

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### *Интерференция квазичастиц и сверхпроводящая щель в $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$*

Несмотря на то, что во всех высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) имеется общий структурный элемент – плоскости  $\text{CuO}_2$  – критические температуры  $T_c$  разных систем ВТСП при оптимальном допировании различаются весьма существенно, иногда на порядок. Для понимания механизма высокотемпературной сверхпроводимости необходимо изучить факторы, влияющие на  $T_c$  и на сверхпроводящую щель (СЩ). Так как СЩ является одним из основных атрибутов сверхпроводящего состояния, то очень важно иметь как можно более детальную информацию о ее структуре в импульсном пространстве. На сегодняшний день считается общепризнанным, что СЩ в ВТСП имеет  $d$ -волновую симметрию и поэтому равна нулю на линиях  $(0,0)$ - $(\pm\pi,\pm\pi)$ , называемых узлами. Однако экспериментальным исследованиям СЩ спектроскопическими методами сильно мешает наличие в ВТСП псевдощели: часто бывает совершенно непонятно, какую же энергетическую щель мы «видим» – СЩ или псевдощель. Ряд экспериментов указывает на то, что в недодопированных образцах СЩ присутствует не на всем контуре Ферми, а лишь на его четырех участках, расположенных в окрестности узлов и называемых фермиевскими дугами (длина этих дуг увеличивается с ростом концентрации носителей).

Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС) позволяет отличить СЩ от псевдощели по характерной модуляции туннельной проводимости, обусловленной эффектом интерференции когерентных боголюбовских квазичастиц (которых нет в несверхпроводящем псевдощелевом состоянии). До сих пор такая модуляция наблюдалась только в монокристаллах  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  ( $\text{Bi}2212$ ) с  $T_c = 86$  К (для других систем ВТСП качество поверхности скола не удовлетворяло требованиям СТС). В работе [1] японские, американские и канадские физики сообщили об измерении СТС-спектров в оптимально допированных монокристаллах  $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$  ( $\text{Na-CCOC}$ ) с  $x = 0.14$  и  $T_c = 28$  К. Путем тщательного анализа полученных результатов они смогли разделить вклад в туннельную проводимость от боголюбовских квазичастиц и от некогерентного бездиссипативного «шахматного» порядка и таким образом определить положение контура Ферми в плоскости  $(k_x, k_y)$  и дисперсию СЩ (см. рис.). Как и в других ВТСП, контур Ферми имеет округлую форму с центром в точке  $(\pi, \pi)$ , но вдали от узлов СЩ интерференции квазичастиц не наблюдается, что говорит об отсутствии в этой области импульсного пространства когерентных квазичастиц. Иными словами, контур Ферми не является замкнутым (как в  $\text{Bi}2212$  с оптимальным допированием), а разбивается на фермиевские дуги (как в недодопированных ВТСП). При всем при этом дисперсия СЩ в окрестности узлов практически совпадает с таковой в оптимально допированном  $\text{Bi}2212$ . Если учесть, что  $T_c$  оптимально допированных  $\text{Na-CCOC}$  и  $\text{Bi}2212$  различаются в три раза,

И далее ...

- 2 Нефоновная сверхпроводимость в ВТСП с электронным допированием?

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Квантовый спиновый эффект Холла

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 3 Структура кластеров золота

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Рентгеновская трубка с катодом из углеродных нанотрубок и рекордным размером фокусного пятна
- 5 Эмиссионные характеристики полевого катода из УНТ, выращенных на массиве из столбиков нанопористого кремния

## СПИНТРОНИКА

- 6 Ферротороидные домены: новый вид памяти?

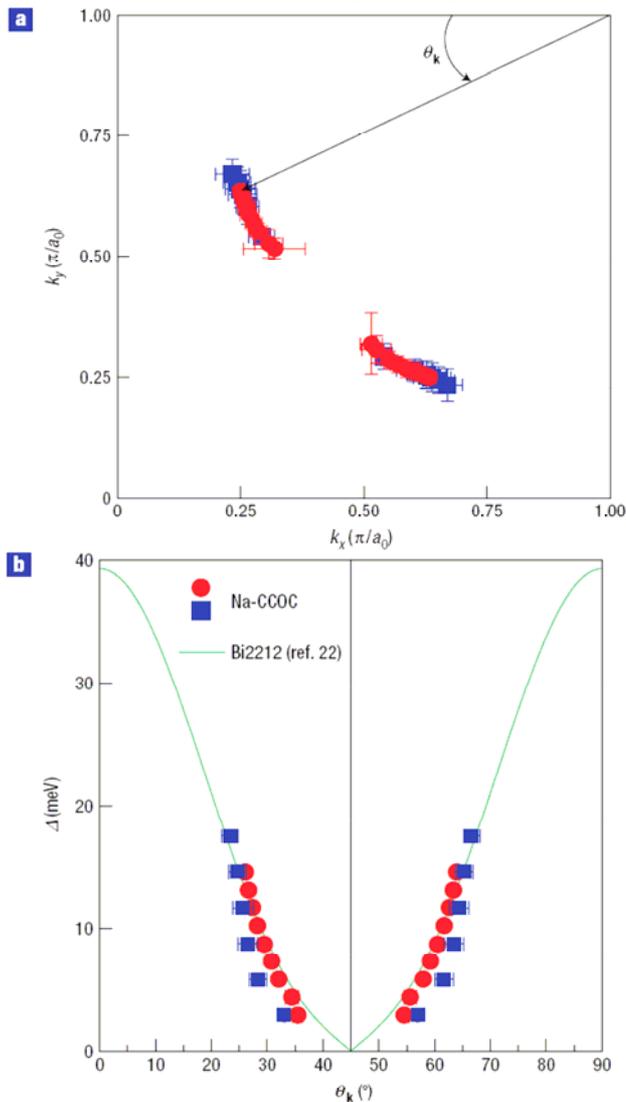
## ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 7 Нанoeлектроника. Экстраординарное становится обыденным

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 10 XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС – XVIII) 9–14 июня 2008 г., Санкт-Петербург, Россия

то вывод отсюда такой [1]: характерный масштаб энергий, который определяет величину  $T_c$  в ВТСП, обусловлен не только (и не столько!) дисперсией СЩ вблизи узлов, но еще и (а может быть, даже главным образом) суммарной длиной фермиевских дуг, то есть фактически – относительной площадью когерентных участков поверхности Ферми. Чем больше эта площадь, тем выше  $T_c$ . Такой подход позволяет объяснить не только различие  $T_c$  оптимально допированных ВТСП разных систем, но и изменение  $T_c$  одного и того же ВТСП при допировании.



Поверхность Ферми (a) и дисперсия сверхпроводящей щели (b) в Na-CCOC (кружки и квадраты – для двух разных образцов) и Bi2212 (сплошная линия).

Л.Опенев

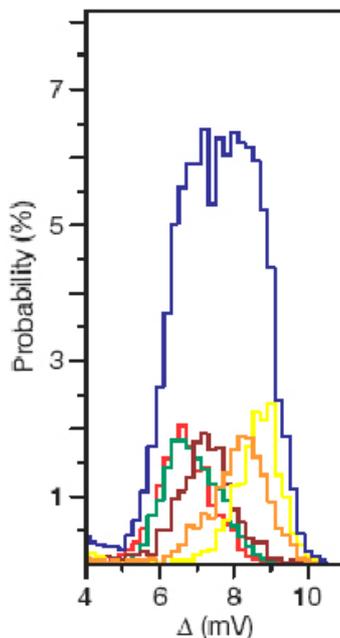
1. T.Hanaguri et al., Nature Phys. 3, 865 (2007).

### Нефононная сверхпроводимость в ВТСП с электронным допированием?

До сих пор так и не установлено, что же играет роль "сверхпроводящего клея", связывающего носители заряда в ВТСП. Из числа возможных кандидатов основными являются колебания решетки (фононы) и спиновые возбуждения. В свое время фононный механизм сверхпроводимости обычных низкотемпературных сверхпроводников был одно-

значно доказан в экспериментах по туннелированию [1]. Недавние данные сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) свидетельствуют о наличии корреляции между величиной сверхпроводящей щели и частотой колебаний атомов кислорода в ВТСП  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  с дырочным типом проводимости [2] (очко в пользу фононов). Так как и в дырочных, и в электронных ВТСП за сверхпроводимость ответственны одни и те же фрагменты их структуры – плоскости  $\text{CuO}_2$ , то логично предположить, что механизм спаривания носителей заряда соответствующего знака в них тоже одинаковый. Поэтому было бы интересно посмотреть, что дает СТМ для ВТСП *n*-типа.

Качественные образцы электронных ВТСП, пригодные для СТМ, долгое время изготовить не удавалось. И вот наконец появилась статья [3], в которой коллектив американских физиков из Boston College, University of Tennessee и Oak Ridge National Laboratory сообщил о воспроизводимом измерении СТМ-спектров в почти оптимально допированном ВТСП  $\text{Pr}_{0.88}\text{LaCe}_{0.12}\text{CuO}_4$  с  $T_c = 24$  К и электронной проводимостью. Локальные величины сверхпроводящей щели  $\Delta$  при  $T = 5.5$  К были определены в нескольких тысячах точек поверхности образца (о том, что эта щель именно сверхпроводящая, а не какая-либо еще, говорит исчезновение щелевых особенностей туннельных спектров при  $T=T_c$ ). Средняя величина  $\Delta$  составила  $7.2 \pm 1.2$  мэВ (см. рис.), что соответствует  $2\Delta/k_B T_c \approx 7.5$  и указывает на сильную связь носителей со "склеивающими" их бозонами.



Гистограммы распределения локальных величин  $\Delta$  в различных участках образца с размерами 25.6 нм × 25.6 нм каждый. Синяя кривая – суммарная гистограмма по всем областям.

Анализ локальной плотности квазичастичных состояний при  $E > \Delta$  показал, что энергия коллективной бозонной моды в электронных возбуждениях составляет  $E_1 = (10.5 \pm 2.5)$  мэВ. Что это за мода? Хотя авторы [3] не исключают возможности ее фононного происхождения, они отмеча-

ют, что величина  $E_1$  подозрительно близка к энергии резонансной магнитной моды (11 мэВ), обнаруженной в  $\text{Pr}_{0.88}\text{LaCe}_{0.12}\text{CuO}_4$  при исследовании неупругого рассеяния нейтронов [4]. Вот такой крутой поворот делает история ВТСП. Лет 10-15 назад, на пике увлечения нефононным механизмом высо-

Перст, 2008, том 15, выпуск 1/2

котемпературной сверхпроводимости, даже самые убежденные его сторонники отстаивали свое мнение только на примере дырочных ВТСП и "не возражали" против фононного механизма в электронных ВТСП, где  $T_c$  гораздо ниже. А теперь выходит, что все может оказаться "с точностью до наоборот"...

1. *W.L.McMillan, J.M.Rowell, Phys.Rev.Lett. 14, 108 (1965).*
2. *J.Lee et al., Nature 442, 546 (2006).*
3. *F.C.Niستمski et al., Nature 450, 1058 (2007).*
4. *S.D.Wilson et al., Nature 442, 59 (2006).*

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

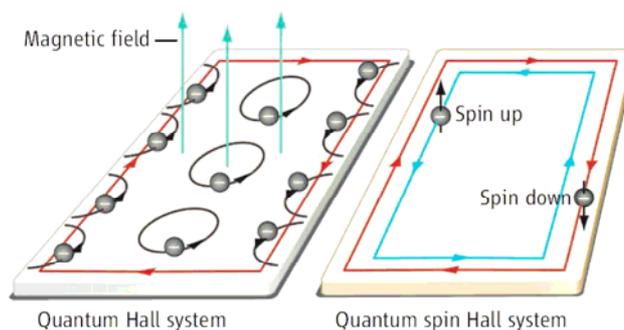
### Квантовый спиновый эффект Холла

Спиновый эффект Холла был давно предсказан теоретиками и недавно наблюдался в эксперименте. Для спинового эффекта Холла не требуется внешнее магнитное поле. Отличают два типа этого эффекта: внутренний и внешний. Внешний эффект возникает в результате анизотропии рассеяния электронов на кулоновских центрах, вызванной спин-орбитальным взаимодействием. При протекании тока электроны со спином вверх относительно плоскости преимущественно рассеиваются направо, а электроны со спином вниз – налево. На боковых краях возникает избыток электронов со спином вверх и со спином вниз аналогично избыточному заряду в обычном эффекте Холла. Внутренний спиновый эффект Холла обусловлен анизотропией движения электронов с различной ориентацией спина в кристалле.

После обнаружения классического спинового эффекта Холла сразу возник вопрос, не существует ли квантовый спиновый эффект Холла (QSHE), аналогичный знаменитому квантовому эффекту Холла (QHE). Возможная аналогия демонстрируется рисунком. В режиме QHE, когда несколько подзон Ландау полностью заполнены, и наблюдается ступенька на холловском токе, вдоль краев структуры течет незатухающий (persistent) зарядовый ток. Отсутствие затухания вызвано тем, что для этого электроны должны перейти в верхние подзоны Ландау, для чего им надо преодолеть энергетический зазор. В режиме QSHE вдоль краев должен возникать незатухающий спиновый ток. Аналогия на этом прекращается, поскольку заряд является квантованной величиной, а проекция спина – величиной непрерывной.

Как все-таки можно было бы добиться незатухающего спинового тока? Ведь его существование могло бы оказаться хорошей находкой для спинтроники. Ясно, что этот эффект не может быть обусловлен внешним спиновым эффектом Холла, поскольку рассеяние на примесях неизбежно приводит к диссипации. Одного внутреннего механизма недостаточно, надо обеспечить сохранение спина при протекании спинового тока, чтобы все-таки выйти на аналогию с обычным QHE. Теоретики предло-

жили использовать новое состояние материи - спиновый изолятор. Это состояние может возникать в результате спин-орбитального взаимодействия, приводящего к возникновению запрещенной зоны. Возможно, переход к такому состоянию происходит в гетероструктурах узкозонных полупроводников, например, CdTe/HgTe/CdTe. В режиме спинового изолятора нижняя зона заполнена электронами только с одной ориентацией спина, а до другой зоны имеется щель. Зарядовый ток течь не может, а вот спиновый ток – может, причем, незатухающий. В недавнем эксперименте König et al. (Universität Würzburg) [2] удалось наблюдать некоторые намеки на существование спинового изолятора и рассмотренных краевых состояний в спиновом эффекте Холла.



Аналогия между зарядовым и спиновым эффектом Холла. В режиме квантового эффекта Холла (слева) по краям структуры течет незатухающий зарядовый ток. В режиме квантового спинового эффекта Холла (справа) по краям структуры течет незатухающий спиновый ток [1].

*В.Вьюрков*

1. *N. Nagaosa, Science 318, 758 (2007).*
2. *M. König et al., Science 318, 766 (2007).*

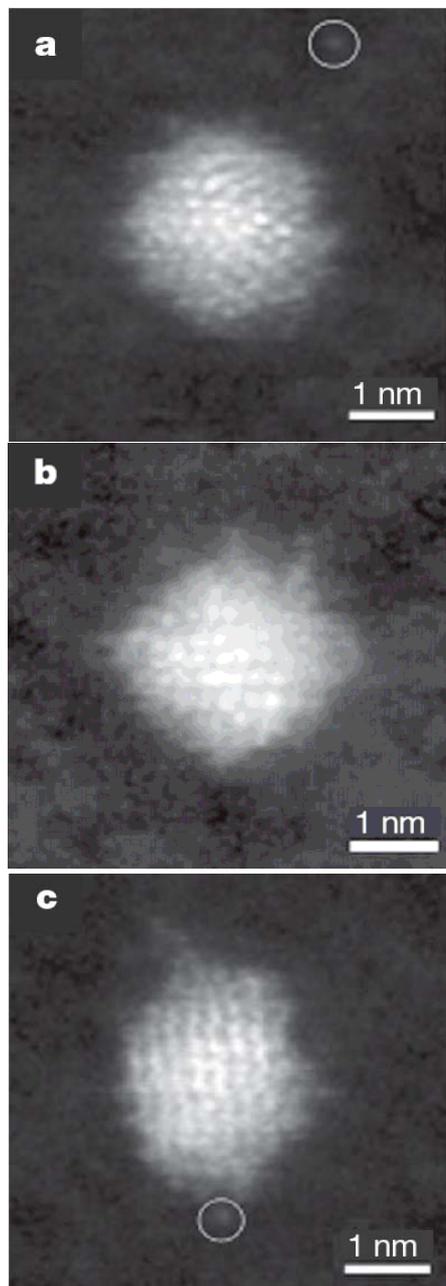
## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

### Структура кластеров золота

Экспериментальное определение атомного строения наночастиц – задача не из легких. Если для устойчивых и сравнительно крупных частиц подходит электронная томография (основанная на анализе большого количества изображений, полученных при различных ориентациях образца), то ультрамаленькие частицы (кластеры) отличаются низкой устойчивостью и при воздействии на них пучка электронов переходят в другие конфигурации. Между тем огромный интерес представляет использование атомных кластеров для ускорения некоторых химических реакций, причем действие кластеров как катализаторов является избирательным и зависит не только числа атомов в кластере, но и от его формы, а также от характера упаковки атомов, то есть – от структуры кластера.

В работе [1] сообщается о разработке новой методики определения атомной конфигурации кластеров. Она основана на сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM) в режиме

HAADF (high-angle annular dark field). Эта методика позволяет "разглядеть" отдельные атомы на поверхности кластера. В [1] она использована для исследования кластеров золота  $Au_N$  с  $N = 50 \div 1500$ , полученных в газовой фазе и осажденных на подложку из аморфного углерода. Было, в частности, обнаружено, что кластеры с одним и тем же числом атомов могут иметь различную структуру (см. рис.).



Изображения кластеров  $Au_{309}$  с различной структурой, полученные методом HAADF-STEM. Кружками обведены отдельные атомы Au в окрестности кластера.

Как показало численное моделирование, это объясняется наличием у каждого кластера нескольких энергетических минимумов, разделенных невысокими барьерами. Кроме того, расположение атомов на поверхности кластера может быть не таким, как внутри него. Это обусловлено сильными флуктуациями поверхностных атомов и их интенсивным движением относительно сердцевины кластера, что, по-видимому, и является физической причиной повышенной каталитической активности кластеров золота. В дальнейшем авторы [1] предполагают обобщить свой метод так,

чтобы стало возможным изучать не только статические характеристики кластеров, но и их динамику в ходе каталитических реакций.

*I. Z.Y.Li et al., Nature 451, 46 (2008).*

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Рентгеновская трубка с катодом из углеродных нанотрубок и рекордным размером фокусного пятна

Источники рентгеновского излучения с холодным полевым катодом, содержащим углеродные нанотрубки (УНТ) в качестве эмиттера, получили широкое распространение и доказали свою эффективность благодаря высоким эмиссионным свойствам УНТ. Особенно привлекательны такие приборы при исследовании объектов с высокой степенью разрешения. До настоящего времени наилучшее разрешение рентгеновских источников с УНТ-катодами составляло 10 мкм. Недавно сотрудники Korea Advanced Institute of Science and Technology (Daejeon, Korea) [1] разработали источник с разрешением лучше 5 мкм. Такой результат достигнут благодаря использованию специальной конфигурации катода, в которой нанотрубки, эмитирующие электроны, нанесены на поверхность острого вольфрамового наконечника с радиусом кривизны  $\sim 5$  мкм. Конструкция рентгеновского источника представлена схематически на рис. 1а.

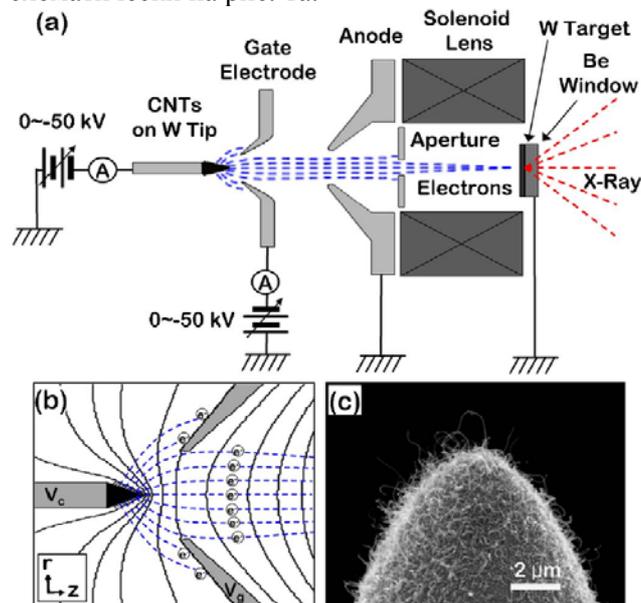


Рис.1. а) Схема устройства источника рентгеновского излучения, включающая в себя электронную пушку, линзу в виде соленоида, и мишень просвечивающего типа; б) вычисленная траектория электронов; в) микроизображение катода, поверхность которого однородно покрыта многослойными нанотрубками диаметром около 50 нм и длиной около 1 мкм.

Для изготовления наконечника из вольфрамовой проволоки толщиной 250 мкм с заостренным концом использовали электрохимическое травление. УНТ на поверхности наконечника выращивали методом плазмохимического осаждения паров (PECVD) (Ni катализатор). Для улучшения адгезии

*Перст, 2008, том 15, выпуск 1/2*

нанотрубок на протравленную поверхность наконечника напыляли буферный слой нитрида титана. Степень однородности покрытия наконечника нанотрубками иллюстрируется микрофотографией (рис. 1с). С целью снижения эффекта сферической абберации использовали электронную магнитную линзу на основе соленоида. Этой же цели служит диафрагма диаметром от 4 до 10 мм, помещаемая перед входом в линзу. Для того, чтобы соударения электронов с атомами внутри материала мишени не вызывали дополнительной расходимости пучка рентгеновского излучения в работе использовали мишень просвечивающего типа, толщина которой много меньше характерной длины пробега электронов в материале. Мишень представляла собой пленку Ве толщиной 500 нм и диаметром 20 мм с напыленным слоем W. Результаты измерений эмиссионных характеристик катода на основе УНТ и транспортных характеристик электронной пушки показаны на рис. 2.

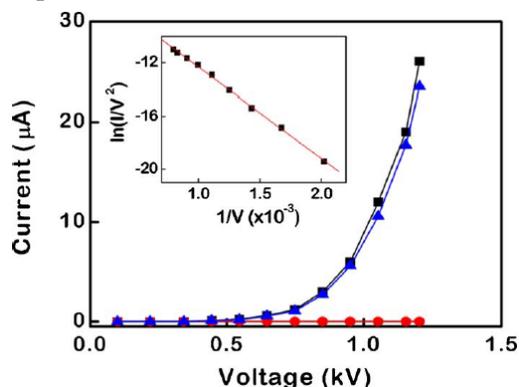


Рис. 2. Эмиссионные характеристики катода на основе УНТ и транспортные характеристики электронной пушки: ■ – ток эмиссии; ● – ток, теряемый на управляющем электроде; ▲ – ток, попадающий на мишень. На вставке показана вольтамперная характеристика в координатах Фаулера-Нордгейма.

Измерения проводили при напряжении на катоде -40 кВ и варьируемом напряжении на сетке, помещенной на расстоянии 0.25 мм от катода. Напряженность электрического поля, обеспечивающая плотность тока эмиссии 10 мА/см<sup>2</sup>, составила 1.6 В/мкм. Полученное на основании результатов обработки зависимости Фаулера-Нордгейма величина коэффициента усиления электрического поля составила 2700. Столь высокое усиление достигается в результате использования специальной конфигурации катода, когда УНТ эмиттеры помещены не на плоской поверхности, а на заостренном вольфрамовом наконечнике. Площадь эмитирующей поверхности оценивается величиной  $1.6 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, что примерно соответствует площади полусферического наконечника с радиусом кривизны 5 мкм.

Тестовые испытания описанной выше рентгеновской трубки были выполнены с использованием в качестве эталона решетки, содержащей полоски золота шириной 6 мкм, нанесенные на подложку с интервалом 25 мкм. Результаты испытаний позво-

ляют считать, что данный прибор имеет разрешающую способность ниже 5 мкм.

*А.В.Елецкий*

1. S.H. Heo et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 183109 (2007).

### **Эмиссионные характеристики полевого катода из УНТ, выращенных на массиве из столбиков нанопористого кремния**

Холодные полевые катоды на основе углеродных нанотрубок (УНТ) обладают выдающимися эмиссионными свойствами, что связано с высоким аспектным отношением УНТ и их хорошей электропроводностью. Одно из наиболее перспективных применений таких катодов связано с разработкой плоских мониторов, отличающихся низким уровнем потребляемой мощности по сравнению с традиционно используемыми термоэмиссионными катодами и пониженным напряжением питания по сравнению с холодными катодами на основе металлических эмиттеров. В связи с этим в настоящее время во многих лабораториях мира ведутся интенсивные исследования, направленные на разработку холодных катодов на основе УНТ. Целью этих исследований является максимально возможное повышение коэффициента усиления электрического поля, проявляемого индивидуальными эмиттерами и снижение пороговой напряженности электрического поля на эмиттере, обеспечивающей необходимую плотность тока эмиссии. Недавно группа исследователей Zhengzhou Univ., (Zhengzhou, China) [1], разработала конструкцию полевого эмиссионного катода на основе УНТ, удовлетворяющую сформулированным выше требованиям. Это достигнуто благодаря специальной структуре подложки, а также в результате использования оригинальной процедуры роста УНТ. В качестве подложки использовали монокристаллическую пластинку из нанопористого кремния, подвергнутую травлению в плавиковой кислоте с небольшой добавкой нитрата железа. Образованная в результате травления поверхностная структура содержала матрицу столбиков нанопористого кремния (рис. 1а). Эту матрицу помещали в кварцевую трубку, где проводили синтез УНТ методом термического CVD. Согласно этой процедуре, печь нагревали до 820°C в потоке чистого H<sub>2</sub>. Затем поток водорода при той же температуре заменяли на смесь H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> в объемном отношении 3:7, в смесь вводили раствор ферроцена в ксилоле (концентрация 0.015 г мл<sup>-1</sup>) со скоростью 0.2 мл мин<sup>-1</sup>. Процесс синтеза продолжался 15 мин. Затем поток газовой смеси заменяли на чистый азот, и печь естественным образом охлаждали до комнатной температуры.

Микроизображения подложки, покрытой многослойными УНТ, показаны на рис. 1b-1d. Типичная длина нанотрубок составляет несколько мкм, а диаметр достигает 40 нм. По длине УНТ наблюдаются многочисленные гранулы, которые представ-

ляют собой наночастицы железа, образовавшиеся в результате разложения ферроцена и играющие роль катализатора при синтезе УНТ.

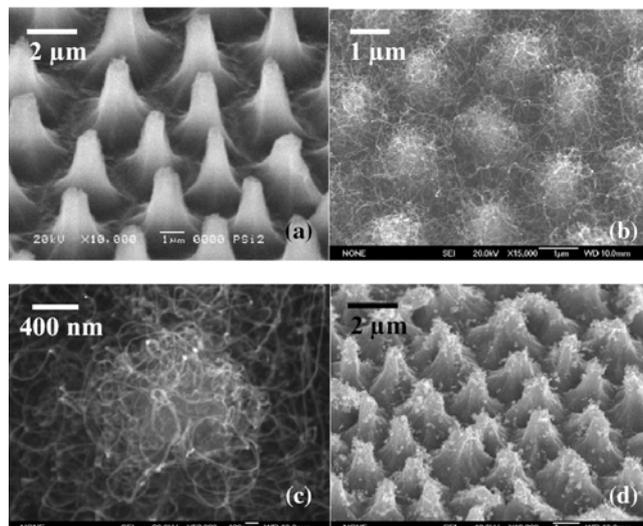


Рис. 1. Поверхностная морфология подложки и катода, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. (а) Матрица столбиков Si, снятая под углом 45°; (б) матрица УНТ, снятая под углом 30°; (с) вид сверху на индивидуальный столбик, покрытый УНТ; (д) изображение поверхности образца после 2 минут синтеза.

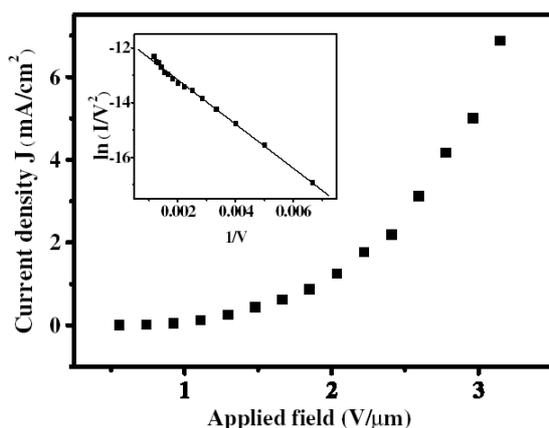


Рис. 2. Зависимость плотности тока эмиссии от напряженности электрического поля. На вставке показана та же характеристика в координатах Фаулера-Нордгейма.

Эмиссионные вольтамперные характеристики катода (рис. 2) измеряли в условиях вакуума  $6 \times 10^{-5}$  Па при межэлектродном расстоянии 270 мкм. Площадь катода составляла  $1.0 \times 1.5$  см<sup>2</sup>. Пороговая напряженность электрического поля, обеспечивающая плотность тока эмиссии  $2$  мкА см<sup>-2</sup>, составила  $0.56$  В мкм<sup>-1</sup>. Восстановленная на основании этой зависимости величина коэффициента усиления электрического поля (в предположении, что работа выхода электрона порядка 5 эВ) оказалась  $\sim 25000$ Э, что существенно превышает измеренные ранее величины. Столь высокий коэффициент авторы объясняют присутствием в образце наночастиц железа, которые снижают работу выхода электрона и уве-

личивают эффективную величину коэффициента усиления электрического поля.

А.В.Елецкий

1. X.J. Li, W.F. Jiang, *Nanotechnology* **18**, 065203 (2007).

## СПИНТРОНИКА Ферротороидные домены: новый вид памяти?

Осенью 2007 года в *Nature* появилось сообщение о наблюдении доменов нового типа - ферротороидных [1], которые могут оказаться находкой для индустрии компьютерной памяти, подобно тому, как магнитные домены стали одним из наиболее распространенных ныне видов записи информации.

По аналогии с магнитными доменами ферротороидные домены представляют собой области, но не с различной намагниченностью, а с различной ориентацией вектора *тороидного момента*, характеризующего спонтанный дальний порядок особого типа [2]. Простым геометрическим представлением тороидного момента  $\mathbf{T}$  являются четыре иона тетрагональной кристаллической ячейки с магнитными моментами  $\mathbf{M}_1 \div \mathbf{M}_4$  (рис.1а). Магнитное поле системы во внешнем пространстве равно нулю (подобно тому, как не создает внешних магнитных полей катушка с током, замкнутая на себя и образующая «бублик» (*tor*) – отсюда и название). Это обстоятельство и делает ферротороидное упорядочение столь трудно обнаружимым с помощью традиционных магнитных или магнитооптических методов.

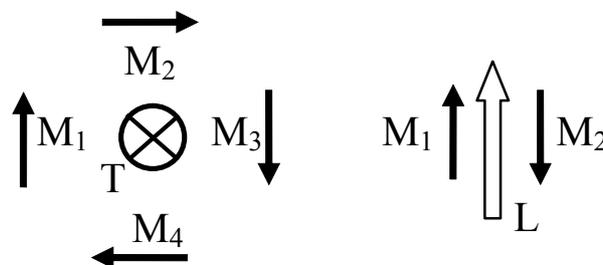


Рис. 1 Примеры различных видов упорядочения в твердых телах: а) тороидное упорядочение спинов:  $\mathbf{M}_1 \div \mathbf{M}_4$  – магнитные моменты атомов,  $\mathbf{T}$  — вектор тороидного момента б) антиферромагнитное упорядочение:  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$  магнитные моменты атомов,  $\mathbf{L} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$  – вектор антиферромагнетизма.

В силу своего вихреобразного характера ферротороидное упорядочение сильно напоминает антиферромагнитное (рис. 1б), которое образовано двумя магнитными подрешетками, полностью компенсирующими магнитный момент друг друга. По этой причине антиферромагнитное упорядочение также долгое время не удавалось наблюдать традиционными способами.

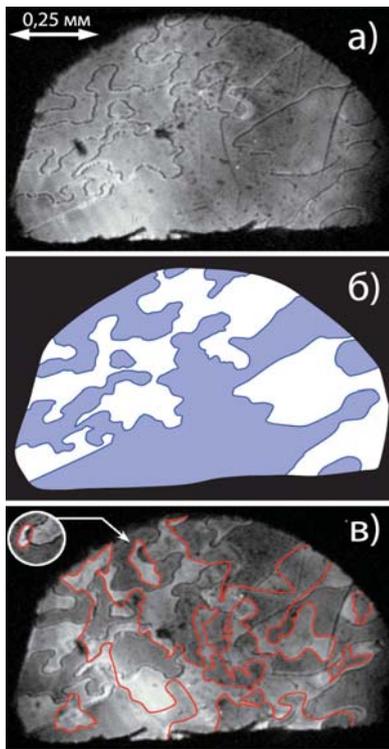


Рис. 2 Изображения, полученные на второй гармонике в  $\text{LiCoPO}_4$  [1]:

- а) границы антиферромагнитных доменов
- б) антиферромагнитные домены
- в) антиферромагнитные и ферротороидные домены. Красным выделены ферротороидные границы.

Впервые изображения антиферромагнитных доменов были получены в 1995 году с помощью нелинейного магнитооптического эффекта – генерации магнито-индуцированной второй гармоники [3]. Домены с противоположным направлением антиферромагнитного момента дают противоположные по знаку вклады в сигнал на второй оптической гармонике, благодаря чему становятся видимыми доменные границы, как результат деструктивной интерференции света от доменов противоположной полярности (рис. 2а). На рис. 2б схематически показано восстановленное по рис. 2а распределение антиферромагнитных доменов.

Ферротороидное упорядочение тоже должно давать вклад во вторую гармонику, причем его симметричные свойства отличаются от антиферромагнитного вклада, а значит, ферротороидные домены по-другому поляризуют свет. Соответствующим подбором поляризаций падающей и отраженной волн на второй гармонике авторам [1] удалось получить изображение, на котором были видны дополнительные области, соответствующие иному виду упорядочения – ферротороидному (рис. 2в). Несмотря на то, что два типа упорядочения коррелируют между собой (во многих областях образца границы доменов обоих типов совпадают), критерий отличия ферротороидных доменов от антиферромагнитных в том, что ферротороидные домены образуют независимые области, а их границы (выделены красным на рис. 2в) проходят внутри антиферромагнитных доменов.

Таким образом, ферротороидные домены, несмотря на то, что они не создают вокруг себя магнитного поля, перестают быть «вещью в себе», по крайней

мере, их можно видеть. Кроме того, ферротороиды обладают магнитоэлектрическими свойствами, т.е. под воздействием электрического поля в них появляется магнитный момент (и наоборот), что также можно использовать для считывания информации в виде ферротороидных доменов [4]. Однако для создания компьютерной памяти необходимо уметь не только считывать, но и записывать информацию. Поэтому следующим шагом на этом пути является демонстрация переключения доменов в «торроидном» поле, которое может быть создано, например, одновременным приложением магнитного и электрического полей под прямым углом друг к другу. С этого момента можно будет говорить о том, что ферротороидная память не за горами, а свойство ферротороидов не создавать магнитных полей из недостатка, долгое время препятствовавшего их обнаружению, превращается в достоинство. Действительно, в традиционной магнитной записи поля размагничивания, создаваемые одним доменом, воздействуют на соседние домены, что может привести к неконтролируемому перемагничиванию и утере информации. Это обстоятельство является одним из лимитирующих факторов при увеличении плотности записи информации в магнитной памяти. Ферротороидная память изначально свободна от такого рода ограничений.

А.Пятаков

1. Bas B. Van Aken et al, *Nature* **449**, 702 (2007).
2. В. Дубовик, Т. Тосуньян, *Физика элементарных частиц и атомного ядра* **14**, 1193 (1983).
3. M. Fiebig et al, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2906 (1995).
4. Попов Ю.Ф. и др., *ЖЭТФ*, **114**, 263 (1998).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

### *Нанoeлектроника. Экстраординарное становится обыденным*

Первые новогодние выпуски новостных сайтов поместили множество оптимистичных, умеренных и пессимистичных прогнозов развития электроники (теперь уже можно всегда подразумевать с приставкой *нано-*) в 2008 и последующих годах [1].

#### *Организационные проблемы*

Существенную долю электронного рынка составляют потребительские изделия, которые требуют больших объемов производства компактных, быстродействующих приборов с малой потребляемой мощностью и низкой стоимостью. Править полупроводниковой промышленностью будут по-прежнему запоминающие устройства (ЗУ). В ближайшие несколько лет *NAND*-флэш будет доминировать. Изготовители ЗУ стремятся первыми выйти на рынок с ЗУ следующего поколения (последовательно 65-, 45-, 32-, 22-нм), для которых, в свою очередь, необходимо оборудование следующего поколения, которое бы обеспечивало новый порог размеров элементов микросхем. Компании ждут прибылей от значительного интереса потребителей

к таким приборам, насыщенным ЗУ, как MP3-плееры и, разумеется, твердотельным диск-драйверам и серверам. Снижение размеров элементов микросхем важно для увеличения временного ресурса элементов питания популярных сегодня мобильных устройств.

Решение этих и других сложных технологических проблем в экономическом плане требует все большего сотрудничества между корпорациями (изготовителями приборов, поставщиками оборудования и исследовательскими центрами). Однако, в ситуации значительного роста стоимости и разработок, и производства сегодняшнее разделение труда между разработчиками (*fabless* или *fab-lite companies*) и изготовителями (*foundry company*) приборов подвергается критике. Популярную сейчас модель «компания – разработчик – фабрика» могут ждать изменения. Такая модель представляется неэффективной при разработке сложных современных технологий. Фабрикам в настоящее время трудно сохранить высокий уровень процессов для новейших технологий (меньше 100 нм) из-за недостаточности «разработческих знаний» и научной интуиции. В то же время существующее разделение между технологическим процессом и конструированием усложняет и работу дизайнера. Многие *небольшие* компании, не имеющие производственных цехов (*fabless*), не способны разрабатывать новейшие процессы, остановившись на рубеже 100 нм, ниже которого стоимость дизайна резко возрастает. На этом пути появилась новая тенденция включения «сильных» фабрик в процесс разработки на исследовательском этапе. Так, компания *Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd. (TSMC)*, участник *IBM alliance*, участвует и в разработке 32-нм технологии, и в дизайнерских разработках, и в соответствующих фундаментальных исследованиях [3].

Характерно и объединение конкурирующих на рынке компаний для совместных технологических разработок. Так, над 32-нм технологией совместно работают *IBM, AMD, Freescale* (все - США), *Infineon Technologies* (Германия), *Samsung* (Ю.Корея), *STMicroelectronics* (Швейцария), *Toshiba* (Япония). К этому т.н. *Frishkill* альянсу «подкрадывается» и китайская компания *Semiconductor Manufacturing International Corp. (SMIC)*, заключившая в декабре 2007 г. лицензионное соглашение с *IBM* на передачу 45-нм КМОП технологии. Технология будет внедрена на 300 мм фабрике компании *SMIC* [4]. Совместную разработку технологии микросхем на *SOI* (*silicon-on-insulator*) подложках проводит *SOI Industry Consortium*, в который входят *AMD, IBM, Sony, Toshiba, Freescale Semiconductor*.

#### *Новые литографические подходы*

Переход от 65- к 45-нм технологии потребовал серьезных изменений: иммерсионная *ArF* (193-нм) литография; материал с высокой диэлектрической постоянной (*high-k*) в качестве подзатворного изо-

лятора; материал с низкой диэлектрической постоянной для межслойной изоляции; замена алюминиевых межсоединений медными.

Но эти изменения (уже освоенные многими компаниями) недостаточны для следующего шага от 45 к 32 нм. Основная проблема - литография. Сначала верили, что литография с использованием экстремального ультрафиолета (ЭУФ с длиной волны 13 нм) подоспеет как раз вовремя (где-то в окрестности 2009 г.), чтобы удовлетворить потребность в формировании 32-нм рисунков. Но теперь ясно, что дела с ЭУФ замедлились. Ставка делается на то, что промежуточным мостиком станет *ArF* литография (на 193 нм) с иммерсией (используют жидкости и линзы с высоким коэффициентом преломления, например, линзы из лютеций-алюминиевого граната) и двойным экспонированием. Двойное экспонирование представляет собой расщепление плотного рисунка схемы на два отдельных, менее плотных, которые затем печатаются на пластине последовательно в одном формируемом слое. В зависимости от устройства может быть 3-5 критических слоев в микросхеме, требующих двойного экспонирования [2].

Конечно, изощренные подходы в попытке продлить жизнь 193-нм литографии на 32-нм технологию удорожают производство и не решают проблему кардинально (в частности, следующий шаг к 22нм). Поэтому ЭУФ не сходит с повестки дня. В качестве источника для ЭУФ сегодня рассматривают излучение газоразрядной или лазерноформируемой плазмы. Однако на пути ЭУФ еще много нерешенных проблем, в частности с оптикой и с качественным фоторезистом для этого диапазона излучений. В демонстрационных структурах на 32-нм рисунке достигнута многообещающая 2.5-нм однородность. Можно сказать, что успешное использование ЭУФ в дальнейшем будет зависеть от того, удастся ли в 2008 г. найти мощный фотонный источник и надежный резист. Этот год прояснит, продолжит ли ЭУФ плавать или утонет [2].

Некоторые эксперты считают, что 2008 г. станет поворотным и для печатной (наноимпринт) литографии. Полупроводниковые производители с увеличенным интересом стали обращать внимание на импринт литографию, достигшую на тестовых чипах суб-20-нм разрешения при 1-нм однородности воспроизведения критических размеров (тестовые образцы изготовлены компанией *Toshiba* на стандартной установке производства компании *Molecular Imprints Inc.*, США). Инфраструктура импринт литографии уже достаточно развита в связи с ее использованием в производстве жестких дисков и светодиодов [5].

#### *Новые материалы*

Число новых материалов, необходимых для обеспечения КМОП технологии, растет экспоненциально с переходом на новый топологический размер (эту закономерность часто называют как "More Moore")

– «Более Мур»). Дополнительные новые материалы требуются для таких приборов, как МЭМС и пассивные компоненты (ситуацию именуют "More Than Moore" – «Более, чем Мур»). 32-нм технология требует введения таких новых материалов, как оксиды гафния для подзатворного изолятора, тантала или вольфрама в качестве материала электрода. Более предпочтительным называют гафний кремниевый оксинитрид ( $HfSiON$ ), так как чистый оксид гафния  $HfO_2$  уже при  $\sim 500^\circ C$  начинает кристаллизоваться. С другой стороны, диэлектрическая постоянная  $k$  у оксинитрида меньше в сравнении с чистым оксидом ( $k \sim 15$  для  $HfSiON$ ,  $\sim 25$  для  $HfO_2$  в сравнении с  $\sim 9$  для  $SiON$ ). Рассматривают также оксид циркония-гафния  $HfZrO_x$  для изолятора и карбид тантала для металлического электрода.

Различные подходы используют для управления напряжением пробоя  $n-p-n$  и  $p-n-p$  транзисторов. В одной из версий используют следующие структуры:  $W/TiN/HfMgO$  для  $n$ -транзистора и  $W/TiN/HfAlO$  для  $p$ -транзистора.

Для увеличения подвижности носителей в канале (электроны в  $n$ - и дырки в  $p$ -транзисторе) как 45-, так и 32-нм версий, применяют различные методы создания напряженных слоев кремния. Наиболее широко используют эпитаксиальные островки кремний-германия ( $SiGe$ ) или карбида кремния ( $SiC$ ) в областях исток-сток [2].

Недавно Toshiba сообщила о движении в направлении следующего поколения нанотранзисторов с каналом до 10 нм на структуре, состоящей из слоя кремниевых нанокристаллов толщиной 1.2 нм, заключенного между оксидными пленками толщиной 1 нм. Тестовая структура способна длительно сохранять данные и в тоже время обладает высокой скоростью записи и стирания данных [6].

*Что и когда после NAND-флэш?*

На повестке дня и альтернативные виды энергонезависимой памяти –  $MRAM$  (магнитная оперативная память),  $FeRAM$  (пьезоэлектрическая оперативная память) и  $PCM$  (*phase-change memory*), из которых, по мнению некоторых комментаторов, именно  $PCM$  наиболее перспективна в плане возможного масштабирования до 5 нм и ниже. ( $PCM$  использует материал, переходящий из аморфной фазы в кристаллическую под воздействием лазерного излучения). Принципиальные проблемы в разработке  $PCM$  решены, для массового производства необходимо преодолеть некоторые инженерные барьеры [7].

*Реальны ли 450 мм подложки?*

Размеры инвестируемых капиталов в новые разработки столь велики, что производителям чипов необходимо получить прибыли от капиталов как можно скорее, чтобы иметь время и средства для инвестиций в новые требования. Критичным становится процент выхода годных чипов - устойчивый выход более 90% становится нормой в промышленности.

Другой способ снизить удельные (в пересчете на один чип) производственные расходы – переход на подложки все большего диаметра: 300 мм стали уже нормой, дискутируется возможность 450 мм подложек.

Относительно сроков перехода на 450 мм прогнозы самые разные - от 2012 до 2020-2025 года. Неутешительный прогноз основан на том, что пока инвестиции в эти разработки незначительные, а оцениваемые компанией Gartner Dataquest затраты на 450 мм исследования и разработки составят 10-16 млрд. долл. Стоимость же 450 мм фабрики, по предварительным оценкам, может вдвое превысить стоимость 300 мм фабрик. Существует и более оптимистичный прогноз – достаточно найти инвестора, который решится вложить в 450 мм исследования 3-4 млрд. долл., и фабрика станет реальностью [8]. То, что сегодня кажется невероятным (слитки кремния почти полуметрового диаметра!?), уже завтра может стать привычным делом. Успешными станут те, которые первыми освоят 32-нм технологию на 450 мм подложках.

А пока – успех по-прежнему сопутствует компании *Intel*, запустившей в производство 16 новых микропроцессоров типа *Penryn*, выполняемых по 45-нм технологии [9].

*А что в России?*

Поскольку в мировых прогнозах развития электроники Россия как-то совсем не замечена, поместим мнение одного из комментаторов *EE Times*: несмотря на очень скудную информацию, похоже, что Россия все же пробудилась от зимней спячки.

В частности, в России недавно прозвучало сообщение о двух фабриках, работающих на 200-мм подложках. Это – завод «Микрон» (Зеленоград), который стал сотрудничать с компанией *STMicroelectronics* (Женева, Швейцария), и завод «Ангстрем» (Зеленоград), оснастивший свои производственные территории новым оборудованием от завода компании *Advanced Micro Devices (AMD)* в Дрездене. Производство на «новом» «Ангстреме» может стартовать в 2009 г. Россия также анонсировала осторожные планы создания первой 300-мм фабрики<sup>1</sup> в сотрудничестве компании *Sitronics* (Зеленоград) с *Tronic JV* и *Kedah Group* (Малайзия) и планирует запустить первое 45-нм производство на 300-мм подложках в 2010 или 2011 г. при условии финансовой поддержки со стороны правительства [10] (в других источниках указаны неправдоподобно оптимистичные сроки запуска проекта 45/300 – октябрь 2009г. [11])

Малайзийская компания *Kedah Group* планирует также создать современную кремниевую фабрику в Н.Новгороде. Параметры будущей фабрики впечатляют - 30 тыс. пластин диаметром 200 и 300 мм в месяц с топологическими нормами от 180 нм до 90 нм [12].

<sup>1</sup>К слову, первая 300 мм фабрика (SC300) была создана в 2000 г. в Дрездене (Германия) как совместное производство *Infineon Technologies AG* (Германия) и *Motorola* (США). В 2001 г. к ней добавились еще 4 фабрики: *Intel*, США (*D1C*), *Renesas Technology*, Япония (*Naka 2-1F*), *UMC*, Тайвань (*Fab 12A*) и *TSMC*, Тайвань (*Fab 12 Phase 1*). Сегодня 300 мм фабрики называют мегафабриками ("megafabs"); они производят в основном запоминающие устройства. Сначала их производительность составляла 20-30 тыс. подложек (300 мм) в месяц, а стоимость оценивалась в 3-4 млрд. долл. Теперь же производительность достигает 200 тыс. (и более) подложек (300 мм) в месяц, а стоимость - 9-10 млрд. долл. [10].

1. <http://www.semiconductor.net/article/CA6515391.html>
2. <http://www.semiconductor.net/article/CA6515401.html>
3. <http://www.semiconductor.net/article/CA6523095.html?desc=topstory>
4. <http://www.semiconductor.net/blog/270000427/post/500019450.html>
5. <http://www.semiconductor.net/article/CA6491521.html>
6. <http://www.semiconductor.net/articleXml/LN716077592.html>
7. <http://www.semiconductor.net/article/CA6516457.html?desc=topstory>
8. <http://www.semiconductor.net/article/CA6510599.html>: а также <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=OODL2FORGOPUOOSNDL SCKHA?articleID=205901753>
9. <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=FWZYKZUDMUNZIOSNDL PCKH0CJUNN2JVN?articleID=205209378>
10. <http://www.semiconductor.net/article/CA6515396.html?q=Fab+Spending+Tapers+in+2008>
11. <http://www.eetimes.eu/202101377>
12. [http://www.eworld.ru/news/chn\\_r.htm](http://www.eworld.ru/news/chn_r.htm)

## КОНФЕРЕНЦИИ

**XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС – XVIII) 9–14 июня 2008 г., Санкт-Петербург, Россия**

### Тематика:

1. Фазовые переходы, критические явления
2. Структура и динамика кристаллической решетки
3. Теория и моделирование
4. Физические свойства сегнетоэлектриков (монокристаллы, керамика, композиты, жидкие кристаллы, новые материалы)
5. Оптические свойства сегнетоэлектриков, фоторефракция
6. Спектроскопические методы исследования.
7. Сегнетоэлектрики – релаксоры
8. Мультиферроики
9. Доменная структура и процессы переключения.
10. Сегнетоэлектрические пленки, сверхрешетки и наноструктуры
11. Сегнетоэлектрики на сверхвысоких частотах
12. Сегнетоэлектрическая память и другие применения

### Контрольные даты:

**15 февраля 2008** – последний день поступления тезисов и регистрационной формы

**31 марта 2008** – подтверждение принятия доклада

**15 апреля 2008** – предварительная программа на сайте Конференции

Оргкомитет:

Тел.: (812) 346-46-37; (812) 234-59-80

e-mail: [VKSI8@eltech.ru](mailto:VKSI8@eltech.ru)

Web: <http://www.eltech.ru/science/conf.htm>

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

Ответственный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие В.Вьюрков, А.Елецкий, Л.Опенев, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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