

Краткие сообщения

Эволюция электросопротивления монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с $\delta \approx 0,45$ в процессе приложения высокого гидростатического давления

Р.В. Вовк, Г.Я. Хаджай, М.А. Оболенский

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 27 июля 2011 г., после переработки 14 октября 2011 г.

Исследована температурная зависимость электросопротивления $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,55}$ в плоскости слоев при гидростатических давлениях до 10 кбар. Зависимости, полученные выше критической температуры сверхпроводящего перехода, могут быть с высокой точностью аппроксимированы в рамках модели ($s-d$)-рассеяния электронов на фононах. Приложение высокого давления приводит к уменьшению сопротивления, которое при высоких температурах существенно больше, чем при низких. Это может быть связано с ослаблением электрон-фононного взаимодействия при увеличении давления.

Досліджено температурну залежність електроопору $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,55}$ в площині шарів при гідростатичних тисках до 10 кбар. Залежності, які отримано вище температури надпровідного переходу, можуть бути з високою точністю апроксимовані у рамках моделі ($s-d$)-розсіяння електронів на фононах. Додаток високого тиску призводить до зменшення опору, який при високих температурах істотно більше, ніж при низьких. Це може бути пов'язано з послабленням електрон-фононної взаємодії при збільшенні тиску.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники.

Ключевые слова: электрон-фононное взаимодействие, электросопротивление, монокристаллы.

Несмотря на то, что с момента открытия высоко-температурной проводимости (ВТСП) [1] прошло уже более двух десятилетий, микроскопическая природа этого уникального явления все еще остается окончательно не выясненной. Согласно современным представлениям [2] считается, что ключом к пониманию природы ВТСП могут служить физические явления, наблюдаемые в нормальном состоянии при температурах вблизи и выше критической (T_c). К числу последних, в частности, можно отнести возникновение у ВТСП широкого температурного участка избыточной парапроводимости в базисной ab -плоскости [3], некогерентного поперечного электротранспорта [2], переходов вида металл–диэлектрик [4], псевдощелевой аномалии (ПЩ) и т.д. Все вышеперечисленные явления чрезвычайно важны для решения одной из основных прикладных и фундаментальных задач физики твердого тела — создания новых функциональных ма-

териалов с высокой токонесущей способностью. Большое значение при исследовании этих явлений имеет выяснение механизмов переноса заряда и рассеяния носителей. Неоценимую роль при этом играет применение высокого давления как инструмента, позволяющего не только проверить адекватность различных теоретических моделей, но и определить эмпирические пути улучшения критических параметров сверхпроводящих соединений, что особенно важно для их практического применения.

Самым перспективным для исследований в этом аспекте является соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (система 1–2–3), что связано с широкими возможностями варьирования его проводящих характеристик и критических параметров путем изменения степени кислородной нестехиометрии и легирования замещающими элементами [4,5]. Следует отметить, что до настоящего времени данные по изучению влияния давления на

нормальный электротранспорт в образцах системы 1–2–3 остаются в значительной степени противоречивыми. Очевидно, определенную роль здесь играет тот факт, что существенная часть экспериментального материала получена на керамических, пленочных и текстурированных образцах с различной технологической предысторией [6–9]. При этом в большинстве из этих работ исследовалось влияние давления на проводимость оптимально допированных кислородом образцов. Вместе с тем, с учетом вышесказанного, наиболее информативным представляется изучение именно образцов с пониженным содержанием кислорода, поскольку это не только позволяет выяснить роль и влияние структурных особенностей системы на формирование нормального и сверхпроводящего состояния, но и дает нам возможность моделирования их электротранспортных характеристик.

Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является исследование влияния высокого гидростатического давления до 11 кбар на проводящие характеристики в *ab*-плоскости монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с дефицитом кислорода $\delta \approx 0,45$ и критической температурой $T_c \approx 50$ К.

Монокристаллы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выращивали по раствор-расплавной технологии в золотом тигле [2,3]. Для проведения резистивных исследований отбирали кристаллы прямоугольной формы с характерными размерами $3 \times 0,5 \times 0,03$ мм. Минимальный размер кристалла отвечал направлению вдоль оси *c*. Для получения образцов с оптимальным содержанием кислорода отобранные кристаллы отжигали в потоке кислорода при температуре 400 °С на протяжении пяти суток. Для уменьшения содержания кислорода до $\delta \approx 0,45$ проводили их дополнительный отжиг в течение суток в атмосфере воздуха при температуре 600 °С с последующей закалкой. Электроконтакты для стандартной четырехзондовой схемы создавали с помощью нанесения серебряной пасты на поверхность кристалла и подсоединения золотых проводников диаметром 0,05 мм с последующим трехчасовым отжигом при температуре 200 °С в атмосфере кислорода. Такая процедура позволяла получать переходное сопротивление контактов менее 1 Ом и проводить резистивные измерения при транспортных токах до 10 мА в *ab*-плоскости.

Гидростатическое давление создавали в автономной камере типа поршень–цилиндр [3,10]. Величину давления измеряли с помощью манганинового манометра, температуру — медь-константановой термопарой, вмонтированной во внешнюю поверхность камеры на уровне расположения образца.

На рис. 1 представлены температурные зависимости электросопротивления в базисной плоскости $R_{ab}(T)$, измеренные при разных давлениях. По мере возрастания величины приложенного давления электросопротивление уменьшается — $dR_{300}/dP = -4,3 \cdot 10^{-3}$ Ом/кбар,

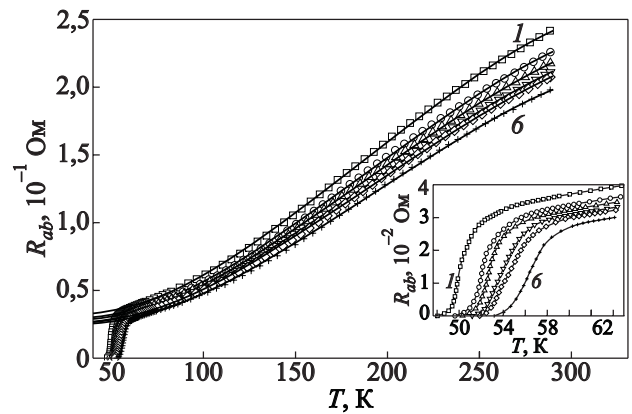


Рис. 1. Температурные зависимости электросопротивления $R_{ab}(T)$ монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, полученные при давлении P , кбар: 0, 2,9, 5,6, 6,9, 7,8 и 10,45 — кривые 1–6 соответственно. Сплошными линиями показана аппроксимация посредством соотношений (1) и (2).

а критическая температура (T_c) образца растет — $dT_c/dP = 0,54$ К/кбар (вставка к рис. 1), что согласуется с литературными данными [3,6–10].

Отметим, что уменьшение содержания кислорода до $\delta \approx 0,45$, помимо понижения T_c (от 92 до ~ 50 К), приводит к отклонению зависимостей $r_{ab}(T)$ книзу от линейного хода, который характерен для оптимально допированных образцов [2,3,6–9].

В [11,12] температурную зависимость сопротивления высокотемпературного сверхпроводника $YReBaCuO$ ($Re = Pr, Nd$) связали с наличием металлической и полупроводниковой фаз, причем сопротивление металлической фазы описывали как $\rho_0 + aT$, что характерно для рассеяния электронов фононами при высоких температурах ($T > \theta$).

В работе [13] температурная зависимость электросопротивления слоистого соединения $Nb_{1-x}Sn_xSe_2$ качественно аналогична нашим результатам (рис. 1), она описана в рамках предположения о рассеянии электронов фононами с учетом дополнительного вклада в проводимость электронных состояний зоны, энергия дна которой выше энергии Ферми [14].

Следуя этим работам, мы попытались описать экспериментальные кривые (рис. 1) выше сверхпроводящего перехода при помощи формулы

$$R = \frac{R_0 + R_3}{1 + C_4 \exp\left(-\frac{T_1}{T}\right)}. \quad (1)$$

Здесь

$$R_3 = C_3 \left(\frac{T}{\theta}\right)^{3\theta/T} \int_0^{\theta/T} \frac{X^3 e^X}{(e^X - 1)^2} dX \quad (2)$$

— сопротивление, обусловленное ($s-d$)-рассеянием электронов на фонах, параметр C_3 зависит от характеристик зонной структуры (эффективной массы d - и s -электронов, энергии Ферми и т.д.) [15]; R_0 — остаточное сопротивление; θ — температура Дебая; знаменатель $1 + C_4 \exp(-\frac{T_1}{T})$ связывается с дополнительным вкладом в проводимость электронных состояний зоны, энергия дна которой выше E_F на величину kT_1 . Аналогичный множитель был ранее использован в [14] для аппроксимации $R(T)$ слоистого $\text{Nb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ вблизи комнатных температур, где также наблюдали отклонение температурного хода сопротивления книзу от линейной зависимости. При этом следует отметить, что это соединение также имеет слоистую структуру и параметр анизотропии численно близкий соответствующему параметру ВТСП системы 1–2–3, а также характеризуется качественно подобным поведением экспериментальных резистивных кривых. Это позволяет сделать предположение о том, что такое поведение также может быть обусловлено похожими причинами.

На рис. 2 приведены температурные зависимости производных $d\rho/dT$ выше сверхпроводящего перехода для давлений 0 и 10,5 кбар. Видно, что производные, вычисленные по формулам (1) и (2), очень хорошо описывают экспериментальные значения, что является дополнительным свидетельством адекватности описания температурной зависимости сопротивления соотношениями (1), (2).

Таблица 1. Параметры аппроксимации температурной зависимости электросопротивления $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,55}$ при различных давлениях

№	P, кбар	ρ_0 , Ом	C_3 , Ом	θ , К	C_4	T_1 , К	ε , %
1	0	0,03085	1,1550	624	315	2520	0,48
2	2,9	0,0282	1,081	626	190	2420	0,62
3	5,6	0,02705	1,0615	632	80	2145	0,59
4	6,9	0,02510	1,0060	622	160	2385	0,73
5	7,8	0,02480	0,995	626	200	2465	0,81
6	10,45	0,02385	1,0040	650	265	2500	0,71

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что температура Дебая θ практически не зависит от давления и хорошо согласуется с литературными данными [16]. Остаточное сопротивление R_0 и параметр C_3 , характеризующие процессы рассеяния в образце, монотонно уменьшаются с ростом давления, в частности $dR_0/dP \approx -6,9 \cdot 10^{-4}$ Ом/кбар, что более чем на порядок медленнее, чем уменьшение R_{300} . Параметры C_4 и T_1 , характеризующие электронную структуру образцов, проходят через минимум вблизи 6 кбар.

Уменьшение R_0 свидетельствует об улучшении структуры образца под действием приложенного давления. Уменьшение величины C_3 может быть обусловлено уменьшением вероятности индуцированных фонами ($s-d$)-переходов [15]. С этим же может быть связано и быстрое уменьшение R_{300} по сравнению с R_0 .

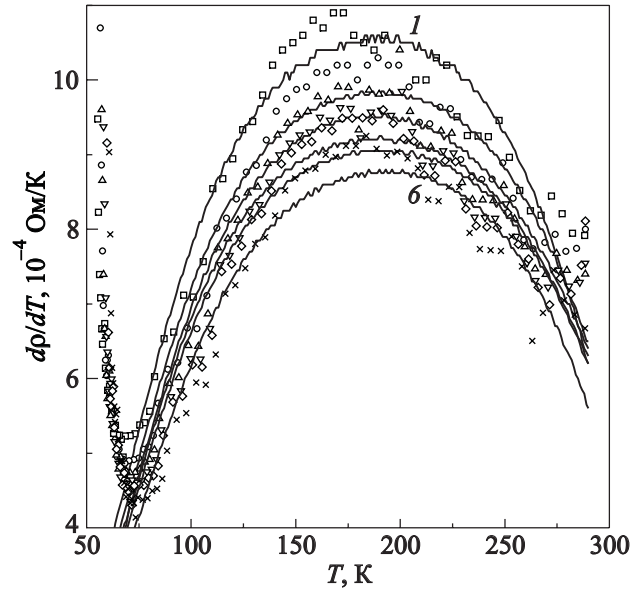


Рис. 2. Температурные зависимости производных $d\rho/dT$, вычисленных при различных давлениях, выше сверхпроводящего перехода. Обозначения кривых соответствуют рис. 1.

Параметры аппроксимации, приведенные в табл. 1, обеспечивают среднюю по исследованному интервалу температур относительную погрешность ε (последний столбец таблицы).

При этом необходимо отметить, что в некоторых работах по изучению влияния давления на резистивные параметры нестехиометричных по кислороду образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (см., например [17]) анализируется также и воздействие индуцированного давлением перераспределения лабильного кислорода на резистивные параметры образцов подобного состава. В то же время, как известно из литературы (см., например, [9,10]), при изучении влияния давления на образцы системы 1–2–3 следует разделять так называемый «истинный» (обусловленный непосредственно сжатием кристаллической решетки) и «релаксационный» (связанный с перераспределением лабильного кислорода) эффекты давления. Ввиду краткости нашего сообщения мы не проводим здесь подробное рассмотрение «релаксационного» эффекта давления, оставляя более

детальный анализ для расширенного сообщения, в котором будут представлены результаты, полученные для нескольких монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с различным содержанием кислорода.

На рис. 2 видно, что соотношения (1), (2) справедливы при $T > 60$ К. При дальнейшем приближении к сверхпроводящему переходу экспериментальные значения сопротивления отклоняются вниз от аппроксимации (1), (2), что связано, вероятно, с возникновением сверхпроводящих флуктуаций.

В заключение кратко просуммируем основные результаты, полученные в настоящей работе.

Температурная зависимость электросопротивления $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,55}$ (выше T_c) в плоскости слоев при гидростатических давлениях до 10 кбар может быть с высокой точностью аппроксимирована в рамках модели ($s-d$)-рассеяния электронов на фононах. Приложение высокого давления приводит к уменьшению сопротивления, причем при высоких температурах это уменьшение существенно больше, чем при низких. Указанное уменьшение может быть связано с ослаблением электрон-фононного взаимодействия при росте приложенного давления. При высоких температурах появляются признаки изменения механизма проводимости.

1. J.G. Bednorz and K.A. Müller, *Z. Phys.* **B64**, 189 (1986).
2. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.V. Samoilov, A. Chroneos, and V.M. Pinto Simoes, *J. Alloys Compd.* **464**, 58 (2008).
3. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.V. Samoilov, and A. Chroneos, *J. Alloys Compd.* **453**, 69 (2008).
4. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, I.L. Goulatis, V.I. Beletskii, and A. Chroneos, *Physica* **C469**, 203 (2009).
5. M.A. Obolenskii, R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, D.A. Lotnyk, and K.A. Kotvitskaya, *Physica* **B404**, 3516 (2009).
6. R. Griessen, *Phys. Rev.* **B36**, 5284 (1987).
7. J.A. Driessen, R. Griessen, N. Koeman, E. Salomons, R. Brouwer, D.G. Degroot, K. Heeck, H. Hemmes, and J. Rector, *Phys. Rev.* **B36**, 5602 (1987).
8. H.A. Borges and M.A. Continentino, *Solid State Commun.* **80**, 197 (1991).
9. W.H. Fietz, R. Quenzel, K. Grube, J. Metzler, T. Weber, and H.A. Ludwig, *Physica* **C235**, 1786 (1994).
10. R.V. Vovk, Z.F. Nazzyrov, M.A. Obolenskii, I.L. Goulatis, A. Chroneos, and V.M. Pinto Simoes, *Philos. Mag.* **91**, 2291 (2011).
11. В.А. Волошин, И.С. Абалешева, Г.Ю. Бочковая, Ф.А. Бойко, Н.А. Дорошенко, Я.И. Южелевский, *ФТТ* **38**, 1553 (1996).
12. Ф.А. Бойко, Г.В. Букин, В.А. Волошин, А.А. Гусев, *ФНТ* **28**, 138 (2002) [*Low Temp. Phys.* **28**, 95 (2002)].
13. В.И. Белецкий, О.А. Гавренко, Б.А. Мерисов, М.А. Оболенский, А.В. Сологубенко, Г.Я. Хаджай, Х.Б. Чашка, *ФНТ* **24**, 360 (1998) [*Low Temp. Phys.* **24**, 273 (1998)].
14. F. Claisse, M. Cormier, and C. Frigout, *High Temp.–High Press.* **4**, 395 (1972).
15. L. Colquitt, *J. Appl. Phys.* **36**, 2454 (1965).
16. D. Varshney, R.K. Singh, and A.K. Khaskalam, *Phys. Status Solidi* **B206**, 749 (1998).
17. R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, and M.A. Obolenskii, *J. Mater. Science Mater. Electron.* **22**, 20 (2011).

Evolution of electrical resistance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals ($\delta \approx 0.45$) with applying high hydrostatic pressure

R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, and M.A. Obolenskii

The temperature dependence of electrical resistance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,55}$ in the plane of layers is studied under hydrostatic pressures up to 10 kbar. The obtained dependences above superconducting transition can be approximated with a high precision within the framework of the model of ($s-d$)-scattering of electrons by phonons. An increase in pressure leads to reduction of resistance, which at high temperatures is much more than at low ones. This may be due to the weakening of electron-phonon interaction with increasing pressure.

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

Keywords: electron-phonon interaction, electrical resistance, single crystals.