

## Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу **ГАМАЮНОВОЇ Ніни Володимирівни “МІКРОКОНТАКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОВМІСНИХ НАДПРОВІДНИКІВ”**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Надпровідність у залізовмісних надпровідниках вперше була виявлена близько десяти років тому. На даний час відкрито велику кількість надпровідних сполук на основі заліза, які розподілено в окремі класи. Спільною рисою для усіх цих систем є наявність залізовмісного шару - ґратки заліза, зведеного з пніктогенами (арсеном чи стибієм) або халькогенами (селеном чи телуrom). Це відкриття ще більше заплутало проблематику природи високотемпературної надпровідності, оскільки деякі залізовмісні сполуки відносять до високотемпературних надпровідників, наприклад, оптимально доповані лантанові зразки типу 1111 та деякі сполуки типу 122, FeSe під тиском тощо. Ситуація для останніх не менш складна, ніж для купратів, бо для побудови єдиної теорії надпровідності необхідно розібратися в тих елементарних збудженнях, що присутні в залізовмісних надпровідних матеріалах. У зв'язку з наявністю заліза у їх складі розглядається ідея «магнітної» природи надпровідності за рахунок спінових флуктуацій, однак є підстави і для електрон-фононного механізму за БКШ-теорією. Відповідь на це питання вимагає комплексних різносторонніх досліджень як залізовмісних сполук окремо, так і класів сполук в цілому.

Один із таких напрямків представлено у дисертаційній роботі Гамаюнової Н. В. «Мікроконтактні дослідження залізовмісних надпровідників». Дисертація присвячена дослідженню електронних транспортних властивостей точкових контактів на основі залізовмісних надпровідників  $KFe_2As_2$ ,  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) та FeSe, до яких у роботі долучаються схожі ізоструктурні сполуки  $LaCuSb_2$  та  $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$ , де замість заліза фігурує мідь, в рамках єдиної експериментальної методики мікроконтактної спектроскопії. Використовувані методи досліджень – мікроконтактна спектроскопія Янсона та андреевська спектроскопія – забезпечують пряму прецизійну експериментальну інформацію відповідно про електрон-квазічастинкову взаємодію та надпровідну щільність у досліджуваних твердих тілах та належать до потужних методів фізики твердого тіла.

Вищезазначене дає підстави засвідчити **актуальність** теми роботи Гамаюнової Н.В. серед сучасних напрямків фізики твердого тіла.

Актуальність проведеної роботи також підтверджується тим, що вона виконана в рамках наступних державних тем наукових досліджень, що виконувались за попередній період та виконуються на даний час: «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні властивості новітніх

низьковимірних структур та надпровідних сполук» (термін виконання 2012-2016 рр.), «Функціональні властивості новітніх надпровідникових сполук і металовмісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (термін виконання 2017-2021 рр.).

**Мета роботи** полягала в наступному: експериментально виявити та дослідити функцію електрон-квазічастнкової взаємодії у  $KFe_2As_2$ ,  $LaCuSb_2$  та  $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$ , а також встановити абсолютні та приведені величини надпровідних щілин, їхні температурні та магнітопольові залежності та інші можливі особливості надпровідного стану у  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) та  $FeSe$ .

Для досягнення мети розроблено наступний перелік конкретних задач:

- експериментальне одержання якісних відтворюваних мікроконтактних спектрів досліджуваних сполук, виокремлення спектрів, одержаних у тепловому режимі протікання струму;
- аналіз особливостей мікроконтактних спектрів Янсона сполук  $KFe_2As_2$ ,  $LaCuSb_2$  та  $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$ ;
- аналіз спектрів андреєвського відбиття  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) та  $FeSe$  у рамках моделі Блондера – Тінкхама – Клапвейка (БТК);
- аналіз мікроконтактних спектрів  $KFe_2As_2$ ,  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) та  $FeSe$  у тепловому режимі.

Щоб встановити відповідність між зазначеною метою та одержаними результатами та надати оцінку виконанню поставлених задач, далі пропоную розгляд структури дисертації та короткий огляд її змісту. Особливу увагу приділено новизні та достовірності отриманих результатів та їхнього значення для фізики твердого тіла.

Дисертаційна робота Гамаюнової Н.В. “Мікроконтактні дослідження залізовмісних надпровідників” має загальноприйнятну структуру та містить наступні елементи: анотація, вступ, літературний огляд, опис методики експерименту, три оригінальні розділи результатів роботи, висновки та список використаних джерел.

У **першому розділі** наведено огляд літературних даних щодо основних властивостей надпровідників на основі заліза. Докладно розглянуто ситуацію існуючих результатів для типових представників 1111, 122 та 11-класів цих матеріалів, до яких відносять також досліджувані зразки. Приведено особливості їх кристалічної та електронної структури, фазові діаграми систем різного складу, визначення та величини температури надпровідного переходу, запропоновані механізми надпровідності. Вказано коло відкритих на даний час питань та проблем у дослідженнях даних систем.

**Другий розділ** присвячено опису експериментальних та аналітичних методик, що були застосовані автором у дисертаційній роботі. Експериментальна частина – це вимірювання вольт-амперних характеристик та її перших та других

похідних точкових контактів на основі залізовмісних надпровідних зразків у нормальному чи надпровідному стані. Аналітична частина – це робота безпосередньо з одержаними мікроконтактними спектрами Янсона та спектрами диференціального опору, де мало місце визначення режиму протікання струму через контакт, розрахунок константи електрон-фононої взаємодії, підгонка теоретичних спектрів у рамках моделі БТК для визначення надпровідної щілини, аналіз у рамках теплового режиму.

У **третьому розділі** обговорюються результати «класичної» мікроконтактної спектроскопії Янсона електрон-бозонної взаємодії у низькотемпературних надпровідних сполуках  $\text{KFe}_2\text{As}_2$ ,  $\text{LaCuSb}_2$  та  $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ , вимірюваних у нормальному стані. Для сполуки  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  експериментально виявлена бозонна мода при 20 меВ, а для пояснення її походження розроблена модель «непрямих екситонних збуджень». Для обох сполук  $\text{LaCuSb}_2$  та  $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$  виявлено високу анізотропію фононного спектра, для якого характерний виражений максимум в інтервалі 10 – 20 меВ. Для усіх зазначених сполук оцінено енергію Дебая та розраховано константу електрон-фононої(бозонної) взаємодії.

**Четвертий розділ** присвячено виявленню та встановленню величини надпровідної щілини у  $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  ( $x=0,35$ ) та  $\text{FeSe}$  за допомогою спектроскопії андреєвського відбиття. Одержані експериментально спектри диференціального опору використовувались для підгонки розрахункових спектрів у рамках моделі БТК. Із такого аналізу для  $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  ( $x=0,35$ ) визначено усереднений параметр  $2\Delta/k_B T_c$ , що складає  $3,6 \pm 1$  та є близьким до стандартного значення за теорією Бардіна-Купера-Шріффера (БКШ), а також температурну залежність надпровідної щілини, що близька до БКШ-кривої. Відповідно для  $\text{FeSe}$  виявлено двощілинний стан із параметрами  $2\Delta/k_B T_c$ , що дорівнюють  $4,2 \pm 0,9$  та  $2,3 \pm 0,5$  для більшої та меншої щілини, та усередненим параметром з урахуванням вкладу кожної щілини в провідність, що становить  $3,7 \pm 0,7$  та є дещо більшим за стандартне БКШ-значення. Вперше для  $\text{FeSe}$  одержано температурну та магнітопольову залежності надпровідних щілин у  $\text{FeSe}$ : температурна залежність обох щілин близька до БКШ, а залежність від магнітного поля для обох щілин дуже сильно слабка (практично відсутня для більшої щілини). Відмічу, що історія досліджень  $\text{FeSe}$  зачіпає перехід від досліджень твердих контактів до м'яких контактів, де саме останні забезпечують гарну експериментальну статистичну базу.

У **п'ятому розділі** представлено аналіз мікроконтактних спектрів у рамках теорії теплового режиму. Тепловий режим є в деякому сенсі «небажаним», оскільки не містить важливої спектральної інформації, задля одержання якої власне й проводять мікроконтактні дослідження. Однак у дисертаційній роботі йому знайшлося застосування: за допомогою зазначеного аналізу були визначені

такі параметри, як число Лоренца, залишковий питомий опір та діаметр контакту. Завищені значення останніх у випадку  $KFe_2As_2$  і  $FeSe$  пов'язують із деградацією поверхні зразків. У цьому ж розділі розглянуто питання асиметрії спектрів диференціального опору, представлених у попередньому розділі для сполук  $Ba_{0.65}Na_{0.35}Fe_2As_2$  та  $FeSe$ , яка обумовлена ефектами термо-ЕРС у випадку гетероконтактів у тепловому режимі. Розрахована асиметрична частина якісно подібна температурній залежності термо-ЕРС досліджуваних зразків.

Найбільш важливими результатами дисертації, що складають її **наукову новизну**, є наступні:

- вперше встановлено функцію електрон-бозонної взаємодії у  $KFe_2As_2$ . Особливості даної взаємодії проявляються на мікроконтактних спектрах Янсона у вигляді максимуму при 20 меВ, що є проявом непрямих «екситонних» збуджень у  $KFe_2As_2$ .

- вперше одержано інформацію про функцію електрон-фононої взаємодії сполук  $LaCuSb_2$  і  $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$ , що проявляють виражений максимум із змінним положенням в діапазоні 10 ÷ 20 меВ внаслідок анізотропії фононного спектра у цих сполуках.

- визначено величину надпровідної щілини у  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) та відповідний усереднений параметр  $2\Delta/k_B T_c = 3,6 \pm 1$ . Показано, що температурна поведінка надпровідної щілини у  $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$  ( $x=0,35$ ) близька до БКШ залежності.

- визначено наявність двох надпровідних щілин у  $FeSe$  та розраховано їхні відповідні параметри  $2\Delta_L/k_B T_c = 4,2 \pm 0,9$  та  $2\Delta_S/k_B T_c = 2,3 \pm 0,5$ . Усереднений параметр з урахуванням внеску в провідність від обох щілин становить  $2\Delta/k_B T_c = 3,7 \pm 0,7$ .

- вперше одержано температурні та магнітопольові залежності надпровідних щілин у  $FeSe$ . Показано, що температурна залежність обох щілин близька до БКШ кривої. Із ростом магнітного поля андреєвські спектри пригнічуються, однак поле слабо впливає на величину надпровідних щілин.

**Достовірність та обґрунтованість** отриманих результатів та висновків забезпечується аргументованою постановкою експериментальних завдань і теоретичних розрахунків із використанням відповідних адекватних методик та моделей. Що стосується дисертаційної роботи Гамаюнової Н.В., усі експериментальні результати там отримано із використанням загальноновизнаних мікроконтактних методів. Згідно з описом процесу експериментальних досліджень, кожен етап вимірювань супроводжувався ретельним аналізом можливих помилок. Відповідно до цього у ході досліджень виникали та вирішувались додаткові субзадачі. Для виконання поставлених завдань коректно використано визначений комплекс лабораторного обладнання (мікроконтактний спектрометр) для вимірювання вольт-амперних характеристик точкових контактів

та її перших та других похідних та подальшого дослідження нелінійностей провідності точкових контактів на основі вищезазначених зразків. Аналіз одержаних даних та теоретичні розрахунки базуються на засадах та основних положеннях теорії мікроконтактної спектроскопії Янсона, моделі БТК надпровідних контактів малої площі, теорії теплового режиму.

У дисертації докладно наведено принципові деталі експерименту. Використовувані зразки попередньо атестовані за складом, структурою та надпровідними характеристиками: визначено величину критичної температури надпровідного переходу із вимірювань температурної залежності питомого опору та магнітної сприйнятливості, на що у тексті роботи є відповідні посилання. Наведено технічні параметри експериментальних пристроїв та похибки вимірювань (де може бути застосовано).

Таким чином, **достовірність отриманих результатів** не підлягає сумніву.

Характеризуючи дисертаційну роботу Гамаюнової Н.В. в цілому, можна підсумувати, що вона є завершеною науковою працею, логічною за викладенням одержаних результатів та їх теоретичним осмисленням, а отримані результати та висновки мають **вагому наукову цінність**.

**Практичне значення одержаних результатів** перш за все стосується фундаментальних аспектів: результати можуть бути використані для подальших експериментальних та теоретичних робіт у даному напрямку для більш глибокого трактування природи надпровідності в залізовмісному сімействі надпровідників та при дослідженні інших новітніх надпровідників.

За результатами проведених досліджень автором **опубліковано** 15 робіт, з яких 5 – це статті у спеціалізованих фахових журналах, 1 – стаття у електронному виданні IEEE Xplore Digital Library, та 9 – тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій. Зазначені роботи та автореферат, де визначено **особистий внесок здобувача**, повністю відображають зміст та результати дисертаційної роботи.

Разом із тим до змісту дисертації є наступні **зауваження**:

1. До підрозділу 3.1. У дисертації відзначається, що параметр зміни диференціального опору  $\Delta R/R$  у випадку спектральних режимів не перевищує 10-50%. Однак для приведених спектрів диференціального опору контактів  $KFe_2As_2$  зі сріблом даний параметр сягає 80%. При цьому зазначається, що даний спектр одержано у спектральному режимі та інформація з нього трактується як спектральна.

2. До підрозділів 4.2 та 4.3. При дослідженнях FeSe за допомогою мікроконтактної спектроскопії андреєвського відбиття як для випадку твердих контактів, так і для випадку м'яких контактів біло визначено дві надпровідні щілини. При цьому у визначенні величин щілин існують розбіжності: 2,5 та 3,5

меВ для твердих контактів та 1 меВ та 1,8 меВ для м'яких контактів. Чітке ж пояснення цього факту у дисертації відсутнє.

3. До підрозділу 4.3. У дисертації зазначено, що слабка (майже відсутня) залежність надпровідних щілин у FeSe від магнітного поля викликана поведінкою андреевських мінімумів при підвищенні величини магнітного поля. Але не наведено суто фізичного пояснення цього явища.

Висловлені зауваження не впливають на загальне позитивну оцінку від одержаних у роботі нових та важливих результатів.

Даючи загальну оцінку дисертації, вважаю, що за актуальністю, новизною, високим науковим рівнем, обсягом виконаних експериментальних досліджень та одержаних результатів дисертаційна робота Гамаюнової Н.В. "Мікроконтактні дослідження залізовмісних надпровідників" повністю відповідає вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор Гамаюнова Ніна Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
лауреат Державної премії України з науки і техніки,  
виконувач обов'язків директора  
Київського академічного університету  
НАН України та МОН



О.А. Кордюк