

РЕЦЕНЗІЯ

старшого наукового співробітника відділу надпровідних і мезоскопічних структур,
кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника

Турутанова Олега Георгійовича

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 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ »,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

зі спеціальності 104 — «Фізика та астрономія»

з галузі знань 10 — «Природничі науки»

Незважаючи на 40 років експериментальних і теоретичних досліджень властивостей купратних високотемпературних надпровідників (ВТНП) залишається низка нерозв'язаних питань щодо формування надпровідного стану в цих сполуках, що мають складну кристалографічну та електронну структуру. Зокрема, в них знайдено явище, яке відсутнє у класичних низькотемпературних надпровідниках, а саме, зниження щільності електронних станів поблизу рівня Фермі при температурах набагато вищих за температуру надпровідного переходу, що здобуло назву «псевдощілина» (ПЩ). Одна з найпоширеніших точок зору (якої дотримується автор дисертації) на природу ПЩ пов'язана з об'єднанням електронів у бозонні «локальні пари» (ЛП) малого розміру (кілька ангстрем), імовірно, завдяки магнітним взаємодіям, тому що ці ВТНП є антиферомагнетиками, принаймні, за низького рівня допування киснем. Утворення таких пар та їхня подальша еволюція та трансформація у звичайні куперівські пари через область флуктуаційної надпровідності із зниженням температури є досі дискусійним механізмом, але автор дисертації виконав низку експериментів, що мають підтвердити теоретичну концепцію бозе-ейнштейнівської конденсації (БЕК) з утворенням локальних пар при високих T та переходу до більш звичного надпровідного БКШ-стану поблизу

T_c . З цією метою фокус досліджень був зосереджений на параметрах ПЩ (її величині Δ^* та температурі її «розкриття» T^*) і надлишковій флуктуаційній провідності (ФЛП), що зумовлена внесками Асламазова-Ларкіна та Макі-Томсона. Ці параметри обчислювалися за допомогою теоретичних формул Соловйова-Дмітрієва, що описують ПЩ, виходячи з резистивних вимірювань плівкових та монокристалічних зразків ВТНП системи 1-2-3 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$), які піддавалися дії сильного магнітного поля (до 9 Тл), високого гідростатичного тиску (до 1,1 ГПа) чи відпалу при кімнатній температурі, а також додаванню магнітних домішок (Ho, Pr). Це дозволяло авторові цілеспрямовано впливати на зарядові носії, параметри кристалічної ґратки та підсистему лабільного кисню, не змінюючи при цьому базового хімічного складу матеріалу, а зміна законів залежностей надлишкової провідності та фітінг з теоретичною формулою дозволяв визначити необхідні параметри. Окрім підтвердження теоретичної концепції псевдощільни та моделі локальних пар, автор здобувими їм експериментальними результатами щодо впливу різноманітних зовнішніх чинників на транспортні і електронні властивості вищеназваних сполук зробив досить великий внесок у вивчення цього «популярного» сімейства купратних ВТНП, чим зумовлена актуальність роботи. *Тому робота Колісника А.С. є своєчасною, науково обґрунтованою та такою, що відповідає передньому краю сучасної фізики твердого тіла.*

Дисертаційна робота Колісника А.С. виконувалася у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України в рамках цільових фундаментальних програм НАН України та планових науково-дослідних робіт відділу мікроконтактної спектроскопії ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, спрямованих на з'ясування природи високотемпературної надпровідності та розробку нових матеріалів квантової електроніки.

Дисертація викладена на 182 сторінках, містить 39 рисунків, 170 бібліографічних посилань, анотацію, список із 4 журнальних публікацій автора за

темою дисертації, список з 5 конференційних доповідей, які засвідчують апробацію результатів, список умовних позначень, зміст, 5 розділів, висновки, по розділах і загальні, та перелік посилань.

У першому розділі «Основні властивості досліджуваних надпровідників (огляд літератури)» зроблено прицільний аналіз літератури по характеристикам високотемпературних надпровідників взагалі та зокрема купратних, на основі $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ та подібних сполук. Розглянуто кристалічну структуру, механізми провідності, фазову діаграму купратів і вплив ступеня допування киснем. Зосереджено увагу на найбільш поширених теоретичних концепціях псевдощільнини, моделі локальних пар, сильно пов'язаних бозонів, надлишкової провідності та підходах до вимірювання та опису надлишкової провідності. Згідно зі подальшою структурою дисертації, викладені відомі результати дослідження впливу магнітного поля, гідростатичного тиску, структурної релаксації магнітних домішок на псевдощільнинний стан. *Автор продемонстрував добре знання літератури та ясне розуміння свого особового внеску в дослідження за цим науковим напрямом.*

Другий розділ «Об'єкти і методи експериментальних досліджень» містить опис технологій виготовлення тонкоплівкових та монокристалічних зразків ВТНП (імпульсним лазерним напиленням – PLD, та розчинно-розплавним методом, відповідно) і створення низькоомних контактів для 4-зондових вимірювань опору. Рентгеноструктурний аналіз підтвердив високу текстурованість епітаксійних плівок з товщиною ~ 100 нм і з орієнтацією осі c перпендикулярно до поверхні підкладки. Описана методика вимірювання під гідростатичним тиском та процедура деоксигенації і відпалу. Також приведено інші деталі, як-то геометрія експерименту та орієнтація магнітного поля паралельно осі c .

Розділ дає необхідну інформацію для оцінки достовірності результатів, які викладено у наступних розділах.

Третій розділ «Вплив магнітного поля до 9 Тл на температурну залежність псевдощільнини в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » є найбільш інформативно насиченим і ілюстрованим.

У ньому йдеться про вплив постійного магнітного поля до 9 Тл, орієнтованого паралельно кристалографічній осі c , на температурні залежності питомого опору, флуктуаційної провідності та параметра псевдощілини у епітаксійних плівках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Накладання магнітного поля призводить до характерного розширення надпровідного переходу, однак не впливає на опір у нормальному стані, який має лінійну залежність від температури. Суттєвим результатом є висновок, що магнітне поле по-різному взаємодіє з нормальними електронами, відповідальними за опір, і з локальними парами, відповідальними за псевдощілину, і є важливим аргументом на користь існування локальних пар у ВТПН. У флуктуаційній області температур поблизу надпровідного переходу знайдена зміна нахилу лінійних залежностей довжини когерентності вздовж осі c , $\xi_c(0)$, величини псевдощілини при температурі Гінзбурга $\Delta^*(T_G)$ і числа Гінзбурга Gi від магнітного поля при індукції поля $B \sim 1$ Тл, що інтерпретується як перехід від руйнування пар магнітним полем до його взаємодії з двовимірною ґраткою вихорів Абрикосова. З аналізу польової залежності числа Гінзбурга зроблено висновок, що зі зростанням поля до 9 Тл відбувається триразове зменшення довжини когерентності в площині ab , і з одночасним зменшенням довжини когерентності вздовж осі c вони зрівнюються. Це дозволяє говорити про магнітоіндуковану ізоτροпізацію куперівських пар, **що є нетривіальним результатом.**

У **четвертому розділі** «Вплив гідростатичного тиску на псевдощілину в монокристалах $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($x = 0,23$)» наведено результати дослідження зазначених вище параметрів під впливом високого гідростатичного тиску (до 1,1 ГПа) в монокристалах системи YBCO з домішкою магнітних атомів празеодиму ($\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $x \approx 0,23$). Специфічні магнітні дефекти, що створюють іони празеодиму, які пригнічують надпровідність, збагачують поведінку системи і роблять її цікавішою, та дозволяють дослідити конкуренцію між баричним збільшенням густини носіїв заряду і руйнівним впливом магнітних домішок.

Під дією тиску спостерігається зменшення опору та зростання критичної температури, а також флуктуаційної провідності $\sigma'(T)$, довжини когерентності $\xi_c(0)$ і відстані між провідними площинами CuO_2 . Найбільш важливий результат розділу, немонотонна залежність псевдощільни $\Delta^*(T_G)$ від тиску пов'язується з тим, що при малих тисках посилюється вплив магнітних дефектів (включення PrBCO), який призводить до руйнування локальних пар, а при подальшому збільшенні тиску відбувається структурне впорядкування, частково нейтралізуючи руйнівний вплив магнітних дефектів. Порівняння результатів з даними для інших магнітних ВТНП, свідчить на користь магнітної природи високотемпературного максимуму на залежності $\Delta^*(T)$. Теоретичний аналіз показує зростання густини локальних пар під тиском на 11%, що узгоджується з відновленням типової для добре структурованих ВТНП форми залежності $\Delta^*(T)$ поблизу T_c . *Трохи дивним здається зростання, а не зменшення, відстані між провідними площинами CuO_2 з тиском.*

П'ятий розділ «Вплив тривалого відпалу на властивості слабо допованих монокристалів $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » присвячений аналізу впливу кімнатного відпалу слабодогованих монокристалів $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Сумісно протікаючі процеси дифузії лабільного кисню та структурної релаксації з посиленням впливу некомпенсованих магнітних моментів іонів гольмію створюють складну картину. Вони призводять не лише до гомогенізації надпровідної матриці із зменшенням нормального опору, зростанням критичної температури та звуженням переходу, а й з аномальною поведінкою 2D флуктуацій за межами моделі Макі-Томсона. Аналіз еволюції температурної залежності псевдощільни дозволив припустити можливість формування хвиль спінової густини у псевдощільнинному стані $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Розрахунок за теорією Пітерса–Бауера показав зростання густини локальних пар на 13% у процесі відпалу, що пояснює зростання T_c .

Змістовну частину завершують **висновки дисертаційної роботи**. Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів забезпечуються використанням апробованих експериментальних методик та обладнання, якісні

зразки епітаксійних плівок і монокристалів, а також використанням кількісного аналізу в межах добре відомих флуктуаційних моделей. Обробка отриманих експериментальних даних виконана у єдиному теоретичному підході з узгодженою інтерпретацією для трьох різних типів зовнішнього впливу — магнітного поля, тиску та відпалу, що підвищує переконливість загальних висновків дисертації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в отриманні низки оригінальних експериментальних результатів щодо поведінки псевдощілинного стану у купратних ВТНП під дією зовнішніх чинників та їх тлумачення з оглядом на найбільш поширену концепцію локальних пар. Вперше було:

- Досліджено вплив постійного магнітного поля (до 9 Тл) на флуктуаційну провідність та псевдощілину у добре структурованих плівках YBCO.
- Виявлено нетривіальну температурну залежність довжини когерентності вздовж осі c від індукції магнітного поля.
- Встановлено, що з ростом магнітного поля спостерігається принципова зміна характеру 2D-3D кросовера.
- Показано, що вплив високого гідростатичного тиску призводить до фазового розшарування в монокристалах $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.
- Доведено мікроскопічний механізм збільшення густини носіїв заряду (локальних пар) під час кімнатного відпалу загартованих зразків, що безпосередньо впливає на еволюцію параметра псевдощілини.

Отримані в дисертації результати мають важливе практичне значення для розвитку теорії високотемпературної надпровідності. Експериментальні дані щодо еволюції псевдощілини, флуктуаційної провідності та довжини когерентності можуть бути безпосередньо використані для верифікації існуючих теоретичних моделей купратів. Практичне значення також полягає в можливості використання встановлених закономірностей (зокрема впливу відпалу та дифузії кисню) для цілеспрямованої модифікації властивостей ВТНП-матеріалів та створення надійної

компонентної бази для кріогенної мікроелектроніки, надпровідних магнітних систем та пристроїв квантової інформатики.

Основні результати дисертаційної роботи повною мірою висвітлені у наукових фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus/Web of Science (зокрема, у журналі "Low Temperature Physics", квартиль Q3), а також апробовані у формі доповідей на авторитетних вітчизняних та міжнародних наукових конференціях (CM<P, HEUREKA). *Кількість та якість публікацій повністю відповідають вимогам МОН України.*

Незважаючи на високий науковий рівень та безперечну цінність отриманих результатів, до роботи є кілька зауважень дискусійного характеру, окрім несуттєвих друкарських помилок у тексті.

У першому розділі, під час літературного огляду альтернативних не-фермі-рідинних теорій нормального стану, дисертант міг би приділити більше уваги моделям хвиль зарядової щільності (CDW), оскільки CDW часто є серйозним конкурентом надпровідності в недодопованих купратах.

Також, у зв'язку з великою кількістю температурних діапазонів з різними механізмами і теоретичними уявленнями, що описують, було б доцільно додати схематичний рисунок з температурної віссю, де були б показані граничні температури та відповідні їм області і теоретичні моделі.

У другому розділі є неточність. Написано, що вимірювання опору під тиском робилося класичним 4-зондовим методом на постійному струмі 10 мА з посиланням на рис. 2.3, але там зображена схема вимірювань на змінному струмі в установці PPMS-9.

У третьому розділі, як зауваження, слід зазначити, що ці висновки робляться з фітінгу з теоретичними формулами, в тому числі для псевдощільності, але при її виводі залежність від магнітного поля там не було закладено, тому у подальших дослідженнях доцільно скомбінувати дію магнітного поля з іншими методами, наприклад, тунельною мікроскопією.

Зазначені зауваження мають рекомендаційно-дискусійний характер, не впливають на достовірність фізичних висновків і жодним чином не знижують високої позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Таким чином, дисертаційна робота Колісника Андрія Сергійовича на тему «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 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ » є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке містить нові, науково обґрунтовані результати, та 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», затвердженому 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 напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми «Фізика» ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія», а її автор, Колісник Андрій Сергійович, безумовно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент: старший науковий співробітник
відділу надпровідних і мезоскопічних структур
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник

 Турутанов О.Г.



ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар ФТІНТ
ім. Б.І. Веркіна НАН України
кандидат фізико-математичних наук


