

УДК 538.945+537.312.62

## ЕВОЛЮЦІЯ ФЛУКТУАЦІЙНОЇ ПРОВІДНОСТІ МОНОКРИСТАЛІВ $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ З РІЗНИМ ВМІСТОМ ПРАЗЕОДИМА

А.А. Завгородній, Р.В. Вовк, З.Ф. Назиров, М.О. Оболенський, Є.І. Іврий

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 17 листопада 2010 р.

У роботі досліджено вплив допущання празеодимом на провідність у базисній площині ВТНП-монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Встановлено, що надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  поблизу  $T_c$  задовільно описується в рамках теоретичної моделі Асламазова-Ларкіна. При цьому абсолютні значення величини поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  зростають в міру збільшення вмісту празеодиму. У той же час для зразків з  $z \geq 0,48$  спостерігається досить різке зниження величини  $\xi_c(0)$ , що може бути пов'язано із загальним пригніченням надпровідних характеристик при наближенні концентрації празеодиму до  $z \approx 0,5$ .

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** надлишкова провідність, допущання, монокристали  $YBaCuO$ , високотемпературна надпровідність, довжина когерентності.

## ЭВОЛЮЦИЯ ФЛУКТУАЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРАЗЕОДИМА

А.А. Завгородний, Р.В. Вовк, З.Ф. Назиров, М.А. Оболенский, Е.И. Иврий

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 ВТСН-монокристаллов  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Установлено, что избыточная проводимость  $\Delta\sigma(T)$  монокристаллов  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  вблизи  $T_c$  удовлетворительно описывается в рамках теоретической модели Асламазова-Ларкина. При этом абсолютные значения величины поперечной длины когерентности  $\xi_c(0)$  возрастают по мере увеличения содержания празеодима. В то же время для образцов с  $z \geq 0,48$  наблюдается достаточно резкое снижение величины  $\xi_c(0)$ , что может быть связано с общим подавлением сверхпроводящих характеристик в случае приближения концентрации празеодима к  $z \approx 0,5$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** избыточная проводимость, допирование, монокристаллы  $YBaCuO$ , высокотемпературная сверхпроводимость, длина когерентности.

## EVOLUTION OF FLUCTUATION CONDUCTIVITY OF $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ SINGLE CRYSTALS WITH DIFFERENT PRASEODYMIUM CONTENT

A.A. Zavgorodny, R.V. Vovk, Z.F. Nazirov, M.A. Obolenskii, E.I. Ivry

V.N. Karazin Kharkov National University  
Svoboda sq. 4, Kharkov, 61077, Ukraine

In present work effect of praseodymium doping on conductivity in a basic plane of HTSC  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals are investigated. It is established, that excess conductivity  $\Delta\sigma(T)$  of  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals nearby  $T_c$  satisfactory described by Aslamazov-Larkin theoretical model. Absolute values of cross-section coherent length  $\xi_c(0)$  grow in process of an increase of a praseodymium content. At the same time for samples with  $z \geq 0.48$  sharp enough decrease in size  $\xi_c(0)$  that is maybe connected with the general suppression of superconducting characteristics at an come close of praseodymium concentration to  $z \approx 0.5$ .

**KEYWORDS:** excess conductivity, doping,  $YBaCuO$  single crystals, high-temperature superconductivity, coherent length.

Відомо, що сполуки  $RBa_2Cu_3O_7$  ( $R = Y$  та інші рідкоземельні елементи) є технологічно важливими структурами для отримання новітніх перспективних матеріалів з високою струмонесучою здібністю, забезпечення компонент для виготовлення елементів пам'яті, надчутливих елементів зчитування і надшвидкісних ліній зв'язку на основі ВТНП. Критична температура ( $T_c$ ) цих сполук, оптимально допованих киснем, становить  $T_c \approx 90$  K і слабо залежить від природи  $R$ . При цьому  $SeBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  і  $TbBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  не утворюють ОРТО-структуру [1],  $PmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  є радіоактивним, а  $PrBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  не є надпровідним («аномалія празеодима»), незважаючи на наявність орторомбічної елементарної комірки [2]. Особливий інтерес у цьому аспекті, представляють сполуки з частковою заміною  $Y$  на  $Pr$ , що, з одного боку, приводить до часткового пригнічення надпровідності, а з іншого - дозволяє зберігати практично незмінними параметри решітки та кисневий індекс сполуки. Зокрема, дослідження впливу домішок  $Pr$  на умови та режими реалізації флуктуаційної провідності в таких сполуках [1,2] відіграє важливу роль не тільки для прояснення природи високотемпературної надпровідності, але і для визначення емпіричних шляхів підвищення критичних параметрів ВТНП-сполук. Враховуючи вищесказане, ціллю даної роботи було дослідження впливу домішок  $Pr$  в широкому інтервалі концентрацій ( $0,0 \leq z \leq 0,5$ ) на флуктуаційну провідність у монокристалах  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при протіканні транспортного струму в базисній аб-площині.

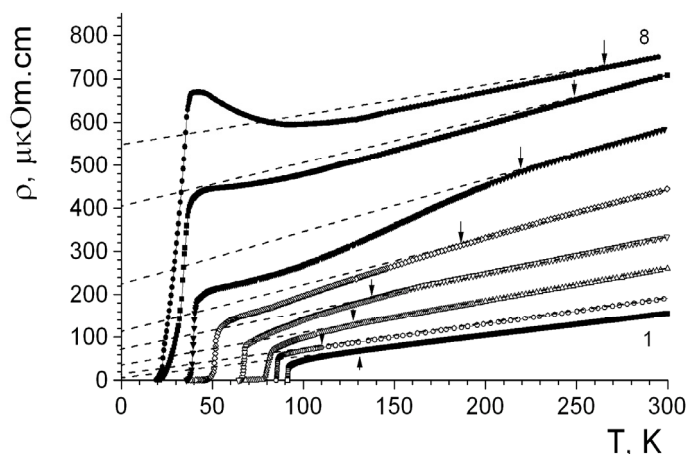


Рис. 1. Температурні залежності електроопору  $\rho_{ab}(T)$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  для  $z = 0,0; 0,05; 0,19; 0,23; 0,34; 0,43; 0,48; 0,5$  - криві 1-8, відповідно. Стрілками показані температури переходу в псевдощільний режим  $T^*$ . Пунктирними лініями зображена екстраполяція лінійних ділянок у нульове значення температури.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Монокристали  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  вирощували за розчин-розплавною технологією [2]. Для отримання кристалів з частковою заміною Y на Pr,  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , в початкову шихту додавали  $Pr_5O_{11}$  у відповідному процентному співвідношенні. Режимы вирощування і насичення киснем кристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , були такими ж, як і для нелегованих монокристалів [2]. Як початкові компоненти для вирощування кристалів використовували сполуки  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  і  $Pr_5O_{11}$ . Електроопір в аб-площині вимірювали за стандартною чотирьохконтактною методикою на постійному струмі до 10 мА. Температуру зразка визначали платиновим терморезистором.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Температурні залежності питомого електроопору в аб-площині  $\rho_{ab}(T)$  кристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  показані на рис. 1. Видно, що, по мірі збільшення вмісту празеодима, електроопір зразків зростає, а критична температура знижується, що узгоджується з літературними даними [1]. Як випливає з рис. 1, при зменшенні температури нижче деякого характерного значення  $T^*$  відбувається відхилення  $\rho_{ab}(T)$  від лінійної залежності, що свідчить про появу деякої надлишкової провідності  $\Delta\sigma$ . Температурну залежність надлишкової провідності  $\Delta\sigma(T)$  при  $T < T^*$  можна отримати з співвідношення:

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

де  $\sigma_0 = \rho_0^{-1} = (A + BT)^{-1}$  - провідність, що визначається екстраполяцією лінійної ділянки в нульове значення температури, а  $\sigma = \rho^{-1}$  - експериментально вимірюване значення провідності в нормальному стані.

З теорії [3] відомо, що поблизу  $T_c$  надлишкова провідність зумовлена процесами флуктуаційного спаровування носіїв, внесок яких в провідність при  $T > T_c$  визначається ступеневими залежностями виду:

$$\Delta\sigma_{2D} = \frac{e^2}{16\hbar d} \varepsilon^{-1}, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{3D} = \frac{e^2}{32\hbar \xi_c(0)} \varepsilon^{-1/2}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon = (T - T_c)/T_c$ ,  $e$  - заряд електрона,  $\xi_c$  довжина когерентності вздовж осі  $c$  при  $T \rightarrow 0$  і  $d$  - характерний розмір двовимірного шару. У нашому випадку  $T_c$  визначали у точці максимуму на залежностях  $d\rho_{ab}(T)/dT$ .

На рис. 2 представлені температурні залежності  $\Delta\sigma(T)$  тих же зразків в координатах  $\ln\Delta\sigma - \ln\varepsilon$ . Видно, що в області температур між  $T_c$  і  $1,05-1,1 T_c$  (за різної концентрації празеодима) експериментальні криві задовільно апроксимуються прямими з кутом нахилу  $\tan\alpha \approx -0,5$ , який відповідає показнику ступеня  $-1/2$  у рівнянні (3), що свідчить про тривимірний характер флуктуаційної надпровідності в цьому температурному інтервалі. При подальшому підвищенні температури швидкість зменшення  $\Delta\sigma$  істотно зростає ( $\tan\alpha \approx -1$ ), що, у свою чергу, можна розглядати як вказівку на зміну вимірності ФП. Як випливає з (2) та (3), в точці 2D-3D кросовера:

$$\xi_c(0)\varepsilon_0^{-1/2} = d/2. \quad (4)$$

У цьому випадку, визначивши значення  $\varepsilon_0$  і використовуючи літературні дані про залежність міжплощинної відстані від  $\delta$  [4] ( $d \approx 11,7 \text{ \AA}$ ), можна обчислити значення  $\xi_c(0)$ . Як видно зі вставки (b) до рис. 2, величина  $\xi_c(0)$ , розрахована згідно (4), збільшується більше ніж у чотири рази по мірі збільшення вмісту празеодима у зразку від  $z = 0$  до  $z \leq 0,43$  і, відповідно, зниження  $T_c$  від 91,74 до 45,2 К, що якісно узгоджується зі

значеннями величини  $\xi_c(0)$  отриманими для бездомішкових зразків YBaCuO при зниженні вмісту кисню [2]. У той же час для зразків з  $z \geq 0,48$  спостерігається досить різке зниження величини  $\xi_c(0)$ , що може бути пов'язано із загальним пригніченням надпровідних характеристик. Ці особливості можуть бути зумовлені загальним зміщенням провідної підсистеми в область фазової діаграми, в якій властивості нормального стану визначаються антиферомагнітними кореляціями.

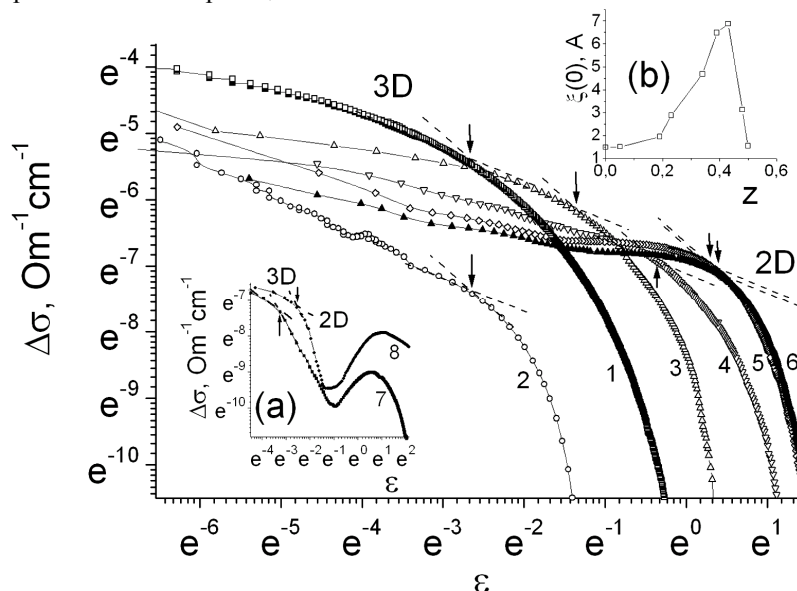


Рис. 2. Температурні залежності надлишкової провідності в аб-площині для монокристалів K1 - K6 в координатах  $\ln \Delta \sigma - \ln \varepsilon$ . Позначення кривих відповідає позначенням на рис. 1. Пунктирними лініями показана апроксимація експериментальних кривих прямими з кутами нахилу  $\alpha_1 \approx 0,5$  (3D - режим) і  $\alpha_2 \approx 1,0$  (2D - режим). Стрілочками показані точки 2D-3D кросовера. На вставці (a) показані ті ж залежності для зразків K7 і K8. На вставці (b) показана концентраційна залежність довжини когерентності  $\xi_c(0, z)$ .

Визначивши температуру переходу в тривимірний флуктуаційний режим  $T_f^{3D}$  в точці відхилення величини  $\Delta \sigma$  вгору від лінійної залежності при зниженні температури [2] можна оцінити відносну протяглість існування ПЩ режиму як:  $t^* = (T^* - T_f^{3D}) / T_f^{3D}$ . Як показали розрахунки, при зростанні ступеня допущення празеодимом відбувається більше ніж шестиразове відносне розширення температурної області реалізації ПЩ, від  $t^* = 0,5302$  до 3,4895, що, в цілому, якісно узгоджується з результатами, отриманими для бездомішкових зразків YBaCuO [2] при зниженні вмісту кисню.

Однак при мінімальному ступені допущення празеодимом  $z = 0,05$  спостерігається більше ніж дворазове звуження відносної ширини  $t^*$ , у порівнянні з бездомішковим зразком YBaCuO оптимального по кисню складу, до значення  $t^* = 0,254$ . Як зазначалося вище, при цій же концентрації празеодима спостерігається аномальне (більше ніж на 30 K) розширення лінійного ділянки залежно  $\rho_{ab}(T)$ . Подібна поведінка кривих  $\rho_{ab}(T)$  спостерігалася також в роботі [5] на зразках YBaCuO слабо легуваних празеодимом. Ймовірно, цей ефект може бути пов'язаний з особливостями індукованих добавками празеодима процесів кластеризації в сполуках  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . На відміну від бездомішкових зразків  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , формування кластерів в оптимально допованих киснем сполуках  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , вірогідно, відбувається при досягненні певної порогової концентрації празеодима [4]. При відносно малому ( $z \leq 0,1$ ) вмісті празеодима процес утворення таких кластерів, ймовірно, в значній мірі знижений. У цьому випадку легування празеодимом приводить до загального збільшення концентрації точкових дефектів, які, є ефективними центрами розсіювання нормальних і флуктуаційних носіїв. Дійсно, згідно з літературними даними [5] празеодим в сполуках  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  може бути чинником потужного розпарювального ефекту, що може ускладнювати флуктуаційне формування нескорельованих бозонів, відповідальних за появу надлишкової провідності при температурах нижче  $T^*$ . Це, у свою чергу, повинно приводити до зниження абсолютної величини  $T^*$ , що і спостерігається у нашому випадку.

## ВИСНОВКИ

На завершення стисло підсумуємо основні результати, отримані в роботі. Наведена вище сукупність експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про те, що надлишкова провідність  $\Delta \sigma(T)$  монокристалів  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  у разі наближення до  $T_c$  задовільно описується в рамках теоретичної моделі Асламазова-Ларкіна. Абсолютні значення величини поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  збільшуються по мірі зростання вмісту празеодиму. Легування монокристалів YBaCuO малими домішками празеодима  $z \approx 0,05$  приводить до незвичайного ефекту звуження температурного інтервалу реалізації ПЩ-режиму, тим самим, подовжуючи область лінійної залежності  $\rho(T)$  в аб-площині, що, ймовірно, може бути пов'язано з

особливостями індукування процесів кластеризації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.I. Chroneos, I.L. Goulatis and R.V. Vovk Atomic Scale Models for  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$  and  $\text{R}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$  Compounds (R= Y and Lanthanides) // *Acta Chim. Slov.* – 2007. -№54. -P. 179-184.
2. М.А. Оболенский, Р.В. Вовк, А.В. Бондаренко Эволюция псевдощелевого состояния в слабо допированных празеодимом монокристаллах  $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  с заданной топологией плоских дефектов // *ФНТ.* -2006. -Т.32, №12. -С. 1488-1492
3. Л.Г. Асламазов, А.И. Ларкин. Влияние флуктуаций на свойства сверхпроводников при температурах выше критической // *ФТТ.* -1968. -Т.10, №4. -С.1104-1111.
4. G.D. Chryssikos, E.I. Kamitsos, J.A. Kapoutsis, A.P. Patsis, V. Psycharis, A. Kafoudakis, Mitros C. , G. Kallias, E. Gamari-Seale, D. Niarchos X-ray diffraction and infrared investigation of  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  and  $\text{R}_{0.5}\text{Pr}_{0.5}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  compaunds (R=Y and lanthanides) // *Physica C.* -1995. –Vol.254. -P.44-62.
5. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.I. Chroneos Excess conductivity and pseudo-gap state in YBCO single crystals slightly doped with Al and Pr // *J Mater Sci: Mater in Electron.* -2007. -Vol.18. - P. 811-815.