

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Коробкова Максима «Процеси переносу у нестехіометричних купратах в умовах екстремальних зовнішніх дій»

яка подається на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірант **Коробков Максим** виконав у повному обсязі Індивідуальний план Освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Він успішно склав сім заліків та один екзамен з наступних дисциплін:

Заліки:

- 1) «Філософські засади та методологія наукових досліджень»;
- 2) «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень»;
- 3) «Планування, організація і проведення наукових досліджень та навчальних занять»;
- 4) «Історія та методологія фізики та астрономії»;
- 5) «Методологія застосування сучасних інформаційних технологій для автоматизації наукових та навчальних експериментів»;
- 6) «Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур»;
- 7) «Вибрані розділи сучасної теоретичної фізики».

Екзамен:

- 8) Іноземна мова для аспірантів (англійська мова).

Всі заплановані види робіт було виконано своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Незважаючи на досить велику кількість наукових праць, присвячених вивченню впливу різного роду чинників на електротransпорт в системі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, у науковій літературі майже відсутні праці, в яких описані результати досліджень щодо вивчення впливу опромінення на анізотропію процесів розсіювання носіїв заряду як у нормальному стані, так і поблизу надпровідного переходу, псевдощільнну і флуктуаційну аномалії, а також некогерентний електротransпорт. Оскільки, відповідно до сучасних уявлень, саме ці незвичайні фізичні явища, що спостерігаються у ВТНП – сполуках у нормальному (не надпровідному) стані, є важливими для розуміння фізичної суті мікроскопічної природи ВТНП, яка ще залишається нез'ясованою, незважаючи на більш ніж 37 – річну історію інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в цій галузі фізики твердого тіла.

Опромінення електронами ВТНП сполук дає можливість, без зміни складу зразків, створювати в них дефекти різної концентрації та морфології. Створення ансамблю дефектів заданої концентрації та природи відкриває можливості керування, зокрема, електротранспортними властивостями зразка як у нормальному, так і в надпровідному станах. Враховуючи перспективу використання високотемпературних надпровідників в якості надчутливих датчиків та ліній передачі електричного струму з малими втратами енергії, що працюють в інтервалі температур кипіння рідкого азоту, створення так званої «керованої» дефектної структури у надпровіднику має значне фундаментальне та практичне значення. Внаслідок складності будови досліджуваної сполуки, визначення розподілу дефектів по об'єму зразка, стабільності дефектного складу та залежності транспортних параметрів від виду дефектів кристалічної структури у широкому інтервалі температур потребує значних експериментальних зусиль.

Стан розробки тематики та пропозиції щодо подальших досліджень. У попередніх дослідженнях було встановлено, що у монокристалах шаруватих високотемпературних надпровідників нормальна провідність в інтервалі T_c –300 К обмежена розсіюванням на фононах та дефектах. Було досліджено також флуктуаційну провідність, що домінує поблизу T_c . Вплив опромінення електронами на провідність в площині шарів приводить до утворення певного числа дефектів, які викликають збільшення надлишкового опору, інтенсифікують розсіювання носіїв заряду на фононах, але на флуктуаційну провідність не впливають. Надпровідний перехід внаслідок опромінення стає ширшим. Але інформація про експериментальні дослідження впливу опромінення електронами на провідність уперек шарів дуже обмежена, а даних про вплив опромінення електронами на анізотропію транспортних властивостей, зокрема надпровідних, нема. Також відсутні систематичні дані про ступінь однорідності зразків та стабільність їхніх транспортних характеристик після опромінення. Тому неможливо прогнозувати транспортні властивості ВТСП в умовах опромінення, що звужує можливості застосування цих матеріалів в якості конструкційних та функціональних.

Вважається, що енергії електронів, які викликають у Y-Ba-Cu-O зміщення кожного з чотирьох типів атомів – O, Cu, Y и Ba; показано, що проникна здібність таких електронів у Y-Ba-Cu-O набагато перевищує товщину кристалу. Розраховані втрати енергії для електронів з енергією 1 МэВ складають для таких товщин кристалів 3÷8 %. Електронне опромінення приводить до утворення точкових дефектів чи невеликих кластерів, котрі відповідають за додатковий пінінг. Електронне опромінення з енергією до 3 МэВ приводить до значного збільшення критичного струму. Найбільш вірогідними центрами пінінгу є зміщення атомів Cu у площинах CuO_2 . У після опромінення монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ електронами з енергією 3 МэВ нижче 10 К зі флюенсами до $4.53 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ отримали квазідвофазну систему з критичними температурами надпровідного переходу, характерними для кожної «фази». Таке розшарування пояснили анізотропністю утворення пошкоджень у $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – кисневі дефекти в основному локалізовані у базальній $\text{Cu}(1)\text{-O}(4)$ площині. Показано, що в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ зменшення T_c внаслідок опромінення пов'язане зі зміщеннями кисню та міді в площинах CuO_2 . Вплив точкових дефектів на надпровідні характеристики монокристалів Y-Ba-Cu-O пов'язаний з тим, що довжини когерентності малі, тому точкові дефекти чи їх кластери можуть бути ефективними центрами пінінгу. У той же час точкові дефекти суттєво впливають на нормальний опір систем з металевою провідністю, збільшуючи надлишковий опір, який обумовлений дефектами, чи змінюючи

фононний спектр системи. Тому дослідження впливу опромінення електронами певних енергій на електричний опір системи Y-Ba-Cu-O у широкому інтервалі температур від надпровідного переходу до кімнатних може дати важливу інформацію про взаємодію носіїв заряду з фононою та дефектною підсистемами, що необхідно для цілеспрямованого впливу на властивості матеріалу.

Метою дисертації є експериментальне дослідження впливу опромінення швидкими електронами і високого тиску на процеси переносу заряду та розсіювання носіїв у ВТНП-сполуках сімейства $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{Re} = \text{Y}, \text{Pr}$) у широкому діапазоні температур; вивчення розподілу дефектів, що утворилися, та встановлення характерних часів релаксації цих дефектів.

Для досягнення поставленої мети було необхідно розв'язати наступні задачі.

- 1) виготовити високодосконалі монокристалічні зразки сполуки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ для магніторезистивних досліджень і провести їх опромінення високоенергетичними електронами з енергіями 0.5 – 2.5 MeV при різних дозах;
- 2) виготовити експериментальні зразки з монокристалів сполук $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ у виді містків для резистивних досліджень з системою односпрямованих двійникових меж;
- 3) виміряти температурні залежності поздовжнього і поперечного електроопору монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ до і після опромінення і провести їх кількісний аналіз у широкому інтервалі від кімнатних температур до температури надпровідного переходу, а також провести апроксимацію процесів переносу заряду в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на основі апробованих теоретичних моделей, зокрема моделей Блоха – Грюнайзена та Асламазова – Ларкіна;
- 4) виділити окремі механізми розсіювання носіїв заряду в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та їх додаткові внески у провідність зразків при наближенні до температури надпровідного переходу і вивчити вплив опромінення на параметри, що характеризують вищевказані механізми розсіювання носіїв заряду та їх еволюцію у часі;
- 5) проаналізувати природу анізотропії електричного опору ВТНП – сполук сімейства $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ після опромінення електронами різних енергій для коригування спектру радіаційних дефектів і дослідити залежності електрофізичних параметрів зразків $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ від часу, для отримання інформації про рухливість радіаційних дефектів та еволюцію дефектного ансамблю;
- 6) дослідити динаміку магнітного потоку в монокристалічних зразках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, опромінених електронами з енергіями 0.5 – 2.5 MeV на основі аналізу магнітоопору в широкому інтервалі температур і проаналізувати вплив опромінення на параметри 2D – 3D кросоверу в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, а також вивчити механізми фазового розшарування в опромінених високоенергетичними

електронами монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в умовах високотемпературного відпалювання;

- 7) дослідити вплив прикладання високого гідростатичного тиску до 14 кбар на електроопір і фазове розшарування в базисній площині монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є ВТНП-сполуки сімейства $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{Re} = \text{Y}, \text{Pr}$).

Предметом дослідження є температурні залежності в широкому інтервалі температур анізотропного електричного опору монокристалів шаруватих високотемпературних надпровідників, що зазнали впливу високого тиску і різних доз опромінення електронами та змінення під дією опромінення електронами параметрів розсіювання носіїв заряду на дефектах та фонах, флуктуаційної провідності, а також ступеню фазового розшарування та стабільності транспортних характеристик монокристалів шаруватих високотемпературних надпровідників.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань були використані та апробовані експериментальні методи фізики конденсованого стану при низьких температурах. ВТНП – монокристали системи 1 – 2 – 3 вирощували за розчин – розплавною методикою в золотих тиглях та тиглях, виготовлених з кераміки ZrO_2 . Насичення кристалів киснем здійснювали в атмосфері кисню при 420°C протягом трьох діб. Дослідження структури зразків здійснювались з використанням оптичної та растрової електронної мікроскопії. Опромінення електронами з енергіями 0.5...2.5 MeV проводили при температурах $T < 10\text{ K}$ на прискорювачі електронів. Дозі опромінення 10^{18} см^{-2} електронами з енергією 2.5 MeV відповідає усереднена по всіх підгратках концентрація дефектів 10^{-4} змішень/ат. Використання гелієвого кріостату давало можливість проводити вимірювання опору після опромінення в інтервалі температур $10 < T < 300\text{ K}$. Динаміку магнітного потоку досліджували магнітотранспортним методом. Вимірювання електроопору проводили методом Монтгомері. Температуру експериментальних зразків вимірювали платиновими термометрами електроопору. Спад електричної напруги вимірювали нановольтметрами В2 – 38. Обробку результатів здійснювали з використанням комп'ютерних програм Microcal Origin та Matlab.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна в межах підтримки програми Європейської Спільноти Horizon 2020 у рамках гранту № 644348. Робота також підтримана проектами МОН України № ДР 0116U000827 і № ДР 0111U010546.

4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.

Здобувач брав безпосередню участь у постановці завдань дисертаційної роботи, підготовці зразків, розробці методики автоматичного вимірювання резистивних та магніторезистивних залежностей зразків у широкому інтервалі температур. Експериментальні дослідження температурних залежностей поздовжнього і поперечного

електроопору в зразках, що були опромінені високоенергетичними електронами, виконані здобувачем особисто. Всі дослідження впливу опромінення на анізотропію магнітоопору монокристалічного зразка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ проведені за безпосередньою участю здобувача. При підготовці всіх публікацій за темою дисертаційної роботи здобувач брав участь в аналізі, систематизації, узагальненні та тлумаченні отриманих результатів, на основі яких він спільно з науковим керівником сформулював висновки дисертаційної роботи.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації Коробкова М.В. забезпечена коректним застосуванням апробованих експериментальних методів фізики конденсованого стану при низьких температурах, а також ретельним співставленням одержаних результатів із першоджерел наукової літератури. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у провідних міжнародних виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus і фахових вітчизняних виданнях та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є статистично достовірними та науково обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Основні наукові результати роботи можуть бути використані для подальшого пошуку шляхів модифікації електрофізичних характеристик матеріалів на основі купратних ВТНП – сполук сімейства $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{R} = \text{Ho}, \text{Y}, \text{Pr}, \text{Sc}$) під впливом опромінення електронами. Як відомо, електротransпортні характеристики визначають важливі конструкційні та експлуатаційні властивості ВТНП – сполук, що застосовуються як датчики чи лінії передачі електричної енергії. Опромінення електронами є вельми ефективним засобом створення значної кількості дефектів без зміни складу об'єкту, що опромінюється. Це дає можливість відокремити ефекти, які пов'язані безпосередньо з дефектами, що можуть виникнути як у процесі контрольованого впливу, так і під час експлуатації систем на основі ВТНП – сполук. Зокрема, встановлений вплив опромінення електронами на процеси розсіювання носіїв заряду на дефектах та фононах, на флуктуаційну провідність, фазове розшарування та стабільність характеристик, дасть можливість прогнозувати поведінку вказаних матеріалів в екстремальних умовах та створювати зразки з бажаними функціональними характеристиками.

Підвищення критичної температури надпровідного переходу та критичного струму існуючих високотемпературних надпровідників пов'язане з модифікацією їх властивостей за рахунок створенням певного ансамблю дефектів. Шляхом до зменшення енергоспоживання, підвищення швидкодії та мініатюризації надпровідних приладів є створення різного роду штучних наноструктур завдяки опроміненню керамічних надпровідників електронами чи іонами. Тому дослідження впливу опромінення електронами певних енергій на електричний опір системи $\text{Y}-\text{Ba}-\text{Cu}-\text{O}$ у широкому інтервалі температур від температури надпровідного переходу до кімнатних може дати важливу інформацію про взаємодію носіїв заряду з фононною та дефектною підсистемами, що необхідно для здійснення контрольованого впливу на властивості матеріалу.

Отримані результати можуть бути також використані при підготовці бакалаврів та магістрів фізичних спеціальностей, а саме при викладанні спецкурсів та проведенні лабораторних практикумів.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Результати дисертації опубліковані у 4 наукових працях, серед яких 2 статті в закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 2 статті у фахових вітчизняних виданнях та 1 теза доповіді на міжнародній науковій конференції.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій здобувача за темою дисертації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus:

1. Khadzhai, G.Y., Kamchatnaya, S.N., Korobkov, M.V., Vovk, R.V., Dobrovolskiy, O.V. / High-pressure effects on basal-plane conductivity of YPrBCO single crystals // Current Applied Physics, 2022, 39, страницы 311–316. (Scopus, Q2) (Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, проведення вимірювань, технічне оформлення тексту роботи)
2. Chroneos, A., Khadzhai, G.Y., Goulatis, I.L., Korobkov, M.V., Vovk, R.V. / Effect of high pressure on temperature dependences of the resistivity in the ab-plane of $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(13), страницы 9875–9884. (Scopus, Q1) (Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, підготовка і проведення вимірювань, аналіз результатів)

Список публікацій здобувача за темою дисертації у вітчизняних фахових виданнях:

3. N.A. Azarenkov, G.Ya. Khadzhai, A.V. Matsepulin, M.V. Korobkov, A.O. Komisarov, A.I. Rusalovich, Junyi Du, S.N. Kamchatnaya, A.Yu. Vragov, L.A. Paschenko, V.Yu. Gres, E.S. Gevorkyan, R.V. Vovk / Еволюція флуктуаційної провідності монокристалів $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ під впливом середніх доз опромінення електронами та допування празеодимом // The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series “Physics”, 2023, Vol. 38, p.p. 7-14. (Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, технічне оформлення тексту роботи)
4. L.A. Paschenko, G.Ya. Khadzhai, M.V. Korobkov, A.O. Komisarov, A.Yu. Vragov, R.V. Vovk / Структурна релаксація в монокристалах $RBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($R = Ho, Y$) під впливом стрибкоподібної зміни температури // The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series “Physics”, 2024, Vol. 39, p.p. 23-41. (Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, а також її розв’язання, підготовлення матеріалів до публікації)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Л.О. Пащенко, О.Ю. Врагов, А.О. Комісаров, М.В. Коробков, Р.В. Вовк / Анізотропія електротранспорту монокристалів YBaCuO опромінених високоенергетичними електронами // Збірник матеріалів міжнародної конференції «Ядерна фізика на Закарпатті» (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) 21-23 травня 2024 року. *(Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, а також її розв'язання, підготування матеріалів для конференції)*

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

8. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати досліджень були представлені, обговорені і опубліковані в тезах доповіді в міжнародній науковій конференції: «Ядерна фізика на Закарпатті» (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) 21-23 травня 2024 року, м. Ужгород.

9. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет системі [StrikePlagiarism.com](https://www.strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10. Оцінка мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступний для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21.03.2022 року № 341), Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 року № 759).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Коробкова Максима «Процеси переносу у нестехіометричних купратах в умовах екстремальних зовнішніх дій» відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія. Здобувачем повністю виконана освітня та наукова складові освітньо-наукового рівня вищої освіти.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувачка представила основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри фізики низьких температур Фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № від червня 2024 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення.

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове і практичне значення, на розширеному засіданні кафедри було одностайно ухвалене рішення про рекомендацію дисертації Коробкова М.В. «Процеси переносу у нестехіометричних купратах в умовах екстремальних зовнішніх дій» до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія з галузі знань 10 – Природничі науки.

В.о. завідувача кафедри
фізики низьких температур
фізичного факультету
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна,
доктор фізико-математичних наук, професор

 Валерій ШКЛОВСЬКИЙ