

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПСЕВДОЩЕЛИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

Завгородняя Н.Н., Назиров З.Ф., Вовк Р.В.

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
г. Харьков-77

r.v.vovk@mail.ru

В работе исследовано влияние допирования празеодимом на проводимость в базисной плоскости ВТСП-монокристаллов $YBaCuO$. Установлено, что избыточная проводимость $\Delta\sigma(T)$ образцов в широком интервале температур $T_f < T < T^$ подчиняется экспоненциальной температурной зависимости $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$ и может быть интерпретирована в терминах теории кроссовера БКШ-БЭК, где T^* представлена, как среднеполевая температура сверхпроводящего перехода.*

Как известно, допирование соединения $YBaCuO$ замещающими элементами вызывает изменение плотности носителей тока, тепло-и электропроводности этого сверхпроводника. Важную роль при этом играет вид и концентрация примеси. Особый интерес, в этом аспекте, представляет частичная замена Y на Pr , которая, с одной стороны, приводит к подавлению сверхпроводимости (в отличие от случаев замены Y на остальные редкоземельные элементы), а с другой - позволяет сохранять практически неизменными параметры решетки и кислородный индекс δ [1,2]. В частности, исследования влияния примесей Pr на условия и режимы существования области псевдощелевого состояния (ПЩ) таких соединений [1] играет важную роль не только для прояснения природы высокотемпературной сверхпроводимости, но и для определения эмпирических путей повышения их критических параметров. Следует отметить, что к настоящему времени данные о степени влияния допирования Pr на ПЩ-состояние соединения $YBaCuO$ остаются в значительной степени противоречивыми. Очевидно, определенную роль здесь играет тот факт, что существенная часть экспериментального материала была получена на керамических, пленочных и текстурированных образцах различной технологической предыстории [3,4], имеющих высокое содержание межгранулярных связей. Как было показано в работе [5], при достаточно высокой точности измерений значения псевдощели в широком интервале температур можно определить из зависимостей $\rho_{ab}(T)$ (электросопротивление в базисной плоскости) при температурах ниже некоторого характерного значения T^* (температуры открытия псевдощели). В данной работе было исследовано влияние примесей Pr в широком интервале концентраций ($0.05 \leq z \leq 0.5$) на температурную зависимость псевдощели в монокристаллах $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с различной критической температурой (T_c) при протекании транспортного тока в базисной ab -плоскости.

Монокристаллы $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выращивали по раствор-расплавной технологии [1]. Для получения кристаллов с частичной заменой Y на Pr , $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, в начальную шихту добавляли Pr_5O_{11} в соответствующем процентном соотношении. Режимы выращивания и насыщение кислородом кристаллов $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ были такими же, как и для нелегированных монокристаллов [1]. Как исходные компоненты для выращивания кристаллов использовали соединения Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO и Pr_5O_{11} . Электросопротивление в ab -плоскости измеряли по стандартной 4-х контактной методу дици на постоянном токе до 10 мА. Температуру образца определяли платиновым терморезистором.

Как показал анализ температурных зависимостей удельного электросопротивления в ab -плоскости $\rho_{ab}(T)$ кристаллов $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, по мере роста содержания празеодима, электросопротивление образцов возрастает, а критическая температура понижается, что согласуется с литературными данными [2-4]. При этом следует отметить, что при концен-

трациях празеодима ($0.0 \leq z \leq 0.34$) зависимости $\rho_{ab}(T)$ являются квазиметаллическими, в то время как при дальнейшем росте концентрации празеодима эти кривые приобретают вид, который характеризуется наличием участка с характерным термоактивационным прогибом. При этом, при понижении температуры ниже некоторого характерного значения T^* происходит отклонение $\rho_{ab}(T)$ от линейной зависимости, что свидетельствует о появлении некоторой избыточной проводимости, которая, как уже отмечалось выше, обусловлена переходом к псевдощелевому режиму (ПЩ) [5]. При этом для образца с примесью празеодима $0.1 \leq z$ область линейной зависимости $\rho_{ab}(T)$ существенно расширяется по сравнению с беспримесным кристаллом, а температура T^* смещается в область низких температур более чем на 30 К. Это, в свою очередь, свидетельствует о соответствующем сужении температурного интервала существования избыточной проводимости. Следует отметить, что подобное поведение кривых $\rho_{ab}(T)$ достаточно необычным, поскольку до настоящего времени при допировании соединений $YBaCuO$ празеодимом при концентрациях $z \geq 0.2$ наблюдался обратный эффект смещения T^* в сторону высоких температур [2-4].

Температурная зависимость избыточной проводимости обычно определяется из равенства:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 \quad (1)$$

где $\sigma_0 = \rho_0^{-1} = (A + BT)^{-1}$ - проводимость, определяемая экстраполяцией линейного участка в нулевое значение температуры, а $\sigma = \rho^{-1}$ - экспериментальное значение проводимости в нормальном состоянии. Как показал анализ, в достаточно широком температурном интервале эти кривые хорошо описываются экспоненциальной зависимостью вида:

$$\Delta\sigma \sim \exp(\Delta^*_{ab}/T), \quad (2)$$

где Δ^*_{ab} - величина, определяющая некоторый термоактивационный процесс через энергетическую щель - «псевдощель».

Экспоненциальная зависимость $\Delta\sigma(T)$ уже наблюдалась ранее на пленочных образцах $YBaCuO$ [5]. Как было показано в [5], аппроксимация экспериментальных данных может быть существенно расширена за счет введения множителя $(1 - T/T^*)$. В этом случае, избыточная проводимость оказывается пропорциональной плотности сверхпроводящих носителей $n_s \sim (1 - T/T^*)$ и обратно пропорциональной числу пар $\sim \exp(-\Delta^*/kT)$, разрушенных тепловым движением:

$$\Delta\sigma \sim (1 - T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T), \quad (3)$$

При этом T^* рассматривается как среднеполевая температура сверхпроводящего перехода, а температурный интервал $T_c < T < T^*$, в котором существует псевдощелевое состояние, определяется жесткостью фазы параметра порядка, что, в свою очередь, зависит от дефицита кислорода или концентрации допирующего элемента. Таким образом, используя методику, предложенную в [5] по экспериментальной кривой $\ln\Delta\sigma$ можно построить температурную зависимость $\Delta^*_{ab}(T)$ непосредственно до T^* .

Температурные зависимости псевдощели были ранее получены в работе [6] в рамках теории кроссовера БКШ-БЭК. В общем виде эти зависимости описываются уравнением:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \Delta(0) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{T}{\Delta(0)}} \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{T}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\sqrt{x_0^2 + 1} - 1}{T/\Delta(0)}}\right)\right], \quad (4)$$

где $x_0 = \mu/\Delta(0)$ (μ - химпотенциал системы носителей; $\Delta(0)$ - величина энергетической щели при $T=0$), а $\operatorname{erf}(x)$ - функция ошибок. В предельном случае $x_0 \rightarrow \infty$ (слабого спаривания) аналитическое выражение (4) приобретает вид:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \Delta(0) \sqrt{2\pi\Delta(0)T} \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{T}\right], \quad (5)$$

хорошо известный в теории БКШ. В то же время для предела сильных взаимодействий в 3-х мерном случае ($x_0 < -1$) формула (4) преобразуется в:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \frac{8}{\sqrt{\pi}} \sqrt{-x_0} \left(\frac{\Delta(0)}{T} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{\sqrt{\mu^2 + \Delta^2(0)}}{T} \right] \quad (6)$$

Как показал анализ, в случае образцов слабо допированных празеодимом ($z \leq 0.2$) температурные зависимости псевдощели показывают довольно значительное расхождение с теорией [6], как это уже наблюдалось ранее для пленочных образцов YBaCuO с отклонением от кислородной стехиометрии [5]. Такая же тенденция наблюдается и для образцов с максимальным содержанием празеодима ($z \approx 0.5$). При этом характерный максимум, наблюдаемый для таких образцов, может быть обусловлен переходом к так называемому, SDW-режиму, как это уже наблюдалось в [7] для недодопированных образцов новых ВТСП-соединений системы SmFeAsO. В то же время, для образцов со средним составом ($0.2 \leq z \leq 0.5$), учитывая некоторую условность определения величины открытия псевдощели T^* по отклонению зависимости $\rho_{ab}(T)$ от линейного поведения, согласие эксперимента с теорией можно считать удовлетворительным.

Литература

1. *Obolenskii M.A., Vovk R.V., Bondarenko A.V., and Chebotaev N.N.*/Localization effects and pseudogap state in YBa₂Cu₃O_{7- δ} single crystals with different oxygen content.// ФНТ, т.32, №6, с.746-752 (2006).
2. *Radousky H.B.*. A review of the superconducting and normal state properties of Y_{1-x}Pr_xBa₂Cu₃O₇// J.Mater. Res. Vol.7, №7, P. 1917-1955 (1992).
3. *Kebede A.et al.*// Magnetic ordering and superconductivity in Y_{1-y}Pr_yBa₂Cu₃O₇./ Phys. Rev. B 40, p.4453-4462 (1991).
4. *Ginsberg D.M. (ed)*, Physical properties high temperature superconductors I, World Scientific, Singapore (1989).
5. *Прокофьев Д.Д., Волков М.П., Бойков Ю.А.* Величина и температурная зависимость псевдощели в YBaCuO, полученные из резистивных измерений // ФТТ. - 2003. – Т.45, №7. - С.1168-1176.
6. *Babaev E., Kleinert H.* Nonperturbative XY-model approach to strong coupling superconductivity in two and three dimensions // Phys. Rev. B. - Vol.59, -1999. – P.12083-12089.
7. *Июмов Ю. А., Курмаев Э. З.* Новый класс высокотемпературных сверхпроводников в FeAs-системах // УФН. -178,№12. – С. 1307-1334 (2008).