

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Коробкова Максима «Електротранспорт ВТНП купратів системи $YBaCuO$ в умовах екстремальних зовнішніх впливів»

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 електротранспорт в системі $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, у науковій літературі майже відсутні праці, в яких описані результати досліджень щодо вивчення впливу празеодиму і домішок титану на анізотропію процесів розсіювання носіїв заряду як у нормальному стані, так і поблизу надпровідного переходу, псевдощілинну і флуктуаційну аномалії, а також некогерентний електротранспорт. 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 40 – річну історію інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в цій галузі фізики твердого тіла.

Прикладання високого тиску до ВТНП-сполук різного складу дає можливість не тільки перевіряти адекватність численних теоретичних моделей, але і окреслювати емпіричні

шляхи підвищення їх критичних характеристик. 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 . Допування різноманітними домішками приводить до утворення певного числа дефектів різної морфології, які викликають збільшення надлишкового опору, інтенсифікують розсіювання носіїв заряду на фононах і впливають на характер реалізації в системі флуктуаційної і псевдоцілінної аномалій. Надпровідний перехід внаслідок ізовалентного і неізовалентного допування, як правило, стає ширшим. Але інформація про експериментальні дослідження впливу легування празеодимом на провідність уперек шарів дуже обмежена, а даних про вплив високого тиску на анізотропію транспортних властивостей, зокрема надпровідних, нема. Також відсутні систематичні дані про ступінь однорідності зразків та стабільність їхніх транспортних характеристик після допування титаном. Тому неможливо достовірно прогнозувати транспортні властивості такого роду ВТНП-сполук в умовах екстремальних зовнішніх впливів, що звужує можливості застосування цих матеріалів в якості конструкційних та функціональних.

Одними з найбільш затребуваних для досліджень, в цьому аспекті, є сполуки так званої системи 1-2-3, $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, де R – іон рідкоземельного елемента. Це зумовлено низкою причин: цей надпровідник має високу критичну температуру та найкращу струмонесучу здатність у сильних магнітних полях, можна відносно легко отримати литі зразки та монокристали, фізичні властивості, зокрема й надпровідні, можна досить просто змінити, варіюючи кисневий індекс δ або легуванням, є можливість отримувати високоякісні монокристали відносно великих розмірів. Остання обставина має вирішальне значення для фундаментальних досліджень.

Критична температура (T_c) цих сполук, оптимально допованих киснем, становить $T_c \approx 90$ К і слабо залежить від природи R. При цьому $\text{CeBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ і $\text{TbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ не утворюють ОРТО-структуру, $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ є радіоактивним, а $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ не є надпровідником («аномалія празеодима»), незважаючи на наявність орторомбічного елементарного осередку. Особливий інтерес у цьому аспекті представляють сполуки з частковою заміною Y на Pr, що, з одного боку, призводить до часткового пригнічення надпровідності, а з іншого – дозволяє зберігати практично незмінними параметри решітки та кисневий індекс сполуки.

На відміну від низькотемпературних, високотемпературні надпровідники мають малу довжину когерентності ξ , велику величину глибини проникнення магнітного поля λ , і суттєво анізотропну кристалічну структуру, яка, своєю чергою, зумовлює значну анізотропію їхніх

фізичних характеристик. У поєднанні з високою критичною температурою T_c це приводить до суттєвої зміни фазової діаграми вихорової системи. 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 високого тиску і магнітного поля на електричний опір системи Y-Ba-Cu-O з домішками титану і празеодиму у широкому інтервалі температур від надпровідного переходу до кімнатних може дати важливу інформацію про взаємодію носіїв заряду з фононною та дефектною підсистемами, що необхідно для цілеспрямованого впливу на властивості матеріалу.

Метою дисертації є розв'язання актуального наукового завдання, яке полягає у встановленні впливу експериментальних зовнішніх чинників на процеси переносу заряду та розсіювання його носіїв у ВТНП – сполуках сімейства $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ у широкому інтервалі температур, магнітних полів і високих тисків; вивчення розподілу дефектів мікроструктури, а також встановлення фізичних особливостей і механізмів релаксації цих дефектів.

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

- 1) Отримати монокристали високого ступеня досконалості та керамічні зразки системи 1-2-3 із заданою морфологією дефектної структури, а також зразки леговані титаном.
- 2) Створити методику транспортних вимірювань на малих зразках при високій густині струму.
- 3) Виміряти температурні, баричні та орієнтаційні залежності електроопору та параметрів резистивного стану у монокристалах YPrBCO.
- 4) Дослідити динаміку магнітного потоку на основі аналізу магнітоопору в керамічних зразках YBCO з домішками титану.
- 5) Розділити внесок дефектів різної вимірності та морфології – вакансій, двійникових меж, домішкових дефектів, а також структурної анізотропії в процеси розсіювання носіїв транспортного струму.
- 6) Дослідити вплив високого тиску на електротransпортні характеристики і надлишкову провідність в монокристалічних зразках $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.
- 7) Вивчити вплив домішок титану на перехід порядок-безпорядок керамічної сполуки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є динаміка переносу заряду і магнітного потоку в ВТНП-сполуках системи $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ і $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ під дією температури, магнітного поля і високого тиску.

Предметом дослідження є процеси електропереносу і механізми розсіювання носіїв струму в сполуках $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в умовах дії зовнішніх чинників.

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.

Електроопір вимірювали за стандартною чотирьохконтактною методикою, а анізотропію електроопору – методом Монтгомері на постійному струмі від 0.1 до 10 мА.

Динаміку магнітного потоку досліджували транспортним методом з використанням спеціальної установки для проведення резистивних вимірювань зі змінною орієнтацією магнітного поля.

Гідростатичний тиск створювали в автономній камері типу поршень-циліндр з фіксованим зажимом. Як середовище, що передає тиск, використовували зневоднену суміш трансформаторного масла з гасом у співвідношенні 1:1. Для визначення величини тиску в камері був використаний попередньо відградуваний манганіновий манометр, поміщений у робочу частину камери.

Температуру зразка визначали платиновими і вугільними терморезисторами, а також мідь-константовими термопарами. 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, допованих титаном і празеодимом, виконані здобувачем особисто. Всі дослідження впливу високого тиску і магнітного поля на електроопір монокристалічних зразків $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ і керамік $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 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 $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($R = \text{Ho}, \text{Y}, \text{Pr}, \text{Sc}$) під впливом зовнішніх чинників. Як відомо, електротранспортні характеристики визначають важливі конструкційні та експлуатаційні властивості ВТНП – сполук, що застосовуються як датчики чи лінії передачі електричної енергії. Допування титаном і празеодимом є вельми ефективним засобом створення значної кількості дефектів різної морфології. 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 високого тиску 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 допуванню різноманітними домішками і покращення їх функціональних характеристик під дією зовнішніх чинників. Тому дослідження впливу високого тиску і магнітного поля 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 9 наукових працях, серед яких 4 статті у періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 статті у фахових вітчизняних виданнях та 2 тези доповідей на міжнародній науковій конференції.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Наукові праці у закордонних виданнях і фахових виданнях України, що індексуються в
міжнародних наукометричних базах:**

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, сторінки 311–316.
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), сторінки 9875–9884.
3. V. Yu. Gres, M.V. Korobkov, G. Ya. Khadzhai, and R.V. Vovk / Resistive Investigations of Pressure Effect on the Fluctuations Paraconductivity in $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Single Crystals // *Functional materials*, 2025, 32, №3, p.p. 367-371.
4. M.V. Korobkov, S.V. Savych, G. Ya. Khadzhai, R.V. Vovk / Magnetoresistance of titanium-doped HTSC compounds YBaCuO // *Functional materials*, 2026, 32, №2, p.p. 342-349

Перелік статей опублікованих у вітчизняних фахових наукових періодичних виданнях:

5. Р. В. Вовк, О. Ю. Врагов, М. М. Іноземцев, В. О. Ковригин, А. О. Комісаров, М. В. Коробков, В. Ф. Коршак, Л. О. Пашенко, Г. Я. Хаджай, О. Г. Чепурін, Д. Ф. Ярчук./ Кристалічна структура, дефекти, пінінг та динаміка магнітного потоку у ВТНП-сполуках системи 1-2-3 // *The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series “Physics”*, 2025, Vol. 42, p.p. 7-22.
6. Г. Я. Хаджай, В. Ю. Гресь, М. В. Коробков, В. Ф. Коршак, Р. В. Вовк / Вплив тиску на розсіювання нормальних і флуктуаційних носіїв у монокристалах $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ // *The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series “Physics”*, 2025, Vol. 43, p.p. 28-39.
7. В. Ю. Гресь, М. В. Коробков, Л. О. Пашенко, О. Ю. Врагов, Н. С. Бантюков, В. Е. Корж, Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, Р. В. Вовк. Анізотропія провідності і перехід метал-ізолятор монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з різним вмістом празеодиму // *The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series “Physics”*, 2025, Vol. 43, p.p.7-21.

Друковані тези, що опубліковані у матеріалах наукових конференцій:

1. Л.О. Пашенко, 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. С.203.
2. Л.О. Пашенко, Ю.В. Литвинов, А.О. Комісаров, М.В. Коробков, Р.В. Вовк / Вплив опромінення швидкими електронами на магнітоопір оптимально допованих киснем монокристалів YBaCuO // Збірник матеріалів міжнародної

конференції «Ядерна фізика на Закарпатті» (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) 21-23 травня 2024 року. С.205.

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) 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.

Здобувач представив основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри фізики низьких температур Фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № від травня 2026 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. «Електротранспорт ВТНП купратів системи $YPrBaCuO$ в умовах екстремальних зовнішніх впливів» 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