

Том 11, выпуск 23

В этом выпуске:

НАНОСТРУКТУРЫ

Нулевое сопротивление имеет глубокие корни в российской науке

27 октября с.г. в конференц-зале ФИАН состоялась сессия отделения физических наук РАН, посвященная эффекту нулевого сопротивления двумерного газа, находящегося в магнитном поле и подверженного микроволновому излучению. Первая публикация об открытии этого эффекта появилась в 2002 г. и принадлежит R.Mani с соавторами. Немного позднее о наблюдении эффекта сообщил M.Zudov с коллегами. Группа Zudov'a уже несколько лет «видела» осцилляции магнетосопротивления, возникающие под воздействием излучения, однако до нуля сопротивления они дотянулись не сразу. Первая интерпретация нулевого сопротивления, выдвинутая Mani, утверждала, что под воздействием излучения в электронной системе возникает новое состояние, родственное сверхпроводящему. От этой интерпретации быстро отказались, но бум уже возник. И в самом деле, это, пожалуй, одно из самых ярких явлений в двумерных системах, открытое после квантового эффекта Холла.

В настоящее время большинство исследователей склонны считать, что в основе нулевого сопротивления лежит эффект абсолютной отрицательной проводимости (АОП), возникающий в замагниченном двумерном газе под воздействием излучения и предсказанный в работах В.И.Рыжия более 30 лет назад. Состояние с отрицательной проводимостью является неустойчивым, система распадается на домены, а измеряемое макроскопическое сопротивление становится равным нулю. С этой интерпретацией некоторые не согласны. Полной ясности пока нет, тем более что сами домены пока никто не видел. Целью сессии было выяснить предысторию открытия и понять, насколько теория справляется с его объяснением.

В докладе В.Ф.Елесина (МИФИ) была упомянута работа автора с коллегами 1966 года, в которой рассматривается возможность возникновения АОП в объемном полупроводнике в результате взаимодействия с оптическими фонами при их поглощении. Тогда же была доказана неустойчивость такого состояния. Позднее, в 1968 году, была предсказана АОП в магнитном поле при рассеянии на заряженных примесях. Однако в трехмерных системах подобная АОП никогда не была обнаружена.

В.Ф.Гантмахер (ИФТТ РАН) рассказал о магнетоприменных резонансах в *p-Ge*, которые авторы наблюдали много лет назад. Они также приводят к осцилляциям магнетосопротивления. Надо отметить, что недавно обнаруженные осцилляции магнетосопротивления двумерного газа при частотах излучения ниже циклотронной вполне могут быть обусловлены генерацией магнетоплазмонов.

Свой доклад В.И.Рыжий (Univ. Aizu, Япония) начал как раз с того, что именно использование двумерных систем позволило наблюдать эффект нулевого сопротивления, возникающий вследствие АОП, предсказанной в работах докладчика, начиная с 1968 года.

15 декабря 2004 г.

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ

- 2 Спиновый эффект Холла в полупроводниках

Дислокации формируют наноструктуру

СВЕРХПРОВОДНИКИ

- 3 Семейство пироксенов растет

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Углеродные нанотрубки в рентгеновской динамической радиографии

Нанотрубки-манганиты

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 5 1-ая Международная конференция «ФПС'04»

НОВОСТИ ФИЗИКИ В БАНКЕ ПРЕПРИНТОВ

- 9 О корреляции критической температуры и сверхтекучей плотности в ВТСП

Квадратная вихревая решетка в $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$

- 10 Огромные критполя в пленках MgB_2

Немонотонная d-волновая щель в электронном ВТСП

Моделирование процесса декогеренции квантового регистра. Неудача?

Динамика решетки и электрон-фононное взаимодействие в углеродной нанотрубке (3,3)

Именно в двумерных системах достигнута рекордная подвижность, кроме того, в замагниченном двумерном газе очень низкая темновая проводимость. Фотопроводимость при любой интенсивности излучения может иметь отрицательный знак, вопрос только в том, сумеет ли она пересилить темновую проводимость. Другой счастливой случайностью было то, что исследовали слабые магнитные поля, циклотронная частота, а вместе с ней и необходимая частота излучения, оказались низкими, что позволило наблюдать эффект при достижимой мощности излучения. По мнению докладчика, его давние работы и работы последнего времени дают вполне адекватное описание явления. По всей видимости, эффект обусловлен рассеянием на примесях с поглощением фотонов. Однако рассеяние на фонах может усложнить картину, поскольку дает вклад в проводимость противоположного знака. Построенная теория объясняет и температурную зависимость, и наличие осцилляций на гармониках циклотронного резонанса, и насыщение осцилляций с ростом интенсивности излучения.

Доклад С.И.Дорожкина (ИФТТ РАН) был посвящен развитой им теории стимулированных излучением переходов внутри уширенных уровней Ландау, создающих инверсную заселенность. В результате инверсной заселенности возникает отрицательная проводимость. Сам автор настаивает на том, что эта теория объясняет большинство экспериментальных фактов и даже наличие особенности в проводимости при частоте излучения, равной половине ларморовской частоты. Большинство теоретиков против этой модели. Уширение уровня Ландау, вероятнее всего, неоднородное, а это означает, что состояния с разностью энергий, равной энергии фотона, могут находиться на огромном расстоянии друг от друга. Кроме того, В.Ф.Елесин утверждает, что, по его мнению, создание инверсной заселенности в непрерывном спектре при перебрасывании электронов снизу вверх по энергии (аналог оптической накачки) невозможно.

По мнению выступившего в дискуссии В.А.Волкова (ФИАН), окончательно разобраться с эффектом нулевого сопротивления удастся, если принять во внимание также и сопутствующие явления, а именно, циклотронное поглощение и поведение осцилляций Шубникова-де Гааза.

В.Вьюрков

Спиновый эффект Холла в полупроводниках

Известно, что если образец, по которому течет электрический ток, поместить в перпендикулярное магнитное поле, то возникнет поперечная разность потенциалов. Этот эффект получил название эффекта Холла. Он широко используется для исследования различных транспортных характеристик твердых тел и находит практическое применение (например, в магнитных датчиках). Некоторое время тому назад было высказано предположение, что

в парамагнетике даже в отсутствие внешнего магнитного поля может возникать "спиновый ток", направленный перпендикулярно электрическому полю. При этом электроны со спинами "вверх" и "вниз" двигаются навстречу друг другу, так что переноса электрического заряда не происходит, но зато на противоположных краях образца скапливаются электроны с разнонаправленными спинами.

David Awschalom с сотрудниками (Калифорнийский университет в Санта Барбара) сообщили о первом экспериментальном наблюдении спинового эффекта Холла [1]. Для его регистрации в тонких полупроводниковых пленках *GaAs* и *InGaAs* они использовали оптическую методику и показали, что электронные спины на краях пленки действительно имеют противоположную поляризацию – в соответствии с теоретическими предсказаниями. Этот эффект открывает новые возможности для манипулирования спинами электронов в немагнитных полупроводниках при $H = 0$. В частности, он может быть использован для распределения спинполяризованного тока и для усиления спиновой поляризации.

1. Science, 306, 1117

Дислокации формируют наноструктуру

Уметь управлять параметрами самособирающихся массивов квантовых точек важно как для усовершенствования уже существующих оптоэлектронных приборов (например, полупроводниковых лазеров), так и для создания новых (например, однофотонных источников для квантовой информатики). Авторы работы [1] попытались создать массив квантовых точек на основе арсенида галлия, используя периодические поля упругих напряжений регулярной сетки дислокаций, расположенной неглубоко под поверхностью полупроводника (надо отметить, что эту идею уже ранее опробовали на кремнии).

Остроумный метод создания таких регулярных дислокационных структур был предложен несколько лет назад [2]. Если сращивать две монокристаллические пластины одного и того же материала, между кристаллографической ориентацией которых внесена небольшая «разориентировка», то на их границе формируется регулярная система дислокаций, компенсирующих это несоответствие. Таким методом ранее уже удалось получить регулярные сетки дислокаций в металлах и кремнии.

В работе [1] были взяты две пластины *GaAs*, разориентированные между собой в двух направлениях: был внесен некоторый поворот вокруг оси, перпендикулярной поверхности (twist). Сращивание таких пластин сопровождалось формированием квадратной двумерной сетки винтовых дислокаций и разориентировкой вокруг оси, лежащей на исходной поверхности образца (001) (tilt), что привело к формированию одномерной сетки смешанных дислокаций. Периодичность получаемой в процессе сращи-

вания пластин дислокационной структуры определяется формулой $D=b'/2\sin\theta/2$, где b' – компонента вектора Бюргерса, задействованная в компенсации, и θ – угол разориентировки. Для $A^{III}B^V$ полупроводников винтовой дислокации в этой формуле соответствует полный модуль вектора Бюргерса, равный $a/\sqrt{2}$ (a – параметр решетки), а смешанной дислокации – компонента вектора Бюргерса, перпендикулярная плоскости срачивания, $a/2$.

Подготовленные таким образом пластины сжимают и отжигают в течение часа при 600°C под нагрузкой. Между ними образуются ковалентные связи и формируются сетки дислокаций.

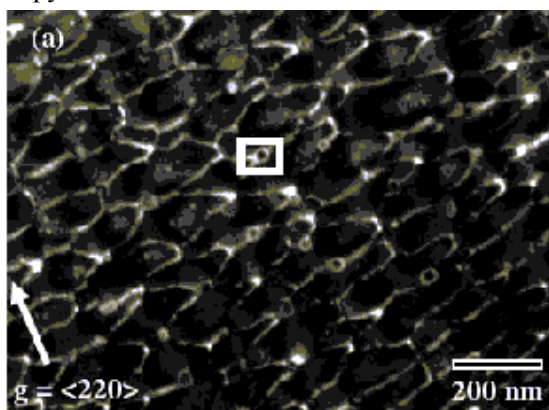


Рис. 1. (а) ПЭМ изображение «композитной подложки» с полученной регулярной дислокационной сеткой. Прямоугольником выделена поверхностная полость, образовавшаяся в результате несовершенства поверхностей. (б) Схема, расшифровывающая рис. 1а. Пунктирными линиями показаны смешанные дислокации, сплошными – винтовые.

На рис. 1 представлено изображение получившейся дислокационной сетки. Затем лишний материал удаляли, чтобы полученная сетка находилась неглубоко под поверхностью (в данном случае 20 нм) и на поверхность эпитаксиально наращивали гетероструктуру $GaAs/InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$. Атомная силовая микроскопия сформированной поверхности подтверждает, что упругие напряжения, создаваемые дислокационной сеткой, приводят к неоднородному осаждению материала, и период получившейся поверхностной наноструктуры задается периодом дислокационной сетки. Авторам работы [1] пока не удалось получить массив

квантовых точек на этом материале, но это уже вопрос подбора параметров формируемой дислокационной сетки и условий осаждения.

Л. Дунин-Барковский

1. *J.Phys.:Condens.Matter*, 2004, **16**, 7941.
2. *Appl.Phys.Lett.*, 1990, **56**, 737.

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Семейство пироксенов растет

ПерсТ (вып. 7 с.г.) уже сообщал об открытии нового класса сверхпроводников со структурой пироксена, среди которых рекордсменом является соединение KOs_2O_6 с критической температурой ~ 10 К, и предсказывался новый всплеск интереса к оксидной сверхпроводимости. На важность исследований в этой области обратили внимание W.Koshibae и S.Maekawa (Tohoku Univ.) в ноябрьском выпуске интернет-форума ведущих мировых специалистов в области физики твердого тела - Journal-Club for Condensed Matter Physics (<http://jc-cond-mat.bell-labs.com/>). Подводя итоги месяца, эксперты обычно выделяют несколько важнейших публикаций и сопровождают их комментариями. Одна из трех тем ноября - это сверхпроводимость в KOs_2O_6 , а также новых соединениях той же структуры $RbOs_2O_6$ [1] и $CsOs_2O_6$ [2]. В них ион осмия имеет дробную степень окисления +5.5, находясь в промежуточном состоянии между $5d^2$ и $5d^3$. При этом $5d$ -электроны осмия определяют одновременно транспортные и магнитные свойства данных материалов, переплетение которых в этих оксидных соединениях и представляет, по мнению W.Koshibae и S.Maekawa, наибольший интерес.

Структура пироксена (в отличие от перовскитов) базируется на треугольной решетке, которая является классическим примером эффекта фрустрации в спиновой системе, порождающего многообразие спиновых структур. Эта проблема довольно детально изучена к настоящему времени. А вот как соответствующие спиновые степени свободы влияют на поведение свободных электронов, неизвестно. Что происходит с топологией поверхности Ферми в таком случае? И, наконец, какова природа сверхпроводимости и симметрия параметра порядка? К слову, уже имеются указания на нетривиальный характер спаривания и существенную анизотропию параметра порядка [3].

Интересно, что критическая температура сверхпроводящего перехода у соединения с дробной степенью окисления KOs_2O_6 в 10 раз выше, чем у $Cd_2Re_2O_7$ ($T_c=1$ К) с четным числом $5d$ -электронов. Является это случайным обстоятельством или ключевым моментом, объясняющим природу сверхпроводимости в подобных соединениях? Ни на один из этих вопросов, по утверждению W.Koshibae и S.Maekawa, ответа нет, а, значит, имеется обширное и перспективное поле деятельности, в первую очередь, для теоретиков.

1. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2004, **73**, 819
2. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2004, **73**, 1655
3. *cond-mat/0402400*

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Углеродные нанотрубки в рентгеновской динамической радиографии

Углеродные нанотрубки (УНТ) вследствие их хорошей электропроводности и высокого аспектного отношения перспективны в качестве катодов полевых электронных эмиттеров. Такие эмиттеры успешно применяются, в частности, в новых типах электронно-лучевых трубок, работающих при пониженных напряжениях питания. Интересно и другое эффективное применение полевых эмиссионных катодов - фокусируемые рентгеновские динамические радиографы для формирования изображения быстро движущихся объектов. Такой прибор, разработанный недавно в Университете Северной Каролины (США), позволяет исследовать характеристики живых объектов с минимальным вредом для их здоровья.

Источником рентгеновского излучения в них является молибденовая мишень, помещенная в вакуумную камеру длиной 3см. Источником тока эмиссии, достигающего в импульсе значения 6мА, служит катод диаметром 1мм, поверхность которого покрыта произвольно ориентированными нанотрубками. Напряжение между катодом и мишенью составляет 60кВ. Исследуемый образец помещают между источником рентгеновского излучения и экраном. Как показывают специально проведенные измерения, разрешающая способность прибора достигает значения $150 \times 30 \mu\text{м}^2$. Рентгеновский луч, прошедший сквозь образец, попадает на цезиевую сцинтилляционную матрицу размером $5.26 \times 5.26 \text{см}^2$, состоящую из 1056×1056 фотодиодов. Размер отдельного пикселя, несущего видеосигнал объемом 12 бит и шириной полосы 6.25МГц, составляет 50мкм. Длительность импульса рентгеновского излучения варьируется в диапазоне от 0.5 до 150мкс при времени нарастания импульса не больше 0.1мкс и частоте повторения импульсов 20кГц. Параметры устройства позволяют получать движущееся изображение исследуемого объекта с частотой развертки 16 кадров в секунду.

В качестве примера, демонстрирующего возможность динамического изображения движущегося объекта, авторы приводят рентгеновские изображения лопастей компьютерного вентилятора, вращающегося с частотой 1000 оборотов в минуту. В другом примере, демонстрирующем возможность использования описанной системы для изучения живых объектов, авторы исследуют кровообращение крысы.

А.В.Елецкий

1. *Rev. Sci. Instruments* 2004, **75**, 3264

Нанотрубки-манганиты

P.Levy с коллегами (Centro Atomico Constituyentes, Buenos Aires, Аргентина) в работе [1] сообщили о синтезе нанотрубок состава $La_{0.325}Pr_{0.300}Ca_{0.375}MnO_3$ (LPC(0.3)), а авторы [2] обсудили их возможные применения.

Для получения манганитов цилиндрической формы исследователи применили метод травления в растворах. Мембраны, полученные травлением пленок из майлара (Mylar - многослойный синтетический материал, используемый для изготовления парусов) или поликарбоната, предварительно облученных тяжелыми ионами, были заполнены раствором солей соответствующих металлов. Последующая термообработка позволила получить структуры, показанные на рис.1. Ясно видно, что это - полые цилиндры диаметром $\sim 800 \text{нм}$, длиной $\sim 4000 \text{нм}$ (по данным SEM), толщина стенок $\sim 100 \text{нм}$ (диаметр и плотность упаковки определяются параметрами исходной мембраны). Более подробные исследования с помощью TEM показали, что «кирпичиками» в стенках цилиндров являются монокристаллы размером $\sim 20 \text{нм}$. Данные рентгеновской дифракции подтвердили наличие одной фазы, соответствующей структуре перовскита LPC(0.3).

Интерес к манганитам во многом обусловлен их необыкновенными магнитными свойствами - эффектом колоссального магнитного сопротивления. Магнитные свойства нанотрубок $LaPrCa$ манганита (по оценкам их создателей) в целом соответствуют свойствам массивного образца (магниторезистивные свойства в них проявляются при температурах ниже 200К), а необычная геометрия открывает новые возможности. По мнению авторов [2], в системе нанотрубок можно «настроить» тонкое равновесие между различными фазами, что позволит, например, создавать системы из сосуществующих ферромагнитной (металлической) и антиферромагнитной (непроводящей) фаз. Не исключено использование нанотрубок такого типа в качестве сильно локализованных источников электронов с определенной ориентацией спинов. Такие источники перспективны для конструирования наноэлектронных схем, принцип действия которых основан на прецизионном манипулировании спинами электронов, (квантовые компьютеры, постоянная магнитная память), для создания спинчувствительной зондовой микроскопии.

Другое перспективное применение – в высокотемпературных твердоэлектролитных топливных элементах. Материал катода в этих элементах должен быть устойчивым в окислительной среде при высоких температурах. $LaCa$ манганиты удовлетворяют этому требованию, обладают и ионной, и электронной проводимостью, из них могут быть сделаны хорошие катоды; при этом нанотрубчатая структура позволит эффективно распределять газы. Изменяя химический состав, размеры и пространственное

распределение нанотрубок $LaPrCa$ манганита, можно расширить области их применения.

В целом, по образному выражению авторов [2] будущее этих пустых нанотрубок выглядит очень наполненным!

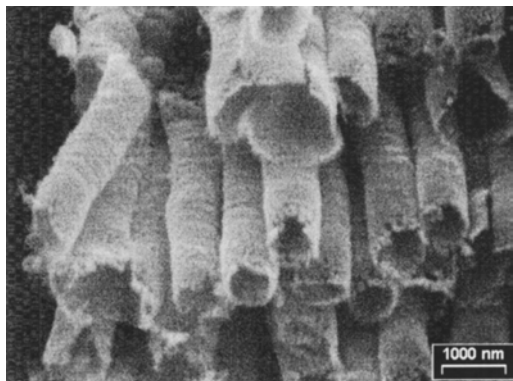


Рис. 1. Нанотрубки-манганиты

О.Алексеева

1. *Appl.Phys.Lett.* 2003, **83**, 5247
2. *Nature* 2004, **427**, 301

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

1-ая Международная конференция «ФПС'04»

Конференция «*Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости*» (первая «русскоязычная») прошла 18-22 октября 2004 г. в пансионате «Звенигородский» под Москвой. Организаторы - ФИАН и Научные советы РАН по физике конденсированного состояния и физике низких температур (при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, Федерального агентства по атомной энергии РФ, Российской Академия наук, РФФИ, Фонда некоммерческих программ «Династия» и Правительства г. Москвы). Председатель конференции Нобелевский лауреат академик Виталий Лазаревич Гинзбург.

В конференции приняли участие ученые из дальнего зарубежья, уехавшие из России на долгий срок или навсегда, а также ученые из стран СНГ. Среди участников 170 ученых из России (17 городов), Украины, Белоруссии, Эстонии, Великобритании, Германии, США, Франции, Португалии, Голландии, Финляндии. Соавторами ряда докладов были также ученые из Японии, Кореи, Норвегии, Греции, Польши, Швеции, Италии, Швейцарии, Израиля. Как и сама наука, конференция оказалась поистине международной.

Таким представительным съездом конференция обязана не только интригующей тематике, но и почтением к заслугам и личности ее инициатора - Виталия Лазаревича.

На конференции работали 4 секции: 1) механизмы ВТСП; 2) свойства ВТСП; 3) новые сверхпроводящие материалы; 4) приложения ВТСП; а также стендовые секции.

Вступительное слово В.Л.Гинзбурга, как всегда, было интересно. Даже в таком вопросе, как история

сверхпроводимости Виталий Лазаревич «ухитряется» найти таинственные детали. Например, что первооткрыватель сверхпроводимости (Камерлинг-Онес) чуть было не открыл изотоп-эффект (на много лет раньше), однако ему не хватило чувствительности тогдашних приборов; из-за экономии жидкого гелия, он не обнаружил эффект Мейсснера-Оксенфельда: свинцовый шар, поведение которого изучалось в магнитном поле, был полым. Главная «изюминка» выступления В.Л.Гинзбурга – призыв получить сверхпроводимость при комнатной температуре. Это сверхзадача нашего сообщества. *В.Л.Гинзбург дал прогноз для комнатного сверхпроводника – это слоистое соединение с богатым экситонным спектром. Чтобы заменить фононы экситонами. Ищите!*

В предлагаемых механизмах ВТСП на конференции не было недостатка. Начиная с Е.Г.Максимова, который доказывал, что ВТСП по своим свойствам мало отличаются от обычных металлов - никакой экзотики; стандартный БКШ-феномен; только ток переносят боголюбовские квазичастицы (куперовские пары с d -симметрией). Удивительно, но А.С.Александров согласился с Максимовым: электрон-фононное взаимодействие в купратах, MgB_2 , фуллеренах – самое сильное взаимодействие. Правда, это не значит, как сказал Александров, что магнитный механизм сверхпроводимости не существует, но дорогу ему открывает все же электрон-фононное взаимодействие: электрон-фононное взаимодействие в « c »-направлении заэкранировать просто нельзя; константы электрон-фононного взаимодействия больше единицы; обязательно возникнут поляроны и биполярны (это сверхлегкие биполярны, поэтому снимается проблема их большой массы). На основе биполяронного механизма А.С.Александров объясняет всю физику ВТСП. Александр Сергеевич представил участникам конференции очень интересную формулу, утверждая, что будто из нее нет исключений:

$$T_c = 1.64 [eR_H / (\lambda_{ab})^4 (\lambda_c)^2]^{1/3},$$

где e – заряд электрона, R_H – постоянная Холла, λ_{ab} и λ_c – глубины проникновения магнитного поля в плоскости « ab » и вдоль оси « c ».

«Незакрытый» Александровым магнитный механизм ВТСП активно проповедовал Н.М.Плакида - основанная на этом механизме его теория ВТСП также прекрасно объясняет многие факты.

Дальнейшее развитие своей теории ВТСП, основанной на спаривании носителей заряда с большим импульсом и кулоновским взаимодействии, предложил Ю.В.Кобаев. Детали этой теории обсуждали также в своих докладах его коллега (В.Ф.Елесин) и ученик (В.И.Белявский). Новый момент - добавление к связанному состоянию пар частиц с большим импульсом еще и связки вихрь-антивихрь. И эта теория также объясняет многие основные для ВТСП факты.

Прямое отношение к механизму сверхпроводимости ВТСП имели доклады А.Ф.Андреева (Электронные пары для ВТСП), Э.А.Пашицкого (О роли кулоновского взаимодействия в формировании сверхпроводящего и псевдощелевого состояний в купратных металло-оксидных соединениях), М.Ю.Кагана (Композитные фермионы, тройки и четверки в Ферми-Бозе смеси с притяжением), Г.Б.Тейтельбаума и Л.П.Горькова (Псевдощелевой режим и динамическое фазовое расслоение в высокотемпературных сверхпроводниках), М.В.Садовского (Сверхпроводимость в псевдощелевом состоянии в модели «горячих точек»: моделирование фазовой диаграммы), В.В.Валькова (Трехцентровые взаимодействия и спиновые флуктуации в проблеме высокотемпературной сверхпроводимости), а также доклады В.И.Пентегова, В.Р.Шагинян, К.Д.Цендина. Наличие столь разных механизмов ВТСП говорит о явном недостатке решающих экспериментальных результатов. С.Г.Овчинников рассказал, что развит обобщенный метод сильной связи для расчета электронной структуры. В рамках сильных электронных корреляций проведены расчеты электронной структуры купратов и манганитов. Результаты расчетов согласуются с данными, полученными методом *ARPES* (фотоэмиссия с угловым разрешением).

Об исследованиях ВТСП методом *ARPES* сообщил А.А.Кордюк, который считает, что (несмотря на проблемы и сомнения) *ARPES* – мощный метод исследования электронной структуры – достигнуто чрезвычайно высокое разрешение по углу (0.1°) и энергии (1мэВ), имеется возможность изменять частоту возбуждающего электромагнитного излучения, устанавливается надежно поверхность Ферми. Особенно метод пригоден для 2D-систем (в трехмерных системах линии уширяются). Из измерений *ARPES* можно видеть, например, что концентрация носителей и площадь поверхности Ферми сильно меняются при легировании, что сильно изменяются константы взаимодействия λ , что в *Bi-2212* главным является взаимодействие носителей заряда со спиновыми флуктуациями, а также что волновая функция пар имеет *d*-симметрию.

Как всегда, споры вызвала природа псевдощели: это состояние газа слабозаимодействующих парных частиц с зарядом $2e$ или обычная диэлектрическая щель? Похоже, никто друг друга не переубедил. В докладе Г.Б.Тейтельбаума и Л.П.Горькова утверждается, что псевдощелевое поведение в купратах может быть связано с динамическим фазовым расслоением на металлические (с большой концентрацией носителей) и магнитные (с малой концентрацией носителей) области. Такое поведение обусловлено начинающимся при $T \gg T_c$ фазовым переходом 1-го рода, распространение которого на большие масштабы срывается из-за нарушения условий электронейтральности CuO_2 плоскостей. Кстати, эта идея легко объясняет и возникновение

зарядовой модуляции («страйпы»). При таком фазовом расслоении возникают искажения решетки. Чтобы минимизировать эти искажения (энергию системы), дырки собираются в группы с характерным размером порядка четырех постоянных решетки. Фазовому расслоению в ВТСП было также уделено значительное внимание и в других докладах.

Соединение MgB_2 продолжает удивлять необычными свойствами. Только-только привыкли к тому, что у него 2 сверхпроводящие щели, как теоретики (О.В.Долгов и другие) и экспериментаторы (Я.Г.Пономарев) заговорили о 4 щелях, о наведенной сверхпроводимости на определенных листах поверхности Ферми. Конечно, примеси и дефекты усредняют картину, поэтому все и наблюдают две сильно различающиеся щели.

Доклад Е.В.Антипова был посвящен новым соединениям и, естественно, его излюбленной ртутной ВТСП системе (автором которой он и является). Кстати, из его сообщения мы узнали, что слово «перовскит» происходит от фамилии Перовского, первооткрывателя соединения (к слову, недурно было бы и за ртутной системой закрепить термин – «антиповит»). Евгений Викторович остановился на очень интересной проблеме, почему иногда не возникает сверхпроводимости в соединениях системы $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (аналогичные вопросы возникают для системы $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$). Оказывается барий очень легко замещает неодим (или празеодим) и, когда таких замещений много, у кислорода появляются два минимума (по энергии), т.е. два равноправных положения. Возникает сильный беспорядок и $T_c \rightarrow 0$. Поэтому нужны специальные условия для приготовления таких соединений с высокими T_c . Похожая картина и в ртутных ВТСП: при обычных условиях приготовления на своих местах отсутствует до 15% ртути, и T_c , естественно, понижается; для синтеза нужны специальные неравновесные условия. При этом плохо как недоокисление, так и переокисление фазы. На величину окисления можно влиять, например, давлением или фторированием. Добавка фтора приводит к оптимальному окислению и, тем самым, к максимальному T_c . Именно на ртутном соединении с фтором получен современный рекорд $T_c = 138\text{K}$ в обычных условиях (это соединение обозначается как *Hg-1223F*). Получена линейная зависимость T_c от величины параметра решетки «*a*»: T_c растёт с уменьшением «*a*», при $a = 3.88\text{Å}$ в *Hg-1201* величина $T_c \approx 100\text{K}$, при $a = 3.85\text{Å}$ в *Hg-1223F* $T_c = 138\text{K}$. Таким образом, проявляется известный «закон Маттиаса»: максимальные T_c достигаются вблизи границы неустойчивости системы. Для получения $T_c = T_{\text{комн}} = 293\text{K}$ надо иметь $a \approx 3.74\text{Å}$. Исследования этой системы при высоких давлениях подтверждают полученную зависимость $T_c(a)$. Современный абсолютный рекорд критической температуры (получен при высоком давлении) $T_c = 166\text{K}$ для

фторированного образца. До комнатной температуры осталось всего-то 127К!

Строение купратов, как считает Антипов, уже хорошо понято. Сложнее с другими соединениями. В системе висмутатов получен ряд новых соединений, в том числе и сверхпроводящих, например, $Sr_{1-x}K_xBiO_3$ ($T_c=12K$ при $x=0.6$). Очень сложным объектом оказались дибориды. В этой системе получены также новые соединения, однако среди них ни одно и близко не подошло к $T_c=40K$ для MgB_2 . Поэтому Антипов не верит, что в MgB_2 или его аналогах можно увеличить T_c заметно выше 40К (сегодняшний рекорд 41,8К). Для высокой T_c надо получить упорядоченное состояние, а при замещениях возникает беспорядок и $T_c \rightarrow 0$.

Где искать новые ВТСП? Четкого ответа нет, например, Нобелевский лауреат К.Мюллер верит, что среди сложных оксидов ванадия. В этой системе уже получены полупроводниковые ($PbVO_3$) и даже металлические ($SrVO_3$) соединения. ВТСП среди них пока не найдено.

В дискуссии по докладу Е.В.Антипова выступил Е.Г.Максимов, который спросил, почему нет высоких T_c в легких оксидах и других подобных соединениях с легкими атомами. Ответ Антипова: на уровень Ферми не выходят состояния этих легких элементов; задача – как этого добиться. Е.Г.Максимов сообщил: их теоретические расчеты показывают, что в соединении YC (карбид иттрия) T_c должна превышать 50К. В природе такого соединения нет. Но ведь в природе не было и соединений Nb_3Ge и Nb_3Si с решеткой типа A15, однако их получили. Это - вызов экспериментаторам.

В целом, виден заметный прогресс в исследовании ВТСП соединений, однако продвижение вперед становится все труднее.

Обзорный доклад по исследованиям вихрей в сверхпроводниках сделал Л.М.Фишер, остановившийся, главным образом, на физической природе макротурбулентной неустойчивости в сверхпроводниках. Он привел очень интересные факты. Например, сейчас магнитооптическим методом видят отдельные вихри в специальных соединениях ($NbSe_2$) и картину их движения. В последнее время изучают интересные дендритные структуры вихрей (хотя феномен был обнаружен еще на образцах соединений с решеткой типа A15, например, в Nb_3Sn , о чем рассказал И.А.Руднев). Интересно, что скорость распространения вихрей достигает в таких структурах до 90% от скорости Ферми. На границах двойникования вихри могут двигаться даже под углом к силе Лоренца, поскольку это область «легкого распространения». Простая картина макротурбулентной неустойчивости, а именно, «аннигиляция вихрей и антивихрей → тепловыделение → волна неустойчивости» для объяснения явления не подходит, т.е. это не термомагнитное явление. Быстрые

джозефсоновские вихри тоже, оказывается, могут распространяться в протяженных джозефсоновских переходах, магнитосвязанных с волноводными системами (теоретический доклад А.С.Малишевского, В.П.Силина и др.). Дело экспериментаторов – наблюдать их.

В докладах было сообщено и о других интересных явлениях, присущих ВТСП, например, об обнаружении аномального эффекта Нернста и огромного изотоп-эффекта (но не в T_c , а в спектрах фотоэмиссии). Было сообщено и о ряде сенсационных идей и предложений, среди них – о сверхпроводимости при $T > T_{комм}$ и о возможности высокотемпературной сверхпроводимости жидкого водорода.

Совершенно необычный «круглый стол» организовал Е.Г.Максимов. Тема обсуждения - «Есть ли загадки в ВТСП?» - вызвала огромный интерес (зал не вместил всех желающих, многие стояли в дверях) и бурные дискуссии. Действительно, вопросы, казавшиеся довольно ясными или хотя бы близкими к ясности, в действительности оказались непонятными. М.В.Садовский поставил вопросы о природе нормального состояния ВТСП. По его утверждению, в этом вопросе существует полный разнобой. Есть ли Ферми-жидкость? Или это так называемая маргинальная Ферми-жидкость? «Плохая» (новый термин!?) Ферми-жидкость? В низкоэнергетическом пределе в металле должна быть нормальная Ферми-жидкость? Латинжеровская Ферми-жидкость? Сколько теоретиков, столько мнений.

Вопрос о псевдощели не ясен: диэлектрик или не-взаимодействующие пары; роль расслоения фаз, страйпы; роль беспорядка? Вопросов больше, чем ответов. Кстати, многие утверждают, что страйпы могут быть поверхностным явлением.

Е.Г.Максимов «подлил масла в огонь» утверждением, что фазовая диаграмма ВТСП, где по оси абсцисс отложена концентрация носителей заряда, абсолютно не ясна. Поверхность Ферми соединения $YBa_2Cu_3O_x$ не меняется при изменении x от 6.4 до 6.9. Какая же это концентрация? «Свежая» работа: в образцах $Bi-2212$ с $T_c=15K$ и $T_c=88K$ Ферми-поверхность одна и та же. «Оптика» подтверждает, что изменение концентрации носителей в области сверхпроводимости незначительно. Отсюда следовал вывод: все теории, в которых T_c меняется за счет изменения концентрации носителей, не верны! С.Г.Овчинников поддержал последнее утверждение, сказав, что методы определения концентрации носителей годятся только для оптимального состава и не годятся для недолегированных и перелегированных образцов.

Были и совершенно неожиданные выступления: - в плоскостях CuO_2 в ВТСП - полуионно-полуковалентная связь; это - исключение из правил, необычная ситуация; происходит резонанс ионно-ковалентной связи (предложенный еще Полингом);

- новый подход к сверхпроводимости ВТСП: в основе этого явления лежит локализация (!?)

Оказались непонятными даже «простейшие» явления в ВТСП. Почему сопротивление всех ВТСП пропорционально T (Е.Г.Максимов)? Линейный ход сопротивления возникает, если электроны взаимодействуют с «какими-то» бозонами. Но ведь энергия этих бозонов лежит в области фононов!

«Брошен камень» и в сторону фотоэмиссии. Сейчас разрешение в *ARPES* порядка 1мэВ. И наблюдают странные результаты, например, отсутствие ферми-поверхности в некоторых направлениях ($Y-124$). Форма сигнала в *ARPES* практически никогда не бывает «ферми-жидкостной». То, что называют в спектрах *ARPES* «background», по словам А.С.Александрова, «мы не понимаем». Обнаружен большой изотоп-эффект формы этого «background» (при замене O^{16} на O^{18} в *LaSrCuO*). Вывод Александрова: ситуация с *ARPES* непонятна, теории этого явления нет, рисование поверхности Ферми некорректно! Метод чисто поверхностный, это не объем образца.

С.Г.Овчинников вновь вернулся к проблеме фазовой диаграммы и псевдощели. «Все привязано к фазовой диаграмме». Передопированный ВТСП – это нормальный металл с какими-то «штучками» (!?), недоопированный ВТСП – это допированный диэлектрик. Но ведь тогда должна меняться концентрация носителей. Как меняется температура возникновения псевдощели T^* при легировании? Есть случаи, когда $T^*(x)$ не пересекает зависимость $T_c(x)$, а идет правее ее (*Bi-2201*). Вывод: псевдощель не имеет отношения к сверхпроводимости. «Нет пар выше T_c » (!?)

Проблема с магнитным механизмом ВТСП: если величину T_c определяют спиновые флуктуации, то должна быть прямая зависимость от их амплитуды. Однако нет корреляции, скорее даже антикорреляция.

Вот такое состояние дел оказалось через 18 лет после открытия ВТСП. И это хорошо, сказал Н.М.Плакида в заключение и процитировал Е.Г.Максимова (в мягкой редакции): «Тот, кто откроет механизм ВТСП, сыграет плохую роль для нашего сообщества». Предложено уж что-то слишком много механизмов. Нет консенсуса. Как сказал А.С.Александров: «Большой разброс мнений – это хорошо. А консенсус будет».

Активно работала и секция приложений. Доклад Н.А.Черноплекова «Сильноточная сверхпроводимость: проблемы и перспективы» был посвящен обзору применений сверхпроводников (низкотемпературных и ВТСП). Наблюдается постепенный выход сверхпроводников на уровень технических приложений. Так в Японии запущен сверхпроводниковый генератор мощностью 70МВт. Хотя до сих пор нет развитой промышленной технологии производства ВТСП материалов, «смелость невежества» позволяет делать прорывные работы. Во всем мире стареет электротехническое оборудование (оценки показы-

вают, что устарело 40-60% такого оборудования). Естественно, предполагается его замена, и эта замена может быть (обсуждается) на сверхпроводниковую технику.

Есть область техники, где сверхпроводимость уже «вошла в рынок». Это производство сверхпроводящих томографов. Первый такой томограф был создан в 1982 году. Сейчас выпускается примерно 1000 томографов в год. Объем продаж превышает несколько миллиардов долларов. Магнитное поле в таком томографе, создаваемое сверхпроводящим соленоидом, около 3Тл. Магнитная (сверхпроводящая) или магниторезонансная томография – один из самых мощных методов исследования. Все шире входят в обиход также магнитные (сверхпроводящие) сепараторы.

Мощными потребителями сверхпроводящих материалов являются ускорители со сверхпроводящими обмотками - для них изготовлено более 1200 тонн таких материалов. Сверхпроводники «осваивают» и космос. Тут первыми были работы ФИАН'а по исследованию космических лучей. Спектрометры со сверхпроводящей магнитной системой для исследования космических частиц были установлены на Международной космической станции, на спутнике США. При этом предполагается исследование всех видов материи, включая «темную».

Что касается ВТСП, то серьезным конкурентом для существующих материалов считается MgB_2 . Критическое магнитное поле MgB_2 в два раза выше, чем у Nb_3Sn . Но здесь еще требуется доведение его до оптимальной технологии. Висмутовый купрат, приготовленный по методу «порошок в трубе», нашел применение в линиях электропередач (специальные, короткие; сейчас в мире примерно 10 таких линий, проектируются более длинные) и в системах подмагничивания железных сердечников в устройствах ограничителей токов. Созданы прототипы всех электротехнических устройств на основе ВТСП. Однако ниша реального использования пока не велика. Это - тоководы, упомянутые линии электропередач и ограничители токов.

Планы США – переход в 2010 году на сверхпроводниковое электротехническое оборудование. Для продвижения этой цели создана новая программа ускоренной разработки ВТСП проводников 2-го поколения с использованием пленочной технологии, позволяющей достичь величины плотности критических токов $3 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$ при $T=77\text{К}$. Удастся пропускать реальные рабочие токи 100-200А (и даже килоамперы в специальных случаях). Существуют прототипы ВТСП лент длиной до 100м и до 1км в лентах с несколько меньшими токами.

По-видимому, альтернативы перехода в будущем на сверхпроводниковую технику не существует. Вопрос времени и развитости соответствующих технологий.

В докладе К.Л.Ковалева (Перспективные применения объемных ВТСП в электромеханике) приведен такой факт: за 10 лет мощность двигателей на основе ВТСП выросла на 5 порядков.

Е.Ю.Клименко сделал несколько замечаний по докладу Н.А.Черноплекова. Во-первых, он считает, что низкотемпературные сверхпроводники уже коммерчески конкурентоспособны на ряде направлений. Во-вторых, сейчас происходит революция в криокуллерах (рефрижераторах) - буквально скачок в устройствах до азотных температур и значительный успех в устройствах до гелиевых температур. Он отметил также, что техническая электродинамика с сильным пиннингом – важная задача для теоретиков на макроуровне.

На заключительном пленарном заседании итоги подвели Ю.В.Копаев (теоретические работы) и В.Ф.Гантмахер (эксперимент).

Ю.В.Копаев в заключительном слове обрисовал ситуацию с механизмом высокотемпературной сверхпроводимости. Электрон-фононное взаимодействие действительно сильно в этих системах. Но и другие механизмы предложены не по злому умыслу. Сейчас происходит сближение с обеих сторон: со стороны электрон-фононного взаимодействия и со стороны кулоновского механизма. Это звучало на конференции. Исходной системой для ВТСП является антиферромагнитный изолятор. Эту фазу определяет не электрон-фононное взаимодействие. Следы ее существуют и в ВТСП. В ВТСП величина энергии Ферми мала и большого толмачевского логарифма не наберешь, т.е. кулоновское взаимодействие не ослаблено в области сверхпроводящего параметра. Поэтому появилась модель Фрелиха-Кулона. Другие модели: модель Хаббарда сближается с t - g -моделью. Надо учитывать еще трехцентровые переходы. Симметричные соображения: важны, чтобы «не заблудиться». В теории среднего поля: учет диэлектрических и зарядовых корреляций.

В.Ф.Гантмахер высказал заключительные замечания по экспериментальным работам. Говорят, что экспериментальная работа без теоретического объяснения не считается за работу. Это категорически неправильно. Как говорил П.Л.Капица, «Эксперимент – это браслет, а теория – любовь. Любовь проходит, браслет остается навсегда». Но эксперимент должен быть достоверен и понятен. Нужно четко понимать, какие цели ставит эксперимент. Эксперимент первичен, но он должен быть адекватен решаемой задаче. Работ «под фонарем» (искать не там, где нужно, а там, где светло) не должно быть. Пример: нужно ли сейчас работать на ВТСП керамиках? Ответ: можно и нужно. Их можно использовать при исследованиях пространственно-неоднородных структур. Но нужна достоверная аттестация образцов, и такая возможность сейчас в лабораториях есть. На конференции были работы с хорошо атте-

стованными керамическими образцами (по туннелю, микроскопии). Много работ по исследованию вихрей в ВТСП. На специальной конференции по вихрям (организованной В.В.Мошчалковым) было не больше о вихрях, чем здесь. Наука о вихрях, в каком-то смысле, пройдена, и она связана с российскими учеными. На конференции удалось собрать большую команду, связанную с российскими корнями. Это очень хорошо, установлены и крепнут связи со всеми мировыми лабораториями. Нужно держаться за то, в чем сильны. Важно изучать фундаментальные вопросы природы ВТСП. Но изучать только транспортные свойства – мало. Для теоретиков нужны результаты и ЭПР, и квадрупольного резонанса, и ЯМР, рентгеновской спектроскопии, ARPES. Все это надо изучать.

Общая оценка – конференция прошла на высоком научном и организационном уровне при удивительной благожелательности и терпимости участников к противоположным точкам зрения.

Рассказать о всех дискуссиях, прошедших на конференции, практически невозможно. Несомненно, конференция удалась. Как сказал Е.В.Ильичев по поводу организации следующей конференции, - «Ты свистни, себя не заставляю я ждать!».

А еще заключительный банкет совпал с днем рождения председателя Программного комитета Юрия Васильевича Копаева. Оргкомитет подарил ему книгу «Энциклопедия народной медицины» со словами: «А эта Конференция – лекарство от разобщенности».

А.И.Головашкин

НОВОСТИ ФИЗИКИ В БАНКЕ ПРЕПРИНТОВ

О корреляции критической температуры и сверхтекучей плотности в ВТСП

В препринте сообщается о результатах исследования корреляции между критической температурой T_c и сверхтекучей плотностью n_s (определяемой по глубине проникновения магнитного поля при низкой температуре) в сильно недодопированных пленках ВТСП $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ с $T_c = (6 \div 50)$ К. Вопреки ожидавшейся прямой пропорциональности $T_c \sim n_s$, обнаружена нелинейная зависимость $T_c \sim n_s^{1/\beta}$ с $\beta = 2.3 \pm 0.4$.

Yu. Zuev *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0410135>, submitted to Phys. Rev. Lett.

From: Yuri Zuev <zuev@pacific.mps.ohio-state.edu>

Квадратная вихревая решетка в $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$

Сообщается о первом экспериментальном наблюдении вихревой решетки в монокристаллах электронного ВТСП $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$. Для этой цели была использована методика малоуглового рассеяния нейтронов. Оказалось, что вихревая решетка является квадратной. Связи между ближайшими вихрями в ней направлены под углом 45° к связям $Cu-O$ в слоях CuO_2 , что согласуется с теориями, основанными на d -волновой симметрии сверхпроводящего состояния.

Интенсивность дифракции на вихревой решетке быстро уменьшается с ростом магнитного поля.

R.Gilardi *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0410250>

From: Raffaele Gilardi <raffaele.gilardi@psi.ch>

Огромные критполя в пленках MgB_2

Верхнее критическое поле H_{c2} тонких пленок MgB_2 измерено при $H \leq 60$ Тл. Пленки были получены лазерным напылением и химическим осаждением из пара; некоторые пленки легировали углеродом. Они имели $T_c = (29 \div 39)$ К и $\rho = (5 \div 250)$ мкОм·см в нормальном состоянии, то есть являлись довольно-таки “грязными”. Тем не менее, величины H_{c2} оказались исключительно большими. В одной из пленок достигнута рекордная величина $H_{c2} = 52$ Тл при $T = 4.2$ К и параллельном поверхности направлении поля. В отличие от предсказаний теории БКШ, признаки насыщения H_{c2} при понижении температуры отсутствуют. Интересно также, что пленки с существенно различными ρ имеют близкие H_{c2} . Полученные результаты свидетельствуют о весьма нетривиальной взаимосвязи ρ и H_{c2} в двухзонных сверхпроводниках.

C.Ferdeghini, *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0411404>

From: Carlo Ferdeghini <ferdeghini@fisica.unige.it>

Немонотонная d -волновая щель в электронном ВТСП

Методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением исследована анизотропия сверхпроводящей щели Δ в электронном ВТСП $Pr_{0.89}LaCe_{0.11}CuO_4$. Найдено, что зависимость Δ от электронного импульса в целом согласуется с d -волновой симметрией, но является немонотонной: величина Δ максимальна не на границах зоны Бриллюэна, а в ее “горячих” областях, где электроны сильно взаимодействуют с антиферромагнитными спиновыми флуктуациями. По мнению авторов, их

результаты однозначно указывают на спиновый механизм спаривания электронов в ВТСП n -типа.

H. Matsui, *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0411547>

From: Hiroaki Matsui <h.matsui@arpes.phys.tohoku.ac.jp>

Моделирование процесса декогеренции квантового регистра. Неудача?

Представлены результаты моделирования процесса декогеренции квантового регистра, состоящего из N твердотельных зарядовых кубитов, взаимодействующих с окружающей средой (фононами и электронами). Найдены явные зависимости недиагональных элементов редуцированной матрицы плотности от времени. Показано, что для N -кубитной системы так называемые “свободные от декогеренции подпространства”, вопреки распространенному мнению, не существуют. Это означает, что все недиагональные члены убывают со временем пропорционально $\exp(-q(t)N)$, где $q(t)$ имеет тот же порядок величины, что и для одного кубита. И как же тогда быть с мечтой о многокубитном квантовом компьютере?

B. Ischi *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0411086>

From: Michael Hilke <hilke@physics.mcgill.ca>

Динамика решетки и электрон-фононное взаимодействие в углеродной нанотрубке (3,3)

Недавно было высказано предположение, что самая узкая углеродная нанотрубка (3,3) является сверхпроводящей. Электронные и решеточные характеристики такой нанотрубки рассчитаны современными методами *ab initio* без каких бы то ни было упрощающих предположений. Показано, что при $T \approx 40$ К имеет место пайерлсовский переход, связанный с нестинговой особенностью поверхности Ферми, тогда как расчетная величина температуры сверхпроводящего перехода на порядок меньше.

K.-P. Bohnen, *et al.*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0411515>

From: Rolf Heid <heid@ifp.fzk.de>

Экспресс-бюллетень ПерсТ выходит

при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ,

Научных Советов Российских научно-технических программ:

“Актуальные направления в физике конденсированных сред”,

“Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники”, “Физика твердотельных наноструктур”

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

В подготовке выпуска принимали участие:

О.Алексеева, М.Белоголовский, В.Вьюрков, А.И.Головашкин,

Л.Дунин-Барковский, А.Елецкий, Ю.Метлин, Л.Опенев

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Ответственный за тираж: Ю.Мухин

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