

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-03>

UDC 53.092+537.311+537.312+538.91+539.374+669.715

PACS numbers: 74.72.-h, 74.72.Bk, 74.62.Fj, 74.62.Dh

ЕВОЛЮЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРООПОРУ МОНОКРИСТАЛІВ $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ В ШИРОКОМУ ІНТЕРВАЛІ ПРИКЛАДЕНОГО ТИСКУ І КОНЦЕНТРАЦІЙ ДОМІШОК ПРАЗЕОДИМУ

Г. Я. Хаджай¹, В. Ф. Коршак¹, М. М. Іноземцев¹, В. А. Співак¹,
Д. Ф. Ярчук¹, О. Г. Чепурін¹, А. О. Комісаров¹, О. Ю. Врагов¹,
В. О. Ковригін¹, Junyi Du^{1,2}, Л. О. Пащенко¹, Р. В. Вовк¹

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

²Школа математичних наук Лоянського педагогічного університету, 471934 Лоян, Китай

E-mail: rvvovk2017@gmail.com

Надійшла до редакції 15 квітня 2024 р. Переглянуто 19 травня 2024 р.

Прийнято до друку 22 травня 2024 р.

У роботі досліджено вплив високого гідростатичного тиску $0 \leq P \leq 17$ кбар на електричний опір $\rho(T)$ у базисній ab -площині допованих празеодимом монокристалів системи $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при $0 \leq x \leq 0.34$. Монокристали сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ вирощували за розчин-розплавною технологією в золотому тиглі. Гідростатичний тиск створювали у мультиплікаторі типу поршень-циліндр. Тиск визначали манганіновим манометром, температуру – мідь-константановою термпарою. Встановлено, що збільшення тиску приводить до зростання критичної температури досліджених сполук та до зменшення їх електричного опору, що відповідає літературним даним для полікристалічних зразків. Поблизу надпровідного переходу вигляд температурних похідних електричного опору $d\rho/dT$ сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ свідчить про певну неоднорідність зразків, тобто про наявність у зразках областей з різними температурами надпровідного переходу T_c , що переходять у надпровідний стан у міру досягнення T_c . При проміжних концентраціях празеодиму такі області переходять у надпровідний стан послідовно, але при $x = 0$ та $x = 0.34$ вигляд $d\rho/dT$ свідчить про наявність перколяційних шляхів протікання транспортного струму. Значення T_c та літературні дані відносно температури Дебая вказують на те, що формула МакМіллана може бути застосованою тільки для таких сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, які мають $T_c \leq 65$ К (тобто, для $x, \delta > 0.3$), і дає при цьому дуже високі значення константи електрон-фононої взаємодії, $\lambda \sim 1$. Виявлено, що, на відміну від бездомішкових зразків $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з оптимальним вмістом кисню, прикладання високого тиску приводить до кратного зростання величини баричної похідної dT_c/dP . Встановлено, що, в межах експериментально досягнутих тисків, не реєструється зміна знаку баричних похідних dT_c/dP при збільшенні тиску, що спостерігалось на полікристалічних зразках з близькими значеннями концентрації празеодиму. Обговорюються можливі механізми впливу високого тиску на критичну температуру переходу в надпровідний стан T_c з урахуванням особливостей в електронному спектрі носіїв.

Ключові слова: монокристали $YBaCuO$, допування празеодимом, гідростатичний тиск, фазове розширення, баричні похідні.

Як цитувати: Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, М. М. Іноземцев, В. А. Співак, Д. Ф. Ярчук, О. Г. Чепурін, А. О. Комісаров, О. Ю. Врагов, В. О. Ковригін, Junyi Du, Л. О. Пащенко, Р. В. Вовк. Еволюція температурних залежностей електроопору монокристалів $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в широкому інтервалі прикладеного тиску і концентрацій домішок празеодиму. Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 40, 2024, 35–40. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-03>

In cites: G. Ya. Hadzhai, V. F. Korshak, M. M. Inozemtsev, V. A. Spivak, D. F. Yarchuk, O. G. Chepurin, A. O. Komisarov, O. Yu. Vragov, V. O. Kovrygin, Junyi Du, L. O. Pashchenko, R. V. Vovk. Evolution of the temperature dependences of electrical resistance of $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals in a wide range of applied pressure and concentrations of praseodim impurities. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 40, 2024, 35–40. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-03> (in Ukrainian).

© G. Ya. Hadzhai, V. F. Korshak, M. M. Inozemtsev, V. A. Spivak, D. F. Yarchuk, O. G. Chepurin, A. O. Komisarov, O. Yu. Vragov, V. O. Kovrygin, Junyi Du, L. O. Pashchenko, R. V. Vovk (2024)

ВСТУП

Відомо, що сполуки $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Y}$ та інші рідкоземельні елементи) є технологічно важливими структурами для отримання новітніх перспективних матеріалів з високою струмонесучою здатністю, забезпечення компонентів для виготовлення осередків пам'яті, надчутливих елементів зчитування та надшвидкісних ліній зв'язку на основі ВТНП. Характерною особливістю ВТНП-купратів є наявність широкої ділянки надлишкової провідності $\Delta\sigma$ нижче певної температури T^* . На температурних залежностях електричного опору $\rho(T)$ це відображається відхиленням донизу від високотемпературної лінійної ходи. Важливу роль при цьому відіграє склад та топологія дефектного ансамблю, що визначають умови протікання транспортного струму та механізми розсіювання носіїв. Як відомо [1, 2], зміна ступеня відхилення від кисневої стехіометрії та допування домішками празеодиму є ефективними методами модифікування електротransпортних характеристик та зміни критичних параметрів високотемпературних надпровідних сполук системи $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. При цьому, однак, збільшення ступеня дефіциту кисню до $\delta \geq 0.15$ часто приводить до виникнення в системі нерівноважного стану [3], який може бути досить легко індукований прикладанням високого тиску [1], стрибкоподібною зміною температури [4] або виникати в результаті тривалого зберігання [5] експериментальних зразків. Такий нерівноважний стан, як правило, супроводжується досить інтенсивно протікаючими процесами структурної релаксації [1], які, зі свого боку, істотно впливають на цілу низку фізичних характеристик цієї сполуки, у тому числі магніторезистивних. Внесення домішок празеодиму, у разі оптимально допованих киснем зразків $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, як свідчать відомі літературні джерела (див., наприклад [1, 2]), не впливає на реалізацію нерівноважного стану в цій сполуці, що дозволяє, шляхом порівняльного аналізу, виділити роль та механізми впливу перерозподілу лабільного кисню на електротransпортні характеристики досліджуваних зразків. Водночас, прикладання високого тиску приводить до виникнення деяких особливостей у поведінці баричних залежностей резистивних характеристик цієї ВТНП-системи [1].

Згідно з літературними даними [2, 3], прикладання високого тиску до зразків високотемпературних надпровідних сполук системи $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{R} = \text{Y}$, або лантаноїди), у переважній більшості випадків, приводить до істотного зростання величини критичної температури переходу в надпровідний стан зі швидкостями $dT_c/dP \approx (0.1-3)$ кбар. Виняток при цьому складають сполуки системи $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, у яких, при певних значеннях концентрації празеодиму,

можуть спостерігатися як позитивні, так і негативні значення баричної похідної dT_c/dP а в окремих випадках і зміна її знаку в міру зростання прикладеного тиску [1]. Подібні особливості автори, як правило, пояснюють проявом, так званої, “аномалії празеодиму” – пригнічення провідних і надпровідних характеристик сполуки $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при внесенні домішок празеодиму. При цьому критична температура зменшується від $T_c \approx 90$ К, при $x = 0$, до повного зникнення надпровідності, при $x \approx 0.7$ [1].

На сьогодні існують декілька теоретичних моделей, присвячених поясненню виникнення “аномалії празеодиму”, найбільш відомими з яких є “hole filling model”, “pair breaking phenomena”, а також моделі, що передбачають локалізацію діркових носіїв та, обумовлені взаємодією з іонами празеодима, різні уявлення про механізми перебудови зонних станів (огляд [1]). Дискусія з цього питання продовжується дотепер. З огляду на обмежений обсяг нашого повідомлення, ми не проводимо тут докладний аналіз цих явищ, залишаючи його для окремої роботи.

Слід також зауважити, що значна частина експериментальних даних, отриманих при дослідженні впливу високого тиску на транспортні характеристики сполук $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, була отримана на керамічних, плівкових чи текстурованих зразках з вельми різною технологічною передісторією [1]. Водночас найбільш інформативними, у цьому сенсі, є дослідження на монокристалічних зразках, як найбільш досконалих об'єктах, у яких практично відсутні такі структурні дефекти як міжгранулярні межі й дислокації невідповідності на границі розділення плівка – підкладина тощо.

У цій роботі були проведені вимірювання електроопору $\rho(T)$ у базисній ab -площині на досконалих монокристалічних зразках $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ у широкому інтервалі тиску ($0 \leq P \leq 17$ кбар) та концентрації празеодиму ($0 \leq x \leq 0.34$).

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

ВТНП-монокристали сполук $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ вирощували за розчин-розплавною технологією в золотому тиглі, згідно з методикою, розробленою авторами [3]. Для проведення резистивних досліджень відбирали кристали прямокутної форми розміром приблизно $3 \times 0.5 \times 0.03$ мм³. Найменший розмір кристала відповідав напрямку c -осі. Електричні контакти створювали за стандартною 4-х контактною схемою шляхом нанесення срібної пасти на поверхню кристала з наступним приєднанням срібних провідників діаметром 0.05 мм та тригодинним відпалом при температурі 200 °С в атмосфері кисню. Така процедура дозволяла отримати перехідний опір

контактів менше одного Ома та проводити резистивні вимірювання при транспортних струмах до 10 мА в ab -площині. Гідростатичний тиск створювали у мультиплікаторі типу поршень-циліндр [2, 3]. Величину тиску визначали за допомогою манганінового манометра, температуру – мідь-константанової термопари, вмонтованої у зовнішню поверхню камери на рівні положення зразка.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1–рис. 4 наведено залежності $\rho(T)$ в інтервалі температур від кімнатної до критичної, отримані у випадку прикладання високого тиску до ~ 17 кбар до зразків з різною концентрацією празеодиму ($x = 0$ – 0.34). Як видно з цих рисунків, при збільшенні тиску критична температура збільшується, а електроопір $\rho(T)$ зменшується, що якісно узгоджується з літературними даними для полікристалічних зразків [1].

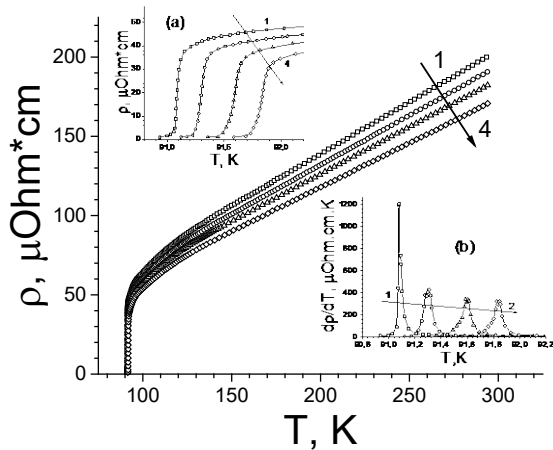


Рис. 1. Температурні залежності електроопору у базисній площині $\rho(T)$ монокристала $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, виміряні для $x = 0$ за тисків P : 0; 2.5; 6.51; 9.5 кбар – криві 1–4 відповідно. Вставка (а): резистивний перехід до надпровідного стану. Вставка (б): $d\rho(T)/dT$ в області надпровідного стану. Нумерація кривих на вставках відповідає нумерації на основній панелі.

Fig. 1. Temperature dependences of electrical resistivity in the basal plane $\rho(T)$ of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal, measured for $x = 0$ at pressures, P : 0; 2.5; 6.51; 9.5 kbar – curves 1–4, respectively. Inset (a): resistive transition to the superconducting state. Inset (b): $d\rho(T)/dT$ in the region of the superconducting state. The numbering of the curves in the insets corresponds to the numbering in the main panel.

На вставках (а) та (б) до рис. 1 показано резистивні переходи в надпровідний стан в координатах $\rho(T)$ vs T , та $d\rho(T)/dT$ vs T . Як видно зі вставок, на надпровідних

переходах зразків з нульовою та максимальною концентрацією празеодиму практично відсутня східчаста структура, яка спостерігалась для двох проміжних концентрацій празеодиму – рис. 2 та рис. 3. Наявність східчастої структури може вважатися достовірною ознакою присутності в системі макроскопічних областей з різними T_c [3], які з'єднані послідовно та переходять у надпровідний стан у міру досягнення T_c . Водночас відсутність таких сходинок на резистивних переходах нашого зразка може бути ознакою існування в об'ємі зразка перколяційних шляхів протікання транспортного струму [2, 3], коли одна з областей шунтує інші.

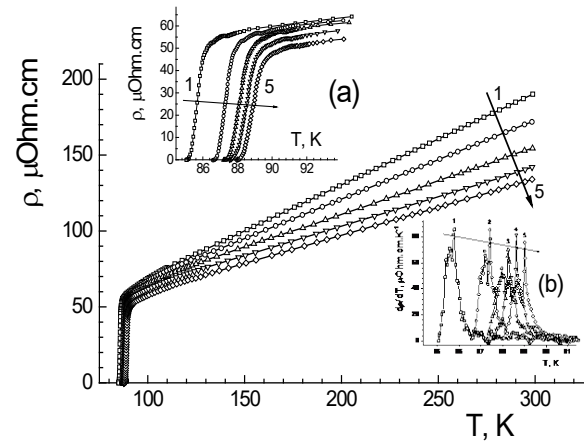


Рис. 2. Температурні залежності електроопору у базисній площині $\rho(T)$ монокристала $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, виміряні для $x = 0.05$ за тисків P : 0; 4.52; 9.17; 12.74; 17.05 кбар – криві 1–5 відповідно. Вставка (а): резистивний перехід до надпровідного стану. Вставка (б): $d\rho(T)/dT$ в області надпровідного стану. Нумерація кривих на вставках відповідає нумерації на основній панелі.

Fig. 2. Temperature dependences of electrical resistivity in the basal plane $\rho(T)$ of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal, measured for $x = 0.05$ at pressures, P : 0; 4.52; 9.17; 12.74; 17.05 kbar – curves 1–5, respectively. Inset (a): resistive transition to the superconducting state. Inset (b): $d\rho(T)/dT$ in the region of the superconducting state. The numbering of the curves in the insets corresponds to the numbering in the main panel.

Залежності $T_c(P)$ для досліджених зразків показано на рис. 5. Видно, що швидкість зростання критичної температури з тиском збільшується з ростом x та досягає для зразка з максимальним вмістом празеодиму $dT_c/dP \approx 0.33$ К/кбар в інтервалі експериментально досягнутих тисків. Також видно, що для кожної концентрації Pr максимальне зростання

критичної температури спостерігається в інтервалі тисків від 0 до 3–4 кбар, після чого величина баричної похідної, dT_c/dP , кратно зменшується, про що більш детально буде сказано нижче.

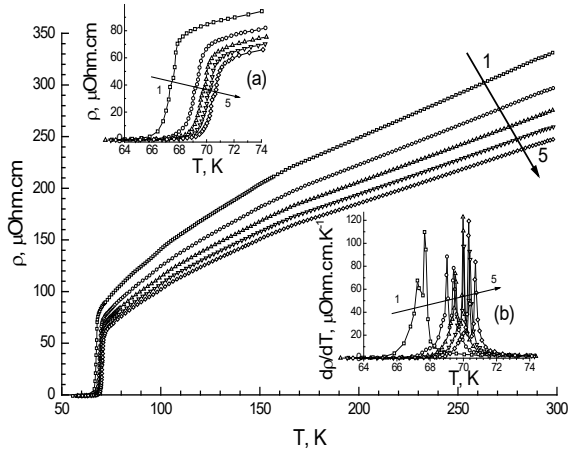


Рис. 3. Температурні залежності електроопору у базисній площині $\rho(T)$ монокристала $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, виміряні для $x = 0.23$ за тисків P : 0; 4.1; 6.4; 8.7; 11 кбар – криві 1–5 відповідно. Вставка (а): резистивний перехід до надпровідного стану. Вставка (б): $d\rho(T)/dT$ в області надпровідного стану. Нумерація кривих на вставках відповідає нумерації на основній панелі.

Fig. 3. Temperature dependences of electrical resistivity in the basal plane $\rho(T)$ of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal, measured for $x = 0.23$ at pressures, P : 0; 4.1; 6.4; 8.7; 11 kbar – curves 1–5, respectively. Inset (a): resistive transition to the superconducting state. Inset (b): $d\rho(T)/dT$ in the region of the superconducting state. The numbering of the curves in the insets corresponds to the numbering in the main panel.

Як відзначалося нами в попередніх роботах, значення величини баричної похідної до $dT_c/dP \leq 0.2$ К/кбар можуть бути успішно пояснені з використанням для якісного аналізу залежностей $T_c(P)$ відомої формули МакМіллана [6]:

$$T_c = \frac{\theta_D}{1.45} \exp\left[-\frac{1.04(1+\lambda)}{\lambda - \mu^*(1+0.62\lambda)}\right], \quad (1)$$

де θ_D – температура Дебая, μ^* – екранований кулонівський псевдопотенціал, що характеризує відштовхування електронів, λ – константа електрон-фононної взаємодії, яка, зі свого боку, залежить від параметрів електронного та фононного спектрів надпровідника:

$$\lambda = \frac{N(\varepsilon_F) \langle I^2(\vec{k}-\vec{k}') \rangle}{M\theta_D^2}, \quad (2)$$

де $N(\varepsilon_F)$ – густина станів на рівні Фермі, I – усереднений по поверхні Фермі матричний елемент електрон-фононної взаємодії, M – маса іона.

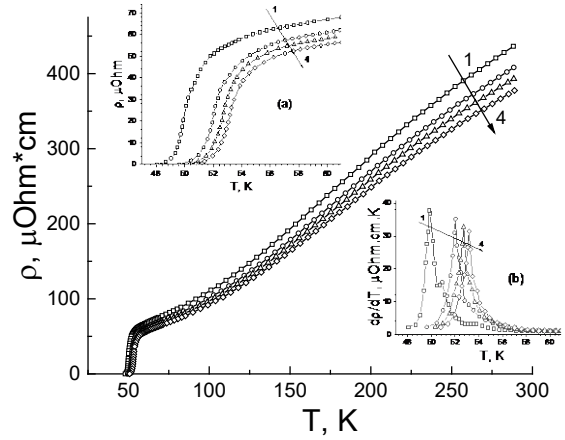


Рис. 4. Температурні залежності електроопору у базисній площині $\rho(T)$ монокристала $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, виміряні для $x = 0.34$ за тисків P : 0; 3.72; 6.53; 9.7 кбар – криві 1–4 відповідно. Вставка (а): резистивний перехід до надпровідного стану. Вставка (б): $d\rho(T)/dT$ в області надпровідного стану. Нумерація кривих на вставках відповідає нумерації на основній панелі.

Fig. 4. Temperature dependences of electrical resistivity in the basal plane $\rho(T)$, of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal, measured for $x = 0.34$ at pressures, P : 0; 3.72; 6.53; 9.7 kbar – curves 1–4, respectively. Inset (a): resistive transition to the superconducting state. Inset (b): $d\rho(T)/dT$ in the region of the superconducting state. The numbering of the curves in the insets corresponds to the numbering in the main panel.

Як було показано в [7], формула МакМіллана цілком коректна лише за $\lambda \leq 1.5$. Значення $\lambda \leq 1.5$ можна отримати, якщо величина $\ln(1.45*T_c/\theta)$ буде знаходитися в межах від -10 до -2 . Для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ це реалізується в інтервалі $x, \delta > 0.3$. У [8] наводяться дані про кореляцію між T_c та λ (λ обчислена за формулою МакМіллана для $\mu^* = 0.13$) для 12 перехідних металів. На вставці до рис. 5 наведено ці дані разом з аналогічними даними для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [7]. Видно, що тільки для $T_c \leq 65$ К дані для перехідних металів узгоджуються з даними для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Це свідчить про сильну електрон-фононну взаємодію в цих речовинах. Для $T_c \geq 65$ К ($x, \delta < 0.3$) λ різко зростає, а потім переходить у негативну область. Таким чином, ВТНП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ можна назвати надпровідниками з

сильним зв'язком тільки після x , $\delta > 0.3$, при менших значеннях x або δ формула МакМіллана очевидно не може бути застосована.

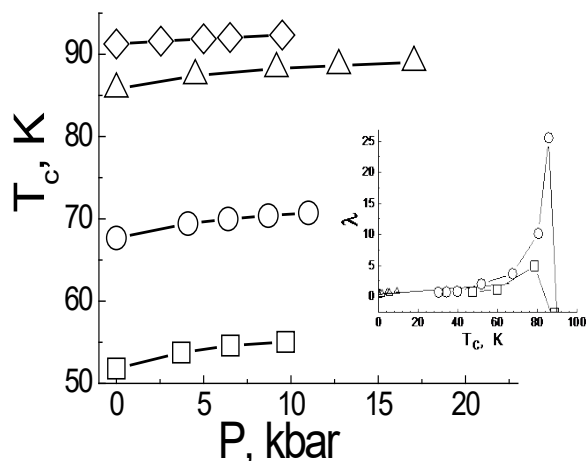


Рис. 5. Баричні залежності T_c монокристалів $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ для $x = 0$ (\diamond); $x = 0.05$ (Δ); $x = 0.23$ (\circ); $x = 0.34$ (\square). На вставці показано кореляцію між T_c та λ , обчислену за формулою МакМіллана: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ – \square ; $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ – \circ ; 12 перехідних металів – Δ [8].

Fig. 5. Baric dependences of T_c of $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals for $x = 0$ (\diamond); $x = 0.05$ (Δ); $x = 0.23$ (\circ); $x = 0.34$ (\square). The inset shows the correlation between T_c and λ , calculated according to McMillan's formula: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ – \square ; $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ – \circ ; 12 transition metals – Δ [8].

Крім того, як зазначалося вище, в [1] спостерігали зміну знака dT_c/dP . Усе вищесказане не дозволяє однозначно інтерпретувати отримані дані в рамках теорії БКШ. Вірогідно такі значення величини dT_c/dP , а також кратне зменшення величини dT_c/dP з ростом тиску можуть бути пов'язані з особливостями зонної структури сполуки $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [9]. Слід також зазначити, що, в межах експериментально досягнутих тисків, ми не зареєстрували зміни знаку баричних похідних dT_c/dP при збільшенні тиску, що спостерігалось в [1] на полікристалічних зразках з близькими значеннями концентрації празеодиму. Очевидно, що для остаточного прояснення цього питання потрібні додаткові дослідження на зразках з більш високим вмістом празеодиму і в більш широкому діапазоні прикладеного тиску.

ВИСНОВКИ

Результати, що викладені вище, дозволяють зробити такі висновки:

1. При збільшенні тиску критична температура сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($0 \leq x \leq 0.34$) збільшується, а електроопір зменшується, що якісно узгоджується з літературними даними для полікристалічних зразків.

2. Поблизу надпровідного переходу температурні похідні опору сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при проміжних концентраціях празеодиму демонструють наявність у зразках областей з різними T_c , що переходять у надпровідний стан послідовно. При $x = 0$ та $x = 0.34$ така поведінка відсутня, що вказує на наявність перколяційних шляхів протікання транспортного струму.

3. Формула МакМіллана може бути застосованою тільки для сполук $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з $T_c \leq 65$ К (x , $\delta > 0.3$), і дає при цьому дуже високі значення константи електрон-фононої взаємодії, $\lambda \sim 1$.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. M. Akhavan. *Physica B*, 321, 265 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00860-8)
2. R. V. Vovk, A. L. Solovyov. *Low Temp. Phys.*, 44, 81 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5020905>
3. D. D. Balla, A. V. Bondarenko, R. V. Vovk, M. A. Obolenskii, and A. A. Prodan. *Low Temp. Phys.*, 23, 777 (1997). <https://doi.org/10.1063/1.593445>
4. M. A. Obolenskii, A. V. Bondarenko, R. V. Vovk, A. A. Prodan. *Low Temp. Phys.*, 23 (11), 882 (1997). <https://doi.org/10.1063/1.593496>
5. R. V. Vovk, N. R. Vovk, G. Y. Khadzhai, O. V. Dobrovolskiy, Z. N. Nazyrov, J. Mater. Sci.: Mater. Electr., 25 (12), 5226 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2292-5>
6. W. L. McMillan. *Phys. Rev.*, 167, 331 (1968). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.167.331>
7. G. Ya. Khadzhaj, A. V. Matsepulin, A. Chroneos, I. L. Goulatis, R. V. Vovk. *Solid State Communications*, 327, 114205 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2021.114205>
8. S. V. Vonsovskiy, Y. A. Izyumov, E. Z. Kurmaev, *Superconductivity of Transition Metals*, Springer, Berlin Heidelberg (2011), 512 p.
9. U. Schwingensclogl and C. Schuster. *Appl. Phys. Lett.*, 100, 253111 (2012).

Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, М. М. Иноземцев, В. А. Співак, Д. Ф. Ярчук, О. Г. Чепурін,
А. О. Комісаров, О. Ю. Врагов, В. О. Ковригін, Junyi Du, Л. О. Пащенко, Р. В. Вовк

EVOLUTION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF ELECTRICAL RESISTANCE OF $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ SINGLE CRYSTALS IN A WIDE RANGE OF APPLIED PRESSURE AND CONCENTRATIONS OF PRASEODIUM IMPURITIES

G. Ya. Hadzhai¹, V. F. Korshak¹, M. M. Inozemtsev¹, V. A. Spivak¹,
D. F. Yarchuk¹, O. G. Chepurin¹, A. O. Komisarov¹, O. Yu. Vragov¹,
V. O. Kovrygin¹, Junyi Du^{1,2}, L. O. Pashchenko¹, R. V. Vovk¹

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

²School of Mathematical Sciences, Luoyang Normal University, 471934 Luoyang, China

E-mail: rvvovk2017@gmail.com

Received on April 15, 2024. Reviewed on May 19, 2024.

Accepted for publication on May 22, 2024.

The effect of high hydrostatic pressure $0 \leq P \leq 17$ kbar on the electrical resistance $\rho(T)$ in the basic *ab*-plane of praseodymium-doped single crystals of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ system at $0 \leq x \leq 0.34$ was investigated in the paper. Single crystals of compounds $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ were grown by solution-melt technology in a gold crucible. Hydrostatic pressure was created in a piston-cylinder multiplier. The pressure was determined with a manganin manometer, and the temperature – with a copper-constantane thermocouple. It was established that an increase in pressure leads to an increase in the critical temperature of the studied compounds and a decrease in their electrical resistance, which corresponds to literature data for polycrystalline samples. Near the superconducting transition, the appearance of the temperature derivatives of the electrical resistance, $d\rho/dT$, of the $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ compounds indicates a certain heterogeneity of the samples, i.e., the presence of areas in the samples with different temperatures of the superconducting transition, T_c , which transition to the superconducting state as T_c is reached. At intermediate concentrations of praseodymium, such regions pass into the superconducting state sequentially, but at $x = 0$ and $x = 0.34$, the form $d\rho/dT$ indicates the presence of percolation paths for the flow of the transport current. The value of T_c and literature data on the Debye temperature indicate that the McMillan formula can be applied only to compounds $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ that have $T_c < 65$ K (that is, for $x, \delta > 0.3$), and at the same time gives a very high values of the electron-phonon interaction constant, $\lambda \sim 1$. It was found that, in contrast to pure $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ samples with optimal oxygen content, the application of high pressure leads to a multiple increase in the value of the baric derivative dT_c/dP . It was established that within the limits of experimentally achieved pressures, there was no change in the sign of baric derivatives dT_c/dP with increasing pressure, which was observed on polycrystalline samples with close values of praseodymium concentration. The possible mechanisms of the effect of high pressure on the critical temperature of the transition to the superconducting state T_c are discussed, taking into account the features in the electronic spectrum of carriers.

Keywords: *YBaCuO single crystals, praseodymium doping, hydrostatic pressure, phase separation, baric derivatives.*