

Гохфельд Денис Михайлович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ  
МЕЖКРИСТАЛЛИТНЫХ ГРАНИЦ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Красноярск - 2004

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН и Сибирском государственном аэрокосмическом университете им. М.Ф. Решетнева

Научный руководитель: кандидат физико – математических наук  
Петров М.И.

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук  
Югай К.Н.  
кандидат физико – математических наук  
Гавричков В.А.

Ведущая организация: Институт неорганической химии СО РАН  
(Новосибирск)

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 по  
защитам диссертаций при Институте физики  
им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу:  
660036, г. Красноярск, Академгородок

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ. – мат. наук \_\_\_\_\_ С.С. Аплеснин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. К настоящему времени на высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) проведены практически все базовые эксперименты, подобные поставленным ранее на низкотемпературных сверхпроводниках (НТСП), которые позволили в свое время объяснить явление низкотемпературной сверхпроводимости в металлах и подтвердить применимость теории Бардина – Купера – Шриффера к описанию свойств НТСП. Однако несмотря на многочисленные проведенные исследования ВТСП, природа сверхпроводимости в этих металлооксидах остается до конца невыясненной.

Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) слабых связей сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник является мощным инструментом изучения физических процессов, определяющих токоперенос через такие контакты. Широкие возможности экспериментального исследования протекания тока через слабые связи на ВТСП предоставляет использование, как объектов исследования, композитов на основе ВТСП. Двухфазные композиты на основе ВТСП являются физической моделью сети слабых связей с заранее заданными параметрами. Ввиду относительной простоты технологии приготовления композитов по сравнению с одиночными джозефсоновскими контактами, на этих гетерогенных материалах появляется возможность целенаправленно изучить особенности протекания сверхпроводящего тока по слабым связям различного характера, формируемыми “искусственными” границами разделяющими сверхпроводящие кристаллиты. Кроме этого, сопоставление результатов исследований композитов на основе ВТСП с данными, полученными на поликристаллических ВТСП с “естественными” межкристаллитными границами, позволяет установить природу “естественных” межкристаллитных границ.

Сравнение экспериментальных результатов с существующими в литературе теориями позволяет пролить свет на их применимость к ВТСП и идентифицировать физические процессы, определяющие протекание тока через эти материалы, что в настоящее время является важной научной задачей.

Актуальность вызвана также исследованием новых композитных материалов на основе ВТСП в материаловедческом и прикладном плане, как материалов, обладающих ценными для практического применения свойствами.

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании транспортных свойств поликристаллических ВТСП с искусственно созданными и “естественными” межкристаллитными границами с непосредственной проводимостью и проведении моделирования физических процессов, происходящих в таких системах при протекании электрического тока. Согласно с этим были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Синтезировать композиты из ВТСП  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и металлооксида  $BaPbO_3$  и экспериментально исследовать их ВАХ. Проанализировать и описать полученные результаты в рамках теории, рассматривающей андреевское отражение в слабых связях сверхпроводник – нормальный металл - сверхпроводник.
2. Экспериментально исследовать температурную эволюцию ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллическом ВТСП  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  в температурном интервале 4.2 – 93.5 К и в поликристаллическом ВТСП  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$  в температурном интервале 4.2 – 38 К с целью определения природы и геометрических параметров “естественных” межкристаллитных границ в этих ВТСП. Провести моделирование полученных ВАХ с использованием теории Кюммеля - Гунзенхаймера - Никольского.
3. Исследовать эволюцию транспортных свойств композитов  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  при кроссовере от “чистого” к “грязному” пределу при увеличении содержания Sn в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ . Исследовать возможность практического применения эффекта магнитосопротивления в композитах на основе ВТСП.

### Научная новизна:

1. Впервые исследованы ВАХ композитных материалов ВТСП ( $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$ ) + металлооксид ( $BaPbO_3$ ). Впервые экспериментальные ВАХ описаны в рамках микроскопической теории Кюммеля-Гунзенхаймера-Никольского.
2. Впервые исследована температурная эволюция ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП составов  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ . Разработана эвристическая модель, позволяющая описывать экспериментальные ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП. Впервые произведено описание экспериментальных ВАХ с использованием разработанной модели и микроскопической теории Кюммеля-Гунзенхаймера-Никольского.
3. Впервые экспериментально исследован кроссовер от “чистого” к “грязному” пределу в сети слабых связей сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник, реализующейся в композитах  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ .
4. Проанализирована возможность практического применения исследованных ВТСП материалов в качестве активных

элементов ограничителей тока короткого замыкания и как датчиков слабых магнитных полей, основанных на эффекте магнитосопротивления в композитах на основе ВТСП.

Практическая ценность Предложена модель, позволяющая описать ВАХ контактов на микротрещине с непосредственной проводимостью в поликристаллических ВТСП, исследовать природу межкристаллитных границ и процессы в них, сопровождающие протекание тока. Сделаны предложения по практическому применению исследованных материалов как активных элементов ограничителей тока короткого замыкания и датчиков слабых магнитных полей, основанных на эффекте магнитосопротивления. Полученная информация может быть использована для прогнозирования свойств и целенаправленного синтеза композитов на основе ВТСП, предназначенных для применения в устройствах электротехники.

На защиту выносятся:

1. Результаты измерения ВАХ композитов из ВТСП ( $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$ ) и металлооксида ( $BaPbO_3$ ). Анализ полученных результатов в рамках теории Кюммеля-Гунзенхаймера-Никольского.
2. Результаты исследования температурной эволюции ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ . Эвристическая модель, описывающая транспортные свойства контактов на микротрещине в поликристаллах. Анализ полученных результатов в рамках теории Кюммеля-Гунзенхаймера-Никольского.
3. Результаты исследования температурных зависимостей сопротивления композитов  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  для различного содержания ингредиентов композита и различного содержания олова в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  в магнитных полях различной напряженности.

Апробация. Материалы диссертации были представлены на международных конференциях: 5<sup>th</sup> International Workshop «High-Temperature Superconductors and Novel Inorganic Materials Engineering (MSU-HTSC -V)», Moscow, March 24-29, 1998; 3<sup>th</sup> International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials (New3SC-3), Honolulu, Hawaii, USA, January 15-19, 2001; XVIII международная школа-семинар “Новые магнитные материалы микроэлектроники”, Москва, 24-28 июня, 2002; VI-bilateral Russian-German symposium “Physics and chemistry of advanced materials”, Новосибирск, 18-27 августа, 2002; 7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-Rio), Rio de Janeiro, Brazil, May 25-30, 2003 и на XXXIII совещании по физике низких температур, Екатеринбург, 17-20 июня, 2003.

Публикации По теме диссертации опубликовано 30 работ, из них 10 в рецензируемых журналах.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения, содержит 131 стр. машинописного текста, включая 31 рисунок, 1 таблицу и список цитированной литературы (182 наименования).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указана актуальность темы, сформулирована цель, показаны новизна и практическая ценность исследований, приведена аннотация полученных результатов и структура диссертации.

В первой главе (п. 1.1) проведен краткий обзор и приведены результаты теоретических работ, посвященных исследованию протекания тока по слабым связям. В п. 1.2 проведен обзор экспериментальных работ, в которых исследуются транспортные свойства слабосвязанных сверхпроводников (одиночных переходов, регулярных структур и статистических сетей слабых связей) как на основе НТСП, так и на основе ВТСП. В конце обзора дана постановка задачи.

Во второй главе описаны экспериментальные методики измерения транспортных характеристик поликристаллических композитных ВТСП при различных температурах, основанные на стандартном 4-х зондовом методе. К ним относятся: плотность критического тока, электросопротивление и ВАХ. Описана технология изготовления объемных образцов и особенности образцов на микротрещине.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования транспортных свойств композитов из ВТСП ( $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$ ) и металлооксида ( $BaPbO_3$ ).

Композиты, состоящие из 92.5 объемных % ВТСП ( $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$ ) и 7.5 объемных % металлооксида  $BaPbO_3$ , приготавливались по технологии быстрого спекания [1]. Отсутствие химического взаимодействия  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  с  $BaPbO_3$  во время совместного отжига позволяет приготовить композиты с четкими границами между гранулами ингредиентов. Короткое время отжига приводит к реализации в образце сети слабых связей с атомарно резкими границами [1]. Критическая

температура исследуемых композитов  $T_c = 93.5$  К совпадает с  $T_c$  исходной керамики  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$ . Измеренная на начальном участке ВАХ плотность критического тока  $j_c = 200$  А/см<sup>2</sup> (по критерию 1 мкВ/см).

На рис. 1 приведена ВАХ образца, измеренная при 4.2 К. ВАХ полностью воспроизводима при любой скорости сканирования, что указывает на отсутствие влияния саморазогрева образца. Для сравнения на рис. 1 приведена экспериментальная ВАХ образца, сформированного из 92.5 об. %  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и 7.5 об. %  $VaPb_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ . Поскольку технология синтеза этого композитов была полностью аналогична, то средняя эффективная толщина металлических областей между ВТСП гранулами в ВТСП +  $VaPb_{0.9}Sn_{0.1}O_3$  такая же, как в ВТСП +  $VaPbO_3$ . Замена части свинца на олово в  $VaPbO_3$  приводит к уменьшению длины свободного пробега электронов и смене режима транспорта тока от баллистического к диффузному. Рис. 1 демонстрирует, как это отражается на виде ВАХ.

Широкая гистерезисная особенность на ВАХ делает исследуемый материал перспективным в плане практического применения для использования в переключателях различных типов. Например ограничение тока, т.е. переключение транспортным током из состояния с малым сопротивлением в состояние с большим сопротивлением.

Вычисление ВАХ слабых связей с конечными размерами нормального металлического региона выполнено в работе [2]. Теория Кюммеля-Гюнзенхаймера-Никольского (КГН) [2] описывает появление участков отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на ВАХ S-N-S контакта, в отличие от большинства прочих рассмотрений, пренебрегающих вкладом в протекание тока от связанных состояний в S-N-S контакте.

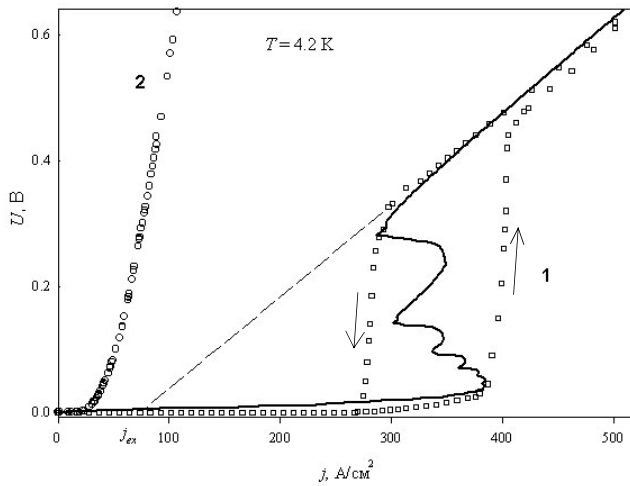


Рис. 1. ВАХ композитов 1)  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + VaPbO_3$ , 2)  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + VaPb_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ . Эксперимент – точки, теория – сплошная линия.

Зависимость тока через контакт S-N-S от напряжения определяется в КГН следующим выражением [2]:

$$I = -\frac{e}{d m^*} \sum_k \sum_{n=1}^{\infty} P_N(E_k) \times [f(E_k) k_e - (1 - f(E_k)) k_h] \times \exp(-nd/l) \left( |A_n^+(E_k + eU/2)|^2 - |A_n^-(E_k - eU/2)|^2 \right) + I_{Sh}, \quad (1)$$

здесь мы используем такие же обозначения, как в [2]:  $f_0(E_k)$  – функция распределения Ферми;  $P_N$  – вероятность нахождения квазичастиц в N регионе с толщиной  $d$  и средней длиной свободного пробега  $l$ ;  $e$  – заряд и  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $n$  – число андреевских отражений, испытываемых квазичастицей, начавшей движение с андреевского уровня, характеризующегося набором квантовых чисел  $k$ , перед тем как покинуть потенциальную яму;  $A_n^-(E_k - eU/2)$ ,  $A_n^+(E_k + eU/2)$  – амплитуды вероятности  $n$  андреевских отражений квазичастиц с направлением распространения дырок по (+) или против (-) электрического поля;  $I_{Sh} \sim U$  – ток Шарвина.

Использование теории КГН для расчета ВАХ удобно и потому, что она оперирует с отношением  $d/l$ , как параметром слабой связи, определяющим вид ВАХ и ее особенностей. При вычислениях использовались значения физических параметров исследуемых материалов [1] ( $T_c = 93.5$  К,  $\Delta = 17.5$  мэВ,  $l = 220$  Å,  $d = 70$  Å). Вычисленная кривая представлена на рис. 1. Достигнуто удовлетворительно согласие теоретической кривой с экспериментальной ВАХ (рис. 1). Участок ОДС на

теоретической ВАХ соответствует гистерезисной особенности на экспериментальной ВАХ, измеренной в режиме заданного тока.

Случай  $d > l$ , реализующийся в образце ВТСП +  $\text{BaPb}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_3$ , находится вне области применимости теории КГН. Однако теория КГН предсказывает уменьшение ширины гистерезиса, участка малого дифференциального сопротивления и избыточного тока с увеличением отношения  $d/l$ .

В четвертой главе приведены результаты исследования транспортных свойств контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  и  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ .

Технология приготовления ВТСП  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  и  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  - стандартная керамическая.

Температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  поликристаллического  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , найденная из магнитных измерений, совпадает с началом резистивного перехода на зависимости  $R(T)$  и равна 93.5 К. Контакты на микротрещине в  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  обладают  $R \sim 1 \div 2$  Ом при  $T > T_c$  и критическим током  $I_c \sim 1 \div 10$  мА при 4.2 К, что соответствует уменьшению  $S$  соответственно в  $\sim 10^2 \div 10^3$  раз после создания микротрещины. Экспериментальные ВАХ характеризуются наличием критического тока, участком с нелинейной зависимостью  $U(I)$  и следующим за ним скачкообразным увеличением  $U$ , сопровождающимся гистерезисом. В области больших значений  $I$  и  $U$  зависимость  $U(I)$  линейна, ее экстраполяция к значению  $U = 0$  дает величину избыточного тока  $I_{ex} = 24$  мА при 4.2 К.

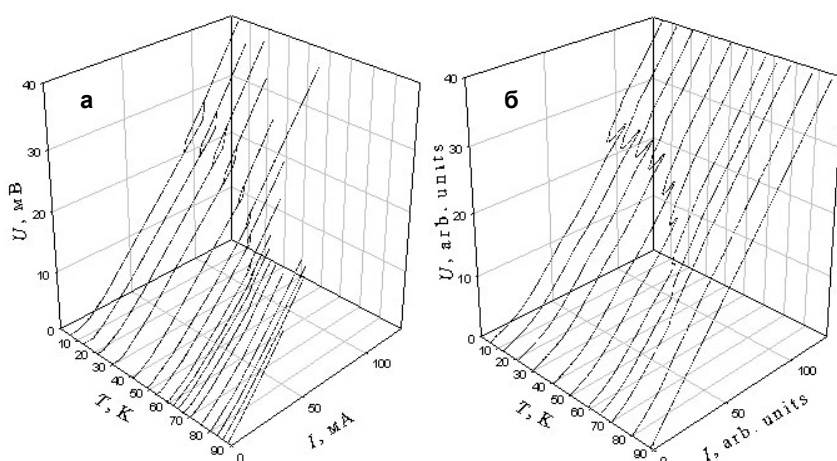


Рис. 2. Температурная эволюция ВАХ контакта на микротрещине в поликристаллическом  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ : а) эксперимент, б)

На рис. 3а приведена температурная эволюция ВАХ контакта на микротрещине в  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ . ВАХ в диапазоне температур ниже  $T_c = 38$  К характеризуются наличием критического тока, участком с малым дифференциальным сопротивлением и, при  $T < 35$  К, следующим за ним скачкообразным изменением напряжения  $U$ , сопровождающимся гистерезисом. В области больших значений тока  $I$  и  $U$  зависимость  $U(I)$  линейная, ее экстраполяция к значению  $U = 0$  дает  $I_{ex} = 15$  мА при 4.2 К. Кроме того на ВАХ наблюдается отчетливая аркообразная особенность, уменьшающаяся с повышением температуры.

Сравнение  $R$  образца сразу за температурой перехода до создания микротрещины ( $R = 0.15$  Ом) и после ( $R = 4$  Ом) показывает, что площадь контакта уменьшилась приблизительно в 27 раз. После создания микротрещины, температура исчезновения сопротивления понизилась на 2.5 К по сравнению с объемным образцом, в то время как температура начала перехода осталась неизменной.

Существование избыточного тока на ВАХ контактов на поликристаллических ВТСП вызвано андреевским отражением [2] и подтверждает металлический характер проводимости “естественных” межкристаллитных границ [3].

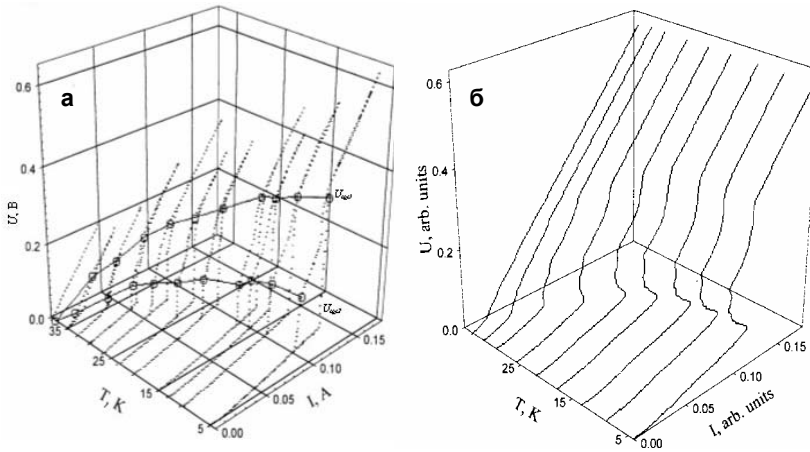


Рис. 3. Температурная эволюция ВАХ контакта на микротрещине в поликристаллическом  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ : а) эксперимент, б) моделирование.

В объемном поликристаллическом образце протекание транспортного тока происходит по трехмерной сети слабых связей, что приводит к изменению масштаба ВАХ по осям токов и напряжений по сравнению с ВАХ одиночного контакта. Ток протекает, преимущественно, по слабым связям с меньшим сопротивлением при заданном транспортном токе и температуре образца. В этом случае влияние разброса параметров незначительно.

В контакте на микротрещине большая часть перколяционных путей разрывается. Поскольку в контакте малого сечения ток вынужденно протекает и по коротким и по длинным нормальным металлическим областям между сверхпроводящими гранулами, то вид ВАХ контакта на микротрещине должен значительно измениться по сравнению с ВАХ объемного контакта. При развитии микротрещины в образце происходит переход от протекания тока по трехмерной сети к протеканию по системе меньшей размерности, вплоть до одномерной цепочки слабых связей. Множественный гистерезис, наблюдаемый на ВАХ некоторых образцов свидетельствует о том, что зависимость  $U(I)$  определяется суперпозицией ВАХ нескольких контактов с различными параметрами.

Для описания наблюдаемых ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллических сверхпроводниках предлагается эвристическая модель. Рассмотрим цепочку последовательно соединенных слабых связей с различными протяженностями слабых связей металлического типа между сверхпроводящими “берегами”. ВАХ такой цепочки контактов определяется выражением:

$$U(I, T) = \sum_i V_i U_i(I, T, d_i), \quad (2)$$

где  $U_i(I, T, d_i)$  – ВАХ одиночного S-N-S перехода с толщиной N-слоя  $d_i$ ;  $V_i$  – весовые коэффициенты, показывающие степень влияния контакта на результирующую суперпозиционную ВАХ (нормировка  $\sum V_i = 1$ ).

Используя выражение (2) и уравнение теории КГН (1), была вычислена зависимость  $U(I)$  (рис. 2б), воспроизводящая экспериментальную ВАХ контакта на микротрещине в  $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , приведенную на рис. 2а. Оказалось, что использование уже двух слагаемых в сумме (2) хорошо описывает экспериментальную ВАХ. Наилучшее согласие было достигнуто при значениях  $d_1/l = 0.15$ ,  $V_1 = 0.34$ ,  $d_2/l = 0.5$ ,  $V_2 = 0.66$ . Расчетная зависимость хорошо совпадает с экспериментальной ВАХ, включая участок с гистерезисом. Зависящим от температуры параметром была только энергетическая щель, взятая из теории БКШ.

Аналогично была описана ВАХ контакта на микротрещине в  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ . Уже при использовании двух слагаемых в сумме (2), расчетная кривая удовлетворительно описывает экспериментальную ВАХ (рис. 3а, б). Лучшее согласие достигается при значениях  $d_1/l = 0.2$ ,  $V_1 = 0.93$ ,  $d_2/l = 0.6$ ,  $V_2 = 0.07$ . Аркообразная особенность на экспериментальной ВАХ соответствует на рассчитанной кривой аркообразной особенности, за появление которой ответственен эффект многократного андреевского отражения. На экспериментальных ВАХ  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  выделены особые точки  $U_{sgs1}(T)$  и  $U_{sgs2}(T)$ , отмечающие аркообразную особенность. Для этих особых точек должна сохраняться пропорциональность  $\Delta(T)$  [2,4]. Наблюдаемые нами зависимости  $U_{sgs1}(T)$  и  $U_{sgs2}(T)$  отличаются незначительно от температурной зависимости энергетической щели теории БКШ.

Из условия описания экспериментальных ВАХ можно оценить величины эффективной протяженности межкристаллитных границ:  $d_1 \approx 1.5 \text{ \AA}$  и  $d_2 \approx 5 \text{ \AA}$  для “естественных” межкристаллитных границ в  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и  $d_1 \approx 2 \text{ \AA}$  и  $d_2 \approx 6 \text{ \AA}$  для  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$  (в случае  $l \sim 10 \text{ \AA}$  [5]).

В поликристаллических ВТСП существует, также, распределение кристаллитов по ориентации, и, в следствие сильной анизотропии кристаллов ВТСП, имеется разброс по величине энергетической щели по пути протекания тока. Простой, хотя и не вполне корректный путь учета такого разброса - это подстановка различных значений энергетической щели в уравнение КГН (1) для разных членов (2). Такая операция незначительно улучшает совпадение теоретических кривых с экспериментальными ВАХ, но при этом увеличивается число подгоночных параметров. Отметим, что функция распределения толщин межгранульных границ и функция распределения значений энергетической щели кристаллитов по пути протекания тока, могут быть связаны между собой из-за особенностей синтеза керамики.

В пятой главе приведены результаты исследования зависимостей сопротивления от температуры композитов  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  с различным соотношением ингредиентов и различным содержанием олова в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ .

Содержание Sn в $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$	$\rho(77 \text{ K}), \text{ Ом} \cdot \text{ см}$	Маркировка
$x = 0$	0.0057	N(0)
$x = 0.037$	0.0068	N(0.037)
$x = 0.125$	0.0130	N(0.125)
$x = 0.25$	0.0537	N(0.25)

Таблица 1. Удельное сопротивление несверхпроводящего ингредиента композитов,  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ , и маркировка в зависимости от содержания олова.

Все образцы были приготовлены за один технологический цикл. В таблице 1 приведены значения удельного электросопротивления  $\rho$   $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  при 77 К и маркировка несверхпроводящих ингредиентов, используемая далее в тексте. С ростом  $x$  в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  от 0 до 0.25 наблюдается увеличение  $\rho$  практически на порядок. Увеличение  $\rho$  при частичном замещении свинца на олово происходит вследствие уменьшения длины свободного пробега носителей.

Были приготовлены композиты с объемным содержанием  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  7.5%, 15%, 30%, 37.5% и 45%. Дебаеграммы полученных композитов показали только рефлексы соответствующих фаз исходных ингредиентов. Обозначим композитные образцы как S + I% N(x). Здесь I% - объемное содержание металлооксида  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ . Объемное содержание ВТСП (S), следовательно,  $(100\% - I\%)$ .

На рис. 4 приведены зависимости  $R(T)$  композитов, нормированные на значение  $R(T_c = 93.5 \text{ K})$ . Данные по  $R(T)$  для различных  $x$  на рис. 4 сгруппированы вместе для одинаковой объемной концентрации  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ .

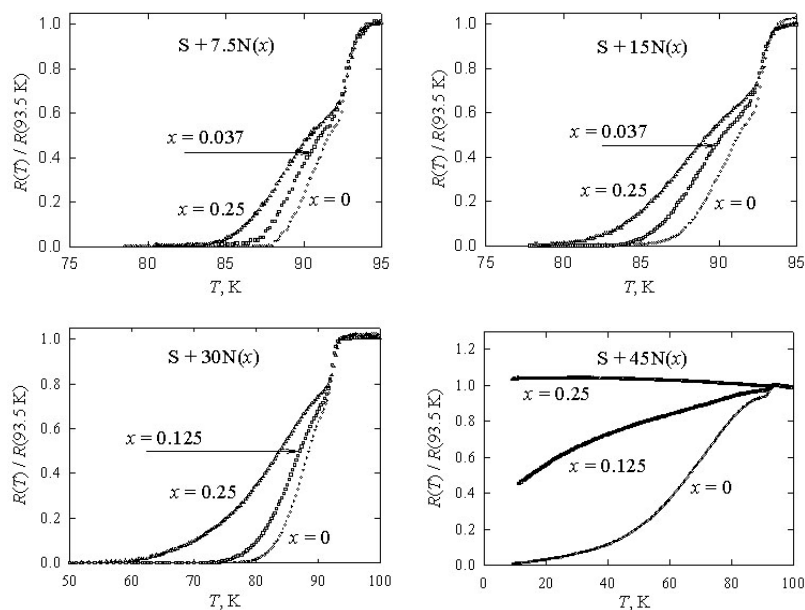




Рис. 4. Зависимости сопротивления от температуры композитов  $S + 7.5N(x)$ ,  $S + 15N(x)$ ,  $S + 30N(x)$ ,  $S + 45N(x)$ .

При  $T = 93.5$  К на всех  $R(T)$  наблюдается скачок электросопротивления, соответствующий переходу в сверхпроводящее состояние ВТСП гранул в композите. Вторая часть зависимости  $R(T)$ , плавное понижение сопротивления с температурой, отражает переход сети слабых связей в образце. Температура  $T_{c0}$  при которой наблюдается полный переход в сверхпроводящее состояние зависит от объемного содержания несверхпроводящего ингредиента и от его проводимости. Также  $T_{c0}$  зависит от величины измерительного тока  $I$ , что присуще слабой сверхпроводимости. Зависимости  $R(T)$ , приведенные на рис. 4, измерены при  $j = 5$  А/см<sup>2</sup>.

В работе [1] было показано, что увеличение объемной концентрации металла в композите приводит к понижению температуры  $T_{c0}$  вследствие увеличения эффективной протяженности  $d$  металлических слабых связей ( $d \sim V^{1/3}$ ). Для исследуемых композитов оценка средних протяженностей металлических регионов между ВТСП кристаллитами дает  $d \approx 70$  Å для  $S + 7.5N(x)$ ,  $d \approx 88$  Å для  $S + 15N(x)$ ,  $d \approx 111$  Å для  $S + 30N(x)$ ,  $d \approx 120$  Å для  $S + 37.5N(x)$ ,  $d \approx 127$  Å для  $S + 45N(x)$ . Уменьшение  $T_{c0}$  и модификация зависимостей  $R(T)$  для одной серии образцов, в данном случае, зависит только от изменения проводимости несверхпроводящего компонента и, следовательно, от изменения  $l$  в материале N – регионов между ВТСП кристаллитами. Внедрение Sn в металлооксид  $BaPbO_3$  приводит к понижению  $l$ . Это изменяет ВАХ композита (см. рис. 1). Соответственно изменяется зависимость  $R(T)$  и понижается температура  $T_{c0}$  (рис. 4).

Таким образом, измеренные зависимости  $R(T)$  демонстрируют кроссовер от “чистого” ( $l \gg d$ ) к “грязному” ( $l \ll d$ ) пределу в композитах с увеличением содержания Sn в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ .

Также были проведены измерения зависимостей  $R(T)$  для композитов при разных значениях внешнего магнитного поля  $H$ . Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно направлению тока.

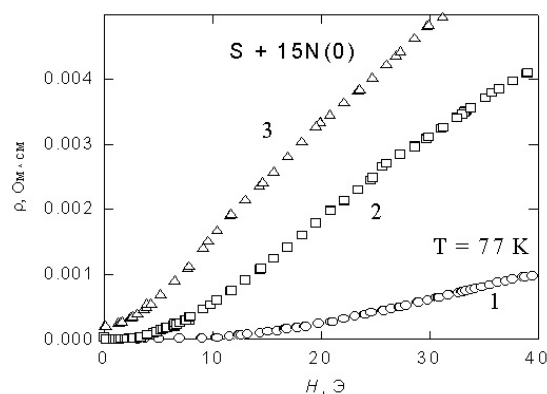


Рис. 5. Зависимости  $\rho(H)$  композита  $S + 15Sn0$  при 77 К и различном измерительном токе: 1)  $j = 0.05$  А/см<sup>2</sup>,  $j < j_c$ , 2)  $j = 0.35$  А/см<sup>2</sup>,  $j \approx j_c$ , 3)  $j = 0.7$

Использованные поля (до  $\sim 500$  Э) практически не влияют на переход ВТСП кристаллитов (не изменяют  $T_c$ ), но уширяют вторую ступень сверхпроводящего перехода, ответственную за переход сети слабых связей. Магнитное поле дополнительно нарушает фазовую когерентность между ВТСП гранулами в композите, что приводит к уменьшению температуры  $T_{c0}$ . Сопротивление композитов очень чувствительно к магнитному полю при  $T > T_{c0}(I, H)$  (рис. 5). Композиты на основе ВТСП, благодаря магниторезистивному (МР) эффекту при технически важной температуре кипения азота, могут найти практическое применение как датчики магнитных полей. Величина МР эффекта в композитах регулируется измерительным током (рис. 5). Важным техническим параметром, характеризующим МР эффект, является величина  $\rho_0 = (\rho(H) - \rho(H = 0)) / \rho(H = 0)$ , показывающая во сколько раз увеличилось  $\rho$  в поле  $H$ . Относительно состояния  $R \approx 0$ , выполняющегося для композитов с  $V\% < 30\%$  при  $H = 0$  и  $T = 77$  К, величина  $\rho_0$  может иметь огромное значение ( $> 3000\%$ ).

В приложении изложены предложения по использованию ВТСП материалов как активных элементов ограничителей тока короткого замыкания. Впервые показана важность учета перегрузок, возникающих в момент отключения ограничителя тока короткого замыкания, находящегося в активном режиме.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы работы:

1. Синтезированы композиты  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPbO_3$ , моделирующие сеть слабых S-N-S связей. Измерена ВАХ объемных образцов из этих материалов в режиме заданного тока при 4.2 К. Экспериментальная ВАХ обладает широкой гистерезисной особенностью, которая отражает наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления.

В рамках теории КГН [2] вычислены теоретические ВАХ, воспроизводящие экспериментальные результаты, и достигнуто удовлетворительное согласие расчетных кривых с экспериментальными ВАХ при реальных значениях параметров материалов и геометрии слабых связей.

2. Исследована температурная эволюция ВАХ контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ . На экспериментальных ВАХ контактов из таких ВТСП присутствует гистерезисная особенность и избыточный ток, указывающий на непосредственную проводимость “естественных” межкристаллитных границ. Кроме этого экспериментальные ВАХ контакта на микротрещине в  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$  демонстрируют ярко выраженную аркообразную особенность. Показано, что вид ВАХ, существование и форма аркообразных особенностей и гистерезиса определяются соотношением числа длинных и коротких межкристаллитных границ в исследуемых поликристаллических ВТСП. Достигнуто удовлетворительное совпадение рассчитанных в рамках теории КГН кривых с экспериментальными ВАХ в температурном диапазоне от 4.2 К до  $T_c$ , что позволило оценить эффективную протяженность “естественных” межкристаллитных границ в поликристаллических ВТСП:  $d \sim 1.5 \div 8 \text{ \AA}$  для  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7$  и  $d \sim 2 \div 6 \text{ \AA}$  для  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ .

Таким образом показано, что теория КГН, рассматривающая андреевское отражение как основной физический процесс, формирующий ВАХ со всеми ее характерными особенностями, позволяет описать транспорт тока как через “искусственные”, так и через “естественные” границы с непосредственной проводимостью, разделяющие ВТСП кристаллиты.

4. Синтезированы композиты  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ , моделирующие сеть S-N-S связей. Исследованы зависимости  $R(T)$  этих материалов и их эволюция в слабых магнитных полях для различных значений транспортного тока.

В композитах  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  реализуется кроссовер от “чистого” ( $l \gg d$ ) к “грязному” ( $l \ll d$ ) пределу, при увеличении содержания Sn в  $BaPb_{1-x}Sn_xO_3$ .

Исследованные композиты  $Y_{0.75}Lu_{0.25}Ba_2Cu_3O_7 + BaPb_{1-x}Sn_xO_3$  обладают регулируемым магниторезистивным эффектом (более 3000 %) в слабых магнитных полях при  $T = 77 \text{ K}$ , что делает их привлекательным для возможного практического применения.

5. Исследованы аспекты практического применения исследуемых ВТСП материалов как активных элементов ограничителей тока. Впервые показана важность учета перегрузок, возникающих в момент отключения ограничителя тока короткого замыкания, находящегося в активном режиме.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Petrov M.I., Balaev D.A., Gohfeld D.M., Ospishchev S.V., Shaihutdinov K.A., Aleksandrov K.S. Applicability of Andreev reflection to description of experimental current-voltage characteristics of polycrystalline HTSC composites with normal metal (N) boundaries. // Book of Abstracts of 5<sup>th</sup> International Workshop «High-Temperature Superconductors and Novel Inorganic Materials Engineering (MSU-HTSC -V)». – Moscow. - March 24-29. - 1998. - P. S-35.
2. Петров М.И., Гохфельд Д.М. Применимость андреевского отражения к описанию ВАХ композитов ВТСП + нормальный металл // Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции Решетневские чтения. - С.А.А. – Красноярск. - 10-12 ноября. - 1998. - С. 81.
3. Petrov M.I., Balaev D.A., Gohfeld D.M., Ospishchev S.V., Shaihutdinov K.A., Aleksandrov K.S. Applicability of the theory based on Andreev reflection to the description of experimental current-voltage characteristics of polycrystalline HTSC+ normal metal composites // Physica C. – 1999. – V. 314. – P. 51-54.
4. Гохфельд Д.М. Вольт – амперные характеристики гетерогенных ВТСП с непосредственной проводимостью // Тезисы докладов III Всероссийской научно-практической конференции Решетневские чтения. - С.А.А. – Красноярск. - 10-12 ноября. - 1999. - С. 141-142.
5. Mamalis A.G., Ovchinnicov S.G., Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihutdinov K.A., Gohfeld D.M., Kharlamova S.A., Vottea I.A. Composite materials on high- $T_c$  superconductors and  $BaPbO_3$ , Ag basis // Book of Abstracts of 3<sup>th</sup> International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials (New3SC-3). - Honolulu, Hawaii, USA. - January 15-19. - 2001.

6. Гохфельд Д.М. Экспериментальное исследование и моделирование транспортных свойств сети слабых связей на основе ВТСП // Тезисы докладов 7-ой Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург. – 5-10 апреля. – 2001. – С. 295-296.
7. Овчинников С.Г., Мамалис А.Г., Кирко В.И., Петров М.И., Балаев Д.А., Шайхутдинов К.А., Гохфельд Д.М., Милицын С.В., Воттеа И.Н. Разработка новых объемных материалов на основе высокотемпературных сверхпроводников, как активных элементов для ограничителей тока короткого замыкания // Материалы международного научного семинара “Инновационные технологии 2001”. – Красноярск. - 20-22 июня. - 2001. – С. 245-251.
8. Овчинников С.Г., Кирко В.И., Mamalis A.G., Петров М.И., Иванов В.В., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Харламова С.А., Милицын С.В., Шайхутдинов К.А. Новая концепция переключателя тока на основе высокотемпературного сверхпроводника // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. - № 10. – С. 95-98.
9. Balaev D.A., Popkov S.I., Shaihutdinov K.A., Gohfeld D.M., Petrov M.I. Magnetoresistivity in bulk HTSC-based composites // Theses of International Baikal scientific conference “Magnetic materials”. – Иркутск. – 21-24 сентября. – 2001. – С. 88.
10. Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Магнитосопротивление композитов на основе ВТСП // Тезисы докладов 1-ой Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению. – Калуга. - 4-7 октября. - 2001. - С. 59-60.
11. Овчинников С.Г., Петров М.И., Балаев Д.А., Шайхутдинов К.А., Гохфельд Д.М. Материалы на основе ВТСП для сверхпроводящих ограничителей тока // Тезисы докладов 1-ой Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению. – Калуга. - 4-7 октября. - 2001. - С. 63-64.
12. Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Композиты на основе ВТСП, как материалы, обладающие большим магнитосопротивлением в слабых магнитных полях // Письма в ЖТФ. – 2001. - Т. 27. - № 22. – С. 45-51.
13. Mamalis A.G., Ovchinnikov S.G., Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihutdinov K.A., Gohfeld D.M., Kharlamova S.A., Vottea I.N. Composite materials on High- $T_C$  Superconductors and BaPbO<sub>3</sub>, Ag basis // Physica C. – 2001. – V. 364-365. – P. 174-177.
14. Mamalis A.G., Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihutdinov K.A., Gohfeld D.M., Milityn S.V., Ovchinnikov S.G., Kirko V.I. A dc superconducting fault current limiter using die-pressed YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> ceramic // Supercond. Sci. Technol. – 2001. – V. 14. – P. 413-416.
15. Петров М.И., Балаев Д.А., Шайхутдинов К.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И. Новые композитные материалы на основе висмутовых высокотемпературных сверхпроводников // Материалы международной научно - практической конференции САКС-2001. – Красноярск. - 1-4 декабря. - 2001. - С. 194-196.
16. Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Гигантское магнитосопротивление в слабых магнитных полях композитных материалов на основе высокотемпературного сверхпроводника // Материалы международной научно - практической конференции САКС-2001. – Красноярск. - 1-4 декабря. - 2001. - С. 197-198.
17. Балаев Д.А., Шайхутдинов К.А., Попков С.И., Гохфельд Д.М., Петров М.И., Овчинников С.Г., Мамалис А.Г. Влияние магнитного поля на транспортные свойства композитов на основе ВТСП. Гигантское магнитосопротивление при 77 К // Сборник трудов XVIII международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. - Москва. – 24-28 июня. – 2002. – С. 56-58.
18. Петров М.И., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Шайхутдинов К.А., Александров К.С. Температурная эволюция гистерезисной особенности на вольт-амперной характеристике поликристаллического высокотемпературного сверхпроводника структуры 1-2-3 // ФТТ. – 2002. – Т. 44. - № 7. – С. 1179-1184.
19. Mamalis A.G., Petrov M.I., Ovchinnikov S.G., Kirko V.I., Balaev D.A., Shaihutdinov K.A., Gohfeld D.M., Kharlamova S.A., Milityn S.V., Ivanov V.V., Vottea I.N. A novel energy efficient SFCL with a silver free contact switchgear for application in electricity and transportation // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2002. – V. 12. - № 2. – P. 1770-1775.
20. Балаев Д.А., Попков С.И., Гохфельд Д.М., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Гигантское магнитосопротивление композитов на основе ВТСП в слабых магнитных полях при температуре жидкого азота // Вестник Красноярского Государственного Университета. – 2002. - № 1. – С. 93-97.
21. Petrov M.I., Balaev D.A., Gokhfeld D.M., Shaihutdinov K.A. Effect of geometrical parameters of the weak link distribution function on transport properties of random network of Josephson junctions // Theses of VI-bilateral Russian-German symposium “Physics and chemistry of advanced materials”. – Новосибирск. – 18-27 августа. – 2002. – С. 52.

22. Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihtudinov K.A., Gokhfeld D.M. Transport properties of heterogeneous high-Tc superconductors // Theses of VI-bilateral Russian-German symposium "Physics and chemistry of advanced materials". – Новосибирск. – 18-27 августа. – 2002. – С. 57.
23. Balaev D.A., Petrov M.I., Shaihtudinov K.A., Gokhfeld D.M., Popkov S.I., Ovchinnikov S.G., Mamalis A.G. Giant magnetoresistive effect at 77 K in high-Tc superconductor based composites // Theses of VI-bilateral Russian-German symposium "Physics and chemistry of advanced materials". – Новосибирск. – 18-27 августа. – 2002. – С. 69.
24. Petrov M.I., Balaev D.A., Gokhfeld D.M., Shaihtudinov K.A. Temperature evolution of hysteresis peculiarity on CVC of HTSC based break junction // Theses of VI-bilateral Russian-German symposium "Physics and chemistry of advanced materials". – Новосибирск. – 18-27 августа. – 2002. – С. 80.
25. Shaihtudinov K.A., Balaev D.A., Gokhfeld D.M., Popkov S.I., Petrov M.I. Transport properties of HTSC-based composites: modeling the random networks of Josephson weak links with magneto-active barriers // Journ. Of Low Temp. Phys. – 2003. – V. 130. - № 3/4. – P. 347-381.
26. Petrov M.I., Gokhfeld D.M., Balaev D.A., Shaihtudinov K.A., Kümmel R. Andreev reflections and experimental current-voltage characteristics of break junctions of polycrystalline high-temperature superconductors // Book of Abstracts of 7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-RIO). – Rio de Janeiro, Brazil. - May 25-30. – 2003. – P. 87.
27. Balaev D.A., Shaihtudinov K.A., Popkov S.I., Gokhfeld D.M., Petrov M.I. Large magnetoresistance of high-Tc superconductor based composites to low magnetic fields at the liquid nitrogen temperature // Book of Abstracts of 7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-RIO). – Rio de Janeiro, Brazil. - May 25-30. - 2003. – P. 190.
28. Петров М.И., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Шайхутдинов К.А. Андреевское отражение в естественных границах  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  // ФТТ. – 2003. – Т. 45. - № 7. – С. 1164-1167.
29. Петров М.И., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Шайхутдинов К.А. Вольт-амперные характеристики контактов на микротрещине в поликристаллических ВТСП // Тезисы докладов секций «Сверхпроводимость» и «Наноструктуры и низкоразмерные системы» XXXIII совещания по физике низких температур. – Екатеринбург. - 17-20 июня. - 2003. - С. 142.
30. Балаев Д.А., Шайхутдинов К.А., Попков С.И., Гохфельд Д.М., Петров М.И. Магниторезистивные свойства композитов  $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + \text{BaPb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$  ( $x = 0, 0.25$ ) // ФММ. – 2003. – Т. 96. - № 6. – С. 1-9.

#### Цитированная литература

1. Petrov M.I., Balaev D.A., Ospishchev S.V., Shaihtudinov K.A., Khrustalev B.P., Aleksandrov K.S. Critical currents in bulk  $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + \text{BaPbO}_3$  composites // Phys. Lett. A. – 1997. – V. 237. – P. 85-89.
2. Kümmel R., Gunsenheimer U., Nicolsky R. Andreev scattering of quasiparticle wave packets and current voltage characteristics of superconducting metallic weak links // Phys. Rev. B. – 1990. – V. 42. – № 7. – P. 3992-4009.
3. Likharev K.K. Superconducting weak links // Rev. Mod. Phys. – 1979. – V. 51. - № 1. – P. 101-159.
4. Octavio M., Tinkham M., Blonder G.E., Klapwijk T.M.K. Subharmonic energy-gap structure in superconducting constrictions // Phys. Rev. B. – 1983. – V. 27. - № 11. – P. 6739-6746.
5. Горьков Л.П., Копнин Н.Б. Высокотемпературные сверхпроводники с точки зрения эксперимента // УФН. – 1988. – Т. 156. - № 1. – С. 117-135.