



*На правах рукописи*

**Рабаданова Аида Энверовна**

**СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ С ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИЕЙ РЕШЕТКИ УВСО ПРИ ПЕРЕХОДЕ В  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ**

Специальность: 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук.

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дагестанский государственный университет».

**Научный руководитель:** **Палчаев Даир Каирович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, и.о. заведующего кафедрой  
физики конденсированного состояния и  
наносистем ФГБОУ ВО «Дагестанский  
государственный университет»

**Официальные оппоненты:** **Кульбачинский Владимир Анатольевич,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики низких  
температур физического факультета МГУ  
имени М.В. Ломоносова (г. Москва)

**Каменцев Константин Евгеньевич,**  
кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией новых функциональных  
материалов ФГБОУ ВО «МИРЭА –  
Российский технологический университет»  
(г. Москва)

**Ведущая организация:** Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ» (г. Москва)

Защита состоится « 4 » октября 2024 года в 15<sup>00</sup> час. на заседании диссертационного совета 24.2.308.01 при ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» и на сайте <http://diser.kbsu.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

**А.А. Дышеков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе сложных оксидов, в том числе соединение  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO), на основе сложных оксидов, получили широкое применение на практике. Они перспективны в электроэнергетике (сверхпроводники 2-го поколения) [1] и электронике, при создании мемристоров [2] и квантовых компьютеров [3]. Знание природы формирования высокой проводимости и сверхпроводимости этих материалов существенно повысило бы эффективность наделения их востребованными на практике характеристиками. Отсутствие данных знаний до сих пор остается одной из важнейших проблем [4, 5] физики конденсированного состояния. Нет каких-либо ясных представлений не только о природе ВТСП, но и явлениях псевдощели и «странного металла» (неметаллического поведения температурной зависимости), проявляемых ВТСП в нормальной фазе. В связи с чем, актуальны исследования корреляций свойств ВТСП, установленных на основе экспериментальных данных. В этих системах, в отличие от металлических проводников, имеет смысл говорить только о некоторых локальных зарядовых возбуждениях с незначительной степенью их обобществления, поскольку они обладают проводимостью на уровне выше интерметаллидов. Для ВТСП, в отличие от низкотемпературных сверхпроводников, характерна сравнительно высокая рыхлость упаковки, обусловленная значительным вкладом направленной и насыщенной ковалентной связи. Основной проблемой теории, связанной с невозможностью количественного описания фононного электросопротивления даже классических металлов, является [6] отсутствие знаний о деформационном потенциале решетки атомов. Согласно [6] непосредственное отношение к формированию термического деформационного потенциала имеет ангармонизм, что приводит к расширению (или сжатию) решетки. Заметим, что переход YBCO из диэлектрического состояния в сверхпроводящее с

критической температурой ( $T_c$ )  $\sim 92\text{K}$ , происходит при повышении в нем содержания лабильного кислорода. При постоянных значениях температуры и давления ( $\sim 5\text{K}$  и  $\sim 1$  атм.) абсолютная объемная деформация (сжатие) решетки YBCO, при изменении содержания кислорода ( $\delta \leq 1$ ), составляет всего  $\sim 1.6\%$ . Эта деформация согласно [7] сопровождается повышением уровня допирования YBCO зарядовыми возбуждениями, обеспечивающими высокую проводимость и сверхпроводимость. Исследования оптимально допированного YBCO [8] непосредственно в области  $T_c$  (при атмосферном давлении в отсутствие магнитного поля) показали, что на температурных зависимостях параметра  $c$  и объема наблюдается «разрыв» с положительной стрикцией  $\sim 3\%$ . Такое аномальное поведение параметров решетки при  $T_c$ , как правило, характерно (п.1.4) всем ВТСП. Незначительный эффект изменения объема не рассматривается при интерпретации перехода в сверхпроводящее состояние, хотя разность коэффициентов теплового расширения параметров решетки  $a$  и  $b$  при  $T_c$ , демонстрирующая критическое поведение, обсуждается в работе [9]. Факт перехода YBCO из состояния диэлектрика в состояние сверхпроводника при объемной деформации решетки всего на  $\sim 1.6\%$  указывает на актуальность исследования роли изменения объема при переходе в сверхпроводящее состояние. В связи с чем, настоящая работа направлена на решение задачи по установлению связи температурных зависимостей электросопротивления и параметров решетки YBCO в области перехода в сверхпроводящее состояние и в нормальной фазе. Данная работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния и наносистем ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» при поддержке государственного задания (проект № FZNZ-2020-0002) и гранта РФФИ 20-32-90170 (Аспиранты).

### **Цель работы**

Исследование температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения многофазных керамических и монокристаллических

образцов YBCO в нормальном состоянии и при переходе в сверхпроводящее состояние, а также анализ связи между этими параметрами, и установление наличия стрикции объема для фаз с различной кислородной стехиометрией.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Анализ литературных данных по температурным зависимостям электросопротивления и теплового расширения проводников.
2. Изготовление керамических и монокристаллических образцов YBCO с различным содержанием кислорода для исследования электросопротивления и теплового расширения.
3. Исследования температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения в керамических и монокристаллических образцах в нормальном состоянии и при переходе в сверхпроводящее состояние.
4. Исследование связи температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения образцов и установление наличия стрикции объема для каждой из фаз.

### **Объекты исследования**

Микрористаллические и монокристаллические образцы YBCO с широким интервалом сверхпроводящего перехода.

### **Новизна работы**

На основе экспериментальных данных, полученных на одних и тех же (микрористаллических и монокристаллических) образцах YBCO, содержащих несколько сверхпроводящих фаз, установлена корреляция температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения при переходе в сверхпроводящее состояние, а также и в нормальном состоянии.

Для образцов YBCO с широким интервалом перехода в сверхпроводящее состояние, показано, что при переходе температурные

коэффициенты электросопротивления и теплового расширения в  $T_c$  для каждой сверхпроводящей фазы аномально отклоняются от их нулевых значений. При этом отклонение температурного коэффициента теплового расширения происходит с изменением знака.

К наиболее оригинальным и существенным результатам экспериментальных исследований, выполненных в работе, относятся:

1. установлено, что для образцов, содержащих несколько сверхпроводящих фаз различной стехиометрии, при переходе в сверхпроводящее состояние до  $T_c$  наблюдается сжатие, затем положительный скачок объема для каждой фазы;

2. для многофазных образцов YBCO установлено наличие линейной корреляции между температурными коэффициентами электросопротивления и теплового расширения в нормальном состоянии.

### **Практическая значимость**

Экспериментальные данные, полученные в работе, могут служить основой для создания расширенной базы данных по температурным коэффициентам электросопротивления и теплового расширения. Они могут быть использованы для развития теории проводимости, а также при прогнозировании и создании сверхпроводящих материалов с заданными характеристиками, в том числе со значениями  $T_c$ , выше достигнутых на настоящее время.

Наличие корреляции электросопротивления с тепловым расширением параметров решетки обеспечивает возможность количественной оценки электрических свойств по данным термической деформации и, наоборот, по изменению электрических свойств судить об изменениях межатомных расстояний.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В монокристаллических и микрокристаллических образцах YBCO, содержащих фазы с различным уровнем допирования и шириной сверхпроводящего перехода, функция, описывающая температурную зависимость параметров решетки, в области  $T_c$  терпит «разрыв» для каждой фазы, как и для оптимально допированной фазы орто-I, с критической температурой  $\sim 92$  К.

2. Начало сверхпроводящего перехода, определяемое по температурной зависимости электросопротивления, для каждой сверхпроводящей фазы сопровождается сжатием решетки, после которого происходит рост объема в области срединных значений  $T_c$  этих фаз. В нормальном состоянии для этих образцов обнаруживается линейная корреляция температурных коэффициентов электросопротивления и объемного теплового расширения, с коэффициентом корреляции не ниже  $\sim 0.98$ .

3. На интервале перехода в сверхпроводящее состояние отклонения коэффициентов объемного расширения от своих нулевых значений (для каждой из сверхпроводящих фаз) в отличие от производной электросопротивления по температуре, происходят с изменением знака. Отклонения находятся в пределах аномалии, обычно, наблюдаемой для YBCO с одной оптимально допированной сверхпроводящей фазой. Изменение объема в области  $T_c$  для этих фаз на порядок меньше, чем для однофазного образца.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов**

Достоверность полученных результатов определяется тем, что температурные зависимости теплоемкости, электросопротивления, теплового расширения параметров решетки исследованы для одних и тех же образцов на высокотехнологичных измерительных установках, реализующих хорошо

апробированные методы. Для всех свойств, исследованных в различных лабораториях, температуры перехода в сверхпроводящее состояние и аномалий, наблюдаемых в нормальном состоянии, согласуются в пределах погрешности их определения. Этим обоснованы установленные корреляции температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения, которые воспроизводятся для всех исследованных образцов. Полученные в работе результаты согласуются с признанными теоретическими положениями и экспериментальными данными других авторов.

### **Соответствие диссертации Паспорту научной специальности**

Отраженные в диссертационной работе научные положения соответствуют пунктам 1 и 3 Паспорта специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» для физико-математических наук:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

3. Теоретическое и экспериментальное изучение свойств конденсированных веществ в экстремальном состоянии (сильное сжатие, ударные воздействия, сильные магнитные поля, изменение гравитационных полей, низкие и высокие температуры), фазовых переходов в них и их фазовых диаграмм состояния.

### **Апробация основных результатов**

Результаты работы были представлены на следующих форумах (*международных и российских*): Международная конференция ФКС-2021 «Физика конденсированных состояний», г. Черноголовка, 2021 г.; Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» – ЛаПлаз, г. Москва (2018, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.);



Международный междисциплинарный симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-22, г. Ростов-на-Дону, 2019 г; XIII Школа-конференция молодых ученых — «КоМУ-2021», г. Ижевск, 2021 г.; XII Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2022), г. Махачкала, 2022 г.; XVI Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16), г. Махачкала, 2023 г.

### **Личный вклад автора**

Формулировка цели и задач, защищаемых положений, новизны, практической значимости проведены автором совместно с научным руководителем. Экспериментальные данные по температурным зависимостям параметров решетки были получены в ИФТТ РАН на основании договора, в рамках гранта РФФИ № 20-32-90170. Теплоемкость исследована в ИФ ДФИЦ РАН. Автору в публикациях принадлежат основные результаты, вошедшие в защищаемые положения и выводы.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 работ в журналах из перечня ВАК, из них в базах Web of Science и Scopus (4), ИОУ-ХАУ (1).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, выводов, содержит 73 рисунка, 3 таблицы. Список используемой литературы включает 115 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объекты исследований, показана научная новизна, практическая значимость и

достоверность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** представлены экспериментальные факты о значимости изменения объема в формировании температурных зависимостей электросопротивления металлических проводников. Эти сведения были необходимы для пояснения указанных выше проблем при интерпретации температурных зависимостей электросопротивления проводников. Наряду с этим, приводятся литературные экспериментальные данные, свидетельствующие о разрыве в  $T_c$  температурной зависимости объема ВТСП, в том числе для YBCO.

**В главе 2** приведены обсуждаемые в литературе возможные процессы повышения уровня допирования YBCO при увеличении содержания кислорода, основанные на факте смещения (деформации решетки) соответствующих ионов в элементарной ячейке. Принято считать, что такая деформация обеспечивает детальное зарядовое равновесие в ней и наделяет ее элементарными зарядовыми возбуждениями. В настоящей работе предложено дополнение к этому сценарию, исходя из представлений [10] о конденсированной среде, как о системе поляризованных взаимодействующих атомов (ионов). Элементарные зарядовые возбуждения в таких системах зависят от термической деформации, а также деформации, связанной с изменением содержания кислорода, которые могут изменить не только силу взаимодействия, но и направление этого взаимодействия. Очевидно, что такие возбуждения, сопровождаемые изменением расщепления разрешённых уровней энергии элементарных зарядовых возбуждений, обеспечивают диэлектрическую экранировку. Изменение величины расщепления и связанное с этим изменение концентрации и степени обобществления элементарных зарядовых возбуждений, отражают особенности температурных зависимостей этих свойств. Для сильно коррелированных электронных систем, к которым относятся и ВТСП, такие представления могут быть обоснованы путем анализа связи между температурными зависимостями

электросопротивления и термической деформации, исследованными на одних и тех же образцах. При этом необходимо знание этой связи в достаточно широком интервале температур, чтобы проследить критическое поведение свойств не только при переходе, но выше и ниже перехода.

**В главе 3** приведены технологии получения керамических и монокристаллических образцов YBCO с различной шириной области сверхпроводящего перехода, методики исследования температурных зависимостей параметров решетки методом дифракционного анализа и температурных зависимостей электросопротивления 4-х зондовым методом с коммутацией постоянного тока. Исследования свойств проводились на одних и тех же четырех образцах: трех микрокристаллических (YBCO-2, YBCO-3, YBCO-4) и одном монокристаллическом (YBCO-M), содержащих (преимущественно) фазы с различными значениями  $T_c$  от ~82К до ~90.5К. Микрокристаллические порошки YBCO-1 с оптимальным содержанием кислорода использовались для отработки технологии и насыщения кислородом монокристаллического образца при температуре 500°C в течение 10 часов.

**В главе 4** представлены результаты исследований температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения многофазных образцов YBCO от комнатных температур до  $T_{c,он}$  и на интервале температур, полного перехода в сверхпроводящее состояние.

На рисунке 1 приведены температурные зависимости электросопротивления  $\rho(T)$  образцов YBCO-2 и YBCO-3. На вставках показаны  $\rho(T)$  при переходе в сверхпроводящее состояние и их производные  $d\rho/dT$  в этой области. На температурной зависимости электросопротивления YBCO-2, в отличие от YBCO-3, в нормальном состоянии при ~160 К наблюдается переход в псевдощелевое состояние. На ширине перехода в сверхпроводящее состояние (~7 К и ~4 К, соответственно) (вставки на рис. 1), проявляются преимущественно по две сверхпроводящие фазы.

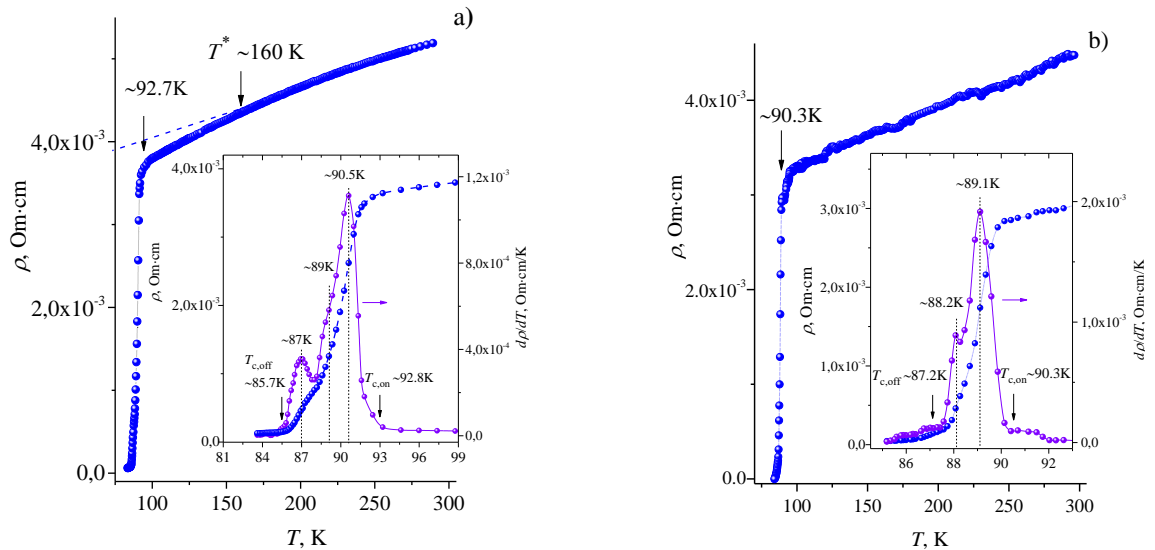


Рис. 1. Температурные зависимости электросопротивления микрокристаллических образцов YBCO-2 – а) и YBCO-3– б). На вставках зависимости  $\rho(T)$  и  $d\rho/dT$  от температуры в области сверхпроводящего перехода

На рисунке 2 приведены температурные зависимости электросопротивления микрокристаллического YBCO-4 и монокристаллического образца YBCO-M.

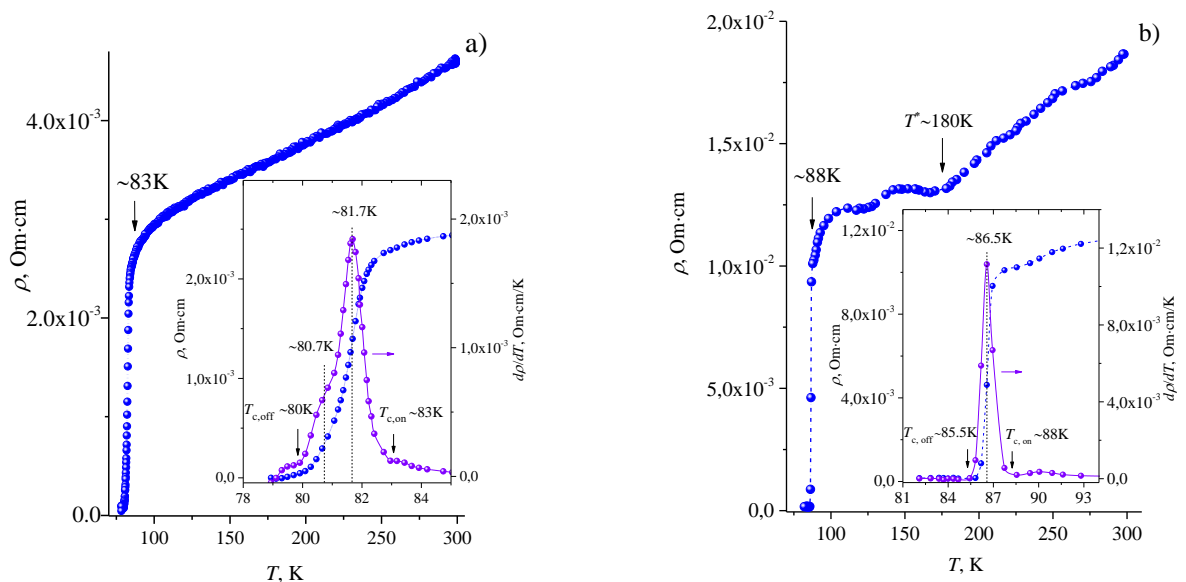


Рис. 2. Температурные зависимости электросопротивления образцов YBCO-4 – а) и YBCO- M – б). На вставках зависимости  $\rho(T)$  и  $d\rho/dT$  от температуры в области сверхпроводящего перехода

В нормальном состоянии на температурной зависимости электросопротивления YBCO-M, в отличие от YBCO-4, наблюдается явный

переход в псевдощелевое состояние при  $\sim 180$  К, что обычно характерно для монокристаллов YBCO. На ширине сверхпроводящего перехода ( $\sim 3$  К и  $\sim 2.5$  К, соответственно), оцененной по температурным зависимостям  $d\rho/dT$ , проявляется преимущественно по одной сверхпроводящей фазе.

На рисунке 3 приведены фрагменты температурных зависимостей дифрактограмм микрокристаллических образцов YBCO-2, YBCO-3 и YBCO-4 в интервалах: от  $\sim 300$ К до  $\sim 82$  К, от  $\sim 94$  К до  $\sim 85$  К и от  $\sim 84$  К до  $\sim 80$  К соответственно.

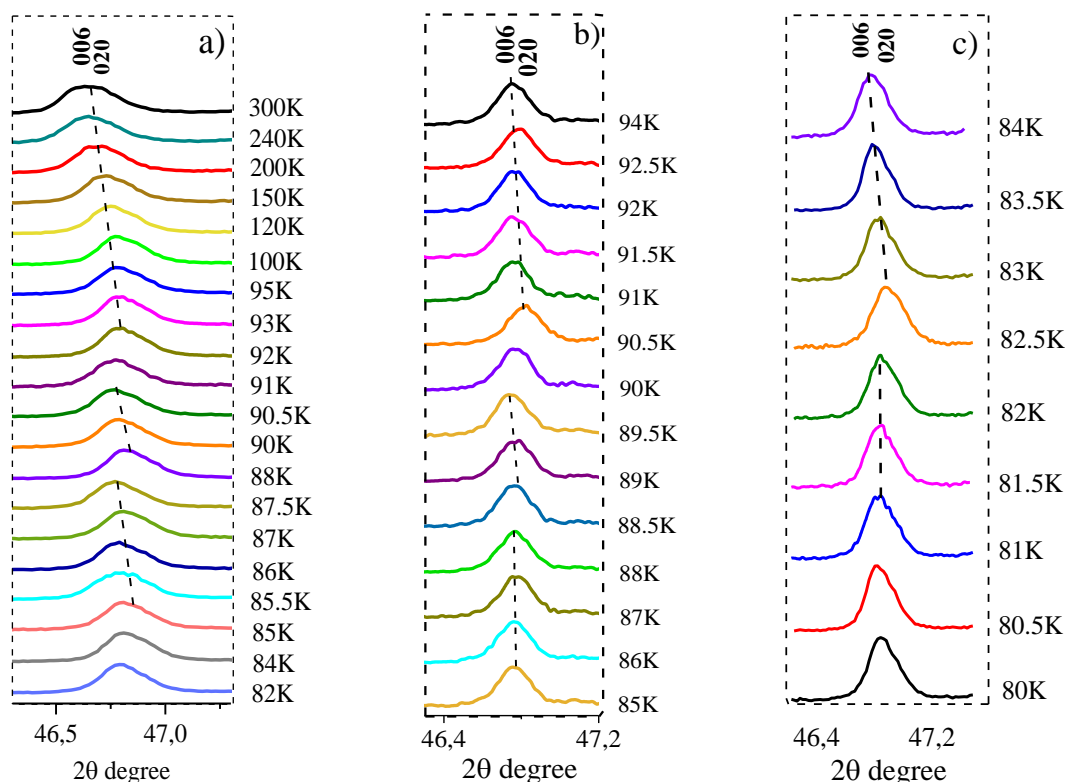


Рис. 3. Эффект смещения соответствующих рефлексов на рентгенограммах микрокристаллических образцов: YBCO-2 – а), YBCO-3 – б) и YBCO-4 – в)

У образца YBCO-2 (рис.3а) на интервале от комнатной температуры до 92 К (в нормальном состоянии) максимумы пиков (006) и (020) смещаются в сторону больших углов, т.е. в направлении  $c$  решетка сжимается. На интервале от начала сверхпроводящего перехода ( $\sim 92$  К) до середины температуры перехода ( $T_c \approx 90.5$ К) этой фазы, пики (006) и (020) резко смещаются в сторону меньших углов, т.е. происходит положительная стрикция параметра  $c$ . В

области второго экстремума ( $T_c \sim 87$  К на рис.1 а) этот эффект повторяется. Аналогичные изменения положения пиков на дифрактограммах (рис.3 б и с) при сверхпроводящих переходах наблюдаются для фаз, содержащихся в образцах YBCO-3 и YBCO-4.

На рисунке 4а приведены температурные зависимости коэффициентов теплового расширения (КТР) параметров решетки для YBCO-2. Аномальные отклонения КТР параметров решетки от нулевых значений (рис. 4 а) с изменением знака (от отрицательного к положительному) происходят при тех же температурах, где производные электросопротивления по температуре выходят на экстремум – 90.5К и 87К. Они соответствуют срединным значениям  $T_c$  на интервале перехода для доминирующих сверхпроводящих фаз в образце.

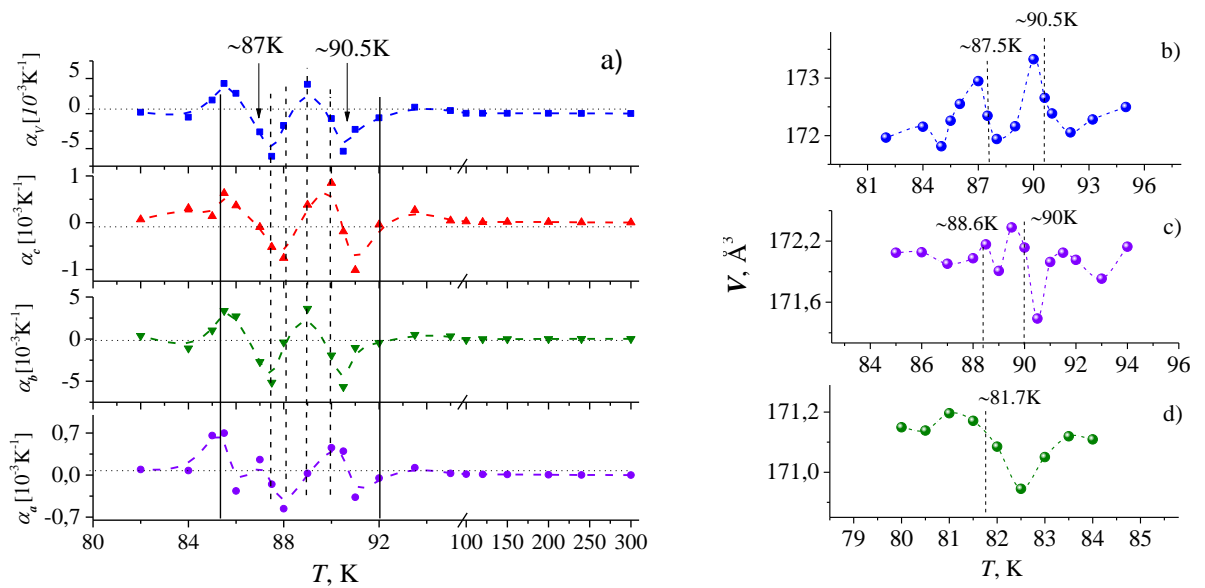


Рис. 4. Температурные зависимости КТР параметров решетки YBCO-2 – а) и объема образцов YBCO-2 – б), YBCO-3 – с) и YBCO-4 – д)

Отклонения температурных зависимостей  $d\rho/dT$  (рис. 1а) и КТР от своих плавных зависимостей на интервалах  $92\text{K} \rightarrow 90.5\text{K} \rightarrow 89\text{K}-88\text{K} \rightarrow 87.5\text{K}-87\text{K} \rightarrow 85\text{K}$  на порядки больше, чем в нормальной фазе. Аналогичные аномалии КТР параметров решетки и  $d\rho/dT$  при одних и тех же температурах наблюдаются и для образцов YBCO-3 и YBCO-4. На рисунках 4 б, с, д приведены температурные зависимости объема YBCO-2, YBCO-3 и YBCO-4.

Пунктирными линиями указаны срединные значения  $T_c$ , определенные по температурным зависимостям  $d\rho/dT$ , на которые приходится стрижка объема для всех образцов.

На рисунках 5 а и в приведены температурные зависимости  $\alpha_V$  до и после (вставка) псевдощелевого состояния, а также температурная зависимость проводимости ( $\sigma$ ) в нормальном состоянии. Видно, что ниже 130К проводимость возрастает ввиду наступления псевдощелевого состояния. Это свидетельствует о повышении элементарных зарядовых возбуждений в этом состоянии. На рисунке 5 а изменение значения  $\alpha_V$  до сверхпроводящего перехода примерно на два порядка меньше, чем отклонения  $\alpha_V$  в области перехода (рис. 4 а) для сверхпроводящих фаз.

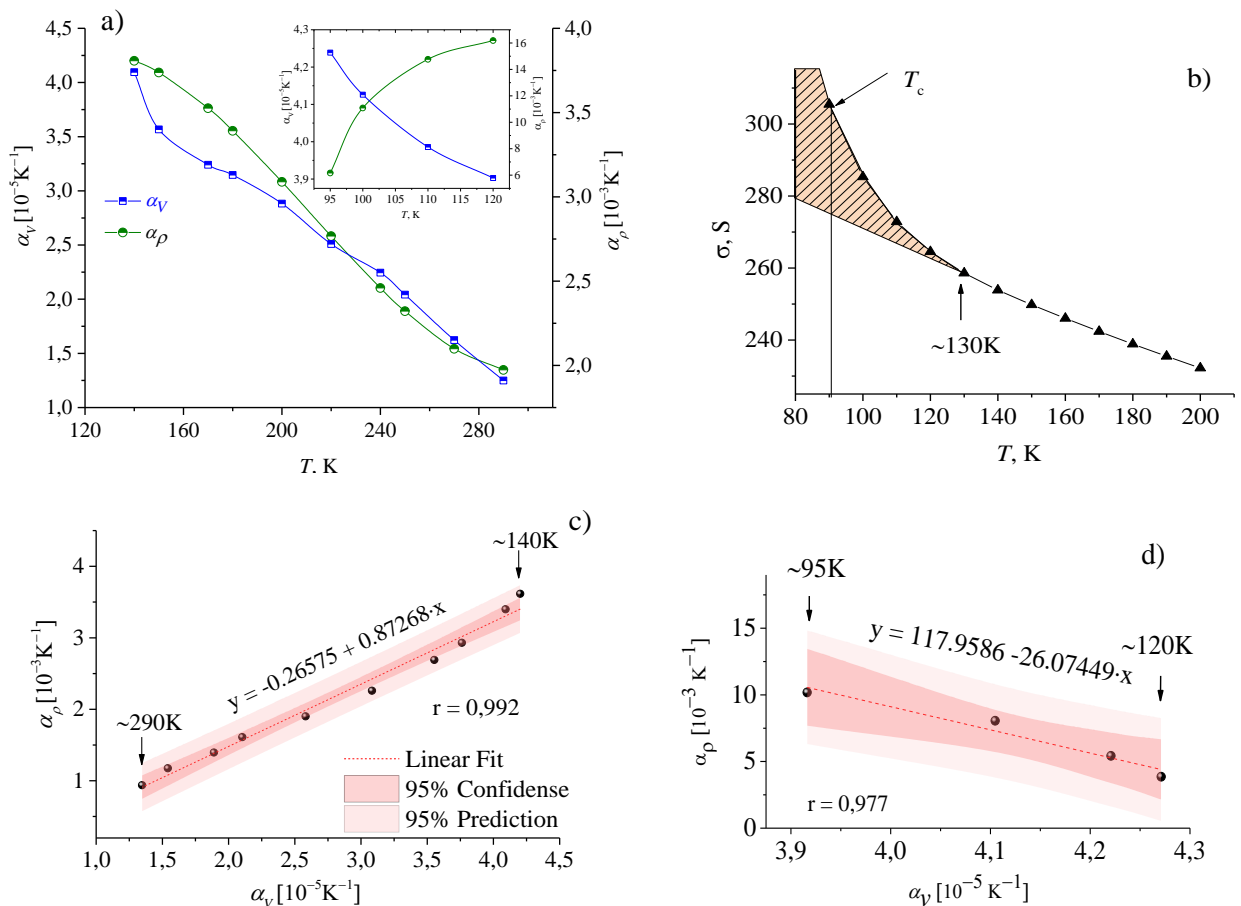


Рис. 5. Зависимости температурных коэффициентов теплового расширения  $\alpha_V$  и электросопротивления  $\alpha_\rho$  – а), электропроводности  $\sigma$  – б) от температуры, корреляции  $\alpha_V$  и  $\alpha_\rho$  в нормальном состоянии – с) и псевдощелевом состоянии – д) для образца YBCO-2

Результаты корреляционного анализа температурных зависимостей коэффициентов объемного теплового расширения  $\alpha_V$  и электросопротивления  $\alpha_p$  для образца YBCO-2 в нормальном состоянии представлены на рисунках 5 с и d. Корреляция  $\alpha_p(T)$  и  $\alpha_V(T)$  в нормальном состоянии прямая до псевдощелевого состояния (рис. 5 а и с), а после перехода в это состояние – обратная (рис. 5 d и вставка на рис. 5 а) с коэффициентами корреляции, близкими к единице ( $\sim 0.99$  и  $\sim 0.98$  соответственно).

На рисунке 6 приведены данные по температурным зависимостям параметров решетки монокристаллического образца YBCO-M в нормальном состоянии. От комнатных температур до 180K характер температурной зависимости электросопротивления металлический (рис. 2b). Ниже 180K (псевдощелевое состояние) наблюдается сжатие решетки в направлениях **b**, **c** и объема. Температурные зависимости объема (рис. 6) и электросопротивления (рис. 2 b) для этого образца подобны.

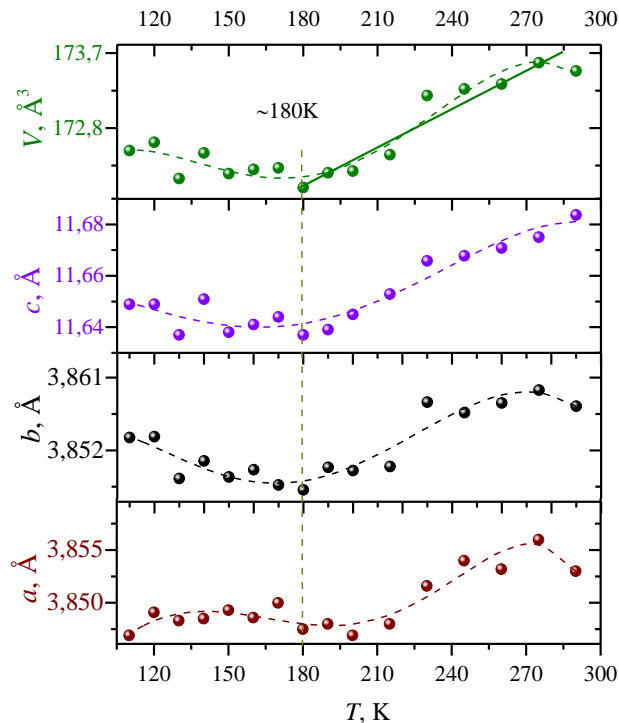


Рис. 6. Температурные зависимости параметров решетки в нормальном состоянии для монокристаллического образца YBCO-M



Результаты корреляционного анализа зависимостей  $\alpha_p(T)$  и  $\alpha_v(T)$  приведены на рисунке 7b. Деление этих зависимостей на три участка было необходимо ввиду изменения характера их производной (рис. 7a) при двух температурах (130K и 230K). Согласно проведенному анализу, корреляция на всех участках прямая от комнатной температуры до 180K и ниже (в псевдощелевом состоянии) с коэффициентами корреляции  $\sim 0.99$ .

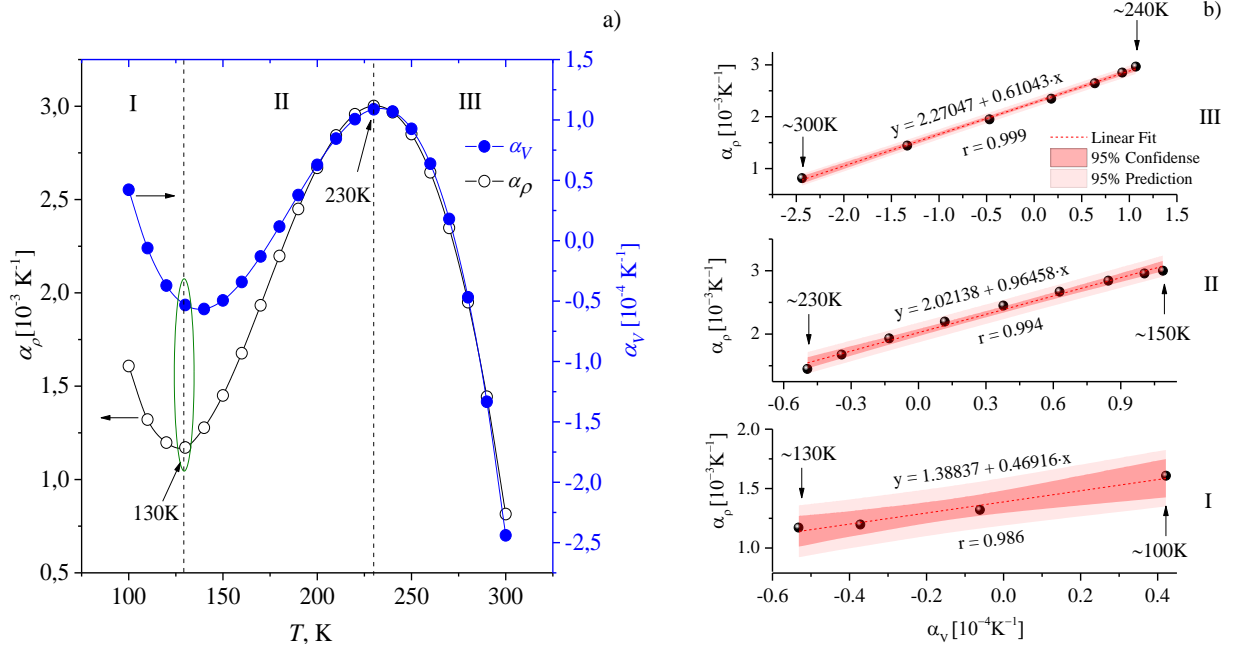


Рис. 7. Температурные зависимости  $\alpha_p$  и  $\alpha_v$  для монокристаллического образца YBCO-M в нормальной фазе

На рисунках 8 и 9 представлены результаты исследования связи температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения микрокристаллических и монокристаллических образцов на соответствующих интервалах перехода в сверхпроводящее состояние. Во всех образцах аномальное поведение этих зависимостей в  $T_c$  (в нулевом магнитном поле) характерно каждой доминирующей сверхпроводящей фазе на интервале температур полного перехода в состояние с нулевым сопротивлением. Серединные значения  $T_c$  (рис. 8a,b и 9a) для микрокристаллических YBCO-2, YBCO-3 и монокристаллического YBCO-M образцов, согласно данным  $\alpha_v(T)$  и  $d\rho/dT$ , практически совпадают, несмотря на размытость области перехода, связанную с их многофазностью. На участках роста объема со стороны высоких

температур срединные значения  $T_c$  обозначены серыми точками. Для микрокристаллического образца YBCO-3 (рис. 9а) так же, как и для образцов YBCO-2 и YBCO-M (рис.8 а, b), отклонения  $\alpha_V = dV/VdT$  от своих нулевых значений происходят с изменением знака, в отличие от аномалий на зависимостях  $d\rho/dT$ .

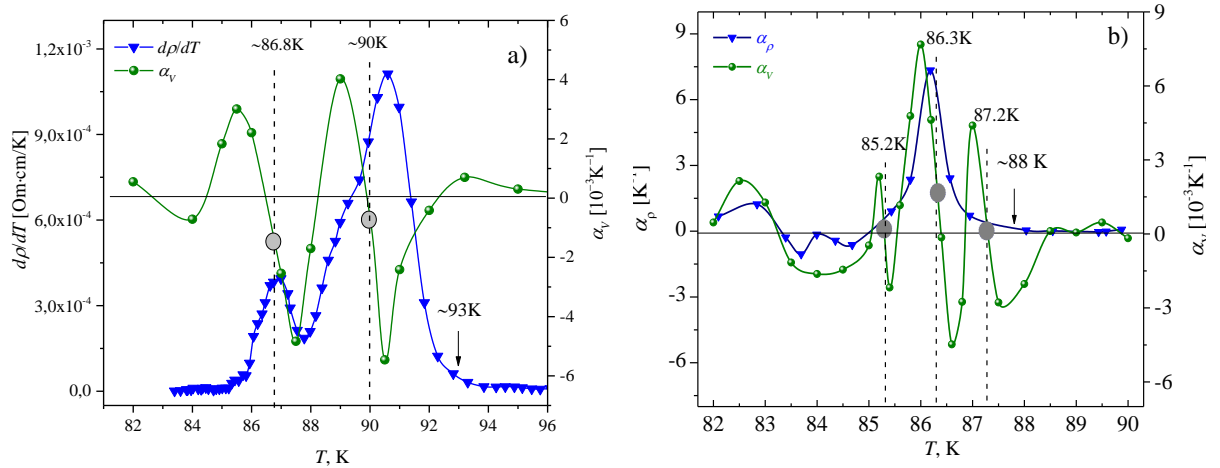


Рис. 8. Температурные зависимости  $d\rho/dT$  и  $\alpha_V$  при переходе в сверхпроводящее состояние для микрокристаллического YBCO-2 – а) и  $\alpha_p$  и  $\alpha_V$  монокристаллического YBCO-M – б) образцов

После перехода каждой из фаз в сверхпроводящее состояние изменение термической деформации  $\alpha_V$  стремится к нулю. В промежутке между переходами этот эффект не наблюдается, поскольку происходят те же этапы изменения объема, как и для предыдущей фазы. Отклонения  $\alpha_V$  при сверхпроводящем переходе каждой из доминирующих фаз образца YBCO-M, так же как для YBCO-2, более чем на порядок превосходит отклонения  $\alpha_V$  в нормальном состоянии. Как видно, три доминирующие фазы в YBCO-M на зависимости  $\alpha_V(T)$  хорошо разрешены. Такого разрешения этих фаз на температурной зависимости  $d\rho/dT$  достичь не удалось (рис.2 б) ввиду высокой скорости перехода на интервале 3 К из-за небольшого размера монокристаллического кристаллита.

На рисунке 9 б представлены зависимости  $d\rho/dT$  и объема от температуры для образца YBCO-4. Ширина пика на зависимости  $d\rho/dT$  для

микроструктурного образца YBCO-4 составляет  $\sim 2$  К (рис. 2 а, рис. 9 б). Здесь начало перехода ( $T_{c,on}$ ) наблюдается при  $\sim 83$ К, что согласуется с началом  $\sim 83,5$  К уменьшения (сжатия) объема (расхождение примерно  $\pm 0.25$  К). После достижения объемом минимума после сжатия происходит его рост (рис. 9 б) с точкой перегиба при температуре  $\sim 82$ К. Максимум температурной зависимости  $d\rho/dT$  наблюдается при температуре 81.7К. Серединные значения  $T_c$ , определенные по  $d\rho/dT$  и аномальному росту объема отличаются на  $\pm 0.15$  К (рис. 9 б). У всех образцов перед переходом в сверхпроводящее состояние объем решетки заметно сжимается, затем резко возрастает.

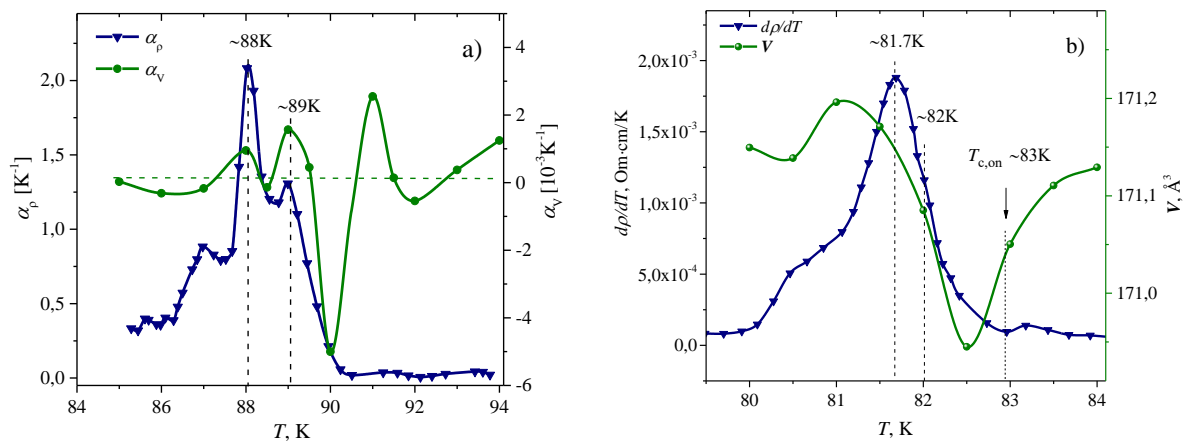


Рис. 9. Температурные зависимости  $d\rho/dT$  и  $\alpha_V$  образца YBCO-3 – а), а также  $d\rho/dT$  и объема YBCO-4 – б) при переходе в сверхпроводящее состояние.

На рисунке 10 приведены зависимости коэффициентов теплового расширения  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  в направлениях  $a$  и  $b$ , а также коэффициента расширения площади основания элементарной ячейки  $\alpha_S$  в области перехода в сверхпроводящее состояние для образца YBCO-M. Рисунок наглядно демонстрирует, что отклонения параметров  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$  и  $\alpha_S$  относительно их нулевых значений такие же, как и у микроструктурного образца YBCO-2. Для каждой из сверхпроводящих фаз монокристаллического образца обнаруживается достаточно четкая обратная корреляция изменения знака отклонений  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$ , в отличие от микроструктурного образца.

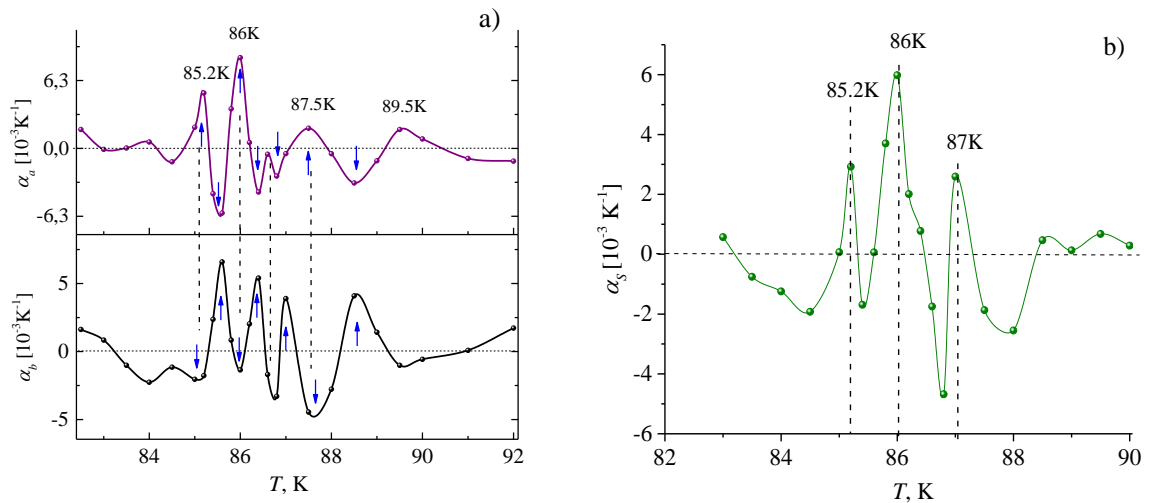


Рис. 10. Температурные коэффициенты расширения  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  в направлениях  $a$  и  $b$  – а), а также относительное изменение площади ( $S$ ) основания элементарной ячейки  $\alpha_S$  – б) в области перехода в сверхпроводящее состояние для монокристаллического образца YBCO-M

Это подобно изменениям температурных зависимостей параметров  $a$  и  $b$  для однофазного монокристаллического образца из работы [10]. При этом, на температурной зависимости относительного изменения площади основания элементарной ячейки (рис.10 б), рассчитанного по результатам температурных зависимостей параметров  $a$  и  $b$  для трех доминирующих фаз, проявляются те же аномалии, связанные с первоначальным сжатием, а затем ростом, как и для объема.

### Основные результаты и выводы

1. Получены микрокристаллические образцы YBCO с различной шириной перехода в сверхпроводящее состояние: 11К (YBCO-1), 7К (YBCO-2), 4К (YBCO-3), 3К (YBCO-4), содержащие преимущественно фазы со значениями  $T_c$  равными: для первого ~88К и ~93К; второго ~87К и ~90К; третьего ~88К и ~89К; четвертого ~81К и ~82К образцов.

2. В процессе варьирования технологическими режимами удалось получить образцы керамик на основе YBCO (НОУ-ХАУ) с преимущественной текстурой роста в направлении параметра  $c$ . Это позволило повысить достоверность полученных температурных зависимостей параметров решетки

для микрокристаллических образцов на порошковом дифрактометре по изменению положению пиков на рентгенограмме.

3. Монодоменный образец с низким уровнем допирования был дополнительно насыщен лабильным кислородом в микрокристаллическом порошке того же состава. После насыщения образец содержал преимущественно фазу с  $T_c \sim 86,5\text{K}$  и шириной перехода  $\sim 2,3\text{K}$ . Температурные зависимости параметров решетки после насыщения этого образца получены на монокристалльном дифрактометре.

4. Значения температур, соответствующих сверхпроводящему переходу и аномалиям в нормальном состоянии, устанавливались по результатам температурных зависимостей электросопротивления, теплового расширения и теплоемкости, полученным в разных лабораториях на одних и тех же образцах. В пределах погрешности изменения соответствующих параметров эти значения согласуются, что дало возможность исследовать связь свойств этих образцов.

5. Выполнен корреляционный анализ зависимостей температурных коэффициентов электросопротивления и теплового расширения от температуры, полученных на одних и тех же микрокристаллических и монодоменном образцах YBCO, в нормальном и псевдощелевом состояниях до сверхпроводящего перехода, а также установлена связь этих свойств на интервале перехода в сверхпроводящее состояние.

6. В микрокристаллическом образце YBCO-2 наблюдается изменение угла наклона температурных зависимостей электросопротивления и объема в области  $\sim 150\text{K}$ . На интервале от  $\sim 290\text{K}$  до  $\sim 140\text{K}$ , до достижения псевдощелевого состояния, наблюдается прямая линейная связь между этими параметрами с коэффициентом корреляции  $\sim 0.992$ . В псевдощелевом состоянии, на интервале от  $120\text{K}$  до  $95\text{K}$ , корреляция также линейная, но обратная. Коэффициент корреляции составляет около  $\sim 0.977$ .

7. Для монокристаллического образца при температурах 230 К и 130 К происходит изменение наклона зависимостей электросопротивления и объема. Эти изменения связаны с переходом в псевдощелевое состояние материала. Существует линейная корреляция между электросопротивлением и объемом образца с коэффициентом корреляции, близким к 0.99.

8. Для каждой фазы всех исследованных образцов начало сверхпроводящего перехода, определяемое по температурной зависимости электросопротивления, сопровождается сжатием решетки, после которого происходит рост объема в области средних значений  $T_c$  этих фаз этих фаз на зависимости  $d\rho/dT$ . После перехода каждой фазы в сверхпроводящее состояние изменение объема стремится к нулю.

### Цитируемая литература

1. Albiss, B. A. Applications of YBCO-coated conductors: a focus on the chemical solution deposition method / B.A. Albiss, I.M. Obaidat // Journal of Materials Chemistry. – 2010. – Т. 20. – №. 10. – С. 1836-1845.
2. Tulina, N.A. Memristive Properties of Oxide-based High-Temperature Superconductors / N.A. Tulina, A.A. Ivanov // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2020. – V. 33. – P. 2279–2286.
3. Kockum, A.F. Quantum Bits with Josephson Junctions. In: Tafuri, F. (eds) Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect. / A.F. Kockum, F. Nori // Springer Series in Materials Science. – 2019. – V. 286– P. 703- 741.
4. Singh, N. Leading theories of the cuprate superconductivity: A critique / N. Singh // Physica C: Superconductivity and its Applications. – 2021. – Т. 580. – С. 1353782.
5. Веденеев, С. И. Проблема псевдощели в высокотемпературных сверхпроводниках / С.И. Веденеев // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191. – №. 9. – С. 937-972.
6. Займан, Дж. Принципы теории твердого тела. – М.: Мир, 1974. – 472.

7. Cava, R.J. Structural anomalies, oxygen ordering and superconductivity in oxygen deficient  $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_x$  / R.J. Cava, A.W. Hewat, E.A. Hewat, B. Batlogg, M. Marezio, K.M. Rabe, J.J. Krajewski, W.F. Peck Jr., L.W. Rupp Jr. // *Physica C: Superconductivity*. – 1990. – Т. 165. – №. 5-6. – С. 419-433.
8. Srinivasan, R. Anomalous variation of the c lattice parameter of a sample of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  through the superconducting transition / R. Srinivasan, K.S. Girirajan, V. Ganesan, V. Radhakrishnan, G.S. Rao // *Physical Review B*. – 1988. – V. 38. №.1. – P. 889-892.
9. Schneider, T., Singer, J. M. Phase Transition Approach to High Temperature Superconductivity-Universal Properties of Cuprate Superconductors. – World Scientific, 2000.
10. Meingast, C. Large a-b anisotropy of the expansivity anomaly at  $T_c$  in untwinned  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  / C. Meingast, O. Kraut, T. Wolf, H. Wühl, A. Erb, G. Müller-Vogt // *Physical review letters*. – 1991. – Т. 67. – №. 12. – С. 1634-1637.

#### **Список публикаций автора по теме диссертации**

1. Rabadanova, A. E. Structure and properties of YBCO before and after the short-term exposure of the plasma flow / A.E. Rabadanova, S.K. Gadzhimagomedov, D.K. Palchaev, M.H. Gadzhiev, G.B. Ragimkhanov, N.A. Demirov // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1385. – №. 1. – С. 012028.
2. Gadzhimagomedov, S.K. Changes in the surface structure of nanostructured ceramics  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  after exposure to a plasma stream / S.K. Gadzhimagomedov, D.K. Palchaev, J.K. Murlieva, M.K. Gadzhiev, G.B. Ragimkhanov, N.A. Demirov, R.M. Emirov, A.E. Rabadanova, P.M. Saypulaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1588. – №. 1. – С. 012009.
3. Gadzhimagomedov, S.K. Superconducting YBCO ceramics after exposure to a plasma flow to a mixture of argon and oxygen / S.K. Gadzhimagomedov, D.K. Palchaev, M.K. Gadzhiev, Z.K. Murlieva, M.K. Rabadanov, P.M. Saypulaev, N.A.

Demirov R.M. Emirov, A.E. Rabadanova // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1923. – №. 1. – С. 012007.

4. Gadzhimagomedov, S. K., Palchaev, D. K., Murlieva, Z. K., Rabadanov, M. K., Presnyakov, M. Y., Yastremsky, E. V., Shabanov N.S., Emirov R.M., Rabadanova, A. E. YBCO nanostructured ceramics: Relationship between doping level and temperature coefficient of electrical resistance // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2022. – Т. 168. – С. 110811.

5. А.Э. Рабаданова, Д.К. Палчаев, М.Х. Рабаданов, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева, Р.М. Эмиров, Н.М.-Р. Алиханов. Влияние термообработки на изменения структуры сверхпроводящих порошков состава YBCO // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2021. Том 36. Вып. 3. С. 37-50.

6. А.Э. Рабаданова, С.Х. Гаджимагомедов, Д.К. Палчаев, М.Х. Рабаданов, Ж.Х. Мурлиева, Ш.П. Фараджев. Свойства керамик YBCO в зависимости от допирования кислородом // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2022. Том 37. Вып. 3. С. 42-57.

7. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, М.Х. Рабаданов, Ж.Х. Мурлиева, А.Э. Рабаданова. Корреляция  $T_c$  с параметрами решетки керамики YBCO // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. – 2019. Т. 34. – №. 1. – С. 24-31.

8. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева, А.Э. Рабаданова. Связь эффектов проводимости и сверхпроводимости YBCO с особенностями кристаллической структуры // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2020. Том 35. Вып. 3. С. 96-102.

Получено свидетельство о регистрации НОУ-ХАУ №82 «Получение текстурированного микрокристаллического порошка соединения  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ » от 29.09.2022.



## Материалы конференции

1. Рабаданова А.Э., Палчаев Д. К., Мурлиева Ж.Х., Эмиров Р.М. Структура керамик YBCO в зависимости от режимов спекания. Сборник тезисов II Международной конференции ФКС-2021, «Физика конденсированных состояний» / под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка, 31 мая – 4 июня 2021 г., Черногловка, 2021 г. 396 с. С. 245.
2. Рабаданова А.Э., Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Эмиров Р.М. Электросопротивление керамик YBCO в зависимости от режимов спекания. Материалы XIII Школы-конференции молодых ученых — «КоМУ-2021»: 18-22 октября 2021 г. Ижевск: УдмФИЦУрО РАН, – 149 с. 2021. С.134-136
3. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, М.Х. Рабаданов, Ж.Х. Мурлиева, А.Э. Рабаданова, Н.А. Палчаев. Корреляция  $T_c$  с параметрами решетки керамики YBCO. Сборник научных трудов IV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2018, 30 января - 1 февраля 2018 года, М.: НИЯУ МИФИ, 2018. -543 с. С. 131-132.
4. Палчаев Д.К., Гаджимагомедов С.Х., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Рабаданова А.Э. Температурные коэффициенты электросопротивления и объемного теплового расширения YBCO вблизи  $T_c$ . Сборник научных трудов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз 2019», Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 12 - 15 февраля 2019г. Москва, 2019 г. - 348 с. С. 131-132.
5. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, М.Х. Рабаданов, Ж.Х. Мурлиева, А.М. Алиев, А.Э. Рабаданова, М.Х. Гаджиев. Корреляция производных от температурных зависимостей электросопротивления, объемного теплового расширения и теплоемкости по температуре для YBCO вблизи  $T_c$ . Труды 22-го Международного междисциплинарного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-22, 4-9 сентября 2019г. Ростов-на-Дону, 2019 г. 206 с. С. 108-111.
6. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, А.Э. Рабаданова, Ж.Х. Мурлиева, М.Х. Рабаданов Формирование зарядовых возбуждений и их релаксация в

неметаллических проводниках на примере YBCO. Сборник тезисов II Международной конференции ФКС-2021, «Физика конденсированных состояний» / под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка, 31 мая – 4 июня 2021 г., Черногловка, 2021 г. 396 с. С. 251.

7. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева, М.Х. Рабаданов, А.Э. Рабаданова. Изменение уровня допирования нанокерамики YBCO при увеличении дефектов структуры. Сборник научных трудов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.1. 23–26 марта 2021г. М.: НИЯУ МИФИ, 2021 г.. С. 279-280.

8. А.Э. Рабаданова, Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева. Возможность донасыщения кислородом монокристаллических сверхпроводников YBCO. Сборник научных трудов VIII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022, посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии по физике Басова Николая Геннадиевича. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – 453 с. С. 259.

9. А.Э. Рабаданова, Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, С.Х. Гаджимагомедов, М.Х. Рабаданов. Корреляция температурных коэффициентов электросопротивления и объемного расширения многофазного сверхпроводящего YBCO. Сборник научных трудов IX Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023: М.: НИЯУ МИФИ, Москва, 2023 г. С. 249.

10. А.Э. Рабаданова, Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева, Р.М. Эмиров, Ш. П. Фараджев. Связь электросопротивления и теплового расширения YBCO. Сборник научных трудов X Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2024: М.: НИЯУ МИФИ, Москва, 2024 г.