

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### *ВТСП: двадцать лет спустя*

В 2006 году исполняется 20 лет с момента открытия высокотемпературной сверхпроводимости Беднорцем и Мюллером. Этому событию редакция журнала "Nature Physics" посвятила один из последних номеров, предоставив свои страницы известным специалистам в области ВТСП.

#### *Восемь фактов*

В статье, озаглавленной "Что мы действительно знаем о высокотемпературных сверхпроводниках?" [1], нобелевский лауреат A.J.Leggett (University of Illinois) выделяет восемь основных экспериментальных фактов, которые (с его точки зрения) можно считать надежно установленными:

- 1) сверхпроводимость ВТСП есть следствие образования куперовских пар с зарядом  $2e$  каждая (или, более строго – следствие возникновения при  $T=T_c$  недиагонального дальнего порядка); об этом однозначно свидетельствуют эксперименты по квантованию магнитного потока и наличие эффекта Джозефсона;
- 2) медь-кислородные плоскости  $\text{CuO}_2$  – обязательный элемент кристаллической структуры всех ВТСП;
- 3) в первом приближении можно считать, что куперовские пары формируются независимо в разных слоях  $\text{CuO}_2$  (или группах из нескольких таких соседних слоев), разделенных "резервуарами заряда"; об этом говорит малая (по сравнению с  $k_B T_c$ ) величина энергии перескока электронов между слоями, определяемая по температурной зависимости сопротивления вдоль оси  $c$ ;
- 4) механизм формирования куперовских пар – либо нефоновый, либо включает фононы гораздо более сложным образом, чем в теории БКШ (это следует из очень слабого изотопического эффекта или его полного отсутствия в ВТСП);
- 5) спиновое состояние куперовских пар является синглетным;
- 6) орбитальное состояние куперовских пар в тетрагональных ВТСП имеет  $d$ -волновую симметрию;
- 7) характерные размеры куперовских пар составляют  $(1 \div 3)$  нм;
- 8) куперовские пары, как и в теории БКШ, формируются из электронов, находящихся в обращенных по времени состояниях.

A.J.Leggett полагает, что ближайшей целью экспериментальных исследований должно стать установление как причин универсальности свойств разных семейств ВТСП (например, схожей зависимости  $T_c$  от числа слоев  $\text{CuO}_2$  в элементарной ячейке), так и причин их неуниверсальности (например, резкого различия  $T_c$  однослойных ВТСП на основе  $\text{Hg}$  и  $\text{Tl}$ ), а также выяснение роли высокоэнергетических возбуждений в сверхпроводимости ВТСП. Он замечает, что нам надо учиться ставить перед экспериментом такие вопросы, на которые можно в принципе получить внятные недвусмысленные ответы и которые "не приурочены" к какой-либо конкретной модели. По его мнению, будущая теория высокотемпературной сверхпроводимости должна не только всесторонне описать это явление, но и либо указать нам путь к комнатнотемпе-

И далее ...

- 4 Распад квазичастиц в квантовой спиновой жидкости

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Углеродные нанотрубки с люминесцирующими частицами

- 6 Сигареты с нанотрубным фильтром

- 7 Нанотрубный осциллятор

## НИТРИДНЫЕ НОВОСТИ

- 8 Влияние слоя  $\text{AlN}$  на параметры  $\text{HEMT}$  на гетероструктуре  $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$

## НАНОСТРУКТУРЫ

- 9 Характеристики  $\delta$ -легированных  $\text{HEMT}$  с линейно изменяющимся каналом  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

## ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

- 11 Университет на месторождении гелия

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 11 July 2-8, 2006, Boulder, Colorado. 14th Int. Conf. on Composites/Nano Engineering (ICCE-14).

**25 февраля – 3 марта 2007.**  
Снежинск, Россия. 7 Международный уральский семинар "Радиационная физика металлов и сплавов".

- 12 **Январь 2007 г. Москва.**  
4 Всероссийская конференция "Необратимые процессы в природе и технике".

ратурным сверхпроводникам, либо сказать, почему таковых не существует (по крайней мере, в ряду слоистых купратных и родственных им материалов).

*Что думают теоретики ?*

Следующая статья [2] представляет собой подборку мнений ведущих теоретиков. В сильно сокращенном варианте это звучит так.

P.Anderson (Princeton University) верен своей теории резонирующих валентных связей (*RVB*) и считает, что она в состоянии (возможно, с некоторыми модификациями) объяснить суть явления. Такого же мнения придерживаются M.Rice (Institut für Theoretische Physik, Цюрих) и P.Lee (Massachusetts Institute of Technology), последний надеется, что удастся (хотя бы путем численных расчетов) доказать наличие сверхпроводимости в модели Хаббарда с отталкиванием. D.Pines (University of Illinois) тоже убежден в нефононном механизме сверхпроводимости ВТСП. С его точки зрения, мы уже близки к согласованной микроскопической теории сверхпроводимости передопированных ВТСП, в основе которой – аккуратное описание взаимодействия электронов с антиферромагнитными флуктуациями. Здесь, однако, необходимо разобраться, почему при допировании других антиферромагнитных диэлектриков (таких как  $LaTiO_3$ ,  $V_2O_3$ ,  $NiS_2$ ,  $Sr_2VO_4$ ) сверхпроводимость не возникает даже при очень низких температурах. На это обращает внимание M.Imada (University of Tokyo).

J.Zaanen (Universiteit Leiden) считает, что ВТСП отличаются не своей сложностью, а наоборот, простотой, которая проявляется, например, в строго линейной температурной зависимости сопротивления оптимально допированных образцов вплоть до точки плавления. Это не может быть простой случайностью. И надо избегать любых догм, таких как догма Андерсона-Хаббарда об электронном механизме сверхпроводимости ВТСП. Фононы определенно играют важную роль, хотя и весьма необычную с позиций микроскопической теории. Нужно искать фундаментальный принцип, лежащий в основе явления. Но найти его путем умозрительных рассуждений – дело практически бесполезное. Ключ должен дать эксперимент.

S.Chakravarty (University of California) видит этот ключ в немонотонной (колоколообразной) зависимости  $T_c$  от числа слоев  $CuO_2$  в элементарной ячейке, а T.Senthil (Indian Institute of Science) – в близости сверхпроводящего, диэлектрического (моттовского) и псевдощелевого состояний. M.Randiera (Ohio State University) придает большое значение поиску в ВТСП новых элементарных возбуждений с необычными квантовыми числами и детальному изучению конкуренции

между различными упорядоченными состояниями.

Вообще в отношении к теории ВТСП можно выделить две полярные позиции:

1) многочисленные необычные свойства ВТСП обусловлены различными, не связанными между собой эффектами, так что можно говорить, например, о теории транспортных свойств и теории механизма спаривания как о разных теориях;

2) естественное объяснение всех особенностей ВТСП можно дать с единой точки зрения в рамках новой теории конденсированного вещества с сильными корреляциями.

J.Schmalian (Iowa State University) придерживается второй точки зрения и полагает, что систематическая феноменология нескольких семейств ВТСП говорит в ее пользу. Но пока, полагает M.Vojta (Universität Karlsruhe), все же не до конца ясно, являются ли такие отличительные особенности как псевдощель, страйпы и видимые с помощью СТМ неоднородности необходимыми ингредиентами или же, напротив, помехой для высокотемпературной сверхпроводимости.

A.C.Varma (University of California) – так тот вообще не видит смысла в дальнейших спорах и заявляет, что эксперимент подтвердил предсказанное им нарушение симметрии относительно обращения времени в псевдощелевой фазе за счет спонтанного возникновения замкнутых контуров с током. Следовательно, говорит он, и спаривание носителей, и аномальные свойства ВТСП выше  $T_c$  обусловлены сильными флуктуациями в окрестности квантовой критической точки, где псевдощель “закрывается” (остается, правда непонятным, почему же эту теорию обходят молчанием другие мэтры – то ли из зависти, то ли...).

*Эти экзотические ВТСП*

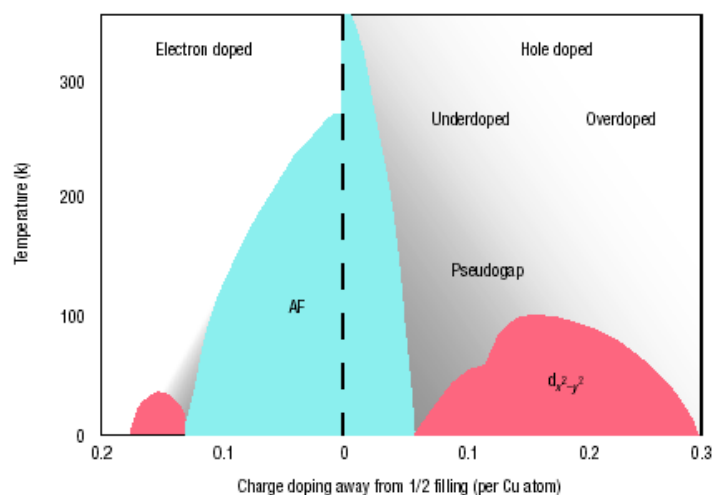


Рис.1. Схематическое изображение фазовой диаграммы ВТСП в координатах температура – отклонение числа носителей (в расчете на атом меди) от половинного заполнения.

В обзорной статье “Являются ли высокотемпературные сверхпроводники экзотическими соединениями?” [3] D.A.Bonn (University of British Columbia), обсуждая фазовую диаграмму ВТСП и родительских диэлектриков (рис. 1), особо подчеркивает, что в ВТСП имеют место все три состояния, представляющие

наибольший интерес для современной физики конденсированного вещества:

1) в передопированных ВТСП – ферми-жидкость, которая описывается в рамках одноэлектронной теории;

2) в исходных недопированных соединениях – диэлектрическое состояние (одноэлектронная модель неприменима в принципе);

3) в оптимально допированных и недопированных ВТСП – нечто среднее между ферми-жидкостью и диэлектриком.

Такое “промежуточное” расположение ВТСП-составов на фазовой диаграмме говорит о необходимости использования принципиально новых подходов для их описания. Здесь, впрочем, необходимо оговориться, что пока не вполне ясно, к чему все-таки ближе оптимально допированные ВТСП с максимальной  $T_c$  – к ферми-жидкости или к диэлектрику. Многие сейчас склоняются к тому, что все же – к ферми-жидкости. Но тогда непонятно, какую роль играют (и играют ли?) диэлектрические (кулоновские) корреляции в механизме спаривания...

Автор [3] уделяет большое внимание описанию экспериментов, позволивших установить  $d$ -волновую симметрию параметра порядка  $\Delta$  в ВТСП. Он отмечает, что это стало возможным благодаря, во-первых, разработке методов изготовления совершенных монокристаллов ВТСП с длиной свободного пробега носителей до  $\sim 1$  мкм и чистотой до 99.999% (“Природа завернула delicate парное состояние в очень сложную проблему материалов”), а во-вторых – с применением новых экспериментальных методик, таких как фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением и сканирующая СКВИД-микроскопия. Для оптимально допированных и передопированных образцов использование обычной (но учитывающей анизотропию  $\Delta$ ) теории БКШ оказывается достаточным для количественного описания многих характеристик ВТСП. Кстати,  $d$ -волновая симметрия  $\Delta$  открывает новые возможности для использования ВТСП в сверхпроводниковой электронике (о самом последнем эксперименте по симметрии  $\Delta$  в ВТСП см. ниже).

Особое значение D.A.Vonn придает флуктуациям параметра порядка, которые в ВТСП очень сильны из-за малой длины когерентности, большой сверхпроводящей щели и низкой фазовой жесткости. Все эти величины в ВТСП примерно на порядок отличаются от соответствующих величин в низкотемпературных сверхпроводниках. Свою роль играет и сильная анизотропия (слоистая кристаллическая структура). Как следствие, флуктуационная область в окрестности  $T_c$  оказывается очень большой. И хотя ее не удалось разглядеть на температурной зависимости теплоемкости  $C$  (из-за большого фононного вклада в  $C$ ), зато она

четко видна при измерениях коэффициента теплового расширения  $\alpha$  (см. рис.2). Если при оптимальном допировании  $\alpha(T)$  имеет скачок при  $T=T_c$ , как и предсказывает теория среднего поля, то в недопированных составах с  $x < 1$  флуктуации захватывают очень большой диапазон температур шириной  $\Delta T = T - T_c \sim T_c$ . Флуктуации при  $\Delta T \sim T_c$  наблюдаются также спектроскопическими методами, при исследованиях магнитной восприимчивости и эффекта Нернста. Не исключено, что флуктуации имеют непосредственное отношение к формированию в ВТСП псевдощели. При наличии магнитного поля флуктуации приводят к плавлению вихревой решетки и, следовательно, к переходу в резистивное состояние. Это существенно осложняет работы по практическому использованию ВТСП в магнитах и других сильноточных устройствах.

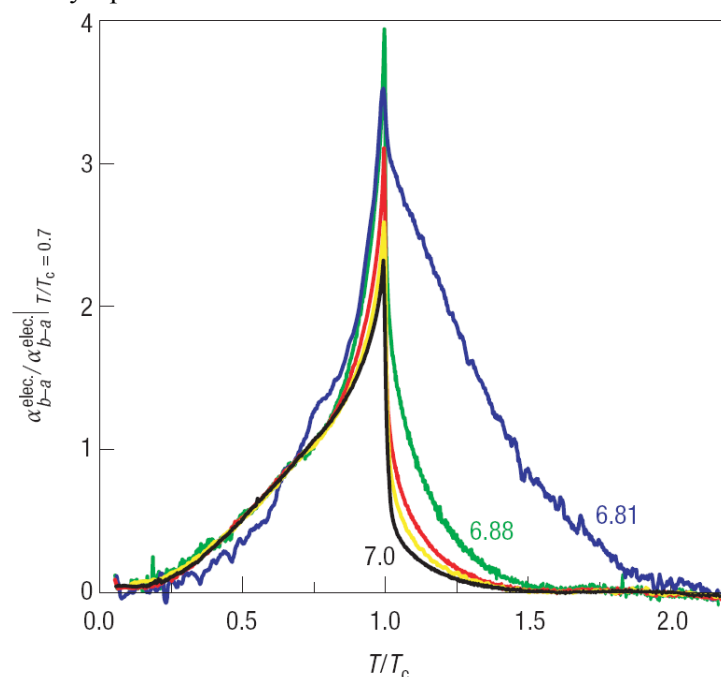


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента теплового расширения  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  с различными  $x$ , нормированные на свои значения при  $T/T_c=0.7$ .

А на вопрос, вынесенный в заглавие статьи, автор дает утвердительный ответ: да, ВТСП – экзотические соединения, причем практически во всем и в гораздо большей степени, чем представлялось 20 лет назад. Вот с такой экзотикой нам и предстоит разбираться. Хватит ли на это следующего двадцатилетия?...

#### $d_{x^2-y^2}$ симметрия

В еще одной статье этого же номера журнала “Определение симметрии щели в  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  фазочувствительным методом с угловым разрешением” [4] группа авторов из IBM и University of Twente постаралась поставить точку в спорах о характере отклонения симметрии параметра порядка  $\Delta$  в оптимально допированных ВТСП от  $d_{x^2-y^2}$ -волновой. Хотя подавляющее большинство специалистов было согласно с тем, что  $\Delta$  имеет преимущественно форму  $d_{x^2-y^2}$ -волны, тем не менее высказывались предположения, что вследствие нарушения симметрии относительно обращения вре-

мени к  $d_{x^2-y^2}$ -волне может подмешиваться мнимая компонента ( $is$ ,  $ip$  или  $id_{xy}$ ). Кроме того, что касается Y123, орторомбическая кристаллическая структура этого ВТСП должна приводить к примеси действительной  $s$ -компоненты в  $\Delta$ , и вопрос заключается лишь в количественной мере этой примеси.

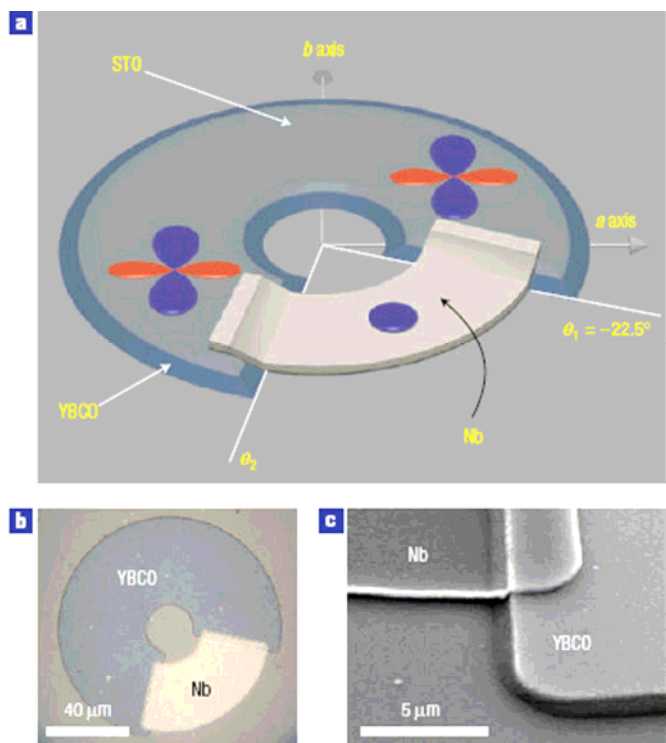


Рис. 3. Кольцо Y123/Nb. (a) схематическое изображение; (b) и (c) – снимки, полученные на оптическом и сканирующем электронном микроскопе, соответственно.

разцы, состоящие из 72 колец с двумя контактами Y123/Nb на каждом (см. рис. 3). При этом пленки Y123 практически не содержали двойников. Величина  $\Delta$  при данном  $\theta$  рассчитывалась по измеренной величине магнитного потока, обусловленного циркулирующим током при  $T < T_c$ . Для чистой  $d_{x^2-y^2}$ -волны должно быть  $\Delta = \Delta_0 \cos(2\theta)$ . Количественный анализ экспериментальных данных показал (см. рис. 4), что примеси мнимых компонент в  $\Delta$  не превышают 2.5%. Из этого авторы [4] делают вывод, что эффекты нарушения симметрии относительно обращения времени не имеют к высокотемпературной сверхпроводимости никакого отношения. Между тем примесь  $s$ -волны в  $\Delta$  оказывается весьма значительной. Для модельной зависимости  $\Delta(\theta) = \Delta_{x^2-y^2} \cos(2\theta) + \Delta_s$  получается  $\Delta_s / \Delta_{x^2-y^2} = -0.1 \pm 0.02$ . Вследствие этого сверхпроводящая щель вдоль оси  $b$  оказывается на  $\approx 20\%$  больше, чем вдоль оси  $a$ , а направления нулей щели сдвинуты на несколько градусов относительно диагоналей  $\theta = (2m+1) \cdot 45^\circ$ , где  $m = 0, 1, 2, 3$ .

Л.Опенков

1. A.J.Leggett, *Nature Physics* 2006, 2, 134
2. *Nature Physics* 2006, 2, 138.
3. D.A.Bonn, *Nature Physics* 2006, 2, 159
4. J.R.Kirtley et al., *Nature Physics* 2006, 2, 190

### Распад квазичастиц в квантовой спиновой жидкости

Современная физика конденсированного состояния вещества во многом основана на концепции элементарных возбуждений – квазичастиц – фундаментальных квантов энергии и импульса. Самые различные системы сильно взаимодействующих друг с другом частиц часто удается описать в терминах квазичастиц, взаимодействующих между собой очень слабо или же не взаимодействующих вовсе. Однако есть и исключения. В некоторых системах сам факт существования квазичастиц нельзя считать доказанным. При этом квазичастицы, подобно нестабильным элементарным частицам, не могут выжить, если определенные каналы их распада разрешены законами сохранения. Впервые распад квазичастиц был предсказан для такого экзотического состояния вещества как сверхтекучий  $^4\text{He}$  (при  $T \rightarrow 0$  это – квантовая бозе-жидкость, кристаллизации которой препятствуют нулевые колебания).

В работе [1] экспериментально показано, что распад квазичастиц имеет место также и в квантовых магнитах. Авторы [1] использовали метод неупругого рассеяния нейтронов для исследования спиновых возбуждений в квазидвумерном органометаллическом соединении со сложным названием “piperazinium hexachlorodocuprate” (PHCC). В этом веществе спины ионов  $\text{Cu}^{2+}$  формируют немагнитную квантовую спиновую жидкость. Оказалось, что, как и в сверхтекучем  $^4\text{He}$ , спектр квазичастичных возбуждений становится неопределенным начиная с некоторого порогового импульса (см. рисунок), а квазичастичный пик сливается с двухчастичным континуумом, так что возбужденные

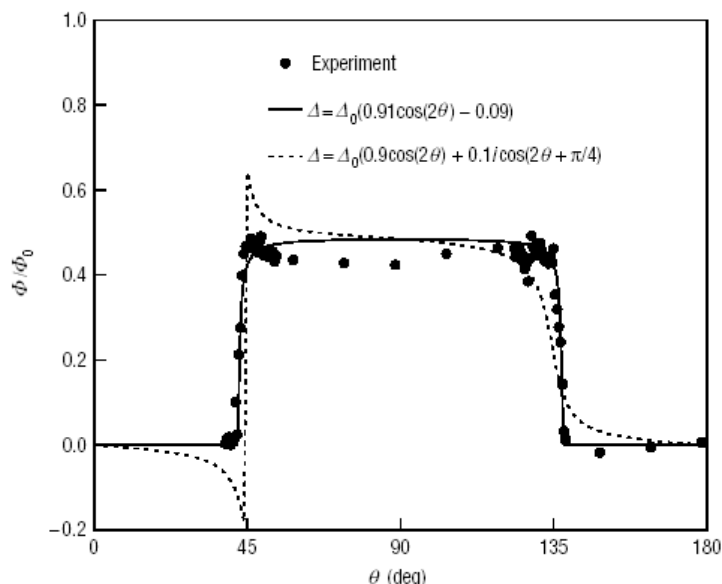


Рис. 4. Магнитный поток через кольцо Y123/Nb как функция  $\theta$ . Точки – эксперимент. Сплошная и пунктирная линии – теория для  $d_{x^2-y^2}$ -волны с примесью  $s$ -волны и  $id_{xy}$ -волны, соответственно.

Для нахождения зависимости  $\Delta$  от угла  $\theta$ , определяющего положение вектора квазиимпульса на контуре Ферми в плоскости  $a$ - $b$  ( $\theta = 0$  вдоль оси  $a$  и  $\theta = \pi/2$  вдоль оси  $b$ ), авторы [4] изготовили об-

состояния уже не являются квазичастицами. При этом же импульсе резко возрастает затухание квазичастиц. Полученные в [1] результаты имеют важное значение для понимания свойств сильно коррелированных систем и разработки методов их математического описания. Это касается, прежде всего, низкоразмерных систем, таких как спиновые цепочки и слоистые ВТСП, особенно если учесть, что спиновые возбуждения, возможно, ответственны за высокотемпературную сверхпроводимость.

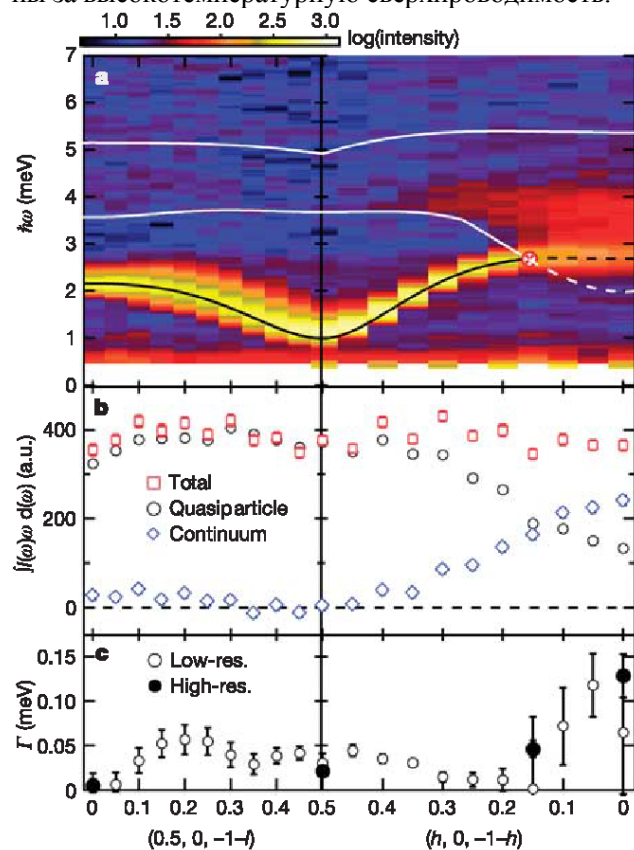


Рис. а) Черная линия – спектр одночастичных возбуждений, белые линии – границы двухмагнонного континуума; б) первые частотные моменты интенсивности рассеяния нейтронов (полный, квазичастичный и для континуума); в) затухание квазичастиц.

1. M.B.Stone et al., Nature 2006, 440, 187

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Углеродные нанотрубки с люминесцирующими частицами

ПерсТ регулярно информирует читателей о наиболее интересных работах по заполнению углеродных нанотрубок (УНТ) различными материалами [1-4]. Сотрудники Univ. Pennsylvania (США) предложили оригинальный способ наблюдения за процессом заполнения УНТ – они наделили углеродные нанотрубки способностью светиться, заполнив их люминесцентными частицами [5]. Авторы использовали светопроницаемость углеродных нанотрубок, выращенных CVD-методом. Нанотрубки длиной от 20 до 50 мкм со средним диаметром ~ 500 нм и толщиной стенок 15 нм были получены в порах мембраны из оксида алюминия (мембрана

затем растворялась в NaOH). Нанотрубки заполняли из микропипетки суспензией люминесцентных частиц в этиленгликоле, воде и смеси этиленгликоль/вода. Люминесцентные частицы представляли собой шарики из полистирола со средним диаметром 50 нм, в оболочку которых производителем введены светящиеся красители. Схема заполнения приведена на рис. 1.

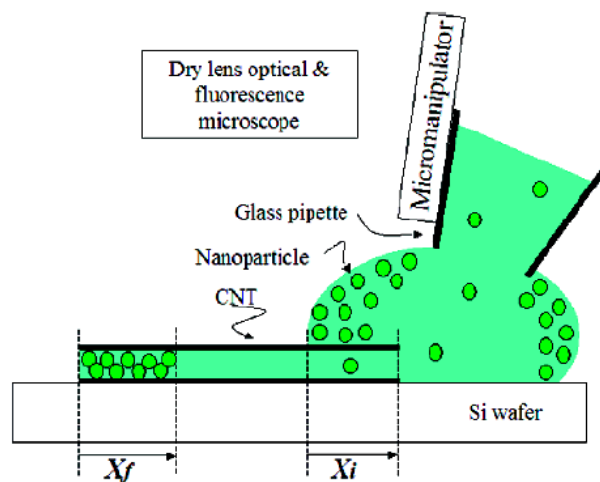


Рис. 1. Схема заполнения УНТ.  $X_i$  – часть УНТ, погруженная в каплю.  $X_f$  – часть УНТ, в которой сформировался плотный слой частиц.

Процесс заполнения наблюдали в оптическом микроскопе. На рис. 2а показано оптическое изображение пустой УНТ длиной 29 мкм. Суспензия легко проникает в нанотрубки за счет эффекта капиллярного втягивания, при этом заполненная часть трубки имеет более темный цвет, чем пустая. Затем наблюдения продолжили, используя люминесцентный микроскоп. Люминесценцию возбуждали с помощью ртутной лампы. На рис. 2б,с,д показаны УНТ через 10, 20 и 40 с после первого появления свечения в противоположном от капли конце трубки.

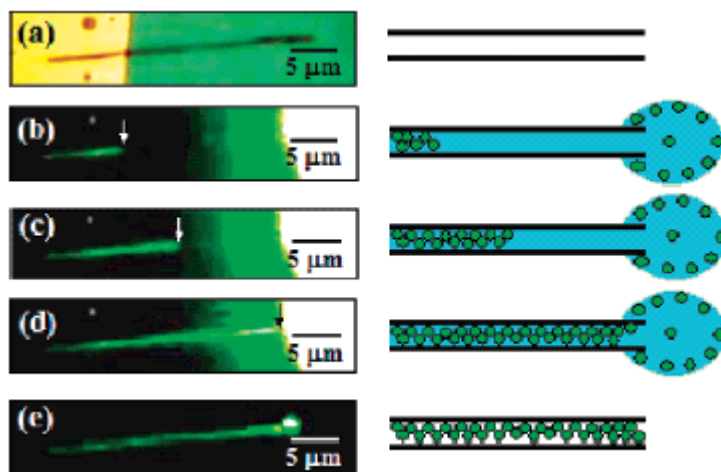


Рис. 2. Заполнение УНТ частицами. а) оптическое изображение пустой УНТ длиной 29 мкм.

Первоначально нанотрубка заполняется суспензией за счет капиллярных сил. Концентрация частиц на этой стадии мала, и люминесценция через стенку трубки не наблюдается. Но постепенно, по мере того, как испарение жидкости с внешнего края компенсируется по-

ступлением новой суспензии из капли, концентрация частиц в нанотрубке растёт. Из области плотной упаковки частиц в противоположном конце нанотрубки регистрируется люминесценция; по мере продолжения процесса размеры этой области растут, и, наконец, трубка полностью заполняется частицами, что видно уже и в электронном микроскопе (рис. 3).

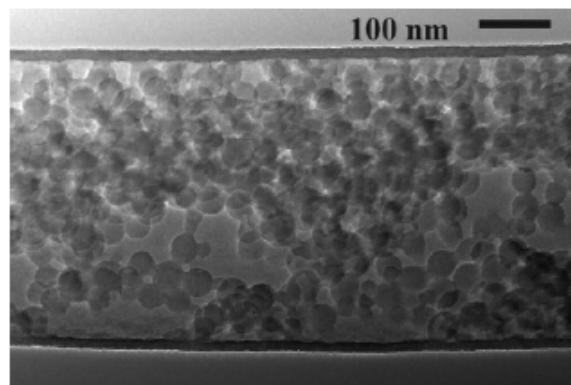


Рис. 3. ТЕМ изображение нанотрубки, заполненной люминесцирующими частицами

Таким образом, авторы [5] показали, что частицы могут переноситься через углеродные нанотрубки, что нанотрубки могут заполняться частицами, и что тонкие стенки прозрачны для люминесценции. Таким же образом можно заполнять нанотрубки ферромагнитными частицами. Авторы считают, что их метод можно применить и для изготовления «наноаквариумов», которые позволят изучать живые макромолекулы под электронным микроскопом в условиях вакуума. В настоящее время они разрабатывают методику «герметизации» нанотрубок, содержащих такие образцы.

О.Алексеева

1. ПерсТ 2003, 10, 10, с.2 [http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2003/3\\_10/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2003/3_10/index.htm)
2. ПерсТ 2005, 12, 12, с.5 [http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2005/5\\_12/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2005/5_12/index.htm)
3. ПерсТ 2006, 13, 4, с.1 [http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/6\\_04/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/6_04/index.htm)
4. ПерсТ 2006, 13, 6, с.5 [http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/6\\_06/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/6_06/index.htm)
5. Nano Letters 2005, 5, 873

### Сигареты с нанотрубным фильтром

Горящая сигарета - это целая химическая фабрика, производящая более 4 тыс. различных соединений, в том числе мутагенных, токсичных и около 60 известных или предполагаемых канцерогенов. К газовым компонентам табачного дыма относятся окись и диокись углерода, цианистый водород, аммоний, изопрен, ацетальдегид, акролеин, нитробензол, ацетон, сероводород.

Фаза табачного дыма, содержащая твердые частицы, включает в основном никотин, воду и смолу - табачный деготь. В составе смолы - полициклические ароматические углеводороды, вызывающие рак, в том числе нитрозоамины, аромати-

ческие амины, изопреноиды, пирен, антрацен. Кроме того, смола содержит простые и сложные фенолы, крезолы, нафтолы, нафталены. В состав твердой фазы входят также такие компоненты как ртуть, кадмий, стронций, полоний, таллий, свинец, мышьяк. Соответствующие данные по составу специфических компонентов табачного дыма и много другой полезной и интересной информации (курильщики, почтайте!) можно найти на сайте <http://Sigarets.ru>.

Когда курящий затягивается, он вдыхает так называемый главный поток дыма (побочный поток дыма идет между затяжками), причем, при курении сигарет без фильтра 32%, а с фильтром - 23% от этого главного потока. Большая часть дыма выделяется в окружающую среду, где его вдыхают некурящие - так называемые пассивные курильщики. Производство сигарет с фильтром дает возможность вводить добавки (активированный уголь, цеолиты), в какой-то мере сорбирующие вредные вещества. Однако постоянное ужесточение требований к качеству сигарет вызывает необходимость повышения эффективности сорбентов. Китайские исследователи [1] предложили использовать углеродные нанотрубки (УНТ), уже хорошо зарекомендовавшие себя для удаления фтора, свинца, кадмия из растворов [2,3].

В экспериментах использовали окисленные УНТ (О-УНТ), полученные при каталитическом пиролизе пропилена и последующей обработке в концентрированной азотной кислоте. Для сравнения были взяты стандартные сорбенты - цеолит NaY и активированный уголь.

Свойства сорбентов, важные для интерпретации результатов, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства сорбентов [1]

| Сорбент              | Размер пор (нм) | Уд. поверхность S <sub>ВЕТ</sub> (м <sup>2</sup> /г) |
|----------------------|-----------------|------------------------------------------------------|
| Цеолит NaY           | 0.4             | 766                                                  |
| Активированный уголь | 3-7.0           | 904                                                  |
| О-УНТ                | 3-40            | 151                                                  |

Все сорбенты были помещены в фильтрующий мундштук сигарет. Процесс «курения» проводили автоматически в стандартных условиях. Главный поток дыма проходил через сорбенты, затем конденсат собирали на фильтрах и взвешивали. Анализ на никотин и смолу проводили методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии. О-УНТ оказались наиболее эффективными сорбентами никотина (до 0.56 мг/сигарета) и смолы (до 13 мг/сигарета), несмотря на то, что их удельная поверхность гораздо меньше, чем у цеолита или активированного угля. На рис.1 приведены ТЕМ-изображения углеродных нанотрубок до и после адсорбции. Искривленные О-УНТ длиной от сотен нанометров до микрон образуют агрегированные поры размером 3-40нм, которые подходят для сорбции всех типов молекул табачного дыма. Обработка азотной

кислотой приводит к открытию нанотрубок, благодаря чему они используются как контейнеры, внутренние каналы и межслоевые пространства которых заполняются никотином и смолой (см. рис.2). Часть вредных веществ адсорбируется на внутренней поверхности стенок УНТ, многие соединения (главным образом, полициклические ароматические углеводороды) сорбируется или конденсируется на внешней поверхности, как видно на рис. 1б.

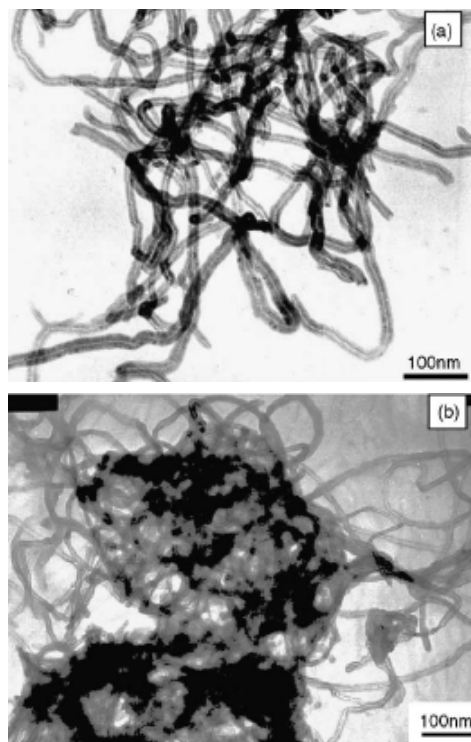


Рис. 1. ТЕМ-изображения углеродных нанотрубок до и после адсорбции

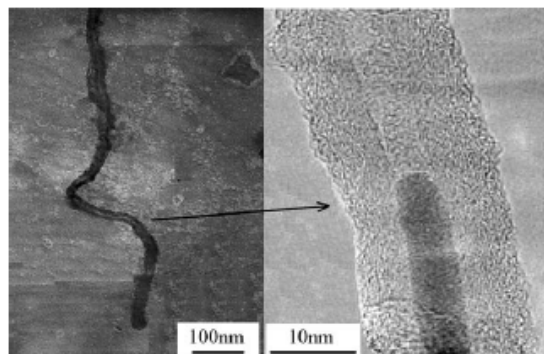


Рис. 2 HRTEM- изображения отдельной О-УНТ после сорбции дыма

Цеолит, имеющий размеры пор 0.74нм, может эффективно сорбировать молекулы нафталина, антрацена, имеющие размер 0.73нм, и некоторые другие, но практически не снижает содержание никотина (молекулярный размер 0.78нм) и ряда других компонентов смолы, имеющих молекулярный размер более 0.9 нм. Размеры пор и удельная поверхность активированного угля больше, чем у цеолита, и, соответственно, эффективность удаления никотина и смолы выше, но, тем не менее, гораздо ниже, чем для О-УНТ (см. таблицу 2). По мнению авторов, важную роль в повышении эффективности может играть капиллярная конденсация некоторых компонентов в УНТ.

Оптимальное количество О-УНТ в фильтре сигареты для наиболее эффективного удаления никотина, и смолы по оценкам авторов [1] равно 20-30мг. Даже если стоимость сигареты с таким фильтром немного возрастет, польза для здоровья будет гораздо больше затрат. Итак, найдена новая область применения углеродных нанотрубок! Может быть, производители сигарет станут теперь спонсорами соответствующих научных исследований и разработок?.

Таблица 2. Сравнение сорбционных характеристик О-УНТ, цеолита и активированного угля

| Сорбент              | $M_0$<br>(мг/сигарета) | $M_{\text{никотина}}$<br>(мг/сигарета) | $\eta_{\text{никотина}}$ (%) | $M_{\text{смолы}}$<br>(мг/сигарета) | $\eta_{\text{смолы}}$ (%) |
|----------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Без сорбента         | 0                      | 1.1                                    |                              | 16.0                                |                           |
| Цеолит NaY           | 50.5                   | 1.01                                   | 8.2                          | 9.4                                 | 41.3                      |
| Активированный уголь | 50.5                   | 0.72                                   | 34.5                         | 6.3                                 | 60.6                      |
| О-УНТ                | 50.5                   | 0.54                                   | 50.9                         | 3.0                                 | 81.3                      |

$M_0$  – масса сорбента в одной сигарете,  $M_{\text{никотина}}$  и  $M_{\text{смолы}}$  – масса никотина и смолы в табачном дыме после сорбента,  $\eta_{\text{никотина}}$  и  $\eta_{\text{смолы}}$  – эффективность удаления никотина и смолы сорбентом для одной сигареты.

О.Алексеева

1. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **252**, 2933
2. *ПерсТ*, 2002, **9**, вып.3, с.3; вып.18, с.6
3. *ПерсТ* 2003, **10**, вып.11, с.5

### Нанотрубный осциллятор

Механические свойства углеродных нанотрубок (УНТ) зависят от приложенного электрического напряжения. Благодаря этому свойству УНТ могут служить основой *нанозлектромеханических систем (NEMS)*, например, осцилляторов, спо-

собных совершать механические колебания под действием приложенного напряжения либо механической нагрузки. Принцип действия таких устройств основан на наличии упругих сил между соседними нанотрубками, составляющими жгуты, либо между соседними слоями многослойной нанотрубки. В работе [1], выполненной в Университете Сеула (Южная Корея), представлены результаты детального моделирования подобных осцилляторов.

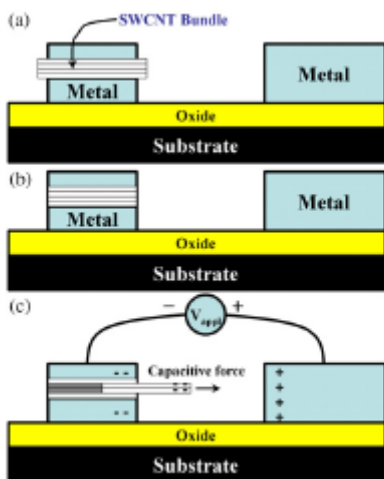
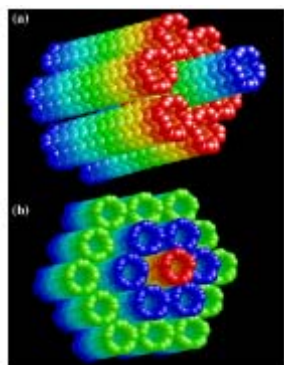


Рис.1. Схема устройства

Согласно этой схеме, металлические электроды осаждены на оксидный слой. Внутри одного из электродов вводится жгут, содержащий некоторое количество однослойных УНТ (рис. 1а). При этом внешние части нанотрубок жгута прочно связаны с металлом, в то время как одна (или несколько) внутренняя нанотрубка является подвижной и способна выдвигаться из жгута под действием напряжения, приложенного к электродам. Методом травления поверхность этого электрода зачищается заподлицо с нанотрубкой (б). Приложение напряжения к электродам вызывает движение одной или нескольких внутренних нанотрубок, принадлежащих жгуту (с). При отключении приложенного напряжения эти нанотрубки под действием вандерваальсовских сил притяжения, действующих со стороны закрепленных трубок, возвращаются назад и могут испытывать осцилляции.

Рис. 2.



В детальных расчетах, выполненных методом молекулярной динамики для температур 1, 100 и 300К, рассматривали жгуты, составленные из однослойных УНТ с индексами хиральности (5, 5) (рис. 2). Рис. 2а соответствует ситуации, когда осциллирующими

элементом является внутренняя нанотрубка, а в случае, проиллюстрированном на рис. 2б, осциллирующим элементом является первая внутренняя оболочка, состоящая из шести нанотрубок. В обоих случаях, как показывают расчеты, зависимость энергии вандерваальсовского взаимодействия подвижного элемента со своим окружением от положения имеет форму, близкую к параболической и характерную для гармонического осциллятора. Характерная величина возвращающей силы составляет 5 – 10эВ/нм. Это приводит к осцилляциям с характерными частотами в диапазо-

не десятков ГГц, в зависимости от длины и структуры осциллирующего элемента. Расчеты показывают, что основные механизмы затухания колебаний связаны с трением осциллирующего элемента. С ростом температуры затухание, обусловленное обоими механизмами, возрастает. Вследствие значительного уровня затухания для постоянной работы рассматриваемых осцилляторов необходимо наличие вынуждающей силы, компенсирующей диссипацию энергии при колебаниях.

А.В.Елецкий

1. Nanotechnology 2006, 17, 2250

## НИТРИДНЫЕ НОВОСТИ

### Влияние слоя $AlN$ на параметры транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на гетероструктуре $Al_{0,38}Ga_{0,62}N$

Полупроводниковые  $GaN$  приборы – лучшие кандидаты для высокотемпературных, высокочастотных, высокоомощных применений. Разработкой их технологии активно занимаются многие компании. Рост гетероструктур  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  с высоким содержанием  $Al$  приводит к увеличению концентрации носителей в канале. Однако такую структуру вырастить достаточно сложно, так как при увеличении концентрации  $Al$  падает подвижность электронов в канале. Для решения проблемы было предложено ввести тонкий слой  $AlN$  между барьером  $AlGa$  и каналом  $GaN$ , уменьшающий рассеяние носителей на гетерогранице при сохранении высокой концентрации двумерного электронного газа в канале.

Группа из Inst. Semiconductors (Chinese Acad. Sci., Пекин) исследовала влияние времени роста прослойки  $AlN$  на свойства структуры [1]. Все исследованные структуры  $Al_{0,38}Ga_{0,62}N/AlN/GaN$  были выращены методом  $MOCVD$  на 5 см сапфировых подложках. Активная область состояла из канала  $GaN$  толщиной 110нм, прослойки  $AlN$  и барьера  $Al_{0,38}Ga_{0,62}N$  толщиной 20нм. В эксперименте изменяли время роста слоев  $AlN$  (0; 12; 15; 18; 24с) при неизменных прочих условиях. Как видно из рис. 1, время роста оказало существенное влияние на параметры структуры: среднее поверхностное сопротивление имело минимальную величину 277Ом/□ при времени роста 12с, и резко возрастало при времени роста более 18с, достигая 522 Ом/□ при 24с.

Измерения проводили методом Холла. Высокая концентрация  $2DEG$  ( $1.5 \times 10^{13} \text{см}^{-2}$ ), обусловленная большой концентрацией  $Al$  в барьерных слоях (38%) и большим разрывом зон  $\Delta E_c$  на гетерогранице за счет слоя  $AlN$ , достигалась при малом времени роста (12с). В диапазоне времени роста 12 - 18с подвижность  $2DEG$  в канале изменяется мало (от  $5537 \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$  до  $4387 \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$  при 85К и от  $1460 \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$  до  $1107 \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$  при 300К), однако при дальнейшем увеличении времени роста подвижность резко падает до  $810 \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$  ( $T=300\text{К}$ ). Подвижность носителей в канале напрямую связана с временем роста, так как увеличение

толщины структуры приводит к образованию дефектов и увеличению шероховатости гетерограницы. Эксперимент показал, что оптимальная толщина слоя  $AlN$  1-1.5 нм позволяет получить

структуры с наилучшими электрическими параметрами. Существенно изменялись и другие параметры (концентрация  $2DEG$  и подвижность носителей в нем) – см. рис. 2.

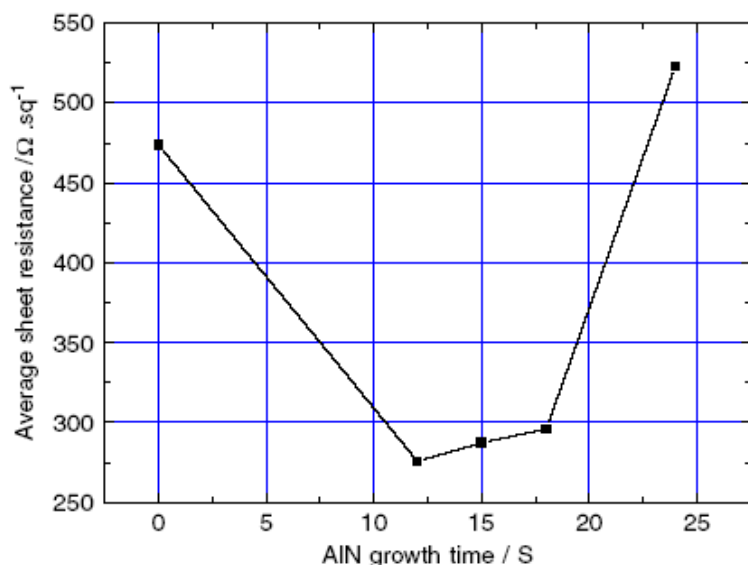


Рис. 1. Среднее поверхностное сопротивление пластинок в зависимости от времени роста слоя  $AlN$ .

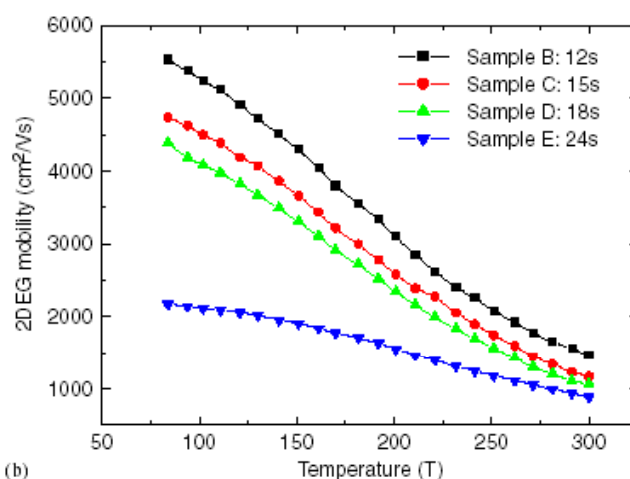
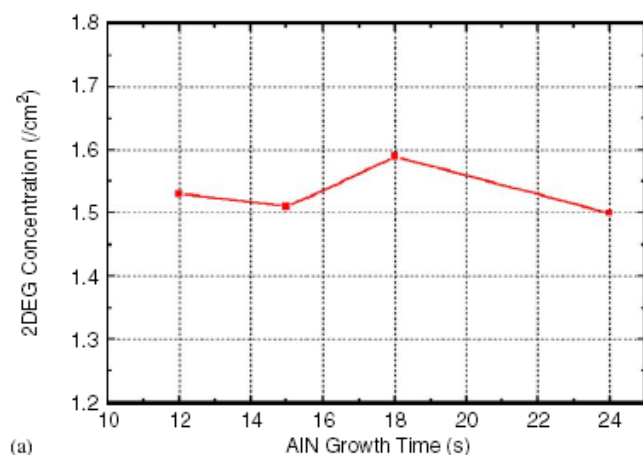


Рис. 2. Концентрация  $2DEG$  в канале транзистора в зависимости от времени роста при комнатной температуре (a), подвижность  $2DEG$  в зависимости от температуры (b).

С. Широков

1. *J. Cryst. Growth* 2006, **289**, 415

## НАНОСТРУКТУРЫ

### Характеристики $\delta$ -легированных $HEMT$ с линейно изменяющимся каналом $In_xGa_{1-x}As$

Транзисторы с высокой подвижностью электронов ( $HEMT$ ) на основе  $InP$  существенно превосходят по параметрам аналогичные приборы на основе  $GaAs$ . Большая рабочая частота и меньший шум  $InP$   $HEMT$  обусловлены меньшей эффективной массой электронов, большей скоростью насыщения электронами, большей поверхностной плотностью носителей в канале  $InGaAs$ .

Ученые из Natn. Cheng Kung Univ. и Feng Chia Univ. (Тайвань) исследовали  $HEMT$  транзисторы на основе  $\delta$ -легированных структур  $InAlAs/InGaAs/InP$  с линейно изменяющимся составом канала ( $LGC-HEMT$ )  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x$  линейно изменялся в диапазоне 0.5 – 0.56) [1]. В такой структуре увеличивается подвижность электронов в канале и пороговые поля ударной ионизации. В работе [1] проводили сравнение  $LGC-HEMT$  с транзисторами, у которых постоянные кристаллических решеток слоев согласованы с каналом  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  ( $LM-HEMT$ ).

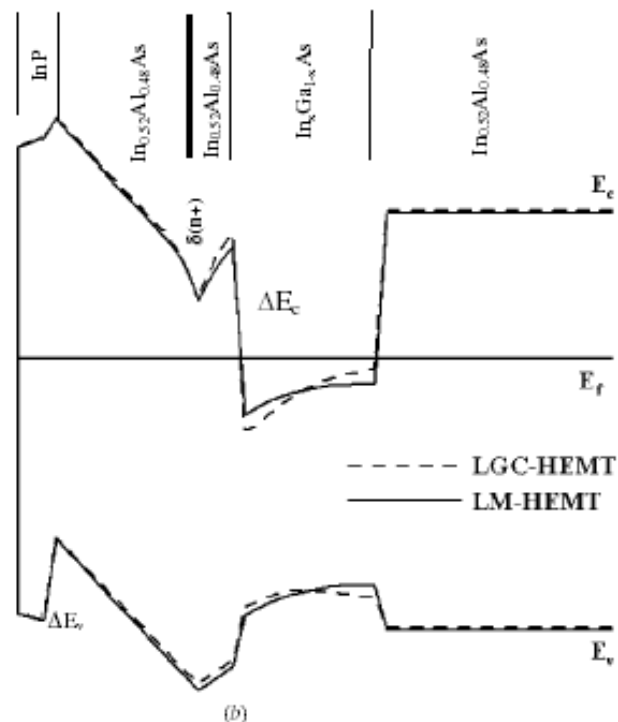
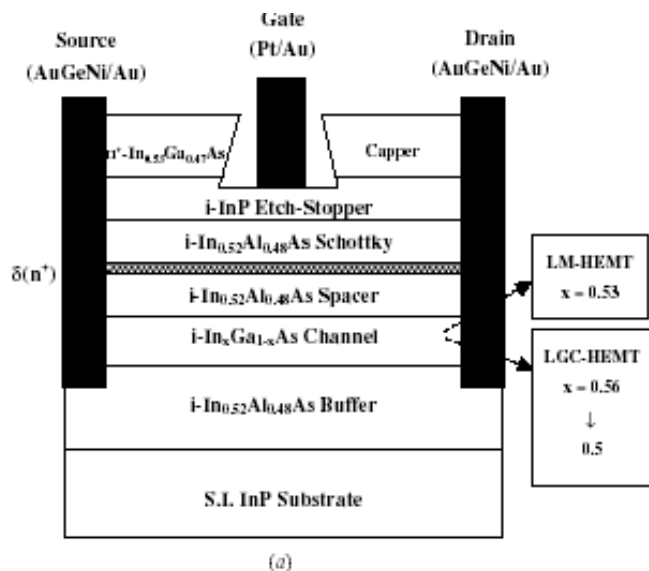


Рис. 1. Схематическое сечение (a) и зонная диаграмма исследованных структур(b)

Сравнительные параметры представлены в таблице. Ток утечки затвора складывается из двух основных компонентов: 1) электроны, туннелирующие из барьера Шоттки в канал (увеличивают ток затвора  $I_G$  и уменьшают напряжение затвор – сток  $V_{GD}$ ) и 2) дырки, образованные ударной ионизацией в канале и туннелирующие через барьер валентной зоны в затвор. Максимальный ток утечки в открытом состоянии составил 0.7мкА/мм и 4.6мкА/мм для *LGC-HEMT* и *LM-HEMT*, соответственно.

Таблица. Сравнительные параметры *LGC-HEMT* и *LM-HEMT*, измеренные в одинаковых условиях.

| Параметр             | Значение параметра |                |
|----------------------|--------------------|----------------|
|                      | <i>LGC-HEMT</i>    | <i>LM-HEMT</i> |
| $g_{m,max}$ , мСм/мм | 346                | 295            |
| $g_d$ , мСм/мм       | 3.6                | 9.3            |
| $A_V$                | 93.1               | 30.8           |
| $BV_G$ , В           | 16.6               | 18.25          |
| $V_{on}$ , В         | 0.5                | 0.8            |
| $f_t$ , ГГц          | 41                 | 32             |
| $f_{max}$ , ГГц      | 63                 | 41             |

$g_m$  - внешняя крутизна характеристики прямой передачи;

$g_{m,max}$  - максимальная внешняя крутизна характеристики прямой передачи (измерена при напряжении  $V_{DS}=2В$ );

$g_d$  - выходная проводимость (измерена при напряжении  $V_{DS}=2В$ ,  $V_{GS}=0В$ , плотности тока  $I_{DS}=110мА/мм$ );

$A_V = g_m/g_d$  - коэффициент усиления по напряжению;  
 $BV_{GD}$  - напряжение пробоя затвор-сток (измерено при токе затвор-сток  $I_{GD}=-1мА/мм$ );

$V_{on}$  - прямое отпирающее напряжение (измерено при токе  $I_{GD}=1мА/мм$ );

$f_t$  - максимальная частота отсечки при единичном усилении;

$f_{max}$  - максимальная частота генерации.

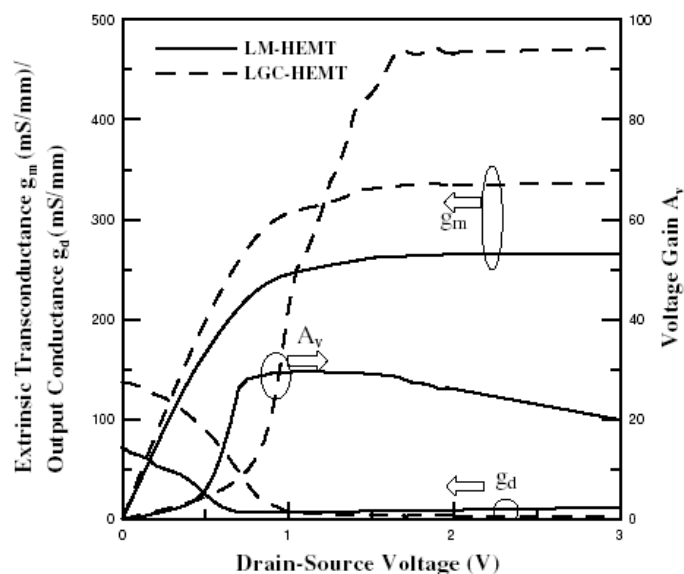


Рис. 2. Внешняя крутизна характеристики прямой передачи, выходная проводимость и коэффициент усиления по напряжению в зависимости от напряжения сток-исток при комнатной температуре.

Большая величина прямого отпирающего напряжения  $V_{on}$  приводит к большим токам в канале и, как следствие, к увеличению мощности и расширению рабочего диапазона частот. СВЧ параметры были исследованы в диапазоне частот 0.5-40ГГц в схеме с общим истоком при комнатной температуре. Результаты показывают,

что СВЧ параметры *HEMT* транзистора с линейно изменяющимся составом канала значительно превосходят аналогичные параметры транзистора с согласованными постоянными кристаллических решеток слоев гетероструктуры.

*С. Широков*

*1. Semicond. Sci. Technol. 2006, 21, 619*

## **ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК**

### **Университет на месторождении гелия**

В непосредственной близости от Оренбурга находится уникальное предприятие - единственный на евразийском пространстве Оренбургский гелиевый завод, извлекающий легчайший благородный газ - гелий - из природного газа. Гелий – невосполнимый природный ресурс и стратегическое сырье. Он необходим для получения низких и сверхнизких (вблизи абсолютного нуля) температур, где даже обычные материалы проявляют необычные свойства. На мировом рынке существует высокий устойчивый спрос на гелий.

Не секрет, что многие уникальные экспериментальные установки в нашей стране простаивают из-за дороговизны сжиженного гелия (цена за 1 литр *LHe* достигает 10 долл.). Например, стандартные измерения в ЭПР спектрометре требуют до 30л *LHe* в сутки. Ограниченные финансовые возможности многих наших научных организаций не позволяют в нужном количестве приобретать гелий и, минуя российские исследовательские учреждения, ценный газ из Оренбурга попадает в Германию, Францию и другие страны Западной Европы. По этой причине автор настоящей заметки выполняет часть своих научных исследований за рубежом.

Чтобы изменить ситуацию, Оренбургский университет (ОГУ - <http://www.osu.ru/>) разработал новую инновационную образовательную программу, предусматривающую создание уникального научно-образовательного и технологического центра низкотемпературных исследований и технологических разработок, на базе которого начнется подготовка специалистов, способных проводить низкотемпературные исследования в физике конденсированного состояния, химии и биологии на мировом уровне. ПерсТ, обратившись за информацией о новом центре к проректору ОГУ по научной работе проф. С.Н. Летуте, получил ответ: «Подобного центра в России в настоящее время не существует, так как общепризнанные лидеры низкотемпературных исследований ориентированы на фундаментальные области физики, например, физики сверхпроводимости, ядерной физики, разработки криогенной аппаратуры и т.д. и зачастую не знакомы с технологическими потребностями. Большая часть таких центров на-

ходится в системе Академии наук и слабо связана с высшими учебными заведениями. Из-за дороговизны гелия и недостатка финансирования неуклонно сокращаются низкотемпературные исследования и в Москве, и в России в целом. Поэтому создание низкотемпературного центра в Оренбурге позволит замедлить эту опасную тенденцию, грозящую затормозить технологическое развитие страны. Разумеется, молодому университету, каким является ОГУ, в настоящее время для организации задуманного нужна интеллектуальная, кадровая, организационная и финансовая помощь. С созданием учебно-научного центра криотехнологий система высшего образования России получит свой центр коллективного пользования, доступность и возможности которого стимулируют творчество научно-исследовательских коллективов и высших учебных заведений, где невозможно приобретение и эксплуатация современных дорогих в эксплуатации приборов, использующих уникальные возможности жидкого гелия».

Еще одним привлекательным аспектом создания центра криогенных технологий является возможность образования при нем филиалов институтов из системы Академии наук. Университет намерен в будущем бесплатно предоставлять комфортабельные помещения криогенного центра для размещения там оборудования Академии наук. В результате ученые получают возможность осуществить давно задуманные эксперименты, а студенты увидят работу мэтров биологии, химии и физики.

*Р. Моргунов*

## **КОНФЕРЕНЦИИ**

**July 2-8, 2006**, Boulder, Colorado. 14 Int. Conf. on Composites/Nano Engineering (ICCE-14).

### *Topics*

Nano Materials, Devices and Actuators, Inorganic Nanowires, Nano-Fabrication, Nano Lithography, Nanosensors, Magnetic Materials, Thin Films, Surface-Coating, Processing/Characterization.

ABSTRACTS – before June 9, 2006

Details: <http://www.uno.edu/~engr/composite>

**25 февраля – 3 марта 2007.** Снежинск, Россия. 7 Международный уральский семинар “Радиационная физика металлов и сплавов”.

### *Темы:*

- общие вопросы физики радиационных повреждений металлов и сплавов;
- влияние облучения и самооблучения на свойства упорядоченных соединений, в том числе, с сильными электронными корреляциями;
- изменение структуры и свойств металлов и сплавов (модельных и конструкционных для ядерной и термоядерной энергетики) под действием облучения;
- поведение имплантированных и трансмутированных газовых примесей в облученных металлах и сплавах;
- приборы и техника эксперимента.

В частности, предполагается подробно обсудить следующие вопросы:

- влияние внешних воздействий на структурно-фазовые изменения в актинидах;
- деформационные и радиационные дефекты в металлах и сплавах и их влияние на структурно-фазовые превращения;
- влияние нано- и субмикроструктуры на радиационную повреждаемость материалов.

Планируются также доклады в смежных областях (радиационные эффекты в диэлектриках, полупроводниках и сверхпроводниках).

Тезисы докладов должны быть присланы до **1 октября 2006 г.**

**Основные контрольные даты:**

01 августа 2006 – окончание регистрации

01 октября 2006 - окончание приема тезисов

Контакт:

Арбузов В.Л.

e-mail: [radiation7@imp.uran.ru](mailto:radiation7@imp.uran.ru)

[www.imp.uran.ru/radiation](http://www.imp.uran.ru/radiation)

факс: +7-343-3740003; телефон: +7-343-3783850, 3783538

Elliott Celia M.

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

e-mail: [cmelliot@uiuc.edu](mailto:cmelliot@uiuc.edu)

[www.physics.uiuc.edu/Research/Workshops/7th\\_Urals](http://www.physics.uiuc.edu/Research/Workshops/7th_Urals)

fax: 1-217-244-4293; phone: 1-217-244-7725

**Январь 2007 г. Москва.** 4 Всероссийская конференция **«Необратимые процессы в природе и технике».**



Организаторы - Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Физический институт им. П.Н. Лебедева, Центр прикладной физики МГТУ.

Секции

- *Перспективные направления исследования необратимых физических процессов*
- *Математическое моделирование физических процессов и технических систем*
- *Фундаментальные проблемы создания новой техники*
- *Необратимые оптические процессы*
- *Научно-методические проблемы преподавания естественнонаучных дисциплин*

Тезисы – до 30 сентября 2006 г.

Материалы направлять по адресу: 105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра физики.

Контактные телефоны: (495) 263-63-52; 263-63-68; 261-67-35.

E-mail [nppt@mx.bmstu.ru](mailto:nppt@mx.bmstu.ru)

С программами предыдущих конференций можно ознакомиться на сайте:

<http://fn.bmstu.ru/nppt>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой  
ИФТТ РАН и РНЦ «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. Елецкий, Ю.Метлин,  
Р.Моргунов, Л.Опенов, С.Широков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Н.Морозова

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