

В этом выпуске:

## МИКРОТЕХНОЛОГИИ

### Флэш по-сибирски

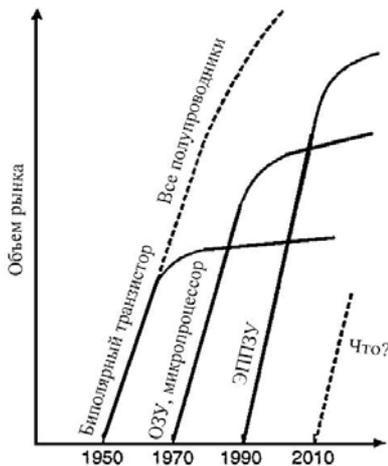


Рис. 1. Двигатели рынка полупроводниковых приборов в историческом разрезе.

Флэш-память – это быстрое электрически перепрограммируемое запоминающее устройство (ЭППЗУ), которое подобно магнитной памяти сохраняет информацию при отключенном питании. Если взглянуть на историю полупроводниковой техники с рыночной точки зрения (см. рис. 1), то можно увидеть, что схемы флэш-памяти появились на рынке в начале 90-х годов

и в настоящее время уверенно выходят на лидирующие позиции. Доминирование флэш-памяти на рынке связано с тем, что она находит широкое применение в относительно недорогих устройствах массового сбыта: компьютеры, видеокамеры, цифровые фотоаппараты, мобильные телефоны, плееры, банковские карточки (smart cards), пропуска и т. д. Хранителем битов в таком ЗУ является транзистор, под затвором которого находится окруженная диэлектриком запоминающая среда. Известно, что каждый потребитель хочет иметь всё больше битов за всё меньше денег. Менее известно, почему это не всегда удаётся. Перст обратился с вопросом к известному специалисту по ЭППЗУ, д.ф.-м.н. В.А.Гриценко (ИФП СО РАН).

*Владимир Алексеевич! Какие физические и технологические проблемы тормозят сегодня победное шествие схем флэш-памяти по маршруту мега-гига-тера? И как их преодолеть?*

В.А.Г. Существует два основных вида ЭППЗУ. В приборах с плавающим затвором в качестве запоминающей среды выступает поликремний, изолированный от канала и затвора транзистора диэлектриком. Программирование такого элемента памяти осуществляется путем инжекции электронов из кремния в плавающий затвор туннельным механизмом Фаулера-Нордгейма, либо за счет разогрева электронов в канале. Накопление электронов в плавающем затворе (поликремнии) приводит к переводу запоминающего транзистора в непроводящее состояние (отсутствие канала - логический "0"). Перепрограммирование такого прибора осуществляется путем подачи на управляющий затвор отрицательного потенциала электроны из плавающего затвора туннелируют обратно в кремниевую подложку. При этом в подложке образуется проводящий инверсионный канал (логическая "1") Масштабирование такого флэш-элемента памяти сопряжено с серьезными трудностями из-за стекания заряда через окисел в

И далее ...

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 3 И все-таки водород будет храниться в углеродных наноструктурах?
- 4 Новый тип нанотермометра
- 5 Сети однослойных нанотрубок  
Электромеханический осциллятор на основе углеродной нанотрубки
- 6 Открытие и закрытие однослойных углеродных нанотрубок

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- 7 Трение и адгезия: от континуальных моделей к микроскопике

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 7 Локализация двумя электронами
- 8 Обратная связь подавляет декогерентность

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 **October 3-7, 2005.** The International Conference "Micro- and nanoelectronics – 2005" (ICMNE-2005) and co-located Symposium "Quantum Informatics - 2005" (QI-2005). Zvenigorod, Moscow region.

## СЕГОДНЯШНИЕ РЕКОРДЫ

**11.07.2005.** Самая длинная прядь из углеродных одностенных нанотрубок – 15 см

Пряди из жгутов ориентированных ОСНТ получены в дуговом разряде. Диаметр жгутов ~30нм, диаметр прядей ~ 10-100мкм, направление ориентации – вдоль оси пряди. Длина пряди достигает 15см. Такие макрообразцы проявляют улучшенные автоэмиссионные свойства и перспективны для применений в качестве источников электронов в различных приборах.

Авторы Ch.Liu, Yu.Tong, H.-M.Cheng (Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China), D.Golberg and Y.Bando (National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki, Japan)

Источник *Appl.Phys.Lett.* 2005, **86**, 223114  
Информацию представила О.Алексеева

кремниевую подложку. В то же время именно масштабирование (уменьшения размеров) и приводит к увеличению информационной емкости флэш-памяти. В настоящее время максимальная емкость флэш-памяти, доступной на рынке, составляет 4ГБ ( $10^9$  бит/кристалл).

Другой тип ЭПЗУ основан на эффекте локализации электронов в тонких (~5нм) аморфных пленках нитрида кремния  $Si_3N_4$ . Нитрид кремния обладает эффектом памяти - свойством локализовать инжектированные в него электроны и дырки. Время жизни электронов в локализованном состоянии составляет более 10 лет. В качестве запоминающих структур в таких элементах памяти выступают silicon-oxide-nitride-oxide structures - SONOS ( $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2-polySi$ ) (рис. 2). Через нижний туннельный окисел  $SiO_2$  толщиной 1.8нм электроны или дырки туннелируют в нитрид кремния и захватываются в нем на ловушки. Верхний "толстый" окисел толщиной 5нм блокирует инжекцию электронов из поликремниевго затвора в нитрид кремния.

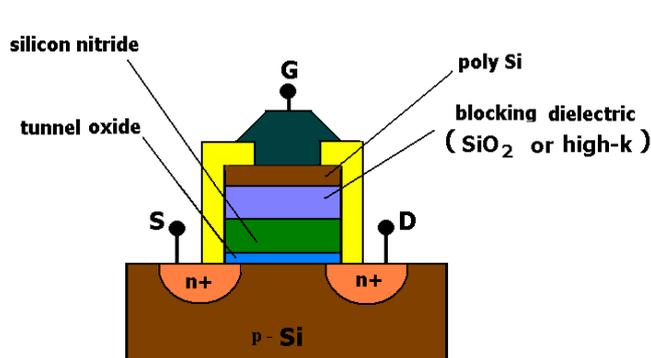


Рис.2. Структурная схема элементарной ячейки флэш-памяти.

В Институте физики полупроводников СО РАН получен патент на SONOS FLASH [1] с использованием в качестве блокирующего диэлектрика плёнок с высокой диэлектрической проницаемостью  $k$  (high- $k$  dielectrics), таких, как  $Al_2O_3$  ( $k=10$ ),  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$  ( $k=25$ ) - см. рис. 2 [1-3].

При фиксированном напряжении перепрограммирования замена блокирующего  $SiO_2$  с диэлектрической проницаемостью  $k=4$  на альтернативный диэлектрик приводит к увеличению электрического поля в туннельном окисле (рис. 3). Ток инжекции электронов и дырок из кремниевой подложки экспоненциально зависит от электрического поля в туннельном окисле. Мы рассчитали зависимости порогового напряжения запоминающего флэш-транзистора как функцию длительности перепрограммирующего импульса для структур  $Si-SiO_2-Si_3N_4-Al_2O_3-polySi$  и  $Si-SiO_2-Si_3N_4-ZrO_2-polySi$ .

Замена блокирующего  $SiO_2$  на альтернативный диэлектрик  $Al_2O_3$  или  $ZrO_2$  приводит к экспоненци-

ально сильному (на 5-8 порядков) увеличению тока перепрограммирования. За счет возрастания тока перепрограммирования структур  $Si-SiO_2-Si_3N_4-Al_2O_3-polySi$  на два порядка уменьшается длительность перепрограммирующего импульса, возрастает быстродействие предложенного флэш-элемента памяти в режиме перепрограммирования (рис. 4). Быстродействие в режиме перепрограммирования является важным параметром флэш-памяти, так как при увеличении объема памяти время перепрограммирования является критичным параметром. Были рассчитаны также запоминающие свойства структур  $Si-SiO_2-Si_3N_4-ZrO_2-polySi$ . Применение  $ZrO_2$  в качестве блокирующего слоя позволяет уменьшить напряжение перепрограммирования с -9/+10В до -6/+7В. Уменьшение напряжения перепрограммирования до -6/+7В приводит к увеличению надежности и процента выхода флэш-элементов памяти. Это связано с меньшей вероятностью пробоя  $p-n$  переходов и диэлектрика.

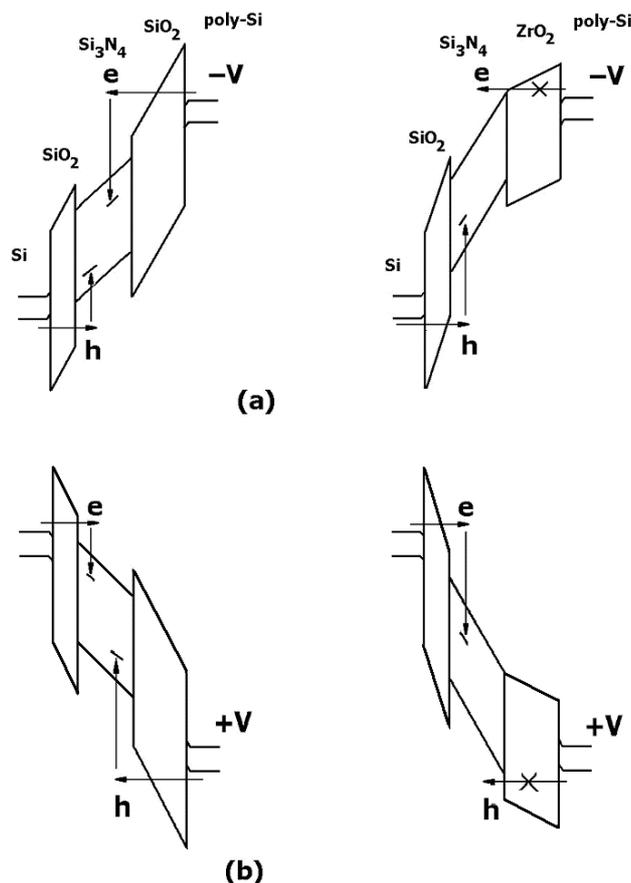


Рис.3. Физика работы флэш-памяти (а-запись, б-стирание информации). Слева – обычная SONOS, справа – сибирская с high- $k$  диэлектриком вместо подзатворного  $SiO_2$ . Перечёркнутая стрелка означает, что процесс подавлен.

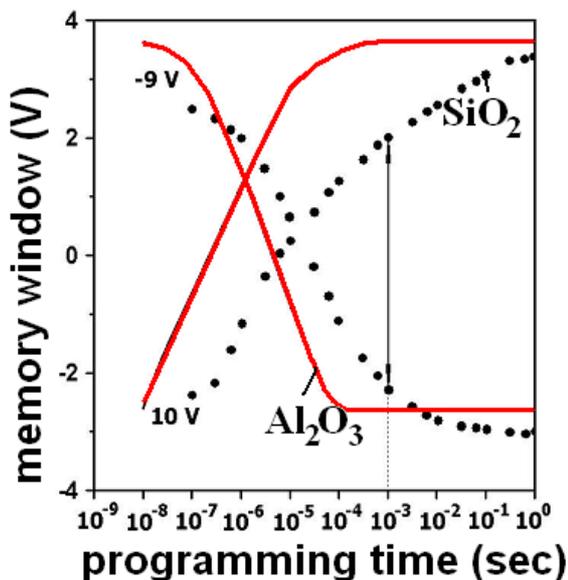


Рис.4. Основная характеристика любой флэш-памяти: «окно памяти» в зависимости от времени перепрограммирования

Таким образом, применение в конструкции SONOS FLASH диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью открывает принципиальную возможность масштабировать и увеличивать емкость флэш от гигабитного до терабитного масштаба.

1. V. A. Gritsenko, *Memory Device for EEPROM. Patent Russia, No. 2003103143/09(003159), 03.02.2003*
2. V. A. Gritsenko, K. A. Nasyrov, Yu. N. Novikov, A. L. Aseev. *High-Permittivity-Insulator EEPROM Cell Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>, Russian Microelectronics, 2003, 32, No. 2, p. 90*
3. V. A. Gritsenko, K. A. Nasyrov, Yu. N. Novikov, A. L. Aseev, S. Y. Yoon, J.-W. Lee, E.-H. Lee, C. W. Kim, *A new low voltage fast SONOS memory with high-k dielectric. Solid-State Electronics, 2003, 47, No. 10, p. 1651*

Интервью записал С. Чикичев

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### И все-таки водород будет храниться в углеродных наноструктурах?

Необходимость создания эффективных хранилищ водорода для автомобилей на топливных элементах заставляет ученых продолжать поиски новых сорбентов и/или новых подходов. Углеродные наноструктуры, несмотря на проявившийся в последнее время пессимизм, остаются в центре внимания. Авторы [1] Yu. Zhao, Y.-H. Kim, A. C. Dillon, M. J. Heben, and S. B. Zhang из National Renewable Energy Laboratory (Golden, Colorado, США) предлагают в качестве адсорбентов новые соединения фуллеренов (organometallic buckyballs - "OBB" в терминологии авторов), а именно фуллерены, с которыми связаны атомы переходных металлов (ПМ). Это совершенно новая концепция хранения водорода в

молекулярном виде. В работе теоретически показано, что количество водорода, обратимо извлекаемого при комнатной температуре и давлении, близком к атмосферному, может достигать 9 масс.%! Некоторые подробности.

В своих предыдущих работах авторы измерили энергии связи недиссоциативной адсорбции водорода как на одностенных (~20 кДж/моль) [2], так и на многостенных углеродных нанотрубках (~54 кДж/моль) [3] в присутствии наноразмерных ПМ. Значения энергии связи оказались существенно выше, чем для обычной ван-дер-ваальсовой адсорбции молекулярного водорода на углероде и значительно ниже, чем для хемосорбции атомарного водорода на поверхности металла. Наличие следовых количеств переходных металлов привело к повышенной сорбционной емкости по водороду при умеренной энергии связи. Это явилось стимулом поиска способа, которым можно было бы сконструировать новые адсорбенты, способные хранить большие количества водорода.

Авторы [1] предлагают новые металлоорганические молекулы на базе C<sub>60</sub>. Модель основана на том факте, что как H<sub>2</sub>, так и циклопентадиеновые кольца (Cp=C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>) могут действовать как лиганды для ПМ. Авторы показывают, что комплекс Cp[ScH<sub>2</sub>] способен хранить 6.7% недиссоциированного H<sub>2</sub>, однако, после удаления водорода эти комплексы могут полимеризоваться, что делает процесс необратимым. Оказывается, этого можно избежать, если симметрично распределить такие комплексы на фуллеренах, например, как C<sub>60</sub>[ScH<sub>2</sub>]<sub>12</sub> и C<sub>48</sub>B<sub>12</sub>[ScH]<sub>12</sub>. Образуются стабильные системы, способные обратимо адсорбировать дополнительный водород, при этом достигается емкость 7.0 и 8.77 масс. %, соответственно. Более того, обратимо извлекаемый водород "хранится" с энергией связи ~ 0.3-0.4 эВ, что идеально для транспортных целей. Очень важно отметить, что такие системы на являются всего лишь красивыми теоретическими моделями. Стабильные фуллерены и нанотрубки, покрытые переходными металлами, уже были синтезированы [4,5]. В модели [1] базисной единицей построения более сложных металлоорганических молекул является CpM. Авторы вычислили энергии связи в системах CpM для M=Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni; рассмотрели связь между комплексом CpM и водородом и вычислили энергии связи на H<sub>2</sub> при адсорбции дополнительных молекул водорода в этих системах. Подробно были изучены системы CpSc-водород и C<sub>60</sub>Sc<sub>12</sub>-водород. В соответствии с расчетами энергия связи Sc в C<sub>60</sub>[ScH<sub>2</sub>]<sub>12</sub> равна 2.8 эВ/Sc, что на 0.95 эВ/Sc выше, чем без водорода. OBB C<sub>60</sub>[ScH<sub>2</sub>]<sub>12</sub> аналогично изолированному Cp[ScH<sub>2</sub>] может связывать четыре дополнительных молекулы водорода на Sc, образуя C<sub>60</sub>[ScH<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>)<sub>4</sub>]<sub>12</sub> (рис.1а), что соответствует емкости 7.0 масс.%. Добавляя бор (напомним, что такие системы были синтезированы), можно

повысить стабильность и уменьшить вес фуллера. Энергия связи в  $OBV C_{48}B_{12}[ScH]_{12}$  увеличивается еще больше - до 3.6 эВ/Sc, почти до значения энергии связи в  $CpSc$ , равного 3.76эВ/Sc. Важно, что  $OBV$  с добавками бора не только более стабильны, но и позволяют связывать на одну молекулу водорода на Sc больше -  $C_{48}B_{12}[ScH(H_2)_5]_{12}$  (рис.1b). То есть в таком  $OBV$  на один атом Sc приходится 11 атомов водорода, 10 из которых (в молекулярной форме) могут обратимо адсорбироваться и десорбироваться. Энергия связи составляет 0.3эВ/ $H_2$ . Обратимо извлекаемое при комнатной температуре количество водорода соответствует 8.77масс.%. Объемная плотность для плотноупакованной структуры из  $C_{48}B_{12}[ScH(H_2)_5]_{12}$  по оценкам может достигать 43кг  $H_2/m^3$ .

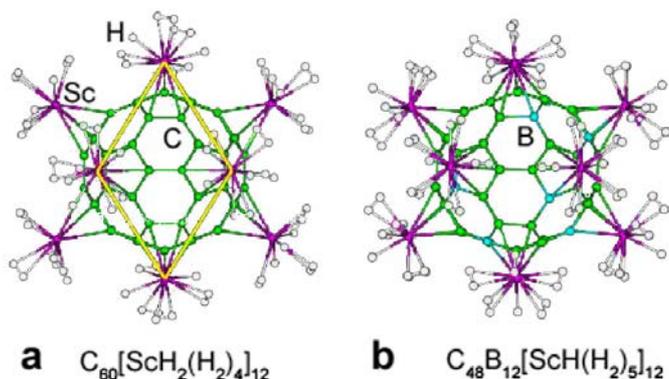


Рис.1. **a)** Оптимизированная атомная структура  $C_{60}[ScH_2(H_2)_4]_{12}$ ; **b)** Оптимизированная атомная структура  $C_{48}B_{12}[ScH(H_2)_5]_{12}$

Конечно, возникает вопрос, как же осуществить процесс аккумуляции и выделения водорода. Модель [1] показывает, что богатые водородом фазы становятся более стабильными при росте давления водорода. Например,  $Cp[ScH_2]$  спонтанно поглощает молекулярный водород, образуя  $Cp[ScH_2(H_2)_4]$  при всех давлениях выше ~ 1атм. (Как уже говорилось, к сожалению,  $Cp[ScH_2]$  после освобождения водорода может полимеризоваться).  $OBV C_{60}[ScH_2]_{12}$  и  $C_{48}B_{12}[ScH]_{12}$  также спонтанно адсорбируют молекулярный водород при умеренных давлениях, но до большего содержания водорода. Так же, как и в случае изолированного  $Cp[ScH_2]$ , водород освобождается при некотором падении давления - ниже 0.53атм. для  $C_{60}[ScH_2(H_2)_4]_{12}$  и 1.40атм. для  $C_{48}B_{12}[ScH(H_2)_5]_{12}$ . При этом полимеризации не происходит. Вычисления из первых принципов показывают также, что рассмотренные  $OBV$  стабильны относительно распада на различные кластеры Sc-водород- $C_{60}$  или  $C_{48}B_{12}$ . Авторы считают, что разработанный ими подход приведет к созданию нового класса металлоорганических сорбентов водорода, не ограниченных фуллеренами. Учитывая, что в авторском коллективе - А.С.Диллон и М.Дж. Небен, первые наблюдавшие повышенную сорбцию водорода одностенными углеродными нанотрубками, можно предположить, что

через некоторое время они опубликуют экспериментальное подтверждение своей теоретической модели [1].

О.Алексеева

1. *Phys.Rev.Lett.* 2005, **94**, 155504
2. *Nature* 1997, **386**, 377
3. *Mater.Res.Soc.Symp.Proc.* 2003, **801**,167
4. *Appl.Phys.Lett.* 2000, **77**, 3015
5. <http://cms.mpi.univie.ac.at/VASP>

### Новый тип нанотермометра

Среди возможных применений углеродных нанотрубок (УНТ) более продвинуты разработки, основанные на использовании их высоких эмиссионных характеристик. Число публикаций, выполненных на эту тему, непрерывно растет, как растет и объем получаемой информации об особенностях эмиссии электронов из УНТ в различных условиях. В недавней работе [1], выполненной в Nanyang Technological Univ. (Сингапур), установлена существенная зависимость эмиссионных характеристик многослойных УНТ от температуры. Важно подчеркнуть, что указанная зависимость наблюдается в условиях относительно низких температур, когда еще несущественна известная температурная поправка к классической зависимости Фаулера-Нордгейма, обусловленная снижением энергетического барьера для быстрых электронов.

В эксперименте источником эмиссии служила пленка из многослойных УНТ, выращенная термическим разложением ацетилена в газоразрядной плазме в смеси  $N_2:H_2:C_2H_2 = 5:3:1$  при полном давлении газа 0.7Торр и температуре 650°C в присутствии никелевого катализатора, нанесенного на кремниевую подложку. При длительности синтеза 10 минут толщина пленки составляла 7нм.

Эмиссионные характеристики полученной пленки исследовали при расстоянии между катодом и анодом 100мкм, в условиях вакуума  $1.5 \times 10^{-6}$ Торр. Значительную зависимость характеристик от температуры регистрировали в диапазоне от 300 до 600К. Увеличение температуры эмиттера в указанном диапазоне приводит к снижению величины напряженности электрического поля, при которой плотность эмиссионного тока достигает 10мкА/см<sup>2</sup>, от 6.5 до 4В/мкм. Вольт-амперная характеристика эмиттера смещается в область низких напряженностей электрического поля.

Авторы интерпретируют обнаруженные особенности как результат зависимости работы выхода электронов от температуры. Обработка полученных экспериментальных данных в рамках такой интерпретации указывает на снижение работы выхода УНТ с 5 до 1эВ при увеличении температуры от 300 до 600К. Хотя физическая природа обнаруженного эффекта остается необъясненной, столь значительная температурная зависимость работы выхода может быть использована как основа для создания нового типа сверхминиатюрного термометра, показав

ния которого выражаются через величину эмиссионного тока.

*А.В.Елецкий*

1. *Appl. Phys. Lett.* 2005, **86** 263104

### **Сети однослойных нанотрубок**

Многие аналитики связывают дальнейшее развитие микроэлектроники с углеродными нанотрубками (УНТ), которые отличаются миниатюрными размерами и хорошими электрическими характеристиками, изменяющимися в значительных пределах в зависимости от геометрии. При этом возникает возможность формирования электрической сети из определенного набора УНТ. В работе [1], выполненной группой исследователей из Института физики Академии наук Китая (Пекин), сообщается о формировании двумерной сети из однослойных УНТ на стадии синтеза, что представляется значительным технологическим достижением. Синтез образцов производили методом химического осаждения паров в трехсекционной кварцевой трубке, помещенной в двухсекционную печь. В качестве катализатора использовали мелкодисперсную смесь ферроцена с серой в мольном отношении 16:1. Указанную смесь помещали в первую секцию печи, выдерживаемую при температуре 55°C, через которую прокачивали аргон атмосферного давления с небольшой примесью (на уровне 0.1%) ацетилена. Этот газ вместе с некоторым количеством сублимированного катализатора подавали через узкую соединительную трубку в реакционную камеру, помещенную во вторую секцию печи, которую поддерживали при температуре 1100°C. Термокаталитическое разложение ацетилена на катализаторе приводило к образованию на кремниевой подложке, помещенной на выходе из реакционной камеры, двумерной сети, составленной из однослойных УНТ. Как следует из результатов наблюдений, выполненных с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения и атомного силового микроскопа, полученные УНТ имеют диаметр от 0.7 до 3 нм. Важной особенностью полученных сетей является тот факт, что нанотрубки, составляющие сети, не объединены в жгуты. Еще одной отличительной чертой этого объекта является плавный характер изгибов нанотрубок при практически полном отсутствии коленообразных и спиралевидных изгибов. Кроме того, авторы отмечают возможность управления плотностью получаемых сетей, которая, с одной стороны, зависит от положения точки на подложке, а, с другой стороны, в оптимальном режиме синтеза пропорциональна длительности процесса.

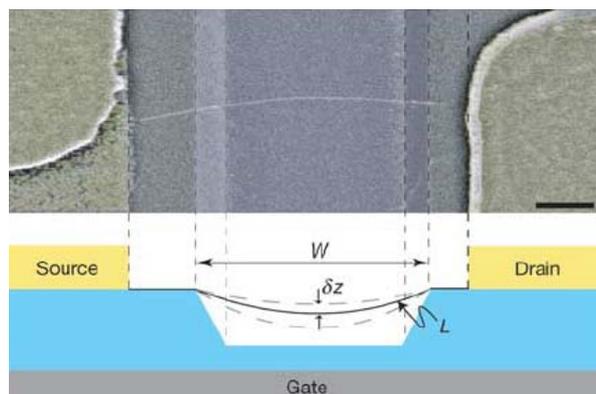
*А.В.Елецкий*

1. *J. Phys. Chem. B* 2004, **108**, 10751

### **Электромеханический осциллятор на основе углеродной нанотрубки**

В последние годы обострился интерес исследователей и инженеров к разработке так называемых *Нанотрубок*, **2005, том 12, выпуск 14**

ноэлектромеханических систем (НЭМС), действие которых основано на взаимосвязи электрических и механических характеристик нанометровых объектов. Типичным примером таких систем могут служить углеродные нанотрубки (УНТ), электрические характеристики которых (проводимость, ширина запрещенной зоны и т.п.) проявляют зависимость от угла изгиба. Установлению указанной зависимости было посвящено достаточно много экспериментальных работ, однако в настоящее время наблюдается переход от исследования физических характеристик объектов к созданию прототипа будущих приборов, действие которых основано на таких характеристиках. Один из таких приборов разработан и описан недавно сотрудниками Корнельского университета (США).



Индивидуальную УНТ диаметром 1–4 нм, содержащую один или несколько слоев и выращенную методом химического осаждения из паровой фазы, подвешивали между двумя электродами над углублением шириной 1.2–1.5 мкм и глубиной 500 нм. Потенциал, вызывающий механическое воздействие на нанотрубку, подавали через помещенный под ней затворный электрод. Потенциал имеет как статическую, так и синусоидально зависящую от времени составляющие. При этом результат воздействия переменного напряжения на нанотрубку имеет резонансный характер, так что при частоте изменения напряжения, близкой к собственной частоте колебаний нанотрубки, амплитуда колебания максимальна. Измерения показывают, что собственная частота колебаний различных УНТ находится в диапазоне нескольких десятков МГц. Значение добротности осциллятора для различных нанотрубок варьируется в пределах от 40 до 200. При этом, поскольку основной механизм затухания осцилляций связан с вязкостью газа, наблюдается обратно пропорциональная зависимость добротности от давления воздуха. Осцилляции вовсе не наблюдаются при давлениях выше 10 Торр.

Важной особенностью описываемого осциллятора нанометровых размеров является зависимость собственной частоты осциллятора от величины статической составляющей приложенного напряжения. Как следует из результатов модельных расчетов, подтвержденных соответствующими измерениями, характер изменения резонансной частоты зависит

от приложенного напряжения. При малых напряжениях имеет место квадратичная зависимость, в области промежуточных напряжений указанная зависимость становится линейной, а при повышенных напряжениях изменение резонансной частоты пропорционально приложенному напряжению в степени две третьих. Величины напряжения, при которых происходит переход от одной зависимости к другой, определяются степенью провисания нанотрубки над контактами. Результаты измерений резонансной частоты колебаний нанотрубок позволили определить значения упругой постоянной, составляющие для различных УНТ величину порядка  $10^{-4}$  Н/м. Описанный осциллятор может быть использован в качестве основы для создания сверхчувствительного миниатюрного датчика механических напряжений. Оценки показывают, что спектральная чувствительность такого датчика составляет примерно  $10^{-15}$  Н/Гц<sup>1/2</sup> и на порядок превосходит лучшие показатели коммерческих устройств.

*А.В.Елецкий*

1. *Nature* 2004, **431** 284

### **Открытие и закрытие однослойных углеродных нанотрубок**

Углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие внутренней полостью, рассматриваются в качестве перспективного средства для хранения газообразных, жидких и твердых материалов, а также для создания электрохимических устройств. Реализация этих перспектив зависит от возможности раскрытия головок УНТ с тем, чтобы обеспечить доступ материала внутрь полости и их последующего закрытия, с тем, чтобы воспрепятствовать самопроизвольному выходу материала наружу. В то время как методы раскрытия УНТ, основанные на использовании сильных окислителей, разработаны достаточно давно, до сих пор не существовало достаточно хорошо отработанной процедуры закрытия объединенных в жгуты УНТ. Подобная процедура была разработана группой исследователей из Zhejiang University (Китай) совместно с University of North Carolina (США). Однослойные УНТ синтезировали методом лазерной абляции изотопически обогащенного графита (10% <sup>13</sup>C) в присутствии Ni/Co катализатора. Импульсы лазерного излучения с  $\lambda = 532$  нм длительностью 5 – 7 нс и энергией 400 мДж фокусировали в пятно диаметром около 3 мм. Полученный материал, содержащий УНТ, промывали последовательно в 20% растворе H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub> и метаноле, и фильтровали. Затем для уменьшения длины жгутов образец погружали в раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub> (3:1) и в течение 24 часов подвергали ультразвуковой обработке. Исследования, выполненные с помощью КР-спектрометра, рентгеновского дифрактометра и просвечивающего электронного микроскопа, показали, что очищенные образцы, не подвергнутые ультразвуковой обработке, содержат около 90% однослойных УНТ диаметром около 1.4 нм, объеди-

ненных в жгуты диаметром 30-50 нм и длиной свыше 10 мкм. В результате ультразвуковой обработки длина жгутов сократилась до ~ 0.5 мкм. Полученный образец очищенных УНТ в течение 10 часов подвергали вакуумному отжигу при температуре 400°C, что, как показывают результаты анализа микроизображений, привело к раскрытию головок большинства нанотрубок. Отжиг в течение 1 часа при температуре 800°C привел к закрытию головок 95% раскрытых нанотрубок. При этом структура закрытых головок УНТ оказалась далека от идеальной полусферы, завершающей обычно однослойную нанотрубку. Часто головки имеют плоскую либо нерегулярную многогранную структуру. Сорбционные свойства УНТ с раскрытыми и закрытыми головками по отношению к газообразному этану C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> исследовали методом ЯМР, позволяющим различать количество газообразного и сорбированного этана. Результаты измерений показывают, что сорбционная емкость раскрытых УНТ (~ 10 масс. %) примерно в 5 раз превышает соответствующее значение для нанотрубок с закрытыми головками. Это, во-первых, указывает на то, что основная часть сорбированного этана содержится во внутренней полости УНТ, а, во-вторых, на высокую эффективность используемых методов раскрытия и закрытия головок нанотрубок.

*А.В.Елецкий*

1. *Chem. Phys. Lett.* 2004, **399**, 109

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

### **Трение и адгезия: от континуальных моделей к микроскопике**

Для расчета сил адгезии и трения, действующих между соприкасающимися поверхностями твердых тел, используют методы континуальной контактной механики, основанные на линейной теории упругости. Поверхности при этом предполагаются гладкими и ровными; их атомное строение не учитывается. Например, сила, необходимая для отрыва поверхности с радиусом кривизны  $R$  от плоской подложки (см. рис. 1), находится по простой формуле  $F = 3\pi R\gamma$ , где  $\gamma$  – поверхностная энергия. Это выражение может быть обобщено и на другие геометрии путем замены  $R$  на соответствующую характеристическую длину. В некоторых случаях континуальная теория дает на удивление точные результаты, а иногда расходится с экспериментом в десятки раз. Причина этого в принципе ясна. Она заключается в том, что поверхности реальных твердых тел в большинстве случаев сильно отличаются от своих идеализированных математических образов. Их неровность существенно влияет на силу адгезии. Кроме того, в последнее время наблюдается всплеск интереса к микро- и даже наноскопическим электромеханическим устройствам. Они часто оказываются неработоспособными из-за нежелательной адгезии. А континуальные модели в принципе

не годятся для расчета их характеристик. Все это говорит о необходимости разработки новой, микроскопической теории контактных механических явлений.

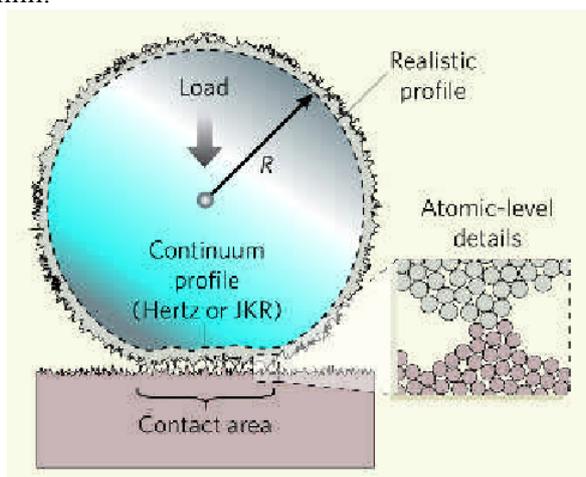


Рис.1 (из статьи [2]). Механический контакт двух твердых тел. Континуальная (пунктирная линия) и реальная форма поверхности.

Шаг в этом направлении сделан в работе [1], авторы которой из Johns Hopkins Univ. (США) использовали метод молекулярной динамики для проверки пределов применимости макроскопического описания контактирующих поверхностей. Они изучили контакты между плоской (001) подложкой из ГЦК-кристалла и тремя различными типами цилиндрических поверхностей, имеющих одинаковый радиус кривизны (рис.2): (а) изогнутой кристаллической решеткой с атомарно гладкой поверхностью, (b) поверхностью образца, вырезанного из аморфного твердого тела, и (с) "ступенчатой" поверхностью образца, вырезанного из кристалла. В случаях (b) и (с) шероховатость поверхности не превышала одного эффективного диаметра атома (одного среднего межатомного расстояния). Сначала были рассчитаны зависимости смещения  $\delta$ , контактного радиуса  $a$  и статической силы трения  $F$  от величины прижимающей силы  $N$ , направленной по нормали к подложке. Оказалось, что для всех типов поверхностей расчетные зависимости  $\delta(N)$  прекрасно согласуются с предсказаниями континуальной модели. Для зависимостей  $a(N)$  качественное соответствие численных результатов с аналитикой сохраняется, но количественное расхождение достигает 100%. Прежде всего это касается "ступенчатой" поверхности, для которой  $a$  увеличивается с ростом  $N$  не монотонно, а "скачками". Континуальное приближение может давать значительно заниженную площадь контакта, особенно при малых  $N$ . Если для гладкой и "ступенчатой" кристаллических поверхностей величина силы трения  $F$  в пределах (10 ÷ 20) % совпадает со своим ожидаемым из макроскопики значением, то для аморфного образца она оказалась в ~ 5 раз меньше. Распределение давления по области контакта также очень чувствительно к структуре поверхности на атомном уровне и в ряде случаев ка-

чественно различается даже при одинаковой шероховатости, количественно определяемой в терминах среднеквадратичного отклонения атомов от идеально гладкой поверхности. Таким образом, шероховатость является усредненной величиной, не позволяющей однозначно предсказать механические характеристики контакта без детализации конкретного вида атомного беспорядка, эту самую шероховатость создающего.

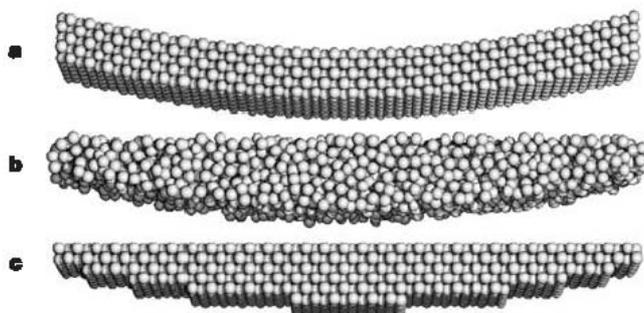


Рис. 2 (из статьи [1]). Поверхности одинакового радиуса, но с различной структурой на атомном уровне.

Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и практическое значение. Они не только позволяют лучше понять физическую природу контактных явлений, но и прокладывают путь к "поверхностной инженерии", которая позволит изготавливать контакты с требуемыми макроскопическими свойствами путем надлежащей микрообработки контактирующих поверхностей. Здесь имеется некоторая аналогия с биологическими объектами, в которых свойства белков определяются типом упаковки составляющих их "кирпичиков" – аминокислот. Впрочем, работа в новом направлении только начинается. Пока более-менее изучен лишь предельный случай малых деформаций, что отвечает контактам металлов или керамик. Для полимеров спектр контактных явлений может оказаться гораздо богаче. Кроме того, описание взаимодействия "реальных поверхностей" в режиме "реального времени" требует обязательного учета нестационарных явлений. Эти и многие другие нерешенные пока вопросы – тема дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Л.Опенев

1. B.Luan, M.O.Robbins, *Nature* 2005, **435**, 929
2. J. N. Israelachvili, *Nature* 2005, **435**, 893

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Локализация двумя электронами

В 1991 году Grossmann с коллегами предсказали интересное физическое явление – динамическую локализацию электронов. Суть его состоит в следующем. В периодической структуре, например, сверхрешетке, в результате конструктивной интерференции («волны складываются в фазе»), из-за этого образуются делокализованные состояния электронов, которые распространяются по всему кристаллу, несмотря на наличие потенциальных

барьеров. Как оказалось, приложение переменного электрического поля может вызвать обратный процесс, а именно деструктивную интерференцию, приводящую к локализации. Этот эффект уже наблюдался в сверхрешетках.

Китайские ученые (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics) предлагают использовать это явление для квантовых вычислений на периодической структуре квантовых точек или атомов [1,2]. Для этого потребовалась некоторая модернизация теории. Дело в том, что эффект Grossmann'a не дает возможность локализовать электрон в определенной квантовой точке и затем перемещать его из одной точки в другую. Авторы предлагают использовать два электрона. Учет силы отталкивания между ними обуславливает возможность их перемещения вдоль цепочки. Электроны могут выступать посредниками в организации взаимодействия между спинами ядер атомов. Как известно, квантовые вычисления было бы удобно проводить именно на ядерных спинах, поскольку они обладают огромным временем декогеренции (несколько часов). Проблема в том, как организовать взаимодействие между ними. Леонид Федичкин (тогда сотрудник ФТИАН, сейчас в Clarkson University, США) впервые предложил использовать один электрон для связи между кубитами на основе ядерных спинов [3]. Побыв некоторое время на одном атоме, электрон передвигается на другой и служит, таким образом, посредником для организации взаимодействия между ядерными спинами. Изначально предполагали, что электрон будет перемещаться с помощью управляющих затворов. Однако затворы «шумят» из-за флуктуаций напряжения. Это вносит дополнительную декогерентизацию в систему. В самом деле, гораздо лучше было бы управлять системой с помощью внешнего микроволнового излучения. Сочетание приведенных двух идей, возможно, позволит разрешить одну из важных проблем в области твердотельных квантовых компьютеров на ядерных спинах.

*В.Вьюрков*

1. *Phys. Letters A* 2005, **337**, 241
2. *J. Phys.: Condens. Matter* 2005, **17**, 4207
3. *Nanotechnology* 2001, **12**, 536

### **Обратная связь подавляет декогерентность**

А.Коротков (University of California, Riverside) предлагает использовать обратную связь для поддержания когерентных осцилляций в зарядовом кубите, состоящем из одного электрона в двойной квантовой точке. Осцилляции Раби в таком кубите заключаются в периодическом переходе электрона из одной квантовой точки в другую. Обратную связь можно организовать с помощью расположенного рядом точечного контакта. Ток в контакте чувствителен к высоте потенциального барьера, который образуется кулоновским полем электрона. Необходимым требованием является то, что связь с кубитом должна быть очень слабой, иначе это будет вносить большие возмущения в квантовую систему, каковой является кубит. Это требование соблюдается, если наведенный ток в наноконтакте, обусловленный осцилляциями Раби, значительно меньше шумового тока. Квантовая система не допускает подглядывания, если бы мы имели возможность выделить полную информацию (с учетом фазы) о колебаниях в кубите, это бы неминуемо привело к сбою фазы колебаний.

Аналогичное предложение автор уже высказывал в 2002 году, но то предложение было очень трудно осуществить на эксперименте, поскольку требовался анализатор шума с частотной полосой, намного превышающей частоту осцилляций Раби. На этот раз предлагается использовать колебательный контур, настроенный на эту частоту.

*В.Вьюрков*

*1. Microelectronics Journal 2005, 36, 253*

### **КОНФЕРЕНЦИИ 2006**

**October 3-7, 2005.** The International Conference "Micro- and nanoelectronics – 2005" (*ICMNE-2005*) and co-located Symposium "Quantum Informatics - 2005" (*QI-2005*). Zvenigorod, Moscow region.

Registration and abstract submission  
<http://www.icmne.ftian.ru>

#### **Deadline is August 15, 2005**

During the conference an equipment exhibition for micro- and nanoelectronics following SEMI Exhibition in Moscow will be organized. Companies interested in presenting their products should contact the relevant member of the Scientific secretariat.

<http://www.icmne.ftian.ru/exhib.shtml>

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](mailto:stk@issp.ras.ru)

Научный консультант: К.Кугель e-mail: [kugel@orc.ru](mailto:kugel@orc.ru)

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

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Ю.Мухин

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