

УДК 538.945+537.312.62

ВПЛИВ ТИСКУ НА ПЕРЕХІД МЕТАЛ-ІЗОЛЯТОР В МОНОКРИСТАЛАХ  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

Аспіранти М. М. Іноземцев, В. А. Співак, Д. Ф. Ярчук, О. Г. Чепурін, Р. А. Лукавенко,  
д-р фіз.-мат. н. Р. В. Вовк

EFFECT OF PRESSURE ON THE METAL-INSULATOR TRANSITION IN  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$   
SINGLE CRYSTALS

Postgraduate students M. M. Inozemtsev, V. A. Spivak, D. F. Yarchuk, O. G. Chepurin,  
R. A. Lukavenko, D.Sc. in physics and mathematics R. V. Vovk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.313120>



**Анотація.** У роботі досліджено вплив високого гідростатичного тиску на провідність в базисній площині ВТНП-монокристалів  $YBaCuO$ . Встановлено, що збільшення дефіциту кисню у зразках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  призводить до посилення ефектів локалізації та реалізації в системі переходу виду метал – діелектрик, який завжди передує надпровідному переходу. Збільшення тиску призводить до істотного зміщення точки переходу метал – діелектрик в область високих температур.

**Ключові слова:** високотемпературна надпровідність, перехід метал – діелектрик, гідростатичний тиск, монокристали  $YBaCuO$ , ефекти локалізації.

**Abstract.** In present work we have investigated the effect of high hydrostatic pressure on conductivity in the *ab*-plane of the oxygen underdoped HTSC  $YBaCuO$  single crystals. It is shown, that the decreasing of oxygen concentration in samples of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  leads to enhancement of the localization and realization in the system of the metal – insulator transition, which always precedes the superconducting transition. Increasing the preassure leads to a significant shift of the metal – insulator transition to low temperatures.

**Key words:** high-temperature superconductivity, metal – insulator transition, hydrostatic pressure,  $YBaCuO$  single crystals, localization effects.

За відсутності мікроскопічної теорії високотемпературної надпровідності (ВТНП), особливого значення набули експериментальні методи, що дають змогу виявити параметри надпровідників, які найістотніше впливають на їхні фізичні характеристики в нормальному і надпровідному стані. Одним з таких найважливіших методів є використання високого тиску [1, 2]. Як відомо, докладання тиску до високотемпературного надпровідника  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  нестехіометричного

складу може приводити до істотної зміни електротранспортних параметрів як у надпровідному, так і у нормальному стані [2]. При цьому ступінь цих змін значно посилюється зі зростанням величини кисневого індексу  $\delta$  [1, 2]. Слід також зазначити, що згідно з сучасними уявленнями [2] вважається, що ключем до розуміння природи ВТНП можуть слугувати саме фізичні явища, які спостерігаються саме в нормальному стані при температурах поблизу і вище критичної ( $T_c$ ). Оскільки

характерною особливістю високотемпературних надпровідників (ВТНП) є близькість діелектричного та надпровідного станів [1], виникає закономірне питання про взаємовплив цих станів і роль, яку відіграють ефекти локалізації при виникненні надпровідності в ВТНП. Як зазначалося вище, найбільш інформативним в цьому аспекті представляється вивчення саме зразків з нестачею кисню з частково пригніченими надпровідними параметрами і більш яскраво вираженими локалізаційними особливостями. Проте, слід зазначити, що, не дивлячись на великий експериментальний матеріал, накопичений до теперішнього часу, лише вельми обмежена кількість робіт [3] була присвячена саме дослідженню впливу тиску на локалізацію носіїв в ВТНП-сполуках і область реалізації переходів виду метал-діелектрик.

З урахуванням вищесказаного, у цій роботі була поставлена мета дослідити вплив високого гідростатичного тиску на провідні характеристики в базисній площині недодопованих киснем монокристалів  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

**Матеріали і експериментальні методики.** Монокристали  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  вирощували за розчин-розплавною технологією в золотому тиглі, згідно з методикою [1]. 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 осі  $c$ . Для отримання зразків з оптимальним вмістом кисню відібрані кристали відпалювали в потоці кисню при температурі  $400^\circ\text{C}$  протягом п'яти діб. Для зменшення вмісту кисню проводили їх відпалювання протягом однієї доби в атмосфері повітря при температурі  $450^\circ\text{C}$ . Електроконтакти створювали за стандартною чотиризондовою схемою шляхом нанесення срібної пасти на поверхню кристала і під'єднання срібних провідників діаметром  $0.05 \text{ мм}$  з подальшим тригодинним відпалюванням при

температурі  $200^\circ\text{C}$  в атмосфері кисню. Така процедура дала змогу отримувати перехідний контактний електроопір менше одного Ома і проводити резистивні вимірювання при транспортних струмах до  $10 \text{ mA}$  в  $ab$ -площині. Гідростатичний тиск створювали в автономній камері типу поршень-циліндр [1]. Величину тиску вимірювали за допомогою манганінового манометра, температуру – мідь-константановою термопарою, вмонтованою в зовнішню поверхню камери на рівні розміщення зразка.

**Результати і обговорення.** На рис. 1 показані температурні залежності електроопору в базисній  $ab$ -площині, виміряні при різному тиску для монокристалів  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  з дефіцитом кисню  $\delta \approx 0.45$  і критичною температурою  $T_c \approx 50 \text{ K}$ . Слід зазначити, що зменшення вмісту кисню, крім зниження  $T_c$  (від  $92$  до  $50 \text{ K}$ ), приводить до трансформації форми залежностей  $\rho_{ab}(T)$ , що відображається в переході від квазіметалевої поведінки кривих, характерної для оптимально допованих зразків [1], до залежностей з характерним термоактиваційним прогином. Видно, що зі збільшенням величини прикладеного тиску критична температура зростає, а електроопір зменшується, що узгоджується з літературними даними [2].

При цьому слід зазначити, що всі криві зберігають вид залежності  $\rho_{ab}(T)$  з характерним термоактиваційним прогином, що свідчить про значну роль, яку відіграють ефекти локалізації в електротранспорті експериментального зразка. На рис. 2 ці ж залежності наведені в координатах  $\ln \rho_{ab} - 1/T$ . Видно, що в цих координатах експериментальні криві спрямляються в досить широкому температурному інтервалі, що відповідає їхньому описанню за допомогою аналітичного співвідношення:

$$\rho(T) \sim \exp\left(\frac{\Delta}{T}\right), \quad (1)$$

де  $\Delta$  – деяка енергія активації.

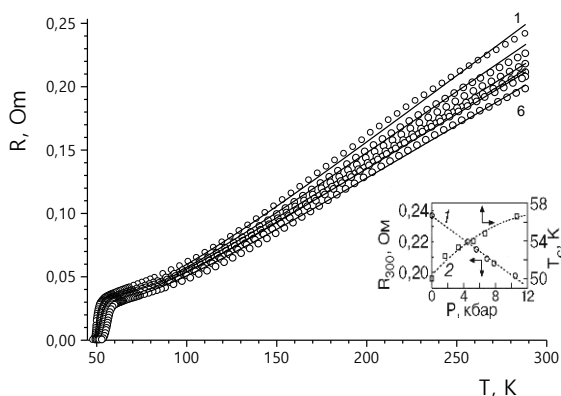


Рис. 1. Температурні залежності електроопору  $\rho_{ab}$  монокристалів  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  отримані при тиску 0; 2.9; 5.6; 6.9; 7.8 і 10,45 кбар – криві 1-6, відповідно. Суцільними лініями показана апроксимація посередництвом співвідношення (2). На вставці – баричні залежності  $T_c(P)$  і  $R_{300}(P)$

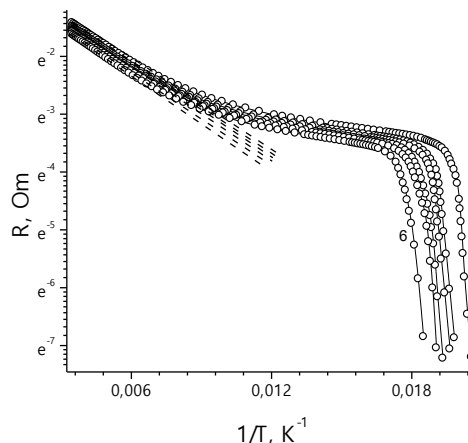


Рис. 2. Залежності  $\ln \rho_{ab} - 1/T$  при різному тиску. Нумерація кривих відповідає рис. 1

У той же час, при зниженні температури нижче за деяке характерне значення починається систематичне відхилення експериментальних точок від лінійної залежності, що, за [4], може слугувати ознакою реалізації в системі переходу метал – діелектрик (МД) «андерсонівського» типу. Як відомо з літератури [4], перехід Андерсона може відбуватися також і в речовинах, які не є аморфними, але які одночасно мають певний ступінь неупорядкованості. У сполуках системи 1-2-3 роль такого фактора може відігравати розупорядкування лабільної компоненти [1,2,5].

У роботі [3] для аналізу експериментальних кривих  $\rho_{ab}(T)$  була запропонована формула:

$$\rho = \frac{\rho_0 + \alpha T}{1 - n \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \right]} - \frac{\beta T_c}{T - T_c}, \quad (2)$$

де перший доданок описує металевий або напівпровідниковий температурний хід електроопору в нормальному стані, а другий – флуктуаційну надпровідність, що виникає при температурі вище резистивного переходу в нормальний стан [5];  $n$  і  $1-n$  – частки

металевої і напівпровідникової провідностей, відповідно.

Флуктуаційна парaproвідність для цих експериментальних кривих більш детально аналізується нами в [5]. Апроксимація експериментальних даних за допомогою першого доданку у формулі (2) показана на рис. 1 суцільними кривими. При цьому слід зазначити, що всі підгоночні параметри, використані в нашому аналізі, є лінійними залежностями одного з них, який фактично збігається зі значеннями концентрації празеодима в наших зразках. Отже, можна зробити висновок про те, що в нашому випадку формула (2), як і в роботі [3], по суті є однопараметричною.

Використовуючи значення параметрів, отриманих з аналізу наших кривих за допомогою формули (2), ми, за методикою [3], розділили вклади, що відповідають металевій і напівпровідниковій складовим провідності для всіх досліджених зразків. На рис. 3 (a-f) подано температурні залежності  $\sigma_{мет}(T)$  і  $\sigma_{н.п.}(T)$ , розраховані за формулами (3) [3] з використанням вищевказаних параметрів:

$$\sigma_1 = \frac{1-n}{\rho_0 + \alpha T} \quad \text{і} \quad \sigma_2 = \frac{n}{(\rho_0 + \alpha T) \exp(\frac{\Delta E}{2kT})} \quad (3).$$

З рис. 3 видно, що незважаючи на те, що зі збільшенням концентрації празеодима частка напівпровідникової складової

зростає, надпровідний перехід завжди настає після того, як починає виконуватися нерівність  $\sigma_{мет} > \sigma_{н.п.}$ . Іншими словами, можна зробити висновок про те, що в зразках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  надпровідний перехід завжди передує переходу метал – діелектрик.

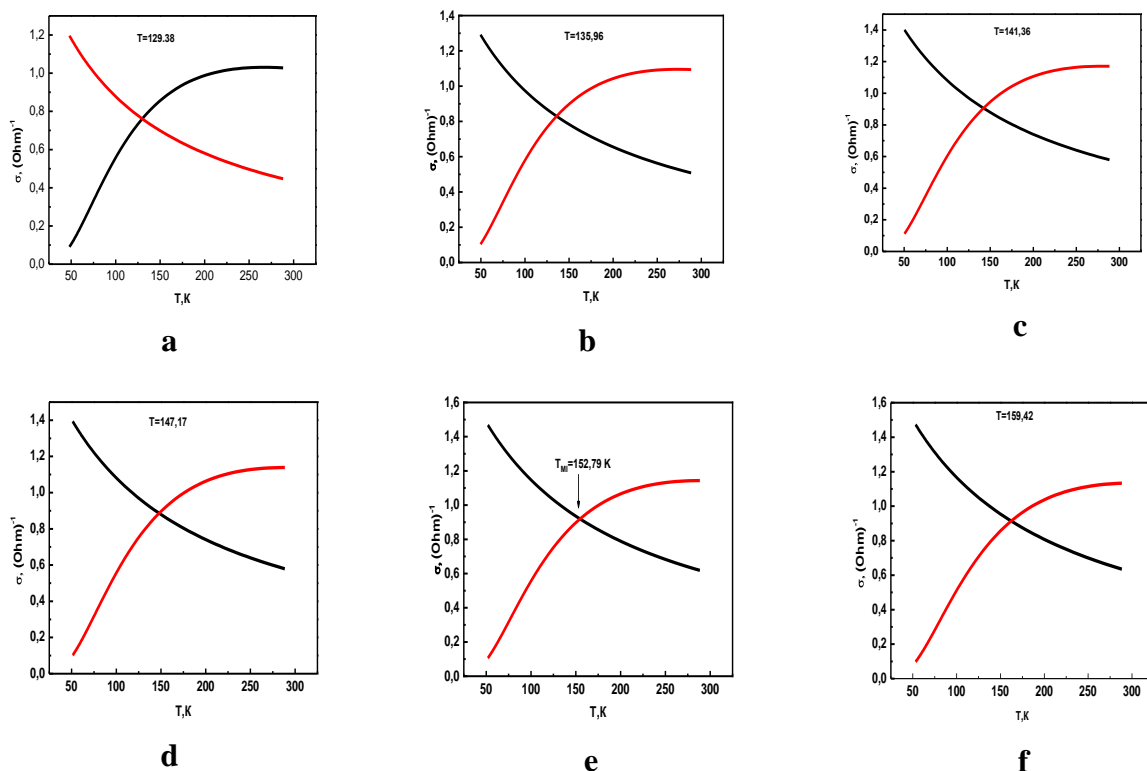


Рис. 3. Температурні залежності  $\sigma_{мет}(T)$  і  $\sigma_{н.п.}(T)$  отримані при тиску 0; 2.9; 5.6; 6.9; 7.8 і 10,45 кбар – рисунки (а–f), відповідно. Стрілочками позначені точки, що відповідають температурі  $T_M$

Якщо за точку переходу метал – діелектрик умовно приймати температуру  $T_M$ , при якій  $\sigma_{мет} = \sigma_{н.п.}$ , то можна бачити, що збільшення концентрації празеодима призводить до істотного зміщення  $T_M$  в область низьких температур (рис. 4).

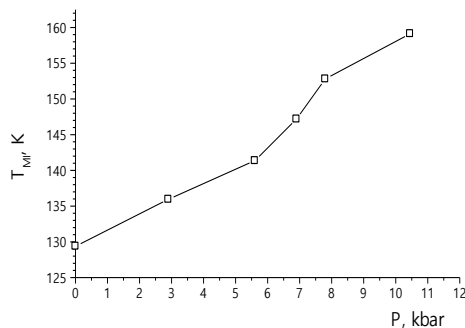


Рис.4. Залежність температури переходу метал – діелектрик  $T_M$  від величини прикладеного тиску

**Висновки.** На закінчення стисло підсумуємо результати, отримані в цій роботі. Зниження ступеня допування киснем в зразках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  призводить до посилення ефектів локалізації та реалізації в системі переходу виду метал – діелектрик, який завжди передує надпровідному

переходу. Збільшення величини прикладеного тиску призводить до істотного зміщення точки переходу  $T_m$  в область більш високих температур, що ймовірно, пов'язано зі зниженням частки напівпровідникового внеску в провідність експериментальних зразків.

### Список використаних джерел

1. Оболенский М. А., Вовк Р. В., Бондаренко А. В., Самойлов А. В. Влияние плоских дефектов и высокого давления на флуктуационную проводимость монокристаллов  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  оптимального состава. *ФТВД*. 2006. Т. 16, № 1. С. 56-63.
2. Sadewasser S., Schilling J.S., Paulicas A.P., Veal B.M. Pressure dependence of  $T_c$  to 17 GPa with and without relaxation effects in superconducting  $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ . *Phys. Rev. B*. 2000. V. 61, № 1. P. 741-749.
3. Волошин В. А., Абальшева И. С., Бочкова Г. Ю., Бойко Ф. А., Дорошенко Н. А., Южелевский Я. И. Условия перехода в сверхпроводящее состояние системы  $YReBaCuO$  (Re = Pr, Nd). *ФТТ*. 1996. Т. 38, № 5. С. 1553-1558.
4. Mott N.F. Metal-insulator transition. Word Scientific: London, 1974.
5. Vovk R. V., Obolenskii M. A., Zavgorodniy A. A., Bondarenko A. V., Goulatis I. L., Samoilov A. V., Chronos A. I. Effect of high pressure on the fluctuation conductivity and the charge transfer of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. V. 453. P. 69-74.

---

Іноземцев М. М., Співак В. А., Ярчук Д. Ф., Чепурін О. Г., аспіранти, Український державний університет залізничного транспорту.

Лукавенко Р. А., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна.

Вовк Р. В. дійсний член (академік) НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту.

Email: rvvovk2017@gmail.com.

Inozemtsev M. M., Spivak V. A., Yarchuk D. F., Chepurin O. G., Postgraduate students, Ukrainian State University of Railway Transport.

Lukavenko R. A., V. N. Karazin Kharkiv National University.

Vovk R. V. Full member (academician) of the National Academy of Sciences of Ukraine, D.Sc. in physics and mathematics, Ukrainian State University of Railway Transport. Email: rvvovk2017@gmail.com.

Статтю прийнято 21.03.2024 р.