

На правах рукописи

ПОПКОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ
СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВТСП С МАГНИТНЫМ
УПОРЯДОЧЕНИЕМ В МЕЖКРИСТАЛЛИТНЫХ ГРАНИЦАХ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Красноярск - 2007

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН и в Сибирском Государственном Аэрокосмическом Университете им. М.Ф. Решетнева

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

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук
Патрин Г.С.

доктор физико – математических наук
Прошин Ю.Н.

Ведущая организация: Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского (г. Омск)

Защита состоится 22.06.2007 г. в 14:30 часов
на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 по
защитам диссертаций при Институте физики
им. Л.В. Киренского СО РАН
Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Автореферат разослан "18" мая 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ. – мат. наук

Втюрин А.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность

Многочисленные исследования транспортных и магнитных свойств поликристаллических двухфазных композитных материалов на основе как ВТСП, так и НТСП показали, что эти материалы можно рассматривать как искусственно созданную сеть джозефсоновских переходов. Сверхпроводящий ингредиент композита формирует «берега» джозефсоновского перехода, а несверхпроводящий ингредиент – барьеры, разделяющие сверхпроводящие кристаллиты. Композитные материалы на основе как ВТСП, так и НТСП, в которых слабая связь формируется металлом, полупроводником или диэлектриком, изучены достаточно полно. Кроме этого, в литературе есть ряд работ, в которых изучалось влияние парамагнитных примесей внедренных в несверхпроводящую прослойку джозефсоновских переходов на их транспортные свойства. Однако, экспериментальных работ, в которых бы изучались транспортные свойства джозефсоновских переходов при плавном изменении характера магнитного упорядочения в диэлектрическом барьере (парамагнетик – суперпарамагнетик – ферри или ферромагнетик), в литературе нет, что обуславливает актуальность данной работы.

Целью данной работы явилось экспериментальное изучение влияния магнитных центров рассеяния несверхпроводящего компонента $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ и трансформации магнитных свойств таких соединений на транспортные свойства композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ представляющих сеть джозефсоновских переходов типа сверхпроводник - ферри-парамагнетик - сверхпроводник. А именно:

1. Синтезировать ингредиенты композитов: $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ – ВТСП, $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ (где x принимает значения от 0 до 1) – ряд соединений имеющих структуру граната. Провести необходимый анализ

полученных ингредиентов (структурные исследования и магнитные измерения).

2. Из полученных ингредиентов синтезировать композиты с разным объемным содержанием несверхпроводящего компонента.
3. Провести измерения магнитных ($M(H,T)$) и транспортных свойств (VAX , $J_c(T)$, $R(T,H)$) полученных композитов.

Научная новизна работы.

1. Синтезированы двухфазные композитные образцы на основе ВТСП ($YBCO$ 1-2-3) в которых в качестве второго (несверхпроводящего) ингредиента использовались соединения структуры граната $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$. В данном соединении ($Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$) при изменении концентрации железа x изменяется тип магнитного упорядочения от ферри (при $x=1$) до парамагнитного (при малых x), при этом кристаллическая структура остается неизменной.
2. На основании исследований транспортных свойств композитов (температурных зависимостей электросопротивления, VAX) с разным объемным содержанием соединения $Y_3Fe_5O_{12}$, а также с различными значениями концентрации железа x в соединении $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ показано подавление сверхпроводящих свойств слабых связей. При этом обнаружено необычное поведение температурных зависимостей электросопротивления в некотором температурном интервале T_c - T_m ниже температуры сверхпроводящего перехода ВТСП гранул.
3. Доказано, что в температурном интервале T_c – T_m имеет место только одночастичное туннелирование, как и выше T_c . Ниже температуры T_m протекание тока обусловлено джозефсоновским туннелированием.
4. Впервые получена зависимость критического тока двухфазных ВТСП композитов с соединением $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ от концентрации железа x (т.е. от типа магнитного упорядочения в несверхпроводящем ингредиенте) в данном соединении.

5. Из семейства температурных зависимостей электросопротивления определена пороговая концентрация железа $x = 0.15$ в композитах $92.5\text{об.}\% \text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + 7.5\text{об.}\% \text{Y}_3(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_5\text{O}_{12}$ при которой режим джозефсоновского туннелирования сменяется на режим одночастичного туннелирования.

Практическая ценность

Исследован широкий спектр образцов, как с изменением объемного содержания, так и с концентрацией парамагнитных центров внутри джозефсоновского контакта. Это позволяет целенаправленно выбрать соединения с необходимым комплексом свойств, которые могут быть использованы в качестве активных элементов современной электроники в удобной, для практического использования, области температур.

На защиту выносятся:

1. Результаты магнитных и мессбауэровских исследований соединений $\text{Y}_3(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_5\text{O}_{12}$ использующихся в качестве несверхпроводящего ингредиента ВТСП композитов
2. Результаты исследования транспортных и магнитных свойств композитов $85\% \text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + 15\% \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $85\% \text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + 15\% \text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$
3. Результаты исследования влияния объемной концентрации ферромагнитной компоненты на транспортные свойства композитов $85\% \text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + V\% \text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, где $V = 3.75, 7.5, 15, 30$.
4. Результаты исследования транспортных свойств серии композитов $92.5\% \text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + 7.5\% \text{Y}_3(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_5\text{O}_{12}$, где x меняется от 0 до 1.

Апробация

Материалы диссертации были представлены на международных конференциях по ВТСП: Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, June 25-30, - 2005. P.658-659), 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (Dresden, Germany July 9-14 2006.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений, содержит 100 стр. машинописного текста, включая 31 рисунок и список цитированной литературы (84 наименования).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен обзор теоретических и экспериментальных работ, в которых исследуются джозефсоновские структуры с магнитным упорядочением в несверхпроводящем слое, обладающем различным типом проводимости (металл, диэлектрик, полупроводник). Рассмотрены работы по исследованию как одиночных джозефсоновских контактов на основе НТСП и ВТСП, так и сети джозефсоновских контактов, реализованной в поликристаллических двухфазных сверхпроводящих композитах. В конце обзора дана постановка задачи.

Во втором разделе приведены методики синтеза ингредиентов ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ и $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$) и композитных образцов на основе ВТСП, а так же результаты рентгеноструктурного анализа полученных ингредиентов и композитов. Далее в разделе 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, вольт-амперные характеристики (ВАХ). Здесь же приведены основные технические характеристики вибрационного магнетометра, на котором проводились магнитные измерения исходных компонентов и композитов с их использованием. Далее в разделе приведены результаты магнитных и мессбауэровских измерений гранатов $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$. В результате магнитных измерений был получен вывод о том, что образцы с содержанием железа $x=1.0$ – образец Gr(1.0) и $x=0.8$ - Gr(0.8) являются ферромагнитными. Величины намагниченности насыщения и магнитного момента на атом железа составили 40 эме/г, $5.01\mu_B$ – образец Gr(1.0) и 10 эме/г, $1.73\mu_B$ - образец Gr(0.8) соответственно, что совпадает с литературными данными. [1] Образцы, в которых значения концентрации железа лежат в интервале $0.6 \leq x \leq 0.15$, демонстрируют суперпозицию ферри- и парамагнитной составляющих. Образцы с $x < 0.15$ парамагнитны, что ранее было так же показано с помощью электронного парамагнитного резонанса. [2] Температурные зависимости намагниченности подтвердили сделанные выводы. Так же из зависимостей $M(T)$ удалось определить значения температуры Кюри для образцов Gr(0.6) и Gr(0.4) которые составили 213 и 12 К соответственно. Мессбауэровские измерения при комнатной температуре показали для образцов Gr(1.0), Gr(0.8) – типичные спектры железо-иттриевого граната [3]. На спектрах образцов Gr(0.6)-Gr(0.025) наблюдается парамагнитное квадрупольное расщепление. Величины квадрупольных расщеплений и изомерных сдвигов типичны для структуры граната и совпадают с литературными данными. [3]

В третьем разделе приведены результаты экспериментального исследования транспортных и магнитных свойств композитов с алюмо-

иттриевым и железо-иттриевым гранатами (85об.% $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ + 15об.% $Y_3Al_5O_{12}$, обозначение - S+15Gr(0.0) и 85об.% $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ + 15об.% $Y_3Fe_5O_{12}$, обозначение - S+15Gr(1.0)). Композит с $Y_3Al_5O_{12}$ играет роль т.н. «реперного» образца, его транспортные характеристики схожи с полученными на ВТСП композитах с диэлектриком CuO . [4] Получены кардинальные отличия в поведении температурных зависимостей электросопротивления $\rho(T)$ для данных образцов S+15Gr(0.0) и S+15Gr(1.0) (рис.1). Ниже температуры сверхпроводящего перехода ВТСП кристаллитов $T_c=93.5K$ для композита S+15%Gr(1.0) наблюдается квази-полупроводниковое ход зависимости $\rho(T)$, имеющий место выше T_c для обоих образцов. Зависимость $\rho(T)$ образца S+Gr(0.0) типична для сети слабых связей S-I-S типа. [4] При сравнении результатов полевых измерений намагниченности удалось получить зависимости $M(H)$ от фазы ВТСП в данных композитах (рис.2). При получении диамагнитного отклика от фазы ВТСП в композите S+15%Gr(1.0) из интегральной кривой $M(H)$ при $T=4.2K$ был вычтена кривая $M(H)$ при $T=100K$ (т.е. отклик от ферромагнетика). Объем редуцированного из-за близости ферромагнетика слоя ВТСП составил $\sim 30\%$. Таким образом из рис.2 видно, что диамагнитный отклик от фазы ВТСП образца S+15%Gr(0.0) больше чем образца S+15%Gr(1.0).

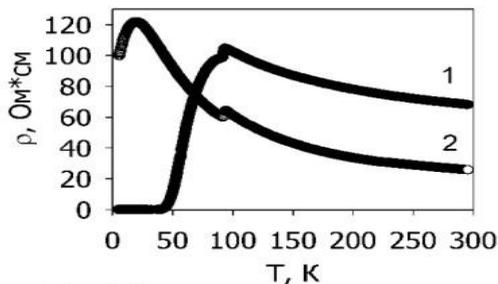


Рис.1 Температурные зависимости электросопротивления образцов S+15Gr(0.0) - 1 и S+15Gr(1.0) - 2.

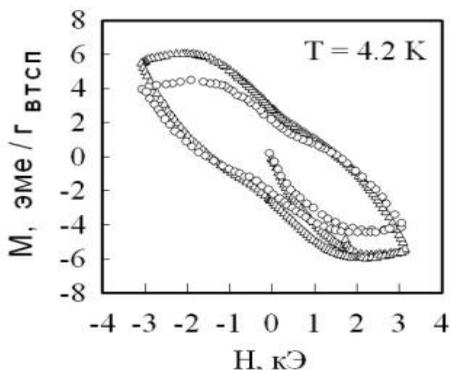
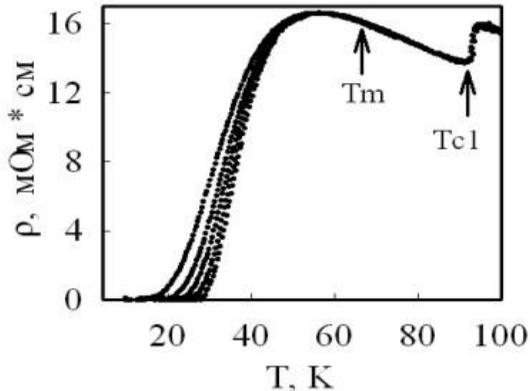


Рис.2 Полевые зависимости намагниченности от гранул ВТСП образцов S+15Gr(0.0) - треугольники и S+15Gr(1.0) - кружки.

В четвертом разделе приведено исследование транспортных свойств композитов с ферритмагнетиком $Y_3Fe_5O_{12}$ при разной объемной концентрации граната в композите 3.75, 7.5, 15, 30 об.%. На рис.3, 4, 5 приведены температурные зависимости электросопротивления образцов S+3.75%Gr(1.0), S+7.5%Gr(1.0), S+15%Gr(1.0) снятые при разных значениях измерительных токов. Температура T_{c1} (рис.3) соответствует «концу» сверхпроводящего перехода ВТСП кристаллитов и для всех образцов равна $T_{c1}=91.5K$. Легко видеть, что в температурном диапазоне $T_{c1}-T_m$ зависимости $\rho(T)$ не чувствительны к измерительному току и показывают квази-полупроводниковых ход, как было показано в разделе 3. Указанная на рис.3, 4, 5 температура T_m соответствует температуре при которой зависимости $\rho(T)$ вновь становятся функциями транспортного тока. Значение температуры T_m сдвигается в область низких температур с увеличением объемного содержания феррит граната в композите. Такой же эффект наблюдается если изменять приложенное магнитное поле при постоянном измерительном токе. На рис.6. приведены ВАХ композита S+15%Gr(1.0) хорошо видно, что в температурном диапазоне $T_{c1} - T_m$ ВАХ линейны. То же наблюдается и

на остальных композитах. Зависимости $\rho(T)$ образца S+30%Gr(1.0) имеют полупроводниковый характер во всем температурном диапазоне, т.е. при данной объемной концентрации $V=30\text{об.}\%$ ферромагнетика сверхпроводящие свойства ВТСП кристаллитов полностью разрушены. Таким образом, в разделе показан значительный эффект влияния объемной концентрации ферромагнетика на транспортные свойства сети джозефсоновских слабых связей S-F-S типа. Так как нелинейность ВАХ является неотъемлемой характеристикой слабых связей, то можно сделать вывод, что в температурном диапазоне $T_{c1} - T_m$ транспортный ток протекает не за счет джозефсоновского, а за счет одночастичного туннелирования, т.о. когерентность сверхпроводящих берегов слабых связей в композите разрушена. Аналогичный эффект наблюдался в работе [5] на слоистой системе Nb/Al/Gd/Al/Nb. При изменении толщины слоя Gd температура T_m так же сдвигалась в область низких температур.



**Рис.3 Температурные зависимости
электрического сопротивления образца S+3.75Gr(1.0) при
значениях транспортного тока j справа налево
27.5; 55; 138; 275; 550 mA/cm^2**

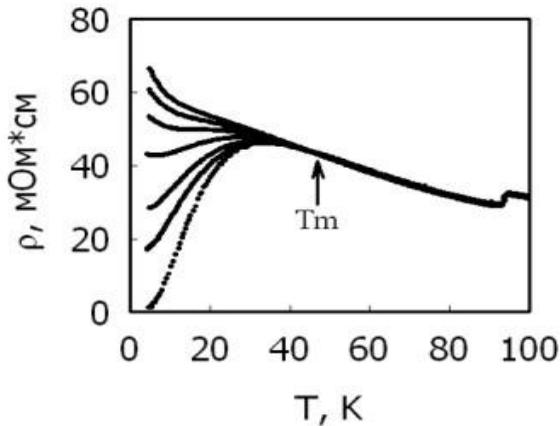


Рис.4 Температурные зависимости электросопротивления образца S+7.5Gr(1.0) при значениях транспортного тока j снизу вверх 4.5; 45; 89; 178; 267; 356; 444 mA/cm^2

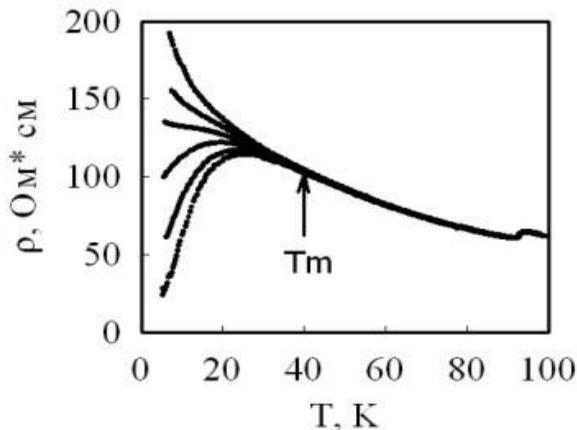


Рис.5 Температурные зависимости электросопротивления образца S+15Gr(1.0) при значениях транспортного тока j снизу вверх 1.5; 7.7; 15; 77; 150; 600 mA/cm^2

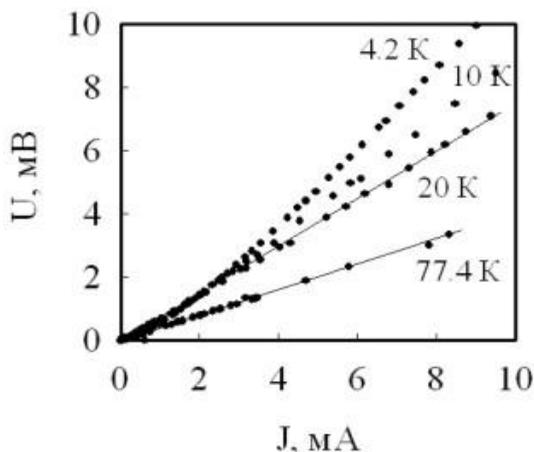
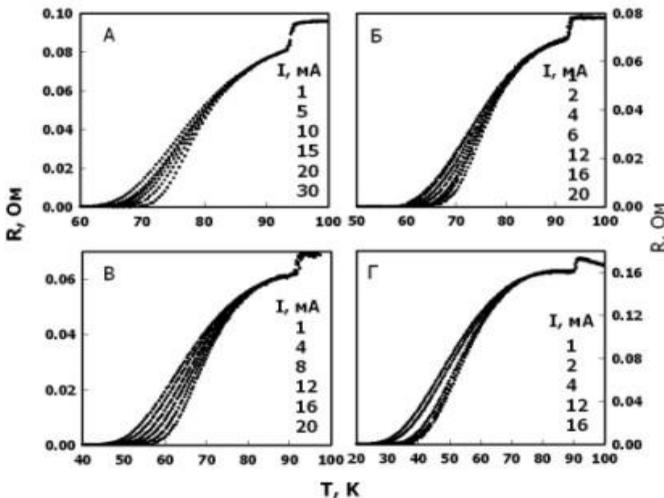


Рис.6 ВАХ образца S+15Gr(1.0) снятые в различных температурах $T=4.2; 10; 20; 77.4$ К

В пятом разделе представлены результаты исследования транспортных свойств сети слабых связей при частичном замещении в несверхпроводящем ингредиенте $Y_3Al_5O_{12}$ ионов Al^{3+} ионами Fe^{3+} . В то же время, остается неизменной объемная концентрация несверхпроводящего ингредиента в композите. Приведены результаты экспериментального исследования транспортных свойств серии композитов $92.5\text{об.}\% Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + 7.5\text{об.}\% Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$, где концентрация железа (Fe) x изменяется от 0 ($Y_3Al_5O_{12}$) до 1 ($Y_3Fe_5O_{12}$). При этом реализуется кроссовер по магнитному упорядочению (парамагнетик - ферримагнетик) в несверхпроводящем ингредиенте при фиксированной эффективной толщине прослойки джозефсоновских контактов в композитах $92.5\text{об.}\% Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + 7.5\text{об.}\% Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$. На рис.7 представлены зависимости электросопротивления от температуры при разных измерительных токах для образцов с малыми $x < 0.15$ (S+Gr(0); S+Gr(0.003); S+Gr(0.025); S+Gr(0.1);). Из представленных, на рис.7,

графиков видно, что зависимости $R(T)$ типичны для сети слабых S-I-S связей [4], а увеличение концентрации x от образца к образцу сдвигает температуру обнуления сопротивления к более низким значениям. Так же из графиков (рис.7) можно видеть, что кривые $R(T)$ чувствительны к незначительным изменениям транспортного тока, при чем, при больших x те же значения транспортного тока сильнее сдвигают точку обнуления сопротивления. В образцах, где $x \geq 0.15$ (рис.8) появляется дополнительный участок $T_{c1}-T_m$, как это имеет место для композитов ($S+3.75Gr(1)$; $S+7.5Gr(1)$; $S+15Gr(1)$). На рис.8 представлены зависимости $R(T)$ композитов ($S+7.5Gr(0.15)$; $S+7.5Gr(0.3)$; $S+7.5Gr(0.4)$; $S+7.5Gr(0.8)$) при различных измерительных токах j . Видно, что при увеличении x ширина диапазона $T_{c1} - T_m$ увеличивается. Транспортные свойства композитов с большим содержанием железа ($x \geq 0.15$) в температурном диапазоне ниже T_m аналогичны таковым для образца $S+7.5Gr(0)$, т.е. зависимости $R(T)$ становятся чувствительны к относительно небольшим изменениям измерительного тока. На следующем рисунке (рис.9) представлены ВАХ образца $S+7.5Gr(0.4)$ в различных температурных диапазонах $T < T_{c0}$; $T_{c0} < T < T_m$; $T_m < T < T_c$; $T > T_c$. Видно, что в температурном диапазоне $T < T_m$ ВАХ не линейны, а при температуре $T=5.6K$ наблюдается критический ток, однако в температурных диапазонах $T_m < T < T_c$ и $T > T_c$ наблюдается линейность ВАХ. Как было показано в разделе 4, величина эффективной геометрической протяженности несверхпроводящих барьеров d в композитах зависит от объемной концентрации не сверхпроводящего ингредиента. Температура T_m чувствительна к эффективной толщине барьера - она понижается с ростом d , т.е. с изменением объемной концентрации граната в композите V . Из рис.8 видно, что температура T_m смещается в область более низких температур по мере замещения алюминия железом в $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ при фиксированной эффективной толщине не сверхпроводящего слоя d ($V=7.5об.%$). Таким образом, степень замещения атомов алюминия на магнитоактивные атомы железа в этом соединении так же влияет на специфическую температуру T_m . При $x=0.15$

(образец S+Gr(0.15)) на зависимости $R(T)$ появляется квази-полупроводниковый участок $T_{c1} - T_m$, его протяженность по температуре составляет ~ 2 градуса и растет с увеличением концентрации x от образца к образцу. Таким образом, значение $x=0.15$ является некоторым критическим значением концентрации железа в соединении $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ для протекания сверхпроводящего тока. На рис.10б представлен график зависимости протяженности температурного интервала $T_{c1}-T_m$ от концентрации x . Видно линейное увеличение протяженности $T_{c1}-T_m$ в зависимости от x . На следующем рисунке (рис.10а) приведена зависимость плотности критического тока композитов в температуре $T=4.2K$ от концентрации железа x . В логарифмической шкале по j_c практически все точки ложатся на прямую, что указывает на экспоненциальное уменьшение критического тока $j_c(x)$.



**Рис.7 Температурные зависимости
электросопротивления образцов S+7.5Gr(0.0)-А;
S+7.5Gr(0.003)-Б; S+7.5Gr(0.025)-В; S+7.5Gr(0.1)-Г
в разных транспортных токах.**

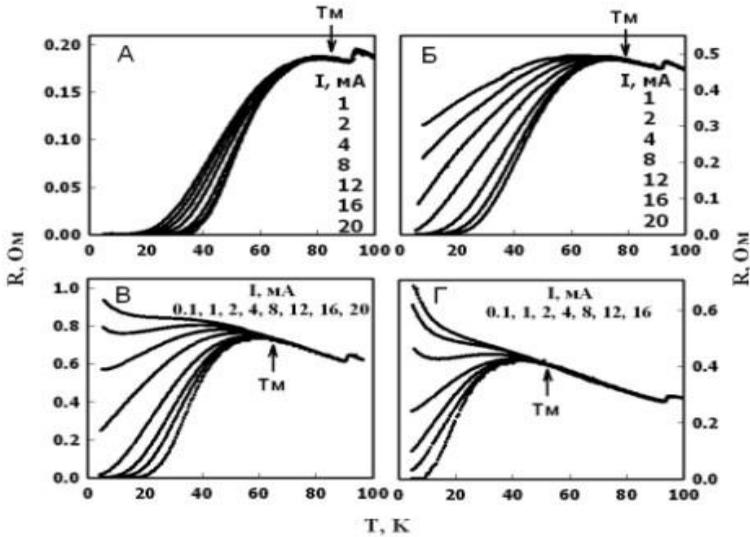


Рис.8 Температурные зависимости электросопротивления образцов S+7.5Gr(0.15)-А; S+7.5Gr(0.3)-Б; S+7.5Gr(0.4)-В; S+7.5Gr(0.8)-Г в разных транспортных токах.

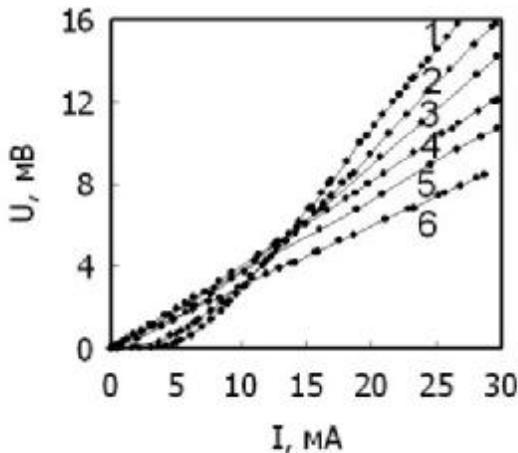


Рис.9 ВАХ образца S+7.5Gr(0.4) при разных температурах 1 -5.6К; 2-14К; 3-30К; 4-50К; 5-70К; 6-100К.

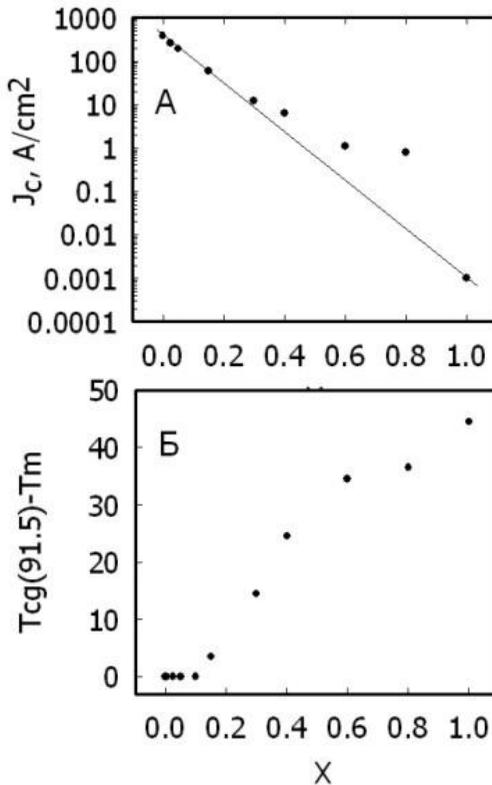


Рис.10 Зависимость плотности критического тока j_c образцов от концентрации x в композитах. Величина j_c приведена в логарифмическом масштабе (А). Зависимость температурного интервала $T_{cg}(91.5K) - T_m$ от концентрации x в композитах (Б)

В заключении диссертации сформулированы основные выводы работы.

1. Синтезированы двухфазные композитные образцы на основе ВТСП (YBCO 1-2-3) в которых в качестве второго (несверхпроводящего) ингредиента использовались соединения структуры граната $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$. В данном соединении ($Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$) при изменении концентрации железа x изменяется тип магнитного упорядочения от

ферри (при $x=1$) до парамагнитного (при малых x), при этом кристаллическая структура остается неизменной.

2. На основании исследований транспортных свойств композитов (температурных зависимостей электросопротивления, ВАХ) с разным объемным содержанием соединения $Y_3Fe_5O_{12}$ в ВТСП композите, а также с различными значениями концентрации железа x в соединении $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ показано подавление сверхпроводящих свойств слабых связей. При этом обнаружено необычное поведение температурных зависимостей электросопротивления в некотором температурном интервале T_c - T_m ниже температуры сверхпроводящего перехода ВТСП гранул.
3. Доказано, что в температурном интервале $T_c - T_m$ имеет место только одночастичное туннелирование, как и выше T_c . Ниже температуры T_m протекание тока обусловлено джозефсоновским туннелированием.
4. Впервые получена зависимость критического тока двухфазных ВТСП композитов с соединением $Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ от концентрации железа x (т.е. от типа магнитного упорядочения в несверхпроводящем ингредиенте) в данном соединении.
5. Из семейства температурных зависимостей электросопротивления определена пороговая концентрация железа $x = 0.15$ в композитах $92.5\text{об.}\% Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + 7.5\text{об.}\% Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ при которой режим джозефсоновского туннелирования сменяется на режим одночастичного туннелирования.

В приложениях приведены результаты работ по автоматизации научного эксперимента выполненных в Институте Физики им. Л.В. Киренского и в Институте физики твердого тела и материаловедения, г. Дрезден, Германия.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. К.А. Шайхутдинов, Д.А. Балаев, С.И. Попков, М.И. Петров. Транспортные и магнитные свойства композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7+Y_3Fe_5O_{12}$, представляющих сеть слабых связей джозефсоновского типа сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник // ФТТ. -2003. –Т.45. – в.10. –С.1776-1783.
2. K.A. Shaihutdinov, D.A. Balaev, D.M. Gokhfeld, S.I. Popkov, M.I. Petrov. Transport properties of HTSC-based composites: modeling the random networks of Josephson weak links with magneto-active barriers // Journal of Low Temperature Physics. –2003. –vol.130. -№ 3/4. –pp.347-382.
3. D.A. Balaev, K.A. Shaihutdinov, S.I. Popkov, M.I. Petrov. The effect of ferromagnetic ordering in insulating component of composites HTSC+ Yttrium Iron Garnet on its transport properties // Solid State Communications. -2003. –vol.125. –pp.281-285.
4. Д.А. Балаев, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. Исследование джозефсоновской связи через магнитоактивный барьер (ферромагнетик, парамагнетик) в композитах $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7+Y_3(Al_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ // ФТТ. -2006. –т.48. –в.11. –С.1929-1937.

Цитированная литература

1. S. Geller, H.J. Williams, G.P. Espinosa, R.C. Sherwood. Importance of Intrasublattice Magnetic Interactions and of Substitutional Ion Type in the Behavior of Substituted Yttrium Iron Garnets // The Bell System Technical J. - 1964. –vol.XLIII. -№2. –pp.565-623.
2. C.Y. Chen, G.J. Pogatshnik, Y. Chen, M.R. Kokta. Optical and electron paramagnetic resonans studies of Fe impurities in yttrium aluminum garnet crystals // P.R.B. -1988. –vol.38. -№13. –pp.8555-8561.
3. Ch.S. Kim, B. Ki. Min, S.J. Kim, S.R. Yoon, Y.R. Uhm. Crystallographic and magnetic properties of $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$. // J.M.M.M. -2003. –vol.254-255. – pp.553-555.
4. М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, Б.П. Хрусталеv. Влияние тепловых флуктуаций на резистивные свойства композитов ВТСП + CuO // ФТТ. -1997. –т.39. -№11. –С.1956-1957.
5. Bourgeois, A. Transport in superconductor ferromagnet superconductor junctions dominated by interface resistance / O. Bourgeois, P. Gandit, A. Sulpice, J. Chaussy, J. Lesueur, X. Grison // P.R.B. -2001. –vol.63. – pp.064517-1 – 064517-8.

Подписано в печать 11.05.2007

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 70. Заказ № 33

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38, ИФ СО РАН

