

Рецензія

провідного наукового співробітника відділу мікроконтактної спектроскопії
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, доктора фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника Золочевського Івана Васильовича
на дисертаційну роботу Колісника Андрія Сергійовича
«Особливості впливу магнітного поля, тиску та відпалу на псевдощілину у
плівках і монокристалах $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Ho}$) та $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ »,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 -
«Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки»

З моменту відкриття високотемпературної надпровідності (ВТНП) у купратних сполуках минуло вже чотири десятиліття, однак створення повноцінної мікроскопічної теорії, здатної вичерпно описати природу цього явища та детальний механізм спарювання носіїв заряду при екстремально високих температурах, досі залишається однією з найгостріших проблем сучасної фізики конденсованого стану. Головною перепорою на цьому шляху є складність внутрішньокристалічних взаємодій у багатокомпонентних ВТНП-системах. На сьогодні існує обґрунтована думка, що ключ до розуміння природи утворення спарених ферміонів (локальних пар) у ВТНП лежить у детальному дослідженні специфічного явища — псевдощілини (ПЩ), і фізика якої досі до кінця не з'ясована. Є надія, що правильне розуміння природи псевдощілини дозволить прояснити механізм надпровідного спарювання в конкретному ВТНП.

Оскільки мікроскопічна природа надпровідного спарювання та псевдощілини є предметом наукових дискусій, найбільш дієвим експериментальним підходом є дослідження реакції електронної підсистеми на зовнішні збурення. Цілеспрямоване накладання екстремальних магнітних полів, застосування високого гідростатичного тиску, генерація структурних дефектів при температурному відпалі та штучне введення парамагнітних

домішок (Ho, Pr) дозволяють модифікувати параметри флуктуаційної провідності та псевдощілини.

Дисертаційна робота А.С. Колісника присвячена всебічному комплексному дослідженню та аналізу впливу магнітного поля, високого гідростатичного тиску та довготривалого відпалу — на флуктуаційну провідність і псевдощілину в плівках та монокристалах купратних високотемпературних надпровідників. **Актуальність** даної теми обумовлена необхідністю з'ясування фізичної природи псевдощілини, зокрема перевірки моделі локальних пар, та її змін під впливом вищезгаданих зовнішніх чинників. Можливий наслідок цих досліджень — визначення механізму надпровідного спарювання в купратних ВТНП, що відкриє шлях пошуку надпровідників з ще більш високими температурами надпровідного переходу.

Загальна характеристика роботи та отриманих в ній результатів

Дисертація Колісника А.С. є глибоким та структурованим науковим дослідженням. Загальній обсяг кваліфікаційної наукової роботи, що подана на рецензію, нараховує 182 сторінки, включаючи 39 рисунків та 6 таблиць. Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел з 170 посилань. Дослідження виконано в рамках відомчої теми Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України: “Провідні, надпровідні, магнітні та сенсорні властивості новітніх функціональних матеріалів” (номер державної реєстрації 0122U001501).

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, та описано її взаємозв'язок із науковими програмами. Сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, розглянуто практичну цінність отриманих результатів та їх наукову новизну, а також наведено дані про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі**, присвяченому огляду літератури, проведено ґрунтовний аналіз сучасного стану експериментальних та теоретичних

досліджень властивостей купратних високотемпературних надпровідників, зокрема системи $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та споріднених сполук. Детально розглянуто кристалічну структуру та особливості електронної конфігурації купратів, де ключову роль відіграють провідні площини CuO_2 та лабільний кисень, концентрація якого визначає ступінь допування та положення зразка на фазовій діаграмі. Особливу увагу приділено аналізу проблеми псевдощільності та моделі локальних пар, яка дає змогу розрахувати температурну залежність параметра псевдощільності $\Delta^*(T)$. В цьому розділі також обґрунтовано вибір зовнішніх енергетичних чинників: сильного магнітного поля, гідростатичного тиску та відпалу, як потужних інструментів для дослідження еволюції псевдощільності. Таким чином, проведений літературний огляд показує, що лише комплексне дослідження реакції псевдощільного стану на ці зовнішні впливи дозволяє створити цілісну фізичну картину електронних процесів у ВТНП.

У **другому розділі** детально розглянуті методики та технології отримання досліджуваних зразків і проведення транспортних вимірювань. Для дослідження впливу магнітного поля використовувалися високоякісні епітаксійні плівки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, отримані методом імпульсного лазерного напилення. Рентгеноструктурний аналіз підтвердив їхню текстурованість та орієнтацію кристалографічної осі c перпендикулярно до поверхні. Дослідження в магнітному полі виконувалися на комплексі Quantum Design PPMS-9 у полях до 9 Тл. Для баричних досліджень використано монокристали $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, а тиск створювався у камері типу «поршень-циліндр» із контролем за допомогою манганінового датчика. Для дослідження відпалу використано монокристали $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, у яких після термічної деоксигенації та загартування відстежувалися релаксаційні процеси під час тривалого відпалу при кімнатній температурі.

Підсумовуючи викладене в другому розділі, а саме, застосування експериментальних методик з використанням сучасного комп'ютеризованого

обладнання, можна говорити про високий рівень підготовки дисертанта, як експериментатора.

У **третьому розділі** представлені результати досліджень особливостей температурних залежностей питомого опору, флуктуаційної провідності та параметра псевдощільності в епітаксійних плівках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ під дією зовнішнього магнітного поля до 9 Тл, орієнтованого паралельно кристалографічній осі c .

Експериментально встановлено, що магнітне поле суттєво зменшує ПЩ при високих температурах, але абсолютно не впливає на опір у нормальному стані. Це є прямим підтвердженням існування локальних пар, оскільки поле по-різному взаємодіє з нормальними електронами та локальними парами.

У розділі проведено детальний аналіз флуктуаційної провідності, результати якого вказують на сильне пригнічення флуктуаційного внеску Макі-Томпсона (2D-MT) під впливом магнітного поля, що зумовлює зміщення температури 3D-2D кросовера і, як наслідок, специфічне зростання довжини когерентності (розміру локальних пар) $\xi_c(B)$.

На основі аналізу надлишкової провідності в рамках моделі локальних пар були вперше детально досліджені польові залежності довжини когерентності $\xi_c(0)$, величини ПЩ - $\Delta^*(T_G)$, виміряній при температурі Гінзбурга, і параметра Гінзбурга G_i , який характеризує ширину області критичних флуктуацій. Виявлено, що всі три параметри: лінійно залежать від поля, причому всі три залежності змінюють нахил в районі 1Тл. Доведено, що така поведінка обумовлена зміною механізму взаємодії магнітного поля з ВТНП: в малих полях до 1 Тл працює механізм руйнування пар, в той час, як при $B \geq 1$ Тл поле формує у ВТНП двовимірну ґратку вихорів, з якою механізм взаємодії поля виявляється зовсім іншим.

Ще одним дуже цікавим фізичним результатом є висновок про явище магнітоіндукованої ізотропізації куперівських пар. Кількісно доведено, що у

сильних полях в 9 Тл довжина когерентності вздовж осі c , $\xi_c(0)$, аномально зростає в 3.1 рази, а довжина когерентності в базисній площині, $\xi_{ab}(0)$, синхронно зменшується теж в три рази, що призводить до формування більш ізотропного флуктуаційного відгуку системи у вихоровому стані $\xi_c(0) \approx \xi_{ab}(0)$.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу гідростатичного тиску до 1.1 ГПа на транспортні властивості, флуктуаційну провідність та температурну залежність псевдощільни в монокристалах $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Встановлено, що під дію тиску флуктуаційна провідність, довжина когерентності $\xi_c(0)$ і відстань між провідними площинами CuO_2 незначно зростають. Крім того, спостерігається зменшення абсолютного значення питомого електроопору в базисній площині ab у всьому досліджуваному температурному діапазоні, та зростання температури надпровідного переходу. На основі ґрунтовного аналізу доведено, що мікроскопічним механізмом таких кардинальних змін транспортних характеристик є суттєве барично-індуковане зростання ефективної густини носіїв заряду безпосередньо у провідних площинах CuO_2 . Зазначене збільшення концентрації дірок, стимульоване зовнішнім тиском, ефективно компенсує пригнічення надпровідності, початково викликане присутністю парамагнітних іонів Pr.

Виявлено складну немонотонну поведінку параметра псевдощільни $\Delta^*(T_G)$ залежно від величини прикладеного гідростатичного тиску. У роботі вперше показано зміну мікроскопічного механізму взаємодії між вільними носіями заряду та локалізованими магнітними дефектами під тиском. З'ясовано, що в області малих тисків (до 0.41 ГПа) спостерігається різке падіння значення псевдощільни $\Delta^*(T_G)$, що зумовлено наявністю магнітних включень діелектричної фази $PrBCO$, які починають виступати як потужні центри розсіяння, руйнуючи локальні пари. Натомість, при досягненні зони середніх тисків (0.64–0.87 ГПа) гідростатичний тиск починає діяти як макроскопічний стабілізуючий фактор, ефективно нейтралізуючи деструктивний вплив

магнітних домішок празеодиму, що призводить до відновлення величини псевдощільності. Окрім того, продемонстровано, що в області високих тисків ($P > 1.1$ ГПа) електронна підсистема проходить через етап просторового та магнітного впорядкування локальних моментів Pr.

Таким чином, одержані експериментальні результати ілюструють здатність високого гідростатичного тиску долати внутрішньокристалічний магнітний безлад і відновлювати когерентний псевдощільний стан.

В п'ятому розділі наведено результати дослідження та аналізу впливу тривалого відпалу при кімнатній температурі на транспортні властивості і параметри нормального стану високотемпературних надпровідників на основі гольмію. Встановлено, що в результаті цієї процедури стимулюється впорядкування кисневої підсистеми в базисних площинах CuO_2 , що призводить до макроскопічної гомогенізації надпровідної матриці, та проявляється у зменшенні нормального опору, монотонному зростанні критичної температури T_c на 9 K (від 63.6 K до 72.7 K) та звуженні ширини резистивного переходу ΔT_c приблизно в 1.8 рази.

Наукова новизна результатів цих досліджень полягає у виявленні ознак виникнення хвиль спінової щільності (ХСЩ) у псевдощільному стані $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Відпал при кімнатній температурі, стимулюючи перерозподіл кисню, виступає каталізатором посилення ХСЩ, що і відображається у зростанні нахилу лінійної ділянки $\alpha = d\Delta^*/dT$ при високих температурах у 3.5 рази порівняно з вихідним станом. Дисертант інтерпретує спостережуваний ефект, як наслідок сильної локальної магнітної взаємодії пар із великим магнітним моментом іонів гольмію ($\mu_{\text{eff}} \approx 9.7\mu_B$) в умовах впорядкування кисневої ґратки. Теоретичне обґрунтування отриманих результатів реалізовано шляхом порівняння експериментальних кривих із мікроскопічною теорією Пітерса-Бауера. Показано, що впорядкування кисневої підсистеми під час відпалу супроводжується систематичним зростанням розрахункової густини локальних пар $\langle n\uparrow n\downarrow \rangle$, що є фундаментальною причиною

спостережуваного зростання критичної температури. Таким чином, застосована методика відпалу дозволила експериментально розмежувати деструктивний вплив структурного безладу вакансій та специфічний стабілізуючий внесок внутрішнього магнетизму іонів гольмію на формування когерентного псевдощілинного стану.

У **«Висновках»** стисло представлено основні результати роботи. Висновки дисертації повністю відповідають поставленій меті дослідження та змісту отриманих результатів. Основні результати, представлені в дисертації опубліковані у вигляді чотирьох статей в журналі Low Temperature Physics (ФНТ) з квантилем Q3, і який входить до Переліку наукових фахових видань України категорії "А", та п'яти тезах міжнародних конференцій.

На сьогоднішній день немає суворої теорії процесів, пов'язаних з флуктуаційною провідністю та псевдощілиною в купратних надпровідниках, що підкреслює актуальність цієї дисертації, яка справляє добре враження про професіональний рівень дисертанта. Він продемонстрував високу ерудицію та обізнаність щодо об'єкта досліджень, що й вимагається від даної кваліфікаційної роботи.

Автором було отримано експериментальні результати, що зазнали глибокого аналізу. На підставі представлених на захист досліджень можна зробити висновок, що дисертант добре оволодів експериментальними методиками та набув високого рівня теоретичних знань. Виходячи з цього можна констатувати, що А.С. Колісник вже є сформованим науковим працівником.

Як і будь-яке дослідження, представлена на його основі дисертація не позбавлена недоліків.

Необхідно відмітити, що незважаючи на достатньо високий рівень написання дисертаційної роботи, в ній присутні друкарські помилки в тексті та на рисунках, які були здебільшого виправлені.

1. У другому розділі детально та ґрунтовно описано технології вирощування монокристалів та напилення плівок. Проте, робота значно виграла б від

наведення більш детальної паспортизації зразків (наприклад, даних рентгенівської дифрактометрії високої роздільної здатності та електронографії цих зразків до, в процесі експериментів і після досліджень впливу зовнішніх чинників, зокрема впливу тиску або тривалого відпалу для підтвердження відсутності незворотних мікроструктурних деградацій.

2. Окремі рисунки у розділах (особливо графіки температурних залежностей псевдощільності зі зшиванням теоретичних і експериментальних даних для різних тисків та часів релаксації) є дещо перевантаженими масивами точок, що трохи ускладнює їх візуальний аналіз.

3. У третьому розділі, при описі фундаментального ефекту магнітоіндукованої ізотропізації куперівських пар (при 9 Тл), фізичний механізм синхронної та протилежної за знаком зміни довжин когерентності на мікроскопічному рівні розкрито дещо стисло, що залишає простір для більш глибокої теоретичної інтерпретації.

Звичайно ж, зазначені недоліки не применшують загальної високої оцінки дисертації.

Підсумовуючи, маю відзначити, що дисертаційна робота Колісника Андрія Сергійовича «Особливості впливу магнітного поля, тиску та відпалу на псевдощільність у плівках і монокристалах $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Ho}$) та $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » відповідає вимогам пп.7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507, та відповідає напряму наукового дослідження освітньо-наукової програми «Фізика» ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Дисертація містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів, характеризується єдністю змісту та відповідає принципам академічної доброчесності, а її

автор Колісник Андрій Сергійович безумовно заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Рецензент: провідний науковий співробітник
відділу мікроконтактної спектроскопії
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,
доктор фізико-математичних наук
старший науковий співробітник

І. Золочев Золочевський І.В.

