

На правах рукописи

ДУБРОВСКИЙ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО
ЭФФЕКТА В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ВТСП

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Красноярск - 2008

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико – математических наук, доцент
Балаев Д.А.

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук, профессор
Патрин Г.С.
доктор физико – математических наук, профессор
Вальков В.В.

Ведущая организация: Новосибирский Государственный университет

Защита состоится 26 декабря 2008 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 по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 38.

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

Автореферат разослан “ 21 ” ноября 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ. – мат. наук _____ Втюрин А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В литературе известны такие явления в гранулярных высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), как гистерезис магнитосопротивления и критического тока от магнитного поля и временная релаксация сопротивления после воздействия магнитного поля. Обычно авторы для объяснения этих явлений используют понятие «захваченный образцом поток» ввиду схожести данных явлений с широко известным гистерезисом намагниченности и релаксации намагниченности. Действительно, возможные механизмы, приводящие к этим явлениям, это – либо влияние захваченного в межгранулярных границах магнитного потока (пиннингование джозефсоновских вихрей), либо влияние потока, захваченного гранулами ВТСП, на межгранулярную среду, либо суперпозиция указанных механизмов. Однако до последнего времени не было предложено четких экспериментальных критериев, указывающих на доминирование того или иного механизма, приводящего к гистерезисным явлениям транспортных свойств в гранулярных ВТСП материалах. Поэтому определение данного критерия и установление механизма, ответственного за гистерезис и релаксацию магнитосопротивления в гранулярных ВТСП является актуальной физической задачей, имеющей фундаментальное значение.

Поликристаллические ВТСП, получаемые стандартной методикой твёрдофазного синтеза, можно упрощенно рассматривать как двухуровневую систему, состоящую из двух подсистем: ВТСП гранул и межгранулярных границ. Критический ток, диссипация во внешнем поле (магнитосопротивление) определяются джозефсоновскими слабыми связями на межгранулярных границах.

Помимо «чистых» поликристаллических ВТСП, гальваномагнитные явления можно исследовать и в композитах на основе ВТСП. Исследования транспортных и магнитных свойств двухфазных композитов на основе ВТСП показали, что такие объекты можно рассматривать как «модельные» гранулярные ВТСП. Джозефсоновские связи в композитных ВТСП дополнительно ослаблены по сравнению с «чистыми» ВТСП, тогда как свойства ВТСП гранул остаются неизменными. Композитные ВТСП являются более удобным объектом для исследования, поскольку обладают достаточно низкими значениями критического тока ($10^{-2} \div 10$ А/см²) при температуре жидкого гелия. Это позволяет проводить измерения магнитосопротивления в широком интервале температур, используя относительно низкие значения аппаратного транспортного тока ($1 \div 10$ мА).

Цель данной работы – экспериментальное изучение механизма, определяющего гистерезис магнитосопротивления и временную эволюцию электросопротивления в постоян-

ном магнитном поле в различных гранулярных ВТСП (иттриевая, висмутовая, лантановая керамики и композиты на основе иттриевой керамики).

В связи с этим в работе были поставлены следующие задачи.

1. Провести целенаправленное исследование гистерезисных зависимостей критического тока и магнитосопротивления композитов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) при различных величинах транспортного тока, как меньше критического, так и выше I_c . Интерпретировать полученные результаты и установить критерий определения доминирующего механизма, определяющего данные гистерезисные явления.

2. Провести измерения релаксации остаточного электросопротивления композитов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) после воздействия магнитного поля при различных величинах транспортного тока. Интерпретировать результаты и проверить справедливость использования теории Андерсона-Кима для расчета энергии пиннингования вихрей из резистивных измерений.

3. Исследовать временную эволюцию электросопротивления композитов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) в приложенном постоянном магнитном поле.

4. Исследовать гистерезисные зависимости магнитосопротивления и эволюцию электросопротивления в постоянных магнитных полях на «чистых» гранулярных ВТСП классических систем ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$, $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$ и $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$) и выяснить физический механизм, обуславливающий указанные явления в данных объектах.

Научная новизна:

1. Впервые продемонстрирована взаимосвязь гистерезиса критического тока $I_c(H)$ и появление таких характерных особенностей гистерезисной зависимости магнитосопротивления $R(H)$, как остаточное сопротивление, участок с нулевым сопротивлением или минимум на ветви обратного хода зависимости $R(H)$ в гранулярных ВТСП и показано, что гистерезисные явления транспортных свойств гранулярных ВТСП обусловлены только влиянием магнитных моментов сверхпроводящих гранул на межгранулярную среду, а пиннинг вихрей в джозефсоновской среде несущественен.
2. Впервые показано, что эффект релаксации остаточного сопротивления гранулярного ВТСП после воздействия магнитного поля вызван только релаксацией магнитного потока в ВТСП гранулах, а транспортный ток регулирует “чувствительность” отклика электросопротивления и остаточного сопротивления на величину магнитной индукции в межгранулярной среде.

3. Впервые обнаружена смена характера временной эволюции электросопротивления гранулярного ВТСП (как композитов, так и «чистых» ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$) в постоянном внешнем магнитном поле. При возрастании, а затем остановке внешнего поля магнитосопротивление релаксирует (уменьшается с течением времени). При уменьшении, а затем остановке поля сопротивление возрастает, а в области полей, меньших точки минимума обратного хода зависимости $R(H)$, магнитосопротивление снова релаксирует с течением времени.
4. Впервые показано, что полевая ширина гистерезиса магнитосопротивления гранулярных ВТСП является универсальным, независящим от транспортного тока параметром, характеризующим внутригранулярный пиннинг и сжатие магнитного потока в межгранулярной среде. Это указывает на то, что доминирующим механизмом, определяющим гистерезис $R(H)$, является захват магнитного потока в ВТСП гранулах и влияние магнитных моментов ВТСП-гранул на поле в межгранулярной среде.

Практическая ценность Целенаправленно экспериментально исследованы гистерезисные зависимости магнитосопротивления гранулярных ВТСП систем ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$, $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$, $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ и композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) и временная эволюция электросопротивления таких систем в постоянном внешнем магнитном поле. На основании полученных результатов была разработана модель гранулярного ВТСП, подтверждающая, что гистерезисные зависимости транспортных свойств и временная эволюция электросопротивления в гранулярных ВТСП определяются влиянием потока, захваченного в ВТСП гранулах.

На защиту выносятся:

1. Результаты измерения гистерезисных зависимостей магнитосопротивления композита $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$. Анализ полученных результатов в рамках модели гранулярного ВТСП.
2. Результаты измерений релаксации остаточного сопротивления в композитах $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$ после воздействия магнитного поля.
3. Результаты измерений временной эволюции сопротивления композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$ в постоянном приложенном магнитном поле.
4. Результаты измерений гистерезисных зависимостей магнитосопротивления и временной эволюции электросопротивления в «чистых» гранулярных ВТСП классических систем (Y - Ba - Cu - O , Bi - Ca - Sr - Cu - O , и La - Sr - Cu - O).

Апробация. Материалы диссертации были представлены на международных конференциях по ВТСП: 8-th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M^2S - $HTSC$ -VIII), Dresden, Germany 9-14 July

2006, Вторая международная конференция Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС 06'), Москва, Звенигород 9-13 октября 2006 г, 25-th Conference on low temperature physics (LT 25), Amsterdam, 6-13 August 2008.

Публикации По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 108 стр. машинописного текста, включая 32 рисунка и список цитированной литературы (85 наименований).

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 проведен обзор экспериментальных работ, посвященных исследованию транспортных свойств ВТСП в магнитных полях на примере композитов и «чистых» гранулярных ВТСП; особое внимание уделено гистерезисным явлениям и релаксационным процессам в поликристаллических ВТСП-материалах. В конце литературного обзора дана постановка задачи.

Во второй главе приведены методики синтеза ВТСП-поликристаллов классических соединений ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$, $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$ и $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$) и композитных образцов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) [1], а так же результаты рентгеноструктурного анализа полученных ингредиентов и композитов. Далее в разделе описаны экспериментальные методики измерения транспортных характеристик поликристаллических композитных ВТСП в магнитных полях при различных температурах, основанные на стандартном 4-х зондовом методе. Также описан метод измерения намагниченности на установке «вибрационный магнетометр со сверхпроводящим соленоидом».

В третьей главе приведены результаты исследования гистерезисных зависимостей магнитосопротивления $R(H)$ и критического тока $I_c(H)$ композитов из ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ и CuO . Данные композиты являются «модельными» гранулярными ВТСП с ослабленными джозефсоновскими связями. Измерения температурных зависимостей намагниченности композитных образцов показали, что все образцы имеют одинаковую температуру начала перехода, равную 93.5 К, что соответствует T_c исходного ВТСП.

В главе подробно рассмотрена модель гранулярных ВТСП как двухуровневая сверхпроводящая система [2, 3]: ВТСП – кристаллиты с сильной сверхпроводимостью и межкристаллитные границы, формирующие слабые связи джозефсоновского типа. Практически всегда в области низких температур в эксперименте выполняются неравенства $H \ll$

H_{C2G} (H_{C2G} – верхнее критическое поле для ВТСП гранул) и $j \ll j_{CG}$ (j_{CG} – плотность критического тока для ВТСП гранул). Поэтому если гранулярный ВТСП обладает ненулевым электросопротивлением, то *вся диссипация* как в присутствии внешнего магнитного поля, так и без него, *происходит только в джозефсоновской среде*. Поле, большее H_{C1J} , проникает в систему межкристаллитных границ в виде гипервихрей или джозефсоновских вихрей, размер которых уменьшается с ростом поля. Из-за сильной зависимости критического тока (а значит и сопротивления) джозефсоновских переходов от магнитного поля [4], а также огромного числа межкристаллитных границ ($\sim 10^3$ на 1 mm) в поликристалле, эти объекты демонстрируют высокую чувствительность к внешнему полю.

Вначале упростим вышеупомянутую двухуровневую систему, считая, что пиннинг в джозефсоновских барьерах, т.е. в межгранульных границах пренебрежимо мал и магнитный поток захватывается только внутри сверхпроводящих гранул. Примем также, что и вклад межгранульных границ в диамагнитный отклик образца тоже пренебрежимо мал. В этом случае при $H > H_{C1J}$ на каждую точку джозефсоновской среды действует локальное поле \mathbf{B}_{local} – векторная сумма внешнего поля \mathbf{H} и поля \mathbf{B}_{ind} , индуцированного диамагнитным откликом гранул, окружающих данную точку:

$$\mathbf{B}_{local} = \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M} \mathbf{k}, \quad \mathbf{B}_{ind} = 4\pi \mathbf{M} \mathbf{k} \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от расположения и формы гранул, окружающих данную точку, \mathbf{M} – намагниченность гранул ВТСП. На рис. 1 схематично показаны линии магнитной индукции \mathbf{B}_{ind} в джозефсоновской среде, возникшие от диамагнитного отклика ВТСП гранул. Рассмотрим направление \mathbf{B}_{ind} в области границ между гранулами ВТСП, через которую туннелируют носители тока.

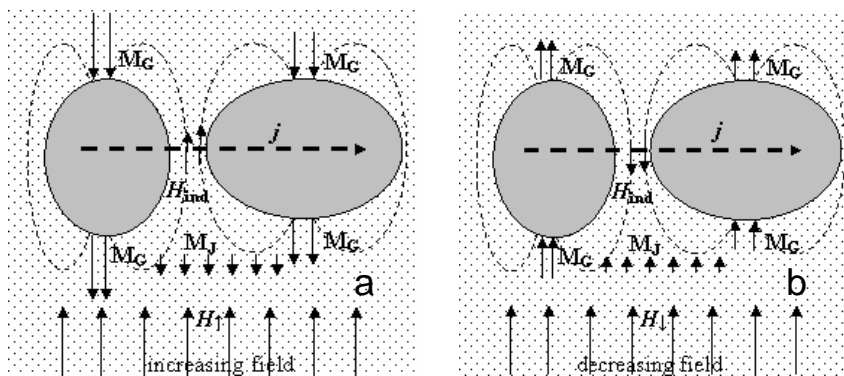


Рис. 1. Схематическое представление гранулярного ВТСП во внешнем поле H . M_G – дипольный магнитный момент гранул ВТСП, M_J – магнитный момент от джозефсоновской среды; он гораздо меньше по значению, чем M_G . Пунктирные линии – линии напряжённости магнитного поля, индуцированного магнитным откликом ВТСП гранул

Поскольку $\mathbf{j} \perp \mathbf{H}$, то в случае возрастания внешнего поля (рис. 1 а) в большей части переходов, по которым течёт транспортный ток, линии магнитной индукции \mathbf{B}_{ind} направлены преимущественно в ту же сторону, что и внешнее поле \mathbf{H} . Поэтому локальные поля в указанной области границ между гранулами будут больше внешнего поля. Если внешнее по-

ле убывает $H = H_{\downarrow}$, рис. 1 b, и H_{\downarrow} находится достаточно далеко от H_{\max} , то намагниченность гранул становится положительной (это следует из классического рассмотрения пиннинга абрикосовских вихрей). Тогда в рассматриваемой области границ между ВТСП гранулами линии магнитной индукции \mathbf{B}_{ind} направлены уже против внешнего поля. Можно говорить об эффективном поле V_{eff} , в котором находится джозефсоновская среда, если усреднить значения модуля $|\mathbf{B}_{\text{local}}|$ по всем межгранульным границам, через которые туннелируют носители:

$$V_{\text{eff}} = \langle |\mathbf{B}_{\text{local}}| \rangle = H - 4\pi M(H) . \quad (2)$$

Выражение для эффективного поля усложнится, если учесть пиннинг в джозефсоновской среде и её намагниченность M_J . M_J является откликом джозефсоновской среды на суперпозицию внешнего поля H и поля, индуцированного гранулами \mathbf{B}_{ind} . В общем случае M_J направлена в ту же сторону, что и M_G – намагниченность гранул. В области рассматриваемых межгранульных границ M_J даёт вклад в $\mathbf{B}_{\text{local}}$, противоположный \mathbf{B}_{ind} , см. рис. 1. По аналогии с (2) можно записать:

$$V_{\text{eff}} = H - 4\pi (M_G(H) - M_J(H, j)) . \quad (3)$$

Согласно представлениям о поведении вихрей в сверхпроводнике в случае протекания транспортного тока в присутствии магнитного поля, ток, больший критического, кардинально изменяет профиль координатной функции потенциала пиннинга [5, 6]. Вследствие действия силы Лоренца вихри срываются с центров пиннинга. Поэтому M_J будет функцией транспортного тока. Следовательно, если пиннинг в джозефсоновской среде значителен, то можно ожидать, что транспортный ток будет влиять на эффективное поле V_{eff} в джозефсоновской среде.

На рис. 2 приведены гистерезисные зависимости $R(H)$ образца $Y\text{-Ba-Cu-O} + 30 \text{ CuO}$ при различных величинах транспортного тока ($2 \div 10 \text{ mA}$, как меньше критического в нулевом внешнем поле, $I_C(T = 4.2\text{K}, H = 0) = 4.5 \text{ mA}$, так и больше) при различных фиксированных значениях $H_{\max} = 1, 2, 3, \dots, 7 \text{ kOe}$ и разность $\Delta H_{R=\text{const}} = (H_{\downarrow} - H_{\uparrow})$ от H_{\downarrow} , т.е. длина отрезка между точками пересечения линии $R = \text{const}$ с зависимостями $R(H_{\uparrow})$ и $R(H_{\downarrow})$, как функция поля H_{\downarrow} . Отметим, что использовать ΔH , как параметр, характеризующий гистерезис $R(H)$, было предложено в данной работе впервые.

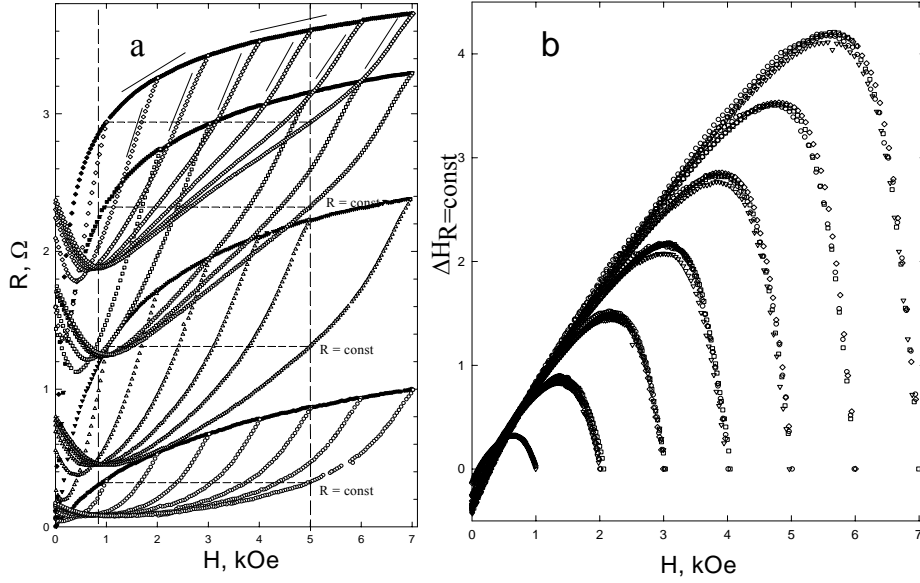


Рис. 2. Гистерезисные зависимости $R(H)$ образца $Y\text{-Ba-Cu-O} + 30 \text{ CuO}$ при различных величинах транспортного тока (2, 4, 7, 10 мА снизу вверх) (а) и разность $\Delta H_{R=\text{const}} = (H_{\downarrow} - H_{\uparrow})$ от H_{\downarrow} (б).

Равенство сопротивлений в полях H_{\uparrow} и H_{\downarrow} , $R(H_{\uparrow}) = R(H_{\downarrow})$, означает равенство эффективных полей в этих точках: $V_{\text{eff}}(H_{\uparrow}) = V_{\text{eff}}(H_{\downarrow})$. В случае когда пиннинг в джозефсоновской среде и вклад в намагниченность от неё малы, из (2) получим:

$$H_{\uparrow} - 4\pi M(H_{\uparrow}) = H_{\downarrow} - 4\pi M(H_{\downarrow}) \quad (4)$$

следовательно ширина гистерезиса магнитосопротивления $\Delta H = H_{\downarrow} - H_{\uparrow}$ при $R = \text{const}$ будет равна:

$$\Delta H_{R=\text{const}} = H_{\downarrow} - H_{\uparrow} = 4\pi (M(H_{\downarrow}) - M(H_{\uparrow})). \quad (5)$$

Видно, что параметр $\Delta H_{R=\text{const}}$ зависит только от намагниченности гранул ВТСП и не зависит от транспортного тока.

Для случая, когда закрепление вихрей в джозефсоновской среде может дать заметный вклад в локальные поля (1), из уравнения (3) получим:

$$\Delta H_{R=\text{const}} = H_{\downarrow} - H_{\uparrow} = 4\pi (M_G(H_{\downarrow}) - M_J(H_{\downarrow}, j)) - 4\pi (M(H_{\uparrow}) - M_J(H_{\uparrow}, j)). \quad (6)$$

В этом случае ширина гистерезиса магнитосопротивления должна зависеть от транспортного тока ввиду зависимостей $M_J(H, j)$.

На рис. 2 показан пример определения ширины гистерезиса магнитосопротивления, максимальное введенное поле $H_{\text{max}} = 7 \text{ kOe}$, $H_{\downarrow} = 5 \text{ kOe}$. Анализируя наши экспериментальные результаты, на рис. 2, а также данные, полученные на других композитных образцах, мы обнаружили, что ширина петли гистерезиса магнитосопротивления, действительно, не зависит от транспортного тока. Рис. 2 иллюстрирует описанную особенность. Данные по $\Delta H_{R=\text{const}}$ для измерений $R(H)$ при различных токах совпадают в пределах точности эксперимента. Т.е., несмотря на то, что сама форма кривых $R(H_{\uparrow})$ и $R(H_{\downarrow})$ сильно

изменяется с ростом тока, что видно на рис. 2, остаётся постоянной разницей $\Delta H_{R=\text{const}} = H_{\downarrow} - H_{\uparrow}$. Величина $\Delta H_{R=\text{const}}$ определяется только H_{max} , т.е. захваченным внутри гранул потоком или внутригранульным пиннигом. Исходя из соображений, приведённых выше (выражение (5)), авторы считают, что независимость ширины гистерезиса от транспортного тока может однозначно быть интерпретирована как то, что гистерезис магнитосопротивления в случае объектов, исследованных в данной работе, определяется только потоком, захваченным внутри ВТСП гранул.

В четвертой главе приведено исследование временной эволюции магнитосопротивления гранулярных композитов на основе ВТСП (Y-Ba-Cu-O) и CuO в постоянных магнитных полях.

Сначала остановимся на временной релаксации остаточного сопротивления после воздействия магнитного поля. При $H_{\downarrow} = 0$ в межгранульной среде остаётся наведённая ненулевая магнитная индукция, что приводит к появлению остаточного электросопротивления R_{rem} . Релаксация намагниченности ВТСП гранул приводит к уменьшению магнитной индукции, наведенной в межгранульном пространстве. А поскольку вся диссипация происходит в межгранульных границах,

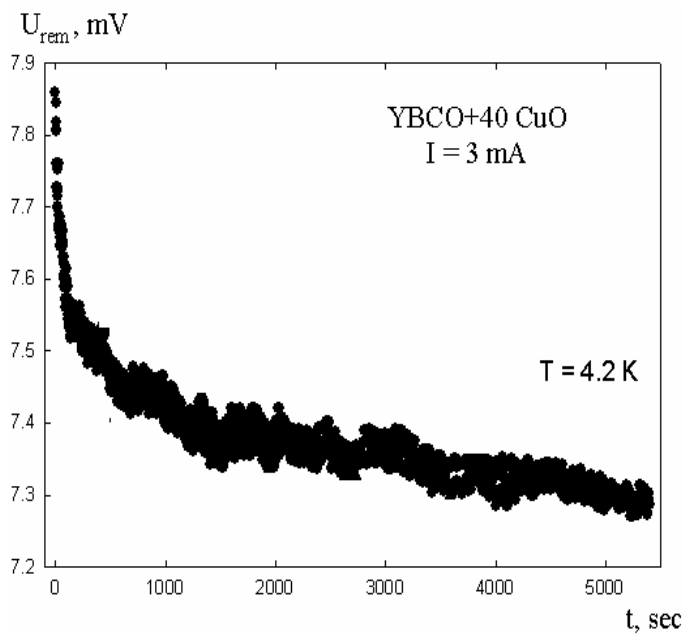


Рис. 3. Релаксация остаточного сопротивления R_{rem} от времени образцов YBCO + 40 CuO.

то эти границы (переходы джозефсоновского типа) реагируют на уменьшение наведённой магнитной индукции и остаточное сопротивление также релаксирует со временем. На рис. 3 приведены типичные зависимости U_{rem} (остаточного напряжения при заданном токе, $R_{\text{rem}} = U_{\text{rem}} / I$) от времени для образца Y-Ba-Cu-O + 40 CuO после ввода/вывода внешнего поля до величины $H_{\text{max}} = 5 \text{ kOe}$.

Для интерпретации данных по релаксации остаточного электросопротивления было предложено сопоставлять величину R_{rem} с равным ему значением сопротивления на зависимости $R(H)$ (прямой ход зависимости $R(H)$). Действительно, равенство электросопротивления R_{rem} и $R(H_{\uparrow} = H^*)$ означает, что величина магнитной индукции, усреднённой по всем межгранульным границам $\langle B_{\text{ind}} \rangle$, одинакова в точках $H_{\downarrow} = 0$ (после

приложения H_{\max}) и $H_{\uparrow} = H^*$. Поле H^* определяется как абсцисса пересечения линии $R(H) = R_{\text{rem}}$ и ветви прямого хода зависимости $R(H)$. На рис. 4 подробно показаны начальные участки прямого хода $R(H)$ композита Y-Ba-Cu-O + 40 CuO и точки пересечения этих зависимостей с прямыми $R(H) = R_{\text{rem}}$, соответствующими данному транспортному току. Оказалось, что величина H^* одинакова для всех значений транспортного тока и равна ≈ 440 Oe (при $H_{\max} = 5$ kOe).

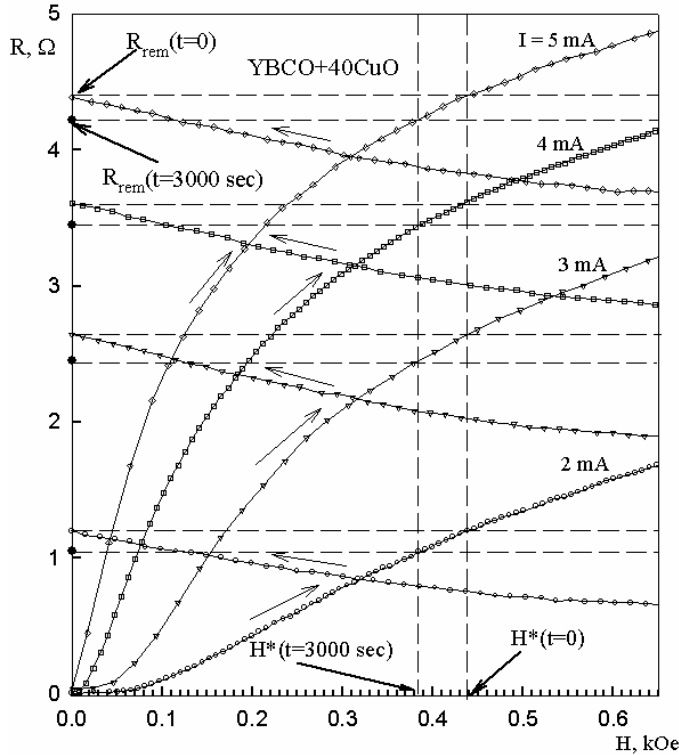


Рис. 4. Гистерезисные зависимости магнитосопротивления образца YBCO + 40CuO при $T = 4.2$ K в области полей до 0.65 kOe. На рисунке указаны остаточное сопротивление $R_{\text{rem}}(t=0)$ и величины R_{rem} через $t = 3000$ sec.

Низкие величины транспортного тока не могут индуцировать поле в образце, сравнимое с внешним полем. Поэтому величина $\langle B_{\text{ind}} \rangle$ при одинаковой магнитной предыстории одна и та же при разных токах. Подобные результаты получены и для других композитных образцов.

В случае учёта пиннинга в межгранульных границах картина проникновения поля в гранулярный сверхпроводник (рис. 1), усложнится и $\langle B_{\text{ind}} \rangle$ при $H_{\downarrow} = 0$ будет определяться суперпозицией полей, наведённых абрикосовскими вихрями, и джозефсоновскими вихрями в межгранулярной среде [7, 8, 9]. Однако транспортный ток, больший критического для джозефсоновских переходов, будет способствовать дополнительному срыву вихрей из межгранулярной среды, что должно приводить к уменьшению величины $\langle B_{\text{ind}} \rangle$ с ростом тока, и, как следствие, зависимости H^* от I . Поскольку такого в эксперименте не наблюдается, то можно заключить, что релаксация электросопротивления исследованных ВТСП

Также на рис. 4 приведены значения $R_{\text{rem}}(t = 3000 \text{ sec})$ (точки на оси ординат), т.е., сопротивление, измеренное через 3000 sec после вывода поля. Мы сопоставили величину $R_{\text{rem}}(t = 3000 \text{ sec})$ с равным ему значением сопротивления на зависимости $R(H_{\uparrow})$ подобно тому, как это сделано для значений $R_{\text{rem}}(t = 0 \text{ sec})$. Из рис. 4 видно, что поле $H^*(t = 3000 \text{ sec})$, т.е., абсцисса пересечения линии $R(H) = R_{\text{rem}}(t = 3000 \text{ sec})$ с зависимостью $R(H_{\uparrow})$ также одинаково для всех значений транспортного тока и составляет величину ≈ 385 Oe. Для других значений t ситуация аналогична.

композитов вызвана только релаксацией магнитного потока, захваченного сверхпроводящими гранулами. Уменьшение поля H^* с течением времени (~ 55 Oe в течении ~ 3000 sec) одинаково для различных плотностей транспортного тока, и это является, на наш взгляд, убедительным доказательством того, что релаксация остаточного электросопротивления в исследованных композитных образцах, вызвана уменьшением магнитной индукции $\langle B_{ind} \rangle$ в межгранульной среде, которая, в свою очередь, связана с процессами выхода вихрей из ВТСП гранул.

При измерениях временной эволюции магнитосопротивления в постоянном магнитном поле была обнаружена смена характера изменения электросопротивления. Впервые обнаружено, что при возрастании, а затем остановке внешнего магнитного поля электросопротивление уменьшается, а при убывании/остановке поля увеличивается со временем. В диапазоне малых полей при условиях $H = \text{const}$ сопротивление снова уменьшается с течением времени.

Остановимся на объяснении наблюдаемой смены характера эволюции релаксации электросопротивления. При остановке внешнего поля на прямом ходу зависимости $R(H)$ или $M(H)$, модуль намагниченности уменьшается со временем. Значит, уменьшается и поле в межгранульной среде, индуцированное дипольными моментами гранул. Это индуцированное поле дает различный по знаку вклад в эффективное поле в межгранульной среде на прямой и обратной ветви зависимости $R(H)$, см. рис. 1. Значит, в случае возрастания внешнего поля, релаксация намагниченности приводит к уменьшению эффективного поля в межгранульной среде, и электросопротивление уменьшается со временем. Когда поле убывает, индуцированное гранулами поле направлено против внешнего и релаксация намагниченности приводит к увеличению эффективного поля, следовательно, сопротивление увеличивается со временем. В полях, меньших точки минимума обратного хода $R(H)$ (вплоть до $H_{dec} = 0$), индуцированное поле преобладает над внешним, и релаксация намагниченности приводит к тому, что эффективное поле уменьшается и R также релаксирует.

В пятой главе приводятся результаты исследования гистерезисного поведения магнитосопротивления $R(H)$ и его временной эволюции в магнитных полях гранулярных ВТСП классических систем Y-Ba-Cu-O, Bi-Ca-Sr-Cu-O, и La-Sr-Cu-O при различных плотностях транспортного тока, как меньше критической (при $H = 0$), так и больше неё. Т.е. в данной главе были проведены эксперименты, подобные исследованиям предыдущих глав, но не на композитах, а на «чистых» гранулярных ВТСП.

На рис. 5 приведены гистерезисные зависимости магнитосопротивления исследованных образцов, измеренные при различных величинах транспортного тока

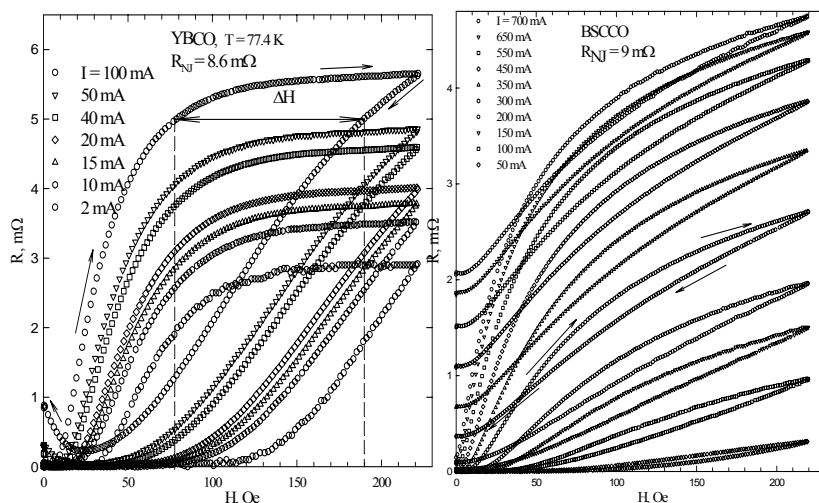


Рис. 5. Гистерезисные зависимости магнитосопротивления исследованных гранулярных ВТСП при различных значениях транспортного тока I .

На рис. 6 приведены зависимости полевой ширины гистерезиса, см. (5), $\Delta H(H_{\downarrow})$ для результатов, приведённых на рис. 5. В пределах точности экспериментальных данных (которые определяются как точностью задания максимально приложенного поля H_{\max} , так и погрешностью измерения H и R) мы не обнаружили влияния варьирования транспортного тока на полевую ширину гистерезиса $R(H)$. Для Y-Ba-Cu-O измерения проведены при токах $I = 10 \div 150$ mA (диапазон полей до 220 Oe) и $I = 100 \div 500$ mA (диапазон полей до 1600 Oe), то есть, практически вплоть до I_c ($I_c(77.4\text{K}) \approx 600$ mA). Указанное поведение харак-

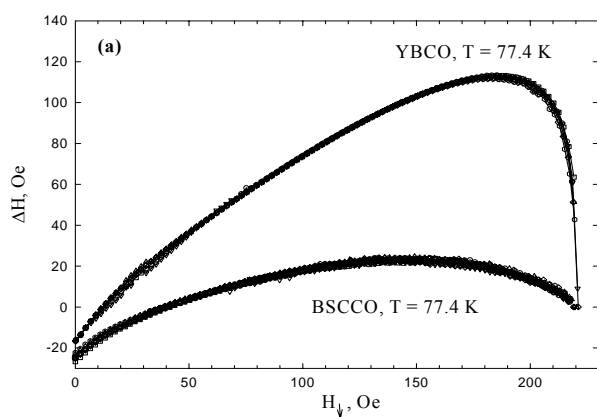


Рис. 6. Полевая ширина гистерезиса $\Delta H = H_{\downarrow} - H_{\uparrow}$, определённая из данных рис. 5 по условию $R = \text{const}$

терно как для относительно слабых полей (200 Oe), так в диапазоне полей до 1600 Oe. Для Bi-Ca-Sr-Cu-O полевая ширина гистерезиса тоже не зависит от тока как при $I < I_c$, так и при $I > I_c$ ($I = 50 \div 700$ mA, $I_c(77.4\text{K}) \approx 400$ mA) в диапазоне слабых (до 220 Oe) полей, а также в полях до 2 kOe (диапазон больших полей на рисунке не показан, т.к. гистерезис $R(H)$ достаточно узок). Что касается образца La-Sr-Cu-O, то нам

удалось провести измерения при температуре 4.2 K в достаточно узком диапазоне транспортного тока $I = 30 \div 50$ mA ($I_c(4.2\text{K}) \approx 300$ mA), и в этом случае ширина гистерезиса магнитосопротивления также не зависит от I (для этого образца зависимости $R(H)$ измерялись до различных значений $H_{\max} = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ kOe).

Таким образом, независимость параметра $\Delta H(H_{\downarrow})$ от транспортного тока наблюдается не только на ВТСП-композитах с ослабленными джозефсоновскими связями, а характерна и для гранулярных ВТСП с джозефсоновскими связями, сформированными «естественными» межгранулярными границами. Обнаруженное поведение можно считать убедительным доказательством того, что гистерезисное поведение магнитосопротивления гранулярного ВТСП определяется в основном влиянием потока, захваченного в сверхпроводящих гранулах. Параметр $\Delta H(H_{\downarrow})$ - полевую ширину гистерезиса магнитосопротивления можно считать до некоторой степени универсальным. Он определяется только внутригранулярным пиннингом.

Исследования временной эволюции магнитосопротивления во внешних полях, проведенные на системах Y-Ba-Cu-O, Bi-Ca-Sr-Cu-O при температуре 77 К и в полях до 250 Ое показали, что 1). релаксация остаточного электросопротивления R_{rem} вызвана только релаксацией магнитного потока, захваченного сверхпроводящими гранулами, подобно тому, что наблюдалась на композитах (Рис.4); 2). смена характера временной эволюции магнитосопротивления в постоянном внешнем поле, обнаруженная на композитах наблюдается и на гранулярном Y-Ba-Cu-O при $T = 77$ К. Таким образом, поведение временной эволюции магнитосопротивления не является свойством ВТСП - композитов, а присуще и гранулярным ВТСП классических систем.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы работы:

1. Исследованы гистерезисные зависимости критического тока и магнитосопротивления композитов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) при различных величинах транспортного тока. Продемонстрирована взаимосвязь гистерезиса критического тока $I_c(H)$ и появление таких характерных особенностей гистерезисной зависимости магнитосопротивления $R(H)$, как остаточное сопротивление, участок с нулевым сопротивлением или минимум на ветви обратного хода зависимости $R(H)$. Полученные результаты интерпретированы в рамках модели для гранулярного ВТСП. Для определения доминирующего механизма, ответственного за указанные явления, впервые предложено использовать следующий параметр – полевую ширину гистерезиса магнитосопротивления. Показано, что этот параметр не зависит от транспортного тока. Это свидетельствует о том, что гистерезисные явления транспортных свойств, обусловлены только влиянием магнитных моментов сверхпроводящих гранул на межгранулярную среду, а пиннинг вихрей в джозефсоновской среде несущественен.
2. Измерения релаксации остаточного электросопротивления композитов на основе ВТСП ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$) после воздействия магнитного поля, показали, что

этот эффект вызван только релаксацией магнитного потока в ВТСП гранулах, а транспортный ток регулирует “чувствительность” отклика электросопротивления и остаточного сопротивления на величину магнитной индукции в межгранульной среде. Поэтому использование выражения, следующего из андерсоновской теории для расчета энергии пиннинга вихрей, некорректно для случая резистивных измерений.

3. Впервые обнаружена смена характера временной эволюции электросопротивления гранулярного ВТСП (как композитов, так и «чистых» ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$) в постоянном внешнем магнитном поле. При возрастании, а затем остановке внешнего поля магнитосопротивление релаксирует (уменьшается с течением времени). При уменьшении, а затем остановке поля сопротивление возрастает, а в области полей, меньших точки минимума обратного хода зависимости $R(H)$, магнитосопротивление снова релаксирует с течением времени. Обнаруженный эффект объясняется влиянием релаксации намагниченности (по модулю) отдельных сверхпроводящих гранул и, как следствие, временной эволюции эффективного поля в межгранульной среде.
4. Исследованы гистерезисные зависимости магнитосопротивления и эволюции электросопротивления в постоянных магнитных полях (включая $H=0$) гранулярных ВТСП классических систем ($Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$, $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$ и $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$). Показано, что предложенный параметр – полевая ширина гистерезиса магнитосопротивления является универсальным, независящим от транспортного тока параметром, характеризующим внутригранульный пиннинг и сжатие магнитного потока в межгранульной среде. Это указывает на то, что доминирующим механизмом, определяющим гистерезис $R(H)$, является захват магнитного потока в ВТСП гранулах и влияние магнитных моментов ВТСП-гранул на поле в межгранульной среде. Пиннинг джозефсоновских вихрей не оказывает существенного влияния на гистерезисное поведение $R(H)$, а диссипация определяется процессами течения джозефсоновских вихрей в межгранульной среде. Экспериментальные данные по релаксации сопротивления подтверждают этот вывод.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. Гистерезис магнитосопротивления гранулярных ВТСП как проявление магнитного потока, захваченного сверхпроводящими гранулами, на примере композитов $YBCO + CuO$ // ЖЭТФ. – 2007. – Т. 132, № 6, С. 1340-1351.

2. D.A. Balaev, A.A. Dubrovskiy, K.A. Shaykhutdinov, S.I. Popkov, M.I. Petrov. Time relaxation of residual resistance of HTSC-based composites // *Physica C*. – 2007. – V. 460-462, pp. 1309-1310
3. Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. Механизм релаксации остаточного электросопротивления гранулярных ВТСП после воздействия магнитного поля на примере композитов Y-B-C-O+CuO // *ФТТ*. – 2008. – Т. 50, № 6, С. 972-979.
4. D.A. Balaev, A.A. Dubrovskiy, K.A. Shaykhutdinov, S.I. Popkov, M.I. Petrov. Peculiarities of the time evolution of magnetoresistance of granular HTSC in a constant applied magnetic field // *Solid State Communications*. – 2008. – V. 147, pp. 284-287.
5. Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Дубровский А.А., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Исследование гистерезиса магнитосопротивления гранулярных ВТСП, Сборник трудов второй международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС 06', Москва, Звенигород 9-13 октября 2006 г., с. 223-224.
6. Балаев Д.А., Дубровский А.А., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Петров М.И. Исследование релаксации остаточного электросопротивления гранулярных ВТСП после воздействия магнитного поля на примере композитов Y-Ba-Cu-O + CuO, Сборник трудов второй международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС 06', Москва, Звенигород 9-13 октября 2006 г., с. 245-246.
7. Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, К.А. Шайхутдинов, С.И. Попков, Д.М. Гохфельд, Ю.С. Гохфельд, М.И. Петров. Гистерезис магнитосопротивления гранулярных ВТСП. Механизм и универсальность полевой ширины гистерезиса. // Сборник трудов третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС 08', Москва, Звенигород 13-17 октября 2008 г., с. 104-105.
8. Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, К.А. Шайхутдинов, С.И. Попков, М.И. Петров. Особенности временной эволюции магнитосопротивления гранулярных ВТСП в постоянном магнитном поле. // Сборник трудов третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС 08', Москва, Звенигород 13-17 октября 2008 г., с. 117-118.

Цитированная литература

1. Балаев Д.А., Петров М.И., Шайхутдинов К.А., Попков С.И., Гохфельд Д.М., Овчинников С.Г. Способ получения композитных материалов на основе высокотемпературных сверхпроводников, Патент РФ, RU 2228311, С2.
2. L. Ji, M.S. Rzchowski, N. Anand, and M. Tinkham. Magnetic-field-dependent surface resistance and two-level critical-state model for granular superconductors // *Phys. Rev. B.* – 1993. – V. 47, pp. 470.
3. J.E. Evetts, B.A. Glowacki. Relation of critical current irreversibility to trapped flux and microstructure in polycrystalline $YBa_2Cu_3O_7$ // *Cryogenics.* – 1988. – V. 28, pp. 641.
4. А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона – М.: Мир. – 1984. – 639 с.
5. Y.M. Kim, C.F. Hempstead, and A.M. Strnad. Flux Creep in Hard Superconductors // *Phys. Rev.* – 1963. - V. 131., № 6, pp. 2486
6. L.F. Cohen, H.J. Jensen. Open questions in the magnetic behaviour of high-temperature superconductors // *Rep. Prog. Phys.* – 1997. – V. 60, pp. 1581.
7. Кузьмичев Н.Д. Критическое состояние среды Джозефсона // *Письма в ЖЭТФ.* – 2001. – Т. 74. - № 5. – С. 291-295.
8. P. Mune, F.C. Fonesca, R. Muccillo, R.F. Jardim. Magnetic hysteresis of the magnetoresistance and the critical current density in polycrystalline $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -Ag superconductors // *Physica C.* – 2003. – V.390, pp. 363.
9. Э.Б. Сонин. Теория джозефсоновской среды в ВТСП: вихри и критические магнитные поля // *Письма в ЖЭТФ.* – 1988. – Т. 47, С. 415.

Подписано в печать 18.11.2008. Заказ № 35
Формат 60×90/16. Уч.-изд. л. 1.0.0 Тираж 70 экз.
Типография Института физики им.Л.В. Киренского СО РАН