

УДК 538.945+537.312.62

## ПСЕВДОЩИЛИННИЙ СТАН В СЛАБКО ЛЕГОВАНИХ АЛЮМІНІЄМ МОНОКРИСТАЛАХ $YBaCuO$ З ЗАДАНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ ПЛОЩИННИХ ДЕФЕКТІВ

І.Л. Гулатіс, М.О. Оболенський, Р.В. Вовк, А.А. Завгородній, К.А. Котвицька

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Україна 61077 м. Харків-77, пл. Свободи 4

email: [Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua](mailto:Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua)

Надійшла до редакції 1 вересня 2008 р.

В роботі досліджено температурну залежність провідності в аб-площині монокристалів  $YBa_2Cu_{3-y}Al_yO_{7-x}$  з системою односпрямованих двійникових меж. Показано, що надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  в широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  підкоряється експоненціальній температурній залежності. При цьому температурна залежність псевдощилини задовільно описується в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК.

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

Дослідженням псевдощілинної аномалії (ПЩ) у ВТНП-сполуках в теперішній час приділяється надзвичайно велика увага (див., наприклад, огляди [1,2]). Згідно з сучасними уявленнями вважається, що саме це фізичне явище може слугувати ключем до розуміння природи високотемпературної надпровідності [2]. В літературних джерелах інтенсивно дискутуються два основні сценарії виникнення псевдощілинної аномалії у ВТНП-системах. Згідно з першим, виникнення ПЩ пов'язане з флуктуаціями ближнього порядку «діелектричного» типу, наприклад, антиферомагнітними флуктуаціями, хвилями спінової і зарядової густини і т.д. [2]. Другий сценарій припускає формування куперівських пар вже при температурах істотно вищих за критичну  $T^* \gg T_c$  ( $T^*$  - температура відкриття псевдощилини) з подальшим встановленням їх фазової когерентності при  $T < T_c$  [3]. Інтенсивні дискусії з даного питання продовжуються дотепер. Мета даної роботи – дослідження впливу допування алюмінієм на температурну залежність псевдощилини в ВТНП-монокристалах системи 1-2-3.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Найперспективнішим для вивчення в вищезазначеному аспекті є сполука  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , що зумовлено можливістю широкого варіювання її складу шляхом заміни компонент їх ізоелектронними аналогами, або зміни ступеня кисневої нестехіометрії. Як відомо, легування сполуки  $YBaCuO$  алюмінієм приводить до заміщення атомів міді в площинах  $CuO$ , при цьому дані про ступінь впливу такої заміни на транспортні властивості, зокрема електропровідність, залишаються в значній мірі суперечливими [4,5]. Крім цього, в монокристалах  $YBaCuO$ , завжди присутні площинні дефекти – межі двійників (МД) [4], вплив яких на транспортні властивості у нормальному стані недостатньо вивчено, що пов'язано з експериментальними труднощами, які виникають при визначенні внеску цих дефектів. Враховуючи вищесказане, в даній роботі було досліджено вплив малих домішок Al (до 5%) на поздовжню провідність монокристалів  $YBaCuO$  з високою критичною температурою  $T_c$  і системою односпрямованих МД при орієнтації вектора транспортного струму  $I \parallel$  МД, коли вплив двійників на процеси розсіювання носіїв мінімізований.

Монокристали  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  і  $YBa_2Cu_{3-y}Al_yO_{7-\delta}$  вирощували по розчин-розплавній методиці. Технологія отримання експериментальних зразків і проведення резистивних вимірювань, а також аналіз транспортних властивостей зразків в нормальному і надпровідному стані більш детально проведені нами в [4]. Резистивні параметри зразків представлені у таблиці.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Температурні залежності питомого електроопору в аб-площині  $\rho_{ab}(T)$  кристалів  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  (K1) і  $Y_1Ba_2Cu_{3-y}Al_yO_{7-\delta}$  (K2) показані на вставці до рис. 1.

Таблиця

Зразок	$T_c$ , К	$\rho_{ab}(300)$ , $\mu\Omega.cm$	$T^*$ , К	$\Delta^*_{ab}$ , meV	$T_f$ , К	$t^*=(T^*-T_f)/T_f$
K1	91,74	155	143	88,4	100,4016	0,424
K2	92,05	421	199	58,1	93,458	1,129

Видно, що на цих залежностях в області відносно високих температур у обох кристалів зберігається достатньо широка лінійна ділянка, що, згідно теорії NAFL [6], слугує достовірною ознакою нормального стану системи. 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 (ПЩ) [1-3]. Температурна залежність надлишкової провідності зазвичай визначається з рівності:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0, \tag{1}$$

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

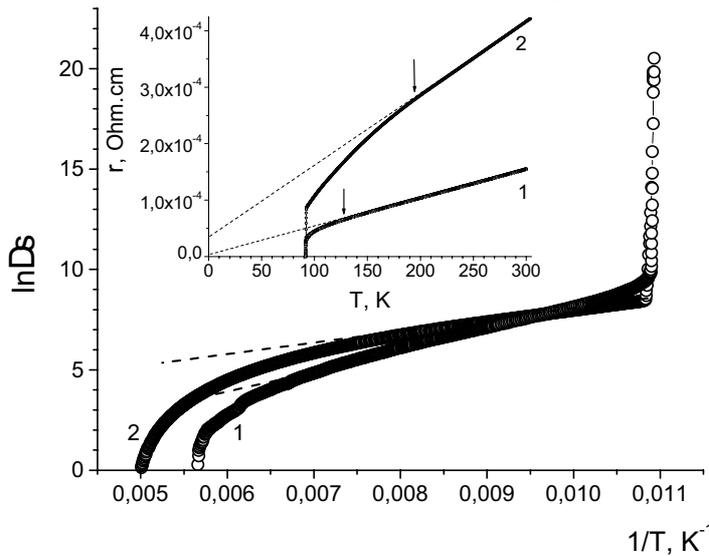


Рис.1. Температурні залежності надлишкової провідності в аб-площині в координатах  $\ln(\Delta\sigma) - 1/T$  монокристалів K1 і K2 – криві 1 і 2, відповідно. Пунктирними лініями показана апроксимація експериментальних кривих рівнянням (2) На вставці показані температурні залежності електроопору  $\rho_{ab}(T)$  цих же зразків. Стрілками показані температури переходу в псевдоцілінний режим  $T^*$ . Пунктирними лініями показана інтерполяція лінійних ділянок в нульове значення температури. Нумерація кривих на вставці відповідає нумерації на рисунку.

Одержані експериментальні залежності  $\Delta\sigma(T)$  представлені на рис.1 в координатах  $\ln\Delta\sigma - 1/T$ . Видно, що в достатньо широкому температурному інтервалі ці залежності мають вид прямих, що відповідає їх описанню експоненціальною залежністю виду:

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

де  $\Delta^*_{ab}$  – величина, що визначає деякий термоактиваційний процес через енергетичну щілину – «псевдоцілину». Величина  $\Delta^*$ , одержана з (2) для наших експериментальних зразків, наведена в таблиці. Видно, що легування алюмінієм приводить до значного пониження абсолютного значення величини псевдоцілини  $\Delta^*_{K1}/\Delta^*_{K2} \approx 1,52$ .

Експоненціальна залежність  $\Delta\sigma(T)$  вже спостерігалася раніше на плівкових зразках  $YBaCuO$  [3]. Як було показано в [3], апроксимація експериментальних даних може бути істотно розширена за допомогою введення співмножника  $(1 - T/T^*)$ . В цьому випадку, надлишкова провідність виявляється пропорційна густині надпровідних носіїв  $n_s \sim (1 - T/T^*)$  і

$$\Delta\sigma \sim (1 - T/T^*) \exp(-\Delta^*/kT), \tag{3}$$

зруйнованих тепловим рухом: при цьому  $T^*$  розглядається як середньопольова температура надпровідного переходу, а температурний інтервал  $T_c < T < T^*$ , в якому існує псевдоцілінний стан, визначається жорсткістю фази параметра порядку, що, в свою чергу залежить від дефіциту кисню або концентрації допуючого елемента. Таким чином, використовуючи методику, запропоновану в [3] по експериментальній кривій  $\ln\Delta\sigma$  можна побудувати температурну залежність  $\Delta^*_{ab}(T)$  до  $T^*$ . Температурні залежності псевдоцілини, одержані по цій методиці для кристалів K1 і K2 показані в приведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато віддалік  $T^*$ ) на рис.2 кривими 1 і 2, відповідно.

У теоретичній роботі [7] температурні залежності псевдоцілини були одержані раніше в наближенні середнього поля в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК для випадку слабого (4) і сильного (5) спаровування:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \Delta(0) \sqrt{2\pi\Delta(0)T} \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{T}\right] \tag{4}$$

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \frac{8}{\sqrt{\pi}} \sqrt{-x_0} \left(\frac{\Delta(0)}{T}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{\sqrt{\mu^2 + \Delta^2(0)}}{T}\right] \tag{5}$$

де  $x_0 = \mu/\Delta(0)$  ( $\mu$  – хімпотенціал системи носіїв;  $\Delta(0)$  – величина енергетичної щілини при  $T=0$ ).

Залежності  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{max}$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно (4) і (5) для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0)=10$  (межа БКШ) і  $\mu/\Delta(0)=-10$  (межа БЕК) показані на рис.2 пунктирними лініями 3 і 4, відповідно. Видно, що у випадку оптимально допованого киснем бездомішкового зразка  $YBaCuO$  температурна залежності псевдоцілини має значну

розбіжність з теорією [7], як це вже спостерігалось раніше у разі плівкових зразків  $\text{YBaCuO}$  з близьким рівнем відхилення від кисневої стехіометрії [3]. В той же час, для монокристалів  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-y}\text{Al}_y\text{O}_{7-\delta}$ , враховуючи деяку умовність визначення величини відкриття псевдощілини  $T^*$  по відхиленню залежності  $R(T)$  від лінійної поведінки, узгодження експерименту з теорією можна вважати цілком задовільним.

Як видно з рис.1, у міру наближення до  $T_c$  відбувається різке зростання величини  $\Delta\sigma$ . З теорії [8] відомо, що поблизу  $T_c$  надлишкова провідність зумовлена процесами флуктуаційного спаровування носіїв. Якщо визначати температуру переходу з ПЩ у ФП-режим  $T_f$  по точці відхилення величини  $\ln\Delta\sigma$  вгору від лінійної залежності

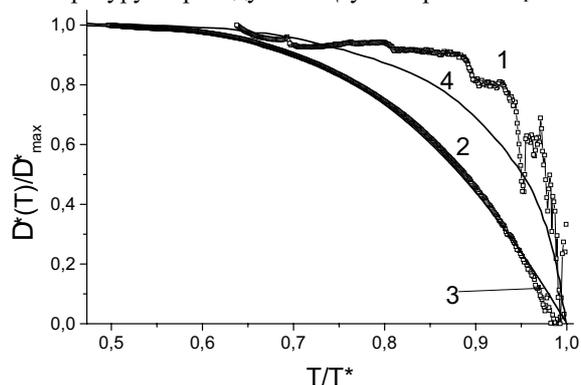


Рис.2. Температурні залежності псевдощілини в приведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато оддалек  $T^*$ ). Нумерація кривих відповідає нумерації на рис.1. Суцільними лініями показана залежність  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max}$  від  $T/T^*$ , розрахована згідно [7].

кросовера БКШ-БЕК. Допування монокристалів  $\text{YBaCuO}$  малими домішками алюмінію до  $y \approx 0,05$  приводить до ефекту розширення температурного інтервалу реалізації ПЩ-режиму, тим самим, звужуючи область лінійної залежності  $\rho(T)$  у  $ab$ -площині.

$\ln\Delta\sigma(1/T)$  [3] можна оцінити відносну протяглість існування ПЩ-режиму як:  $t^*=(T^*-T_f)/T_f$ . Результати розрахунків показують, що при малому легуванні алюмінієм відбувається загальне відносне розширення температурної області реалізації ПЩ більше ніж удвічі, від  $t^*=0,424$  до 1,129.

## ВИСНОВКИ

На завершення стисло підсумуємо основні результати, одержані в роботі. Надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  монокристалів  $\text{YBaCuO}$  і  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-y}\text{Al}_y\text{O}_{7-\delta}$  у широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  підкоряється експоненціальній температурній залежності. При цьому описання надлишкової провідності за допомогою співвідношення  $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T)$  може бути інтерпретоване в термінах теорії середнього поля, де  $T^*$  представлена, як середньопольова температура надпровідного переходу, а температурна залежність псевдощілини задовільно описується в рамках теорії

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Luo H.G., Su H.P., and Xiang T. Scaling analysis of normal-state properties of high-temperature superconductors // Phys. Rev. B. - Vol.77. - 2008. -P. 014529 (1-17).
2. Садовский М.В. Псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках // УФН. -2001. -Т.171, №5. - С.539-564.
3. Прокофьев Д.Д., Волков М.П., Бойков Ю.А. Величина и температурная зависимость псевдощели в  $\text{YBaCuO}$ , полученные из резистивных измерений // ФТТ. - 2003. - Т.45, №7. - С.1168-1176.
4. Оболенский М.А., Бондаренко А.В., Шкловский В.А., Эль-Сидави М., Вовк Р.В., Самойлов А.В., Ниархос Д., Писсас М., Каллиас Г., Сиваков А.Г. Сверхпроводящие параметры и динамика вихрей в допированных алюминием монокристаллах  $\text{YBaCuO}$ , содержащих однонаправленные двойники // ФНТ. - 1995. - Т.21, №12. - С.1200-1207.
5. Van Dover R.B., Schneemeyer L.F., Waszczak J.V. et al. Extraordinary effect of aluminum substitution on the upper critical field of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  // Phys Rev. B - 1989. - Vol.39. - P. 2932-2935.
6. Stojkovic B.P., Pines D. Theory of the longitudinal and Hall conductivities of the cuprate superconductors // Phys. Rev. B. - 1997. - Vol.55, №13. -P.8567-8595.
7. 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.
8. Асламазов Л.Г., Ларкин А.И. Влияние флуктуаций на свойства сверхпроводника при температуре выше критической // ФТТ. - 1968. - Т.10, №4. - С.1104-1111.

## PSEUDOGAP STATE IN SLIGHTLY DOPED BY ALUMINIUM $\text{YBaCuO}$ SINGLE CRYSTALS WITH A GIVEN TOPOLOGY OF PLANE DEFECTS

I.L. Gulatis, M.A. Obolenskii, R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, K.A. Kotvitskaya

N.V. Karasin Kharkov National University, Svobody sq. 4, Kharkov, Ukraine, 61077

In present work the temperature dependence of the  $ab$ -plane conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-y}\text{Al}_y\text{O}_{7-\delta}$  single crystals with the system of the unidirectional twin boundaries was investigated. The excess conductivity for the analyzed single crystals, within a wide temperature interval  $T_f < T < T^*$ , is described by exponential temperature dependence. The temperature dependence of pseudogap is satisfactorily described within the BCS<sub>h</sub>-BEK crossover theoretical model.

**KEYWORDS:** excess conductivity, doping,  $\text{YBaCuO}$  single crystals, high temperature superconductivity, crossover, pseudogap state.