

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
доценту Олегу ЛАЗОРЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Рецензія

офіційного рецензента, доцента кафедри загальної фізики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Таранової Інни Анатоліївни на дисертаційну роботу Ду Цзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури», на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки».

1. Обґрунтування теми дослідження.

Дисертація присвячена вивченню впливу низки зовнішніх чинників (магнітного поля, температури, високого тиску і опромінення), а також легування празеодимом на магніторезистивні властивості монокристалічних купратних високотемпературних надпровідників (ВТНП) таких, як $ReBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($Re = Y, Pr$) шляхом модифікування топології їх дефектного ансамблю. Автор присвятив свою роботу таким аспектам вивчення характеристик ВТНП-матеріалів, як їх електротransпортні властивості, надлишкова провідність та динаміка магнітного потоку. В результаті були вирошені досконалі монокристали цього типу, виконані рентгенівські, електронографічні та металографічні дослідження кристалічної структури, досліджені процеси пінінгу на дефектах різної морфології в цих кристалах та модифікації електроопору, визначена область існування флуктуаційної парaproвідності, а також характер впливу магнітного поля та ряду інших зовнішніх чинників.

Останніми роками одним з основних питань фізики ВТНП є вивчення аномалій так званого псевдощільного стану (ПЩ), що спостерігається в області фазової діаграми, яка відповідає концентраціям носіїв струму меншим за оптимальну, яку зазвичай називають областю "недодопованих" складів. У цій області спостерігаються численні аномалії електронних властивостей як в нормальному, так і в надпровідному станах, пов'язані з

падінням густини одночастинкових збуджень і анізотропною перебудовою спектральної густини носіїв струму. Розуміння природи і властивостей псевдощілинного стану є центральною проблемою в будь-якому підході до описання складної фазової діаграми ВТНП-систем. Значна частина роботи присвячена також проведенню експериментів щодо вивчення впливу гідростатичного тиску, а також зміни рівня допування празеодимом на критичну температуру і нормальний електротранспорт. Дисертаційна робота Ду Цзюньї присвячена вивченню саме цих важливих питань фізики надпровідності і твердого тіла. Її характеризує продуманість і ретельність постановки задачі досліджень, а також тісний зв'язок експерименту з теорією. Слід також відзначити, що високотемпературна надпровідність є одним з фізичних явищ, з яким пов'язують великі сподівання в прикладних застосуваннях. Тому проведені в дисертаційній роботі дослідження магніторезистивних властивостей високотемпературних надпровідників системи $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ є актуальними як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення

Структуру дисертаційної роботи становлять вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і один додаток. Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок (6,5 авторських аркушів), з них текст основної частини становить 125 сторінки (5,5 авторських аркушів). Робота містить 39 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел містить 243 найменування.

У ВСТУПІ розкривається обґрунтування вибору теми роботи, формулюється мета і основні задачі дослідження, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначається наукова новизна роботи та її практичне значення, дається стислий опис методів дослідження, які були використані, а також особистий внесок здобувача при виконанні дисертаційної роботи.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ - **аналітичний огляд** - вміло відібрано те головне, що автор вважав за потрібне, з надзвичайно великого потоку інформації, з яким стикаються дослідники, які працюють у цій галузі. Оригінальна складова роботи викладена у наступних чотирьох змістовних розділах.

ДРУГИЙ РОЗДІЛ є **методичним**. Описано технологію вирощування та структурного аналізу монокристалів із заданою топологією дефектів, виготовлення зразків-містків шляхом лазерного різання з одного блоку. Охарактеризовано використану апаратуру для резистивних вимірювань у магнітному полі та в умовах гідростатичного тиску.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ «"Пружні" та "непружні" двійники та пінінг вихорів Абрикосова в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ » представлено результати досліджень динаміки магнітного потоку, а також пінінгу магнітних вихорів на «непружних» та «пружних» двійниках, клиновидні вершини яких в напрямку двійникування не виходять на поверхню кристала. Показано, що межі «пружних» двійників є ефективними центрами пінінга ліній магнітного потоку в монокристалах досліджуваної сполуки. Встановлено, що основними центрами закріплення вихорів є дислокаційні скупчення, які утворюються в вершинах «пружних» двійників. Лінії дислокацій розташовуються в площині двійників і, при збігові орієнтації магнітних вихорів та дислокаційних ліній, зменшується енергія вихорів, з'являється сила пінінга, що закріплює їх місце розташування, а, в підсумку, і призводить до збільшення критичної густини транспортного електричного струму.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ «Вплив тиску на критичну температуру та електроопір монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » наведено результати досліджень впливу високого гідростатичного тиску до 11 кбар на провідність у базисній ab-площині середньо допованих празеодимом ($x \approx 0,23$) монокристалів $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Показано, що, на відміну від чистих зразків $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, з оптимальним вмістом кисню, прикладання високого тиску сприяє фазовому розшаруванню в базисній площині монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Встановлено, що у нормальному стані провідність є металевою та обмежується розсіюванням на фонах (режим Блоха-Грюнейзена) та дефектах. Гідростатичний тиск призводить до зменшення залишкового та фононного опорів. Температура Дебая та довжина когерентності не залежать від тиску. Показано, що при температурах оддалік від критичної надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому діапазоні температур $T_f < T < T^*$, а температурна залежність псевдощільності задовільно описується в межах теорії переходу БКШ-БЕК.

П'ЯТИЙ РОЗДІЛ «Вплив радіаційних та домішкових дефектів на флуктуаційну провідність монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » присвячений вивченню впливу середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} cm^{-2}) опромінення швидкими електронами на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. При цьому вплив опромінення порівняний зі впливом допування празеодимом. Показано, що опромінення електронами та збільшення ступеня допування празеодимом ($0.0 \leq z \leq 0.5$) призводить до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності, тим самим звужуючи область лінійної залежності $\rho(T)$ у ab-

площині. Встановлено, що при дозах $0 \leq D \leq 6.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ значення величини поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ збільшується зі зростанням D приблизно в 3 рази, та більш ніж у чотири рази у міру підвищення вмісту празеодиму у зразку до $z \approx 0.42$. При цьому в обох випадках зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера. На відміну від випадку опромінення малими дозами ($D \leq 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) та допущання празеодимом до концентрацій $z \leq 0.39$, опромінення середніми дозами та допущання празеодимом при більш високих концентраціях призводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ з характерними максимумами при $D \sim 7-8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ та $z \approx 0.42$, що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

Висновки, отримані за результатами дисертаційної роботи, є обґрунтованими та коректними. Вони підтверджують наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел є актуальним, відповідає сучасним тенденціям наукових досліджень з проблем дисертаційної роботи.

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

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних держбюджетних наукових проектів Міністерства освіти і науки України: № ДР 0117U004857 та № ДР 0116U000827, а також за підтримки програми Horizon 2020 у рамках гранту № 644348.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи Ду Цзюньї, забезпечується використанням сучасних методів дослідження фізики конденсованого стану та оригінальними підходами для підтвердження авторських гіпотез. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими. Теоретичні моделі та методи експериментальних досліджень, які використані в дисертаційній роботі, є коректними. Достовірність результатів досліджень не викликає ніяких сумнівів.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

Основні результати дисертації опубліковані в 6 статтях в наукових виданнях, які реферуються системами Scopus та Web of Science, а також у фахових наукових виданнях України, доповідалися на міжнародній науковій конференції. У роботі отримано низку нових наукових та практичних результатів, серед яких можна відзначити такі:

1. виготовлені високодосконалі монокристалічні зразки сполук $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ для магніторезистивних досліджень та проведено їх опромінення високоенергетичними електронами з енергіями 0.5 – 2.5 MeV при різних дозах;
2. виготовлені експериментальні зразки з монокристалів сполук $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ у вигляді містків для резистивних досліджень з системою односпрямованих двійникових меж;
3. досліджено динаміку магнітного потоку і особливості пінінгу магнітних вихорів (ефект закріплення) на звичайних "непружних" та "пружних" двійниках, тобто на двійниках, клиновидні вершини яких в напрямку двійникування не виходять за поверхню кристала;
4. виміряні температурні залежності електроопору в базисній площині монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ до і після опромінення та проведено їх кількісний аналіз у широкому інтервалі від кімнатних температур до температури надпровідного переходу, а також проведено 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;
5. виділені 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 вивчено вплив опромінення на параметри, що характеризують вищевказані механізми розсіювання носіїв заряду;
6. проведено порівняльний аналіз впливу радіаційних і домішкових дефектів на флуктуаційну провідність, що домінує в температурному інтервалі поблизу критичної температури T_c ;
7. досліджено вплив прикладання високого гідростатичного тиску до 11 кбар на електроопір та фазове розшарування в базисній площині монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

6. Практичне значення одержаних результатів

Отримані результати мають важливе практичне значення і можуть бути використані при створенні конкретних виробів слабкоточної техніки, тобто мікроелектроніки та обчислювальної техніки, СКВІДів, для використання в прецезійних вимірювальних схемах, а також ряді елементів телекомунікаційних пристроїв. Наприклад, пасивні прилади НВЧ-діапазону (фільтри, мультиплексори, лінії затримки, резонатори тощо) є першим практичним застосуванням ВТНП-матеріалів. При цьому застосування ВТНП-вузлів (наприклад, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на підкладці LaAlO_3 або Al_2O_3) у

трансивері призводить до збільшення чутливості та селективності тракту прийому, зменшення комбінованих втрат та зниження побічних випромінювань у тракті передачі. Оскільки пасивні компоненти становлять понад 50 % обсягу як наземних радіoeлектронних систем, так і бортового аерокосмічного радіoeлектронного обладнання, то ВТНП-матеріали відіграють важливу роль у зниженні їх габаритів та маси. Для більш повного використання переваг високотемпературної надпровідності при розробці пасивних компонентів необхідно враховувати основні вимоги до вузлів на основі ВТНП та параметрів їх компонент. Найважливішу роль цьому грає саме оптимізація дефектного ансамблю, велику увагу дослідженням якого було приділено у цій роботі.

Результати дисертаційної роботи можуть бути цікавими для фахівців, які займаються проблемами створення нових композитних матеріалів функціонального призначення, а також науковців в галузях фізики конденсованого стану та матеріалознавства, які працюють у провідних наукових установах України та зарубіжжя. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у виданнях, які включено у міжнародні науково-метричні бази даних з гарним рейтингом (Low Temperature Physics і Functional materials, Q3), що робить їх доступними світовому науковому товариству. Публікація окремих результатів у провідних фахових наукових виданнях України спрощує доступ вітчизняних вчених до сучасного наукового знання. Всі публікації відповідають встановленим вимогам за кількістю та якістю поданого наукового матеріалу.

7. Дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота та наукові праці здобувача було перевірено на наявність текстових запозичень з використанням антиплагіатної системи Strikeplagiarism.com. Аналіз результатів перевірки показав, що текст дисертації не містить плагіату. З ознайомлення з рукописом роботи та науковими доповідями здобувача чітко зрозуміло, що робота виконана самостійно, а Ду Цзюньї добре орієнтується в науковому матеріалі. Таким чином дисертаційна робота відповідає вимогам академічної доброчесності.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

До дисертаційної роботи є зауваження:

1. Мені здається, що стратегія вирощування монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з евтектичного розплаву описана із зайвими подробицями, оскільки подібна стратегія була розроблена ще у 90-х роках минулого століття, а щодо отримання більш складних об'єктів ($\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) майже нічого не сказано.

2. Слід зазначити, що при дослідженнях явищ, пов'язаних з еволюцією температурних залежностей електроопору монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при опроміненні швидкими електронами та допудуванні празеодимом, магнітні вимірювання та визначення критичної температури за магнітною сприйнятливістю, безсумнівно, збагатили б роботу.
3. У роботі зустрічаються друкарські помилки та елементи жаргонної термінології.

Перелічені вище зауваження, які в значній мірі є рекомендаціями для подальшої наукової роботи здобувача, не знижують високий рівень дисертації і високу оцінку, на яку вона заслуговує. Текст дисертації написаний у науковому стилі відповідно до вимог, які встановлено до наукових (кваліфікаційних) робіт. Наукові публікації автора за темою дисертації представлені в тексті дисертації в повному обсязі. Особистий внесок здобувача в розв'язанні наукових задач для досягнення поставленої мети дисертації є визначальним та полягає у проведенні експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів, виконанні розрахунків, участі в обговоренні отриманих результатів, а також у підготовці публікацій за темою дисертації. Дисертація Ду Цзюньї є закінченою науковою роботою, в якій отримана низка нових наукових та практично значимих результатів.

Актуальність теми роботи, новизна та наукова значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків дозволяють зробити висновок, що дисертаційна робота Ду Цзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури» повністю задовольняє вимогам, що встановлені до дисертацій доктора філософії МОН України, а її автор, Ду Цзюньї, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Оформлення дисертації повністю відповідає вимогам, що висуваються до таких робіт згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Ду Цзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури» є завершеним науковим дослідженням в галузі фізики конденсованого стану, актуальним за розглянутими науковими проблемами, має наукову новизну і є важливою для

практичного впровадження отриманих результатів. Тема і матеріал дисертації повністю відповідають спеціальності 104 «Фізика та астрономія» галузі знань 10 «Природничі науки» та вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. № 44). Враховуючи все сказане вище, вважаю, що Ду Цзюньї заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний рецензент,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент, доцент кафедри
загальної фізики
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Інна ТАРАНОВА

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 14:42:16 30.07.2025

Назва файлу з підписом: Рецензія_Таранова_Ду Дзунь.docx.p7s
Розмір файлу з підписом: 50.7 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Рецензія_Таранова_Ду Дзунь.docx
Розмір файлу без підпису: 33.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ТАРАНОВА ІННА АНАТОЛІЇВНА
П.І.Б.: ТАРАНОВА ІННА АНАТОЛІЇВНА
Країна: Україна
РНОКПП: 2478800883
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 14:42:16 30.07.2025
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000088A57901B31A8406
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAdES enveloped)
Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAdES-X Long)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
доценту Олегу ЛАЗОРЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

офіційного опонента, старшого наукового співробітника відділу теплових властивостей і структури твердих тіл та наносистем Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, кандидата фізико-математичних наук, Баснукаєвої Разет Магомедівни на дисертаційну роботу Ду Цзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури», на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки».

Обґрунтування актуальності теми дослідження.

Дисертація присвячена вивченню впливу точкових і площинних дефектів на магніторезистивні властивості монокристалічних купратних високотемпературних надпровідників (ВТНП), таких як $ReBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($Re = Y, Pr$) шляхом дослідження температурних особливостей опору та надлишкової провідності, а також отриманню за допомогою сучасних модельних уявлень інформації про зміну густини носіїв заряду та її відповідність можливим змінам кристалічної структури зразків. Значна частина роботи також присвячена проведенню експериментів із вивчення впливу гідростатичного тиску, електронного опромінення, а також зміни рівня легування празеодимом на флуктуаційну парепровідність і псевдощільну аномалію. Робота вирізняється оригінальним підходом до постановки експерименту з вивчення локальних властивостей кристалів, ретельною та продуманою спрямованістю вимірювальних методів на фізичний результат, що має прикладне значення.

Практично одразу після відкриття високотемпературних надпровідників (ВТНП) було виявлено низку особливостей, які відрізняють їх поведінку від

класичних надпровідників, що підпорядковуються теорії Бардіна—Купера—Шріффера (БКШ). Так, відношення надпровідної щільності при температурі $T=0$, $\Delta(0)$, до критичної температури (температури надпровідного переходу) T_c , яке згідно з БКШ-теорією становить $2\Delta(0)/k_B T_c = 3.52$, виявилось рівним приблизно 5 для YBCO і близько 7 для BiSCCO. Це означає, що, на відміну від класичних надпровідників, ВТНП є надпровідниками з сильною взаємодією, яка, власне, й обумовлює можливість куперівського спаровування при настільки високих температурах.

Основною особливістю, виявленою в нормальному стані ВТНП, є псевдощільна аномалія або псевдощільина (ПЩ), яка спостерігається в недолегованих ВТНП нижче температури ПЩ — $T^* \sim 200 \text{ K} \gg T_c$. Відповідними вимірюваннями було показано, що нижче T^* у таких сполуках спостерігається часткове зменшення густини електронних станів на рівні Фермі, що, за визначенням, і називається псевдощільиною. Однак питання про фізичну природу цього явища, а також такого фундаментального явища, як надпровідне спаровування з критичною температурою надпровідного переходу $T_c \sim 100 \text{ K}$, як докладно зазначено у **Вступі** до дисертації, досі залишається відкритим.

Дослідження, проведені у дисертаційній роботі, дозволяють значною мірою просунутися в розумінні згаданих вище питань, що визначає їх **безперечну актуальність**.

Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт за програмами Міністерства освіти і науки України, перелічених у дисертації, що також підкреслює **актуальність розглянутих у роботі проблем**. Матеріали за темою дисертації опубліковані в авторитетних рецензованих наукових виданнях і представлені для широкого обговорення на наукових форумах відповідної тематики.

Відповідність обраній спеціальності.

Предметом дослідження в дисертаційній роботі були температурні особливості електричного опору ВТНП різного складу, що описуються формулами $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{Re} = \text{Y}, \text{Pr}$) і $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, як у надпровідному

стані, так і при температурах $T \gg T_c$, тобто в нормальному стані. З огляду на це, відповідність роботи Ду Дзюньї спеціальності 104 «Фізика та астрономія» не викликає сумнівів.

Мета дисертаційної роботи Ду Дзюньї – встановлення фізичних закономірностей еволюції магніторезистивних характеристик у шаруватих ВТНП – сполуках родини $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в умовах дії екстремальних зовнішніх чинників (низьких температур, високого тиску та електронного опромінення). Цю мету можна вважати досягнутою в рамках поставлених і розв’язаних у роботі завдань, а саме:

- розглянуто вплив високого гідростатичного тиску, різних рівнів легування і магнітного поля на температурну залежність електроопору $\rho_{ab}(T)$ та надлишкової провідності в монокристалах $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($x \leq 0,05$) и $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$;
- запропоновано механізм, який пояснює вплив тиску на режим флуктуаційної провідності в зразках $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ і зумовлений як зміною співвідношення між ξ і d , так і можливим зміщенням рівня Фермі під впливом домішок празеодиму;
- досліджено динаміку магнітного потоку і особливості піннінгу магнітних вихорів (ефект закріплення) на звичайних "непружних" та "пружних" двійниках, тобто на двійниках, клиновидні вершини яких в напрямку двійникування не виходять за поверхню кристала;
- виміряні температурні залежності електроопору в базисній площині монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ до і після опромінення та проведено їх кількісний аналіз у широкому інтервалі від кімнатних температур до температури надпровідного переходу, а також проведено апроксимацію процесів переносу заряду в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на основі апробованих теоретичних моделей, зокрема моделей Блоха – Грюнайзена та Асламазова – Ларкіна;
- проведено порівняльний аналіз впливу радіаційних і домішкових дефектів на флуктуаційну провідність, що домінує в температурному інтервалі поблизу критичної температури, T_c ;

- досліджено вплив прикладання високого гідростатичного тиску до 14 кбар на електроопір та фазове розшарування в базисній площині монокристалів $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Обґрунтованість і достовірність результатів.

Результати дисертаційної роботи отримані з використанням сучасних експериментальних методів, що характеризуються високою надійністю та обґрунтованістю. Вони багаторазово підтверджувалися в ході порівняльних вимірювань, проведених на різних експериментальних установках та з використанням різних зразків. У тій галузі досліджень, яка перетинається з напрямками роботи інших наукових груп, отримані результати добре узгоджуються з даними, відомими з наукової літератури.

Наукова новизна отриманих результатів.

Серед пріоритетних результатів, отриманих Ду Дзюньї вперше, можна виокремити такі:

1. Вперше встановлено, що межі «пружних» двійників є ефективними центрами пінінга ліній магнітного потоку в монокристалах досліджуваної сполуки.
2. Визначено, що основними центрами закріплення вихорів є дислокаційні скупчення, які утворюються в вершинах «пружних» двійників. Лінії дислокацій розташовуються в площині двійників і, при збігові орієнтації магнітних вихорів та дислокаційних ліній, зменшується енергія вихорів, з'являється сила пінінга, що закріплює їх місце розташування, а, в підсумку, і приводить до збільшення критичної густини транспортного електричного струму.
3. Вперше встановлено, що, на відміну від чистих зразків $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з оптимальним вмістом кисню, в монокристалах $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ прикладання високого тиску приводить до фазового розшарування в базисній площині.
4. Встановлено, що у нормальному стані провідність є металевою та обмежується розсіюванням на фононах (режим Блоха-Грюнейзена) та дефектах.

5. Показано, що флуктуаційна провідність задовільно описується в межах моделі Лоренца-Доніаха.
6. Встановлено, що гідростатичний тиск приводить до зменшення залишкового та фононного опорів. Температура Дебая та довжина когерентності не залежать від тиску.
7. Показано, що надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому діапазоні температур $T_f < T < T^*$. Залежність $\Delta\sigma(T) \sim (1 - T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T)$ інтерпретується в термінах теорії середнього поля, де T^* - середньопольова температура переходу в псевдоцілінний стан, і температурна залежність псевдоціліни задовільно описується в межах теорії переходу БКШ-БЕК.
8. Вперше досліджено вплив середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} cm^{-2}) опромінення швидкими електронами та зміни концентрації празеодиму в інтервалі $0.0 \leq z \leq 0.5$ на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.
9. Вперше показано, що опромінення електронами та збільшення ступеня допування празеодимом приводить до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності, тим самим звужуючи область лінійної залежності $\square(T)$ у ab -площині.
10. Встановлено, що при дозах $0 \leq D \leq 6.5 \cdot 10^{19}$ cm^{-2} значення величини поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ збільшується зі зростанням D приблизно в 3 рази та більш ніж у чотири рази у міру підвищення вмісту празеодиму у зразку до $z \approx 0.42$. При цьому в обох випадках зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера.
11. Показано, що на відміну від випадку опромінення малими дозами ($D \leq 10^{19}$ cm^{-2}) та допування празеодимом до концентрацій $z \leq 0.39$, опромінення середніми дозами та допування празеодимом при більш високих концентраціях приводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ з характерними максимумами

при $D \sim 7-8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ та $z \approx 0.42$, що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

Повнота висвітлення результатів дисертації в роботах здобувача.

Дисертація викладена на 165 сторінках, включаючи список використаних джерел, що налічує 243 посилання. Назва роботи повністю відповідає її змісту та адекватно відображає поставлені в ній завдання та розглянуті наукові питання.

Результати дисертаційної роботи Ду Дзюньї з достатньою повнотою висвітлені у 6 наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях, що входять до переліку кваліфікаційних наукових журналів ДАК України. Окремі результати також доповідалися на міжнародній конференції, отримали належне апробування та відомі фахівцям у галузі фізики твердого тіла. Дисертація написана хорошою, зрозумілою науковою мовою та оформлена відповідно до встановлених вимог.

Практичне значення роботи полягає в тому, що нові явища й ефекти, досліджені в процесі її виконання, розширюють уявлення про унікальні фізичні властивості купратів системи 1–2–3 типу $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (де Re — іон рідкоземельного елемента) та наближають наукову спільноту до розгадки природи високотемпературної надпровідності та практичного застосування цих матеріалів, що демонструють надпровідні властивості при температурах рідкого азоту. Отримані результати можуть бути корисними при розробці нових функціональних матеріалів із заданими властивостями.

Зауваження та недоліки.

Щодо змісту дисертаційної роботи Ду Дзюньї мають наступні зауваження:

1. Оскільки теорія Лоуренса-Доніаха передбачає достатньо протяглий кроссовер від двох- до тривимірного режиму флуктуаційної паравовідності, що також безпосередньо видно з представлених експериментальних даних, при визначенні величини приведеної температури, яка відповідає точці 2D-3D кроссовера, бажано вказувати відповідні допуски.

2. Деякі рисунки, зокрема рисунки 5.3(а) та 5.3(б) у п'ятому розділі, перевантажені великою кількістю кривих, що ускладнює їх сприйняття та аналіз.
3. Автор не завжди коректно відокремлює дієприкметникові звороти комами, що дещо ускладнює читання окремих фрагментів тексту.

Проте зазначені недоліки не мають принципового характеру і жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновок.

Дисертаційна робота Ду Дзюньї є завершеним науковим дослідженням, яке містить нові фундаментальні знання щодо динаміки нормальних носіїв заряду у високотемпературних надпровідниках. Отримані результати мають суттєве наукове значення для галузі фізики твердого тіла та її прикладних аспектів у науці й техніці.

На підставі викладеного вважаю, що дисертаційна робота Ду Дзюньї **«Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ із заданою топологією дефектної структури»** повністю відповідає спеціальності **104 – Фізика та астрономія** та всім вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. № 44), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань **10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».**

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник

Фізико-технічного інституту низьких

температур імені Б. І. Веркіна НАН України,

кандидат фізико-математичних наук

Разет БАСНУКАЄВА

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 14:34:43 30.07.2025

Назва файлу з підписом: Відгук опонента Баснукаєва Р.М..rtf.p7s
Розмір файлу з підписом: 164.9 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук опонента Баснукаєва Р.М..rtf
Розмір файлу без підпису: 147.3 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Баснукаєва Разет Магомедівна

П.І.Б.: Баснукаєва Разет Магомедівна

Країна: Україна

РНОКПП: 3291704027

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 14:34:42 30.07.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП monobank | Universal Bank

Серійний номер: 10FF6F932221FA0056CF030000000001389DF902

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
доценту Олегу ЛАЗОРЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Рецензія

офіційного рецензента, доцента кафедри теоретичної фізики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Рашби Георгія Ілліча на дисертаційну роботу Ду Цзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури», на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки».

У зв'язку з відсутністю повної мікроскопічної моделі фізичних явищ у ВТНП-матеріалах, дослідження цих сполук з використанням екстремальних зовнішніх факторів, таких як температура, високий тиск, радіаційне опромінення, не втрачають своєї актуальності. Тому дисертаційна робота Ду Дзюньї, в якій були досліджені електротransпортні властивості та динаміка магнітного потоку в ВТНП-сполуках системи $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ із заданою морфологією дефектного ансамблю під дією екстремальних зовнішніх чинників (низької температури, гідростатичного тиску, магнітного поля, електронного опромінення), є доцільною та знаходиться у руслі сучасної науки.

Слід зазначити, що дослідження провідності ВТНП-сполук в нормальному стані є одним з основних та прямих джерел інформації про динаміку носіїв заряду, структурних та фазових станах системи. Цікавість до подібних досліджень залишається незмінно високою, оскільки вважається, що такі явища, як перехід метал-ізолятор, некогерентний електротransпорт, флуктуаційна провідність є, разом з псевдощілинним станом, ключем до розуміння природи ВТНП, яка на цей час є центральною невирішеною

проблемою фізики твердого тіла. Таким чином, предмет дослідження, а також результати рецензованої дисертаційної роботи безсумнівно актуальні.

Особливо можна підкреслити, важливість отриманих результатів, що стосуються вивчення впливу опромінення і високого тиску на властивості ВТНП-сполук в плані їх практичного застосування. Дослідження проводилися в рамках виконання держбюджетних НДР за програмами Міністерства освіти і науки України, перерахованим в дисертації, що також підкреслює актуальність розглянутих в роботі проблем.

Наукові праці за темою дисертації опубліковані в рецензованих відомих фізичних журналах та пройшли апробацію на науковій конференції міжнародного рівня.

Оскільки предметом вивчення були температурні особливості електроопору сполук $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в основному в нормальному (не надпровідному) стані і при цьому значна частина роботи присвячена аналізу експериментальних даних в рамках моделей різних механізмів переносу заряду, відповідність роботи Ду Дзюшї спеціальності 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки» не викликає сумнівів.

Структура дисертаційної роботи стандартна. Вона складається зі вступу, п'яти розділів та списку використаної літератури.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, мету і завдання досліджень. Відображена новизна результатів та їх практичне значення. Містяться також потрібні відомості про творчий внесок дисертанта та апробацію праці.

Розділ 1 – огляд наявних літературних даних – в ньому відібрано те головне, що автор вважав за потрібне, з величезного потоку інформації, з яким стикаються дослідники, що працюють в цій галузі. Зокрема, надано опис кристалічної структури сполук $YBaCuO$ з різним значенням кисневого індексу, розглянуто вплив різних видів структурних дефектів на електротransпортні властивості цих сполук. Наведено короткий огляд основних сучасних теоретичних моделей, що описують механізми формування флуктуаційної та псевдощільної аномалій в ВТНП-сполуках. Досить докладно проаналізовані роботи, присвячені вивченню впливу радіаційного опромінення. Ґрунтуючись на наявних даних, автором сформульовані проблеми, що становлять предмет досліджень, виконаних в дисертації.

Оригінальна складова праці викладена в наступних чотирьох змістовних розділах.

Розділ 2 дисертації носить, в основному, методологічний характер. У ньому розглядається технологія вирощування ВТНП-монокристалів системи 1-2-3, методика отримання монокристалічних зразків високого ступеня досконалості та зразків з різним ступенем відхилення від стехіометрії, а також легованих різними елементами, зокрема празеодимом. Описано технологію синтезу монокристалічних зразків сполуки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, які були леговані празеодимом. Також в цьому розділі приведені схематичні описи експериментальних установок та пристроїв, що використовувалися при проведенні вимірювань, а також наведені основні метрологічні характеристики приладів і обладнання, яке використовувалося в процесі експериментальних досліджень.

У третьому розділі «**"Пружні" та "непружні" двійники та пінінг вихорів Абрикосова в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$** » обговорюються експериментальні дані, отримані при дослідженнях закріплення магнітних вихорів (ефект піннінга) на «непружних» і «пружних» двійниках, клиновидні вершини яких в напрямку двійникування не виходять на поверхню кристала. Ефективність дії «пружних» двійників як центрів піннінгу вивчали, вимірюючи величину критичного транспортного струму J_c в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Незважаючи на те, що питання пов'язані з пінінгом вихорів магнітного потоку в надпровідниках другого роду вивчаються протягом багатьох десятиліть, інтерес до них періодично повертається у зв'язку з відкриттям нових надпровідних матеріалів, в яких структура може визначати незвичайні властивості і динаміку самих магнітних вихорів, анізотропні властивості. У свою чергу вміння керувати величиною пінінгу важливе для збільшення струмонесучої здатності надпровідників у сильноточній енергетиці та для впливу на резистивний стан у надпровідниковій електроніці.

У першій частині розділу розглядаються характеристики і структура «пружних» двійників. Такий вибір об'єкта досліджень обумовлений тим фактом, що автори мають унікальні високотемпературні монокристали з розмірами кілька десятків квадратних міліметрів, в яких двійники не виходять на поверхню кристала і є "пружними" двійниками. Для таких дефектів автори роблять оцінку сили пінінгу, і виявляється, що густина критичного струму в цьому випадку повинна дорівнювати густині струму розпаровування. Зроблені висновки щодо того, що межі «пружних» двійників у високотемпературних надпровідниках є ефективними центрами пінінгу ліній магнітного потоку, повністю відповідають основній концепції про

тісний зв'язок зворотної пластичності надпровідників з їхніми фізичними властивостями.

У розділі 4 «Вплив тиску на критичну температуру та електроопір монокристалів $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ » наведено результати досліджень впливу високого гідростатичного тиску до 11 kbar на провідність у базисній ab -площині середньо допованих празеодимом ($x \approx 0,23$) монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Показано, що, на відміну від чистих зразків $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, з оптимальним вмістом кисню, прикладання високого тиску сприяє фазовому розшаруванню в базисній площині монокристалів $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Встановлено, що у нормальному стані провідність є металевою та обмежується розсіюванням на фонах (режим Блоха-Грюнайзена) та дефектах. Гідростатичний тиск приводить до зменшення залишкового та фононного опорів. Температура Дебая та довжина когерентності не залежать від тиску. Показано, що при температурах оддалік від критичної надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому діапазоні температур $T_f < T < T^*$, а температурна залежність псевдощільності задовільно описується в межах теорії переходу БКШ-БЕК.

Розділ 5 «Вплив радіаційних та домішкових дефектів на флюктуаційну провідність монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ » присвячений вивченню впливу середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} cm^{-2}) опромінення швидкими електронами на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. При цьому вплив опромінення порівняний зі впливом допування празеодимом.

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. 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 фононною та дефектною підсистемами, що необхідно для цілеспрямованого впливу на властивості матеріалу. 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.

Показано, що опромінення електронами та збільшення ступеня допування празеодимом приводить до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності, тим самим звужуючи область лінійної залежності $\rho(T)$ у ab -площині. Було досліджено також флуктуаційну провідність, що домінує поблизу T_c . Встановлено, що при дозах $0 \leq D \leq 6.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ значення величини поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ збільшується зі зростанням дози приблизно в 3 рази, та більш ніж у чотири рази у міру підвищення концентрації празеодиму у зразку до $z \approx 0.42$. При цьому, в обох випадках, зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера. На відміну від випадку опромінення малими дозами та допування празеодимом до середніх концентрацій, опромінення середніми дозами та допування празеодимом при більш високих концентраціях приводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ з характерними максимумами, що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

У дисертації Ду Дзюньї використаний широкий спектр об'єктів дослідження різної морфології дефектної структури і досить широкий набір експериментальних методів, при цьому робота достатньо логічна, написана доброю науковою мовою, а отримані дані не викликають сумнівів.

Оцінюючи наукове значення і новизну дисертації, виділю наступні її результати, отримані вперше, і як на мене, важливі для просування вперед у розумінні незвичайної фізики ВТНП-купратів і мають практичне значення:

1. На першому місці стоїть виявлення ролі пружних двійників в реалізації процесів пінінгу і модулювання динаміки магнітного потоку. Результат без сумніву має велике практичне значення.

2. Для подальшого розвитку уявлень про динаміку процесів переносу заряду і її впливу на надпровідні властивості цих речовин велике значення мають висновки про можливість підвищення критичних параметрів і провідних характеристик системи під дією високого гідростатичного тиску.

3. Результати, що були отримані при вивченні впливу опромінення на магніторезистивні властивості сполуки $YBaCuO$ в широкому інтервалі температур дозволяють оцінити ряд фундаментальних величин, таких як критична температура, довжина когерентності, величина псевдощільнини, що разом з результатами структурного аналізу дають важливу інформацію для розуміння таких явищ як псевдощільнинний стан і флуктуаційна провідність,

які є, вірогідно, ключем до розуміння природи ВТНП. Крім цього, експериментальні дані п'ятого розділу окреслюють емпіричні шляхи підвищення технологічних характеристик ВТНП-сполук системи 1-2-3, що, безсумнівно, має велике практичне значення.

У той же час, слід зазначити, що робота не позбавлена деяких недоліків, а саме:

1. Дослідження впливу дефектів різної морфології на пінінг вихорів монокристалів YBaCuO проведено не повно. Безумовний інтерес мало би визначення магніторезистивних характеристик в бездвійникових кристалах. Це дало би змогу отримати важливу інформацію про вплив власного пінінгу і пінінгу на кластерах кисневих вакансій. Очевидно, що зміна фізичних характеристик залежить і від технології отримання вихідних монокристалів. На жаль у дисертації є обмаль інформації та порівнянь з результатами інших авторів.

2. У результатах експериментів по вивченню впливу опромінення і домішок празеодиму на резистивні властивості в нормальному стані і пригнічення надпровідних характеристик сполуки YBaCuO , на мій погляд, не вистачає даних щодо впливу максимальних доз електронного опромінення на цей ефект.

3. Рисунок 5.3 (а, б) і вставки до них краще було б показати кожен на окремому полі.

Проте зазначені недоліки та зауваження не мають вирішального значення і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Таким чином, дисертаційна робота Ду Дзюньї є завершеним науковим дослідженням в області фізики надпровідності і твердого тіла. Отримані в ній результати нові і принципово важливі для розуміння природи надпровідності в ВТНП-купратах.

Вважаю, що дисертація «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » за своєю актуальністю, об'ємом проведених досліджень, ступенем новизни, науковим та практичним значенням одержаних результатів, відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» галузі знань 10 «Природничі науки» та вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. № 44). Враховуючи все зазначене, вважаю, що Ду Цзюньї заслуговує на присудження йому

наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний рецензент,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувач кафедри
теоретичної фізики імені І.М. Ліфшиця
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Георгій РАШБА

Підпис Георгія Рашби засвідчую

Начальник відділу кадрів
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Олена ГРОМИКО

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 16:37:52 14.08.2025

Назва файлу з підписом: Відгук_офіц_реценз_Рашба_ГІ_2025_final.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 330.3 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук_офіц_реценз_Рашба_ГІ_2025_final.pdf
Розмір файлу без підпису: 335.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ

П.І.Б.: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2592413194

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 16:37:53 14.08.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000851F250106867C05

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.08.04 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
доценту Олегу ЛАЗОРЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

офіційного опонента, старшого наукового співробітника ННЦ ХФТІ НАНУ, доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника Сухаревої Тетяни Віталіївни на дисертаційну роботу Ду Дзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки».

Метою дисертаційної роботи Ду Дзюньї є – «встановлення фізичних закономірностей еволюції магніторезистивних характеристик у шаруватих ВТНП – сполуках сімейства $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-x}$ в умовах дії екстремальних зовнішніх чинників (низької температури, високого тиску і електронного опромінення)» (стор. 18 дисертації).

Вже формулювання мети роботи Ду Дзюньї свідчить про актуальність дисертаційної роботи. Дійсно, фактично в роботі йдеться про два найважливіші аспекти проблеми високотемпературної надпровідності:

- Розширення існуючих уявлень про можливу природу і механізми прояву цього унікального явища.
- Пошук емпіричних шляхів підвищення критичних параметрів ВТНП шляхом модифікації хімічного складу, кристалічної та дефектної структури в умовах докладання екстремальних зовнішніх чинників (низької температури, магнітного поля, високого тиску і електронного опромінення).

Про актуальність дисертаційної роботи свідчить також те, що робота виконувалася в рамках низки тем НДР за програмами МОН України.

Для досягнення мети роботи розроблено та реалізовано програму досліджень, що включає розв'язання таких завдань:

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...

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. Дослідити динаміку магнітного потоку і особливості піннінгу магнітних вихорів (ефект закріплення) на звичайних "непружних" та "пружних" двійниках...

4. Виміряти температурні залежності електроопору в базисній площині 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...

5. Виділити окремі механізми розсіювання носіїв заряду в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$... і вивчити вплив опромінення на ... механізми розсіювання носіїв заряду.

6. Провести порівняльний аналіз впливу радіаційних і домішкових дефектів на флуктуаційну провідність... поблизу критичної температури, T_c .

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

Свою основну роль як офіційного опонента я бачу у встановленні на підставі ознайомлення з дисертацією та опублікованими роботами Ду Дзюньї того, що мету роботи досягнуто, а поставлені завдання успішно вирішено. Для цього необхідно розглянути структуру дисертаційної

роботи і, звісно, новизну і достовірність, а також цінність для сучасної фізики основних отриманих у роботі результатів.

Структура дисертації Ду Дзюньї така. Робота складається з анотації, списку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, Висновків і бібліографічного списку, що включає 243 назви.

Анотація і Вступ написані в повній відповідності з вимогами МОН України, що пред'являються до даних розділів кандидатських дисертацій.

У Розділі 1 **“Кристалохімічна структура та нормальна провідність ВТНП – купратів в умовах варіювання дефектного складу і впливу опромінення”** проведена систематизація наявних літературних джерел про структуру та основні фізичні властивості сполук $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та $\text{Y}_{1-z}\text{Pr}_z\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з різними значеннями кисневого індексу і концентрації празеодиму. Цей розділ являє собою класичний літературний огляд. При цьому, однак, погляд здобувача на сучасний стан проблеми видається надміру похмурим (природа високотемпературної надпровідності не встановлена, природа псевдоцілинного стану також не дуже зрозуміла, сполуки $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ мають складну, шарувату структуру, механізми передачі струму різними кристалографічними напрямками не однакові тощо). Утім, незважаючи на весь песимізм здобувача, огляд написаний досить кваліфіковано. Насамперед це стосується викладу питань, пов'язаних із псевдоцілинним станом та флуктуаційною парепровідністю у ВТНП при $T > T_c$, а також із впливом зовнішніх чинників на магніторезистивні характеристики таких систем.

У розділі проаналізовано наявні експериментальні та теоретичні дані з цього питання. Підкреслено обмеженість і суперечливість даних, присвячених саме питанням впливу екстремальних зовнішніх чинників.

Раздел 2 “Експериментальна техніка та методики досліджень”. Методичні досягнення здобувача полягають у розвитку технології одержання монокристалів ВТНП різного складу з регульованими

дефектами та створенні осередку, що дає змогу змінювати взаємну орієнтацію $\mathbf{H}$ і базисної площини ab зразків. Розглянуті також методики отримання високого тиску і використання електронного опромінення. Я вважаю, що матеріал Розділу 2, який стосується синтезу монокристалів різного складу і дефектності, заслуговує винесення на табло найважливіших результатів роботи Ду Дзюньї.

Розділ 3 “«Пружні» та «непружні» двійники та піннінг вихорів Абрикосова в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ” присвячений вивченню впливу «пружних» та «непружних» двійників на піннінг і динаміку магнітного потоку в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Ефективність дії «пружних» двійників як центрів пінінгу вивчали, вимірюючи величину критичного транспортного струму J_c в монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Представлені експериментальні дані свідчать про те, що межі «пружних» двійників є ефективними центрами піннінгу магнітного потоку в монокристалах досліджуваної сполуки. Основними центрами закріплення вихорів є дислокаційні скупчення, які утворюються в вершинах «пружних» двійників. Лінії дислокацій розташовуються в площині двійників і, при збігові орієнтації магнітних вихорів та дислокаційних ліній, зменшується енергія вихорів, з'являється сила піннінгу.

Розділ 4 “Вплив тиску на критичну температуру та електроопір монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ”. У Розділі розглядаються процеси фазового розшарування, упорядкування атомів кисню тощо та їхній вплив на температурну залежність електроопору. Обговорюються можливі механізми впливу допування празеодимом та високого тиску на нормальну і надлишкову провідність, а також механізми розсіювання нормальних і флуктуаційних носіїв. З моєї точки зору зміст цього розділу значно ширший, ніж його назва.

У Розділі 5 “Вплив радіаційних та домішкових дефектів на флуктуаційну провідність монокристалів $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ” розглядаються

різні аспекти проблеми впливу середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} cm^{-2}) опромінення швидкими електронами на електротранспорт в ВТНП-монокристалах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Вплив опромінення швидкими електронами на надлишкову провідність порівнюється із впливом допування празеодимом ($\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$).

Структура дисертаційної роботи цілком логічна.

Зупинюся на аналізі *новизни та достовірності* основних висновків дисертації ДУ ДЗЮНБІ (стор. 123). Висновки, так само як і розділи оригінальної частини дисертації можна умовно розділити на три групи:

- вивчення впливу структурних дефектів – «непружних» та «пружних» двійників – на піннінг магнітних вихорів (Розділ 3, Висновки 1, 2);
- вивчення впливу допування празеодимом та високого тиску на резистивні характеристики в базисній *ab*-площині допованих празеодимом ($x \approx 0,23$) монокристалічних зразків $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на нормальну і надлишкову провідність (Розділ 4, Висновки 3 – 7);
- дослідження впливу опромінення і домішок Pr на умови та режими реалізації флуктуаційної провідності (Розділ 5, Висновки 8-10).

Мені здається доречним розглянути Висновки 1 і 2 спільно. Річ у тім, що й ідейно, й експериментально обидва положення, що виносяться на захист, тісно пов'язані й походять одне з одного.

1. *Вперше встановлено, що межі «пружних» двійників є ефективними центрами піннінга ліній магнітного потоку в монокристалах досліджуваної сполуки.*

2. *Визначено, що основними центрами закріплення вихорів є дислокаційні скупчення, які утворюються в вершинах «пружних» двійників. Лінії дислокацій розташовуються в площині двійників і, при збігові орієнтації магнітних вихрів та дислокаційних ліній, зменшується енергія вихорів, з'являється сила піннінга, що закріплює їх місце розташування, а, в*

підсумку, і приводить до збільшення критичної густини транспортного електричного струму.

Захисту цих висновків присвячено Розділ 3.

Як відомо, піннінг магнітного потоку реалізується на дефектах кристалічної решітки ВТНП. Питання ж про те, чи є межі двійників ефективними центрами піннінгу і, зокрема, яка роль у цьому процесі «пружних» і «непружних» двійників, досі було недостатньо вивчено.

Здобувачу вдалося переконливо довести, що максимальне значення критичної густини транспортного струму J_c досягається тоді, коли напрямки магнітних ліній потоку збігаються з напрямками ліній дислокацій, що утворюють «пружні» двійники, і рух вихорів відбувався перпендикулярно до меж двійників. Що в свою чергу узгоджується з припущенням зробленим дисертантом про закріплення магнітних вихорів на дислокаціях, утворених під час створення «пружних» двійників.

На користь *новизни й достовірності* Висновків 1 і 2 свідчать наступні три обставини:

- межі звичайних, «непружних», двійників, як центрів піннінгу, відрізняються від кластерів дислокацій, що утворюють «пружні» двійники своєю відповідною реакцією на орієнтацію магнітних вихорів, тож внесок цих двох різних центрів прив'язки дійсно не є адитивним;
- суть експериментів здобувача полягала в дослідженні фазового стану та дисипації енергії в системі вихорів в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в похилих, відносно двійникових меж, магнітних полях за допомогою спеціально вирізаних містків для резистивних вимірювань. При цьому вивчався піннінг для двох типів двійників: звичайних – «непружних» та «пружних», коли вершини двійників знаходилися всередині зразка.
- ідейною базою слугувало припущення, про дислокаційну структуру «пружних» двійників які можуть бути центрами закріплення ліній

магнітного потоку в надпровідниках другого роду, до яких належить сполука $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

3. *Вперше встановлено, що, на відміну від чистих зразків $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з оптимальним вмістом кисню, в монокристалах $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ прикладання високого тиску приводить до фазового розширення в базисній площині.*

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 4 (пп. 4.1, 4.2, 4.3).

Я не маю сумнівів в новизні й достовірності цього висновку (основні результати показано на Рис. 4.2 та 4.3). Наявність двох максимумів $d\rho(T)/dT$ на Рис. 4.2 однозначно вказує на появу двох областей з різними температурами надпровідного переходу. Тобто прикладання високого гідростатичного тиску до зразків ВТНП, що були доповані празеодимом ($\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$), привело до появи макроскопічних неоднорідностей, які викликали двохсхідчастий надпровідний перехід. На думку здобувача просторовий розподіл дефектів, створений домішками празеодиму, приводить до того, що разом із мезоскопічними коливаннями також спостерігаються макроскопічні коливання концентрації дефектів.

4. *Встановлено, що у нормальному стані провідність є металевою та обмежується розсіюванням на фононах (режим Блоха-Грюнейзена) та дефектах.*

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 4 (пп. 4.3, 4.4).

Я не сумніваюся в новизні та достовірності цього висновку (основні результати показано на Рис. 4.4). Поведінка наведених на Рис. 4.4 залежностей $\rho_{ab}(T)$ $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, отриманих за різних значень гідростатичного тиску, була проаналізована у парадигмі розсіювання електронів на фононах і дефектах структури, та добре апроксимується відповідним співвідношенням Блоха-Грюнайзена (4.2). При всіх

прикладених тисках залежність $\rho_{ab}(T)$ не змінюється та залишається металевою.

Слід надати належне здобувачеві в тому, що для встановлення цього, здавалося б, цілком логічного результату, поряд із експериментальними, він широко використовував розрахункові методи дослідження. Але, на жаль, у тексті дисертації наведено лише кінцеві результати цих розрахунків.

5. Показано, що флуктуаційна провідність задовільно описується в межах моделі Лоуренса -Доніаха.

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 4 (пп. 4.4 та 4.6.2).

Достовірність цього висновку сумнівів не викликає, оскільки для ВТНП системи 1:2:3 флуктуаційна провідність при наближенні до T_c задовільно описується в рамках теоретичної моделі Лоуренса-Доніаха.

Новизна ж цього висновку (основні результати показано на Рис. 4.5) полягає у встановленні того факту, що в разі прикладання високого тиску до монокристалів $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в порівнянні з загальною провідністю зразка в нормальному стані та $P=0$, при температурах нижче деякої (у цьому випадку, при $T \leq 68$ K), внесок надлишкової провідності переважає, а вплив тиску на опір зразка зумовлений не стільки зміною густини провідних електронів, скільки зміною електронної структури.

6. Встановлено, що гідростатичний тиск приводить до зменшення залишкового та фононного опорів. Температура Дебая та довжина когерентності не залежать від тиску.

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 4 (пп. 4.4).

Достовірність цього висновку сумнівів не викликає. На мою думку, найбільш інформативними для встановлення *достовірності* даного висновку є дані, що представлені в Таблиці 4.2. та на Рис. 4.6. На Рис. 4.6

продемонстровано і проаналізовано відносні зміни параметрів апроксимації, відповідно співвідношенням Блоха-Грюнайзена, та в залежності від тиску (нижня шкала) й анізотропії лінійної стискуваності, (верхня шкала). З Рис. 4.6 видно, що параметри, які характеризують залишковий та фононний опір проявляють тенденцію до зменшення зі збільшенням тиску, а температура Дебая фактично від тиску не залежить.

Новизна ж цього висновку полягає в тому, що здобувачу вдалося встановити той, далеко не очевидний факт, що для монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (в діапазоні використовуваних тисків) прикладання гідростатичного тиску не призводить до зміни температури Дебая.

Але я зовсім не впевнена в доцільності поділу Висновків 4, 5 і 6 на три окремі положення, оскільки всі вони стосуються розгляду близьких за своєю сутністю ефектів, пов'язаних із впливом гідростатичного тиску на механізми розсіювання носіїв заряду монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Використання співвідношення Блоха-Грюнайзена з урахуванням флуктуаційної провідності, описаної в межах теоретичної моделі Лоуренса-Доніаха, дозволило Ду Дзюньї визначити ряд параметрів, що характеризують ці процеси і встановити зв'язок між ними.

7. Показано, що надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому діапазоні температур $T_f < T < T^*$. Залежність $\Delta\sigma(T) \sim (1 - T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T)$ інтерпретується в термінах теорії середнього поля, де T^* - середньопольова температура переходу в псевдоцілінний стан, і температурна залежність псевдоціліни задовільно описується в межах теорії переходу БКШ-БЕК.

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 4 (пп. 4.6).

Я не сумніваюся в новизні та достовірності цього висновку (Здобувачу вдалося показати суть основних отриманих експериментальних результатів на Рис. 4.7 та 4.8). Аналіз надлишкової провідності,

обчислюваної за значеннями виміряного та екстрапольованого опору, дозволив Ду Дзюньї побудувати температурні залежності псевдощілин у монокристалах $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, що зазнали впливу гідростатичного тиску, які були розраховані за формулами (4.7) та (4.8) у середньопольовому наближенні в рамках теорії переходу від БКШ до БЕК (Рис. 4.8). Використовуючи рівняння теорії Асламазова-Ларкіна для 3D і 2D випадків у моделі Лауренса-Доніаха, яка передбачає дуже плавний перехід від 2D до 3D режиму, здобувач зміг обчислити довжину когерентності та виявити певну кореляцію в поведінці баричних залежностей $\xi_c(P)$ та $T_c(P)$. Обидві величини змінюються майже симетрично – зі зростанням $T_c(P)$ величина $\xi_c(P)$ зменшується і навпаки, що може свідчити про однакову природу зміни цих характеристик.

8. *Вперше досліджено вплив середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} см⁻²) опромінення швидкими електронами та зміни концентрації празеодиму в інтервалі $0.0 \leq z \leq 0.5$ на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.*

Захисту цього висновку присвячено Розділ 5.

Достовірність даного висновку не викликає сумнівів. *Новизна* ж цього висновку полягає у спільному вивченні впливу контрольованої зміни концентрації радіаційних і домішкових дефектів на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

9. *Вперше показано, що опромінення електронами та збільшення ступеня допування празеодимом приводить до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності, тим самим звужуючи область лінійної залежності $\rho(T)$ у ab -площині.*

Захисту цього висновку частково присвячено Розділ 5 (пп. 5.1, 5.2).

Новизна та достовірність даного висновку не викликає сумнівів. Основні експериментальні результати, що свідчать на користь

справедливості даного висновку, наведені на Рис. 5.1 та 5.2. При зміні складу та під впливом опромінення криві електроопору характеризуються квазіметалевою поведінкою з характерною лінійною частиною залежності $\rho(T)$ при високих температурах, які при максимальних дозах опромінення та при максимальному вмісті Pr починають набувати характерної S-подібної форми. Еволюція кривих електроопору під впливом опромінення та допування празеодимом хоча і має якісно подібний характер (див. Рис. 5.1), але виявляє істотні відмінності, що свідчать на користь того, що природа змін електричних і надпровідних властивостей ВТНП при зміні складу і під впливом опромінення відрізняється. Проте аналіз поведінки температурних залежностей електроопору при різних дозах опромінення та рівня допування з точки зору існуючих теоретичних моделей не дає однозначного пояснення такої поведінки кривих $\rho(T)$ в області відносно високих температур та не може задовільним чином пояснити відхилення електричного опору від лінійної залежності при температурах нижче певного характерного значення T^* , що відповідає температурі відкриття псевдо щілини.

На мою думку, доцільним буде спільний розгляд *новизни* та *достовірності* Висновків 10 та 11, оскільки положення, що захищаються цими висновками, є результатом вивчення впливу різних доз опромінення та рівня допування об'єктів дослідження на параметри флуктуаційної провідності.

10. *Встановлено, що при дозах $0 \leq D \leq 6.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ значення величини поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ збільшується зі зростанням D приблизно в 3 рази та більш ніж у чотири рази у міру підвищення вмісту празеодиму у зразку до $z \approx 0.42$. При цьому в обох випадках зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера.*

11. *Показано, що на відміну від випадку опромінення малими дозами ($D \leq 10^{19} \text{ см}^{-2}$) та допування празеодимом до концентрацій $z \leq 0.39$,*

опромінення середніми дозами та допування празеодимом при більш високих концентраціях приводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності $\xi_c(0)$ з характерними максимумами при $D \sim 7-8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ та $z \approx 0.42$, що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

Захисту цих висновків частково присвячено Розділ 5 (пп. 5.3, 5.4).

Основні результати, що свідчать на користь обґрунтованості даних висновків, наведені на Рис. 5.2, 5.3 й 5.4.

Найбільш суттєвим є наступне:

Аналізуючи, в рамках існуючих уявлень, різноманітні сценарії впливу ступеня допування празеодимом і різних доз опромінення високоенергетичними електронами оптимально допованих киснем монокристалів $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на механізми розсіювання носіїв заряду на фононах і дефектах, а також надлишкову провідність, здобувач обчислив значення довжини когерентності $\xi_c(0)$ та дістав висновку, що на відміну від випадку опромінення малими дозами, при збільшенні доз опромінення високоенергетичними електронами і ступеня допування празеодимом до більш високих концентрацій пригнічується надпровідність цих сполук.

Новизна ж цього висновку полягає в порівняльному аналізі результатів дослідження впливу опромінення високоенергетичними електронами та легування празеодимом на флуктуаційну провідність монокристалів $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Хоча радіаційні та домішкові дефекти мають різну природу, вплив цих дефектів на температурні залежності електроопору пан Ду Дзюньї пов'язує з якісно схожими режимами реалізації флуктуаційної провідності. Що здається мені занадто сміливим. Дійсно, $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ не є надпровідником («аномалія празеодиму»), незважаючи на наявність орторомбічної елементарної комірки. Часткова заміна Y на Pr призводить до поступового (з ростом допування празеодимом) придушення надпровідності, а з іншого боку – дозволяє

зберігати практично незмінними параметри решітки і кисневий індекс сполуки. А як справедливо зазначає здобувач, під впливом опромінення може відбуватися перерозподіл кисню між позиціями O(4) та O(5) і утворюватися локальні області з тетрагональною структурою.

У мене немає зауважень щодо дисертаційної роботи Ду Дзюньї в цілому. Однак робота має низку недоліків:

1. Щодо структури дисертації. Крім літературного огляду (Розділ 1) практично кожному розділу оригінальної частини передую розлогі вступ, що має характер доповнення до літогляду. Навіщо?
2. Щодо висновків до дисертації. Висновків надто багато. Скорочення кількості висновків хоча б на третину за рахунок об'єднання деяких з них полегшило б сприйняття отриманих у роботі результатів. Тим більше, що у формулюванні деяких висновків взагалі не вказано об'єкт досліджень. Висновок 8, на мій погляд, має скоріше характер преамбули до Висновків 9 – 11, а не є задокументованим конкретним результатом досліджень у дисертації.
3. Мені здається, що усереднення концентрації дефектів по всіх підрешітках є дещо сміливе – маса 4 видів атомів у решітці $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ відрізняється найсуттєвішим чином (Розділ 5, стор. 112). З яких міркувань зроблено оцінку концентрації дефектів при опроміненні електронами? Але якщо є відповідні розрахунки, то це дуже вагомий результат, який слід було б окремо підкреслити в дисертації.

Усі висловлені зауваження не носять принципового характеру, не торкаються загальної високої оцінки дисертації та не можуть вплинути на позитивне враження від отриманих у роботі нових і важливих результатів та її змісту.

Наукова значимість роботи Ду Дзюньї полягає у встановленні впливу різного роду екстремальних чинників (радіаційне опромінення, тиск, магнітне поле) на електрофізичні властивості монокристалів $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

($Re = Y, Pr$) із заданою топологією дефектної структури, що дає можливість не тільки перевірити адекватність численних теоретичних моделей, але й окреслити емпіричні шляхи підвищення критичних параметрів ВТНП- сполук.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розширенні асортименту методів дослідження природи та механізмів процесів електропереносу та розсіювання носіїв заряду в монокристалічних сполуках типу 1 : 2 : 3 шляхом залучення об'єктів, що мають ансамбль дефектів різної концентрації та морфології.

Фундаментальні та практичні результати роботи будуть корисними для фахівців у галузях фізики низьких температур та надпровідності, які працюють у науково-дослідних установах України та зарубіжжя. Матеріали дисертаційної роботи у повному обсязі опубліковані у провідних фахових наукових виданнях України та закордонних наукових виданнях, які реферуються системою Scopus та Web of Science.

Дисертаційна робота та наукові праці здобувача проходили перевірку на наявність плагіату з використанням антиплагіатної системи Strikeplagiarism.com. Результати перевірки переконливо продемонстрували, що дисертаційна робота Ду Дзюньї є оригінальною, текст дисертації не містить плагіату. Відтак, дисертаційна робота відповідає вимогам академічної доброчесності.

Текст дисертації добре структуровано і логічно викладено відповідно до вимог, які встановлено до наукових робіт. Основні матеріали наукових публікацій автора представлені у тексті дисертації. У висновках чітко сформульовано особовий внесок здобувача у розв'язання наукових завдань для досягнення поставленої мети, що полягає у проведенні експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів, проведенні розрахунків, участі в обговоренні отриманих результатів, а також у

підготовці публікацій за темою дисертації. Дисертація Ду Дзюньї є завершеною науковою роботою, в рамках якої отримана низка нових науково-обґрунтованих результатів.

Актуальність теми роботи, новизна та наукова значимість одержаних результатів, їх достовірність та обґрунтованість дозволяють зробити висновок, що дисертаційна робота “Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури” повністю задовольняє вимогам, встановлених до дисертацій доктора філософії МОН України, а її автор, Ду Дзюньї, безумовно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Оформлення дисертації повністю відповідає вимогам, що висуваються до таких робіт згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій». Текст дисертації написаний українською науковою мовою.

На основі викладеного вище вважаю, що дисертаційна робота Ду Дзюньї “Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури” є завершеним науковим дослідженням в галузі фізики низьких температур та надпровідності, актуальним за розглянутими науковими проблемами, має наукову новизну і є важливою для практичного впровадження отриманих результатів. Тема і матеріал дисертації повністю відповідають спеціальності 104 «Фізика та астрономія» галузі знань 10 «Природничі науки» та вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. № 44). Враховуючи усе вищесказане, вважаю, що Ду Дзюньї заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент
старший науковий співробітник
ІНЦ ХФТІ НАНУ,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Т.В. Сухарева

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 12:22:39 14.08.2025

Назва файлу з підписом: ВІДГУК_ Ду_Дзюньї_укр_30.07.25.docx.p7s
Розмір файлу з підписом: 77.6 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: ВІДГУК_ Ду_Дзюньї_укр_30.07.25.docx
Розмір файлу без підпису: 58.8 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Сухарева Тетяна Віталіївна

П.І.Б.: Сухарева Тетяна Віталіївна

Країна: Україна

РНОКПП: 2425001104

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 13:22:26 14.08.2025

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Серійний номер: 382367105294AF970400000089CD6C0143334104

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.08.04 13:00