

PACS: 74.72.-h

Р.В. Вовк<sup>1</sup>, З.Ф. Назиров<sup>1</sup>, А.Г. Петренко<sup>2</sup>

ПОПЕРЕЧНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ПСЕВДОЩЕЛЬ  
В МОНОКРИСТАЛЛАХ  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$   
С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРАЗЕОДИМА

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина

<sup>2</sup>Донецкий национальный университет  
ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83055, Украина

Статья поступила в редакцию 9 марта 2011 года

*Исследованы температурные зависимости электросопротивления вдоль оси  $c$  монокристаллов  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с различным содержанием празеодима  $0.0 \leq z \leq 0.5$ . Обнаружено, что в случае соединения  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при увеличении концентрации празеодима происходит усиление процессов локализации носителей, которое сопровождается переходом от псевдощелевого (ПЩ) режима к режиму прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка.*

**Ключевые слова:** ВТСП, псевдощель, некогерентный электротранспорт, монокристаллы  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , прыжковая проводимость, локализация носителей

Изучение ПЩ-аномалии продолжает оставаться одним из наиболее актуальных направлений физики высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Но, несмотря на большой накопленный литературный материал, до сих пор неясными остаются как сама природа происхождения ПЩ, так и вопрос о ее роли в формировании сверхпроводящего состояния в ВТСП. Наиболее перспективными для изучения в этом аспекте являются соединения  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , что обусловлено возможностью широкого варьирования их состава путем замены иттрия его изоэлектронными аналогами либо изменения степени кислородной нестехиометрии. До настоящего времени считалось [1], что в области электротранспортных свойств ПЩ проявляется в отклонении температурной зависимости электросопротивления вниз от линейной зависимости. Однако, как было установлено в недавней работе [2], ПЩ может оказывать существенное влияние на реализацию различных режимов некогерентного переноса заряда поперек базисной плоскости. Так, согласно [2] температурная зависимость поперечного электросопротивления  $\rho_c$  в случае соединения  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  должна подчиняться соотношению

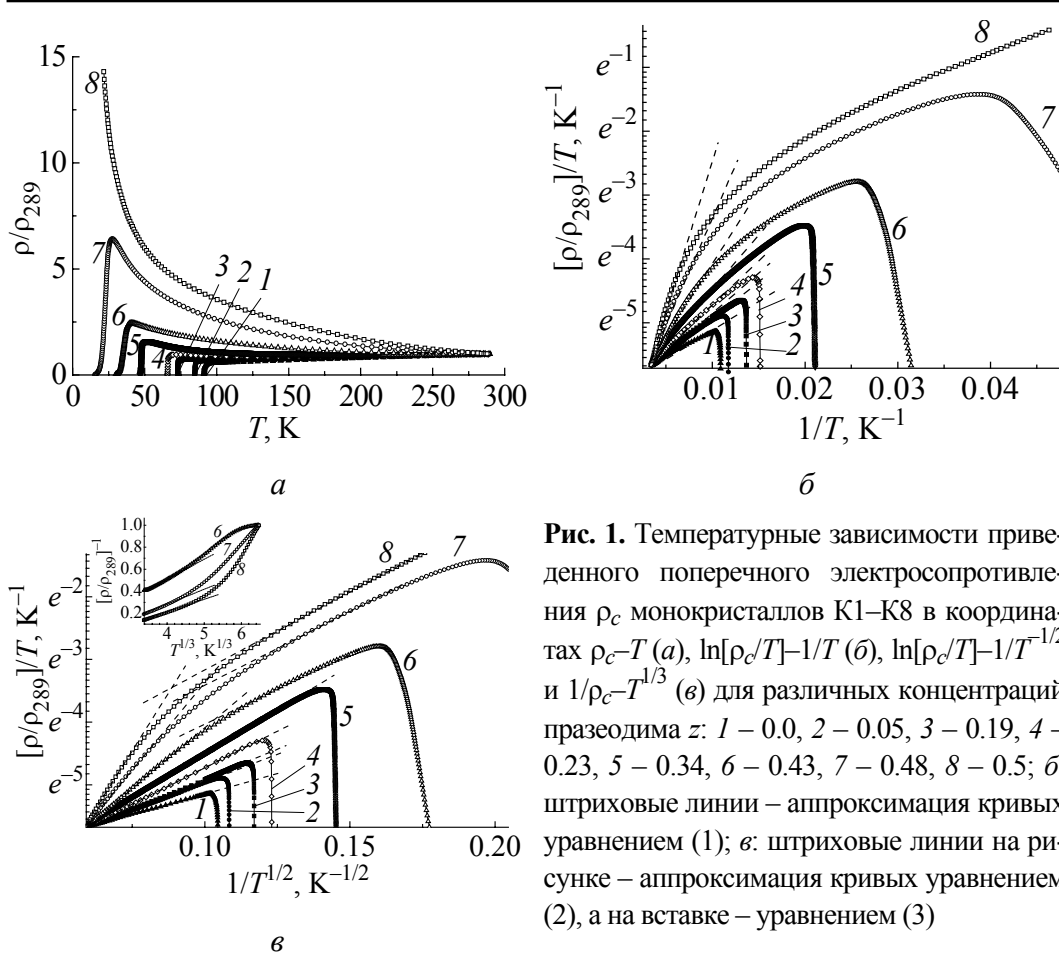
$$\rho_c(T) = \frac{\alpha T}{\Delta^*} \exp\left(\frac{\Delta^*}{T}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от содержания кислорода,  $\Delta^*$  – некоторая величина, определяющая термоактивационный процесс через энергетическую щель – «псевдощель».

Как отмечалось выше, характерной особенностью соединения  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  является относительная простота замены иттрия другими редкоземельными элементами [3]. Особый интерес представляет частичная замена  $Y$  на  $Pr$ , которая, с одной стороны, приводит к подавлению сверхпроводимости [4] (в отличие от случаев замены  $Y$  на остальные редкоземельные элементы), а с другой – позволяет сохранять практически неизменными параметры решетки и кислородный индекс соединения [5]. В частности, исследование влияния примесей  $Pr$  на условия и режимы существования области ПЩ-состояния таких соединений [5] играет важную роль не только для выяснения природы ВТСП, но и для определения эмпирических путей повышения их критических параметров. Следует отметить, что до настоящего времени данные о степени влияния допирования  $Pr$  на проводящие свойства 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 предистории, обладающих высоким содержанием межгранулярных связей. Ввиду вышесказанного в настоящей работе была поставлена цель исследования поперечной проводимости в монокристаллах  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с различной степенью допирования празеодимом.

Монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  выращивали по раствор-расплавной технологии [4]. Для получения кристаллов  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с частичной заменой  $Y$  на  $Pr$  в начальную шихту добавляли  $Pr_5O_{11}$  в соответствующем процентном соотношении. Режимы выращивания и насыщения кислородом этих кристаллов были такими же, как и для легированных монокристаллов [4]. В качестве начальных компонентов для выращивания кристаллов использовали соединения  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  и  $Pr_5O_{11}$ . Характерные размеры кристаллов составляли  $2.5 \times 1.5 \times 0.4$  mm (наименьший размер соответствовал направлению вдоль оси  $c$ ). Электросопротивление измеряли по восьмиконтактной методике, описанной в [3]. Температуру измеряли платиновым терморезистором.

На рис. 1,а показаны температурные зависимости  $\rho_c$  восьми образцов с различным содержанием празеодима. Видно, что по мере увеличения концентрации празеодима электросопротивление образцов возрастает, а критическая температура понижается, что согласуется с литературными данными [4,5]. При этом сами зависимости  $\rho_c(T)$  испытывают переход от квазиметаллического к полупроводниковому поведению с характерной большой отрицательной кривизной экспериментальных кривых.



**Рис. 1.** Температурные зависимости приведенного поперечного электросопротивления  $\rho_c$  монокристаллов К1–К8 в координатах  $\rho_c-T$  (а),  $\ln[\rho_c/T]-1/T$  (б),  $\ln[\rho_c/T]-1/T^{1/2}$  и  $1/\rho_c-T^{1/3}$  (в) для различных концентраций празеодима: 1 – 0.0, 2 – 0.05, 3 – 0.19, 4 – 0.23, 5 – 0.34, 6 – 0.43, 7 – 0.48, 8 – 0.5; б: штриховые линии – аппроксимация кривых уравнением (1); в: штриховые линии на рисунке – аппроксимация кривых уравнением (2), а на вставке – уравнением (3)

На рис. 1,б показаны эти же зависимости в координатах  $\ln(\rho/T)-1/T$ , что соответствует их описанию посредством соотношения (1). Видно, что в области малых концентраций празеодима ( $z \leq 0.23$ ) и относительно высоких температур эти кривые достаточно хорошо спрямляются. В то же время по мере дальнейшего роста концентрации празеодима происходит значительное отклонение экспериментальных кривых от этой зависимости. Как видно из рис. 1,в, на котором показаны эти же кривые в координатах  $\ln(\rho/T)-1/T^{0.5}$ , зависимости  $\rho_c(T)$ , измеренные при относительно большой ( $z \geq 0.34$ ) концентрации празеодима, заметно лучше описываются посредством соотношения для прыжковой проводимости:

$$\rho_c(T) = T \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}, \tag{2}$$

носящего название «закон 1/2» [3,6]. Здесь  $T_0$  – энергия активации. Как следует из рисунка, для кривых с концентрацией  $z \geq 0.43$  при температурах вблизи 94–127 К наблюдается изменение угла наклона более чем в два раза, что, в свою очередь, свидетельствует об уменьшении энергии активации и отражает наличие фазовых переходов, наблюдавшихся ранее в работе [7] для монокристаллов YBaCuO. Согласно [7] переходы такого типа

оказывают влияние на кинетику переноса заряда и согласно классическим критериям Мотта [8] могут служить достоверным признаком реализации в системе перехода металл–диэлектрик «андерсоновского» типа.

Действительно, как показал проведенный анализ наших экспериментальных данных (вставка на рис. 1,б), в области температур, в которой наблюдается систематическое отклонение экспериментальных точек от линейной зависимости в координатах  $\ln[\rho_{ab}/T]-1/T$ , наши кривые достаточно хорошо описываются при помощи асимптотической зависимости – так называемого закона «1/3» [9]:

$$1/\rho \propto T^{1/3}. \quad (3)$$

Такое поведение зависимостей  $\rho(T)$  уже наблюдалось ранее экспериментально для аморфных сплавов Gd–Sn [10]. Согласно [9] зависимость вида (3) следует из скейлингового описания окрестности перехода металл–диэлектрик в случае реализации в системе так называемого «критического» режима, при котором проводимость носит в основном квантовый характер. В данной работе мы не проводим подробное рассмотрение этого вопроса, оставляя более детальный анализ для отдельного сообщения.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в случае соединения  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  по мере увеличения концентрации празеодима происходит усиление процессов локализации носителей, которое сопровождается переходом от ПЦ-режима к режиму прыжковой проводимости. Подобная зависимость свидетельствует о том, что механизм транспорта носителей поперек слоев осуществляется с помощью термоактивационных прыжков с переменной длиной. Показатель 1/2 свидетельствует о том, что прыжковая проводимость одномерна и/или что кулоновское взаимодействие играет в поперечном транспорте существенную роль. Недавно подобную зависимость обнаружили также в некоторых слоистых органических сверхпроводниках в перпендикулярном магнитном поле [11], что может дать ключ к разгадке некогерентного транспорта поперек слоев. Это явление еще раз подчеркивает отличие ВТСП-купратов от фермижидкостных металлов, поскольку температурная зависимость сопротивления вдоль и поперек слоев не одинакова и отличается от характерной для обычных металлов.

1. А.А. Завгородний, А.В. Самойлов, Р.В. Вовк, М.А. Оболенский, З.Ф. Назиров, А.Г. Петренко, V.M. Pinto Simoes, ФТВД **20**, № 4, 80 (2010).
2. H.G. Luo, H.P. Su, and T. Xiang, Phys. Rev. **B77**, 014529 (2008).
3. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.V. Samoilov, A.I. Chronos, V.M. Pinto Simoes, J. Alloys Comp. **464**, 58 (2008).
4. R.V. Vovk, M.A. Obolenskiy, A.A. Zavgorodniy, D.A. Lotnyk, K.A. Kotvitskaya, Physica **B404**, 3516 (2009).
5. H.B. Radousky, J. Mater. Res. **7**, 1917 (1992).

6. М.З. Мейлихов, ЖЭТФ **115**, 1484 (1999).
7. М.А. Оболенский, А.В. Бондаренко, М.О. Зубарева, ФНТ **15**, 1152 (1989).
8. N.F. Mott, Metal-insulator transition, World Scientific, London (1974).
9. В.Ф. Гантмахер, В.Н. Зверев, В.М. Теплинский, О.И. Баркалов, ЖЭТФ **103**, 1460 (1993).
10. Y. Imry, J. Appl. Phys. **52**, 1817 (1981).
11. V.M. Gvozdkov, Phys. Rev. **B76**, 235125 (2007).

*P.V. Vovk, Z.F. Nazirov, A.G. Petrenko*

### ПОПЕРЕЧНА ПРОВІДНІСТЬ І ПСЕВДОЩІЛИНА У МОНОКРИСТАЛАХ $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ З РІЗНИМ ВМІСТОМ ПРАЗЕОДИМУ

Досліджено температурні залежності електроопору вздовж осі  $c$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  з різним вмістом празеодиму  $0.0 \leq z \leq 0.5$ . Виявлено, що у разі сполуки  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при збільшенні концентрації празеодиму відбувається посилення процесів локалізації носіїв, яке супроводжується переходом від псевдощільного (ПЩ) режиму до режиму стрибкової провідності зі змінною довжиною стрибка.

**Ключові слова:** ВТНП, псевдощільина, некогерентний електротранспорт, монокристали  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , стрибкова провідність, локалізація носіїв

*R.V. Vovk, Z.F. Nazirov, A.G. Petrenko*

### TRANSVERSAL CONDUCTIVITY AND PSEUDOGAP IN THE $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ SINGLE CRYSTALS WITH DIFFERENT PRASEODYMIUM CONTENT

In the present work, the temperature dependence of the resistivity along the  $c$ -axis is investigated in the  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals with different praseodymium content  $0.0 \leq z \leq 0.5$ . It is determined, that in case of the  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  compounds with the increase of the praseodymium contents, there is a reinforcement of the processes of the carrier localization. This is accompanied in turn by the transition from a pseudogap regime to the variable-range-hopping regime.

**Keywords:** HTSC, pseudogap, incoherent electrotransport,  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals, hopping conductivity, localization of carriers

**Fig. 1.** Temperature dependences of reduced transversal resistivity of K1–K8 single crystals in co-ordinates of  $\rho_c-T$  (a),  $\ln[\rho_c/T]-1/T$  (b),  $\ln[\rho_c/T]-1/T^{-1/2}$  and  $1/\rho_c-T^{1/3}$  (c) at varied praseodium concentrations  $z$ : 1 – 0.0, 2 – 0.05, 3 – 0.19, 4 – 0.23, 5 – 0.34, 6 – 0.43, 7 – 0.48, 8 – 0.5; b: dotted lines present the approximation of the curves with equation (1); c: dotted lines in the figure are approximations of the curves with equation (2) and with equation (3) in the insertion