

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Электронные корреляции в оксопниктидах

В обычных низкотемпературных сверхпроводниках (например, простых металлах) характерная энергия межэлектронного кулоновского взаимодействия  $U$  меньше кинетической энергии электронов  $E_{kin}$ , поэтому последние можно в хорошем приближении рассматривать как свободные. В купратных ВТСП электронные корреляции, напротив, играют значительную роль, так что родительские недопированные соединения представляют собой моттовские диэлектрики. А какова роль корреляций в безмедных ВТСП? С одной стороны, соответствующие родительские материалы являются антиферромагнетиками, что вроде бы говорит о наличии в них достаточно сильных корреляций. Но, с другой стороны, они, в отличие от купратов, не диэлектрики, а металлы. Для количественного анализа корреляций в пниктидах  $LaFePO$  и  $BaFe_2As_2$  в работе [1] была измерена их оптическая проводимость  $\sigma(\omega)$ .

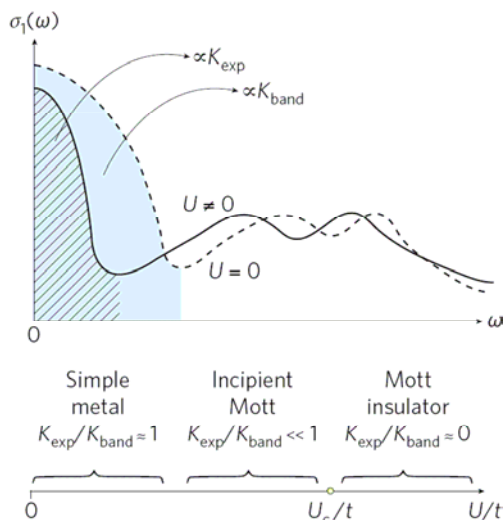


Рис.1. Частотные зависимости оптической проводимости  $\sigma(\omega)$  в отсутствие ( $U = 0$ ) и при наличии ( $U \neq 0$ ) кулоновского взаимодействия между электронами.

Интеграл  $K$  по частоте от друдевской части  $\sigma(\omega)$  пропорционален  $E_{kin}$ . Сравнивая экспериментальную величину  $K_{exp}$  со величиной  $K_{band}$ , полученной из расчетов зонной структуры (без учета межэлектронного взаимодействия), можно судить о силе корреляций, которые приводят к переносу спектрального веса  $\sigma(\omega)$  в область более высоких энергий ( $\sim U$ ), так в отсутствие взаимодействия  $K_{exp}/K_{band} = 1$ , а в предельном случае моттовского диэлектрика  $K_{exp}/K_{band} = 0$  (рис.1). Оказалось, что  $K_{exp}/K_{band} = 0.45$  в  $LaFePO$  и  $0.3$  в  $BaFe_2As_2$ , то есть не сильно отличается от  $K_{exp}/K_{band}$  в купратных ВТСП, тогда как в простых металлах это отношение, как и ожидалось, близко к единице (рис.2). Таким образом, несмотря на отсутствие фазы моттовского диэлектрика, электронные корреляции в пниктидах достаточно сильны и обязательно должны

И далее ...

2 Как плавится вихревая решетка

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

3 Есть два кубита на двойных квантовых точках!

Молекулярная логика  
на службе у  
медицинской диагностики

## СНОВА К ОСНОВАМ

4 Топологические диэлектрики

5 Как диффундируют атомы

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

5 Гибридная логика

## СПИНТРОНИКА

6 Спиново-инжекционный эффект Холла или электроны-слаломисты?

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

6 Атомный силовой микроскоп с наконечником из углеродной нанотрубки

7 Выделение одномерных углеродных цепочек из графенов

## КОНФЕРЕНЦИИ

8 International Conference on Superconductivity and Magnetism 2010 (ICSM2010), 25-30 April 2010, Antalya, Turkey

учитываться при разработке теории механизма их сверхпроводимости.

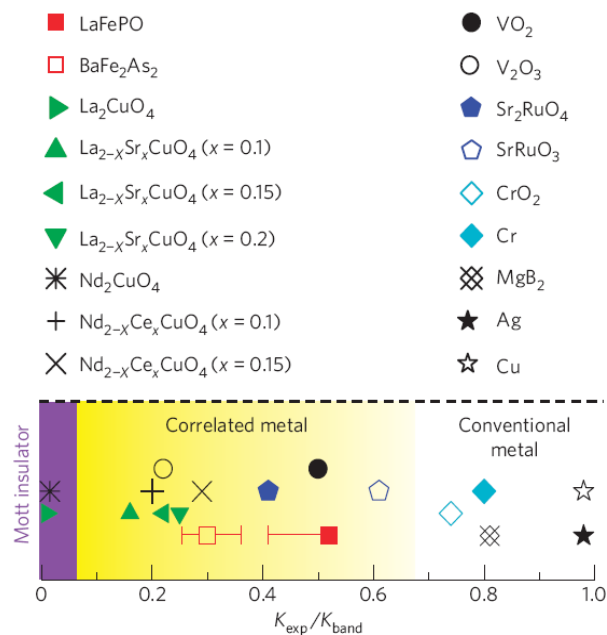


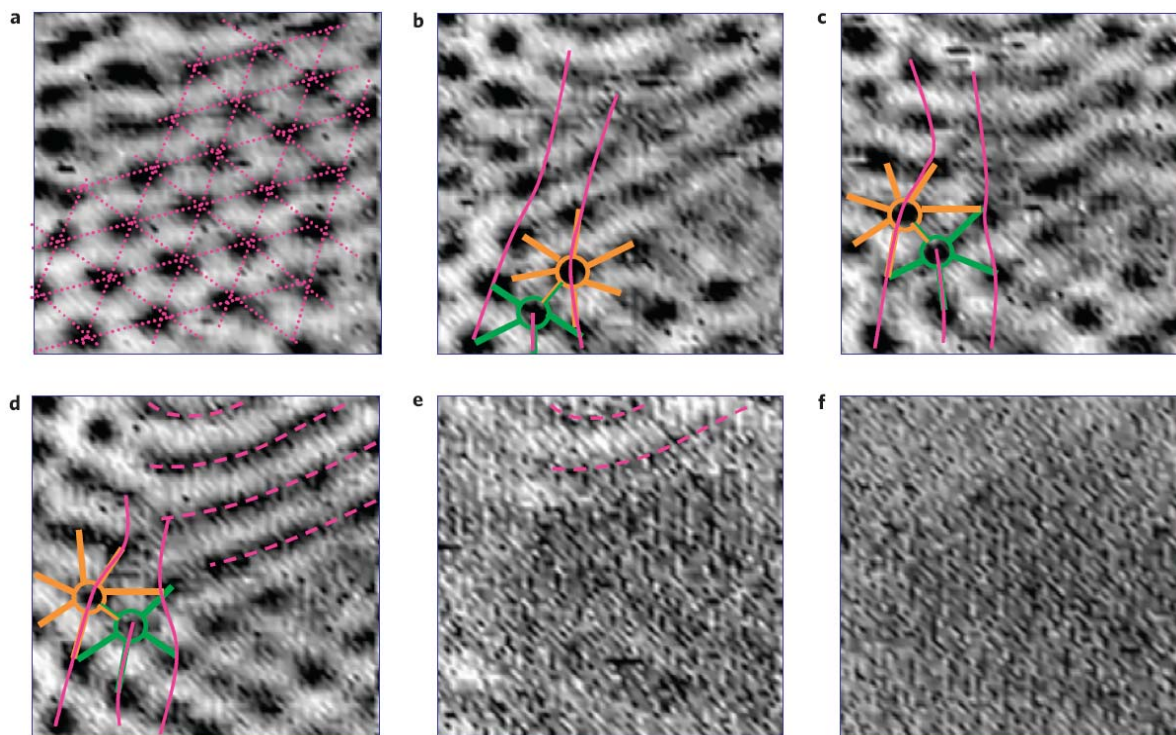
Рис.2. Отношение экспериментальной ( $K_{\text{exp}}$ ) и “зонной” ( $K_{\text{band}}$ ) кинетической энергии электронов в различных материалах.

Л.Опенев

1. *M.M.Quazilbash et al., Nature Phys. 5, 647 (2009).*

### Как плавится вихревая решетка

Известно, что при повышении температуры решетка магнитных вихрей в сверхпроводнике плавится. Обычно об этом судят по изменению таких макроскопических характеристик образца как намагниченность, а микроскопические детали процесса остаются за кадром. В работе [1] испанские физики из университетов Мадрида и Сарагосы представили результаты непосредственного наблюдения плавления вихревой решетки в аморфной тонкой пленке на основе вольфрама с  $T_c = 4.15$  К, которые они получили, используя сканирующую туннельную спектроскопию. На топографических изображениях одного и того же участка образца (см. рис.) хорошо видно, как при нагревании пленки решетка сначала становится все более и более разупорядоченной, затем вихри начинают сливаться, образуя вытянутые цепочки, а в заключение формируется изотропная вихревая жидкость. В [1] получено подтверждение теоретического положения об определяющей роли дислокаций (топологических дефектов) в плавлении вихревой решетки. Этот результат важен и для понимания особенностей плавления других двумерных систем, таких как вихри в пленках жидкого гелия и холодные атомы в оптических решетках.



Динамика плавления вихревой решетки при нагревании.  $H = 2$  Тл.  $T = 1.2$  К (a), 1.9 К (b), 2.0 К (c), 2.1 К (d), 2.8 К (e), 3.0 К (f). Линейные размеры участка сканирования равны 220 нм. Темные области – отдельные вихри (a, b, c) и линейные цепочки из слившихся вихрей (d и верхняя часть e).

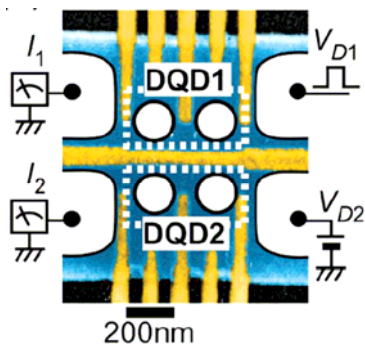
1. *I.Guillamon et al., Nature Phys. 5, 651 (2009).*

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Есть два кубита на двойных квантовых точках!

До сих пор, начиная с 2003 года, держится рекорд количества кубитов (7), установленный на квантовом компьютере фирмы IBM. Кубитами являлись разнообразные переходы в молекулах. Все молекулы работали как отдельные квантовые компьютеры. Поскольку молекул в пробирке было огромное количество, не составляло труда измерить их макроскопический отклик, т.е. считать результат вычислений. К сожалению, эти “жидкие” компьютеры представляли собой тупиковый путь развития. Несмотря на большое количество кубитов в сверхпроводниковом компьютере, представленном недавно фирмой D-Wave Systems, по единодушному мнению ученого сообщества этот компьютер работает в классическом режиме и не обладает преимуществами квантового компьютера. Что касается направлений, по которым просматривается создание квантового компьютера в будущем, то они пока могут “похвастать” только парой-тройкой кубитов.

До недавнего времени квантовые компьютеры на двойных квантовых точках отставали. Благодаря работе японских ученых [1] это отставание ликвидировано: есть 2 кубита. Двойные квантовые точки как перспективный элемент квантовых компьютеров были введены в обиход в работе российских физиков Л. Федичкина, М. Янченко и К. Валиева [2]. Двойная квантовая точка – это две квантовые точки с одним электроном, связанные туннельным образом. Двумя нижними собственными квантовыми состояниями являются симметричное и антисимметричное. Самое главное достоинство двойной квантовой точки состоит в том, что с помощью уменьшения туннельной связи можно добиться малой величины энергетической щели между этими состояниями. Как показано в работе [2], это приводит к существенному подавлению взаимодействия кубита с фононами.



Две двойные квантовые точки (DQD), сформированные полем затворов в двумерном электронном газе.

Структура с двумя двойными квантовыми точками представлена на рисунке. Сами точки “вырезаны” из двумерного электронного газа полем затворов и управляются потенциалами на затворах. Электроны в точках взаимодействуют друг с другом только

через прямое кулоновское взаимодействие. Обменное взаимодействие отсутствует, т.к. нет перекрытия волновых функций. Авторы доказали возможность выполнения с помощью таких кубитов некоторых квантовых логических операций, что, по их мнению, открывает перспективы создания компьютера с большим количеством кубитов.

Однако тут не стоит проявлять излишний оптимизм. Кулоновское взаимодействие нельзя никак отключить, поэтому в выполнении операции с двумя кубитами неизбежно будут вмешиваться соседние и все дело портить. Выход может быть найден в квантовом компьютере без перемещения заряда между квантовыми точками [3].

В.Вьюрков

1. G.Shinkai et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 056802 (2009).
2. L.Fedichkin, M.Yanchenko, K.A.Valiev, *Nanotechnology* **11**, 387 (2000).
3. S.Filippov, V.Vyurkov, L.Gorelik, *arXiv: quant-ph/0903.1056v2* (2009).

### Молекулярная логика на службе у медицинской диагностики

Стремительно развивающиеся системы, в основе которых лежит молекулярная логика, могут стать важнейшим инструментом медицинских исследований. Данное утверждение, несомненно, подтверждается результатами, представленными в работе [1]. Если допустить, что отклонение от нормы, обнаруженное во время медицинского обследования можно интерпретировать в терминах булевых функций, то потенциально, устройство, реализующее подобный механизм послужит основой для “умной” диагностики. Поставив перед собой данную задачу, авторы работы [1] на основе логических вентилей AND и INHIBIT (NOTIF) собрали систему, способную детектировать присутствие в образце, как комплекса белок-ДНК, так и отдельно белка.

Известно, что обструкция дыхательных путей у пациентов с хроническим обструктивным заболеванием легких или с бронхиальной астмой часто сопровождается бактериальными респираторными инфекциями, в частности *Haemophilus influenzae* (гемофильная палочка). Ответом организма в данном случае является выделение противовоспалительных цитокинов, таких как белок IL-8 (интерлейкин-8). Именно обнаружение бактериальной ДНК и белка IL-8 в рамках предложенной авторами модели, в основе которой лежит таблица истинности (рис. 1А) и простая функциональная схема (рис. 1Б) становится выполнимой несложной задачей. Результатом диагностики являются интенсивности  $Sy_3$ - и  $Sy_5$ -флуоресценции ( $Sy_3$ ,  $Sy_5$  – флуоресцентные цианиновые красители, наиболее часто используемые при изучении генов). Если в биологическом образце содержится комплекс ДНК-белок, то  $Sy_3$ -сигнальный зонд связывается с ДНК-мишенью (рис. 2А), а вто-

ричные антитела, свободные от ДНК-мишени, связываются с Су5-сигнальным зондом (рис. 2Б), и о присутствии комплекса ДНК-белок информирует Су3-сигнал (рис. 2В). Здесь авторы отмечают, что обнаружение характерной последовательности оснований ДНК с помощью предложенной ими системы возможно лишь в случае наличия IL-8. Белок в случае отсутствия ДНК-мишени идентифицируется по Су5-сигналу (рис. 2Г).

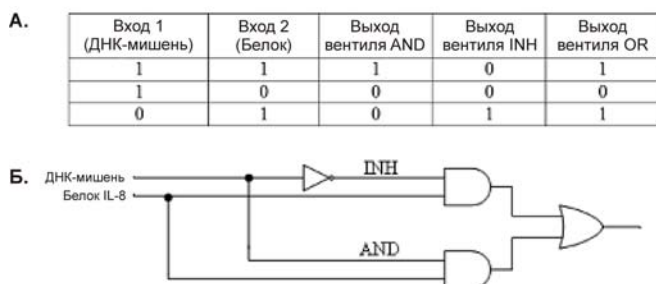


Рис. 1. Таблица истинности для логических вентилях (А). Функциональная модель на основе AND и INHIBIT логических вентилях (Б).

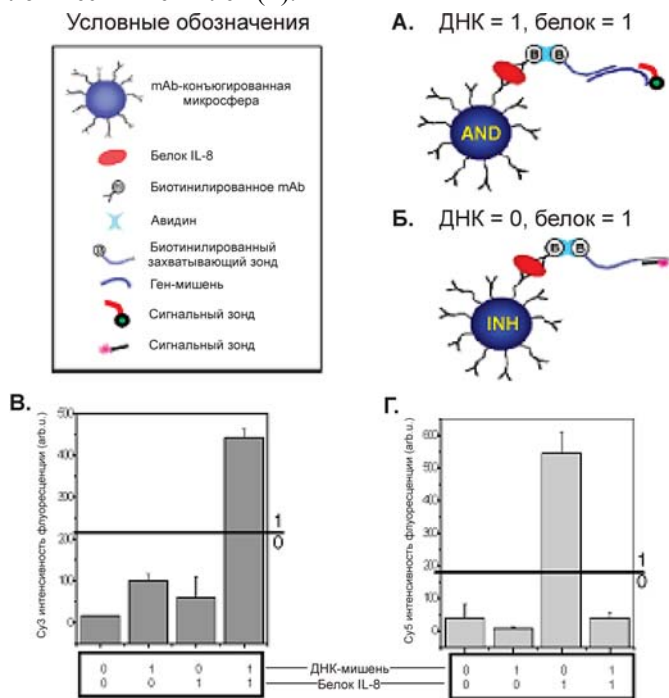


Рис. 2. Схематическая иллюстрация детектирования комплекса белок-ДНК (А) и только белка (Б) (mAb – моноклональное антитело). Усредненные интенсивности Су3- (В) и Су5-флуоресценции (Г) в зависимости от отсутствия (0) или присутствия (1) на “входе” диагностирующей системы ДНК-мишени или белка.

Подводя итог, можно сказать, что авторам удалось продемонстрировать возможность проведения медицинской диагностики с помощью решений на основе молекулярных логических вентилях. Что касается приложений данной методики, то предполагается ее использование для выявления различных патологических состояний организма в зависимости от сочетания диагностических маркеров.

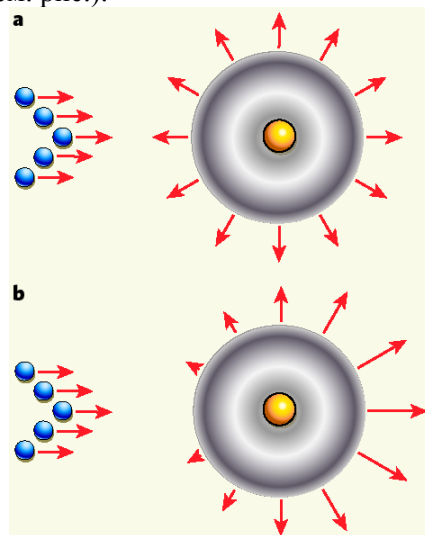
М. Маслов

1. T.Konry, D.R.Walt., *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 13232 (2009).

## СНОВА К ОСНОВАМ

### Топологические диэлектрики

Достигнутый за последние годы прогресс в физике твердого тела во многом обязан уникальному поведению электронов в квазидвумерных материалах: за высокотемпературную сверхпроводимость купратов ответственны слои  $\text{CuO}_2$ , графен толщиной в один атом – так тот вообще можно изготовить в свободном состоянии и т.д. Особый тип двумерных систем представляют собой поверхности так называемых “топологических диэлектриков”: эти поверхности являются проводящими – в отличие от объема образца. Их необычным свойствам посвящены две статьи в одном из августовских номеров журнала Nature. Авторы работы [1], используя сканирующую туннельную спектроскопию и фотоэмиссионную спектроскопию с угловым разрешением, показали, что поверхность  $\text{Bi}_{0.92}\text{Sb}_{0.08}$  остается металлической даже при очень сильном разупорядочении: рассеяние носителей заряда на примесях и дефектах не приводит к их андерсоновской локализации. Это связано с преобладанием малоуглового рассеяния и подавлением процессов обратного рассеяния (см. рис.).



(а) В обычном двумерном металле электроны рассеиваются на примеси во всех направлениях с равной вероятностью. (б) На проводящей поверхности топологического диэлектрика вероятность обратного рассеяния электрона равна нулю.

Поэтому эффекты интерференции при многократном рассеянии приводят не к локализации, а к “антилокализации”. В работе [2] показано, что путем химической модификации поверхности  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  можно перевести ее из металлического в полуметаллическое (с нулевой щелью, как в графене) состояние. Проводимостью такой поверхности легко управлять с помощью электрического поля, изменяя ее с электронной на дырочную и обратно, что важно для приложений в нанoeлектронике. Более того, теоретически предсказано, что на этой поверхности можно даже индуцировать сверхпроводимость [3]. Из сказанного понятно, почему топологические ди-

электрики представляют для нас как практический, так и фундаментальный интерес.

1. P.Roushan et al., *Nature* **460**, 1106 (2009).
2. D.Hsieh et al., *Nature* **460**, 1101 (2009).
3. B.Serajeh et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 066402 (2009).

### Как диффундируют атомы

При не слишком высоких температурах характерные времена процессов диффузии атомов в твердых телах очень велики, что не позволяет использовать для их исследования стандартные методики с высоким разрешением по энергии, тогда как характерные смещения слишком малы для использования когерентного излучения видимого диапазона. В работе [1] группа австрийских и немецких физиков показала, что обширную информацию о динамике диффундирующих атомов дает XPCS спектроскопия (X-ray photon correlation spectroscopy), основанная на сравнительном анализе спектров рассеяния рентгеновских лучей в разные моменты времени. Для демонстрации возможностей этой методики авторы [1] применили ее к изучению диффузии атомов в бинарном сплаве  $\text{Cu}_{90}\text{Au}_{10}$  при  $T \approx 550$  К. Была, в частности, определена температурная зависимость времени  $\tau$  перескока атомов Au с узла на узел, которое при таких температурах составляет около часа. По наклону прямой  $\ln(\tau)$  как функции  $1/T$  определена энергия активации диффузии  $E_a = 2.1$  эВ. Изучен также эффект локального упорядочения атомов Au. Создание новых источников рентгеновского излучения и лазеров на свободных электронах позволит еще больше расширить возможности этой методики.

1. M.Leitner et al., *Nature Mater.* **8**, 717 (2009).

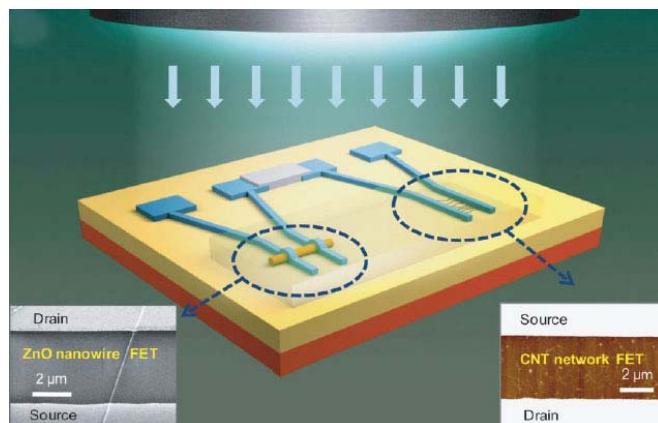
## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

### Гибридная логика

Основой логических схем в современных компьютерах является сочетание двух кремниевых полевых транзисторов с различным характером проводимости канала (т.н. КМОП): n-типа (электроны) и p-типа (дырки). Двум логическим состояниям соответствует один закрытый транзистор, а другой открытый, так что в пассивном состоянии в схеме течет только небольшой ток утечки. Тип проводимости канала задается просто типом легирования материала транзистора: либо донорными примесями, либо акцепторными.

Для новых материалов нанoeлектроники, таких как углеродные нанотрубки, графен и нанопровода, управление типом проводимости пока является сложной проблемой. Решение этой проблемы дано в публикации корейских ученых [1]. Они предлагают в качестве каналов двух транзисторов в паре просто использовать различные материалы. В данном случае это нанопроволока из ZnO и одностенная угле-

родная нанотрубка (SWCN) (рис.). Оксид цинка ZnO является прозрачным полупроводником и широко используется для формирования транзисторов на экранах дисплеев. В рассматриваемой структуре он играет роль канала с n-типом проводимости. Нанотрубка обладает p-типом проводимости. Таким образом, удалось создать аналог КМОП на основе наноматериалов. Работа выхода ZnO, а значит и пороговое напряжение соответствующего транзистора можно регулировать с помощью облучения протонами, которые создают дефекты в окружающем диэлектрике. Это позволяет оптимизировать работу логической схемы (например, инвертора).



С практической точки зрения, представленная структура по своим характеристикам значительно уступает современным схемам на кремниевых транзисторах. Можно ли произнести магические слова о том, что это только первые шаги, и потом можно будет догнать и перегнать кремниевые транзисторы. К сожалению, нет, поскольку есть принципиальные ограничения, по крайней мере, в традиционной структуре полевых транзисторов. Например, отношение тока открытого состояния к току закрытого состояния в транзисторе на нанотрубке составляет при комнатной температуре  $10^4$ , в то время как в кремниевых транзисторах это отношение равно  $10^6$ . Отличие вызвано малой шириной запрещенной зоны в нанотрубке по сравнению с кремнием, поэтому улучшить его невозможно. При уменьшении длины канала (в эксперименте исследовали очень длинный канал - 4 мкм) начнут играть большую роль контакты нанотрубки с металлом. Как известно, они далеко не омические из-за наличия потенциального барьера, который всегда возникает на контакте полупроводника с металлом. В сильнолегированном полупроводнике его просто можно сделать туннельно прозрачным. Как поступить с нанотрубками, пока не ясно. По-прежнему остаются и технологические загвоздки. В эксперименте нанотрубки осаждали на структуру из раствора. Конечно же, это совершенно не годится для формирования микросхем. По мнению International Technology Roadmap for Semiconductors будущее интегральных логических схем вплоть до 2021 г. связано кремниевыми транзисторами на подложке "кремний на

изоляторе” со сверхтонким слоем кремния. Как нам кажется, кремниевые транзисторы не сдадут свои позиции вплоть до длины канала 5-10нм. Продвижение в меньшие размеры невозможно из-за большого тока прямого туннелирования между истоком и стоком. Применение полупроводников с большей шириной запрещенной зоны (например, GaN или алмаз) может позволить еще некоторое уменьшение размеров. Что будет потом, пока никто не знает. По-видимому, это будут транзисторы (или другие элементы и схемы), работающие совсем на других физических принципах.

В.Вьюрков

*I. G.Jo et al., Adv. Mater. 21, 2156 (2009).*

## СПИНТРОНИКА

### Спиново-инжекционный эффект Холла или электроны-сломисты?

В традиционной твердотельной электронике, имеющей дело с накоплением и движением зарядов, наличие у электрона спина в расчет обычно не берется. Но недавно авторами работы [1] было продемонстрировано, как сильно может влиять спин на характер движения электронов даже в немагнитном образце и в отсутствие магнитного поля, если их предварительно поляризовать по спину: электроны выписывают петли, создавая поперечное электрическое напряжение противоположной полярности в различных точках образца (рис. 1 а).

Строго говоря, влияние спина на движение электронов в немагнитных полупроводниках было обнаружено пятью годами ранее – это так называемый *спиновый эффект Холла* [2]. Он был открыт в группе D.Awschalom из University of California, Santa Barbara (США) в полупроводниковых пленках GaAs. Эффект заключался в возникновении неравновесной концентрации спина на боковых гранях образца, которую детектировали магнитооптическим методом. Это явление было предсказано отечественными учеными М. И. Дьяконовым и В.И. Перелем в 1971 г., и его физический механизм заключался в зависимости направления рассеяния электронов на неполяризованной мишени от направления спина вследствие спин-орбитального взаимодействия [3]. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к своего рода сепарации электронов по спину: электроны со спином “вверх” преимущественно рассеиваются влево, а электроны со спином “вниз” – вправо по ходу движения (рис. 1 б).

Природа спиново-инжекционного эффекта та же, что и у спинового эффекта Холла [4], отличие лишь в том, что электроны уже поляризованы по спину, и потому на краях образца возникает не только неравновесная спиновая концентрация, но и неравновесный заряд. Это позволяет обнаруживать эффект с помощью простого вольтметра, не прибегая к изощренным магнитооптическим методам.

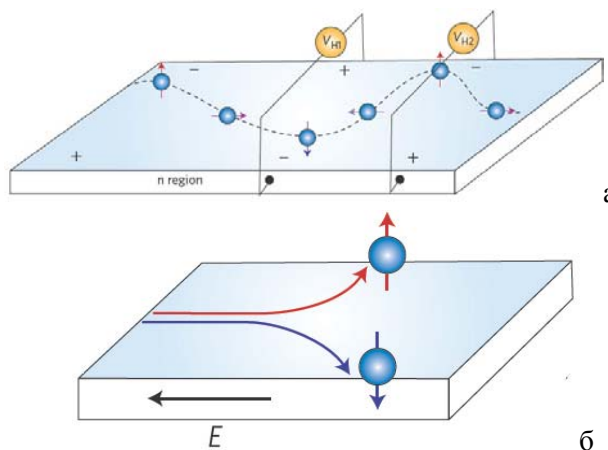


Рис. 1. а - Спиново-инжекционный эффект: движение поляризованных по спину электронов в двумерном электронном газе, образованном в немагнитной гетероструктуре AlGaAs/GaAs; б - Спиновый эффект Холла – спин-зависимое рассеяние электронов при движении в немагнитной среде.

В эксперименте [3] поляризованные по спину электроны возникали под действием света с круговой поляризацией, но то же самое должно происходить и при инжекции сквозь слой ферромагнитного металла. Еще одной любопытной особенностью данного эксперимента являлось волнообразное движение электронов (рис.1 а). Дело в том, что наблюдение спиново-инжекционного эффекта Холла было реализовано в двумерном электронном газе, образующемся в полупроводниковой гетероструктуре. В этом случае, вследствие специфического спин-орбитального взаимодействия (взаимодействия Рашбы) возникает эффективное магнитное поле в плоскости образца, в котором прецессируют магнитные моменты электронов. В результате возникает пространственная модуляция спинового тока с периодом порядка микрона: электроны сносит то вправо, то влево по ходу движения, в зависимости от того, как направлены спины в данной точке. Управлять величиной эффективного магнитного поля Рашбы и, следовательно, перестраивать период пространственной модуляции можно с помощью электрического поля, приложенного в вертикальном направлении, что может быть интересно для приложений в спинтронике.

А. Пятаков

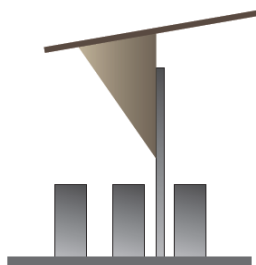
1. *J.Wunderlich et al., Nature Phys. 5, 675 (2009).*
2. *Y.K.Kato et al., Science, 306, 1910 (2004).*
3. *М.И.Дьяконов, В.И.Перель, Письма в ЖЭТФ, 13, 657 (1971).*
4. *I.Žutić, Nature Phys. 5, 630 (2009).*

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Атомный силовой микроскоп с наконечником из углеродной нанотрубки

Атомный силовой микроскоп (АСМ) – одно из наиболее эффективных современных средств изучения структурных свойств объектов нанометровых размеров. Он позволяет исследовать особенности как

биологических объектов, так и элементов наноэлектронных устройств. Чувствительным элементом АСМ является тонкий щуп с наконечником, способный передавать сигнал об интенсивности взаимодействия щупа с атомной структурой исследуемого образца. Обработка этого сигнала дает информацию о деталях его поверхности. Разрешающая способность такого прибора определяется в первую очередь радиусом кривизны наконечника, минимальная величина которого в традиционных устройствах составляет порядка 10 нм. С появлением углеродных нанотрубок (УНТ), диаметр которых примерно на порядок меньше, появилась возможность существенно повысить разрешающую способность АСМ. На рисунке представлена схема исследования поверхности с помощью АСМ, оснащенного наконечником на основе УНТ. Преимущества использования УНТ связаны не только с их малым диаметром, но также с большим аспектным отношением (отношение длины к диаметру), позволяющим проникать в узкие углубления на изучаемой поверхности с целью исследования их структуры. УНТ характеризуются высокой механической прочностью, термической и химической стабильностью, которые позволяют надеяться на длительное использование приборов на их основе. Современное состояние разработок, направленных на создание АСМ с УНТ наконечниками, анализируется в работе, выполненной исследователями University of Warwick (Великобритания) [1].



Схематическое представление принципа действия АСМ, оснащенного наконечником из УНТ.

Одна из ключевых проблем в изготовлении АСМ с наконечником из УНТ связана с необходимостью жесткой фиксации нанотрубки на кантилевере. Существенный успех в решении этой задачи был достигнут в результате разработки методов выращивания индивидуальной УНТ непосредственно на кантилевере. Благодаря использованию стандартной процедуры химического осаждения из пара (CVD), которая заключается в пропускании газообразного углеводорода (метан, этилен, ацетилен и т.п.) над нагретой частицей металлического катализатора удается вырастить УНТ желаемого диаметра и длины, надежно прикрепленную к вершине кантилевера. Другая проблема использования АСМ на основе УНТ связана с трудностями исследований биологических и биохимических объектов, которые обычно проводят в жидкой среде.

Несмотря на эти и некоторые другие трудности использование УНТ в качестве щупа существенно расширяет возможности данного метода. Так, углеродные нанотрубки, обладающие достаточно хоро-

шей электропроводностью, являются эффективным средством измерения электрических характеристик нанообъектов. При этом для повышения качества электрического контакта УНТ с исследуемой поверхностью нанотрубки покрывают атомным слоем металла. АСМ с наконечником из нанотрубки может использоваться не только для пассивного исследования поверхностей, но и для физического воздействия на них с целью изменения их свойств. Примером такого воздействия может служить нанолитография, а также нанесение информации с целью последующего хранения и использования. В этом случае благодаря малым поперечным размерам УНТ достигается уникально высокая плотность информации. Спектр возможных применений АСМ с наконечниками из УНТ значительно шире, чем традиционных устройств, основанных на использовании кремния. Однако для практической реализации потенциала, заложенного в таких приборах, необходимо преодолеть целый ряд технологических проблем, связанных с массовым производством воспроизводимых элементов.

*А.Елецкий*

1. N.R.Wilson, J.V.Macpherson, *Nature Nanotech.* 4, 483 (2009).

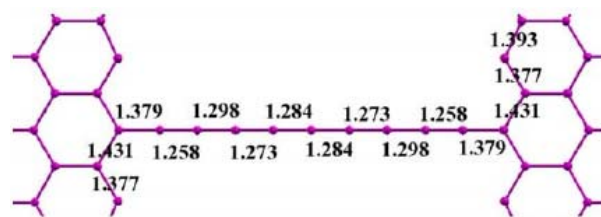
### **Выделение одномерных углеродных цепочек из графенов**

Открытие графенов подстегнуло фантазию исследователей, которые ищут возможности получения и исследования новых углеродных структур. Естественным шагом на этом пути является переход от двумерных объектов, каковыми являются графены, к одномерным системам, представляющим собой протяженную цепочку из атомов углерода, соединенных между собой химической связью. До сих пор подобные объекты изучали лишь теоретически, поскольку не существовало ни эффективного способа их синтеза, ни достаточно надежных подходов к экспериментальному подтверждению такого синтеза. Решение описанной проблемы удалось получить сотрудникам Nanotube Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, (Япония), под руководством одного из первооткрывателей углеродных нанотрубок (УНТ) проф. Sumio Iijima [1]. В качестве исходного материала использовали графеновые хлопья, содержащие от 4 до 20 слоев. Такие хлопья являются побочным продуктом синтеза УНТ электродуговым методом. Суспензию небольшого количества сажи, содержащей подобные хлопья, в этаноле, обрабатывали ультразвуком с целью отделения графенов друг от друга. Каплю полученной жидкости наносили на углеродную сетку, которую помещали в камеру просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ) для наблюдений и манипуляций. Графены, находящиеся на сетке, облучали сфокусированным электронным пучком с энергией от 80 до 120 кэВ при плотности тока около  $100 \text{ А/см}^2$ , что

приводило к частичному разрушению графенов и образованию узких графеновых нанополосок (ГНП). Во избежание полного разрушения ГНП их дальнейшая обработка проводилась при пониженной плотности электронного тока в пучке (около 4 А/см<sup>2</sup>). Как показывают наблюдения, выполненные с помощью ТЕМ высокого разрешения, в результате такого воздействия образуются цепочки шириной в один либо два атома углерода. Детальное изучение динамики формирования таких цепочек под воздействием электронного облучения показывает, что на первой стадии процесса на поверхности графенов образуются отверстия, разделенные перешейком шириной около 1.7 нм, что соответствует графеновой полоске шириной в 6-7 атомов углерода. Дальнейшее облучение сопровождается уменьшением ширины полосок и в некоторых случаях приводит к образованию одномерных цепочек углерода. Одна из таких цепочек имела длину 2.1 нм, что соответствовало 16 атомам углерода, и вела себя подобно упругой струне. Контакт между концом цепочки и краем соседнего графена имел нестабильный характер, так что цепочка мигрировала вдоль поверхности графена дискретными скачками, длина которых соответствовала расстоянию между атомами углерода. Такая цепочка в течение примерно 100 с выдерживала облучение электронным пучком с энергией 120 кВ и плотностью тока 4 А/см<sup>2</sup>, после чего разрушалась.

Результаты квантовохимических расчетов, выполненных методом функционала плотности, указывают на зависимость длины межатомных связей в углеродной цепочке от координаты. Эта зависимость проявляется, в частности, в структуре, представленной на рисунке, которая представляет собой две графеновые плоскости, соединенные углеродной цепочкой. Увеличение длины межатомной связи С–С по мере приближения к краю цепочки объясняет тот факт, что наблюдаемое на эксперименте разрушение углеродной цепочки под действием электронного облучения происходит не в центральной

области, а вблизи концов. Структура, изображенная на рисунке, может рассматриваться как иллюстрация возможного применения одномерных углеродных цепочек, которые могут служить соединительными элементами в наносхемах, элементами которых служат графены.



Результаты квантовохимических расчетов длин межатомных связей для структуры из двух графеновых плоскостей, соединенных одномерной углеродной цепочкой. Длины связей указаны в Å.

*А.Елецкий*

1. C. Jin et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 205501 (2009).

## КОНФЕРЕНЦИИ

***International Conference on Superconductivity and Magnetism 2010 (ICSM2010), 25-30 April 2010, Antalya, Turkey***

ICSM2010 will highlight recent advances in all major disciplines of Superconductivity and Magnetism. Main topics are classified as the following:

- \* Superconducting Materials and Basic Properties
- \* Magnetism and Magnetic Materials
- \* Large Scale Applications, Science and Technology
- \* Electronics Applications, Science and Technology

Important dates are as the following:

Abstract Submission Deadline: **December 1, 2009**

Abstract Acceptance: **January 15, 2010**

Online Registration Open: **December 15, 2009**

Early Registration Deadline: **February 15, 2010**

Web: <http://www.icsm2010.org>

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

Ответственный 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: В.Вьюрков, А.Елецкий,

М.Маслов, Л.Опенов, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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