

УДК 538.945.9
 EDN: LPWZNH

PACS: 74.25

Сверхпроводящая микрокристаллическая керамика YBCO: корреляции структуры и свойств

А. Э. Рабаданова, С. Х. Гаджимагомедов, Д. К. Палчаев, М. Х. Рабаданов,
Ш. П. Фараджев, Ж. Х. Мурлиева, С. А. Майоров, Г. Б. Рагимханов, Р. М. Эмиров

Изготовлена керамика состава $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ методом твердофазного спекания с заданной плотностью и оптимально насыщенная кислородом, проявляющая признаки преимущественной ориентации кристаллитов вдоль оси с. Проведены прецизионные рентгеноструктурные исследования термической деформации решетки для образца $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в сверхпроводящем состоянии. Изучены спектры комбинационного рассеяния с уточнением положения пиков с использованием функции Лоренца. Проведена оценка содержания кислорода и температуры сверхпроводящего перехода по исследованиям структуры, электрических и тепловых свойств. Показано, что начало сверхпроводящего перехода, определяемое по температурной зависимости электросопротивления, сопровождается сжатием решетки, после которого происходит рост объема в области срединных значений T_c . После перехода в сверхпроводящее состояние изменение объема стремится к нулю.

Ключевые слова: сверхпроводимость; $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$; тепловое расширение; теплоемкость; структура; электрические свойства.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-84-91

Введение

Сверхпроводящие материалы востребованы на практике в различных областях, включая транспорт, электронику, энергетику, медицину и аэрокосмическую промышленность, их активно используют при изготовлении двигателей, генераторов, кабелей, катушек и др. [1–3]. В последние годы проведено много экспериментальных и теоретических

исследований структуры и свойств высокотемпературных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) с целью повышения температуры сверхпроводящего перехода T_c и плотности критического тока j_c в них путем замещений в системе и введения добавок из оксидов или перовскитов.

Сверхпроводник YBCO имеет перовскитоподобную структуру, которая состоит из двух гофрированных плоскостей CuO_2 , разде-

Рабаданова Аида Энверовна¹, преп. м.н.с.
 Гаджимагомедов Султанахмед Ханахмедович¹,
 ст. пред., с.н.с., к.ф.-м.н.
 Палчаев Даир Каирович¹, профессор, д.ф.-м.н.
 Рабаданов Муртазали Хулатаевич¹, профессор,
 д.ф.-м.н.
 Фараджев Шамиль Пиралиевич¹, вед. инженер, м.н.с.
 Мурлиева Жарият Хаджиевна¹, профессор, д.ф.-м.н.
 Майоров Сергей Алексеевич², в.н.с., д.ф.-м.н.
 Рагимханов Гаджимирза Балагланович¹, доцент,
 к.ф.-м.н.
 E-mail: gb-r@mail.ru
 Эмиров Руслан Мурадович¹, преп. м.н.с.

¹ Дагестанский государственный университет.
 Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а.
² Объединенный институт высоких температур РАН.
 Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025
 После доработки 23.01.2025
 Принята к публикации 1.02.2025
 Шифр научной специальности: 1.3.8

© Рабаданова А. Э., Гаджимагомедов С. Х.,
 Палчаев Д. К., Рабаданов М. Х., Фараджев Ш. П.,
 Мурлиева Ж. Х., Майоров С. А., Рагимханов Г. Б.,
 Эмиров Р. М., 2025

ленных слоев атомов иттрия, двумя слоями BaO и CuO. Данное соединение является анизотропным с параметром анизотропии, равным 5. В случае высокого содержания кислорода материал обладает орторомбической симметрией (пространственная группа $R\bar{3}m$). Сверхпроводимость этого материала и температура перехода сильно зависят от содержания и упорядочения атомов кислорода. Считается, что кислородная нестехиометрия для YBCO связана со смешанными валентностями меди (2 и 3), что также определяет связь между содержанием кислорода и параметрами решетки. В орторомбической фазе параметры решетки a и c уменьшаются с увеличением содержания кислорода, в то время как параметр b увеличивается [4, 5].

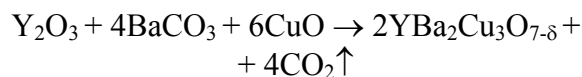
Многие принципиальные вопросы, касающиеся механизма сверхпроводимости и природы спаривания носителей заряда в этих сложных соединениях, остаются нерешенными до сих пор. Однако, ясно, что причиной высокой температуры перехода является нестабильность кристаллической решетки и/или аномальное поведение фононного спектра. Эта нестабильность проявляется, в частности, в виде аномалий фононного спектра, коэффициента теплового расширения $\alpha(T)$ при низких температурах, сингулярности упругих и акустических свойств [6–9].

Обнаруженные в [9] для монокристаллов YBCO вблизи T_c аномалии параметров решетки, имеющие противоположный знак в направлениях a и b , существенно зависят от содержания кислорода. В работе [10] отмечено, что аномалии решетки обусловлены динамическим, а не статическим характером расщепления Cu-O связи в плоскости CuO_2 . При этом колебания ионов кислорода в двухъямном потенциале являются общим свойством для всех сверхпроводников с решеткой перовскита. При этом наблюдаемые аномалии коэффициента теплового расширения, наиболее вероятно, являются фундаментальным свойством сверхпроводников и требуют всестороннего исследования. На первом этапе для обнаружения характерных аномалий, в частности, теплового расширения, необходимо изготовление качественных образцов оксидных ВТСП [11].

В настоящей работе изготовлены образцы на основе YBCO с высоким содержанием сверхпроводящей фазы (до $\sim 95\%$), проявляющие признаки преимущественной ориентации кристаллитов вдоль оси c . Представлены результаты прецизионных рентгеноструктурных исследований термической деформации решетки для образца YBCO в сверхпроводящем состоянии.

Методика эксперимента

Микрокристаллические образцы были получены методом твердофазного спекания с использованием простых реагентов Y_2O_3 ($\sim 99,9\%$), BaCO_3 ($\sim 99,9\%$) и CuO ($\sim 99,9\%$), взятых в эквивалентном соотношении, по следующей реакции:



Исходные реактивы перемешивались в агатовой ступке в течение 5–10 часов с добавлением этилового спирта. Перемешанные порошки прессовались при давлении ~ 100 МПа и далее синтезировались в печи при температуре 900°C в течение 20 часов со скоростью нагрева $3^\circ\text{C}/\text{мин}$. После первого этапа образцы измельчались, повторно перемешивались, прессовались и спекались: нагрев до 850°C за 8 часов (скорость нагрева $1,7^\circ\text{C}/\text{мин}$), далее за 6 часов температура поднималась до 910°C , при которой выдерживались в течение 12 часов. Насыщение кислородом проводилось при 450°C в течение 10 часов.

На рисунке 1 показаны диаграмма режима спекания и морфология соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ после спекания при 910°C в течение 12 часов. На морфологии YBCO видна структура поверхности керамики поликристаллическая с различной ориентацией зерен. Наряду с агломератами с размерами порядка нескольких микрон, образованными из зерен примерно ~ 300 нм, наблюдаются поры (до ~ 10 мкм) и достаточно большие монолитные зерна (до ~ 30 мкм) неправильной формы, но с характерной огранкой. Результаты исследования элементного состава в различных областях, подтверждающие их однофазность.

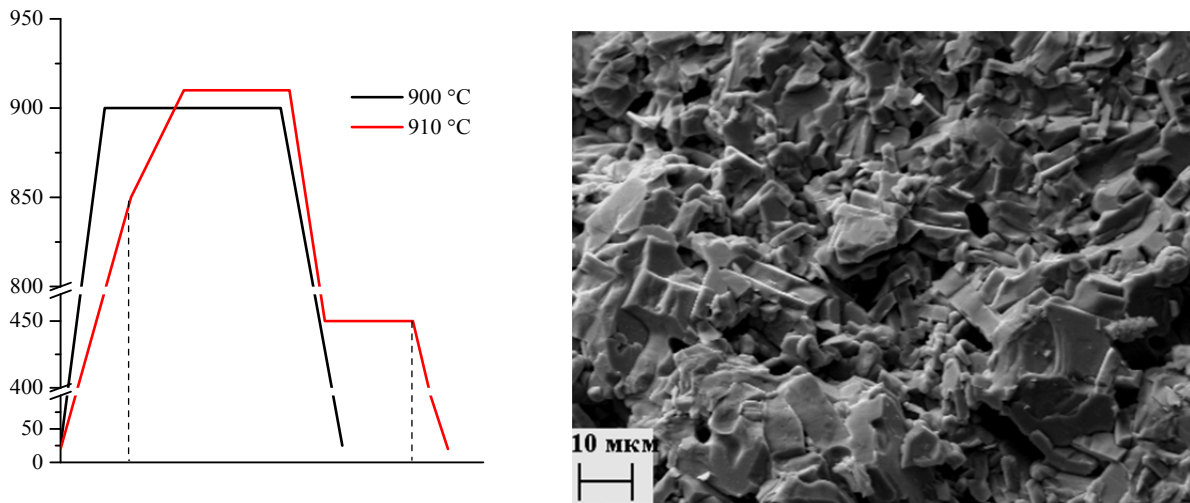


Рис. 1. Диаграмма режима спекания и морфология соединения YBCO после спекания при 910 °C

Дифракционный анализ проводился на дифрактометре SIEMENS D-500, оснащенный низкотемпературным криостатом. Загрузка образца осуществлялась при комнатной температуре с последующим охлаждением до азотных температур. Съёмка проводилась на монокристаллической кремниевой подложке с размером кюветы для образца 15×20 мм. Сканирование проводилось с использованием рентгеновского излучения $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ в схеме со вторичным монохроматором в интервале углов $2\theta = 5\div 70^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ и экспозицией 12 с в каждой точке. Оценка параметров решетки проводилась с использованием программы High Score plus. Морфология определялась на сканирующем электронном микроскопе ASPEX Express на базе EDX детектора Omega Max. Спектры комбинационного рассеяния образцов исследовались на атомно-силовом микроскопе Ntegra Spectra (NT-MDT) (режим комбинационного рассеяния). Измерения электросопротивления образцов проводились на автоматизированной установке стандартным 4-х зондовым методом на прямоугольных образцах в диапазоне температур 84–300 К с использованием цифрового мультиметра Keithley 2002. Для присоединения медных выводов к образцам использовалась проводящая серебряная паста. Температура регистрировалась медь-константа-

новой термопарой. Скорость изменения температуры образца до перехода в сверхпроводящее состояние не превышала ~ 10 К/мин, а в области перехода – не более $\sim 0,1$ К/мин. Суммарная погрешность измерения электросопротивления образцов не превышала 3 %, а температуры $\pm 0,25$ К. Исследования теплоемкости проводили методом ас-калориметрии в диапазоне температур 20–160 К.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2а приведена дифрактограмма, полученная для микрокристаллического образца YBCO. Результаты структурного анализа были получены с использованием модели кристаллической структуры из базы данных ICSD (PDF-2) № 98-004-4113 для пространственной группы Pmmm, Y (1/2 1/2 1/2), Ba (1/2 1/2 0.18386), Cu1 (0 0 0), Cu2 (0 0 0.35501), O1 (0 1/2 0), O2 (1/2 0 0.37825), O3 (0 1/2 0.37825), O4 (0 0 0.15867). Результат анализа показал следующие коэффициенты расхождения: взвешенный профиль $\omega R_p = 5,35$ %; профиль $R_p = 3,68$ %; «goodness of the fit» $\chi^2 = 5,4$; коэффициент Брэгга $R_B = 2,3$ %. Методом Ривельда получены следующие значения параметров кристаллической ячейки: $a = 3,827533$; $b = 3,886522$; $c = 11,68327$; $V = 173,7979$.

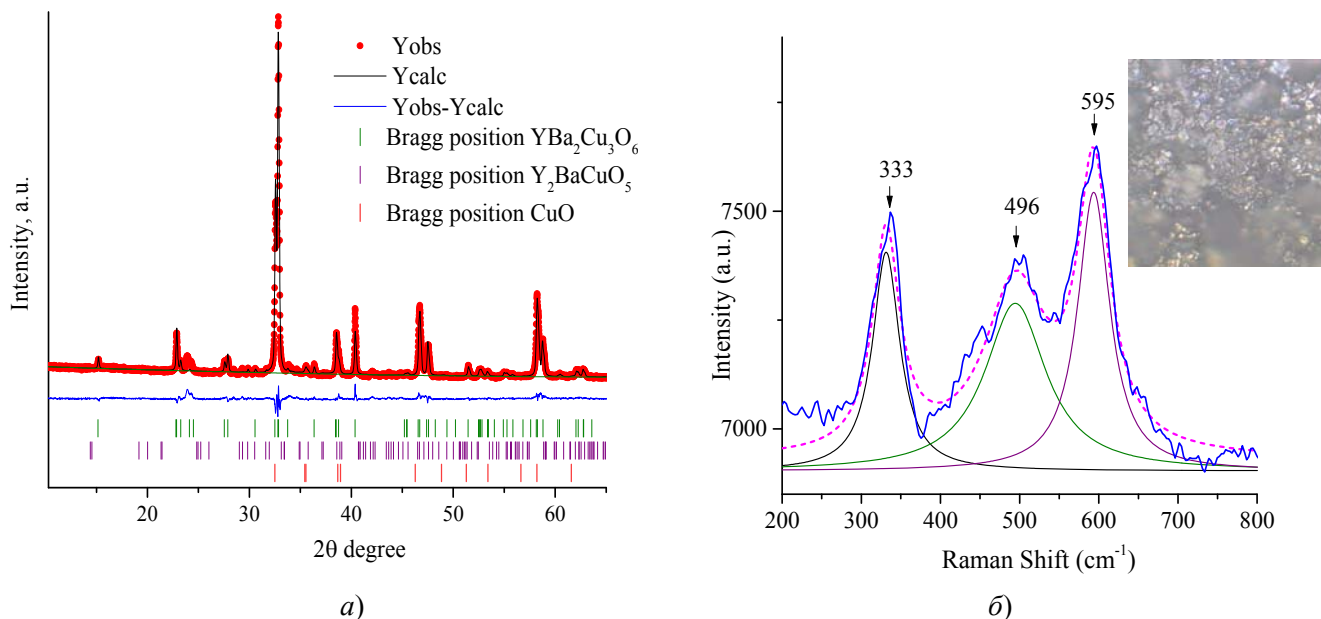


Рис. 2. Экспериментальная (красная), расчетная (черная) и дифференциальная (синяя) дифракционные картины образца YBCO при комнатной температуре – а); спектры комбинационного рассеяния – б). На вставке приведено изображение участка поверхности образца размера 100×100 мкм

Кристаллографическая плотность элементарной ячейки составляет $\sim 6,36 \text{ г/см}^3$. Помимо основных пиков YBCO, на дифрактограмме присутствуют незначительные пики, соответствующие фазам Y-211 и CuO. Содержание кислорода составляет $\sim 6,92$, что соответствует оптимальному содержанию кислорода в структуре YBCO с заполненными позициями O(1) в цепочках CuO вдоль оси *b*. На рисунке 2б приведены результаты исследования спектров комбинационного рассеяния с уточнением положения пиков с использованием функции Лоренца. Для микрокристаллического YBCO проявляются колебательные моды при $\sim 333 \text{ см}^{-1}$ соответствующее колебаниям атомов кислорода O(2) и O(3) в плоскостях CuO₂ (режим O(2, 3)-B_{1g}) и два пика при $\sim 496 \text{ см}^{-1}$ – колебания апикального кислорода O(4) вдоль оси *c* (режим O(4)-A_g) и $\sim 595 \text{ см}^{-1}$ связанные с колебаниями атомов Cu(1) и O(1) [12], интенсивность пика указывает на количество таких катионных нарушений или разрывов в цепях Cu–O. Содержание кислорода [13] по значению пиковой частоты при режиме O(4)-A_g в см^{-1} составляет $\sim 6,86$, что близко к значению, определенному по рентгеноструктурному анализу.

На рисунке 3 приведены результаты исследования $\rho(T)$ для образца после спекания

при температуре 910 °С. Ход зависимости $\rho = f(T)$ металлический, значение ρ_{300} составляет $4,55 \times 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. В интервале от 300 до 110 К температурный коэффициент сопротивления составляет $1,86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Начало перехода в сверхпроводящее состояние приходится на $\sim 90,5 \text{ К}$. Образец содержит несколько сверхпроводящих фаз с различным уровнем допирования и обладает шириной перехода (ΔT) $\sim 4 \text{ К}$. Содержание кислорода, определенное по значению T_c ($\sim 89,2 \text{ К}$), составляет $\sim 6,86$. Относительно большая ширина пика свидетельствует о наличии в образце сверхпроводящих фаз, близких по содержанию кислорода.

Значения теплоемкости образца YBCO в широком диапазоне температур от 20 до 160 К представлены на рисунке 3б. На вставке показано поведение C_p/T в окрестности T_c , где ниже $\sim 90 \text{ К}$ наблюдается отклонение от общей закономерности. Интервал наблюдаемой аномалии составляет $\sim 5\text{--}6 \text{ К}$, что несколько превышает ширину перехода в сверхпроводящее состояние, оцененную по зависимости $\rho(T)$. Как видно, температура начала отклонения от регулярности приходится на $\sim 90,2 \text{ К}$, что незначительно ниже (на $\sim 0,3 \text{ К}$), чем начало перехода на температурной зависимости электросопротивления.

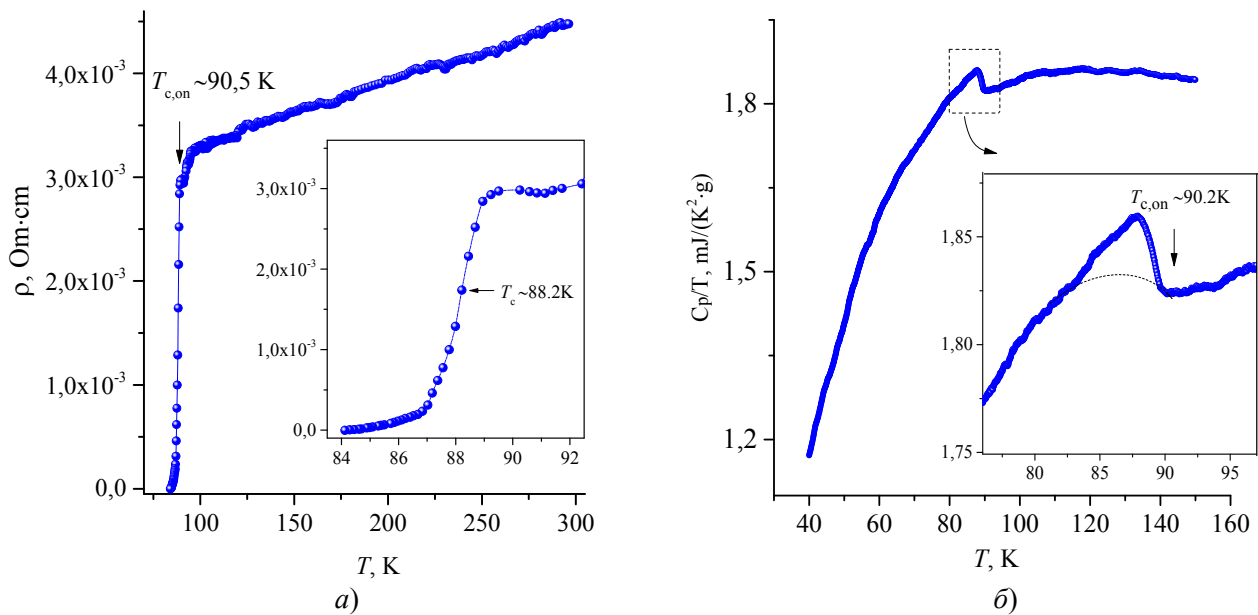


Рис. 3. Температурные зависимости удельного электросопротивления YBCO – а) и теплоемкости – б). На вставках приведены соответствующие зависимости в области сверхпроводящего перехода

Для данного микрокристаллического образца были проведены исследования рентгеноструктурного анализа в области перехода в сверхпроводящее состояние, по данным которых в программе HighScorePlus были определены структурные параметры.

На рисунке 4 приведены температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ и $d\rho/dT$, объема решетки V и теплоемкости C_p/T в области сверхпроводящего перехода. Начало перехода $\sim 90,5$ К проявляется на всех свойствах этого образца в виде подъема на экстремаль для зависимости $d\rho/dT$ и уменьшения объема до минимума, после которого он резко возрастает с точкой перегиба при температуре $\sim 90,5$ К. Максимумы на температурной зависимости $d\rho/dT$, определяющие значение температуры T_c при переходе, в пределах погрешности определения $d\rho/dT$, приходятся на температуры стрикции объема. Эти температуры хорошо согласуются и с температурой ~ 89 К на аномалии теплоемкости, полученной экстраполяцией температурной зависимости теплоемкости от низких и высоких температур. Начало сверхпроводящего перехода, определяемое по температурной зависимости электросопротивления, сопровождается сжатием решетки, после которого происходит

рост объема в области средних значений T_c и после перехода в сверхпроводящее состояние изменение объема становится незначительным.

Температурная зависимость электросопротивления показывает, что оно очень чувствительно к термической деформации решетки. Возникновение сверхпроводимости сильно коррелирует с особенностями формирования деформации решетки ВТСП. Эффекты возбуждения и релаксации элементарных зарядовых возбуждений в системе взаимодействующих поляризованных атомов [14] сопровождаются совершением работы по выходу системы из состояния равновесия и возвращению в новое состояние после термического воздействия. Согласно [15], детальное зарядовое равновесие в YBCO восстанавливается в результате искажения параметров решетки относительно ее идеализированного состояния, в результате перераспределения электронной плотности вокруг ядер, отличающейся от электронной плотности в нейтральных атомах. Устойчивость кристаллической структуры задается правилами Л. Полинга, предусматривающими поляризационную способность ионов [15] и их экранировки. При этом диэлектрическая экранировка локальной неод-

нородности зарядов ионов в пределах элементарной ячейки YBCO осуществляется при изменении концентрации обобществленных зарядовых возбуждений при незначительных деформациях решетки [15, 16]. Сжатие решетки приводит к повышению уровня допирования, на что указывает связь [4, 17] содержания кислорода и значения T_c с уменьшением параметра c . Такое сжатие объясняется выигры-

шем энергии при переходе в сверхпроводящее состояние [18]. Вблизи T_c наблюдаемый интересный эффект обусловлен разновидностью электронной неустойчивости [19]. Поэтому чувствительность зонной структуры элементарных зарядовых возбуждений к незначительным изменениям структуры является причиной наблюдаемой высокой чувствительности T_c к таким структурным изменениям.

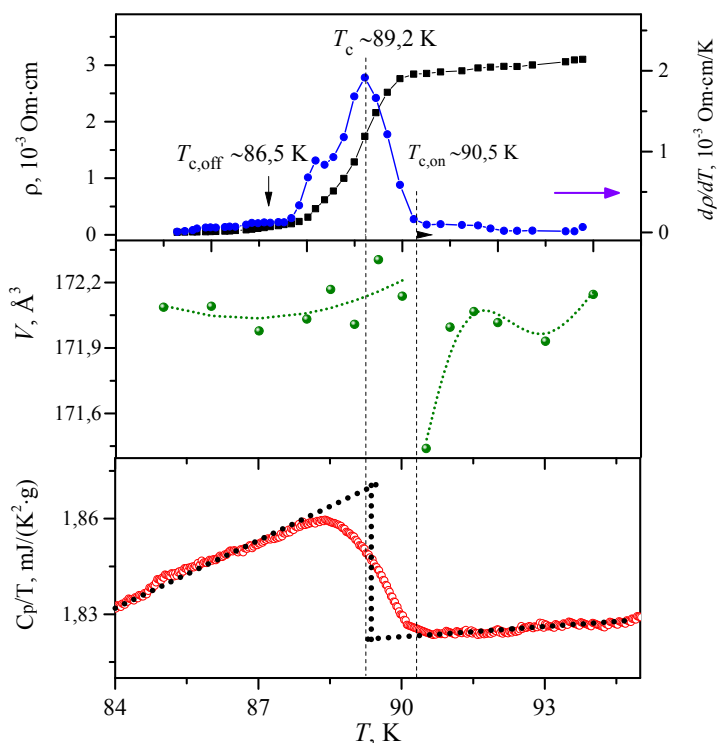


Рис. 4. Температурные зависимости ρ , $d\rho/dT$, V и C_p/T в области сверхпроводящего перехода

Итак, термодинамика процессов в этих системах непосредственно связана с квантовой электродинамикой формирования элементарных зарядовых возбуждений путем их индуцирования при соответствующих деформациях решетки.

Заключение

В настоящей работе проведены прецизионные рентгеноструктурные исследования термической деформации решетки для образца YBCO в сверхпроводящем состоянии. Установлено, что характер зависимости $\rho-T$ металлический, начало перехода в сверхпроводящее состояние приходится на величину

$\sim 90,5$ К, которая согласуется в пределах погрешности определения со значениями, определенными по исследованиям структуры и тепловых свойств. Начало перехода в сверхпроводящее состояние проявляется на всех свойствах в виде аномалий подъема на экстремаль для зависимостей $d\rho/dT$ и C_p/T от T , а также уменьшения удельного объема до минимума, после которого он резко возрастает с точкой перегиба, с последующим стремлением к нулю. Показано, что максимумы на температурной зависимости $d\rho/dT$, определяющие значение температуры T_c при переходе, приходятся на температуры стрикции объема. Предпринята попытка объяснения перехода в сверхпроводящее состояние с учетом особенностей деформации решетки ВТСП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-32-90170 и Гос. задания FZNZ-2020-0002, а также при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Исследования выполнены с использованием оборудования НОЦ «Нанотехнологии» Дагестанского государственного университета. Экспериментальные данные по температурным зависимостям параметров решетки были получены в ИФТТ РАН. Исследования теплоемкости проводили в ИФ ДФИЦ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yazdani-Asrami M., Sadeghi A., Atrey M. D. / International Journal of Refrigeration. 2022. Vol. 140. P. 70–81.
2. Kumar S., Dahiya M., Khare N. / Applied Physics A. 2024. Vol. 130. № 10. P. 1–8.
3. Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwal-la M. et al. / IEEE Transactions on applied superconductivity. 2009. Vol. 19. № 3. P. 1656–1661.
4. Cava R. J., Hewat A. W., Hewat E. A. / Physica C: Superconductivity. 1990. Vol. 165. № 5-6. P. 419–433.
5. Benzi P., Bottizoa E., Rizzi N. / Journal of Crystal Growth. 2004. Vol. 269. P. 625–629.
6. Srinivasan R., Girirajan K. S., Ganesan V., Radhakrishnan V., Rao G. S. / Physical Review B. 1988. Vol. 38. № 1. P. 889–892.
7. Titova S. G., Lukoyanov A. V., Pryanichnikov S. V., Cherepanova L. A., Titov A. N. / Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 658. P. 891–897.
8. Talantsev E. F., Strickland N. M., Wimbush S. C., Storey J. G., Tallon J. L., Long N. J. / Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. № 24.
9. Meingast C., Pasler V., Nagel P., Rykov A., Tajima S., Olsson P. / Physical Review Letters. 2001. Vol. 86. № 8. P. 1606.
10. Menushenkov A. / Journal of Synchrotron Radiation. 2003. Vol. 10. № 5. P. 369–370.
11. Рабаданова А. Э., Палчаев Д. К., Рабаданов М. Х. / Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2021. Т. 36. Вып. 3. С. 37–50.
12. Thomsen C., Kaczmarczyk G. / Handbook of vibrational spectroscopy. 2006. P. 2651–2669. doi: 10.1002/9780470027325.s6305
13. Huong P. V., Bruyere J. C., Bustarret E., Granchamp P. / Solid State Communications. 1989. Vol. 72. № 2. P. 191–194.
14. Slater J. C. Insulators, Semiconductors and Metals. – New York: McGraw-Hill, 1967.
15. Cava R. J., Batlogg B., Rabe K. M., Rietman E. A., Gallagher P. K., Rupp Jr L. W. / Physica C. 1988. Vol. 156. P. 523–527.
16. Božin E. S., Huq A., Shen B., Claus H., Kwok W. K., Tranquada J. M. / Physical Review B. 2016. Vol. 93. № 5. P. 054523.
17. Liang R., Bonn D. A., Hardy W. N. / Physical Review B. 2006. Vol. 73. № 18. P. 180505.
18. Anshukova N. V., Golovashkin A. I., Ivanova L. I. et al. / Physics of the Solid State. 2004. Vol. 46. P. 1394–1397.
19. Hardy F., Adelman P., Löhneysen H. V., Wolf T., Meingast C. / Physical review letters. 2009. Vol. 102. № 18. P. 187004.

PACS: 74.25

Superconducting microcrystalline ceramic YBCO: correlations of structure and properties

A. E. Rabadanova¹, S. Kh. Gadzhimagomedov¹, D. K. Palchaev¹, M. Kh. Rabadanov¹, Sh. P. Faradzhev¹, Zh. Kh. Murlieva¹, S. A. Mayorov², G. B. Ragimkhanov¹ and R. M. Emirov¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala
43-a Gadzhiyev st., Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia
E-mail: gb-r@mail.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

Received 09.01.2025; revised 23.01.2025; accepted 1.02.2025

Ceramics of the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composition have been produced by solid-phase sintering with a given density and with the optimal content level of oxygen. The resulting material exhibits a

preferential orientation of crystallites along the c axis. Precision X-ray diffraction studies have been conducted to examine the thermal deformation of the lattice in a $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ sample in its superconducting state. Raman spectra have been studied with the refinement of peak positions using the Lorentz function. The oxygen content and the superconducting transition temperature have been estimated based on studies of the structure, electrical, and thermal properties. It has been demonstrated that the onset of the superconducting transition, determined from the temperature dependence of the electrical resistance, is accompanied by lattice compression, followed by an increase in volume in the region of mid-values of T_c . After the transition to the superconducting state, the change in volume tends to zero.

Keywords: superconductivity; $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$; thermal expansion; heat capacity; structure; electrical properties.

REFERENCES

1. Yazdani-Asrami M., Sadeghi A. and Atrey M. D., International Journal of Refrigeration **140**, 70–81 (2022).
2. Kumar S., Dahiya M. and Khare N., Applied Physics A **130** (10), 1–8 (2024).
3. Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwalla M. et al., IEEE Transactions on applied superconductivity **19** (3), 1656–1661 (2009).
4. Cava R. J., Hewat A. W. and Hewat E. A., Physica C: Superconductivity **165** (5-6), 419–433 (1990).
5. Benzi P., Bottizoa E. and Rizzi N., Journal of crystal growth **269** (2-4), 625–629 (2004).
6. Srinivasan R., Girirajan K. S., Ganesan V., Radhakrishnan V. and Rao G. S., Physical Review B, **38** (1), 889 (1988).
7. Titova S. G., Lukoyanov A. V., Pryanichnikov S. V., Cherepanova L. A. and Titov A. N., Journal of Alloys and Compounds **658**, 891–897 (2016).
8. Talantsev E. F., Strickland N. M., Wimbush S. C., Storey J. G., Tallon J. L. and Long N. J., Applied Physics Letters **104** (24), 242601 (2014).
9. Meingast C., Pasler V., Nagel P., Rykov A., Tajima S. and Olsson P., Physical Review Letters **86** (8), 1606 (2001).
10. Menushenkov A., Journal of Synchrotron Radiation **10** (5), 369–370 (2003).
11. Rabadanova A. E., Palchaev D. K., Rabadanov M. Kh. et al., Herald of Dagestan State University **36** (3), 37–50 (2021).
12. Thomsen C. and Kaczmarczyk G., Handbook of vibrational spectroscopy, 2002, pp. 2651–2669.
13. Huong P. V., Bruyere J. C., Bustarret E. and Granchamp P., Solid State Communications **72** (2), 191–194 (1989).
14. Slater J. C., Insulators, Semiconductors and Metals. New York, McGraw-Hill, 1967.
15. Cava R. J., Batlogg B., Rabe K. M., Rietman E. A., Gallagher P. K. and Rupp Jr L. W., Physica C **156**, 523–527 (1988).
16. Božin E. S., Huq A., Shen B., Claus H., Kwok W. K. and Tranquada J. M., Physical Review B **93**, 054523 (2016).
17. Liang R., Bonn D. A. and Hardy W. N., Physical Review B **73**, 180505 (2006).
18. Anshukova N. V., Golovashkin A. I., Ivanova L. I. et al., Physics of the Solid State **46**, 1394–1397 (2004).
19. Hardy F., Adelman P., Löhneysen H. V., Wolf T. and Meingast C., Physical review letters **102** (18), 187004 (2009).