

В этом выпуске:

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Визуализация атомов в трехмерной оптической решетке

Внутренние состояния нейтральных атомов, находящихся в узлах оптической решетки при температуре ~ 10 мК, предполагается использовать в качестве логических состояний квантовых битов (кубитов) для проведения квантовых вычислений. Межатомные взаимодействия, приводящие к перепутыванию состояний различных кубитов, могут изменяться в широких пределах [1], а взаимодействие атомов с внешним окружением настолько слабое, что время сохранения когерентности достигает ~ 1 с. Ранее сообщалось о создании одномерных и двумерных оптических решеток, в каждом узле которых находится сразу несколько атомов [2,3], а также небольших (≤ 7 атомов) систем с однократным заполнением узлов [4,5]. Чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами квантового компьютера перед классическим, число кубитов нужно довести хотя бы до ~ 100 и расположить их как можно более компактно, чтобы облегчить межкубитные взаимодействия. Для этого очень пригодились бы трехмерные оптические решетки с контролируемым заполнением узлов атомами.

В работе [6] американские физики из Pennsylvania State University изготовили кубическую оптическую решетку, около половины узлов которой занята одиночными атомами цезия, охлажденными до $T \approx 10$ мК, а другие узлы вакантны (рис.1). Период решетки 4.9 нм. Высота U_0 энергетических барьеров, разделяющих соседние минимумы потенциала решетки, регулируется путем изменения мощности W лазерных пучков, формирующих решетку. В центре решетки она составляет $U_0/k_B = 165$ мК при $W = 60$ мВт. Послойная (в каждой отдельно взятой кристаллической плоскости) визуализация атомов проводилась путем анализа рассеяния охлаждающего лазерного излучения с использованием ССД (charge-coupled device). Было установлено, что атомы, расположенные в центральной части решетки (всего около 250 атомов), не изменяют своих позиций за время наблюдения. Вместе с тем, атомы на периферии решетки (где величина U_0 меньше (рис.1b)) перескакивают с узла на узел за счет термической активации (вероятность квантового подбарьерного туннелирования атомов при заданных параметрах потенциала решетки пренебрежимо мала). Зависимость скорости перескока Γ от U_0 авторы [6] определяли путем понижения U_0 в одном кристаллическом направлении (за счет уменьшения мощности соответствующей пары лазерных пучков) и непосредственного подсчета числа перескоков за 1 мин. Как и ожидалось, величина Γ экспоненциально уменьшается с ростом U_0 (рис.2). Экстраполяция к $U_0/k_B = 165$ мК дает $\Gamma \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, что соответствует макроскопическому (несколько суток) времени пребывания атомов в узлах решетки.

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 2 Как управлять наномагнитами?
- 3 Уровни Ландау дираковских фермионов в графите
- 4 Наномембраны

Датчики из графена "чувствуют" отдельные молекулы

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 5 Paul Chu – человек, перешагнувший азотный рубеж

СПИНТРОНИКА

- 6 Прецессия спинов в графене
- 7 Спины излучают микроволны

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Двустенные стручки

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 7 Гордон Мур просит остановить нанопрогресс
- 8 Научная сессия ОФН РАН
4 октября 2007 года

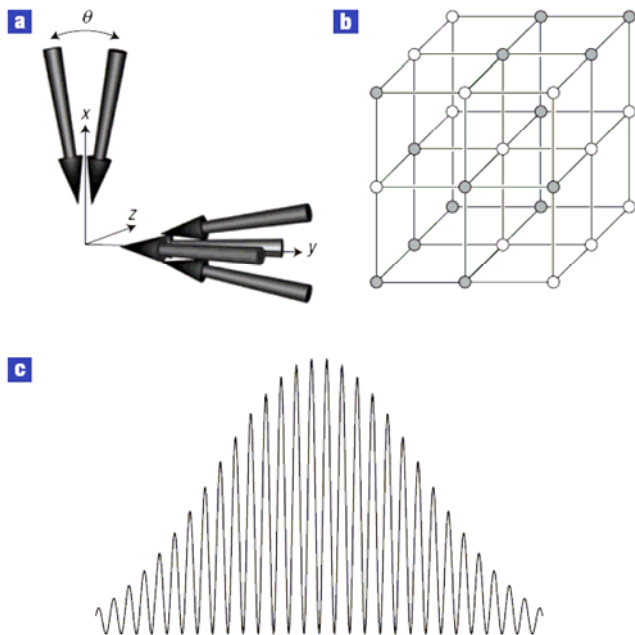


Рис.1. (a) Трехмерная оптическая решетка создается тремя парами лазерных пучков; угол между пучками в каждой паре $\theta = 10^\circ$. (b) Закрашенные кружки – атомы в узлах кубической кристаллической решетки; пустые кружки – узлы, не занятые атомами (вакансии). (c) Потенциальный рельеф вдоль одной из осей оптической решетки. Атомы находятся вблизи минимумов потенциала. Высота энергетических барьеров изменяется вдоль решетки из-за сужения лазерного пучка и максимальна в центре решетки.

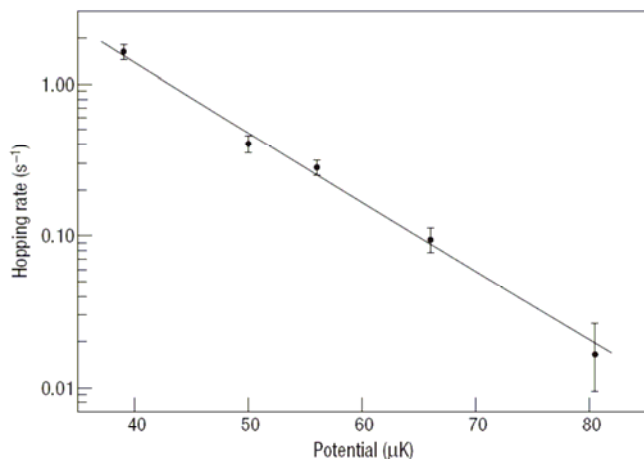


Рис.2. Скорость термоактивированных перескоков атомов между соседними узлами оптической решетки как функция высоты разделяющего их энергетического барьера (деленной на постоянную Больцмана) при $T = 10$ мК.

Существенно, что использованная в [6] методика визуализации является "неразрушающей": заполнение узлов атомами не меняется после "взгляда" на решетку. Достоверность определения того, занят данный узел или свободен, очень велика: вероятность ошибки составляет $3 \cdot 10^{-4}$, и ее можно уменьшить до 10^{-7} путем получения повторного изображения. Оценка времени декогерентизации дает ~ 0.3 с. Это время можно увеличить до ~ 100 с,

если охладить атомы до еще более низких температур (притом, что время одной квантовой операции $\sim 10^{-5}$ с). Большие межатомные расстояния существенно облегчают индивидуальную адресацию кубитов и "чтение" результата квантового вычисления. Трехмерная геометрия способствует созданию сложных запутанных состояний нескольких кубитов, в том числе так называемых кластерных состояний. В дальнейшем авторы [6] планируют отладить процедуру заполнения всех вакантных узлов решетки, чтобы сделать систему атомов-кубитов еще более компактной.

1. O.Mandel et al., *Nature* **425**, 937 (2003).
2. D.Boiron et al., *Phys. Rev. A* **57**, R4106 (1998).
3. R.Scheunemann et al., *Phys. Rev. A* **62**, 051801 (2000).
4. S.Bergamini et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **21**, 1889 (2004).
5. Y.Miroshnichenko et al., *Nature* **442**, 151 (2006).
6. K.D.Nelson et al., *Nature Phys.* **3**, 556 (2007).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Как управлять наномagnитами?

Еще в XVI веке Вильям Гильберт показал, что намагниченность ферромагнетиков можно изменять с помощью внешнего магнитного поля. В XX веке это стало основой для создания устройств магнитной памяти. Для записи информации необходимо локальное магнитное поле. Его может создать магнитная головка, перемещаемая вдоль поверхности – носителя информации. Однако присутствие механического перемещения, естественно, ограничивает скорость записи. Локальное магнитное поле могут создавать и проводники с током, расположенные вблизи каждой магнитной ячейки. Запись становится значительно быстрее и надежнее. Требуется, тем не менее, довольно большой ток, чтобы произвести перемагничивание.

В 1996 г. Slonczewski [1] и Berger [2] выступили с совершенно новым предложением: можно обойтись без магнитного поля! Направление намагниченности маленьких магнитов можно изменять, пропуская через них спин-поляризованный ток. Эффект состоит в простой передаче вращательного момента, каковым и является спин. Предложение казалось очень заманчивым, но вскоре выяснилось, что спиновая релаксация значительно подавляет этот эффект, поэтому для его наблюдения требуется очень большая (10^8 А/см²) плотность тока. Такая плотность значительно превосходит плотность тока, необходимую для создания перемагничивающего магнитного поля от проводников с током.

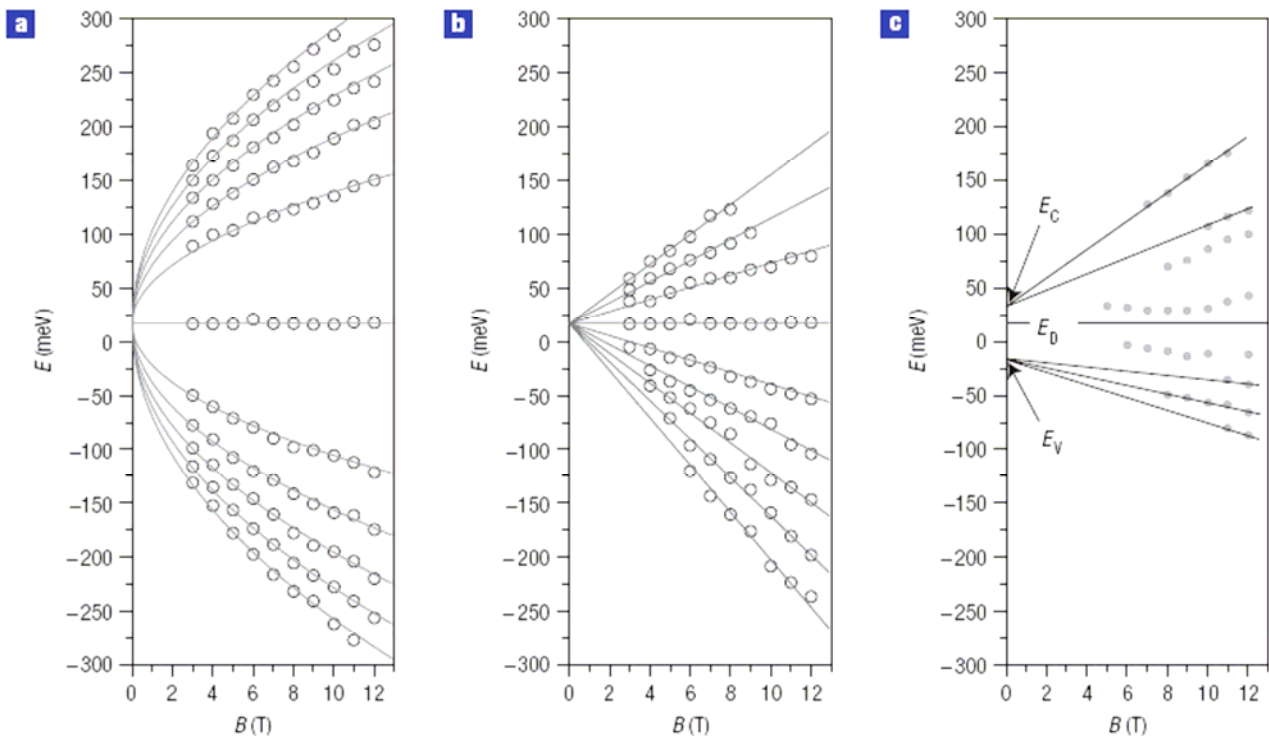
Мы вспомнили этот красивый физический эффект, не нашедший пока практического применения, в связи с недавней заметкой в *Nature Physics* [3].

В.Вьюрков

1. *J. Magn. Magn. Matter* **159**, L1 (1996).
2. *Phys. Rev. B*, **54**, 9353 (1996).
3. *Nature Physics* **3**, 447 (2007).

Уровни Ландау дираковских фермионов в графите

Уникальные электронные свойства графена – квазидвумерного слоя атомов углерода – являются прямым следствием необычного ("релятивистского") закона дисперсии квазичастиц, переносящих электрический ток [1]: $E(p) = \pm v_F p$, где величина v_F примерно в 300 раз меньше скорости света (здесь энергия отсчитывается от, так называемой, точки Дирака E_D , в которой валентная зона и зона проводимости соприкасаются, то есть $E_V = E_C = E_D$). В отличие от обычных полупроводников, квазичастицы в графене являются безмассовыми дираковскими фермионами. Их релятивистская природа проявляется, в частности, в специфическом виде энергетического спектра дискретных уровней Ландау (УЛ): $E_n = \text{sgn}(n) \sqrt{2e\hbar v_F^2 |n| B}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), качественно отличающемся от спектра $E_n = \pm \hbar \omega_c (n + 1/2)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$; $\omega_c = eB/m^*$)



Спектры уровней Ландау для безмассовых (a) и массивных (b) дираковских фермионов, полученные в работе [2] при исследовании поверхности ориентированного пиролитического графита методом сканирующей туннельной спектроскопии. Круги – экспериментальные данные, сплошные линии – теория. Энергия отсчитывается от точки Дирака. (c) Неидентифицированные уровни Ландау.

Наличие вблизи поверхности как массивных, так и безмассовых двумерных дираковских фермионов (отсутствующих в объеме графита) свидетельствует о "расщеплении" объемных и поверхностных электронных состояний. Присутствие в спектрах уровней с $E_n = 0$ (независимо от величины B) подтверждает релятивистскую природу поверхностных квазичастиц. Скорость Ферми, определенная на основании сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей E_n от B для безмассовых фермионов, составила $v_F = (1.07 \pm 0.05) \cdot 10^8$ см/с.

для квазичастиц с квадратичным законом дисперсии. В биграфене (двуслойном графене – двух параллельных графеновых слоях) эффективная масса квазичастиц отлична от нуля, но спектр УЛ $E_n = \text{sgn}(n) \hbar \omega_c \sqrt{|n|(|n|+1)}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) тоже не такой, как в обычных полупроводниках. Это связано с отсутствием запрещенной зоны в точке Дирака, то есть квазичастицы в биграфене являются дираковскими фермионами, но уже не безмассовыми, а массивными. Непосредственному наблюдению УЛ в графене и биграфене методом сканирующей туннельной спектроскопии препятствуют малые размеры образцов и их "паразитное" взаимодействие с подложкой.

Совершенно неожиданно для самих авторов (сотрудников Rutgers University, США) оба упомянутых спектра УЛ были обнаружены при исследовании электронных характеристик поверхности обычного пиролитического графита (см. рис.).

Интересно, что в [2] была обнаружена и еще одна группа УЛ с $E_V \neq E_C$ (см. рис.), происхождение которой однозначно установить не удалось. Для классификации этих УЛ требуется детальный учет зонной структуры графита, что авторы [2] предполагают сделать в дальнейшем.

Л.Опенев

1. K.S.Novoselov et al., *Science* **306**, 666 (2004).
2. G.Li, E.Y.Andrei, *Nature Phys.* **3**, 623 (2007).

Наномембраны

Комбинация неорганических наночастиц и органических молекул позволяет изготавливать новые материалы с уникальными свойствами. Например, внедрение наночастиц в тонкие полимерные пленки приводит к существенному улучшению их термохимических характеристик [1]. Объемная доля наночастиц в таких композитах обычно мала, и они расположены друг относительно друга нерегулярным образом. Это приводит к тому, что длинные полимерные цепочки, образующие матрицу, перепутываются между собой, вследствие чего прочность композита падает. Авторы работы [2] приготовили нанокомпозит, соответствующий противоположному предельному случаю: в нем сферические наночастицы Au образуют плотноупакованный квазидвумерный монослой и прочно сцеплены друг с другом посредством молекул додекантиола (ДТ). Расстояние между соседними наночастицами (1.7 нм) намного меньше их диаметра (6 нм), и поэтому молекулы ДТ, соединяющие разные наночастицы, не перепутываются. Это приводит к значительному увеличению прочности монослоя. Если такой монослой сформировать на подложке, в которой предварительно проделано круглое отверстие диаметром ~ 1 мкм, то на отверстии образуется мембрана (см. рис. 1 и 2).

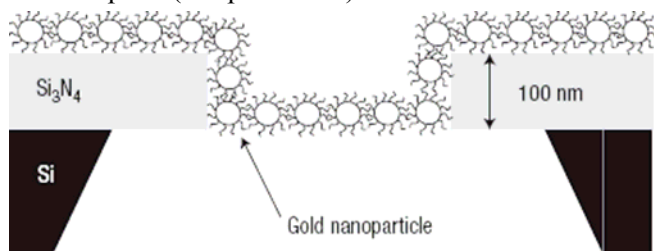


Рис.1. Схематическое изображение монослоя из наночастиц Au и молекул ДТ (dodecanethiol), закрывающего отверстие в подложке Si_3N_4 .

Измерения, выполненные с помощью атомного силового микроскопа, показали, что такие мембраны хоть и тонкие, но очень прочные: их модуль Юнга в среднем составляет около 6 ГПа. Высокая прочность мембран прекрасно сочетается с их эластичностью: изгиб под прямым углом вблизи краев отверстия имеет место на длине ~ 10 нм (несколько диаметров наночастиц). Мембраны сохраняют свои упругие свойства при нагревании (механические повреждения после воздействия иглы микроскопа отсутствуют вплоть до $T \approx 400$ К). Этот результат довольно неожиданный, поскольку теория [3] предсказывает плавление сверхрешеток Au/ДТ при $T \approx 350$ К. Такая термостойкость обусловлена, по-видимому, тем, что край мембраны жестко фиксирован, и поэтому расстояние между наночастицами при нагревании почти не изменяется. В отличие от большинства полимеров, системы плотноупакованных наночастиц проводят электрический ток (за счет туннельного механизма). Поскольку туннельное сопротивление экспоненциально зависит от расстояния между на-

нано частицами, наномембраны можно использовать в качестве очень чувствительных электронных датчиков давления.

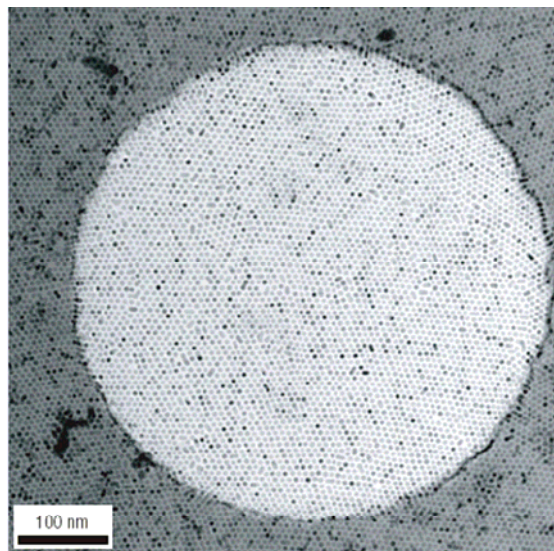


Рис.2. Изображение мембраны Au/ДТ диаметром 500 нм, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии. Темная окружность на периферии мембраны соответствует вертикальной ('ниспадающей') части монослоя на краях отверстия, см. рис.1.

Л.Опенков

1. S.M.Liff et al, *Nature Mater.* **6**, 76 (2007).
2. K.E.Mueggenburg et al, *Nature Mater.* **6**, 656 (2007).
3. U.Landman, W.D.Luedtke, *Faraday Discuss.* **125**, 1 (2004).

Датчики из графена "чувствуют" отдельные молекулы

При увеличении чувствительности любого детектора конечная цель состоит в том, чтобы достичь "предела чувствительности", то есть научиться регистрировать отдельные кванты (заряда, излучения и т.д. – в зависимости от назначения детектора). Для химических датчиков таким квантом является одна молекула. Задача определения мизерной концентрации различных газов очень важна как для экологии, так и для промышленности, не говоря уж о борьбе с терроризмом и других приложениях в области обороны. Чувствительность современных твердотельных датчиков ограничена флуктуациями, обусловленными тепловым движением зарядов и дефектов, в результате чего уровень шума на много порядков превышает сигнал от отдельной молекулы. Но ученым из России (Институт микроэлектронных технологий, Черноголовка), Великобритании (University of Manchester) и Голландии (University of Nijmegen) все же удалось добиться предельного уровня разрешения. Для этой цели они использовали графен [1]. Принцип работы графенового датчика, как и его твердотельных предшественников, основан на изменении электрической проводимости при адсорбции молекул (из-за изменения концентрации носителей заряда), см. рис.1.

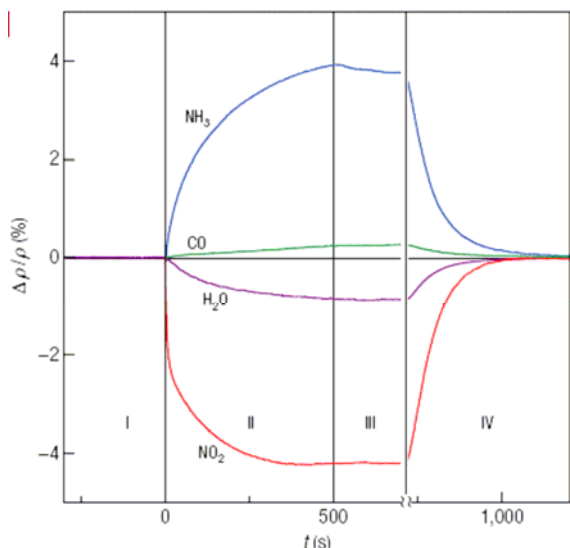


Рис.1. Изменение удельного электрического сопротивления графена $\Delta\rho/\rho$ со временем при воздействии различных газов с относительной концентрацией 10^{-6} . I – до воздействия, II – в процессе воздействия, III – после окончания воздействия, IV – в процессе отжига при $T = 150^\circ\text{C}$. Положительная (отрицательная) величина $\Delta\rho/\rho$ соответствует электронному (дырочному) допированию графена при адсорбции молекул из газовой фазы.

Отличительной особенностью графена является то, что изменение проводимости удастся зарегистрировать даже если число электронов в образце становится больше или меньше всего на единицу (см. рис. 2).

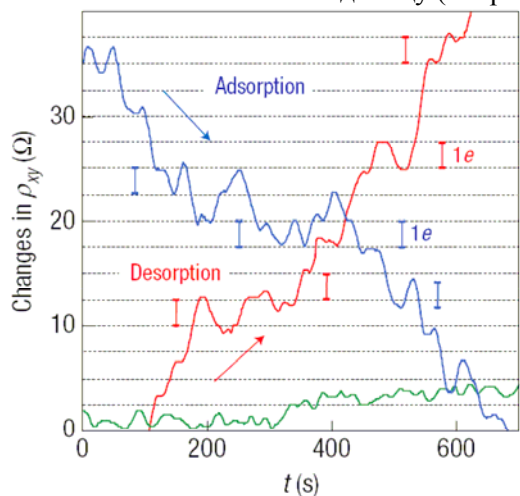


Рис.2. Изменение холловского сопротивления графена в магнитном поле с $H = 10$ Тл при адсорбции (синяя кривая) и десорбции (красная кривая) молекул NO_2 . Горизонтальные линии соответствуют изменению числа электронов в образце на единицу. Зеленая линия – контрольный эксперимент в чистом гелии.

Суперчувствительность графена обусловлена 1) его квазидвумерностью (отсутствуют "внутренние" атомы, на которых адсорбция невозможна, то есть "работает" весь образец); 2) его высокой металлической проводимостью (наиквистовский шум очень слабый даже в отсутствие носителей заряда, когда несколько лишних электронов существенно изменяют концентрацию носителей); 3) малым количеством структурных дефектов, что гарантирует низкий уровень $1/f$ шума; 4) возможностью измерять

сопротивление 4-контактным методом, используя низкоомные электрические контакты. Здесь необходимо отметить, что графеновые датчики способны регистрировать не любые молекулы, а лишь те, которые адсорбируются на графене. И тем не менее беспрецедентно высокая чувствительность и миниатюрные размеры таких датчиков позволят им найти широкое применение в самых различных областях.

Л.Опенев

1. F.Schedin et al, Nature Mater. 6, 652 (2007)

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Paul Chu – человек, перешагнувший азотный рубеж



В начале 1987 г. в группе под руководством Р.Chu был впервые синтезирован сверхпроводник с критической температурой T_c выше точки кипения жидкого азота. Это не только позволило использовать для охлаждения сравнительно дешевый азот вместо дорогого гелия, но и зародило надежду, что T_c вполне реально повысить даже до комнатной температуры и сделать тем самым сверхпроводники атрибутом нашей повседневной жизни. В сентябрьском номере 2007 г. журнал "Nature Materials" опубликовал интервью с Р.Chu [1].

Ниже приведены некоторые выдержки из него.

- Занимались ли Вы проблемой высокотемпературной сверхпроводимости, когда впервые услышали об открытии Беднорца и Мюллера?

- Я всегда с оптимизмом относился к возможности повышения T_c и считал, что именно оксиды являются для этого наиболее подходящими кандидатами. На тот момент максимальную T_c имели материалы со сравнительно высоким удельным электросопротивлением. И у оксидов сопротивление тоже большое. Кроме того, в оксидах есть мягкие фоновые моды, что, как многие тогда считали, должно способствовать сверхпроводимости. После защиты диссертации и перехода в Bell Labs я много работал с оксидами, и это очень способствовало моему пониманию структурных особенностей новых сверхпроводников. Но до Беднорца и Мюллера я не думал о слоистых оксидах.

- А за этим последовало историческое открытие сверхпроводимости в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$?

- Мы в Хьюстоне сделали несколько экспериментов по влиянию высоких давлений на новые сверхпроводники и очень быстро повысили T_c от 35 К до 40 К, а затем и до 50 К. Это убедило и нас, и мно-

гих скептиков, что новые материалы принципиально отличаются от низкотемпературных сверхпроводников. Ведь в то время считалось, что T_c не может превышать ≈ 30 К, поскольку сильное электрон-фононное взаимодействие приводит к структурной неустойчивости. И величина $T_c \approx 35$ К у Беднорца и Мюллера в принципе не противоречила теоретическим предсказаниям. Но наша $T_c \approx 50$ К под давлением уже выходила за эти рамки, и мы чувствовали, что ее можно еще более повысить. Только как? Экспериментируя с составом и структурой, мы довели T_c до ≈ 90 К, но все образцы получались неустойчивыми, а результаты – невоспроизводимыми. В тот период я часто бывал в командировках, но поддерживал постоянный контакт со своими сотрудниками. В один прекрасный день мой бывший студент М.К.Ву сообщил мне по телефону, что ему удалось-таки, используя иттрий, стабилизировать фазу с $T_c \approx 90$ К.

- Каково будущее высокотемпературных сверхпроводников?

- Я мечтаю дожить до широкого практического использования ВТСП. Кроме того, я много работаю над тем, чтобы повысить T_c , в идеале – до комнатной температуры.

- Каким образом?

- У меня несколько идей. Одна из них состоит в том, что нам надо отказаться от попыток усилить только лишь “сверхпроводящее взаимодействие” и постараться как-то оптимизировать взаимодействия другой природы. Что я имею в виду и зачем это нужно? Вспомним, например, что раньше сверхпроводимость и ферромагнетизм считались взаимоисключающими явлениями. Теперь мы знаем, что они могут сосуществовать. А как насчет сегнетоэлектричества? Не исключено, что неустойчивость относительно перехода в сегнетоэлектрическое состояние, которая имеет место, как правило, при температурах существенно выше комнатной, может приводить также и к сверхпроводящему переходу. Мы изучаем и другие возможные пути к комнатнотемпературной сверхпроводимости. Надеюсь дожить до того дня, когда эта работа даст конкретные результаты.

1. P.Chu, *Nature Materials* 6, 622 (2007).

СПИНТРОНИКА

Прецессия спинов в графене

Монослой углерода – графен – интенсивно исследуется в наши дни. Рассматриваются его возможные применения и в области спинтроники. Для этого важно знать скорость релаксации спиновых состояний и длину, на которой происходит эта релаксация.

Для измерения длины диффузии спина в графене нидерландские ученые провели довольно изящный эксперимент [1]. Вид структуры сверху представлен на рис. 1а, а поперечный разрез – на рис. 1б.

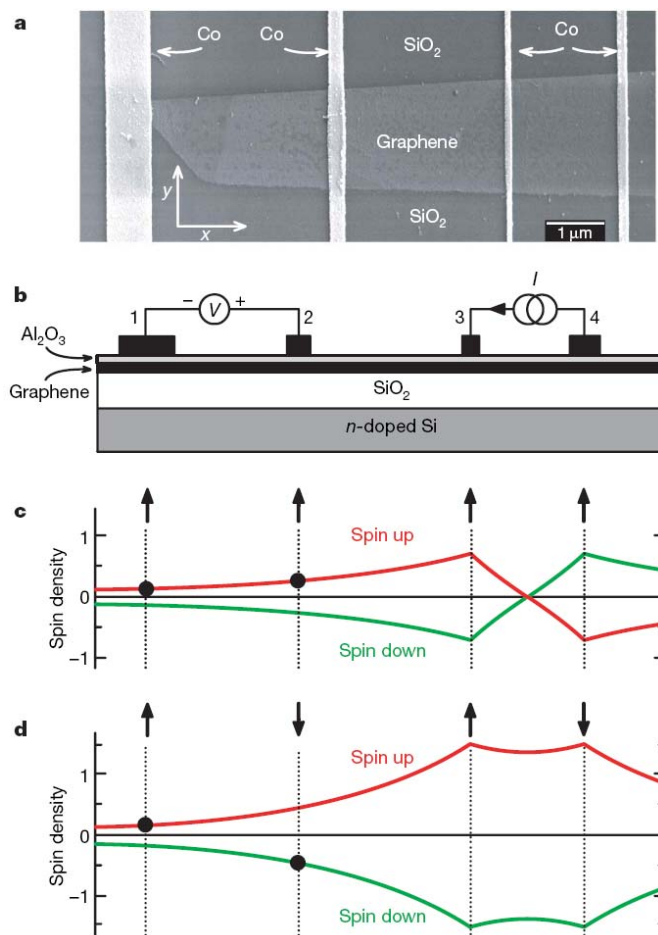


Рис. 1. Вид структуры сверху (1а), разрез структуры (1б) и пространственное распределение концентрации спинов (1с, 1д).

На рисунках 1с и 1д иллюстрируются два варианта измерений. Стрелками указано направление намагниченности металлических контактов (Co). Красная линия изображает превышение концентрации <спинов вверх> над равновесным значением, а зеленая – <спинов вниз>. Общая концентрация электронов везде одинакова, поэтому зеленый и красный графики симметричны относительно горизонтальной оси, изображающей координаты в плоскости графена. Между электродами 3 и 4 прикладывается напряжение, которое вызывает инжекцию спин-поляризованного тока в графен из одного намагниченного контакта через туннельно-тонкий слой оксида алюминия и выход через другой контакт. Далее происходит диффузия спин-поляризованных электронов, попавших в графен. Они растекаются во все стороны, но при этом происходит и релаксация спинов. Между контактами 1 и 2 возникает электрическое напряжение в результате того, что концентрация спинов под ними разная. Сами контакты служат спиновыми вентилями (spin valve), т.е. пропускают электроны преимущественно определенной спиновой поляризации, что определяется намагниченностью контактов. Размещая этот детектор спина на разных расстояниях, можно измерить длину релаксации спина в графене. Она оказалась равной 1.5-2 мкм при комнатной температуре. Интересным обстоятельством является то,

что сигнал остается практически неизменным при разных температурах: 4К, 77К и комнатной. По-видимому, это обусловлено тем, что при повышении температуры усиливается диффузия, но также усиливается и скорость релаксации спина.

В.Вьюрков

1. Nature, 448, 571, 2007.

Спины излучают микроволны

В 1996 году Slonczewski и Berger, (в работах, упомянутых в статье «Как управлять наномагнитами?»), сделали еще одно интересное предположение. Если в кусочек магнита инжектируется ток со спиновой поляризацией перпендикулярной вектору намагниченности, то создаваемое такими спинами магнитное поле, вызывает прецессию магнитного момента. Как известно, прецессирующий магнитный диполь излучает электромагнитные волны. Это и удалось недавно наблюдать ученым из Cornell University (США) [1] и CNRS (Франция) [2]. Частота излучения соответствует ларморовской частоте 1.1ГГц с очень узкой полосой 300кГц. Предполагается, что на основе этого эффекта может быть создан простой, компактный и перестраиваемый источник электромагнитного излучения для систем связи.

В.Вьюрков

1. Nature Physics, 3, 498, 2007.

2. Nature Physics, 3, 402, 2007.

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Двустенные стручки

Как известно, углеродные нанотрубки (УНТ) обладают внутренней полостью диаметром порядка нанометра, которая может быть заполнена атомами или молекулами различного типа. Необычные физико-химические свойства таких объектов и возможности их прикладного использования вызывают интерес, как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. В последние годы в число подобных объектов вошли, так называемые, «стручки» (УНТ, заполненные молекулами фуллеренов). Внутренняя структура стручков содержит необычный квантовый объект - одномерную цепочку молекул фуллеренов, которая не может быть реализована никаким другим способом, кроме как с использованием нанотрубки. Обычно основу стручка составляет одностенная нанотрубка, однако недавно группе исследователей из Университета Нагои (Япония) удалось получить новую разновидность стручка: двустенную нанотрубку, заполненную молекулами фуллеренов C_{60} либо C_{70} . Двустенные УНТ были получены в результате термического разложения CH_4 при температуре 900°C над поверхностью катализатора на основе Fe/MgO в отношении 3:100. Оптимальная длительность процесса роста составляла 10 минут. Для очистки образца УНТ использовали многоступенчатую процедуру, включающую термиче-

скую обработку потоком воздуха 50 мл/мин при 450°C в течение 10 минут, приводящую к удалению частиц аморфного углерода и промывание разбавленной кислотой для удаления остатков катализатора. В результате содержание двустенных УНТ в образце достигало 96%. Очищенные таким образом нанотрубки в течение часа отжигали на воздухе при 450°C, что приводило к раскрытию их концов. Наблюдения, выполненные с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показали, что диаметры нанотрубок лежат в диапазоне от 1 до 5 нм с максимумом в области 2–3 нм, при этом более 70% нанотрубок являются двустенными. Для получения стручков образцы УНТ выдерживали в течение 48 часов в стеклянной трубке вместе с фуллеренами при остаточном давлении 10^{-5} Торр и температуре 500°C. Синтезированные стручки исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения, методами спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеновского дифракционного анализа, а также с помощью термогравиметрического анализа. Как следует из наблюдений, молекулы фуллеренов находятся не только во внутренней полости УНТ, но также прикреплены к их наружной поверхности. Это изменяет характерные частоты в спектре комбинационного рассеяния, сдвигая их в синюю область. Результаты термогравиметрических исследований указывают на повышенную термическую стабильность двустенных стручков по сравнению с двустенными УНТ. Так, температура сгорания стручка $(C_{60})_n$ DWNT составляет 636,2°C, в то время как, соответствующая величина для исходной двустенной нанотрубки составляет 581,8° С. Степень заполнения нанотрубок молекулами фуллеренов, оцененная на основании результатов термогравиметрического анализа, составляет около 75%.

А.В.Елецкий

1. G. Ning et al. Chemical Physics Letters 441, 94, 2007.

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Гордон Мур просит остановить нанопрогресс

Опережая плановые сроки, в рамках проекта PullNano европейцы изготовили демонстрационную ячейку памяти по 32нм технологии [1]. PullNano – это коллективный европейский проект, цель которого к 2010 г. обеспечить европейских чипмейкеров технологией статического оперативного запоминающего устройства (СОЗУ) на основе КМОП ячеек с минимальной шириной линии 32нм и 22нм. Участники проекта - 38 организаций из 12 стран ЕС. Координатор проекта PullNano – компания STMicroelectronics. Проект продолжительностью 30 месяцев с бюджетом 25 млн. евро стартовал в июне 2006 г. Ему предшествовал двухгодичный проект NanoCMOS, который завершился передачей чипмейкерам элементов 45нм технологии.

Изготовленная в рамках PullNano ячейка СОЗУ использует 32нм КМОП транзисторы, дизайн которых существенно отличается от 45нм транзисторов - используется структура полностью обедненного кремния на изоляторе (Fully Depleted Silicon On Insulator - *FDSOI*) и стековый затвор на диэлектрике с высоким *K*.

Для успеха в освоении 32 и 22нм поколения электронных устройств потребуются предварительно разобраться с физикой новых процессов. Партнеры из академических организаций и университетов сосредоточились на создании моделей и компьютерных программ для моделирования работы 32 и 22нм ячеек. Фактически именно с этих размеров только и начнется действительно нанoeлектроника. В 32нм ячейке разработчики впервые столкнутся с необходимостью учитывать и (желательно) использовать квантово-размерные эффекты, присущие наноструктурам.

К разработке специального оборудования и аппаратуры для изготовления и контроля 32нм схем привлечены компании Camesa (Франция), NOVA (Израиль) и французская группа Imagine Optics.

По заявлению руководителя проекта Gilles Thomas после завершения PullNano в конце 2008 г. партнеры продолжают исследования для перехода от 22нм к 16нм технологии, а затем к 11нм. Но это станет возможным, если к тому времени промышленность освоит оборудование на основе экстремального ультрафиолета (*EUV*). Он предсказывает следующие сроки промышленного освоения: 2012 г. - 32нм технология, 2015 г. (не ранее) - 22нм технология. Приближение к 10-ти и 11-ти нанометровому диапазону потребует решения достаточно трудных физических проблем, так как в этом диапазоне путь электрона в транзисторе от истока к стоку будет сравним со средней длиной пробега электрона и по порядку величины сравним с параметром решетки.

К освоению 45нм технологии приступает и крупнейшая российская компания ОАО "Ситроникс" [2], объединяющая ряд компаний России, Украины, Чехии и Греции в области телекоммуникационных и информационных технологий. "45нм проект" стимулирует МЭРТ России, которое планирует выделить из бюджета 2.3 млрд. долл. «Ситрониксу» на строительство производственных площадей под эту технологию. Проект стартует в январе 2008 г., производство чипов должно начаться в октябре 2009 г. Возможно, будет осваиваться технология компании

STMicroelectronics, которая в настоящее время внедряет 180нм процесс на зеленоградском заводе «Микрон», собственником которого является ОАО "Ситроникс".

Американская Intel снова оказалась недостижимой, заявив об изготовлении кремниевых пластин по 45- и 32нм технологии [3]. В ее планах выпустить 15 новых 45нм процессоров (кодовое название Penguin) к середине ноября с.г. и другие 20 процессоров (кодовое название Nehalem) в первом квартале 2008 г. К серийному выпуску 32нм процессоров Intel приступит в 2009 г.

Между тем, появление ультрапортативных мобильных Интернет приборов и персональных компьютеров приведет к гиперсвязанному миру - любой человек может стать доступным в любой точке планеты. Гордон Мур, основатель Intel и автор знаменитого эмпирического закона Мура ("число транзисторов на компьютерном чипе удваивается каждые два года") выразил сожаление, что в новом наномире и его закон перестал выполняться, и мобильная связь грозит его любимому занятию – рыболовству (в любую минуту его может прервать неожиданный тревожный звонок из офиса). Классик микроэлектроники недоволен нанопрогрессом.

1. <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml?articleID=201000364>
2. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=202101377>
3. <http://www.eetimes.eu/semi/201807406.jsessionid=QBUESQGDGXGOMCQSNLPSKH0CJUNN2JVN>

Научная сессия ОФН РАН

4 октября 2007 года в 14 часов.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
(Ленинский просп., 53, главное здание, 3 этаж)

Программа:

1. Максимов Е.Г. (ФИАН)

Комнатная сверхпроводимость: мифы и реальность

2. Bozovic Ivan (Brookhaven National Lab)

Digital synthesis of artificial superconductors

3. Антипов Е.В. (МГУ)

Структурный дизайн новых сверхпроводников

4. Копаев Ю.В. (ФИАН)

С купратным багажом к комнатной сверхпроводимости

Web: www.gpad.ac.ru

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

Научный редактор К.Кугель

Ответственный редактор: И.Чугуева e-mail: irina@issp.ras.ru

В подготовке выпуска принимали участие: В.Вьюрков, А.Елецкий, Ю.Метлин, Л.Опенков,

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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