

УДК 538.945+537.312.62

**ВПЛИВ ДЕФІЦИТУ КИСНЮ НА АНІЗОТРОПІЮ НОРМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В
МОНОКРИСТАЛАХ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$** **Р.В. Вовк, М.О. Оболенський, А.А. Завгородній, О.В. Бондаренко, М.Г. Ревякіна,
Н.Н. Чеботаєв***Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна**Україна 61077 р. Харків-77пл. Свободи 4**email: Ruslan.V.Vovk@univer.kharkov.ua**Поступила до редакції 18 вересня 2006 р.*

У роботі досліджені температурні залежності поздовжнього й поперечного електроопору монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ у міру поетапного зниження вмісту кисню шляхом термообробки. Виявлено, що анізотропія нормального електричного опору $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ добре описується за допомогою універсального «закона $1/2$ » для термоактиваційної стрибкової провідності. Отримано концентраційну залежність енергії активації, що зростає при зниженні вмісту кисню.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: анізотропія, монокристали $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, енергія активації, поздовжня і поперечна провідність.

Як відомо, характерною рисою високотемпературних надпровідних сполук (ВТНП) є шарувата структура [1-3], що зумовлює істотну анізотропію їхніх властивостей у нормальному й надпровідному станах. Одним із представників ВТНП є сполука $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, відмінною рисою якої є сильна залежність її фізичних властивостей, і, зокрема, електропровідності, від концентрації кисню [1-4]. Незважаючи на значну кількість робіт присвячених вивченню поздовжнього й поперечного транспорту в системі 1-2-3, багато аспектів цього питання залишаються дотепер остаточно нез'ясованими. Так, наприклад, у теоретичній роботі [5] був запропонований механізм резонансного тунелювання носіїв заряду між провідними CuO_2 - площинами через локалізовані стани в CuO – ланцюжках. Згідно [5], температурна залежність анізотропії питомого електричного опору $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ повинна описуватись співвідношенням:

$$\rho_c / \rho_{ab} \sim T \cosh^2(k_B T_0 / k_B T), \quad (1)$$

де $k_B T_0$ – деяка енергія активації процесу. Експериментальна перевірка цієї моделі була проведена в [2,3] на монокристалічних зразках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. При цьому, однак, було показано, що хоча теорія [5] якісно узгоджується з експериментом, найкраще описання експериментальних даних отримано для експоненціальної залежності виду:

$$\rho_c / \rho_{ab} \sim \exp(\Delta / k_B T). \quad (2)$$

При цьому слід зазначити, що в роботі [2,3] всі вимірювання проводились на зразках з досить великим дефіцитом кисню ($x > 0,3$), у той час як найбільшу цікавість представляє вивчення монокристалів з малим відхиленням від стехіометрії, у яких найбільш яскраво проявляються особливості, так званого «псевдоцілінного стану» [2,4]. З огляду на вищесказане, у цій роботі було проведено дослідження поздовжнього й поперечного електроопору монокристалічних зразків системи $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ з різним вмістом кисню $0,1 \leq x \leq 0,35$.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Монокристали $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ вирощували розчин-розплавним методом у золотому тиглі при температурах 850-970°C, відповідно до методики [1]. Для вимірювання електричного опору в ab - площині й уздовж c - вісі з однієї ростової партії були відібрані два монокристали розміром $2 \times 0,3 \times 0,02$ мм³ (зразок №1) і $0,3 \times 0,5 \times 0,1$ мм³ (зразок №2), відповідно. Найменші розміри кристалів відповідали напрямку c - вісі. Для одержання зразків з оптимальним вмістом кисню кристали відпалювали в потоці кисню при температурі 400°C на протязі п'яти діб. Для зменшення вмісту кисню зразки відпалювали протягом трьох - п'яти діб в потоці кисню при більш високих температурах, позначених на рис. 1. Вміст кисню ($7-x$) визначали по концентраційним залежностям критичної температури [1,4]. Електричні контакти виготовляли зі срібних провідників, які приєднували до кристалів за допомогою срібної пасти. Вимірювання електроопору проводили чотирьохконтактним методом на постійному струмі 1 мА при двох протилежних напрямках струму. Температуру вимірювали мідь-константановою термопарою, напругу на зразку й зразковому опорі - нановольметрами В2-38. Дані з вольтметрів через інтерфейс автоматично передавалися на комп'ютер. Вимірювання проводили в режимі дрейфу температури, що становив близько 0,1 К/хв при вимірюваннях поблизу T_c , і близько 5 К/хв при $T > T_c$.

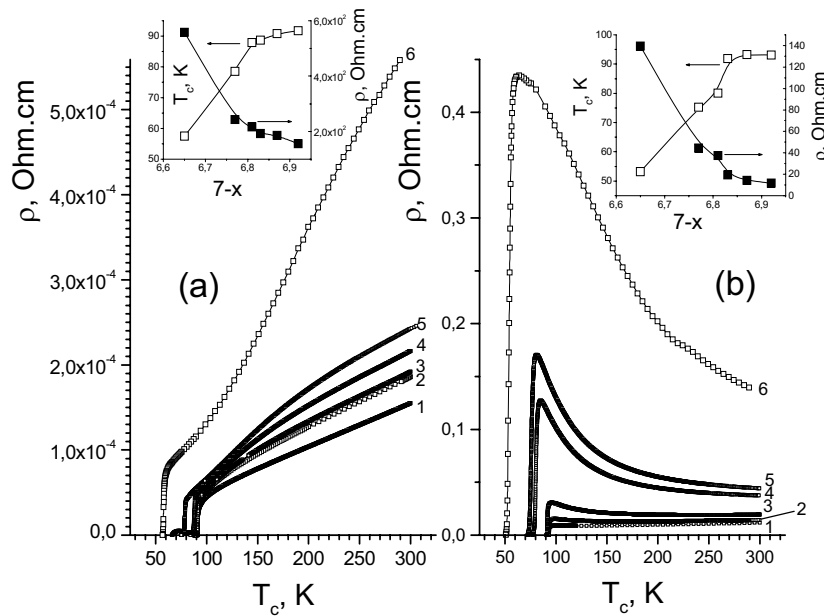


Рис.1. Температурні залежності електричного опору: (а) - в аб-площині $\rho_{ab}(T)$ монокристалу №1; (б) - уздовж осі c $\rho_c(T)$ монокристалу №2. Криві 1-6 виміряні після відпалювання зразків при температурах 670; 720; 760; 790; 810 і 890 К, відповідно. На відповідних вставках показані концентраційні залежності $T_c(7-x)$ (світлі символи) і $\rho_{300}(7-x)$ (темні символи) для кожного зразка.

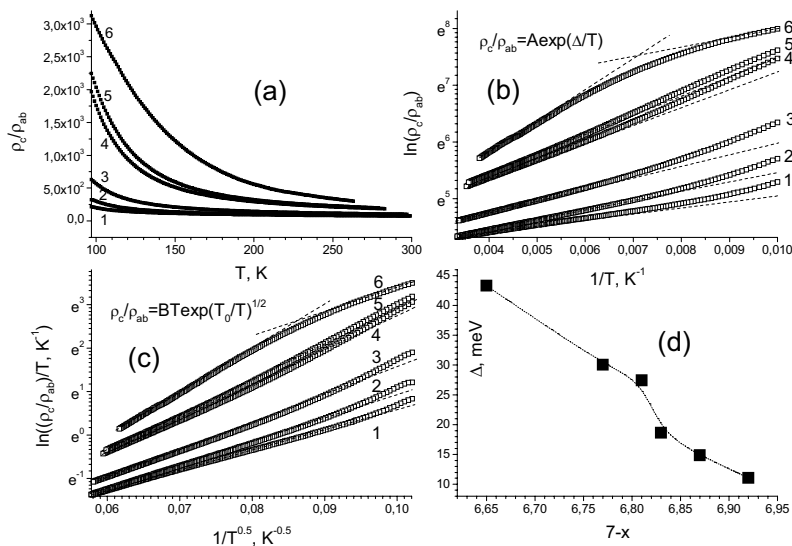


Рис.2. Температурні залежності анізотропії електричного опору $\rho_c/\rho_{ab}(T)$: (а) - в координатах $\rho_c/\rho_{ab} - T$; (б) - в координатах $\ln(\rho_c/\rho_{ab}) - 1/T$; (с) - в координатах $\ln[(\rho_c/\rho_{ab})/T] - 1/T^{0.5}$. Пунктирними лініями на рисунку показана апроксимація кривих співвідношеннями (2) і (3). На рис.2 (d) показана концентраційна залежність енергії активації $\Delta(7-x)$.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 а і б показані температурні залежності електроопору $\rho(T)$, виміряні вздовж і поперек базисної площини, відповідно, до і після відпалювання зразків при різних температурах. Видно, що зниження вмісту кисню приводить до збільшення питомого електроопору й зниження критичної температури (T_c) всіх зразків. Концентраційні залежності $\rho(7-x)$ і $T_c(7-x)$ для обох зразків наведені на відповідних вставках. Як можна бачити з рис. 1, існує принципова відмінність у поведінці залежностей $\rho_{ab}(T)$ від $\rho_c(T)$, вимірюваних паралельно і перпендикулярно базисній площині. У той час як відхилення від стехіометрії по кисню приводить до яскраво вираженої напівпровідникової поведінки кривих $\rho_c(T)$, у базисній площині, на залежностях $\rho_{ab}(T)$, в області досить високих температур, зберігається широка ($\approx 30K$) лінійна ділянка, що слугує достовірною ознакою нормального стану системи [4].

Температурні залежності анізотропії електричного опору $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ показані на рис. 2 у координатах $\rho_c/\rho_{ab} - T$ (а); $\ln(\rho_c/\rho_{ab}) - 1/T$ (б) і $\ln[(\rho_c/\rho_{ab})/T] - 1/T^{1/2}$ (с), що відповідає описанню функції $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ за допомогою співвідношення (2) у другому випадку і аналітичного виразу: $\rho_c / \rho_{ab} = BT \exp(T_0 / T)^{1/2}$, (3) у третьому. Тут B , T_0 – константи. Як відомо,

співвідношення (3) характерне для стрибкової провідності зі змінною довжиною стрибка - «закон 1/2» [6]. Видно, що зниження вмісту кисню приводить до значного зростання абсолютної величини анізотропії ρ_c/ρ_{ab} . При цьому, з рис. 2 (б) і (с) слідує, що хоча рівняння (2) і дозволяє якісно описати експериментальну залежність

в області відносно високих температур, але робить це помітно гірше, ніж співвідношення (3) для стрибкової провідності. З теорії відомо, що «закон $1/2$ » звичайно трактується як прояв кулонівської щільності в енергетичному спектрі носіїв, більше характерному для напівпровідникових сполук. З іншого боку, як було показано в роботі [6], співвідношення (3) носить набагато більш універсальний характер, і може виконуватися для широкого класу провідних сполук при досить великому ступені структурного розупорядкування. Зокрема, подібна ситуація реалізується для випадку гранульованих металів (нанокомпозитів) – сукупності малих металевих гранул у діелектричній матриці [6]. У той же час відомо, що допування ВТНП-купратів шляхом іновалентного заміщення або зміни вмісту кисню, приводить до розпаду системи на електрично нейтральні області двох типів - металеві, з високою концентрацією носіїв, і діелектричні [7]. При цьому вид доменів може "нав'язуватися" і впорядковуваним допантами. Очевидно, що при досить малому розмірі включень із металевою провідністю система може набувати ознак характерних для гранульованих металів. Як видно з рис. 2, у міру збільшення дефіциту кисню, кут нахилу залежностей зростає, що, у свою чергу, свідчить про зростання енергії активації. Концентраційна залежність $\Delta(7-x)$ наведена на рис. 2 (d) з якого видно, що величина енергії активації зростає із збільшенням дефіциту кисню. Слід також зазначити, що для кривих з найбільш низькою T_c при температурах поблизу 135 К спостерігається зміна кута нахилу більш ніж у два рази, що, у свою чергу, свідчить про зменшення енергії активації, і відображає наявність фазових переходів, які спостерігалися раніше в роботі [1] для монокристалів $YBaCuO$. Згідно [1], переходи такого типу впливають на кінетику переносу заряду.

ВИСНОВКИ

Таким чином, аналіз отриманих експериментальних даних дає підстави припустити, що зменшення вмісту кисню в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ приводить до виникнення локалізації носіїв у напрямку осі c і зміни міжшарової взаємодії. При цьому температурна залежність анізотропії питомого електричного опору $\rho_c/\rho_{ab}(T)$, добре описується за допомогою універсального «закону $1/2$ » для термоактиваційної стрибкової провідності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. М.А. Оболенский и др. Синтез и физические свойства монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // ФНТ. - 1990. -Т.16, №9. - С.1103-1127.
2. В.Н. Зверев, Д.В. Шовкун Анизотропия нормального сопротивления монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с дефицитом кислорода // Письма в ЖЭТФ. - 2000. -Т.72, №2. - С.103-108.
3. V.N. Zverev, D.V. Shovkun Pseudogap behavior of the normal state out-of-plane resistance in underdoped single crystals // Physica C. -2003. -Vol.391 - P.315-318.
4. М.А. Оболенский, Р.В. Вовк, А.В. Бондаренко О влиянии высокого давления на флуктуационную проводимость монокристаллов $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ с дефицитом кислорода // ФНТ. - 2006. –Т.32, №6. - С.802-805.
5. А.А. Абрикосов Резонансное тунелирование в высокотемпературных сверхпроводниках // УФН. - 1998. – Т.168, №6. - С.683-695.
6. М.З. Мейлихов Термоактивационная проводимость и вольт-амперная характеристика диэлектрической фазы гранулированных металлов // ЖЭТФ. - 1999. - Т.115, №4. - С.1484-1496.
7. М.А. Obolenskii, A.V. Bondarenko, R.V. Vovk, A.A. Prodan Resistive relaxation processes in oxygen-deficient single crystals of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // Low Temp. Phys. - 1997. – Vol.23, №11. - P.882-885.

EFFECT OF OXYGEN DEFICIT ON ANISOTROPY OF NORMAL TRANSPORT IN $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ SINGLE CRYSTALS

R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodny, A.V. Bondarenko, M.G. Revyakina, N.N. Chebotaev

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

e-mail: ruslan.v.vovk@univer.kharkov.ua

The temperature dependence of the longitudinal and transversal electrical resistivity of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals have been investigated on a step-by-step decrease in the oxygen contents in the process of thermal treatment. It is found that the anisotropy of the normal electric resistance $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ is well described by the universal “law $1/2$ ” of the thermally activated hopping conduction. The conception dependence of the activation energy has been obtained, which increases as the oxygen contents decrease.

KEY WORDS: anisotropy, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals, activation energy, longitudinal and transversal conductivities.