

УДК 538.945+537.312.62

ВПЛИВ ВИСОКОГО ТИСКУ НА ТЕМПЕРАТУРНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ ПСЕВДОЩІЛИНИ СЛАБКО ДОПОВАНИХ КИСНЕМ МОНОКРИСТАЛІВ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

А.А. Завгородній, Р.В. Вовк, М.О. Оболенський, О.В. Самойлов

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Україна 61077 м. Харків-77 пл. Свободи 4

e-mail: Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua

Надійшла до редакції 20 червня 2009 р.

В роботі досліджено вплив високого тиску на провідність в базисній площині ВТНП-монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з нестачею кисню. Встановлено, що надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 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 кросовера БКШ-БЕК. Збільшення прикладеного тиску приводить до ефекту звуження температурного інтервалу реалізації ПЩ-режиму, тим самим, розширюючи область лінійної залежності $\rho(T)$ у аб-площині.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: надлишкова провідність, гідростатичний тиск, монокристали YBaCuO , високотемпературна надпровідність, кросовер, псевдощільний стан.

EFFECT OF HIGH PRESSURE ON TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE PSEUDOGAP IN SLIGHTLY OXYGEN DOPED $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ SINGLE CRYSTALS

A.A. Zavgorodniy, R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.V. Samoylov

V.N. Karazin Kharkov National University

4, Svoboda sq. 61077, Kharkiv, Ukraine

In present work the effect of high pressure on conductivity in the base plane of oxygen deficient $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals was investigated. The excess conductivity $\Delta\sigma(T)$ for the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals shows exponential dependence in the wide temperature range $T_f < T < T^*$. In addition ratio $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$ can be interpreted in the mean field theory, where T^* represents as mean field temperature of superconducting transition and temperature dependence of the pseudogap can be described satisfactorily in term of crossover BSC-BEK theory. The increase of the enclosed pressure brings narrowing over of temperature interval of realization of the PG-mode to the effect, the same, extending the region of linear dependence $\rho(T)$ in ab-plane.

KEYWORDS: excess conductivity, hydrostatical pressure, YBaCuO single crystals, high temperature superconductivity, crossover, pseudogap state.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ПСЕВДОЩЕЛИ СЛАБО ДОПИРОВАННЫХ КИСЛОРОДОМ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

А.А. Завгородній, Р.В. Вовк, М.А. Оболенський, А.В. Самойлов

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

Украина, 61077, м. Харьков-77, пл. Свободы 4

В работе исследовано влияние высокого давления на проводимость в базисной плоскости ВТСП-монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с недостатком кислорода. Установлено, что избыточная проводимость $\Delta\sigma(T)$ монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в широком интервале температур $T_f < T < T^*$ подчиняется экспоненциальной температурной зависимости. При этом описание избыточной проводимости при помощи соотношения $\Delta\sigma \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$ может быть интерпретировано в терминах теории среднего поля, где T^* представлена, как среднестатистическая температура сверхпроводящего перехода, а температурная зависимость псевдощели удовлетворительно описывается в рамках теории кросовера БКШ-БЭК. Увеличение прикладываемого давления приводит к эффекту сужения температурного интервала реализации ПЩ-режима, тем самым, расширяя область линейной зависимости $\rho(T)$ в аб-плоскости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: избыточная проводимость, гидростатическое давление, монокристаллы YBaCuO , высокотемпературная сверхпроводимость, кроссовер, псевдощелевое состояние.

Вивчення псевдощільної аномалії (ПЩ) - значного зменшення густини електронних станів, що спостерігається в області фазової діаграми недодопованих складів, продовжує залишатися одним з найактуальніших напрямків фізики високотемпературної надпровідності (ВТНП). Проте, не дивлячись на великий накопичений літературний матеріал, дотепер неясними залишаються як сама природа походження ПЩ так і питання про її роль у формуванні надпровідного стану у ВТНП. В даний час у літературних джерелах інтенсивно дискутуються два основні сценарії виникнення псевдощільної аномалії у ВТНП-системах. Згідно з першим, виникнення ПЩ пов'язане з флуктуаціями ближнього порядку «діелектричного» типу, наприклад, антиферомагнітними флуктуаціями, хвилями зарядової і спінової густини і т.д. [1]. Другий сценарій припускає формування куперівських пар вже при температурах істотно вищих за критичну $T^* \gg T_c$ з подальшим встановленням їх фазової когерентності при $T < T_c$ [2,3].

Серед теоретичних робіт, що відстоюють другу точку зору, слід відзначити теорію кросовера від механізму БКШ до механізму бозе-ейнштейнівської конденсації (БЕК) [3], в якій були одержані температурні залежності псевдощільни для випадку слабого і сильного спаровування. У загальному вигляді ці залежності описуються рівнянням:

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

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

У граничному випадку $x_0 \rightarrow \infty$ (слабого спаровування) аналітичний вираз (1) набуває виду:

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

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

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

В той же час, як було показано в роботі [2], при достатньо високій точності вимірювань значення псевдощільни 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 псевдощільни).

Найперспективнішими для досліджень в цьому питанні є сполука $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (система 1-2-3), що пов'язано з широкими можливостями варіювання їх провідних характеристик і критичних параметрів шляхом зміни ступеня кисневої нестехіометрії [4,5]. У відсутність мікроскопічної теорії високотемпературної надпровідності, особливе значення набули експериментальні методи, що дозволяють виявити параметри надпровідників, які найістотніше впливають на їх фізичні характеристики у нормальному і надпровідному стані. Одним з найважливіших методів, у цьому аспекті, є використання високого тиску [4,5]. Аналіз вельми обширного літературного матеріалу по вивченню ПЩ в системі 1-2-3 показує, що до теперішнього часу є достатньо незначна кількість робіт, в яких досліджувався вплив тиску на ПЩ в основному в зразках складу близького до стехіометричного [4]. Разом з тим, з урахуванням вищесказаного, найбільш інформативним представляється вивчення саме зразків з пониженим вмістом кисню, оскільки це не тільки дозволяє прояснити роль і вплив структурних особливостей системи на формування надпровідного стану, але і дає нам можливість моделювання провідних характеристик і критичних параметрів надпровідника. У даній роботі досліджується вплив високого гідростатичного тиску до 11 кбар на різні види провідності монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з дефіцитом кисню $\delta \approx 0.5$ і критичною температурою $T_c \approx 50$ К.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Монокристали $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ вирощували за розчин-розплавною технологією в золотому тиглі, згідно методики [5]. Для проведення резистивних досліджень відбирали кристали прямокутної форми з характерними розмірами $3 \times 0.5 \times 0.03 \text{ мм}^3$. Мінімальний розмір кристала відповідав напрямку вздовж вісі c . Для отримання зразків з оптимальним вмістом кисню відібрані кристали відпалювали в потоці кисню при температурі 400°C протягом п'яти діб. Для зменшення вмісту кисню проводили їх додаткове відпалювання протягом доби в атмосфері повітря при температурі 600°C з подальшим загартуванням. Електроконтакти створювали по стандартній 4-х зондовій схемі за допомогою нанесення срібної пасти на поверхню кристала і під'єднання золотих провідників діаметром 0.05 мм з подальшим тригодинним відпалюванням при температурі 200°C в атмосфері кисню. Така процедура дозволяла одержувати перехідний опір контактів менше одного Ома і проводити резистивні вимірювання при транспортних струмах до 10 мА в ab -площині. Гідростатичний тиск створювали в автономній камері типу поршень-циліндр [5]. Величину тиску вимірювали за допомогою манганінового манометра, температуру – мідь-константановою термопарою, вмонтованою в зовнішню поверхню камери на рівні розташування зразка. Для визначення впливу перерозподілу кисню проводили вимірювання після закінчення трьох-п'яти діб після докладання-знімання тиску, по мірі завершення релаксаційних процесів.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

На рис.1 представлені температурні залежності питомого електроопору виміряні при орієнтації транспортного струму $\parallel c$ ($\rho_{ab}(T)$) і різному тиску. Видно, що по мірі збільшення прикладеного тиску критична температура (T_c) зразка зростає, а електроопір зменшується, що узгоджується з літературними даними [5]. Слід зазначити, що зменшення вмісту кисню, крім зниження T_c (від 92 до 50 К), приводить до трансформації форми залежностей $\rho_{ab}(T)$, яке виражається в переході від квазіметалевої поведінки кривих, характерної для

оптимально допованих зразків [4], до залежностей з характерним термоактиваційним прогином.

Докладання тиску також приводить до істотного (до 15 K) розширення лінійної ділянки залежності $\rho_{ab}(T)$ у області високих температур. Останнє відображається в зниженні величини температури T^* , при якій починається систематичне відхилення експериментальних точок вниз від лінійної залежності. Згідно з сучасними уявленнями T^* відповідає температурі відкриття псевдощільності [1-5], про що детальніше буде сказано нижче.

Більш швидко, ніж лінійне, зменшення величини $\rho_{ab}(T)$, яке спостерігається в області температур $T < T^*$, свідчить про появу в кристалі, так званої, надлишкової провідності ($\Delta\sigma$). Температурна залежність надлишкової провідності звичайно визначається з рівності:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 \quad (4)$$

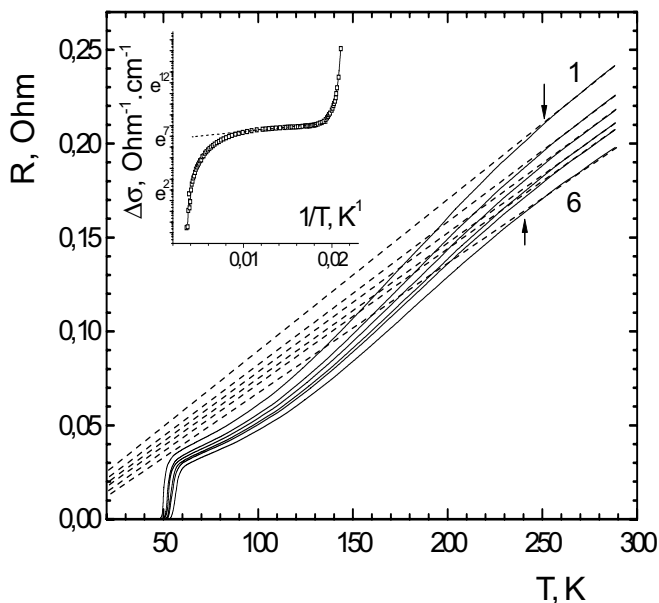


Рис. 1. Температурні залежності електроопору $\rho_{ab}(T)$ монокристала $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ отримані при тиску 0; 4,5; 5,6; 6,9; 7,8 и 10,45 кбар – криві 1-6, відповідно.

Стрілками показані температури переходу в псевдощільний режим T^* . На вставці показані температурні залежності надлишкової провідності $\Delta\sigma(T)$ монокристала при атмосферному тиску.

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. Одержані експериментальні залежності $\Delta\sigma(T)$ представлені на вставці до 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:

$$\Delta\sigma \sim \exp(\Delta^*_{ab}/T), \quad (5)$$

де Δ^*_{ab} – величина, що визначає деякий термоактиваційний процес через енергетичну щілину – «псевдощільину».

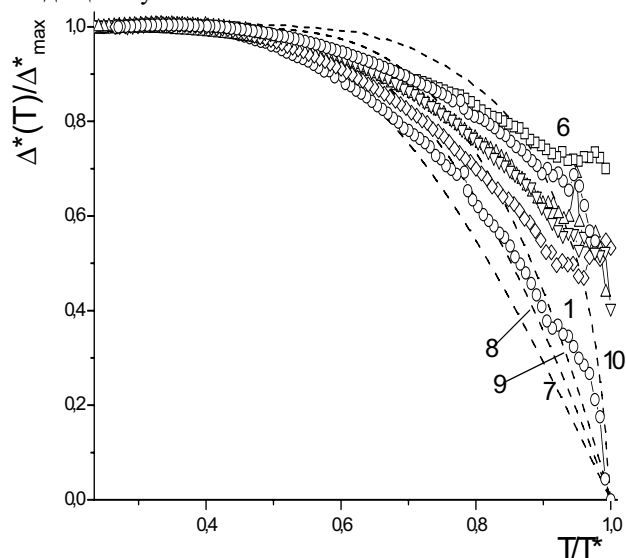


Рис.2. Температурні залежності псевдощільності монокристала $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в зведених координатах $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$ ($\Delta^*_{\max}$ – значення Δ^* на плато оддалік T^*). Нумерація кривих відповідає нумерації на рис. 1. Пунктирними лініями показані залежності $\Delta^*(T)/\Delta(0)$ від T/T^* , розраховані згідно [3] для значень параметра кросовера $\mu/\Delta(0)=10$ (межа БКШ), -2, -5, -10 (межа БЕК) – показані на рис.2 пунктирними лініями (7-10), відповідно.

Експоненціальна залежність $\Delta\sigma(T)$ вже спостерігалася раніше на плівкових зразках YBaCuO [2]. Як було

показано в [2], апроксимація експериментальних даних може бути істотно розширена за допомогою введення співмножника $(1-T/T^*)$. У 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:

$$\Delta\sigma \sim (1-T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T), \quad (6)$$

При цьому T^* розглядається як середньопольова температура надпровідного переходу, а температурний інтервал $T_c < T < T^*$, в якому існує псевдощільний стан, визначається жорсткістю фази параметра порядку, що, в свою чергу, залежить від дефіциту кисню або концентрації допуючого елементу. Таким чином, використовуючи методику, запропоновану в [2], по експериментальній кривій $\ln \Delta\sigma$ можна побудувати температурну залежність $\Delta^*_{ab}(T)$ аж до T^* .

На рис.2 показані температурні залежності псевдощільності в зведених координатах $\Delta^*(T)/\Delta_{\max} - T/T^*$ ($\Delta_{\max}$ – значення Δ^* на плато оддалік T^*) одержані при різному тиску. Залежності $\Delta^*(T)/\Delta(0)$ від T/T^* , розраховані згідно (2), (3) в наближенні середнього поля в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК [3] для значень параметра кросовера $\mu/\Delta(0)=10$ (межа БКШ), -2, -5, -10 (межа БЕК) показані на рис.2 пунктирними лініями. Видно, що по мірі зростання величини прикладеного тиску, відбувається зміщення експериментальних кривих від залежностей вигляду (3) до (2). Така поведінка виявляється якісно подібною до ефекту трансформації температурних залежностей псевдощільності зразків YBaCuO , що спостерігаються при зниженні ступеня кисневої нестехіометрії [2]. Очевидно, що згадані кореляції в поведінці кривих $\Delta^*(T)$ не є випадковими. Дійсно, як добре відомо з літератури (див., наприклад [5]), докладання високого тиску до зразків ВТНП-системи 1-2-3, рівно як і зменшення вмісту кисню, приводить до поліпшення провідних характеристик, яке виражається в збільшенні абсолютної величини T_c і істотному зниженні питомого електроопору. Таким чином, враховуючи деяку умовність визначення величини відкриття псевдощільності T^* по відхиленню залежності $\rho(T)$ від лінійної поведінки, узгодження експерименту з теорією в нашому випадку можна вважати цілком задовільним.

ВИСНОВКИ

На закінчення стисло підсумуємо основні результати, одержані в даній роботі. Докладання високого тиску до монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\delta \approx 0.5$) приводить до істотного розширення інтервалу лінійної залежності $\Delta^*_{ab}(T)$ і звуження температурної ділянки реалізації псевдощільного режиму. При цьому надлишкова провідність підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому інтервалі температур, а температурна залежність псевдощільності - задовільно описується в рамках теорії кросовера БКШ-БЕК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Садовский М.В. Псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках // УФН. -2001. -Т.171, №5. - С.539-564.
2. 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.
3. Babaev E., Kleinert H. Nonperturbative XY-model approach to strong coupling superconductivity in two and three dimensions // Phys. Rev. B. - 1999. - Vol.59. - P.12083-12089.
4. E.V.L. de Mello et. al. Pressure studies on the pseudogap and critical temperatures of a high- T_c superconductor // Phys. Rev. B 66 – 2002. – Vol. P. 092504 (1-4).
5. R.V. Vovk, M. A. Obolenskii, A. A. Zavgorodniy, A. V. Bondarenko, I. L. Goulatis, A. V. Samoilov, and A. Chroneos // J. Alloys Compds. – 2008. – Vol. 453. - P. 69-74.