

УДК 538.945+537.312.62

**ВПЛИВ ДОПУВАННЯ ПРАЗЕОДИМОМ НА ТЕМПЕРАТУРНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ ПСЕВДОЩІЛИНИ МОНОКРИСТАЛІВ  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$** **О.В. Самойлов, А.А. Завгородній, Р.В. Вовк, М.О. Оболенський, К.А. Котвицька, В.Ю. Гресь***Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна  
Україна, 61077, м. Харків-77, пл. Свободи 4  
e-mail: [Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua](mailto:Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua)  
Надійшла до редакції 1 грудня 2009 р.*

У роботі досліджено вплив допування празеодимом на провідність в базисній площині ВТНП-монокристалів  $YBaCuO$ . Встановлено, що надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  зразків в широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  підкоряється експоненціальній температурній залежності  $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$  і може бути інтерпретована в термінах теорії кросовера БКШ-БЕК, де  $T^*$  представлена, як середньольова температура надпровідного переходу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** надлишкова провідність, допування, монокристали  $YBaCuO$ , високотемпературна надпровідність, кросовер, псевдощілинний стан.

**EFFECT OF DOPING BY PRAZEODIMOM ON TEMPERATURE DEPENDENCE OF PSEUDOGAP IN  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  SINGLE CRYSTALS****A.V. Samoylov, A.A. Zavgorodniy, R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, K.A. Kotvitskaya, V.Yu. Gres'***V.N. Karazin Kharkov National University  
4, Svoboda sq., 61077, Kharkiv, Ukraine*

In present work we have investigated the conductivity in the basis plane of the doped by Pr and of  $YBaCuO$  single crystals. It is shown, that the excess conductivity for the analyzed samples shows dependence  $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$  in a wide temperature range  $T_f < T < T^*$ , where  $T^*$  is the mean field temperature of superconducting transition. The temperature dependence of the pseudogap can be satisfactorily described in terms of the BCS-BEC crossover theoretical model.

**KEY WORDS:** excess conductivity, doping,  $YBaCuO$  single crystals, high temperature superconductivity, crossover, pseudogap state.

**ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ ПРАЗЕОДИМОМ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ПСЕВДОЩЕЛИ МОНОКРИСТАЛЛОВ  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$** **А.В.Самойлов, А.А.Завгородній, Р.В.Вовк, М.А.Оболенский, К.А. Котвицкая, В.Ю. Гресь***Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина  
Украина, 61077, г. Харьков-77, пл. Свободы 4*

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 кросовера БКШ-БЭК, где  $T^*$  представлена, как среднеполевая температура сверхпроводящего перехода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** избыточная проводимость, допирование, монокристаллы  $YBaCuO$ , високотемпературная сверхпроводимость, кроссовер, псевдощелевое состояние.

Як відомо, допування сполуки  $YBaCuO$  заміщаючими елементами викликає зміну густини носіїв струму, тепло- та електропровідності цього надпровідника. Важливу роль при цьому відіграє вид і концентрація домішки. Особливий інтерес, в цьому аспекті, представляє часткова заміна  $Y$  на  $Pr$ , яка, з одного боку, приводить до пригнічення надпровідності (на відміну від випадків заміни  $Y$  на решту рідкоземельних елементів), а з іншою – дозволяє зберігати практично незмінними параметри решітки і кисневий індекс  $\delta$  [1,2]. Зокрема, дослідження впливу домішок  $Pr$  на умови і режими існування області псевдощілинного стану (ПЩ) таких сполук [1] відіграє важливу роль не тільки для прояснення природи високотемпературної надпровідності, але і для визначення емпіричних шляхів підвищення їх критичних параметрів. Слід зазначити, що до теперішнього часу дані про ступінь впливу допування  $Pr$  на ПЩ-стан сполуки  $YBaCuO$  залишаються у значній мірі суперечливими. Очевидно, певну роль тут відіграє той факт, що істотна частина експериментального матеріалу була одержана на керамічних, пливкових і текстурованих зразках різної технологічної передісторії [3,4], що мають високий вміст міжгранулярних зв'язків. Як було показано в роботі [5], при достатньо високій точності вимірювань значення псевдощілини в широкому інтервалі температур можна визначити із залежностей  $\rho_{ab}(T)$  (електроопір у базисній площині) при температурах нижчих за деяке характерне значення  $T^*$  (температуру відкриття псевдощілини).

Мета роботи: дослідження впливу домішок  $Pr$  в широкому інтервалі концентрацій ( $0,05 \leq z \leq 0,5$ ) на температурну залежність псевдощілини у монокристалах  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  з різною критичною температурою

( $T_c$ ) при протіканні транспортного струму в базисній аб-площині.

### МАТЕРІАЛИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Монокристали  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  вирощували за розчин-розплавною технологією [1]. Для отримання кристалів з частковою заміною Y на Pr,  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , у початкову шихту додавали  $Pr_5O_{11}$  у відповідному процентному співвідношенні. Режими вирощування і насичення киснем кристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  були такими ж, як і для нелегованих монокристалів [1]. Як початкові компоненти для вирощування кристалів використовували сполуки  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  і  $Pr_5O_{11}$ . Електроопір у аб-площині вимірювали по стандартній 4-х контактній методиці на постійному струмі до 10 мА. Температуру зразка визначали платиновим терморезистором.

### РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Температурні залежності питомого електроопору у аб-площині  $\rho_{ab}(T)$  кристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  показані на рис.1. Видно, що, по мірі зростання вмісту празеодиму, електроопір зразків зростає, а критична температура знижується, що узгоджується з літературними даними [2]. При цьому слід зазначити, що при концентраціях празеодиму ( $0,0 \leq z \leq 0,34$ ) залежності  $\rho_{ab}(T)$  є квазіметалевими, в той час як при подальшому зростанні концентрації празеодиму ці криві набувають виду, який характеризується наявністю ділянки з характерним термоактиваційним прогином.

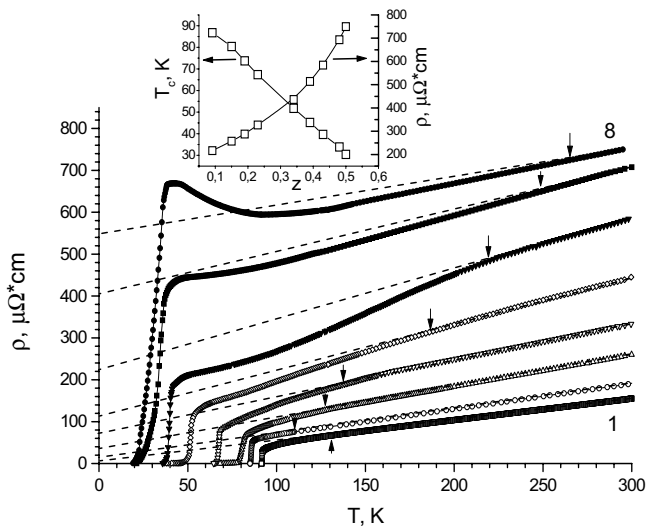


Рис. 1. Температурні залежності надлишкової провідності  $\Delta\sigma(T)$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  для  $z=0,09; 0,15; 0,19; 0,23; 0,34; 0,39; 0,43; 0,5$  – криві 1-8, відповідно. Стрілками показані температури переходу в псевдоцілінний режим  $T^*$ . Пунктирними лініями зображена екстраполяція лінійної ділянки в нульове значення температури. На вставці показані концентраційні залежності електроопору  $\rho_{ab}(300)$  і  $T_c$  цих зразків.

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

де  $\sigma_0 = \rho_0^{-1} = (A + BT)^{-1}$  – провідність, що визначається екстраполяцією лінійної ділянки у нульове значення температури, а  $\sigma = \rho^{-1}$  – експериментальне значення провідності у нормальному стані. Як показав аналіз, у достатньо широкому температурному інтервалі ці криві добре описуються експоненціальною залежністю виду:

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

де  $\Delta^*_{ab}$  – величина, що визначає деякий термоактиваційний процес через енергетичну щілину – «псевдоціліну».

Експоненціальна залежність  $\Delta\sigma(T)$  вже спостерігалася раніше на плівкових зразках  $YBaCuO$  [5]. Як було показано в [5], апроксимація експериментальних даних може бути істотно розширена за допомогою введення співмножника  $(1 - T/T^*)$ . В цьому випадку, надлишкова провідність виявляється пропорційною густині надпровідних носіїв  $n_s \sim (1 - T/T^*)$  і обернено пропорційною числу пар  $\sim \exp(-\Delta^*/kT)$ , зруйнованих тепловим рухом:

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

Як видно з рис.1, при зниженні температури нижче за деяке характерне значення  $T^*$  відбувається відхилення  $\rho_{ab}(T)$  від лінійної залежності, що свідчить про появу деякої надлишкової провідності, яка, як вже наголошувалося вище, зумовлена переходом до псевдоцілінного режиму (ПЦ) [5]. При цьому для зразка з домішкою празеодима  $0,1 \leq z$  область лінійної залежності  $\rho_{ab}(T)$  істотно розширюється у порівнянні з бездомішковим кристалом, а температура  $T^*$  зміщується в область низьких температур більше ніж на 30 К. Це, у свою чергу, свідчить про відповідне звуження температурного інтервалу існування надлишкової провідності. Слід відзначити, що подібна поведінка кривих  $\rho_{ab}(T)$  є достатньо незвичайною, оскільки до теперішнього часу при добуванні сполук  $YBaCuO$  празеодимом при концентраціях  $z \geq 0,2$  спостерігався зворотний ефект зміщення  $T^*$  у бік високих температур [6].

Температурна залежність надлишкової провідності зазвичай визначається з рівності:

При цьому  $T^*$  розглядається як середньопольова температура надпровідного переходу, а температурний інтервал  $T_c < T < T^*$ , у якому існує псевдоцілинний стан, визначається жорсткістю фази параметра порядку, що, в свою чергу залежить від дефіциту кисню або концентрації допуючого елемента. Таким чином, використовуючи методику, запропоновану в [5] по експериментальній кривій  $\ln \Delta \sigma$  можна побудувати температурну залежність  $\Delta^*_{ab}(T)$  безпосередньо до  $T^*$ .

На рис. 2 показано температурні залежності псевдоцілини у зведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато оддалік  $T^*$ ). Температурні залежності псевдоцілини були раніше одержані в роботі [7] в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК. У загальному вигляді ці залежності описуються рівнянням:

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

де  $x_0 = \mu/\Delta(0)$  ( $\mu$  – хімпотенціал системи носіїв;  $\Delta(0)$  – величина енергетичної щільності при  $T=0$ ), а  $\operatorname{erf}(x)$  – функція похибок.

У граничному випадку  $x_0 \rightarrow \infty$  (слабкого спаровування) аналітичний вираз (4) набуває виду:

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

добре відомого у теорії БКШ. В той же час для межі сильних взаємодій в 3-х мірному випадку ( $x_0 < -1$ ) формула (4) переходить в:

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

Залежності  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно (6) для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0)=10$  (межа БКШ), -2, -5, -10 (межа БЕК) показані на рис.2 пунктирними лініями. Видно, що у випадку зразків слабо допованих празеодимом ( $z \leq 0.2$ , криві 1-3) температурна залежність псевдоцілини показує досить значну розбіжність з теорією [7], як це вже спостерігалось раніше для плівкових зразків YBaCuO з близьким рівнем відхилення від кисневої стехіометрії [5]. Така ж тенденція спостерігається і для зразків з максимальним вмістом празеодиму ( $z \approx 0.5$ , криві 8,9). При цьому характерний максимум, що спостерігається для таких зразків, може бути зумовленим переходом до, так званого, SDW-режиму, як це вже спостерігалось в [8] для недопованих зразків нових ВТНП-сполук системи SmFeAsO. В той же час, для зразків з середнім складом ( $0.2 \leq z \leq 0.5$ , криві 4-7), враховуючи деяку умовність визначення величини відкриття псевдоцілини  $T^*$  по відхиленню залежності  $\rho_{ab}(T)$  від лінійної поведінки, узгодження експерименту з теорією можна вважати задовільним.

Як видно з рис. 1, по мірі наближення до  $T_c$  відбувається різке зростання величини  $\Delta \sigma$ . З теорії [9] відомо, що поблизу  $T_c$  надлишкова провідність зумовлена процесами флуктуаційного спаровування носіїв. Якщо визначити температуру переходу з ПЩ у ФП-режим  $T_f$  по точці відхилення величини  $\ln \Delta \sigma$  вгору від лінійної залежності  $\ln \Delta \sigma(1/T)$  [4] можна оцінити відносну протяглість існування ПЩ-режиму як:  $t^* = (T^* - T_f)/T_f$ . Результати розрахунків показують, що при зростанні ступеня допування празеодимом відбувається загальне відносне розширення температурної області реалізації ПЩ, від  $t^* = 0.530$  до 1,874 для кристалів з  $z=0$  і  $z \approx 0.35$ . В той же час слід зазначити, що при малому допуванні празеодимом відбувається загальне відносне звуження температурної області реалізації ПЩ більше ніж удвічі до  $t^* = 0.243$ , при одночасному відносному розширенні області існування ФП, до 0,041.

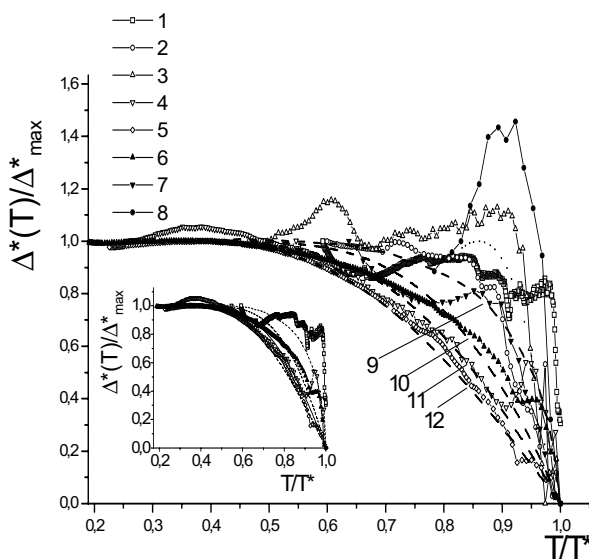


Рис. 2. Температурні залежності псевдоцілини кристалів K1, K2 в зведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато оддалік  $T^*$ ). На вставці виділені криві для нульової і проміжних концентрацій празеодима. Нумерація кривих на рисунку і вставці відповідає нумерації на рис. 1. Пунктирними лініями показані залежності  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно [7] для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0)=10$  (межа БКШ), -2, -5, -10 (межа БЕК) - пунктирними лініями (10-13), відповідно.

той же час слід зазначити, що при малому допуванні празеодимом відбувається загальне відносне звуження температурної області реалізації ПЩ більше ніж удвічі до  $t^* = 0.243$ , при одночасному відносному розширенні області існування ФП, до 0,041.

### ВИСНОВКИ

На закінчення стисло підсумуємо основні результати, одержані в даній роботі. Збільшення електроопору на лінійній ділянці залежностей  $\rho_{ab}(T)$  у разі часткової заміни Y на Pr, свідчить про ефективність розсіювання нормальних носіїв на домішках Pr. Надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  у широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  підкоряється експоненціальній температурній залежності, а температурна залежність псевдощільності – задовільно описується в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК. Допування монокристалів YBaCuO малими домішками празеодима  $z \leq 0.1$  приводить до незвичайного ефекту звуження температурного інтервалу реалізації ПЩ-режиму, тим самим, продовжуючи область лінійної залежності  $\rho(T)$  у ab-площині.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M.A. Obolenskii, R.V. Vovk, A.V. Bondarenko, and N.N. Chebotaev Localization effects and pseudogap state in  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals with different oxygen content // ФНТ. – 2006. – Т.32, №6. – С.746-752.
2. H.B. Radousky A review of the superconducting and normal state properties of  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$  // J.Mater. Res. -1992. - Vol.7, №7. - P.1917-1955.
3. A. Kebede et al. Magnetic ordering and superconductivity in  $Y_{1-y}Pr_yBa_2Cu_3O_7$  // Phys. Rev. B. – 1991. –Vol.40. -P.4453-4462.
4. А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев Флуктуационная проводимость и псевдощель в пленках  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  // ФНТ. – 2006. – Т.32, №6. – С.753-760.
5. Д.Д. Прокофьев, М.П. Волков, Ю.А. Бойков Величина и температурная зависимость псевдощели в YBaCuO, полученные из резистивных измерений // ФТТ. - 2003. – Т.45, №7. - С.1168-1176.
6. A.I. Chroneos, I.L. Goulatis and R.V. Vovk Atomic Scale Models for  $RBa_2Cu_3O_{6.5}$  and  $R_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{6.5}$  Compounds (R= Y and Lanthanides) // Acta Chim. Slov. – 2007. – Vol.54. - P.179-184.
7. E. Babaev, H. Kleinert Nonperturbative XY-model approach to strong coupling superconductivity in two and three dimensions // Phys. Rev. B. – 1999. - Vol.59. – P.12083-12089.
8. Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев Новый класс высокотемпературных сверхпроводников в FeAs-системах // УФН. -2008. – Т.178, №12. – С.1307-1334.
9. Л.Г. Асламазов, А.И. Ларкин Влияние флуктуаций на свойства сверхпроводников при температурах выше критической // ФТТ. – 1968. - Т.10, №4. - С.1104-1111.

© О.В. Самойлов, А.А. Завгородній, Р.В. Вовк, М.О. Оболенський, К.А. Котвицька, В.Ю. Гресь, 2009.