

В этом выпуске:

НАНОСТРУКТУРЫ

Наноструктуры на нанопроволоках

Растет интерес к полупроводниковым нанопроволокам (НП, английская аббревиатура – *NW*) из-за возможного широкого спектра их потенциальных применений. Уже сегодня на НП реализованы экспериментальные полевые транзисторы, простейшие логические схемы, резонансные туннельные диоды, светодиоды, лазеры и биохимические датчики. Важно, что технология приготовления НП допускает возжеленную для оптоэлектронщиков интеграцию III-V полупроводниковых НП со стандартной *Si* технологией.

Об успешном изготовлении кремниевых нанопроволок первыми сообщили в 1998 году А. М. Morales and С. М. Lieber из Гарвардского университета (США) [Science 1998, **279**, 208]. В последующие годы группа проф. Чарльза Либера опубликовала целую серию работ о результатах исследования НП на *GaN*, *CdS*, *CdSe*, *InP*, *Si* и вариантах приборов на их основе (транзисторы, логические схемы, светодиоды, сенсоры). Ч.Либер основал нанотехнологическую компанию MicroSys, Inc. Четыре года тому назад С.Чикичев (ИФП СО РАН) рассказывал в Перст'е [1] о фабрике полупроводниковых нанопроволок (НП), которую организовал Либер в Гарвардском университете. Что же на счету у этой фабрики на сегодняшний день? Заметка в Перст'е называлась «Вперёд, к нанопроволочной электронике: кто прибежит первым?». Похоже, что Ч. Либер со своими китайскими студентами и аспирантами к финишу ближе всех.

В этом выпуске Сергей Чикичев продолжает обзор работ гарвардских ученых.

1. http://perst.isssp.kiae.ru/Inform/perst/2001/111/Perst01_11.doc

Нанотранзистор на кремниевых нанопроволочках

Почти любые полупроводниковые монокристалльные нанопроволочки в Гарвардском университете синтезируют в любых количествах по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК), который был открыт более 40 лет тому назад и описан в статье Вагнера и Эллиса [1]. Суть его иллюстрирует рис.1.

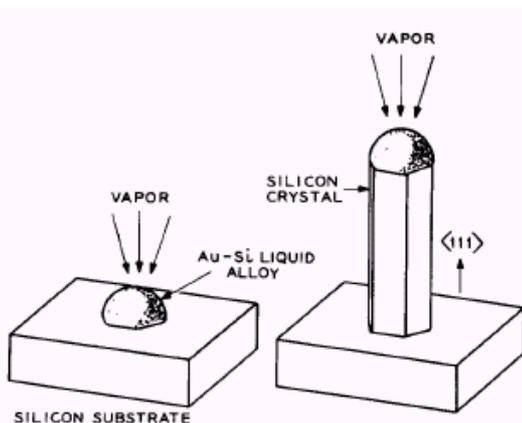


Рис.1. Схема роста кристаллов по ПЖК-механизму [2].

К слову, по данным Science Citation Index только с 1991 по 2005 год эта работа цитировалась 846 раз, причём в возрастающей степени. Возможно, что ПЖК-технология переживает своё второе рождение – на сей раз в наноисполнении.

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ

3 Разноцветная нанопроволочная нанофотоника

5 Полупроводниковые нанопроволочные сенсоры

СВЕРХПРОВОДНИКИ

7 Примеси индуцируют псевдощель в ВТСП

8 Критический ток слоя Cu_2O_4 в ВТСП

8 Вихри и сверхтекучесть в газе фермиевских атомов

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

9 Процессы с участием однослойных нанотрубок, селективные по отношению к их диаметру

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

9 Релаксация электронного спина в квантовых точках

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

10 В планах Intel - 45нм чипы

Сорок лет тому назад нанокapelьки, естественно, делать не умели, зато сейчас монодисперсное коллоидное золото (с диаметром на заказ, начиная с 2 нм) можно просто купить у фирмы Ted Pella, причём сравнительно недорого, ~ 200 долл. за грамм. Стоит заметить, что золотой шарик диаметром 2 нм содержит всего 335 атомов. А именно диаметр золотой крупинки-катализатора и определяет диаметр вырастающей из неё нанопроволоки [2]. Первые электрические измерения на отдельных Si-НП (диаметром от 50 до 150 нм), легированных бором и фосфором, были не очень впечатляющими [3]. Однако за истекшие 4 года ситуация изменилась кардинально, когда гарвардские специалисты научились изготавливать омические контакты к нанопроволочкам и улучшили электронное качество системы Si/SiO₂ [4,5].

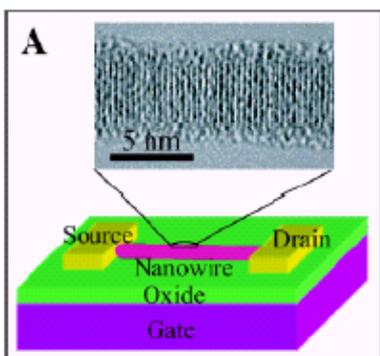


Рис. 2. Нанопроволочный «малодырочный» транзистор из p⁺-Si-НП.

Общий вид полевого транзистора из кремниевой нанопроволоки изображён на рис. 2. Контакты сток-исток представляют собой

двухслойную систему из Ti (50 нм) и Au (50 нм). Насколько полезно вжигать контакты (T=300-600°C, атмосфера – форминг-газ, т. е. 10% H₂+90% He) видно из рис. 3, который показывает, что в результате этой процедуры сопротивление нанопроволоки снижается на порядок.

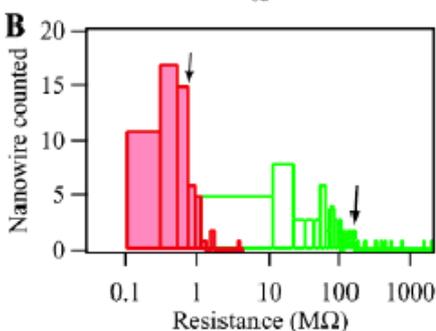
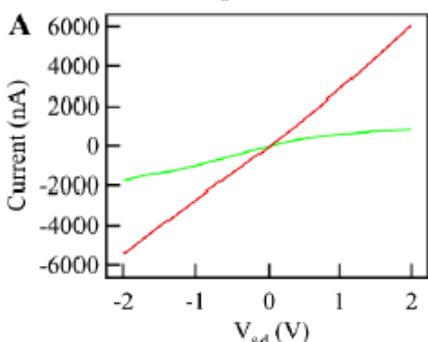


Рис. 3. Влияние термообработки контактов на сопротивление Si-нанопроволок:

а) ВАХ; в) гистограмма сопротивлений (справа – до, слева – после вжигания)

Как известно, кремний на воздухе неизбежно окисляется. Этот «естественный» оксид (SiO_x) никогда не используется в микроэлектронике, потому что, во-

первых, граница Si/SiO_x содержит много состояний для электронов и дырок, во-вторых, в объёме этого SiO_x имеются заряженные ловушки для носителей

заряда, а, в-третьих, на поверхности этого SiO_x оседает «грязь» из лабораторной атмосферы, причём часто имеющая и заряд. Все эти заряды могут индуцировать в Si-НП электрическое поле, изменить которое за счёт подачи напряжения на Si-подложку (затвор) просто невозможно (см. рис. 4 (b), где прямая контактанса почти параллельна оси абсцисс). Так вот в Гарварде научились улучшать «естественный» оксид, покрывающий Si-НП простым окунанием полевого Si-НП транзистора (см. рис.3) в 4-нитрофенилоктадеканоат (детали этой магической процедуры, естественно, не разглашаются) (см. рис. 4). При этом подвижность дырок в Si-НП после такой обработки достигает величин 560-1350 см²В⁻¹с⁻¹, (но чаще, всё-таки, 200-300 см²В⁻¹с⁻¹, см. рис. 4(d)), тогда как в объёмном кремнии с таким же легированием бором она не превышает 40-50 см²В⁻¹с⁻¹.

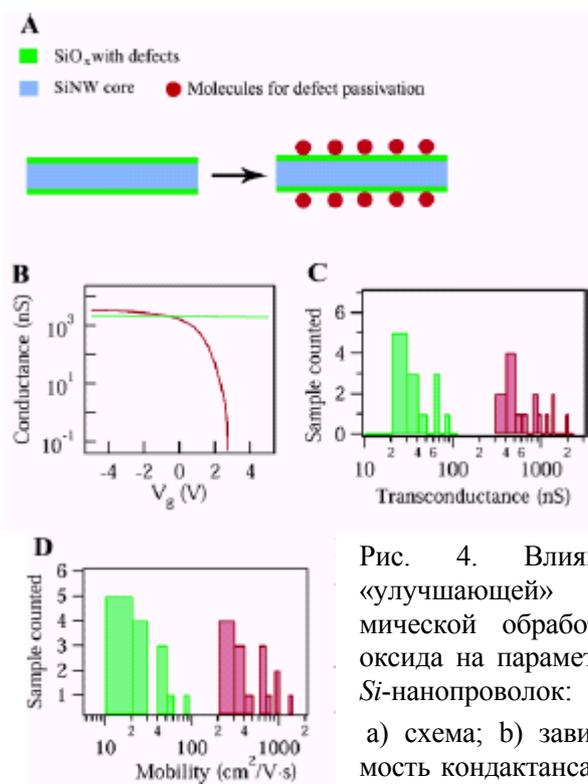


Рис. 4. Влияние «улучшающей» химической обработки оксида на параметры Si-нанопроволок:

а) схема; б) зависимость контактанса от затворного напряжения;

в) г) гистограммы дифференциального контактанса и подвижности дырок в Si-нанопроволоках (слева – до, справа – после обработки в 4- нитрофенилоктадеканоате).

Легко подсчитать, что в Si-НП, легированной бором до концентрации 10²⁰ см⁻³ с Ø=4 нм и длиной 0.5 мкм, содержится всего 60 дырок, так что картинка на рис.3 изображает собой шестидесятидырочный транзистор (может, и десятидырочный, поскольку количество атомов бора, встроившихся в НП, известно не очень точно). На рис. 5 представлена ВАХ Si-НП транзистора при температуре жидкого гелия. Как видно из рис. 5 (а), возникают осцилляции тока, зависящие от напряжения на затворе, причём их период – регулярный, а вот амплитуда –

нет. На рис. 5 (b) представлена зависимость V_{sd} (тянущее напряжение) от V_g (напряжение на затворе). На этом графике внутри каждого «ромбика» проводимость НП нулевая. Наконец, ёмкость затвора (оценённая для системы «цилиндр над плоскостью» по периоду кулоновских осцилляций) в зависимости от длины Si-НП, приведена на рис. 5 (c). В общем, когерентный дырочный транспорт в Si-НП наблюдается вплоть до длины 400нм. Этот результат значительно превосходит аналогичные для одноэлектронных транзисторов, в которых Si-нанопроволоки изготавливают методом «top-down», т.е. «выпиливают» их из КНИ структур с помощью электронной литографии. Так что нанопроволочная «однодырочная» электроника идёт на шаг впереди.

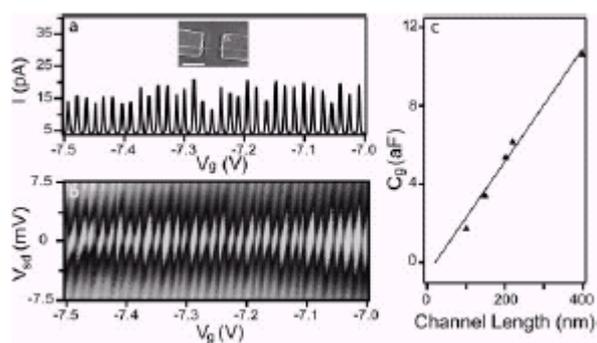


Рис. 5. Кулоновская блокада в *p*-Si- нанопроволоке: а) ток через нанопроволоку в зависимости от напряжения на подложке-затворе; в) «блокадные» ромбики; с) затворная ёмкость в зависимости от длины нанопроволоки.

В некотором смысле вершиной полупроводниковой нанотехнологии является создание модуляционно (или селективно) легированных гетероструктур, в которых получены рекордные подвижности носителей заряда и при $T=300\text{K}$, и при $T \rightarrow 0\text{K}$, потому что именно этим способом нанотехнологам удалось убрать рассеяние на ионизованных примесях (формула Брукса-Херринга). Классическим примером здесь могут служить плоские гетероструктуры *GaAs/AlGaAs*, в которых подвижность 2D электронного газа при низких T достигает фантастической величины ($\sim 30\ 000\ 000\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). Модуляционно легированные нанопроволочные гетероструктуры можно организовать путём, например, выращивания легированной бором Si-обкладки на нелегированной Ge-НП, что и сделали в Гарварде [6,7] и наблюдали и кулоновскую блокаду, и даже «0.7-структуру», которую связывают со спонтанной спиновой поляризацией истинно одномерного электронного газа.

Заметим, наконец, что главный конкурент полупроводниковых нанопроволок – углеродные нанотрубки (УНТ) – всем хороши, но страдают одним, но **большим** недостатком: в зависимости от диаметра и хиральности УНТы могут быть как металлами, так и полупроводниками [8], а контролируемо изго-

тавливать чисто полупроводниковые УНТы - пока достаточно трудная технологическая задача. Что касается кремния, то он и в виде нановолоска – полупроводник.

Работы по различным нанопроволочным приборам защищены патентом [9].

С. Чикичев

1. *Appl.Phys.Lett.* 1964, **4**, 89
2. *NanoLetters* 2004, **4**, 433
3. *J.Phys.Chem.B.* 2000, **104**, 5213
4. *NanoLetters* 2003, **3**, 149
5. *NanoLetters* 2005, **5**, 1143
6. *Nature* 2002, **420**, 57
7. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2005, **102**, 10046
8. *Acc.Chem.Res.* 2002, **35**, 1018
9. A. Majumdar, A.Shakouri, T.D.Sands, P.Yang, S.S.Mao, R.E.Russo, H.Feick, E.R.Weber, H.Kind, M.Huang, H.Yan, Y.Wu, R.Fan. *Nanowires, nanostructures and devices fabricated there from.* US Patent 6,882,051 B2, April 19, 2005.

Разноцветная нанопроволочная нанофотоника

В 2005 году семейство научных журналов, посвящённых *очень маленьким* кусочкам вещества, пополнил ещё один ежемесячник, который так и называется «Маленький» (Small) (издатель – Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. см. <http://www.small-journal.com>). В первом номере первого тома «Small» опубликованы новые данные об исследованиях гарвардских ученых (США) во главе с проф. Ч.Либером по «нанопроволочной нанофотонике» [1]. Популярно этапы их большого пути отражены в публикациях [2-4].

Сегодня в активе этого американо-китайского коллектива целая серия совершенно замечательных «нанопроволочных» изделий. В публикации [1] речь идёт о наносветодиодах, которые получаются, если поперёк нанопроволоки из *p-Si* положить нанопроволоку (НП) из прямозонного полупроводника с электронным типом проводимости. Например, из *n-GaN* ($E_g=3.36\text{эВ}$), или *n-CdS* ($E_g=2.42\text{эВ}$), или *n-CdSe* ($E_g=1.70\text{эВ}$), или *n-InP* ($E_g=1.35\text{эВ}$) и т.д. Авторы преодолели не только сложность получения однородных матриц из пересекающихся нанопроволок, но и не меньшую сложность подключения к ним омических контактов.

Первый биполярный Si-НП транзистор из НП трёх типов (*p*, *n*, и *n*⁺) создавали буквально китайским трудом [5]: нужную нанопроволочку приваривали в сканирующем электронном микроскопе к заточенным металлическим макронаконечникам, а потом уже с использованием оптического микроскопа, держась микроманипуляторами за эти наконечники, почти вслепую, организовывали крест. Этого было достаточно для «прощупывания» реализуемости идеи, а результаты вдохновили авторов на создание

серьёзной технологии. Подход к технологии был найден и запатентован [6], и теперь исследователи выдают серию первоавторских приборов на нанопроволоках.

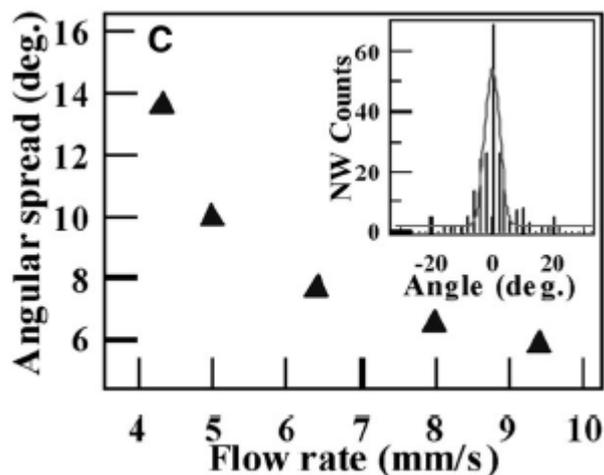
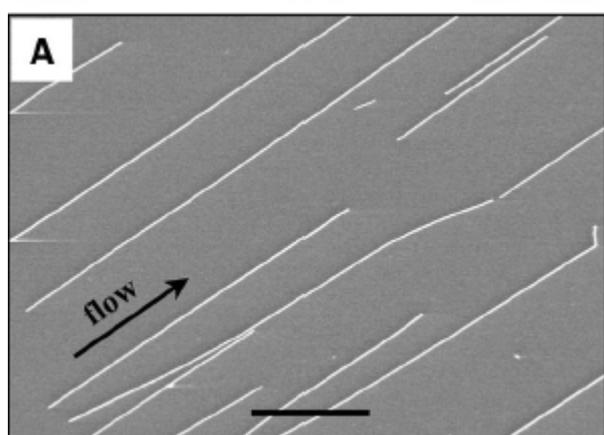
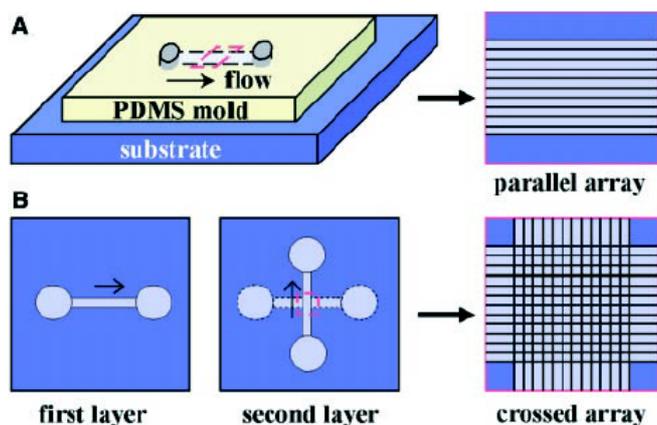


Рис.1. Микроструйное выстраивание нанопроволок
 Нанопроволоки выкладывают методом микроструи [7]. Если к поверхности окисленной кремниевой пластины прижать пластиковую форму с изготовленными на прижимаемой стороне микроканалами ($\varnothing=5\text{-}500\mu\text{m}$ и длиной от 6 до 20мм), а затем заставить протекать по этим каналам взвесь нанопроволок в этаноле, то проволоки выстроятся по течению как водоросли в ручье. При этом разброс по углу отклонения нанопроволоки от оси канала может быть доведён до 6-7° при скорости потока 8-10мм/с. (см. рис. 1). Для надёжного крепления нанопроволок к подложке поверхность SiO_2 предварительно

покрывают самоорганизованным монослоем из 3-аминопропилтриэтоксисилана (АПТЭС), для чего окунают подложку в миллимолярный раствор АПТЭС в хлороформе на полчаса, а затем нагревают до 110°C в течение 10 минут. Если же требуется, чтобы нанопроволоки не просто вытянулись на подложке параллельно друг другу, а легли упорядоченно, то на подложке методом электронной литографии делают сначала канавки в резисте и АПТЭС клей наносят только в эти канавки. Именно там и выстроятся НП после прокачки над канавками этанольной НП-суспензии (см. рис. 2). Лёгким поворотом формы второй набор нанопроволок можно наложить на первый под любым заданным углом. Аналогичным образом можно сформировать и третий, и четвертый слой НП и т.д. (см. рис. 2).

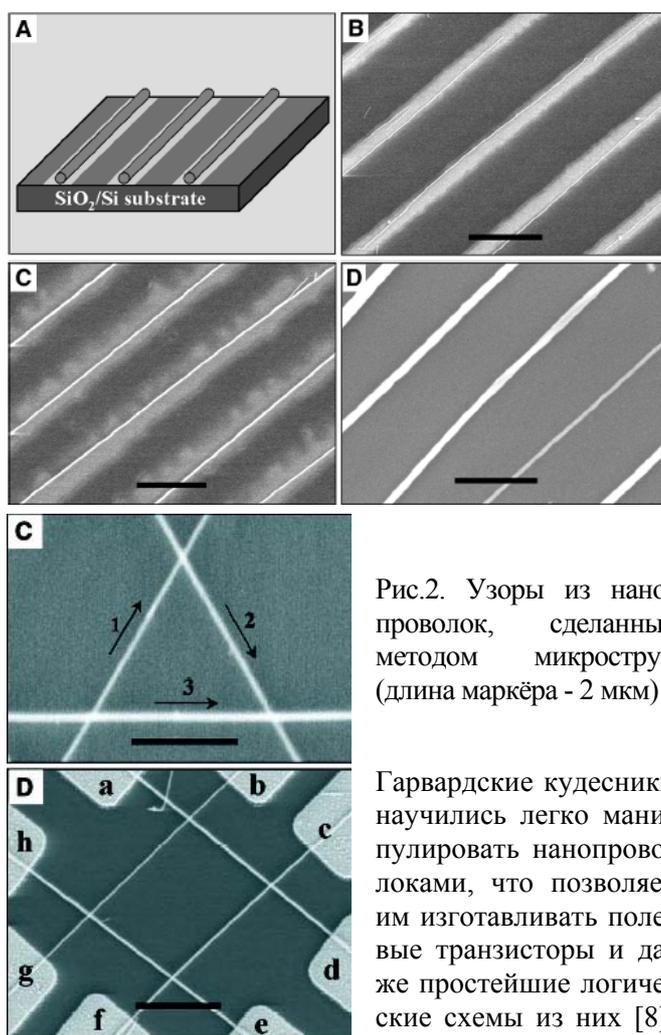


Рис.2. Узоры из нанопроволок, сделанные методом микроструи (длина маркера - 2 мкм).

Гарвардские кудесники научились легко манипулировать нанопроволоками, что позволяет им изготавливать полевые транзисторы и даже простейшие логические схемы из них [8]. А если «поколдовать»

над местами пересечения нанопроволок (например, вскрыть над нужным перекрёстком окно в резисте и подержать структуру в одномолярном растворе хлорида тетраэтиламмония минут 10 - этого будет достаточно, чтобы пороговое напряжение полевого НП-транзистора возросло с 2 до 5В), то можно делать и дешифраторы адреса [9]. Этим же способом сделаны и наносветодиоды, описанные в [1]. Чтобы всё понять, достаточно одного взгляда на рис. 3 и рис. 4.

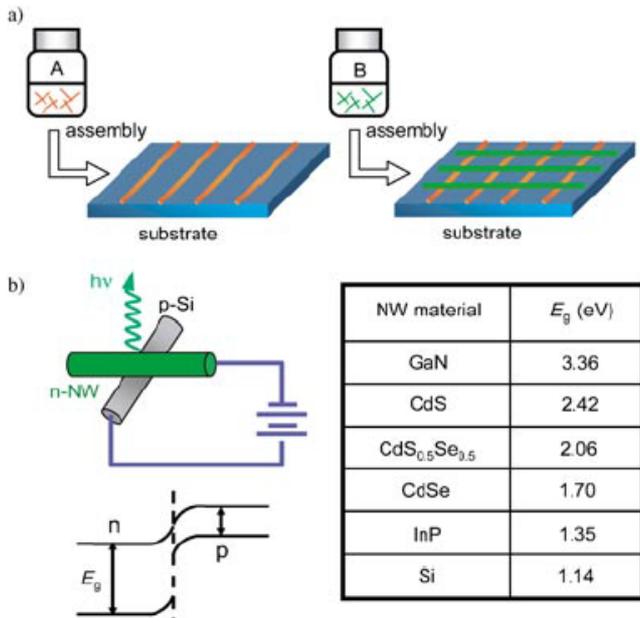


Рис.3. Так изготавливают нанопроволочные разноцветные светодиоды

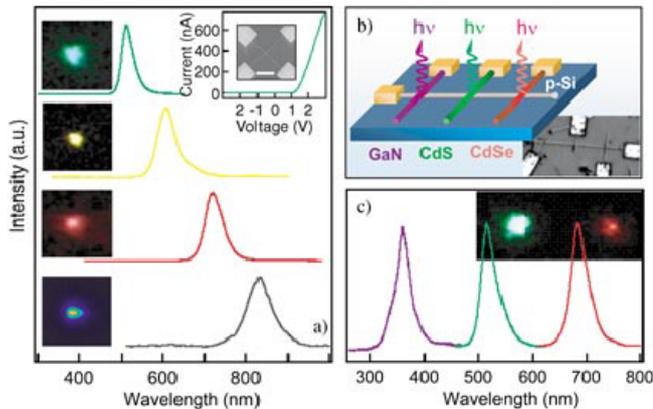


Рис.4. А так они светят!

Известно, что для ряда целей (например, для передачи информации) светодиод должен не только светить, но и мигать (и с достаточно большой частотой для передачи большого объема информации в единицу времени). Реализованная в [1] стопроцентно-нанопроволочная схема (рис. 5) при сверхмалых размерах исключительно быстродействующая.

В семействе полупроводниковых соединений III-V всеми цветами радуги светятся нитриды металлов третьей группы Периодической системы Д.И. Менделеева. И, конечно, гарвардские «нанопроволочники» не могли обойти их стороной [10], освоив синтез $p\text{-GaN:Mg}$ -НТ [11] и сформировав радиальные GaN-InGaN - нанопроволочные (сияющие!) гетероструктуры [12]. В руках у них оказалась *bottom-up* технология, позволяющая иметь безграничное количество разных полупроводниковых «нанокирпичиков» и строить из них и светящиеся, и считающие актуальные приборы без дорогого процесса эпитаксии.

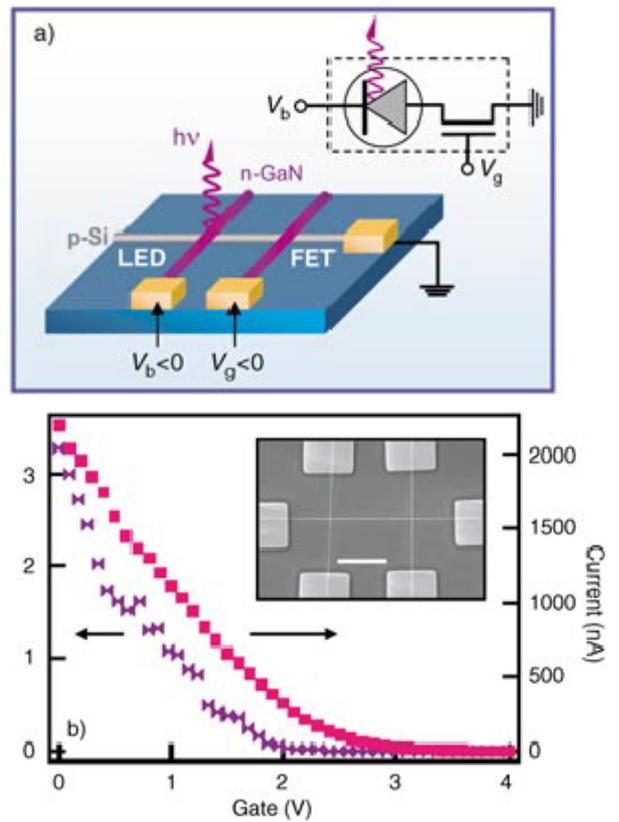


Рис.5. Гигагерцовые «наномигалки» для Bluetooth . К слову, финансирует разработки Агентство перспективных разработок Пентагона (DARPA) + Управление научных исследований ВВС США.

С.Чикичев

1. *Small* 2005, **1**, No 1, 142
2. *Acc.Chem.Res.* 1999, **32**,435
3. *Sci.Am.*, pp.59-64 (September 2001).
4. *MRS Bull.*, pp.486-491 (July 2003).
5. *Science* 2001, **291**, 851
6. C.M.Lieber, Y.Cui, X.Duan, Y.Huang. *Doped elongated semiconductors, growing such semiconductors, devices including such semiconductors and fabricating such devices. US Patent Application Publication: 2002/0130311.A1, September 19, 2002.*
7. *Science* 2001, **291**, 630
8. *Science* 2001, **294**, 1313
9. *Science* 2003, **302**, 1377
10. *NanoLetters* 2002, **2**, 101
11. *NanoLetters* 2003, **3**, 343
12. *NanoLetters* 2004, **4**, 1975

Полупроводниковые нанопроволочные сенсоры

Идея полупроводникового нанопроволочного (НП) сенсора [1] очень проста – сопротивление цилиндрика из полупроводника (например, $p\text{-Si}$, $\varnothing = 10\text{-}50\text{ нм}$) чрезвычайно сильно зависит от того, сколько и каких заряженных частиц осело на поверхность плёнки SiO_x , неизбежно формируемой на кремниевой нанопроволоке на воздухе. Химики уже давно научились таким образом «очувствлять» (или, в терминологии химиков, «функционализировать») поверхность SiO_2 , что после обработки на неё адсорбируется только то, что

нужно, а что не нужно – не прилипает. К примеру, простейший (и важнейший!) сенсор – это тот, который реагирует на pH (водородный показатель) среды. Известно, что у чистой воды $pH=7$, а у «нечистой» $pH \neq 7$. Характер нечистот (кислоты или основания) и даже их количество можно определить по отклонению pH от семёрки.

Так вот, если поверхность Si -НП (с двумя омическими контактами по краям) покрыть 3-аминопропил-этоксисиланом (АПТЭС), то сверхминиатюрный pH -

датчик готов [1] (см. рис.1). Дело в том, что АПТЭС покрывает поверхность SiO_2 плёнкой толщиной всего в один монослой (так называемый самоорганизованный монослой) с торчащими наружу группами NH_2 . В зависимости от кислотности среды эти группы могут или отдавать один протон или, наоборот, присоединять его из раствора, т.е. заряжаться, что незамедлительно сказывается на кондуктансе (I/U) Si -НП. Причём на каждое изменение pH среды Si -НП скачком меняет своё сопротивление.

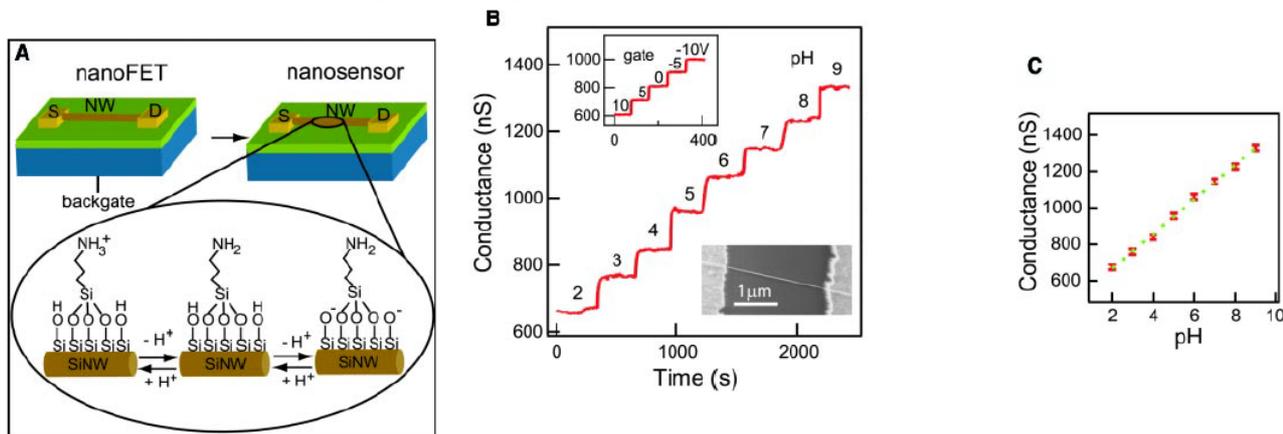


Рис.1. Нанопроволочный pH -метр: а) схема действия; б) реакция на резкие изменения кислотности среды; с) показывает, что pH можно измерять с высокой точностью.

Если нужно детектировать не просто pH , а конкретный белок (например, стрептовидин), то поверхность Si -НП следует покрыть бычьим альбумином, меченным биотинамидокапроилом, который является селективным рецептором для стрептовицина. А дальше всё по той же схеме (рис. 2). Присевший на функционализированную поверхность SiO_2 стрептовидин меняет заряд на этой поверхности, а значит и кондуктанс нанопроволоки. Поэтому для определения этого конкретного протеина достаточно иметь батарейку, вольтметр и амперметр [2,3] (конечно, если у вас уже есть функционализированная Si -НП с двумя омическими контактами).

функционализированную SiO_x -оболочку Si -НП из n -фемтомольного раствора ($n > 10$) протеина; с) немодифицированная Si -НП: нет протеина – нет и реакции. d) при пропускании над сенсором буферного раствора; e) при адсорбции 25 нМ стрептовицина ($n=10$).

Метаболические процессы (деление-рост-развитие) в любых клетках человека напрямую зависят – как ни странно – от концентрации двухвалентных ионов кальция (Ca^{2+}), которые входят в состав оболочки любой клетки и почти всё там регулируют, так как стоят на «воротах», т.е. работают «клеточными таможенниками». Кремниевые нанопроволоки способны прекрасно реагировать на концентрацию этого жизненно важного иона [1].

Но главное, конечно, это дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), в двойной спирали которой посредством всего четырёх оснований (аденин, тимин, гуанин и цитозин) записано всё – от цвета глаз до предрасположенности к болезни Альцгеймера. Поэтому сенсор, который может детектировать последовательность этих оснований в ДНК, это, возможно, наиболее важный для медицины сенсор. Кремниевые нанопроволоки с успехом справляются и с этой задачей [4].

Возвращаясь к нелюбимому гриппу (и соответственно к вирусам, из которых он происходит), заметим, что Si -НП наносенсор даёт вполне измеримый сигнал даже, если на него попал всего один вирус «А» гриппа [5]. Идейная сторона процесса детектирования отдельных вирусов показана на рис. 3, а

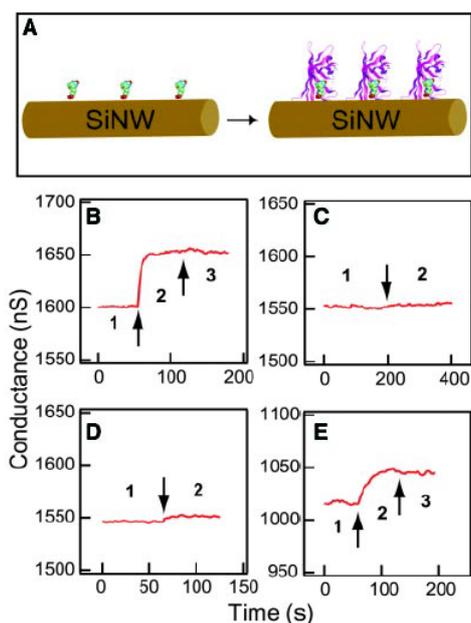


Рис.2. Нанопроволочный сенсор для белков: а) наглядная схема – модифицированная Si -НП (слева) и присоединенный к Si -НП стрептовидин (справа); б) изменение кондуктанса при адсорбции 250 нМ стрептовицина на

многочисленные физико-химические, технические и биологические детали можно почерпнуть из [5,6].

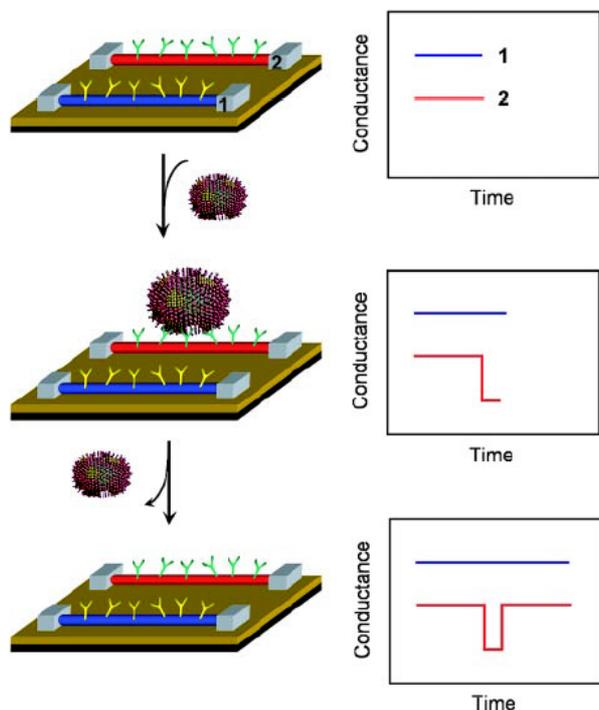


Рис.3. Схема детектирования одиночного вируса. Показаны два нанопроволочных прибора (1 и 2), модифицированные различными рецепторами. Дальняя (красная) НП «очувствлена» для захвата вируса «гриппа А», а ближняя (синяя) – нет. Графики справа показывают, как Si-НП реагируют на адсорбцию и десорбцию *одиночного* вируса.

А теперь представьте, что в вашем распоряжении имеется 10^n нанопроволок, и каждая из них настроена на какого-то своего возбудителя заболевания. Поскольку речь идёт о нанопроволоках, то 10^3 – 10^4 их разместятся (вместе с контактами, которые, на самом деле и занимают наибольшую площадь) на размере спичечной головки. Далее на мультинанопроволочный сенсор помещается капля крови (или пота, или слюны, или мочи) и через секунду компьютер бесстрастно расскажет о попавших в организм возмутителях спокойствия. И это – не мечта, а вполне обозримое будущее полупроводниковой нанопроволочной сенсорики.

Стоит ли теперь удивляться, что по прогнозам [7] к 2010 году рынок нанотехнологических изделий только для биомедицинских применений составит 3.4 млрд. долл.? Скорее всего, действительность превзойдёт все самые смелые прогнозы.

С. Чикичев

1. *Science* 2001, **293**, 1289
2. *Proceedings of 40th Conference on chemical research: "Chemistry on the nanometer scale", October 21-22, 1996, Houston, Texas, pp.165-187 (1997).*
3. *Molecular Nanoelectronics, Ed. by M.A.Reed and T.Lee, American Scientific Publishers, pp.199-227 (2003).*

4. *NanoLetters* 2004, **4**, 51
5. *Proc.Natl.Acad.Sci.* 2004, **101**, 14017
www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0406159101
6. *Proc.Natl.Acad.Sci.* 2005, **102**, 3208
7. *Nano life from \$910m to \$3.4bn by 2010.*
См. http://www.three-fives.com/business_market_news/index.html

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Примеси индуцируют псевдощель в ВТСП

Принято считать, что необычные свойства нормального состояния ВТСП являются ключом к механизму высокотемпературной сверхпроводимости. В частности, значительные усилия сейчас направлены на выявление природы так называемой псевдощели – резкого уменьшения плотности состояний спиновых и зарядовых возбуждений при температурах, значительно превышающих T_c . Многочисленные модели образования псевдощели можно условно разделить на две большие категории: 1) псевдощелевое состояние – предвестник сверхпроводящего, но макроскопическая фазовая когерентность разрушена тепловыми флуктуациями; 2) псевдощель не имеет ничего общего со сверхпроводимостью и является признаком наличия какого-то другого типа упорядочения (например, спинового или зарядового).

Основная сложность экспериментального изучения псевдощелевого состояния заключается в том, что его низкотемпературные характеристики затушевываются присутствием сверхпроводящего конденсата. Для подавления сверхпроводимости требуются большие магнитные поля, что затрудняет использование различных spectroграфических методик. Альтернативой являются примеси (например, *Zn* или *Ni*), замещающие атомы меди в проводящих слоях CuO_2 . По этому пути и пошли авторы работы [1], которые измерили оптическую проводимость монокристаллов $(Sm,Nd)Ba_2\{Cu_{1-y}(Ni,Zn)_y\}_3O_{7-\delta}$ вдоль оси *c*. Концентрации немагнитных *Zn* и магнитных *Ni* примесей до 9% и 17%, соответственно, оказалось достаточно для полного разрушения сверхпроводящих корреляций даже в оптимально допированных образцах с максимальной T_c . При этом было обнаружено, что в то время как примеси *Zn* и *Ni* примерно в равной степени губительны для сверхпроводимости, они совершенно по-разному влияют на псевдощель: увеличение концентрации *Zn* ведет к плавному уменьшению псевдощели, тогда как при добавлении *Ni* псевдощель резко возрастает. Интересно, что при замещении *Cu/Ni* псевдощель появляется даже в оптимально допированных и слегка передопированных образцах, в которых ее вообще не было до введения примесей. Полученные результаты свидетельствуют как против моделей псевдощели – предвестника сверхпроводимости, так и не в пользу тех теоретических построений, которые связывают псевдощель с различными экзотическими несверхпроводящими типами упорядочения (фаза с потоком, *d*-волновая

модуляция плотности и т.д.). Ясно одно: определяющую роль в формировании псевдощели играют магнитные корреляции.

Л.Опенов

1. A.V.Pimenov et al., Phys. Rev. Lett. 2005, 94, 227003

Критический ток слоя Cu_2O_4 в ВТСП

Шведские физики из Chalmers University of Technology измерили критический ток поверхностного слоя Cu_2O_4 (пары параллельных слоев CuO_2) в монокристалле ВТСП $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ [1]. При $T = 4.5$ К он оказался равным $(0.3 \div 0.7)A/cm$, что отвечает объемной $j_c = (2 \div 5) \cdot 10^6 A/cm^2$. Эта величина j_c является, по мнению авторов, предельно возможной не только для монокристаллов, но также для тонких пленок и лент $Bi-2212$.

1. Phys. Rev B 2005, 71, 224501

Вихри и сверхтекучесть в газе фермиевских атомов

При низкой температуре частицы с целым спином (например, атомы натрия) – бозоны – конденсируются в состояние с минимально возможной энергией, образуя бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК), который обладает свойством сверхтекучести, то есть способностью течь без трения. Частицы с полужелым спином (например, электроны) – фермионы – напротив, подчиняются принципу Паули, запрещающему двум и более частицам занимать одно и то же квантовое состояние. Фермионы как таковые не образуют БЭК. Однако они могут объединиться в пары – бозеподобные составные объекты, обладающие целочисленным спином и способные конденсироваться в макроскопическое квантовое состояние. Например, бездиссипативный перенос заряда в сверхпроводниках осуществляется за счет пар электронов – так называемых куперовских пар. Ключевой характеристикой систем со спаренными фермионами является сила межфермионного взаимодействия, которая определяет энергию связи фермионов в паре и размер пары, а следовательно – и макроскопические свойства этих систем. При слабой связи образуется сверхпроводящее состояние типа БКШ, в котором размер пары (длина когерентности) ξ значительно превышает среднее расстояние d между парами. При сильной связи фермионы группируются в локальные пары, которые конденсируются в молекулярный БЭК с $\xi \ll d$.

Хотя в первых экспериментах с газами ферми-атомов (таких, как 6Li и ${}^{40}K$) действительно был обнаружен конденсат фермионных пар, не удалось доказать его сверхтекучесть. Однозначным свидетельством сверхтекучести могло бы стать наблюдение вихрей, которые формируются во вращающейся сверхтекучей жидкости вследствие квантования углового момента (каждый вихрь несет на себе один квант момента). Наличие вихрей есть прямое следствие существования макроскопической волно-

вой функции конденсата. Вихри отталкиваются друг от друга, образуя упорядоченную структуру. Вихревые решетки наблюдаются как в сверхпроводниках, так и в конденсатах бозе-атомов (рис. 1а). Вихревые решетки наблюдаются как в сверхпроводниках, так и в конденсатах бозе-атомов (рис. 1а). В работе [2] вихри впервые обнаружены в ферми-газе из атомов 6Li , который помещали в лазерную ловушку цилиндрической формы и затем приводили во вращение двумя дополнительными противоположно направленными лазерными пучками. Для визуализации вихрей была разработана оригинальная методика, основанная на расширении газа после выключения лазеров, создающих ловушку. Проблема здесь состояла в том, чтобы успеть “разглядеть” вихри, когда они уже увеличились в размере, но еще не исчезли. Время формирования вихревой решетки (порядка одной секунды) в сотни раз превышало характерное время расширения газа, что исключает возможность образования вихрей на стадии расширения. Регулируя силу межатомного взаимодействия путем изменения внешнего магнитного поля, авторы [2] наблюдали вихри как при $\xi \ll d$ (рис. 1b), так и при $\xi \approx d$ (рис. 1c). Дальнейшие исследования сверхтекучести ферми-газов в режиме кроссовера БЭК-БКШ могут помочь разобраться с механизмом высокотемпературной сверхпроводимости, а также лучше понять поведение таких далеких от конденсированного вещества физических объектов как нейтронные звезды и кварк-глюонная плазма.

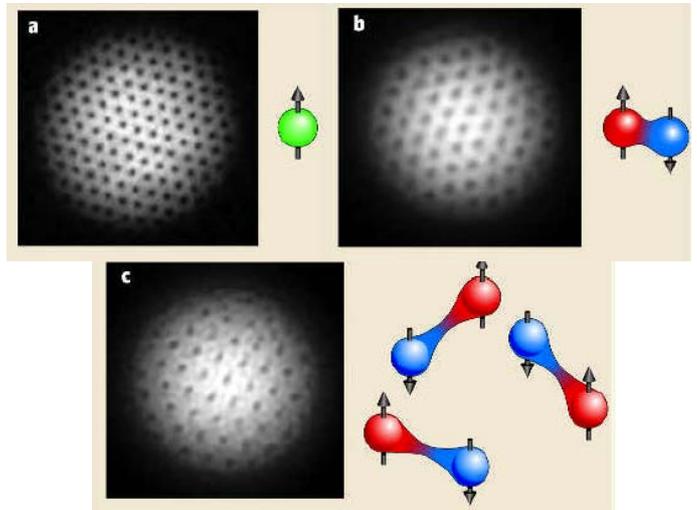


Рис.1. Вихревые структуры во вращающихся сверхтекучих системах: (а) бозе-газ атомов натрия; (b) ферми-газ 6Li с сильным спаривающим взаимодействием и слабым взаимодействием между парами 6Li_2 ; (c) ферми-газ 6Li со слабым спаривающим взаимодействием и сильным взаимодействием между парами 6Li_2

Л. Опенов

1. Nature 2003, 426, 537
2. Nature 2005, 435, 1047

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Процессы с участием однослойных нанотрубок, селективные по отношению к их диаметру

Реализации потенциала углеродных нанотрубок (УНТ) препятствует значительное разнообразие структур, которое наблюдается в образцах, содержащих УНТ. Нанотрубки, синтезируемые методами термического разложения графита или термокаталитического пиролиза углеводородов, характеризуются достаточно широким распределением по диаметрам, а также по индексам хиральности. Это означает соответствующий разброс в электронных характеристиках УНТ, таких как ширина запрещенной зоны, концентрация носителей, электропроводность и т.д. В такой ситуации трудно рассчитывать на широкое развитие электронных нанотехнологий на основе УНТ. В связи с этим предпринимаются значительные усилия, направленные на разработку методов селекции УНТ по структурным параметрам (диаметру и хиральности).

Одна из недавних интересных работ на эту тему выполнена в Венском университете и посвящена исследованию двухслойных нанотрубок методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Напомним, что частота «радиальной дышащей моды», проявляющейся в спектре КР, обратно пропорциональна диаметру нанотрубки, поэтому спектр КР образца содержит информацию о распределении нанотрубок по диаметрам. Двухслойные УНТ были получены из «стручков», представляющих собой однослойные нанотрубки, заполненные молекулами C_{60} либо C_{70} . Как известно, такой стручок преобразуется в двухслойную нанотрубку в результате термообработки. Как следует из анализа спектров КР, исходные образцы однослойных УНТ характеризовались средним диаметром от 1.35 до 1.5 нм с разбросом около 0.1 нм. Диаметр внутренних нанотрубок, образующихся в результате термообработки стручков, на 0.72 нм меньше, чем диаметр соответствующих внешних нанотрубок, образующих двухслойные нанотрубки. Тем самым распределение внутренних нанотрубок по диаметрам повторяет соответствующее распределение внешних нанотрубок со смещением, равным 0.72 нм. При этом расстояние между соседними пиками в спектре КР, соответствующем внутренним нанотрубкам, оказывается значительно больше, а ширина соответствующих линий примерно в 10 раз меньше, чем для соответствующих внешних нанотрубок. Таким образом, спектр КР внутренних нанотрубок несет более подробную информацию о распределении по диаметрам внешних нанотрубок, нежели соответствующий спектр внешних нанотрубок. Данная особенность спектров КР позволила авторам исследовать селективность процессов, происходящих при участии внешних УНТ, на основании анализа КР спектров внутренних УНТ.

Перст, 2005, том 12, выпуск 15/16

Исследования показали, что термообработка однослойных УНТ с открытыми концами в течение 40 мин при 800°C приводит к частичному закрытию концов УНТ. При этом наиболее чувствительными к термообработке оказались нанотрубки меньшего диаметра, которые оказались практически полностью закрытыми после окончания обработки. Это следует из того факта, что последующее заполнение нанотрубок молекулами фуллерена C_{60} оказалось возможным только для нанотрубок большего диаметра, имеющих раскрытые концы. Тем самым продемонстрирована селективность процесса закрытия нанотрубок по отношению к их диаметру. Аналогичные результаты получены и при заполнении нанотрубок молекулами фуллерена C_{70} .

А.Елецкий

1. Phys. Rev. B 2005, 71, 165439

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Релаксация электронного спина в квантовых точках

Спины электронов, локализованных в квантовых точках, рассматриваются как возможные кандидаты в носители информации для вычислительных устройств нового поколения. Есть, правда, одно «но»: очень маленькое время релаксации $\tau \sim 1$ пс, по прошествии которого спин «забывает» о своем первоначальном направлении. Релаксация электронных спинов может быть вызвана спин-орбитальным взаимодействием, влиянием ядерных спинов и рядом других причин. В работе [1] показано, что величину τ можно увеличить на несколько порядков, просто поместив квантовые точки во внешнее магнитное поле. Авторы [1] исследовали систему из двух квантовых точек $GaAs$ с двумя электронами (рис.1).

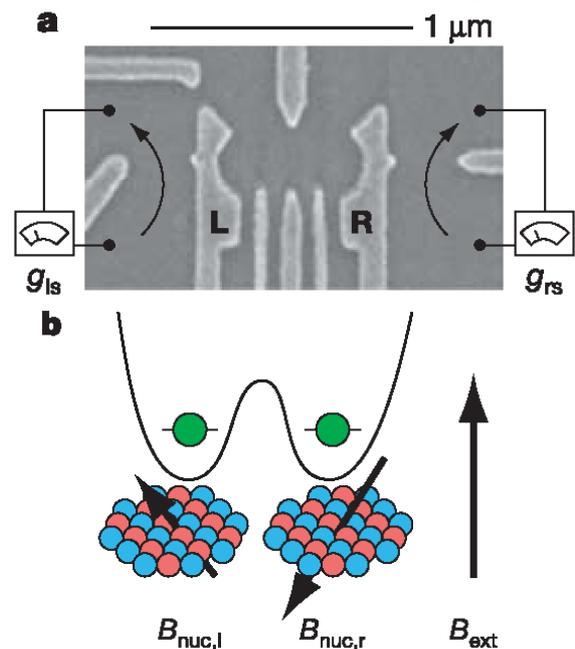


Рис.1 Пара туннельно-связанных квантовых точек в двумерном электронном газе. (а) Микрофотография устройства; (б) Двухъямный потенциал конфайнмента для электронов.

Изменение локальных электрических потенциалов позволяло контролировать распределение электронов между квантовыми точками и изучать конфигурации (1,1), (0,2), (2,0), где цифры в скобках обозначают число электронов в левой и правой точке. Эксперимент проводился при $T \approx 0.1\text{K}$. Начальное состояние представляло собой неполяризованную смесь четырех почти вырожденных состояний (1,1): одного синглетного (1,1) S и трех триплетных (1,1) T . Экспериментально определялось время перехода в синглетное состояние (0,2) S вследствие туннелирования одного электрона из левой квантовой точки в правую при соответствующем изменении локального потенциала на последней (среднее число электронов в левой точке измерялось при помощи квантового точечного контакта). Поскольку туннелирование сохраняет спин, то оно возможно только из синглетного (1,1) S , но не из триплетного (1,1) T состояния. Следовательно, время перехода (1,1) \rightarrow (0,2) определяется временем τ релаксации триплет \rightarrow синглет. Как показано в [1], основной вклад в скорость релаксации дает взаимодействие электронов со случайно ориентированными ядерными спинами. Из рис.2 видно, что увеличение внешнего магнитного поля до $B_{ext} = 150\text{mT}$ приводит к росту τ на три порядка, до 0.01с.

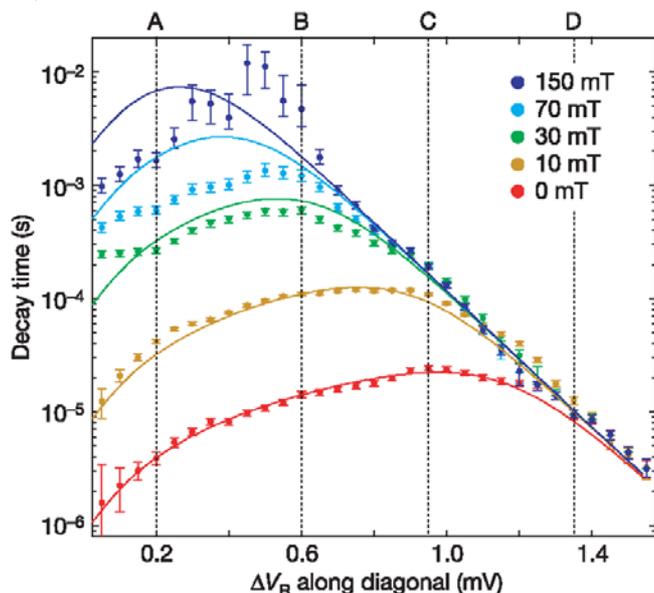


Рис.2. Время спиновой релаксации как функция напряжения на правой квантовой точке при различ-

ных значениях индукции магнитного поля. Точки – эксперимент, сплошные линии – теория.

Модель авторов предполагает, что релаксация спина обусловлена его прецессией вокруг направления полного магнитного поля, которое включает внешнее магнитное поле, ориентированное вдоль спина электрона, а также случайное магнитное поле, создаваемое спинами ядер атомов решетки. Если внешнее магнитное поле превышает поле решетки, то прецессия не может значительно отклонить направление электронного спина в квантовых точках, что означает замедление релаксации. При $\tau < 1\text{ms}$ теория отлично согласуется с экспериментом. При $\tau > 1\text{ms}$ становится все более существенным вклад спин-орбитального взаимодействия, которое не позволяет сколь угодно увеличивать τ только за счет увеличения B_{ext} . Время дефазировки $T_2^* \approx 9\text{ns}$ в исследованной наноструктуре гораздо меньше времени релаксации и не зависит от B_{ext} . Как показано в [1], оно может быть увеличено лишь до характерного времени корреляции ядерных спинов $\sim 0.1\text{ms}$, и то пока чисто теоретически.

В.Вьюрков, Л.Опенов

I. A.C.Johnson et al., Nature 2005, 435, 925

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

В планах Intel - 45нм чипы

Intel - самая большая в мире компания по производству полупроводниковых чипов, анонсировала строительство своего нового завода вблизи Phoenix (шт. Аризона) стоимостью 3 млрд. долл. Это будет первый в мире завод по производству чипов с минимальным размером компонентов 45нм на кремниевых пластинах диаметром 300мм.

I. Nature 2005, 436, 625

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РИЦ «Курчатовский институт» при поддержке
Программы Президиума РАН «Информатизация»

Редактор: С.Корецкая тел: (095) 930 3389, e-mail: stk@issp.ras.ru

Научный консультант: К.Кугель e-mail: kugel@orc.ru

В подготовке выпуска принимали участие: В.Вьюрков, А.Елецкий, Ю.Метлин, Л.Опенов, С.Чикичев

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Ю.Мухин

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