

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ



UZ0602925

На правах рукописи

АЛИМОВ ГЛЕБ РАВИЛЬЕВИЧ

МАГНИТО-, ТЕРМО-МОДУЛИРОВАННОЕ
МИКРОВОЛНОВОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Специальность 01.04.07. – Физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент – 2004

Работа выполнена в НИИ прикладной физики Национального
Университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека

Научный руководитель: Кандидат физико-математических наук
Алиев Марат Камалович

Официальные оппоненты: Профессор, доктор физико-математических
наук **Гасанов Эльдар Мамедович**
Профессор, доктор физико-математических
наук **Имамов Эркин Зуннунович**

**Национальный научный центр - Харь-
ковский физико-технический институт,**

Ведущая организация: г. Харьков, Украина

Защита состоится "17" февраля 2004 года в 10⁰⁰ часов на
заседании специализированного Совета Д 015.15.01 в Институте ядерной фи-
зики АН РУз по адресу: 702132, г.Ташкент, пос. Улугбек.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ АН РУз и в фун-
даментальной библиотеке АН РУз.

Автореферат разослан "17" января 2004 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Доктор физико-математических наук



Каримов Махамдали

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Прошедшие после открытия высокотемпературной сверхпроводимости годы показали, что для микроволнового исследования ВТСП могут с успехом применяться ЭПР-спектрометры. Магнито-модуляционная техника ЭПР-спектрометров, обеспечивающая их рекордно высокую чувствительность, оказалась весьма подходящим инструментом для детектирования микроволновых откликов от межгранульных джозефсоновских (слабых) связей, определяющих токонесущую способность ВТСП-керамик. Высокая восприимчивость этих микроволновых откликов к слабым магнитным полям, вследствие чего они часто называются "низкополевыми сигналами" (НПС), используется в диссертации для обнаружения влияния захваченных абрикосовских вихрей на критический ток слабых связей в ВТСП-керамике. Другого рода задача, рассматриваемая в диссертации, связана с тем, что с помощью ЭПР-спектрометров можно непосредственно наблюдать сверхпроводящий переход в ВТСП в виде пика в температурной зависимости сигнала, детектируемого магнито-модуляционным методом. Сигнал в этом случае пропорционален производной $\partial R/\partial H$, где R - микроволновое поглощение и H - внешнее магнитное поле. Вследствие этого исследование $\partial R/\partial H$ -пика в зависимости от внешнего магнитного поля и от ориентации ВТСП-монокристалла по отношению к полю представляет собой уникальный источник информации о поведении микроволнового поглощения вблизи линии верхнего критического поля $H_{c2}(T)$. В диссертации наряду с указанным методом магнитной модуляции впервые применяется также и метод температурной модуляции, позволяющий измерять производную по температуре от поглощения $\partial R/\partial T$ в области сверхпроводящего перехода. Как показано в диссертации, совместное применение обоих методов позволяет получать более полную информацию о свойствах сверхпроводящего перехода в ВТСП.

Целью исследования является выяснение механизма индуцированного магнитным полем уширения сверхпроводящего перехода в ВТСП-монокристаллах и выявление влияния абрикосовских вихрей на критический ток ВТСП-керамик.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать и создать систему термостатирования, обеспечивающую возможность модуляции температуры образца.
2. Автоматизировать процессы измерений с целью обеспечения оптимальных условий для проведения экспериментов и последующей обработки полученных экспериментальных данных.
3. Провести исследование свойств сверхпроводящего перехода в Y-Ba-Cu-O-монокристаллах с применением высокочувствительных методов магнитной и температурной модуляций.

4. Исследовать влияние захваченных абрикосовских вихрей на критический ток межгранульных слабых связей в Eu-Ba-Cu-O -керамике путем измерения НПС в зависимости от предыстории образца.

Новизна работы:

1. Впервые разработан и применен метод температурной модуляции для измерения производной $\partial R/\partial T$ в ВТСП-монокристалле Y-Ba-Cu-O . Обнаружено, что пик сверхпроводящего перехода в температурной зависимости производной $\partial R/\partial T$ отличается по форме и положению от аналогичного пика в температурной зависимости производной $\partial R/\partial H$, измеренной традиционным для ЭПР-спектрометров методом магнитной модуляции. Выяснено, что указанные пики ведут себя неодинаковым образом с ростом внешнего магнитного поля и имеют сильно отличающиеся зависимости от угла между направлением поля и с-осью монокристалла. Показано, что поведение пиков в слабых полях $H < 20 \text{ Э}$ и их угловые зависимости могут быть хорошо описаны моделью Тинкхама [1], но лишь при условии ее, определенного видоизменения.

2. Показана возможность использования "низкополевого сигнала" для исследования вихревой структуры остаточного поля в 1-2-3 - керамиках и дано прямое экспериментальное подтверждение формулы Фистуля [2], описывающей зависимость критического тока межгранульных джозефсоновских контактов от концентрации абрикосовских вихрей на их берегах.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Экспериментальные данные по микроволновому поглощению вблизи критической температуры, полученные в диссертации путем совместного применения методов магнитной и температурной модуляций, существенно дополняют данные, получаемые резистивным методом, и тем самым способствуют извлечению более полной информации о свойствах сверхпроводящего перехода в ВТСП-монокристаллах и могут быть использованы для строгого тестирования соответствующих теоретических моделей. Предложенный микроволновой метод исследования остаточных магнитных полей в ВТСП 1-2-3 – керамиках с помощью НПС может быть использован для оценки силы пиннинга и нижнего критического поля $H_{c1}(T)$ в гранулах керамики. С практической точки зрения указанные методы могут быть применены для контроля технологии изготовления ВТСП-материалов в целях бесконтактного определения их критических температур, критических полей, фазового состава и токонесущей способности.

Защищаемые положения:

1) Разработанный и реализованный метод температурной модуляции при детектировании микроволнового поглощения в ВТСП.

2) Обнаруженные характерные особенности нерезонансного микроволнового поглощения в монокристаллах типа 1-2-3 в области сверхпроводящего перехода с применением методов магнитной и температурной модуляций.

3) Теоретическое описание полученных экспериментальных данных в области слабых магнитных полей на основе обобщенной модели Тинкхама.

4) Результаты микроволнового исследования влияния захваченных абрикосовских вихрей и вихрей джозефсоновского типа на критический ток межгранульных джозефсоновских контактов в Eu-123 керамике.

Апробация работы и публикации

Основные результаты, изложенные в диссертации, представлялись, докладывались и обсуждались на международных конференциях "NATO Advanced Research Workshop on Vortex Dynamics in High Temperature Superconductors" (VDHTS 2002, May 17-22, 2002, Tashkent, Uzbekistan), "Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors" (MOS99, August, 1999, Stockholm, Sweden), "Modern Problems of Nuclear Physics" August 1999, Bukhara, Uzbekistan), Всероссийской конференции "Применение ядерно-физических методов в материаловедении" (28 сент.-2 окт. 1998, Ижевск, Россия), семинарах ИЯФ АН РУз, ФТИ АН РУз и НИИПФ (Ташкент) и опубликованы в работах [A1-A8].

Объем и структура диссертации

Диссертация объемом 111 страниц состоит из введения, 4-х глав, заключения и 2-х приложений, а также содержит 17 рисунков и 106 ссылок на литературные источники.

Во введении обосновывается актуальность тематики и излагаются цель, новизна и положения выносимые на защиту.

В первой главе, имеющей вводный характер, рассматриваются проблемы физики ВТСП, затронутые в диссертации, и вопросы, связанные с применением ЭПР-спектрометров для микроволновых исследований ВТСП.

Во второй главе рассматривается способ реализации метода температурной модуляции и приводится описание созданной на базе ЭПР-спектрометра экспериментальной установки для микроволновых исследований ВТСП.

В третьей главе приведены результаты микроволнового исследования сверхпроводящего перехода в монокристаллах YBaCuO (для диапазона полей $5 \text{ Э} < H < 10^4 \text{ Э}$), полученные с применением методов магнитной и температурной модуляций. Проводится анализ экспериментальных данных на основе модели Тинкхама [1].

В четвертой главе даются результаты исследования остаточных полей в Eu-Ba-Cu-O -керамике с использованием "низкополевого сигнала". Полученные экспериментальные данные анализируются с привлечением формулы Фистуля [2], описывающей влияние захваченных абрикосовских вихрей на критический ток межгранульных контактов.

В Заключении подводятся общие итоги работы с точки зрения научной и практической значимости. В приложениях А и Б, к третьей и четвертой главам соответственно, дается вывод формул, использованных для анализа экспериментальных данных.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе обсуждаются затронутые в диссертации проблемы физики ВТСП и связанные с ними задачи микроволновых исследований. Одна из этих проблем связана с наблюдаемым в ВТСП эффектом уширения сверхпроводящего перехода с ростом магнитного поля. Данный эффект, неожиданный с точки зрения традиционных сверхпроводников, до сих пор еще не получил своего однозначного объяснения (даже на феноменологическом уровне), хотя к настоящему времени на этот счет выдвинуты различные теоретические модели, использующие такие понятия, как термическая активация вихрей и флуктуации параметра порядка, роль которых в случае ВТСП становится более весомой из-за малой длины когерентности, высокой критической температуры и сильной анизотропии, отличающих эти сверхпроводники. В целях выяснения причины существования рассматриваемого явления могут быть использованы результаты микроволновых исследований ВТСП-монокристаллов, выполненных с применением ЭПР-спектрометра. В этом плане выглядит целесообразным проведение измерения производной $\partial R/\partial T$ в области сверхпроводящего перехода наряду с измерением производной $\partial R/\partial H$, традиционно осуществляемым с помощью ЭПР-спектрометра. Данные, полученные в результате совместных измерений производных $\partial R/\partial H$ и $\partial R/\partial T$ могут дать более полное представление о свойствах сверхпроводящего перехода в ВТСП и использованы для построения адекватных теоретических моделей. Именно в таком виде ставится задача, которая решается в главах 2 и 3 данной диссертации.

Другая рассматриваемая в диссертации проблема касается токнесущей способности ВТСП-керамик в магнитном поле, зависящей от величины критического тока межгранульных контактов. Быстрое падение последнего с ростом магнитного поля, обусловленное джозефсоновской природой этих контактов, является серьезным препятствием для технического применения ВТСП-керамик. Интерес, проявляемый в диссертации к этой проблеме, вызван теоретической работой Фистуля [2], в которой показано, что в полях выше нижнего критического поля гранул ВТСП-керамики критический ток должен в сильной степени зависеть от концентрации абрикосовских вихрей в этих гранулах. Примечательным является сделанное в этой работе предсказание, что воздействие абрикосовских вихрей на критический ток должно приводить к замедлению его падения с ростом магнитного поля. В связи с этим представляется целесообразным экспериментальное изучение этого эффекта, который до сих пор наблюдался лишь косвенным образом в некоторых экспериментах. В целях выявления влияния абрикосовских вихрей на критический ток может быть использован «низкополевой сигнал» (НПС), являющийся микроволновым откликом межгранульных контактов и хорошо наблюдаемый с помощью ЭПР-спектрометра. Изучая зависимость НПС от специально выбранных магнитотемпературных предысторий образца, обеспечивающих присутствие абрико-

совских вихрей в гранулах в различных концентрациях, можно получить информацию об их воздействии на критический ток межгранульных контактов и тем самым проверить формулу Фистуля (поставленная в таком виде задача решается в главе 4 диссертации).

Решение поставленных выше задач требует дополнительного усовершенствования ЭПР-спектрометра. В связи с этим приводится краткий обзор работ, посвященных микроволновым исследованиям ВТСП на модифицированных ЭПР-спектрометрах, дающий представление о месте диссертации в ряду этих работ и ее новизне в инструментальном плане.

Во второй главе рассматривается предлагаемый способ измерения производной dR/dT , основанный на применении метода температурной модуляции, и дается описание созданной на базе ЭПР-спектрометра экспериментальной установки, учитывающей специфику поставленных в диссертации задач.

Возможность реализации метода температурной модуляции обеспечивается применением оригинальной системы термостатирования, использующей луч света для нагрева образца. На рис. 1 приведен общий вид используемой нами

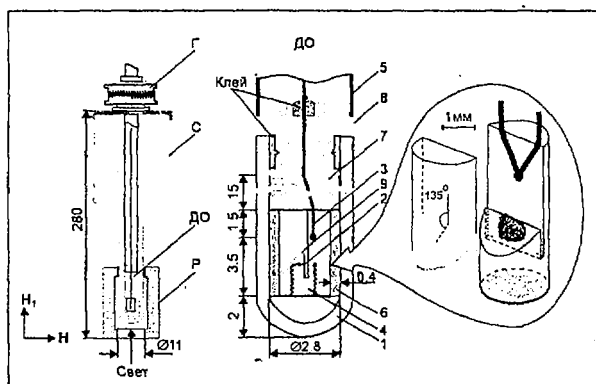


Рис.1. Конструкция криосистемы и держателя образца. 1-кварцевая капсула, 2-образец, 3-спай термолары, 4-сапфировый теплообменник, 5-штوك держателя образца, 6-тепловой изолятор, 7-слой ваты, 8-эбонитовая заглушка, 9-отражатель тепловой волны, С-сосуд Дьюара, ДО-держатель образца, Р-с.в.ч.-резонатор, Г-гониометр.

системы термостатирования. Основным достоинством такой системы является возможность модулирования температуры с частотой 80 Гц и амплитудой модуляции $10^{-2} \div 10^{-1}$ К

На рис. 2 представлена блок схема созданной нами экспериментальной установки на базе стандартного ЭПР-спектрометра типа "SE/X 2543" фирмы "RADIOPAN", позволяющая проводить: 1) измерения пика сверхпроводящего перехода в температурной зависимости сигнала с применением как магнитной, так и температурной модуляций при различных значениях внешнего магнит-

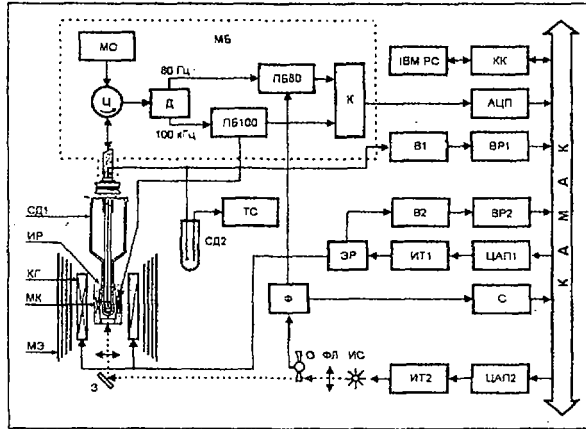


Рис.2 Блок-схема установки. МБ и МО - микроволновой блок и осцилятор соответственно, Ц - циркулятор, Д - СВЧ-детектор, ПБ80 и ПБ100 - приемно измерительные блоки работающие на частотах 80 Гц и 100 кГц, К - коммутатор, КК - контроллер крейта КАМАК, В1 и В2 - микровольтметр и милливольтметр соответственно, ВР1 и ВР2 - входные регистры, ЭР - эталонный резистор, ИТ1 и ИТ2 - источники тока для катушек Гельмгольца КГ и источника света ИС, Ф - формирователь, С - счетчик, ФЛ - фокусирующие линзы, О - обтюратор, З - зеркало, МЭ - магнитные экраны, МК - модуляционные катушки, ИР - измерительный резонатор, СД1 и СД2 - сосуды Дьюара, ТС - платиновый термометр сопротивления.

ного поля и ориентациях образца; 2) измерения НПС в ВТСЦ, в том числе сквидовых, в режиме сканирования как поля, так и температуры; 3) измерения НПС в зависимости от предыстории образца при изучении явлений захвата магнитного потока, крипа потока и т.п.

В третьей главе впервые одновременно представлены результаты микроволнового исследования сверхпроводящего перехода в монокристалле $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$, полученные как методом магнитной модуляции, так и методом температурной модуляции. В эксперименте использовалась созданная нами микроволновая установка, описанная в главе 2. Образец размещался в центре прямоугольного резонатора типа TE_{102} (добротность $Q=5000$, собственная частота $f \approx 10$ ГГц). Измерению подлежала отраженная от резонатора волна, характеризующая СВЧ-поглощение (R) в образце, при подводимой к резонатору СВЧ-мощности -17 dB ($P_{max}=130$ мВт). В случае исследования поглощения в области слабых магнитных полей постоянное магнитное поле (H), воздействующее на образец, создавалось катушками Гельмгольца ($H_{max}=90$ Э), которые вместе с резонатором помещались в пермалловый магнитный экран, подавляющий поле Земли более чем в 100 раз. При измерениях в достаточно сильных магнитных полях до 10 кЭ использовался стандартный электромагнит ЭПР-спектрометра. В эксперименте использовалась геометрия полей $H \parallel H_1$

(H_1 —СВЧ-поле, см. также вставку к рис. 3). Измерения проводились при ориентациях монокристалла с $c \perp H_1$ (c — кристаллографическая ось монокристалла — образца), угол θ между c и H мог меняться вращением монокристалла вокруг направления H_1 и устанавливаться с точностью $\pm 0,5^\circ$. Отраженная от резонатора волна измерялась с применением как метода магнитной модуляции, так и метода температурной модуляции. Соответственно осуществлялось синхронное детектирование на частоте 100 кГц при модуляции магнитного поля (максимальная амплитуда модуляции $h_{m,max}=10$ Э) и на частоте 80 Гц при модуляции температуры образца ($\tau=10^{-2} \div 10^{-1}$ К). В результате, регистрируемый

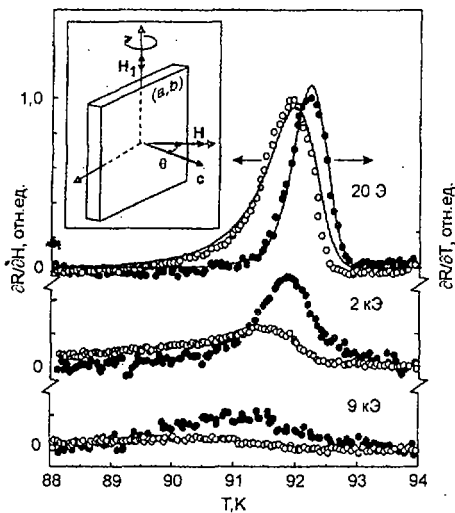


Рис.3. Температурные зависимости производных $\partial R/\partial H$ и $\partial R/\partial T$ при $\theta=0^\circ$ при различных значениях H . Сплошной линией изображены кривые, рассчитанные по формулам (1) и (2). На вставке показана геометрия эксперимента.

сигнал (S) имел в первом случае связь с производной от поглощения по полю ($S \sim \partial R/\partial H$), а во втором — связь с производной от поглощения по температуре ($S \sim \partial R/\partial T$).

На рис. 3 приведены измеренные температурные зависимости производных $\partial R/\partial H$ и $\partial R/\partial T$ при $\theta=0$ для полей 20 Э, 2 кЭ и 9 кЭ. Как видно, максимумы $\partial R/\partial H$ и $\partial R/\partial T$ пиков сдвинуты друг от друга по температуре и пик $\partial R/\partial H$ по сравнению с $\partial R/\partial T$ пиком является более широким и имеет более асимметричную форму с явно выраженным низкотемпературным хвостом. Виден также разный характер поведения пиков с ростом внешнего поля H . $\partial R/\partial H$ пик по сравнению с $\partial R/\partial T$ пиком более быстро спадает по амплитуде и более быстро сдвигается в сторону низких температур, так что относительный сдвиг пиков,

равный 0,2±0,3 К при H=20 Э, достигает при H=9 кЭ величины ~1 К. Наблюдается также сильное уширение обоих пиков с ростом поля.

По разному вели себя пики и при изменении угла θ (рис. 4 и 5). В слабых

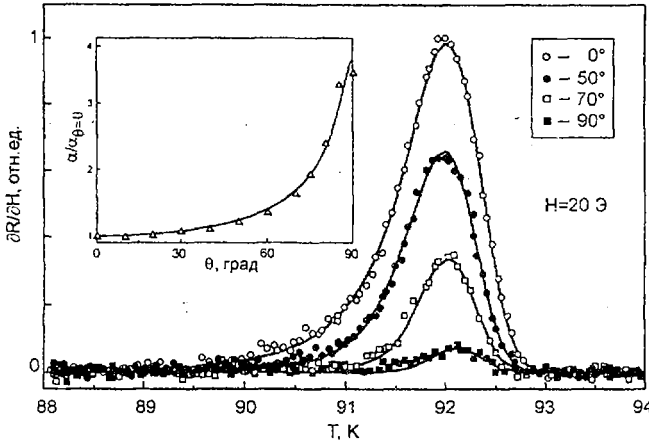


Рис.4. Эволюция температурной зависимости производной $\partial R/\partial H$ при $H=20$ Э с изменением угла θ ; сплошной линией изображены кривые, рассчитанные по формуле (2). На вставке показаны подгоночные значения α при различных углах θ , сплошной линией изображена кривая, рассчитанная по формуле (2).

полях $\partial R/\partial T$ пик с ростом угла θ от 0° до 90° оставался неизменным, тогда как амплитуда $\partial R/\partial H$ пика монотонно уменьшалась и падала примерно в 10 раз при $\theta=90^\circ$. Ширина $\partial R/\partial H$ -пика при этом уменьшалась, а его форма становилась более симметричной. К тому же наблюдался небольшой его сдвиг в сторону высоких температур, достигающий при $\theta=90^\circ$ величины $\sim 0,2$ К. В достаточно сильных же полях наблюдалась обратная картина (рис. 5): с ростом угла θ сильные изменения уже претерпевала амплитуда $\partial R/\partial T$ – пика, тогда как амплитуда $\partial R/\partial H$ -пика лишь незначительно уменьшалась. Общим в поведении обоих пиков при изменении угла θ от 0° до 90° являлось то, что их ширины уменьшались, а максимумы сдвигались в сторону высоких температур, примерно на 1 К для $\partial R/\partial T$ -пика и 2 К для $\partial R/\partial H$ -пика при $H=9$ кЭ.

Обнаруженная значительная разница в поведении $\partial R/\partial H$ - и $\partial R/\partial T$ -пиков, неожиданная с точки зрения низкотемпературных сверхпроводников, может служить дополнительным тестом для теоретических моделей, выдвигаемых для объяснения таких необычных свойств сверхпроводящего перехода в ВТСП, как, например, его «гигантское» уширение в присутствии магнитного поля. Для описания полученных экспериментальных данных мы применили известную модель Тинкхама [1], в которой для объяснения особенностей рези-

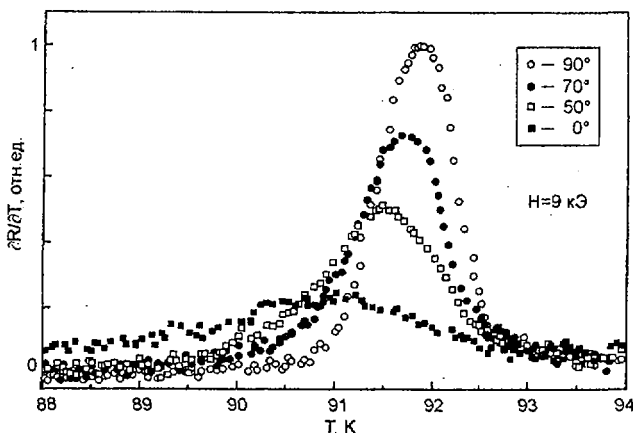


Рис.5. Эволюция температурной зависимости производной $\partial R/\partial T$ при $H=9$ кЭ с изменением угла θ .

стивного перехода в ВТСП используется аналогия с термически активируемым проскальзыванием фазы в джозефсоновском переходе с током.

Сопоставление этой модели с нашими экспериментальными данными выявило только их качественное согласие, но в то же самое время мы обнаружили, что в области слабых полей $H \leq 20$ Э существует возможность хорошего количественного описания всей совокупности данных в случае использования иной, чем в модели Тинкхама, зависимости энергии активации от температуры и поля и учета неоднородности критической температуры T_c в образце (разброса по T_c). В этой предлагаемой нами модели считается, что $R \sim \sqrt{\bar{\rho}}$, где $\bar{\rho}$ - усредненное по T_c удельное сопротивление ρ вида

$$\rho / \rho_n = f(H, T, \theta, T_c) = \begin{cases} I_0^{-2}(\gamma/2) & \text{при } T \leq T_c, \\ 1 & \text{при } T > T_c, \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma = \left[\frac{A_0(1-T/T_c)}{H\sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \Gamma^2}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где ρ_n - удельное сопротивление образца в нормальном состоянии, I_0 - модифицированная функция Бесселя, $A_0 = 2 \cdot 10^5$ Э. Разброс же по T_c учитывается в виде распределения Гаусса со стандартным отклонением, имеющим для исследованных монокристаллов величину $\delta T_c \approx 0,2$ К.

То, что показатель степени для температурной зависимости в (2) равен 1/2, а не 3/2, как в модели Тинкхама, можно объяснить, следуя работе Малоземова и др. [4], тем, что в слабых полях пиннинг абрикосовских вихрей имеет инди-

видуальный характер, тогда как в сильных полях, где обычно используется модель Тинкхама, пиннинг становится коллективным ввиду большой плотности вихрей. В то же время следует отметить, что найденная нами зависимость энергии активации γ от магнитного поля в (2) пока не нашла теоретического объяснения. Что же касается неудовлетворительного количественного описания наших экспериментальных данных в области сильных полей моделью Тинкхама, то причиной этому, по-видимому, является двойниковая структура исследованных нами монокристаллов, на что было указано в работе Шальтьеля и др. [5], вышедшей вслед за нашими публикациями.

Четвертая глава посвящена микроволновому исследованию ВТСП-керамик. В ней даны результаты систематического исследования остаточных магнитных полей в ВТСП-керамике, приобретенных ею в результате различных магнитно-температурных предысторий. Для идентификации этих полей использовался так называемый «низкополевой сигнал» (НПС), вызываемый микроволновым поглощением в контактах между гранулами керамики и регистрируемы на ЭПР-спектрометре методом магнитной модуляции. Вследствие джозефсоновской природы межгранульных контактов указанный сигнал обладает высокой чувствительностью к магнитным полям, в том числе к полю захваченных вихрей. Полученные таким способом данные о зависимости остаточного магнитного поля от предыстории образца позволяют выявить влияние захваченных вихрей (абрикосовского или джозефсоновского типа) на критический ток межгранульных контактов. Тем самым представляется возможность непосредственной проверки формулы Фистуля [2], описывающей влияние абрикосовских вихрей на критический ток джозефсоновского перехода, а также моделей, используемых для объяснения механизма, лежащего в основе НПС.

В качестве образца использовалась ВТСП-керамика Eu-1-2-3 с критической температурой $T_c=90$ К, имеющая вид тонкой пластинки с размерами $2,0 \times 1,0 \times 0,2$ мм³. В эксперименте рассматривались два случая ориентации образца: случай 1, когда плоскость пластинки параллельна внешнему полю H_c и случай 2, когда эта плоскость перпендикулярна внешнему полю. Эксперимент проводился следующим образом. Сначала, в калибровочных целях, был детально изучен спектр НПС по полю при $T=79$ К, полученный после охлаждения образца от $T>T_c$ к данной температуре при нулевом внешнем поле (ZFC-режим). Спектр НПС при амплитуде модуляции $h_m=4$ Э представлен на рис. 6. После этих предварительных измерений основная часть эксперимента сводилась к следующей последовательности действий. При выключенной магнитной модуляции, образец охлаждался при $H_c=0$ от $T=98$ К до 79 К. Затем внешнее поле повышалось до некоторого значения H_A ($5 \text{ Э} \leq H_A \leq 80 \text{ Э}$) с последующим нагревом образца до некоторой температуры T_A ($79 \text{ К} < T_A \leq 93 \text{ К}$). По истечении времени экспозиции ≈ 10 с (это время, как нами было установлено, являлось достаточным для получения устойчивых экспериментальных результатов) образец в обратной последовательности возвращался к $T=79$ К и $H_c=0$ и включалась магнитная модуляция с $h_m=4$ Э для регистрации НПС

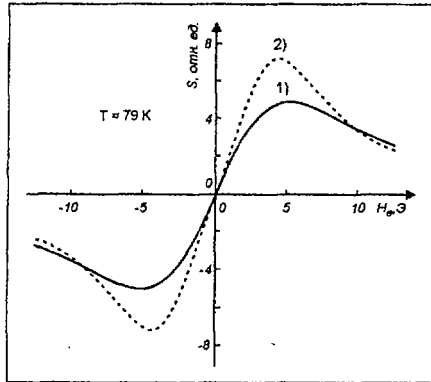


Рис.6. Зависимость НПС от внешнего магнитного поля H_e : 1) плоскость пластинки параллельна полю H_e , 2) плоскость пластинки перпендикулярна полю H_e .

(полученный таким образом сигнал мы будем далее обозначать как S_T -сигнал, чтобы отличить его от собственно НПС, получаемого в ZFC-режиме). Затем модуляция отключалась и образец отогревался до $T=98\text{K}$ для проведения указанной процедуры, но уже с более высоким значением T_A при том же значении H_A . И так далее до достижения $T_A=93\text{K}$, после чего весь измерительный цикл повторялся при новом более высоком значении H_A и т.д. В результате мы получили зависимость S_T -сигнала от H_A и T_A в области значений $5\text{ Э} \leq H_A \leq 80\text{ Э}$ и $79\text{ K} \leq T_A \leq 93\text{ K}$, изменяющихся с шагом $2,5\text{ Э}$ и $0,5\text{ K}$ соответственно. Следует отметить, что проведение большого числа измерений (~ 1000), необходимого для получения столь подробной информации о зависимости $S_T(H_A, T_A)$, оказалось возможным только благодаря применению «быстрой» системы термостабирирования и автоматизации процесса измерений, описанных в главе 2.

На рис. 7 представлены трехмерные картины зависимости $S_T(H_A, T_A)$ для случая 1, когда поле H_A параллельно плоскости пластины, и для случая 2, когда оно перпендикулярно той же плоскости. Обращает на себя внимание сильное отличие этих картин друг от друга. Картина в случае 1 характеризуется треугольным плато, соответствующим нулевому значению сигнала, и резким спадом сигнала на его границе, который затем по приближении T_A к T_c сменяется на небольшой подъем сигнала с образованием неглубокого "желоба" под малым углом к T_c -линии. Особенности же картины в случае 2 в сравнении с обсуждавшейся таковы: в районе прежнего плато уже имеется плавный спад сигнала, начиная с наименьших значений H_A и T_A , очень медленный при малых H_A и T_A и усиливающийся с ростом H_A и T_A ; дальнейшая смена спада сигнала на его подъем происходит при значительно меньших значениях H_A и T_A , так что вместо "желоба" теперь наблюдается глубокое "ущелье", ориентированное под значительно большим углом к T_c -линии. Общим для обеих картин является

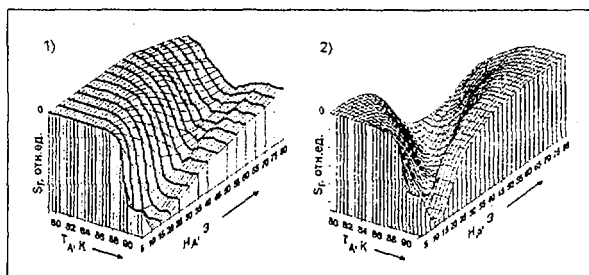


Рис.7. Зависимость S_1 -сигнала от магнитно-температурных предысторий образца.

только постепенный подъем дна "желоба" и "ущелья" с увеличением H_A (уменьшением T_A) и наинизшее предельное значение $H_A \approx 10$ Э, начиная с которого S_1 -сигнал имеет минимум в своей зависимости от T_A .

При интерпретации экспериментальных данных мы исходили из модели Дульчица [3], в которой НПС напрямую связывается с критическим током межгранульных контактов, зависящим от внешнего магнитного поля H_c согласно так называемой «дифракционной формуле» [6]. Мы обобщили эту модель, чтобы учесть влияние на критический ток не только внешнего поля, но и полей, образованных захваченными вихрями как абрикосовского, так и джозефсоновского типа. Заметим, что именно эти дополнительные поля играют определяющую роль в нашем эксперименте, поскольку S_1 -сигнал измеряется при $H_c=0$. В нашем подходе поле захваченных вихрей джозефсоновского типа, действующее в межгранульном пространстве, рассматривается как некоторая добавка к полю H_c , а для учета поля захваченных абрикосовских вихрей применяется формула Фистуля [2], обобщающая «дифракционную формулу» для критического тока на случай присутствия абрикосовских вихрей на берегах джозефсоновского контакта. В результате мы получили зависимость $S_1(\Phi_i^{lr}, \Phi_a^{lr})$, где Φ_i^{lr} и Φ_a^{lr} - потоки магнитных полей через площадь межгранульного контакта, образованные в результате захвата джозефсоновского типа вихрей и абрикосовских вихрей соответственно. Графическое представление этой зависимости дано на рис. 8. Из этого рисунка видно, что, если в керамике присутствуют только вихри джозефсоновского типа, т.е. $\Phi_a^{lr}=0$, то зависимость $S_1(\Phi_i^{lr}, 0)$ соответствует зависимости НПС от поля H_c в случае ZFC-режима. Если же в керамике имеются только абрикосовские вихри, т.е. $\Phi_i^{lr}=0$, то в зависимости $S_1(0, \Phi_a^{lr})$ существует минимум, причем глубина минимума составляет 0,3 от максимальной амплитуды НПС. Последняя ситуация фактически реализуется в случае 1, когда поле экспозиции H_A выставляется вдоль плоскости керамической пластинки. В этом случае распределение вихрей джозефсоновского типа может рассматриваться по модели Бина и нетрудно показать, что применяемое нами при регистрации S_1 -сигнала модуляционное поле должно стирать па-

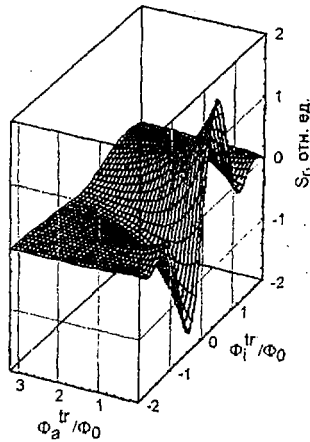


Рис.8 Вычисленная с использованием модели зависимость сигнала S_r от про- низывающих площадь джозефсоновского контакта потоков Φ_l^{tr} и Φ_a^{tr}

мять о захвате вихрей джозефсоновского типа. Для абрикосовских же вихрей этот «эффект потери памяти» не работает, поскольку они при используемых нами малых полях экспозиции $H_A \leq 80$ Э не могут находиться в критическом состоянии. По этой причине S_r -сигнал должен быть равен нулю до тех пор, пока в гранулах не появятся абрикосовские вихри. Именно этим обстоятельством можно объяснить наличие на рис. 7 для случая 1 треугольного плато с $S_r=0$, интерпретируя его границу как линию нижнего критического поля H_{c1} для гранул керамики. Наблюдаемый же на этой границе спад S_r -сигнала к отрицательным значениям и образование «желоба» также коррелируют с поведением S_r -сигнала на рис. 8 в случае наличия только захваченных абрикосовских вихрей (подразумевается, что Φ_a^{tr} растет монотонно с ростом H_A и T_A вне области плато). Количественным подтверждением этого является примерное равенство найденного из эксперимента отношения глубины «желоба», отсчитываемой от нулевого уровня сигнала при $H_A=10$ Э, к максимальной амплитуде НПС и определенного из рис. 8 глубины минимума в зависимости $S_r(0, \Phi_a^{tr})$ к высоте максимума в зависимости $S_r(\Phi_l^{tr}, 0)$ (эти отношения соответственно равны 0,37 и 0,3). Наблюдаемый же на рис. 8а подъем дна «желоба» с ростом H_A можно объяснить тем, что с ростом числа захваченных абрикосовских вихрей возрастает также и поле, являющееся продолжением этих вихрей в межгранульном пространстве. Это поле уже не подвержено «эффекту потери памяти» и поскольку оно в случае 1 имеет положительный знак, то согласно рис. 8 его присутствие должно приводить к уменьшению глубины минимума в зависимости $S_r(0, \Phi_a^{tr})$. И, наконец, предлагаемая модель позволяет проводить количественную оценку силы пиннинга в гранулах керамики, исходя из минимального экс-

периментального значения H_A , при котором в зависимости S_r -сигнала от T_A является минимум.

Отличия же экспериментальной картины, наблюдаемые на рис. 7 для случая 2, могут быть объяснены действующим в этом случае «эффектом размагничивания». Вследствие этого эффекта захваченные вихри джозефсоновского типа уже не стираются модуляционным полем, если $H_A > h_m$, и поэтому плато, наблюдаемое в случае 1, не имеет четкой границы в случае 2 (размытию границы способствует также проявляемый в этом случае диамагнетизм гранул керамики). Кроме того, силовые линии абрикосовских вихрей могут замыкаться в межгранульном пространстве, образуя потоки отрицательного знака. Согласно рис. 8 это должно приводить к углублению минимума S_r -сигнала и его сдвигу в сторону меньших H_A . Это объясняет появление на рис. 7 (случай 2) глубокого «ущелья», а также его сильное расхождение с T_c -линией.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Создана оригинальная система терморегулирования. Специально разработанная для этой цели конструкция термостата позволяет осуществлять модуляцию температуры образца прерыванием луча света, используемого для нагрева образца, с частотой 80 Гц. Измерены и рассчитаны такие ее важнейшие характеристики, как время релаксации, неоднородность температуры в объеме сапфирового теплообменника, амплитуда модуляции температуры в образце и т. д. На базе ЭПР-спектрометра создана автоматизированная установка для исследования нерезонансного микроволнового поглощения в ВТСП, позволяющая проводить:

- измерение пика сверхпроводящего перехода в температурной зависимости сигнала с применением как магнитной, так и температурной модуляций при различных значениях внешнего магнитного поля и ориентациях образца;
- измерение НПС в ВТСП, в том числе сквидовых, в режиме сканирования как поля, так и температуры;
- измерение НПС в зависимости от предыстории образца при изучении явлений захвата магнитного потока, крипа потока и т.п.

2) Впервые при детектировании микроволнового поглощения R в ВТСП-монокристаллах YBCO, наряду с традиционным методом магнитной модуляции, применен метод температурной модуляции. В результате проведенных измерений обнаружено, что пики сверхпроводящего перехода, найденные в температурной зависимости детектированных указанными методами сигналов $\partial R/\partial H$ и $\partial R/\partial T$ (H - внешнее магнитное поле, T - температура), являются сдвинутыми друг относительно друга по температуре и отличаются по форме. Установлен также различный характер поведения этих пиков при изменении как внешнего магнитного поля в области $5 \text{ Э} < H < 10^4 \text{ Э}$, так и ориентации монокристалла по отношению к полю. В итоге, сделан общий вывод о несостоятельности в случае ВТСП какого-либо предположения о подобии $\partial R/\partial H$ и

$\partial R/\partial T$ пиков и указано на существование прямой связи между различием этих пиков и известным эффектом уширения сверхпроводящего перехода в магнитном поле, наблюдаемого в ВТСП.

3) Установлено, что модель Тинкхама, обычно применяемая для объяснения уширения резистивного перехода в ВТСП, находится в качественном согласии с приведенными в диссертации экспериментальными данными. Показано, что в случае слабых полей $H < 20$ Э вся совокупность экспериментальных данных поддается хорошему количественному описанию только при условии применения модели Тинкхама в следующей существенно видоизмененной форме: $R \sim \sqrt{\bar{\rho}}$, где $\bar{\rho}$ - усредненное по T_c удельное сопротивление вида: $\rho = \rho_n$

при $T > T_c$ и $\rho = \rho_n I_0^{-2}(\gamma/2)$ при $T \leq T_c$ с $\gamma = \left[\frac{A_0(1-T/T_c)}{H\sqrt{\cos^2\theta + \sin^2\theta/\Gamma^2}} \right]^{1/2}$ (I_0 -

модифицированная функция Бесселя, $A \approx 2 \cdot 10^5$ Э, $\Gamma \approx 13$). В предложенной модели разброс по T_c учитывается в виде распределения Гаусса.

4) Проведено систематическое исследование остаточных магнитных полей в Eu-123 керамической пластинке, образованных в результате специально подобранных магнитно-температурных предыстории образца. Для этой цели использован высокочувствительный к магнитному полю микроволновой отклик межгранульных джозефсоновских контактов самой исследуемой керамики, так называемый "низкополевой сигнал" (НПС), детектируемый методом магнитной модуляции. Измерена зависимость НПС от предыстории образца в случаях параллельной и перпендикулярной ориентаций керамической пластинки по отношению к полю экспозиции. Обнаружено существенное отличие измеренного в этих двух случаях сигнала в зависимости от температуры и поля экспозиции. Показано, что все особенности экспериментальных данных могут быть объяснены с помощью моделей критических состояний, примененных к захваченным вихрям джозефсоновского типа в указанных двух случаях, и использованием модели Дульчица для НПС, обобщенной для учета предсказанного в работе Фистуля влияния захваченных абрикосовских вихрей на критический ток межгранульных контактов. Указано на возможность применения данных по остаточному магнитному полю для определения нижнего критического поля и качественной оценки силы пиннинга в гранулах керамики. Приведенные результаты показывают высокую эффективность применения методов магнитной и температурной модуляций для микроволнового исследования физических свойств ВТСП и возможность их использования для контроля технологии изготовления этих материалов.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- A1. Алиев М.К., Алимов Г.Р., Муминов Т.М., Олимов Б.А., Соколов Б.Ю., Усманов Р.Р., Холбаев И. *ЭПР-спектроскопия высокотемпературных сверхпроводников с температурной модуляцией*. // ПТЭ. 1996. №5. С.152-156. <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9809372>.
- A2. Алиев М.К., Алимов Г.Р., Муминов А.Т., Олимов Б.А., Усманов Р.Р., Холбаев И. *Установка для микроволнового исследования высокотемпературных сверхпроводников на базе ЭПР-спектрометра*. // Узбекский физический журнал. 2001. 3. №5-6. С.307-312.
- A3. Алиев М.К., Алимов Г.Р., Муминов Т.М., Олимов Б.А., Туркменов Х.И., Холбаев И., Леонюк Л.И., Руми Р.Ф. *Микроволновое исследование сверхпроводящего перехода в ВТСП-монокристалле Y-Ba-Cu-O в слабых магнитных полях*. // Сборник трудов II Республиканской конференции "Успехи физической науки в вузах Узбекистана". 1997. ч.3. С.17-39.
- A4. Алиев М.К., Алимов Г.Р., Муминов Т.М., Олимов Б.А., Туркменов Х.И., Холбаев И., Леонюк Л.И., Руми Р.Ф. *Микроволновое поглощение в монокристалле $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ в области сверхпроводящего перехода*. // ФТТ. 1999. 41. №1. С.14-17. <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9810004>.
- A5. Aliev M.K., Alimov G.R., Muminov T.M., Olimov B.A., Kholbaev I., Leonyuk L.I., Rumi R.F., Turkmenov Kh.I. *Temperature Dependence of Microwave Absorption in Y-Ba-Cu-O Single Crystal near T_c in Low Magnetic Fields*. // Abstracts of The Third International Conference "Modern Problems of Nuclear Physics", - 23-27 August 1999, - Bukhara, - p.351.
- A6. Aliev M.K., Alimov G.R., Leonyuk L.I., Muminov T.M., Olimov B.A., Rumi R.F., Turkmenov Kh.I., and Kholbaev I. *Magnetically and thermally modulated microwave absorption in Y-Ba-Cu-O single crystal near T_c* . // J.Low.Temp.Physics. 1999. 117. No.5/6. P.1105-1109.
- A7. Aliev M.K., Aliev F.K., Alimov G.R., Muminov A.T., Kholbaev I., Turkmenov Kh.I. *Microwave Study of influence of trapped vortices on intergrain weak links in Eu-123 ceramics*. // NATO advanced research workshop on vortex dynamics in high temperature superconductors: Abstracts.- May 17-22, 2002.- Tashkent, 2002. p.4.
- A8. Aliev M.K., Aliev F.K., Alimov G.R., Muminov A.T., Kholbaev I., Turkmenov Kh.I. *Microwave Study of influence of trapped vortices on intergrain weak links in Eu-123 ceramics*. // J.Low.Temp.Physics. 2003. 130. No.3. p.107-116.

5. ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M.Tinkham *Resistive transition of high-temperature superconductors*. //Phys.Rev.Lett. 1988. 61. 14. P.1658-1661.
2. Фистуль М.В. Критический ток джозефсоновских контактов со случайно расположенными вихрями. //Письма в ЖЭТФ. 1989. т.49. вып.2. С.95-98.

3. Dulcic A., Rakvin B., and Pozek M. *Mechanisms of Field Dependent Microwave Absorption in the High- T_c Ceramic Superconductors*. //Europhys.Lett. 1989. **10**. P.593-598.
4. Yeshurun Y., Malozemoff A.P. *Giant flux creep and irreversibility in an Y-Ba-Cu-O crystal: An alternative to the superconducting-glass model*. //Phys.Rev.Lett. 1988. **60**. 21. P.2202-2205.
5. Shaltiel D., Bezalel M., Golosovsky M., Kwok W.K., Fendrich J.A. *Induced microwave absorption by magnetic modulation in untwinned and twinned YBaCuO crystals and its comparison with resistivity measurements*. //Physica C. 1999. **315**. P.23-35.
6. Barone A. and Paterno G. *Physics and Applications of the Josephson Effect* - New York: Wiley. 1982.- 639p.

РЕЗЮМЕ

диссертации Алимова Г.Р. на тему: «МАГНИТО-, ТЕРМО- МОДУЛИРОВАННОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07. – физика твердого тела

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, сверхпроводящий переход, СВЧ-поглощение, магнитная модуляция, температурная модуляция, джозефсоновский контакт, абрикосовские вихри, захваченное магнитное поле.

Объектом исследования являлось магнито-, термо-модулированное микроволновое поглощение в высокотемпературных сверхпроводящих Y-Ba-Cu-O-монокристаллах и Eu-Ba-Cu-O-керамике.

Целью работы являлось выяснение механизма индуцированного магнитным полем уширения сверхпроводящего перехода в ВТСП-монокристаллах и выявление влияния абрикосовских вихрей на критический ток ВТСП-керамик.

Метод исследования. Впервые, применительно к микроволновым исследованиям, разработан и применен, наряду с традиционным методом магнитной модуляции, метод температурной модуляции.

Полученные результаты и их новизна. Обнаружено, что пик сверхпроводящего перехода в температурной зависимости производной по температуре от поглощения ($\partial R/\partial T$) отличается по форме и положению от аналогичного пика в зависимости производной по магнитному полю от поглощения ($\partial R/\partial H$). Выяснено, что указанные пики ведут себя неодинаковым образом с ростом внешнего магнитного поля и при изменении угла между с-осью монокристалла и направлением этого поля. Показано, что поведение пиков в слабых полях и их угловые зависимости могут быть хорошо описаны моделью Тинкхама, но лишь при условии ее, определенного видоизменения. Показана возможность использования "низкополевого сигнала" для исследования вихревой структуры остаточного поля в 1-2-3 - керамиках и дано прямое экспериментальное подтверждение формулы Фистуля, описывающей зависимость критического тока межгранульных джозефсоновских контактов от концентрации абрикосовских вихрей на их берегах.

Практическая значимость. Указано на возможность применения данных по остаточному магнитному полю для определения нижнего критического поля и качественной оценки силы пиннинга в гранулах керамики.

Область применения. Экспериментальная и теоретическая физика высокотемпературных сверхпроводников. Предложенные микроволновые методы, являясь высокочувствительными и бесконтактными, могут быть применены для контроля технологии изготовления ВТСП-материалов.

Физика-математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор
Г.Р. Алимовнинг 01.04.07 – қаттиқ жисмлар физикаси ихтисослиги бўйича
«МАГНИТ ВА ТЕРМОМОДУЛЯЦИЯЛАШТИРИЛГАН ЮҚОРИ
ТЕМПЕРАТУРАЛИ ЎТАЎТКАЗГИЧЛАРДА МИКРОТЎЛҚИНЛАРНИНГ
ЮТИЛИШИ»

мавзусидаги диссертациясининг
ҚИСҚАЧА МАЗМУНИ

Калитли сўзлар: юқоритемпературали ўтаўтказувчанлик (ЮТЎЎ), ўтаўтказувчанлик ўтиши, ўтаюқори частотали ютилиш, магнит модуляция, температурали модуляция, жозефсон контакти, абрикосов уюрмалари, ютилган магнит майдони.

Тадқиқот объектлари: Юқоритемпературали ўтаўтказувчан Y-Ba-Cu-O монокристалларида ва Eu-Ba-Cu-O керамикасида магнит ва термомодуляциялашган микротўлқинларнинг ютилиши ўрганилди.

Ишнинг мақсади: ЮТЎЎ монокристалларида ўтаўтказувчанлик ўтишининг индукцияланган магнит майдони таъсирида кенгайиш механизмини ва абрикосов уюрмаларининг ЮТЎЎ керамикалари критик токига таъсирини тажрибада текшириш.

Тадқиқот методи: Биринчи марта, микротўлқинли изланишларда ананавий магнит модуляция методига қўшимча температурали модуляция методи қўлланилди.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: Микротўлқинлар ютилишининг температурадан олинган ҳосиласининг ($\partial R/\partial T$) температурага боғлиқ спектрида ўтаўтказувчанлик ўтиши пикининг ўрни ва шакли, микротўлқинлар ютилишининг магнит майдонидан олинган ҳосиласининг ($\partial R/\partial H$) бу майдонга боғлиқ спектридаги ўрни ва шаклидан фарқ қилиши аниқланди. Бу пикларнинг кўриниши ташқи майдон қиймати ўсиши ва майдон йўналиши билан монокристаллнинг с-ўқи орасидаги бурчак ўзгариши билан турлича ўзгариши кузатилди. Бу ўзгаришларни Тинкхам моделига айрим тузатишлар киритиш билан тўла изоҳлаш мумкинлиги кўрсатилди. 1-2-3 таркибли керамикаларда қолдик майдон уюрмали структурасини ўрганиш учун «қуйи майдон сигналларидан» фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилди ва гранулалараро жозефсон контактлари критик токнинг абрикосов уюрмалари концентрациясига боғлиқлигини ифодаловчи Фистул формуласининг бевосита тажрибавий исботи топилди.

Амалий аҳамияти. Керамикаларда қолдик майдон қийматига қараб, уларнинг қуйи критик майдон қийматини аниқлаш ва керамика гранулаларида пиннинг кучини сифатий баҳолаш мумкинлиги кўрсатилди.

Қўлланиш соҳаси. Юқори температурали ўтаўтказувчан моддаларни экспериментал ва назарий тадқиқ қилишда. Тақлиф қилинган микротўлқинлар методи, ўта сезгир ва контактсиз бўлганлиги сабабли, ЮТЎЎ материалларни яратиш технологиясида назорат усули тарзида қўлланиши мумкин.

RESUME

Thesis of G.R. Alimov

on the academic degree competition of the candidate of physics and mathematics science, speciality 01.04.07. – solid state physics subject: “MAGNETICALLY AND THERMALLY MODULATED MICROWAVE ABSORPTION IN HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS”

Key words: high temperature superconductivity, superconducting transition, microwave absorption, magnetic-field modulation, temperature modulation, Josephson junction, Abrikosov vortices, remanent field.

Subjects of the inquiry: The microwave absorption, R , in the $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals was studied near superconducting transition temperature, $T_c \approx 92$ K, and in the external magnetic field of $0 < H \leq 9$ kOe.

Aim of the inquiry: Clarification of the mechanism of HTS superconducting transition broadening induced by magnetic field with a study of magnetically and thermally modulated microwave absorption in Y-Ba-Cu-O single crystals near their critical temperatures and an experimental examination of the Fistul theory and models describing influence of Abrikosov vortices on critical current of the Josephson junction and a nature of microwave responses in HTS-ceramics, correspondingly, was the aim of the inquiry.

Method of the inquiry: For the first time temperature modulation method has been developed and used for microwave investigations along with conventional magnetic field modulation one.

The results achieved and their novelty: Temperature dependencies of the temperature derivative of absorption ($\partial R/\partial T$) and magnetic field one ($\partial R/\partial H$) were observed to have superconducting transition peaks differently shaped and shifted one with respect to another. It was found out that the peaks responded differently when external magnetic field and angle between single crystal c axis and magnetic field direction were changing. It was shown that the behaviors of weak field peaks and their angle dependences could be well described by the Tinkham model only if it was certainly modified. It was shown that the “low-field signal” could be used for studying the vortice structure of the remanent field in 1-2-3-ceramics. Fistul formula describing critical current of intergrain Josephson junctions in dependence on concentrations of Abrikosov vortices on their sides was directly confirmed by the experimental data.

Practical value: It is pointed that the data obtained at remanent magnetic fields can be used to determine the low critical field in the grains of ceramics and to estimate the pinning force in these grains.

Sphere of usage: Experimental and theoretical physics of high temperature superconductivity. The suggested microwave methods being high sensitive and contactless can be used for controlling production technology of HTS materials.

Chop etishga 2003y. 27.11.da ruxsat berildi

Nashriyot-hisob tabog'i – 1,4

Adadi 100 nusxa

Buyurtma № 405

Ўzbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro Fizikasi Instituti bosmaxonasida
"Rizograf" nusxa k paitirish qurilmacida chop etildi.

702132, Toshkent, Mirzo-Ulug'bek tumani, Ulug'bek shaharchasi