

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу **КОЛІСНИКА Андрія Сергійовича**  
**«Особливості впливу магнітного поля, тиску та відпалу**  
**на псевдощільну 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 наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія  
з галузі знань 10 – Природничі науки)

### **Актуальність теми дослідження**

Механізм виникнення високотемпературної надпровідності (ВТНП) в купратних сполуках досліджувався в численних теоретичних і експериментальних роботах. Проте, природа куперовського спарювання електронів при таких високих критичних температурах ( $T_c > 100\text{K}$ ) досі залишається відкритим питанням. Зрозуміло, що механізм ВТНП якимось чином пов'язаний з особливостями електронної будови і колективних збуджень в цих матеріалах, що також має проявлятися в особливостях нормального стану при температурах  $T > T_c$ . Однією з найбільш яскравих особливостей в нормальному стані є поява т.з. «псевдощільнини» (ПЩ) в електронному спектрі купратних ВТНП сполук, що виникає при температурі  $T^*$ , значно вищій за температуру переходу у надпровідний стан:  $T^* \gg T_c$ . З точки зору перебудови електронної структури, псевдощільнинний стан характеризується частковим зменшенням густини електронних станів (DOS) на рівні Фермі. При цьому, не виключається, також, суттєва перебудова топології поверхні Фермі нижче температури  $T^*$ . Незважаючи на велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень, фізична природа псевдощільнини залишається предметом наукових дискусій. Зокрема, запропоновані моделі, які пов'язують ПЩ із виникненням хвиль спінової або зарядової густини (SDW, або CDW) / Проте, в даній дисертаційній роботі сповідується інша теоретична модель, а саме – модель виникнення при  $T^*$  локальних електронних пар, які поводять

себе як Бозе-частинки, і при  $T < T^*$  переходять спочатку в стан Бозе-конденсату, а потім, при подальшому зниженні температури, цей Бозе-конденсат перетворюється в конденсат куперівських пар, тобто відбувається т.з. BEC – BCS кросовер.

Для того, щоб розібратися в цій складній фізичній картині, в дисертаційній роботі Колісника проведені комплексні експериментальні дослідження, які мають за мету виявлення природи псевдощільни та, можливо, механізму високотемпературної надпровідності в купратах (RE)BCO. Зокрема, було проведено експерименти по визначенню флуктуаційної провідності в досліджуваних плівках і монокристалах ВТНП при різних експериментальних умовах, а саме: в присутності сильного магнітного поля (до 9 Тл), застосуванні високого гідростатичного тиску, генерації структурних дефектів при температурному відпалі та штучному введенні домішок (зокрема, парамагнітних іонів гольмію та празеодиму). Це дозволило автору даної роботи контролювати модифікувати параметри флуктуаційної провідності та псевдощільни. Такий підхід виступає своєрідним інструментом для строгої перевірки теоретичних моделей (зокрема, моделі локальних пар) та розбудови єдиної мікроскопічної теорії ВТНП, *що і зумовлює актуальність даної дисертаційної роботи.*

### **Структура дисертації, основні наукові результати**

Дисертація Колісника складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел (170 найменувань), а також, додатків зі списком праць, опублікованих за темою дисертації, та відомості про апробацію результатів дисертації. Загальний обсяг роботи становить [182] сторінок, включаючи [39] рисунків та [6] таблиць.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з тематичним планом Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України; сформульовані мета та завдання дослідження, названі об'єкт, предмет та методи дослідження, його наукова новизна та

практична цінність; наведені особистий внесок здобувача, дані про публікації та апробацію результатів дисертаційної роботи, а також, структура та об'єм дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану досліджень флуктуаційної провідності та псевдощілини у високотемпературних надпровідних купратах-  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  та споріднених сполуках.

У розділі систематизовано теоретичні підходи до опису флуктуаційної провідності, що виникає за рахунок надпровідних флуктуацій поблизу критичної температури. Обґрунтовано застосування моделі локальних електронних пар, яка дає змогу розрахувати температурну залежність параметра псевдо щілини  $\Delta^*(T)$  та дослідити режим кросовера від Бозе-Ейнштейнівського конденсату (BEC) до надплинного конденсату куперовських пар згідно теорії Бардіна-Купера-Шріффера (BCS).

У **другому розділі** наведено детальний опис технології виготовлення зразків, процедури їх підготовки та методики проведення резистивних вимірювань. Детально розглянуто процес отримання високоякісних тонких епітаксійних плівок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  методом імпульсного лазерного осадження (PLD) на спеціальні монокристалічні підкладки  $(\text{LaAlO}_3)_{0.3}(\text{Sr}_2\text{TaAlO}_6)_{0.7}$ . Окрім того, описано процедуру вирощування монокристалів купратів розчин-розплавним методом та специфіку формування низькоомних електричних контактів для забезпечення коректності класичних чотиризондових резистивних вимірювань у магнітних полях та під гідростатичним тиском.

У **третьому розділі** представлено результати експериментального дослідження особливостей температурних залежностей питомого опору, надлишкової провідності та еволюції псевдощілини в епітаксійних плівках  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  під дією зовнішнього магнітного поля до  $B = 9$  Тл. Встановлено, що магнітне поле фактично не впливає на форму кривої питомого опору  $\rho(T)$  при високих  $T$ , а температура відкриття псевдо щілини  $T^*$  практично не реагує на дію магнітного поля.

Доведено, що в сильних полях відбувається ізотропізація флуктуаційної провідності.

В четвертому розділі досліджено еволюцію транспортних властивостей та псевдощільності у монокристаллах  $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  під дією гідростатичного тиску до 1.1 ГПа. Встановлено, що фізичне стиснення кристалічної ґратки призводить до зменшення абсолютного значення питомого електроопору в базисній площині  $ab$  у всьому досліджуваному температурному діапазоні. Цей процес супроводжується монотонним зростанням критичної температури надпровідного переходу  $T_c$ .

У п'ятому розділі висвітлено результати дослідження динаміки релаксаційних процесів та еволюції псевдощільного стану в монокристалах  $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  під час тривалого кімнатного відпалу.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових результатів**

В дисертаційній роботі Колісника зразки монокристалів і плівок ВТНП, які були досліджені автором в експериментах, виготовлялися стандартними методами. Дослідження резистивних властивостей проводились загальноприйнятим чотирьохзондовим методом на автоматизованій установці. Результати вимірювань флуктуаційної провідності та псевдощільності оброблялися та порівнювалися із відомими теоретичними моделями.

Результати дисертації доповідалися на кількох міжнародних конференціях і опубліковані у фахових виданнях, що входять у базу даних Scopus. Таким чином, отримані в дисертації Колісника результати слід вважати обґрунтованими і достовірними.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

В даній роботі була отримана ціла низка нових результатів, серед яких можна виділити наступні:

1. Вперше детально вивчено вплив магнітного поля до 9 Тл на флуктуаційну провідність (ФЛП) (Рис. 3.5 та 3.6) та псевдощільність (ПЩ) (Рис. 3.11) добре структурованих плівок YBCO з  $T_c = 88.8$  К.

2. Вперше показано, що магнітне поле суттєво впливає на псевдощільну при високих  $T$  (Рис. 3.11), але ніяк не впливає на опір у нормальному стані (Рис. 3.2). Таким чином, доведено, що магнітне поле по різному взаємодіє з нормальними електронами, відповідальними за опір, та з локальними парами, що відповідають за псевдощільну. Це є прямим підтвердженням існування локальних пар у ВТНП.
3. Виявлено, що ключові параметри надпровідника, такі як довжина когерентності вздовж осі  $c$ ,  $\xi_c(0)$ , величина псевдощільни при температурі Гінзбурга  $\Delta^*(T_G)$  і число Гінзбурга  $G_i$  демонструють лінійні залежності від магнітного поля  $B$ .
4. Доведено, що лінійні залежності у полі від 0 до 1 Тл обумовлені ефектом руйнування пар магнітним полем. Лінійні залежності при  $B > 1$  Тл обумовлені взаємодією двовимірної ґратки магнітних вихорів Абрикосова, сформованої в надпровіднику магнітним полем.
5. На основі аналізу польової залежності числа Гінзбурга  $G_i(B)$  вперше показано, що зі зростанням поля не тільки збільшується  $\xi_c(0)$ , але і відбувається триразове зменшення довжини когерентності в площині  $ab$  -  $\xi_{ab}(0)$ . В результаті при  $B = 9$  Тл  $\xi_c(0) = \xi_{ab}(0)$ . Це дозволяє зробити фундаментальний висновок щодо магнітоіндукованої ізотропізації куперівських пар і, найімовірніше, і магнітних вихорів.

### **Наукове та практичне значення отриманих результатів**

Основні результати дисертаційної роботи Колісника отримані вперше і можуть бути використані для з'ясування природи псевдощільни та механізмів надпровідного спарювання, для подальшого дослідження впливу магнітного поля, тиску, опромінення та старіння в купратних ВТНП сполуках типу REBCO. Отримані в дисертації результати важливі для пошуку нових надпровідних матеріалів з більш високими значеннями критичної температури та для їхнього практичного застосування в електротехніці та електроніці.

## **Повнота викладення наукових результатів в опублікованих працях**

Результати дисертаційної роботи Колісника опубліковані у 10 роботах : 4 статтях в журналі «Фізика низьких температур/LowTemperaturePhysics», що індексується у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, та 6 тезах доповідей у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій. Матеріали дисертації повністю викладені в цих публікаціях.

## **Зауваження до дисертаційної роботи:**

Деякі положення і ствердження в дисертації викладені недостатньо чітко, і тому викликають певні питання, а саме:

- 1) В якому стані виникають локальні пари, при  $T^*$ ? Чи знаходяться вони в стані розрідженого газу, або одразу в стані Бозе-конденсату і мають при цьому надплинні властивості?
- 2) Як можна пояснити (на якісному рівні), що перехід BEC-BCS проявляється у вигляді максимуму на температурній залежності псевдощільнини, як це показано на Рис. 3.11?
- 3) Виникнення вихорів Абрикосова в сильному магнітному полі (як про це сказано на стор. 97 дисертації) відноситься до стану BCS, чи це може бути і в BEC фазі при більш високих температурах?

Зроблені зауваження не носять принципового характеру і не зменшують загальну позитивну оцінку дисертації.

## **Загальний висновок**

Дисертаційна робота КОЛІСНИКА Андрія Сергійовича «Особливості впливу магнітного поля, тиску та відпалу на псевдощільнину у плівках і монокристалах  $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $Re = Y, Ho$ ) та  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ », є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке за актуальністю теми, новизною та обґрунтованістю наукових результатів, їх теоретичним та практичним значенням відповідає вимогам до наукової кваліфікації ступеня доктора філософії, що встановлені «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії»,

затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а КОЛІСНИК Андрій Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 – Природничі науки, за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

**Офіційний опонент:**

провідний науковий співробітник відділу  
надпровідності Інституту металофізики  
ім. Г. В. Курдюмова НАН України  
доктор фізико-математичних наук,  
старший дослідник



О.Л. Касаткін

Підпис д.ф.-м.н. О.Л. Касаткіна засвідчую.

Учений секретар Інституту металофізики  
ім. Г.В. Курдюмова НАН України  
кандидат фіз.-мат. наук



М.І. Савчук