

Краткие сообщения

Влияние давления на критическую температуру монокристаллов $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ с заданной геометрией плоских дефектов

Г.Я. Хаджай, В.В. Скляр, Р.В. Вовк, Я.В. Довгополова, О.А. Черновол-Ткаченко

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: gkhadjai@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2014 г., после переработки 1 апреля 2014 г.,
опубликована онлайн 23 июня 2014 г.

Исследовано влияние высокого гидростатического давления до 17 кбар на проводимость в базисной ab -плоскости слабодопированных празеодимом ($x \approx 0,05$) монокристаллических образцов $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с системой однонаправленных двойниковых границ. Обнаружено, что, в отличие от беспримесных образцов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с оптимальным содержанием кислорода, приложение высокого давления приводит к двойному возрастанию величины барической производной dT_c/dP . Обсуждаются возможные механизмы влияния высокого давления на T_c с учетом наличия особенностей в электронном спектре носителей.

Досліджено вплив високого гідростатичного тиску до 17 кбар на провідність у базисній ab -площині слабодопованих празеодимом ($x \approx 0,05$) монокристалічних зразків $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з системою односпрямованих двійникових границь. Виявлено, що, на відміну від бездомішкових зразків $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з оптимальним вмістом кисню, прикладення високого тиску призводить до подвійного зростання величини баричної похідної dT_c/dP . Обговорюються можливі механізми впливу високого тиску на T_c з урахуванням наявності особливостей в електронному спектрі носіїв.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники.

Ключевые слова: монокристаллы $YBaCuO$, допирование, гидростатическое давление.

В условиях отсутствия полноценной микроскопической теории высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) [1] применение высоких давлений продолжает оставаться одним из важнейших инструментов не только определения адекватности многочисленных теоретических моделей, но и поиска эмпирических путей улучшения критических параметров ВТСП материалов [2,3]. Одними из наиболее перспективных для исследований в этом аспекте являются соединения так называемой системы 1-2-3 ($Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) с частичной заменой иттрия на празеодим [4]. Как известно, замена в этом соединении иттрия на другие редкоземельные элементы не приводит к существенному изменению его резистивных характеристик [5]. Исключение представляет только случай замены ит-

трия на празеодим (так называемая аномалия празеодима), приводящий к увеличению сопротивления и снижению температуры сверхпроводящего резистивного перехода T_c [3–6]. Это, в свою очередь, дает возможность относительно просто варьировать сверхпроводящие характеристики соединения путем изменения концентрации празеодима в конкретном экспериментальном образце. При этом практически не изменяется структура кристаллической решетки и кислородный индекс соединения [4,5]. Последнее является особенно важным, поскольку позволяет исключить возможность возникновения неравновесного состояния, которое может быть индуцировано в беспримесных, нестехиометрических по кислороду образцах посредством приложения давления [2,3] или скачкообразного измене-

ния температуры [7]. Несмотря на то, что в литературе имеется несколько сообщений, посвященных исследованию влияния давления на критическую температуру (T_c) соединений $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (см., например, обзор [4]), данные, приводимые в этих работах, зачастую являются достаточно противоречивыми. При этом сообщается о регистрации как положительной, так и отрицательной барической производной dT_c/dP , а в отдельных случаях и об изменении знака dT_c/dP [4], о чем более подробно будет сказано ниже. Важное значение здесь имеет тот факт, что значительная часть экспериментальных данных была получена на керамических, пленочных и текстурированных образцах весьма различной технологической предыстории [4,5]. В случае же монокристаллических образцов определенные сложности может создавать присутствие в системе достаточно разупорядоченной структуры двойниковых границ (ДГ) [8,9]. Последние, являясь протяженными двумерными дефектами, а также местом стока дефектов более низкой размерности, в свою очередь, сами представляют собой мощные центры рассеяния нормальных и флуктуационных носителей [10], тем самым оказывая заметное влияние на процессы переноса заряда в конкретном экспериментальном образце. Следует также отметить, что в литературе практически отсутствуют экспериментальные данные, полученные при исследовании влияния давления в соединениях с концентрацией празеодима $x < 0,1$. При этом именно в образцах слабодопированных празеодимом зачастую наблюдаются интересные явления подавления псевдощелевого состояния и аномального расширения температурного участка линейной зависимости [11,12]. Учитывая вышесказанное, в настоящей работе были проведены исследования влияния давления на резистивные характеристики допированных празеодимом ($x \approx 0,05$) монокристаллических образцов $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с геометрией протекания транспортного тока \mathbf{I} параллельно ДГ ($\mathbf{I} \parallel \text{ДГ}$), позволяющей минимизировать эффекты рассеяния на двойниковых границах [13,14].

ВТСП монокристаллы соединений $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выращивали по раствор-расплавной технологии в золотом тигле, согласно методике [6,10,12]. Для проведения резистивных исследований отбирали кристаллы прямоугольной формы размером $3 \times 0,5 \times 0,03$ мм. Наименьший размер кристалла соответствовал направлению оси c . Электрические контакты создавали по стандартной четырехконтактной схеме путем нанесения серебряной пасты на поверхность кристалла с последующим подсоединением серебряных проводников диаметром 0,05 мм и трехчасовым отжигом при температуре 200 °С в атмосфере кислорода. Такая процедура позволяла получить переходное сопротивление контактов менее одного Ома и проводить резистивные измерения при транспортных токах до 10 мА в ab -плоскости. Как известно, при насыщении кислородом

в соединениях $YBaCuO$ происходит тетра-орто структурный переход, который, в свою очередь, приводит к двойникованию кристалла, минимизирующего его упругую энергию. Для получения образцов с однопавленными границами двойников из кристалла вырезался мостик шириной 0,2 мм и расстоянием между парами контактов 0,3 мм. При этом геометрия эксперимента выбиралась таким образом, чтобы вектор транспортного тока \mathbf{I} был параллелен плоскостям двойникования [14]. Гидростатическое давление создавали в мультипликаторе типа поршень-цилиндр [3]. Величину давления определяли с помощью манганинового манометра, температуру — медь-константановой термопарой, вмонтированной в наружную поверхность камеры на уровне положения образца.

На рис. 1 показаны температурные зависимости электросопротивления в базисной плоскости $\rho_{ab}(T)$ монокристалла $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, измеренные при различных давлениях. На вставке (а) показаны резистивные переходы в сверхпроводящее состояние. Как видно на рис. 1, значения T_c и $\rho_{ab}(300)$ при атмосферном давлении составили 86 К и 195 мкОм·см соответственно. Таким образом, по сравнению с беспримесными монокристаллическими образцами $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ критическая температура уменьшилась на 5–7 К при одновременном увеличении $\rho_{ab}(300)$ на 30–40 мкОм·см, что в целом согласуется с литературными данными [4,5].

В настоящее время существует целый ряд теоретических моделей, посвященных исследованию причин деградации сверхпроводящих и нормальных характеристик соединений $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ под влиянием примеси празеодима. Наиболее известными среди них являются, так называемые, «hole filling model», «pair breaking phenomena», а также модели, предполагающие локализацию дырочных носителей и обусловленные

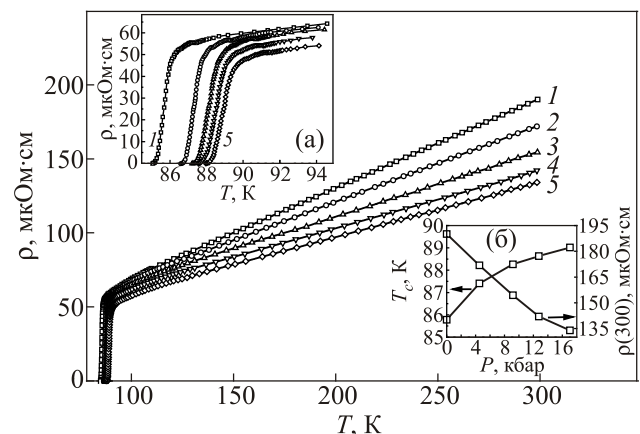


Рис. 1. Температурные зависимости электросопротивления в базисной плоскости $\rho_{ab}(T)$ монокристалла $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, измеренные при P , кбар: 0 (1); 4,52 (2); 9,17 (3); 12,74 (4); 17,05 (5). Резистивные переходы в сверхпроводящее состояние (а). Барические зависимости T_c и $\rho_{ab}(300)$ (б).

взаимодействием с ионами празеодима различные механизмы перестройки зонных состояний (обзор [4]). Учитывая ограниченный объем нашего сообщения, мы не проводим здесь подробный анализ этих явлений, оставляя его для отдельной работы.

Как видно на вставке (б), для нашего образца $dT_c/dP \approx 0,18$ К/кбар, что несколько меньше, чем у соединений с $x \geq 0,1$ [4], но больше, чем у беспримесных монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [13]. Вообще говоря, такое значение барической производной dT_c/dP можно объяснить посредством традиционного использования для качественного анализа зависимостей $T_c(P)$ известной формулы Макмиллана [15,16]:

$$T_c = \frac{\theta_D}{1,45} \exp \left[-\frac{1,04(1+\lambda)}{\lambda - V^*(1+0,62\lambda)} \right], \quad (1)$$

где θ_D — температура Дебая, V^* — экранированный кулоновский псевдопотенциал, характеризующий отталкивание электронов, λ — константа электрон-фононного взаимодействия, которая, в свою очередь, зависит от параметров электронного и фононного спектра сверхпроводника:

$$\lambda = \frac{N(\epsilon_F) \langle I^2(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \rangle}{M\theta_D^2}, \quad (2)$$

где $N(\epsilon_F)$ — плотность состояний на уровне Ферми, I — усредненный по поверхности Ферми матричный элемент электрон-фононного взаимодействия, M — масса иона.

В предположении, что при сжатии образца наряду с ростом температуры Дебая увеличивается и матричный элемент электрон-фононного взаимодействия [17], значения $dT_c/dP < 0,2$ К/кбар представляются вполне разумными. При этом, однако, следует отметить, что у образцов с концентрацией примеси празеодима $x > 0,3$ величина абсолютного значения барической производной dT_c/dP может достигать значений больше 0,6 К/кбар [4]. Кроме того, как отмечалось выше, в некоторых работах наблюдалось изменение знака dT_c/dP . Все вышесказанное не позволяет однозначно интерпретировать полученные данные в рамках теории БКШ.

Относительно слабое влияние давления на величину T_c слабодопированных празеодимом образцов может быть объяснено в рамках модели, предполагающей наличие сингулярности Ван Хофа в спектре носителей заряда [18,19], которая характерна для решеток с сильной связью. Как известно, для кристаллов с высокой $T_c \approx 90$ К уровень Ферми лежит в долине между двумя пиками плотности состояний, при этом плотность состояний на уровне Ферми $N(\epsilon_F)$ существенно зависит от величины, так называемой, орторомбической дисторсии $(a - b)/a$ [18]. Увеличение отношения $(a - b)/a$ приводит к увеличению расстояния между пиками плотности состояний и, соответственно, к уменьшению

$N(\epsilon_F)$ и T_c . Уменьшение же отношения $(a - b)/a$ приводит к сближению пиков плотности состояний, что приводит к росту $N(\epsilon_F)$ и T_c . Такая закономерность изменения T_c наблюдалась при исследовании влияния одноосного сжатия вдоль осей **a** и **b** на критическую температуру монокристаллов с $T_c \approx 90$ К [20]: при приложении нагрузки вдоль оси **a** критическая температура повышалась, а при приложении нагрузки вдоль оси **b** она уменьшалась. При воздействии гидростатического давления величина отношения $(a - b)/a$ изменяется слабо, поскольку она определяется только различием модулей сжатия вдоль осей **a** и **b**. Поэтому изменение критической температуры у образцов с высокой T_c при воздействии гидростатического давления относительно мало.

Для кристаллов с пониженной $T_c \approx 60$ К уровень Ферми может быть сдвинут с середины зоны (в том числе, вследствие допирования замещающими элементами [21]) и расположен в стороне от пика плотности состояний. Поэтому если величина критической температуры, в первую очередь, определяется плотностью электронных состояний, то смещение уровня Ферми в сторону пика плотности состояний при воздействии гидростатического давления может, тем самым, приводить к значительному возрастанию абсолютного значения dT_c/dP . Однако проверка справедливости этого предположения требует проведения дополнительных исследований влияния всестороннего сжатия на критическую температуру соединений $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, в том числе в более широком интервале концентраций празеодима.

1. J. Ashkenazi, *J. Supercond. Nov. Magn.* **24**, 1281 (2011).
2. S. Sadewasser, J.S. Schilling, A.P. Paulicas, and B.M. Veal, *Phys. Rev. B* **61**, 741 (2000).
3. R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, Z.F. Nazyrov, I.L. Goulatis, and A. Chroneos, *Physica B* **407**, 4470 (2012).
4. M. Akhavan, *Physica B* **321**, 265 (2002).
5. *Physical Properties High Temperature Superconductors I*, D.M. Ginsberg (ed.), World Scientific, Singapore (1989).
6. R.V. Vovk, Z.F. Nazyrov, I.L. Goulatis, and A. Chroneos, *Physica C* **485**, 89 (2013).
7. M.A. Obolenskii, A.V. Bondarenko, R.V. Vovk, and A.A. Prodan, *Fiz. Nizk. Temp.* **23**, 1178 (1997) [*Low Temp. Phys.* **23**, 882 (1997)].
8. G. Lacaye, R. Hermann, and G. Kaestener, *Physica C* **192**, 207 (1992).
9. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, I.L. Goulatis, and A.I. Chroneos, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **20**, 858 (2009).
10. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, Z.F. Nazyrov, I.L. Goulatis, A. Chroneos, and V.M. Pinto Simoes, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **23**, 1255 (2012).
11. A.L. Solovyev and V.M. Dmitriev, *Fiz. Nizk. Temp.* **32**, 753 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32** 576 (2006)].

12. R.V. Vovk, N.R. Vovk, O.V. Shekhovtsov, I.L. Goulatis, and A. Chroneos, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 085017 (2013).
13. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, and A. Chroneos, *Physica B* **422**, 33 (2013).
14. R.V. Vovk, N.R. Vovk, A.V. Samoilov, I.L. Goulatis, and A. Chroneos, *Solid State Commun.* **170**, 6 (2013).
15. W.L. McMillan, *Phys. Rev.* **167**, 331 (1968)
16. M.A. Obolenskiy, D.D. Balla, A.A. Zavgorodniy, R.V. Vovk, Z.F. Nazyrov, I.L. Goulatis, M. Januszczuk, and J.N. Latosińska, *Acta Phys. Polon. A* **122** 1111 (2012).
17. S.R. Evan, V.K. Ratti, and B.L. Gyorffy, *J. Phys. F* **3**, 199 (1973).
18. V.M. Gvozdicov, *Physica C* **235-240**, 2127 (1994).
19. A. Perali and G. Varelogiannis, *Phys. Rev. B* **61**, 3672 (2000).
20. U. Welp, M. Grimsditch, S. Flesher, W. Nessler, J. Downey, G.W. Crabtree, and J. Guimpel, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2130 (1992).
21. U. Schwingensclogl and C. Schuster, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 253111 (2012).

The effect of high pressure on critical temperature of $Y_{0.95}Pr_{0.05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals with a given topology of planar defects

G.Ya. Khadzhai, V.V. Sclyar, R.V. Vovk, Ya.V. Dovichpolova, and O.O. Chornovol-Tkachenko

The influence of high hydrostatic pressure up to 17 kbar on conductivity in the basal *ab*-plane of slightly Pr-doped ($x \approx 0.05$) $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single-crystal samples with the system of unidirectional twin boundaries is investigated. It is found that, in contrast to undoped $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ samples with an optimal oxygen content, the application of high pressure leads to a double increase of the values of pressure derivative dT_c/dP . Possible mechanisms of high pressure effects on T_c are discussed with taking into account the presence of singularities in the electron spectrum of the charge carriers.

PACS: **74.72.-h** Cuprate superconductors.

Keywords: YBaCuO single crystals, doping, hydrostatic pressure.