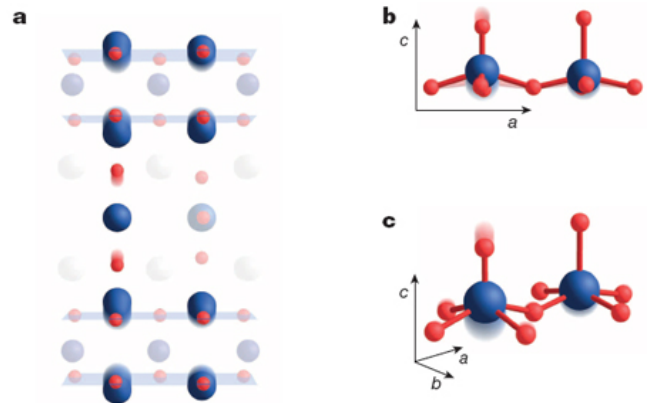
топологическими поверхностными состояниями (фермионными возбуждениями) и флуктуациями сверхпроводящего параметра порядка (бозонными возбуждениями). Следствиями такой симметрии должна быть одинаковая величина характерной скорости элементарных возбуждений и их собственной энергии (времени жизни), см. рис. 5. В физике элементарных частиц суперсимметричные партнеры элементарных частиц ни разу не наблюдались. Может, повезет твердотельщикам?

Л.Опенев

I. S.-Y. Xu et al., Nature Phys. 10, 943 (2014).

Неравновесная структура $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ подозревается в комнатнотемпературной сверхпроводимости

Терагерцовые оптические импульсы индуцируют в недодопированном купратном ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ с $T_c \approx 50$ К неравновесное состояние, в котором даже при комнатной температуре наблюдается когерентный межслоевой транспорт, сильно напоминающий сверхпроводимость [1, 2]. Чтобы понять причину такого необычного эффекта, авторы статьи [3] (Германия, Франция, Швейцария, США, Великобритания) изучили структуру этого экзотического состояния с помощью фемтосекундной рентгеновской дифракции (см. рис.).



Структура неравновесного состояния $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$

Они обнаружили, что нелинейные возбуждения решетки приводят к уменьшению расстояния между парами слоев CuO_2 , увеличению расстояния между слоями CuO_2 в каждой паре и изгибу связи $\text{O}-\text{Cu}-\text{O}$ в каждом слое. Численные расчеты в рамках теории функционала плотности показали, что незначительные, на первый взгляд, изменения кристаллической структуры приводят к довольно сильному изменению структуры электронной. В частности, возрастает вклад $3d$ -орбиталей меди типа x^2-y^2 в плотность электронных состояний на уровне Ферми, что, по мнению авторов, и способствует сверхпроводимости.

Л.Опенев

I. S.Kaiser et al., Phys. Rev. B 89, 184516 (2014).

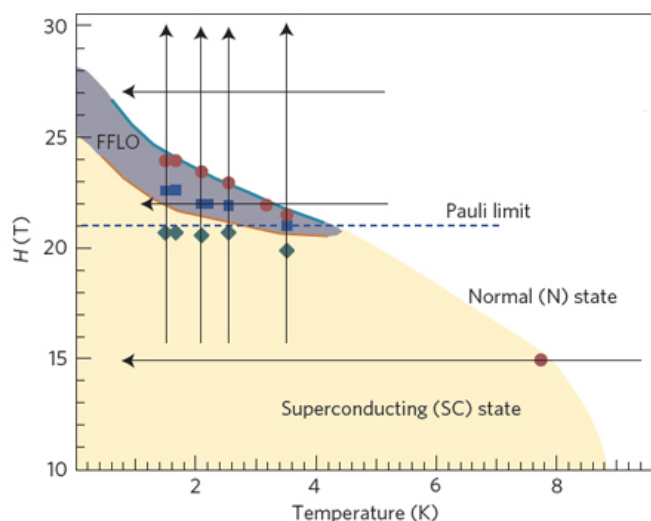
2. W.Hu et al., Nature Mater. 13, 705 (2014).

3. R.Mankowsky et al., Nature 516, 71 (2014).

ПерсТ, 2014, том 21, выпуск 23

Андреевские связанные состояния в $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$ как признак фазы Фулде-Феррела-Ларкина-Овчинникова

В сверхпроводниках с синглетным типом спаривания куперовские пары образованы электронами с противоположными импульсами и спинами, так что суммарный импульс каждой пары равен нулю. Очень сильные (близкие к H_{c2}) магнитные поля индуцируют разбаланс числа электронов со спинами “вверх” и “вниз”, в результате чего возникает экзотическая фаза Фулде-Феррела-Ларкина-Овчинникова (ФФЛО) с конечным импульсом куперовских пар и чередованием “нормальных” областей со “сверхпроводящими”. Эта фаза была предсказана давно, но неоспоримых экспериментальных свидетельств ее существования найти долго не удавалось. В работе [1] (Франция, Япония, США) при исследовании ЯМР-спектров органического сверхпроводника $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$ (см. рис.) обнаружены топологические андреевские связанные состояния, образованные спин-поляризованными пространственнолокализованными квазичастицами, что авторы считают верным признаком ФФЛО-фазы.



Фазовая диаграмма $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$

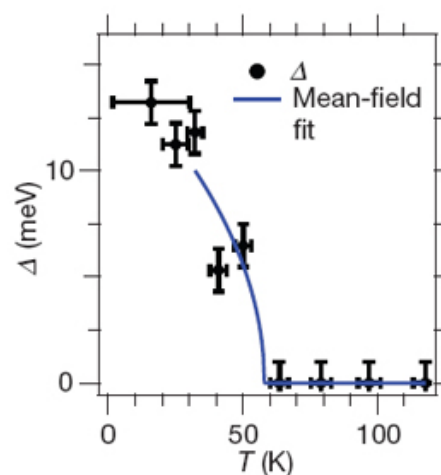
Л. Опенов

1. H. Mayaffre et al., *Nature Phys.* **10**, 928 (2014).

Почему у монослоя FeSe на подложке SrTiO₃ такая высокая T_c?

Критическая температура T_c объемных образцов безмедного ВТСП FeSe очень низкая, $T_c \approx 8$ К, а в монослое FeSe на подложке SrTiO₃ достигает почти 70 К [1] (рекорд для селенидов/пниктидов железа). Чтобы разобраться в причинах такой “аномалии”, авторы работы [2] (США, Канада) изучили ARPES-спектры этих тончайших пленок. Они обнаружили в их электронной структуре необычные “зоны-копии”, обязанные своим происхождением взаимодействию электронов с оптическими фононами подложки. О чем это говорит? Мнения разделились:

одни считают, что фононы просто усиливают основное (электронное) спаривающее взаимодействие, а другие – что механизм сверхпроводимости FeSe – чисто фононный (к слову сказать, константа электрон-фононного взаимодействия достаточно велика, $\lambda \approx 0.5$, а сверхпроводящая щель почти изотропна на всей поверхности Ферми). Так или иначе, эксперименты с монослоями FeSe/SrTiO₃ подсказывают путь дальнейшего кардинального увеличения их критической температуры: для “сэндвичей” SrTiO₃/FeSe/SrTiO₃ оценка дает рост T_c в 2.5 раза – значительно выше точки кипения жидкого азота.



Температурная зависимость сверхпроводящей щели Δ в монослое FeSe/SrTiO₃ ($\Delta=0$ при $T = 58 \pm 7$ К).

Л. Опенов

1. D.F. Liu et al., *Nature Commun.* **3**, 931 (2012).

2. J.J. Lee et al., *Nature* **515**, 245 (2014).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Низкоомные контакты для транзисторов с ультратонкими каналами MoS₂

Дисульфид молибдена MoS₂ привлекает внимание разработчиков нанoeлектронных устройств как материал, из которого можно изготавливать ультратонкие (1÷10 слоев) каналы полевых транзисторов. Основным препятствием здесь является большое контактное сопротивление $R_c \cdot W = (1 \div 10)$ кОм·мкм (W – ширина канала) из-за высокого барьера Шоттки, формирующегося на границе раздела полупроводник (MoS₂)/металл (как правило, Au) и препятствующего движению носителей заряда. Обычные методы понижения $R_c \cdot W$ (легирование, химическая модификация) не годятся из-за чрезвычайно малой толщины таких каналов.

В работе [1] предложен нестандартный путь решения проблемы. Авторы [1] использовали факт наличия у MoS₂ двух кристаллических фаз: не только полупроводниковой (2H), но еще и металлической (1T), различающихся типом упаковки атомов и получающихся одна из другой поворотом октаэдров MoS₆ на 60° (рис. 1). Края полупроводникового канала обрабатывали раствором литийорганического

соединения, индуцируя тем самым структурный переход $2H \rightarrow 1T$, и к этим (уже металлическим) краям подводили электроды (рис. 2).

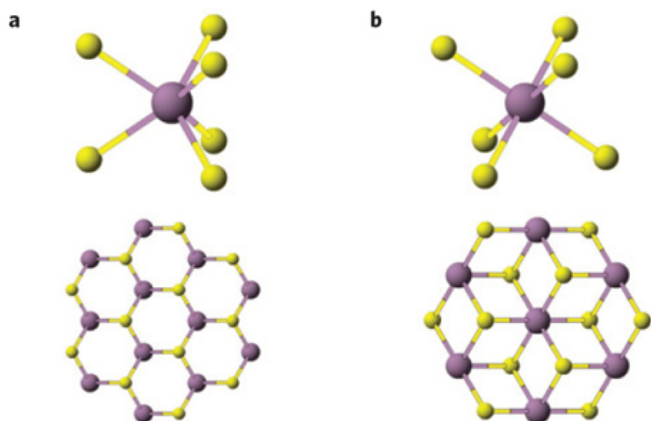


Рис. 1. Полупроводниковая 2H (a) и металлическая 1T (b) фазы MoS_2 .

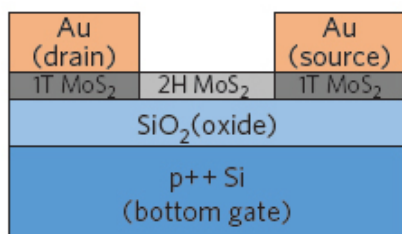


Рис. 2. Схематическое изображение устройства.

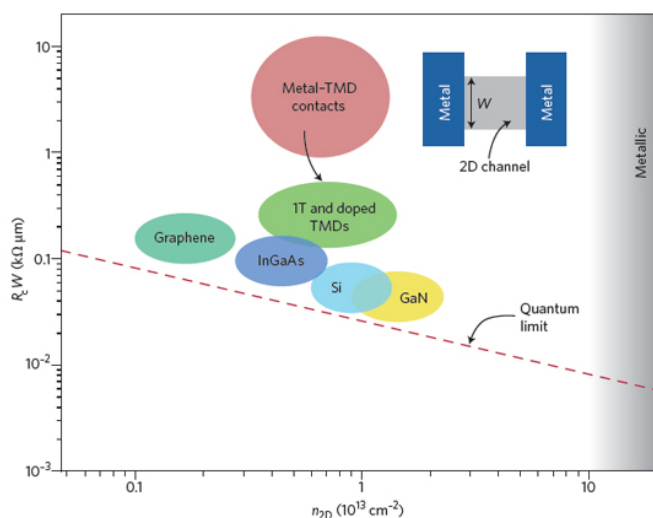


Рис. 3. Контактное сопротивление различных полупроводниковых материалов (n_{2D} – концентрация носителей заряда в слое, TMD – дихалькогениды переходных металлов, пунктирная линия – теоретический квантовый предел).

В итоге величина $R_c \cdot W$ составила всего $(0.2 \div 0.3)$ $k\Omega \cdot \mu m$, и транзисторы имели отличные характеристики, включая большое $(> 10^7)$ отношение токов в открытом и закрытом состояниях, высокую подвижность $\sim 50 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ и пр. У других полупроводниковых дихалькогенидов переходных металлов тоже имеются металлические структурные модификации, поэтому развитая в [1] методика применима и к ним. Заметим, однако, что достигнутые в [1] ве-

личины $R_c \cdot W$ еще довольно далеки от теоретического квантового предела (рис. 3), поэтому не стоит на этом останавливаться.

I. R.Kappera et al., Nature Mater. 13, 1128 (2014).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Из углеродных нанотрубок можно сделать транспортные каналы в клеточных мембранах

Клеточная мембрана отделяет содержимое живой клетки от внешней среды и обеспечивает ее целостность. Но, конечно, в клетку должны поступать вещества, необходимые для жизни (сахара, аминокислоты, ионы). Липидный бислой мембраны для них непроницаем, и транспорт обеспечивают специальные белки, образующие каналы. Ученые давно искали способы создания синтетических аналогов биологических каналов. Нанопоры нужных размеров получить можно, но они не обеспечивают эффективный и селективный перенос молекул и ионов. Исследователи из США и Испании предположили, что для этой цели идеально подойдут одностенные углеродные нанотрубки (ОСНТ) [1]. Действительно, ОСНТ имеют очень маленький внутренний диаметр, обладают отличными транспортными свойствами, могут проникать через липидные мембраны и клеточные стенки (см. ПерсТ [2]).

Используя ультразвуковую обработку, авторы [1] синтезировали узкие короткие ОСНТ, покрытые молекулами липидов (внутренний диаметр $\sim 1.5 \text{ nm}$, длина $5-15 \text{ nm}$). На крио-ТЕМ изображениях видно, что УНТ-порины (так их назвали по аналогии с аквапориными*) спонтанно внедряются в липидные бислой липосом** и образуют там каналы (рис. 1). При этом целостность липидного бислоя сохраняется. Интересно, что хотя толщина бислоя около 5 nm , встраиваются и УНТ большей длины (практически все перпендикулярно к мембране, отклонения не больше 15°).

Для исследования транспорта через УНТ порины липосомы с водой помещали в растворы $NaCl$ и K_2SO_4 . Методом динамического рассеяния света измеряли размеры частиц. Размеры контрольных липосом изменялись очень мало ($< 2\%$), а сокращение размера липосом с УНТ поринами достигало 20% , причем максимальное изменение наблюдали при минимальной ионной силе раствора. Авторы объясняют это тем, что при $pH 7.0$ карбоксильные группы на входе в УНТ порин создают барьер, который не пропускает анионы внутрь, но вода свободно выходит, и липосома сжимается. При высокой ионной силе раствора заряды на входе в УНТ порин экранируются, и ионы проходят в липосому.

Измерения проводимости отдельного канала показали, что она линейно зависит от концентрации соли как при нейтральном pH , так и при $pH 2$.

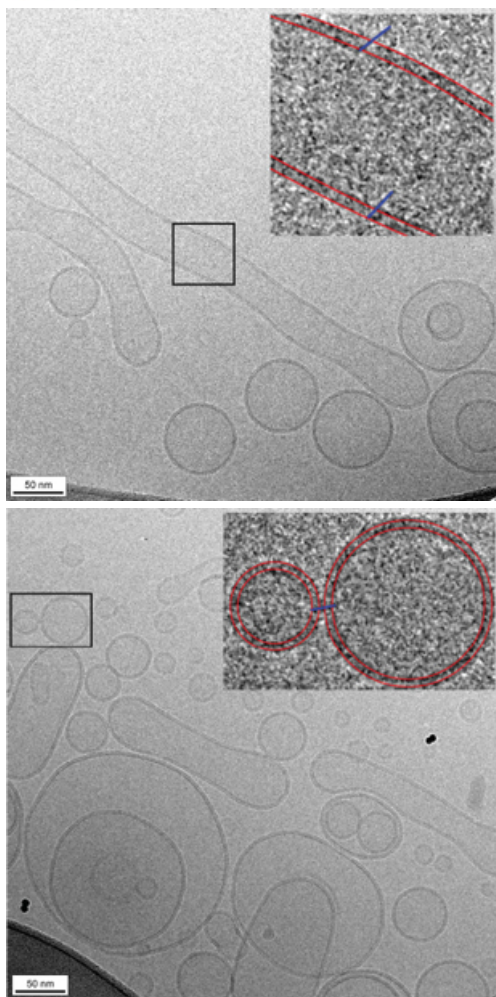
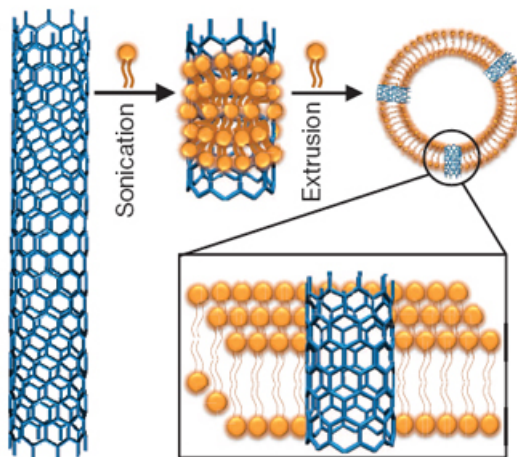


Рис.1. Схема синтеза УНТ-поринов и формирования каналов в липосомах. Справа – крио-ТЕМ изображения комплексов УНТ-липосомы. Красным выделены липидные бислои, голубым – УНТ порины.

Схема измерений приведена на рис. 2. Авторы сделали вывод, что доминирующим механизмом транспорта через УНТ порины является ионный. Наблюдаемые в ряде случаев осцилляции проводимости похожи на “gating” поведение биологических ионных каналов (открытие-закрывание затвора). Конечно, в отличие от белков, у УНТ поринов не может быть конформационных изменений. Требуется дальнейшее изучение природы проводимости.

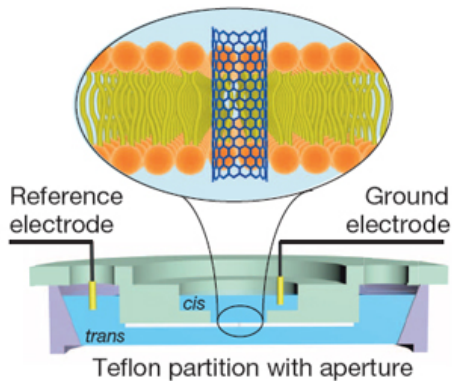


Рис. 2. Установка для измерения проводимости отдельного УНТ порина.

Эксперименты показали, что через УНТ порины осуществляется транспорт не только воды, протонов и небольших ионов, но даже ДНК (рис. 3). После прохождения ДНК наблюдали быструю блокаду канала. Скорость переноса примерно 1.5 нуклеотида за 1 мсек, т.е. близко к величине для биологических нанопор.

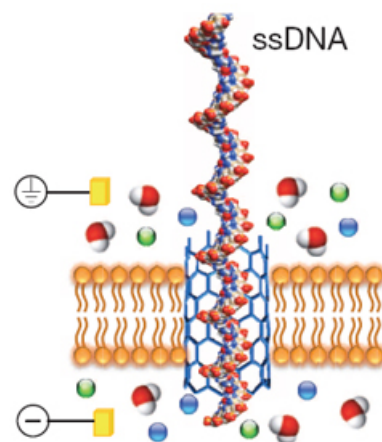


Рис. 3. Схема транслокации ДНК через УНТ порин в липидном бислое.

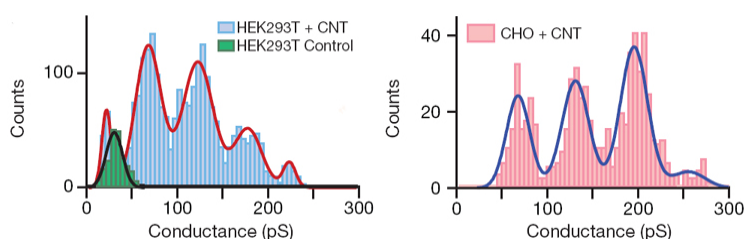


Рис. 4. Гистограмма проводимости при внедрении УНТ порина в живые клетки HEK293Т (слева) и СНО (справа). Проводимость природного канала в HEK293Т (~ 30 пСм) показана зеленым цветом. В контрольном образце СНО без УНТ поринов каналы не активны.

Дальнейшие эксперименты [1] с использованием метода локальной фиксации потенциала (patch clamp) продемонстрировали, что УНТ порины спонтанно встраиваются в мембраны живых клеток СНО и HEK293Т. Через 60-90 мсек после установления плотного контакта между клеткой и микропипеткой с УНТ поринами была зарегистрирована активность

каналов (унитарная проводимость ~ 70 пСм и кратные величины) (рис. 4).

УНТ порыны могут в дальнейшем найти разнообразные применения, например, в качестве компонентов синтетических клеток, для доставки лекарств, при создании новых биосенсоров, для изучения транспорта в биологических каналах. Они обладают стойкостью в различных химических и биологических условиях и исключительной биосовместимостью. Авторы полагают, что УНТ порыны можно дополнительно модифицировать, создав синтетические “ворота” для контролируемого изменения их селективности.

*Аквапорины – мембранные белки, формирующие поры. Избирательно пропускают молекулы воды.

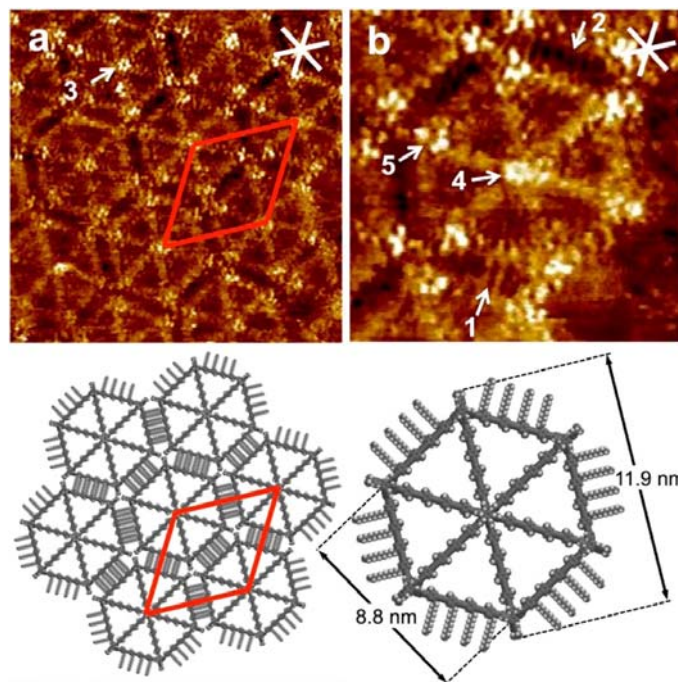
**Липосомы – пузырьки с жидкостью, которые самопроизвольно образуются в смесях фосфолипидов с водой. Стенки состоят из липидных бислоев, по составу сходных с природными мембранами клеток. Липосомы широко применяются в научных исследованиях.

О.Алексеева

1. J.Geng et al., *Nature* **514**, 612 (2014).
2. [ПерсТ 16, вып. 9, с. 6 \(2009\)](#).

Спицевая конструкция молекулярного колеса

Исследователи из Германии [1] сообщают об успешном получении из различных углеводородных олигомеров интересных представителей наномира – макромолекул, названных молекулярными спицевыми колесами. Хотя на колеса эти структуры похожи с большой натяжкой, скорее – шестиугольные со спицами (см. рис.). Линейные размеры углеродных шестиугольников оказались достаточно внушительными: 12 нм по диагонали и около 9 нм между сторонами (“ободами колеса”), а химическая формула и вовсе “тяжеловесной” – $C_{1878}H_{2682}$. Для идентификации молекулярной структуры и контроля роста авторы использовали сканирующую туннельную микроскопию. В результате оказалось, что на границе раздела каприловой кислоты и высокоориентированного пиролитического графита запускается механизм самосборки, что приводит к объединению отдельных “колес” в ансамбли и образованию двумерного кристалла (см. рис.). Будем надеяться, что авторы не остановятся на достигнутом и распространят успешно апробированную методику синтеза на более широкий класс систем за счет использования различных исходных компонентов. Немного пофантазировав, можно представить, что за наноколесами и наномоторами последуют нанорама, нано-амортизаторы, рулевое управление, и наступит новая эра – эра наноавтомобилей. Осталось выяснить, кто же сядет в кресло водителя?



Изображения, полученные с помощью сканирующей туннельной микроскопии (сверху), и молекулярные структуры (снизу) ансамбля спицевых колес (а) и изолированного колеса (б).

М.Маслов

- I. R. May et al., *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 16732 (2014).

ОБЗОРЫ

“Мультиферроики спицевого происхождения”

Так называется обзор японских ученых из Института физических и химических исследований (RIKEN) в журнале *Reports on Progress in Physics* [1]. Обзоры, посвященные магнитным сегнетоэлектрикам (мультиферроикам), публикуются с завидной регулярностью, так что, берясь за написание нового, автор должен продумать, чем же его творение будет отличаться от множества предыдущих.

Коньком авторов являются микроскопические механизмы, приводящие к образованию электрической поляризации из магнитного упорядочения, т.е. речь идет о так называемых мультиферроиках второго рода [2], в которых, в отличие от мультиферроиков первого рода, электрическая поляризация существует независимо от магнитной структуры. Мультиферроики второго рода, в свою очередь, принято делить на два типа: “коллинеарные”, в которых электрическая поляризация спицевого происхождения обусловлена симметричным обменом Гейзенберга (рис. 1а), и “спиральные”, в которых спин-зависимые полярные смещения ионов являются следствием антисимметричного обмена Дзялошинского-Мории (рис. 1б).

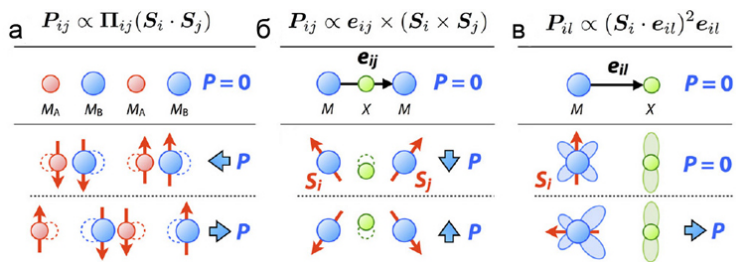


Рис. 1. Три основных механизма электрической поляризации спинового происхождения:
 а – обменно-стрикционный;
 б – взаимодействие Дзялошинского-Мории;
 в – $p-d$ гибридизация (в формулах S_i – спины ионов, e_{ij} – направления ковалентных связей).

Хотя давно уже было ясно, что не все так просто, и в мультиферроиках с неколлинеарными спинами может реализоваться первый механизм (см. ПерсТ [3]). В отличие от множества других работ, авторы [1] уходят от этой устаревшей дихотомии, добавив в число основных механизмов еще и третий – спин-зависимую $p-d$ гибридизацию (рис. 1в), которая не сводится к скалярному или векторному произведению спинов взаимодействующих магнитных ионов, просто потому, что согласно третьему сценарию среди действующих лиц остается только один магнитный ион. В этом случае в зависимости от ориентации его спина возникают изменения в ковалентной связи с p -ионом лиганда (рис. 1в), вызывающие перераспределение заряда и электрическую поляризацию (на важную роль $p-d$ гибридизации в образовании спин-зависимой поляризации ранее указывалось в [4]).

В обзоре также большое внимание уделено темам, появившимся относительно недавно – электроактивным спиновым возбуждениям (электромагнонам) и вихреобразным неоднородностям в распределении намагниченности (магнитным скирмионам), магнитоэлектрические свойства которых, кстати, в настоящее время объясняют именно третьим механизмом.

А. Пятаков

1. Y.Tokura et al., *Rep. Prog. Phys.* **77**, 076501 (2014).
2. D.Khomskii, *Physics* **2**, 20 (2009).
3. [ПерсТ 15, вып. 18, с. 4 \(2008\)](#).
4. A.S.Moskvin, S.-L.Drechsler, *Phys. Rev. B* **78**, 024102 (2008).

КОНФЕРЕНЦИИ

23rd International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, June 22-26, 2015, Saint Petersburg, Russia

The annual International Symposium on Nanostructures is chaired by two Nobel Prize laureates — Professor Zh. Alferov and Professor L. Esaki, and traditionally organized together with the Academic University, Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS, Foundation for Support of Education and Science (Alferov's Foundation) and Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, the institutions pioneering in many directions of this impetuously developing area. The Symposium was launched in 1993 by its Co-Chairs and was one of the first in the leading area in the modern physics and technology.

Topics:

- Technology of Nanostructures: Growth, Self-Organization and Nanopatterning
- Atomic-Scale Characterization of Nanostructures
- Electric, Magnetic and Optical Properties of Nanostructures (including Spin-Related Phenomena, Many Particle Effects, Infrared and THz Phenomena)
- Nanostructure Device Applications in Electronics, Spintronics and Computing
- Nanophotonics, Microcavity and Photonic Crystals: Properties, Characterization and Applications
- Emerging Materials in Nanostructures (including Semiconductors, Oxides, Metals, Ferromagnetics, Carbon-based, Polymer and Biomaterials)
- Nanostructures and Life Sciences
- Metamaterials

Abstract submission deadline - **February 2, 2015**.

Website: www.ioffe.ru/NANO2015

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