

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. ВЕРКІНА**

ГАМАЮНОВА Ніна Володимирівна

Гамаян

УДК 538.915, 538.935

**МІКРОКОНТАКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗАЛІЗОВМІСНИХ НАДПРОВІДНИКІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор
Найдюк Юрій Георгійович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б. І. Веркіна НАН України,
завідувач відділу мікроконтактної
спектроскопії.

Офіційні опоненти:

член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кордюк Олександр Анатолійович,
Фізико-технічний навчально-науковий центр
НАН України, виконуючий обов'язки
директора;

доктор фізико-математичних наук, професор
Пашкевич Юрій Георгійович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О. О. Галкіна НАН України, м. Київ,
завідувач відділу теорії динамічних
властивостей складних систем.

Захист відбудеться «17» жовтня 2018 року о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «14» вересня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03,
кандидат фізико-математичних наук



Юзефович О. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Мікроконтактна спектроскопія Янсона та мікроконтактна спектроскопія андреєвського відбиття належать до передових методів фізики твердого тіла. Серед класичних фундаментальних застосувань мікроконтактної спектроскопії Янсона відзначають пряме експериментальне одержання інформації щодо функції електрон-фононної взаємодії та інших нефононних збуджень у провідниках у нормальному стані шляхом виміру нелінійностей вольт-амперних характеристик точкових контактів при низьких температурах. Мікроконтактні дослідження не обмежуються вивченням властивостей досліджуваних об'єктів лише в нормальному стані. Мікроконтактна спектроскопія андреєвського відбиття в контактах типу нормальний метал – надпровідник є ефективним інструментом дослідження енергетичної щільності в спектрі квазічастинкових збуджень, її залежності від температури та магнітного поля в традиційних і високотемпературних надпровідниках.

Перехід у надпровідний стан у більшості матеріалів здійснюється завдяки взаємодії електронів провідності з фононами кристалічної ґратки. Ця взаємодія призводить до формування куперівських пар та енергетичної щільності у густині електронних станів, що визначає такі макроскопічні параметри надпровідника як критична температура, критичний струм тощо. Точні вимірювання величини надпровідної щільності та її температурної та магнітопольової залежностей є першочерговим завданням при дослідженні надпровідних матеріалів. З'ясування ролі електрон-фононної взаємодії чи інших типів бозонних колективних взаємодій у нормальному стані є важливим для розробки теоретичних моделей формування надпровідного стану. У цьому напрямку є затребуваним систематичне дослідження як окремих сполук, так і цілих класів надпровідників. Серед останніх значна увага приділяється відкритому у 2008 році сімейству високотемпературних залізовмісних надпровідників.

Для масивних залізовмісних надпровідників найвища критична температура надпровідного переходу досягає 55 К у кристалах $\text{SmFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$. Ці матеріали характеризуються рекордними критичними магнітними полями перевершуючими десятки Тесла. Основною ж їх особливістю є те, що надпровідність реалізується в Fe-As або Fe-Se шарах із залізом в якості елемента елементарної комірки. Як відомо залізо є феромагнетиком, а надпровідність і магнетизм це два конкуруючих явища.

Допування вихідних залізовмісних сполук іншими елементами або зовнішній тиск руйнують дальній магнітний порядок та сприяють переходу до надпровідного стану. При цьому питання щодо механізму надпровідності, а також встановлення кількості, абсолютних значень надпровідних щільностей та їхні залежності від температури і магнітного поля у багатьох залізовмісних системах залишаються відкритими. Використовуючи точкові контакти в рамках методів мікроконтактної спектроскопії Янсона та мікроконтактної спектроскопії андреєвського відбиття можливо отримати експериментальну інформацію відповідно про електрон-квазічастинкову взаємодію в нормальному стані та характеристики надпровідного стану залізовмісних надпровідників, що сприятиме пошуку відповідей на вказані питання.

Таким чином, мікроконтактні дослідження залізовмісних надпровідників є важливими для фундаментальної фізики, що вказує на **актуальність** теми дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконано у відділі мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчої теми: «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні властивості новітніх низьковимірних структур та надпровідних сполук» (номер державної реєстрації 0112U002635, термін виконання 2012-2016 рр.) та «Функціональні властивості новітніх надпровідникових сполук і металовмісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (номер державної реєстрації 0117U002294, термін виконання 2017-2021 рр.).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є експериментальне виявлення та аналіз особливостей функції електрон-квазічастинкової взаємодії у низькотемпературних надпровідниках KFe_2As_2 , $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$, а також встановлення кількості та величин надпровідних щілин і отримання їх залежності від температури і магнітного поля для залізовмісних сполук $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) та $FeSe$.

Для досягнення мети ставились та вирішувались наступні **задачі**:

- експериментально одержати відтворювані мікроконтактні спектри точкових контактів на основі досліджуваних сполук, з'ясувати режим протікання струму через такі контакти;

- провести аналіз особливостей мікроконтактних спектрів Янсона точкових контактів на основі KFe_2As_2 , $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$;

- отримати та провести аналіз мікроконтактних спектрів андреевського відбиття сполук $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) та $FeSe$ у рамках моделі Блондера – Тінкхама – Клап-вейка (БТК) для визначення величини надпровідних щілин та їхніх температурної та магнітопольової залежностей;

- провести аналіз мікроконтактних спектрів точкових контактів на основі KFe_2As_2 , $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) та $FeSe$ у тепловому режимі протікання струму згідно з існуючою теорією.

Об'єктом дослідження є нелінійності вольт-амперних характеристик точкових контактів на основі залізовмісних надпровідників зі структурою типу 11 та 122, а також рідкісноземельних антимонідів, які є ізоструктурними до 112-класу надпровідних сполук на основі заліза.

Предметом дослідження є особливості мікроконтактних спектрів Янсона та андреевського відбиття точкових контактів на основі залізовмісних пніктидів KFe_2As_2 , $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) і халькогеніда $FeSe$, та рідкісноземельних мідних антимонідів $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$ при низьких температурах та в магнітному полі.

Методи дослідження. Для експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик точкових контактів та їхніх перших і других похідних застосовувались мікроконтактна спектроскопія Янсона та мікроконтактна спектроскопія андреевського відбиття. Вимірювання проводились за допомогою

низькотемпературного мікроконтактного спектрометра при температурах в інтервалі від 1,6 К до 30 К, а також в окремих випадках у магнітному полі до 15 Тл. Експерименти виконані на монокристалах високої якості: KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$), FeSe , LaCuSb_2 та $\text{La}(\text{Cu}_{0,8}\text{Ag}_{0,2})\text{Sb}_2$, синтезованих співавторами публікацій із Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (Дрезден), Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN (Вроцлав) та Московського державного університету. Аналіз отриманих експериментальних даних проводився у рамках теорії мікроконтактної спектроскопії Янсона, моделі БТК та теорії теплового режиму.

Наукова новизна отриманих результатів. Серед пріоритетних результатів, отриманих у дисертаційній роботі, можна виділити нижченаведені, які виносяться на захист і мають фундаментальний характер:

1. Виявлено одиночну бозонну моду (максимум при енергії 20 меВ) на мікроконтактних спектрах Янсона сполуки KFe_2As_2 . Враховуючи розрахунки функції електрон-фононої взаємодії та специфіку зонної структури KFe_2As_2 , показано, що даний максимум пов'язаний із проявом непрямих «екситонних» збуджень у KFe_2As_2 .

2. Виявлено виражений максимум на мікроконтактних спектрах Янсона в сполуках LaCuSb_2 і $\text{La}(\text{Cu}_{0,8}\text{Ag}_{0,2})\text{Sb}_2$, положення якого знаходиться в діапазоні 10 ÷ 20 меВ. Встановлено, що даний максимум викликаний електрон-фононою взаємодією, а варіювання його положення пов'язано з анізотропією фононного спектра у цих сполуках. Розрахунок константи електрон-фононного взаємодії λ для LaCuSb_2 дає значення $\lambda = 0,20 \pm 0,03$.

3. Отримано андреєвські спектри $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$). У рамках аналізу згідно БТК-моделі показано, що температурна поведінка надпровідної щілини Δ у $\text{Ba}_{0,65}\text{Na}_{0,35}\text{Fe}_2\text{As}_2$ близька до залежності по теорії Бардіна-Купера-Шріффера (БКШ) та усереднений параметр $2\Delta/k_B T_c$ складає $3,6 \pm 1$.

4. Отримано добре відтворювані андреєвські спектри точкових контактів на основі FeSe . У рамках двощілинної БТК-моделі одержано усереднені параметри для більшої та меншої надпровідних щілин $2\Delta_L/k_B T_c = 4,2 \pm 0,9$ та $2\Delta_S/k_B T_c = 2,3 \pm 0,5$. Показано, що температурна залежність обох щілин близька до БКШ залежності.

5. Проаналізовано мікроконтактні спектри KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$) та FeSe в тепловому режимі. Показано, що спектри диференціального опору (dV/dI) можна описати згідно з теорією теплового режиму. У результаті визначено число Лоренца, залишковий питомий опір та діаметр контакту, завищені значення яких для KFe_2As_2 і FeSe пояснюються деградацією поверхні.

Усі експериментальні результати на досліджуваних зразках були отримані вперше.

Особистий внесок здобувача. Наукові статті [1-5, 15], в яких представлені основні результати дисертаційної роботи, було виконано здобувачем у співавторстві. Аналіз результатів і написання статей відбувалися спільно. Особистий внесок здобувача полягає у підготовці зразків до вимірювань; самостійному проведенні експерименту; опрацюванні експериментальних даних із використанням існуючих теоретичних моделей; підготовці матеріалів доповідей

на конференціях та семінарах. Таким чином, особистий внесок дисертанта є **визначальним**.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, які викладені в дисертації, були представлені персонально здобувачем на наступних наукових конференціях:

- 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM2018 (April 29 – May 4, Beldibi/Antalya, Turkey),
- V International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials” NANO-2017 (August 23 – 26, 2017, Chernivtsi, Ukraine),
- International Young Scientists Forum on Applied Physics YSF-2015 (September 29 - October 2, 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine),
- V Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology (September 21-25, 2015, Kyiv, Ukraine),
- III International Workshop on Point-Contact Spectroscopy PCS-2014 (September 8-11, 2014 Kharkiv, Ukraine),
- V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” – ICYS-LTP-2014 (June 2 - 6, 2014, Kharkiv, Ukraine),
- XI International Science Conference “Physical Phenomena in Solids” (December 3-6, 2013, Kharkiv, Ukraine),
- International Conference of Young Scientists and Post-Graduates IEP-2013 (May 20-23, 2013, Uzhhorod, Ukraine),
- International Conference of Student and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2013 (May 15-17, 2013, Lviv, Ukraine).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 15 наукових працях: 5 статей у провідних спеціалізованих наукових журналах [1-5], що індексуються у наукометричній базі даних Scopus; 1 стаття [15], що додатково відображає наукові результати дисертації, розміщена в електронній бібліотеці IEEE Xplore Digital Library (DOI: 10.1109/NAP.2017.8190169); та 9 тез доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій [6-14].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг дисертації складає 128 сторінок, вона містить 47 рисунків, 6 таблиць та список використаних джерел із 177 найменувань на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В **анотації** представлено основні результати досліджень, зазначено їх наукову новизну, наведено ключові слова та список публікацій здобувача за темою дисертації.

У **вступі** коротко обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначені мета та основні завдання досліджень, об’єкти, предмет і методи досліджень. Сформульована та викладена наукова новизна і практична значимість

отриманих результатів, наведені дані про особистий внесок дисертанта та апробації роботи та публікацій за темою дисертації, а також подається інформація про структуру та обсяг.

У **першому розділі «Надпровідники на основі заліза»** приведено літературні дані щодо досліджуваних надпровідних систем: монокристалів FeSe , KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ – типових представників відповідно 11 та 122 класів залізовмісних надпровідників, а також монокристалів LaCuSb_2 та LaCuAgSb_2 – потрійних рідкісноземельних мідних антимонідів, споріднених до 112-класу сполук на основі заліза. Розглянуто особливості їх кристалічної та електронної структури, основні закономірності фазових діаграм та інші характеристики надпровідного стану, зокрема температури надпровідного переходу масиву зразка із температурних залежностей питомого електроопору та магнітної сприйнятливості. Представлено дані про запропоновані на сьогодні механізми надпровідності для типових представників залізовмісних сполук.

У **другому розділі «Методика експерименту та обробки даних»** описано застосовану для мікроконтактних досліджень модуляційну методику детектування гармонік модулюючого сигналу для запису перших dV/dI та других d^2V/dI^2 похідних вольт-амперних характеристик точкових контактів або, іншими словами, відповідно спектрів диференціального опору та мікроконтактних спектрів Янсона. Приведено основні конструкційні характеристики використовуваного обладнання та електронну схему низькотемпературного мікроконтактного спектрометра. Надано опис вставки для створення точкових контактів такими способами як голка-площина, зсувним і «м'яким» способами, та криогенного обладнання для вимірювання у температурному інтервалі 1.6-77 К та в магнітних полях.

Третій розділ «Мікроконтактна спектроскопія Янсона електрон-бозонної взаємодії надпровідних сполук KFe_2As_2 , LaCuSb_2 та $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ » присвячено експериментальному дослідженню низькотемпературних надпровідників KFe_2As_2 , LaCuSb_2 та $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ у нормальному стані за допомогою мікроконтактної спектроскопії Янсона з метою отримати інформацію про електрон - квазічастинкову взаємодію у даних сполуках. Така інформація є важливою для з'ясування механізму надпровідності у даних матеріалах. Проведені експериментальні дослідження та теоретичний аналіз особливостей, виявлених на мікроконтактних спектрах Янсона точкових контактів на основі вищезгаданих зразків.

У **підрозділі 3.1** описано дослідження монокристала KFe_2As_2 – низькотемпературного надпровідника ($T_c = 3,8$ К), що належить до 122 групи залізопніктидних надпровідників та є батьківською сполукою системи $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$, аналогічно як і сполука BaFe_2As_2 .

На рис. 1 приведені мікроконтактні спектри Янсона точкових контактів на основі KFe_2As_2 , що мають виражений максимум близько 20 меВ із подальшим виходом на фон. Відносна зміна диференціального опору $\Delta R/R$ ($R = dV/dI$) таких контактів не перевищує 10%, що характерно для спектроскопічного режиму. Завдяки вимірюванням із застосуванням контрелектродів із міді і срібла та різних зразків досліджуваного матеріалу KFe_2As_2 для контактів різної конфігурації та

опору експериментально показано, що виявлений пік при 20 меВ є спектральною особливістю безпосередньо KFe_2As_2 .

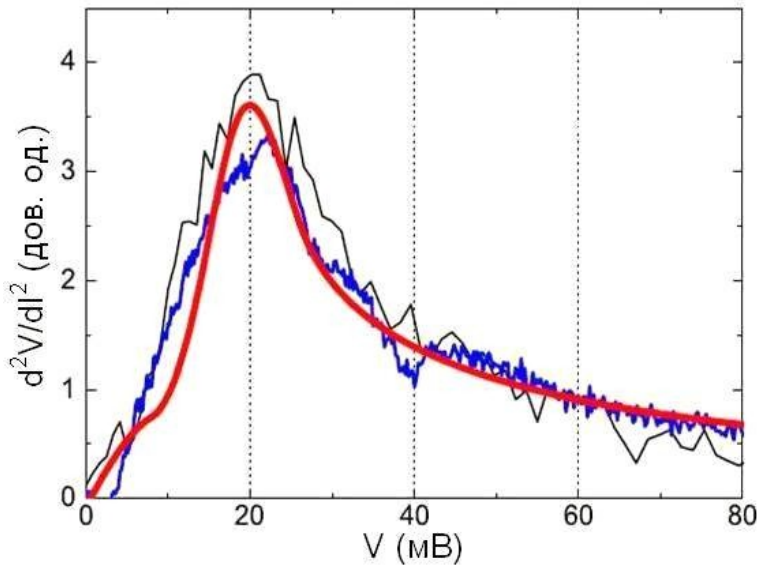


Рис.1. Мікроконтактні спектри Янсона (дві криві з шумом) точкових контактів KFe_2As_2 -Ag з $R = 2,4$ Ом та $5,7$ Ом, виміряні при $T = 4,2$ К, у порівнянні з теоретичним спектром (гладка крива), що розрахований з урахуванням внеску від непрямих «екситонних» збуджень та спінових флуктуацій.

Розрахунки функції електрон-фононої взаємодії показали спектр без вираженої особливості в районі 20 меВ на відміну від вимірених мікроконтактних спектрів. Враховуючи специфіку зонної структури KFe_2As_2 , де одна з електронних зон знаходиться приблизно на 20 меВ вище рівня Фермі, для пояснення природи виявленої 20 меВ моди запропоновано модель непрямих «екситонних» збуджень. На рис. 1 показано, що експериментальні d^2V/dI^2 залежності для контактів на основі KFe_2As_2 добре узгоджуються з теоретичною кривою, обчисленою з урахуванням внеску від непрямих «екситонних» збуджень та спінових флуктуацій при розсіюванні електронів.

Основні результати підрозділу 3.1 опубліковано в роботах [3, 10, 13, 14].

У підрозділі 3.2 розглядаються отримані мікроконтактні спектри Янсона для монокристалів LaCuSb_2 та $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ – низькотемпературних надпровідників ($T_c = 1$ К та $T_c = 0,5$ К відповідно), що належать до групи потрійних рідкісноземельних мідних антимонідів, які ізоструктурні до 112-класу залізовмісних сполук.

На мікроконтактних спектрах Янсона точкових контактів на основі LaCuSb_2 та $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ виявлено виражений максимум, положення якого варіює в діапазоні від 10 до 20 меВ для обох зразків (рис. 2 а, б). Показано, що даний максимум викликаний електрон-фононою взаємодією в даних речовинах, а варіація його положення пов'язана з анізотропією фононного спектру у досліджуваних шаруватих сполуках. Відсутність спектральних особливостей за основним максимумом на мікроконтактних спектрах дозволяє оцінити енергію Дебая (границю спектра) в ≈ 40 меВ, яку можна очікувати і для ізоструктурних залізовмісних надпровідників.

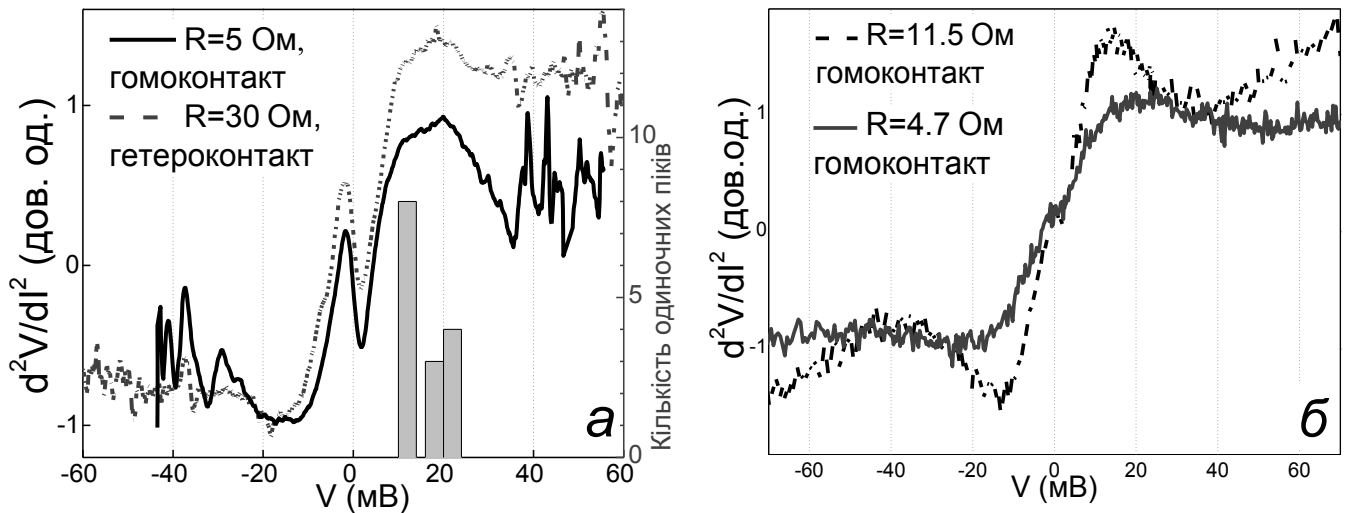


Рис. 2. Мікроконтактні спектри Янсона при $T_{\text{вип}}=4,2\text{ K}$ для двох точкових контактів на основі LaCuSb_2 та статистичні дані щодо положень максимумів для гомоконтактів із різним опором (а) та аналогічні спектри для двох точкових контактів на основі $\text{La}(\text{Cu}_{0,8}\text{Ag}_{0,2})\text{Sb}_2$ (б).

Для LaCuSb_2 оцінена константа електрон-фононої взаємодії λ :

$$\lambda = 2 \int_0^{\infty} \alpha^2 F(\varepsilon) \varepsilon^{-1} d\varepsilon \quad , \quad (1)$$

де $\alpha^2 F(\varepsilon = eV)$ розраховано зі співвідношення:

$$R^{-2} (d^2V / dI^2) = (8ed / 3\hbar v_F) \alpha_{PC}^2 F(\varepsilon)$$

Отримана величина константи електрон-фононої взаємодії складає $0,20 \pm 0,03$, що становить нижню границю значення λ .

Основні результати підрозділу 3.2 опубліковано в роботах [6, 15].

Четвертий розділ «Спектроскопія андреєвського відбиття залізовмісних надпровідних сполук» присвячено дослідженню сполук $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$) та FeSe за допомогою мікроконтактною спектроскопії андреєвського відбиття з метою отримати інформацію про величину надпровідних(ої) щілин(и) та інших характеристик надпровідного стану зазначених матеріалів. Проведено вимірювання dV/dI спектрів точкових контактів між нормальним металом (контрелектродом) та надпровідником (зразком). На отриманих dV/dI спектрах виявлено характерні подвійні андреєвські мінімуми при малих напругах зміщення, положення яких є ключовим для визначення величини надпровідних(ої) щілин(и) та їхніх температурної та магнітопольової залежностей у досліджуваних надпровідниках.

У підрозділі 4.1 описано мікроконтактні дослідження монокристала $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$), що належить до 122 класу залізовмісних надпровідників та проявляє одну з найвищих критичних температур надпровідного переходу ($T_c = 29\text{ K}$) серед барієвих сполук 122 класу.

На dV/dI спектрах контактів на основі $\text{Ba}_{0,65}\text{Na}_{0,35}\text{Fe}_2\text{As}_2$ при температурах значно нижчих, ніж критична температура надпровідного переходу масиву зразка, виявлено відтворені подвійні мінімуми при напругах зміщення в діапазоні $\pm(5 \div 20)$ мВ. Такі особливості пов'язані з проявом надпровідної щілини Δ у

досліджуваній сполуці. Застосування теоретичної підгонки в рамках однощільної моделі БТК (рис. 3 а) дає значення надпровідної щілини $\Delta \approx 3 \div 6$ меВ та параметр $2\Delta/k_B T_c = 3,6 \pm 1$, усереднений по усім контактам. Показано, що температурна залежність надпровідної щілини близька до БКШ кривої (рис. 3 б).

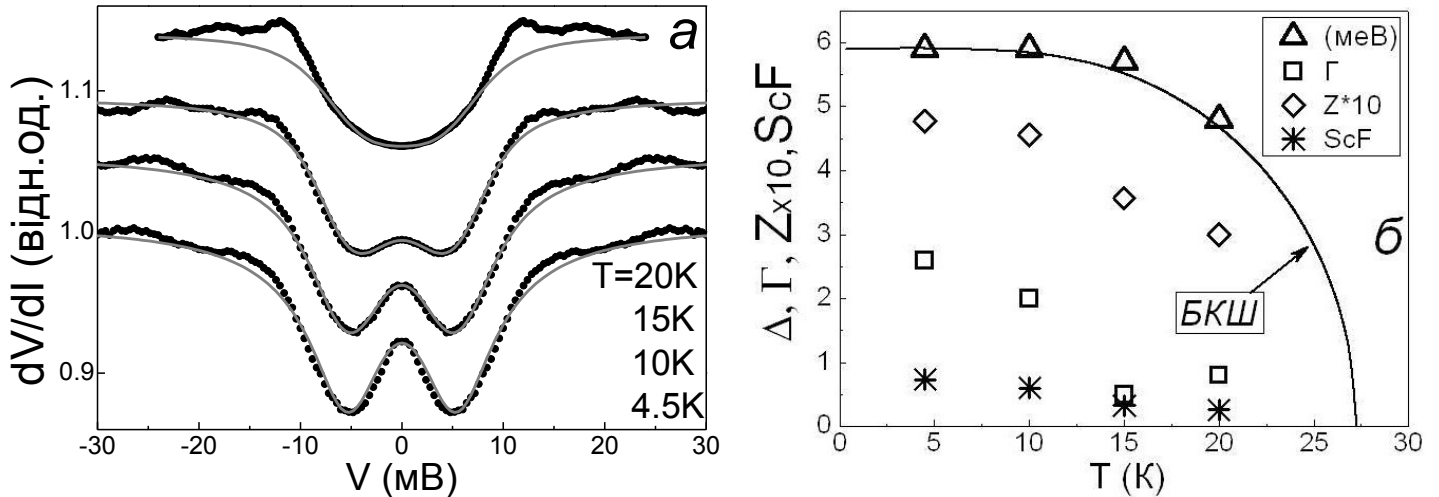


Рис.3. Підгонка теоретичних dV/dI кривих(суцільні) до експериментальних спектрів(кружки) точкового контакту на основі $Ba_{0,65}Na_{0,35}Fe_2As_2$ з $R=75$ Ом при різних температурах в рамках однощільної БТК-моделі (а). Температурна залежність надпровідної щілини Δ та супутніх параметрів, отриманих у результаті підгонки: Γ - параметр уширення, Z - параметр бар'єру та ScF - масштабний коефіцієнт (б).

Основні результати підрозділу 4.1 опубліковано в роботах [4, 11].

Підрозділи 4.2 та 4.3 присвячено дослідженню dV/dI спектрів точкових контактів на основі монокристала FeSe ($T_c = 9$ К). Ця сполука належить до 11-групи надпровідників на основі заліза та має найпростішу кристалічну структуру серед усіх представників цього сімейства. При цьому FeSe проявляє ряд цікавих властивостей, таких як значний ріст критичної температури надпровідного переходу під тиском та досягнення $T_c \geq 60$ К для моношарових плівок.

У **підрозділі 4.2** вивчено особливості dV/dI спектрів точкових контактів на основі FeSe, створених за допомогою класичних способів: голка–площина та зсувного. У цьому випадку більшість виміряних dV/dI спектрів демонструють загальну напівпровідникову поведінку з широким максимумом при нульовій напрузі зміщення. Це пов'язується з низькою концентрацією носіїв заряду на поверхні та/або збідненим (напівпровідниковим) поверхневим шаром FeSe та є характерним, як правило, для контактів із високим опором (малих розмірів). При зменшенні опору (збільшенні області контакту) «захоплюються» більш глибокі шари зразка і напівпровідникова поведінка dV/dI кривих стає металічною із мінімумом при нульовій напрузі зміщення, що викликаний надпровідністю у FeSe.

Виявлено dV/dI спектри (рис. 4 а), де присутні мінімум при нульовій напрузі та гострі бокові піки при кінцевих напругах зміщення, які із підвищенням

температури зменшують інтенсивність та зникають при температурі, вищій за критичну температуру масиву FeSe, що вказує на їхній зв'язок з надпровідністю. Бокові гострі піки є свідченням різкого переходу з надпровідного в нормальний стан деякої ділянки точкового контакту та можуть бути обумовлені досягненням критичної густини струму розпарювання. Температурна залежність положення бокових піків (тобто критичного струму) добре описується БКШ-кривою (рис. 4 б). Оскільки густина струму розпарювання залежить від величини надпровідної щілини, то передбачається, що остання (або деяка усереднена щілина внаслідок багатозонної електронної структури FeSe) також має БКШ-подібну залежність, що підтверджено наступними дослідженнями (див. п.4.3).

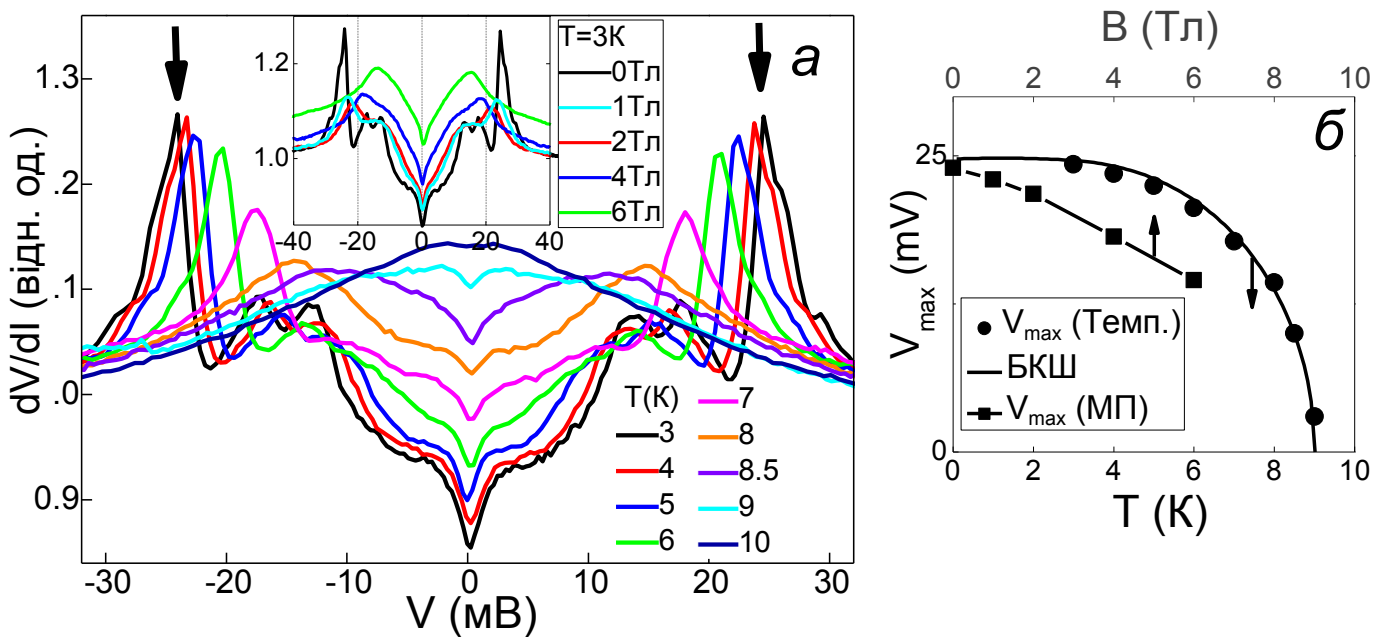


Рис. 4. Температурна серія dV/dI спектрів точкового контакту на основі FeSe з $R=11$ Ом (основна панель) та dV/dI спектри того ж контакту, виміряні при різних величинах магнітного поля (на вставці) (а). Залежність положень бокових піків від температури (Темп.) та магнітного поля (МП) (б).

Типові андреєвські особливості у вигляді подвійних мінімумів при малих напругах зміщення на dV/dI спектрах зустрічалися вкрай рідко. Застосування теоретичної підгонки у рамках двоцілінної БТК-моделі для таких спектрів виявило присутність двох щілин зі значенням 2,5 меВ та 3,5 меВ, де внесок більшої щілини у спектри превалює та складає близько 90 %.

Основні результати підрозділу 4.2 опубліковано в роботах [2, 8, 9].

У підрозділі 4.3 показано, що за допомогою м'якого способу створення точкових контактів на основі FeSe отримані добре відтворювані dV/dI андреєвські спектри (рис. 5 а, б).

Для таких спектрів виконано підгонку згідно з теорією БТК у двоцілінному наближенні (вставка на рис. 5 а). Одержані величини приведених надпровідних щілин $2\Delta/k_B T_c$ складають $2,3 \pm 0,5$ та $4,2 \pm 0,9$, що відносить FeSe до сімейства сильно зв'язаних надпровідників. Абсолютні значення меншої та більшої надпровідних щілин, усередненої щілини з урахуванням внесків у провідність від

обох щілин та супутні розрахункові параметри наведено у табл. 1, де представлені дані, усереднені по 25 контактам. У табл. 2 порівняно одержані у даній роботі значення надпровідних щілин із існуючими літературними даними.

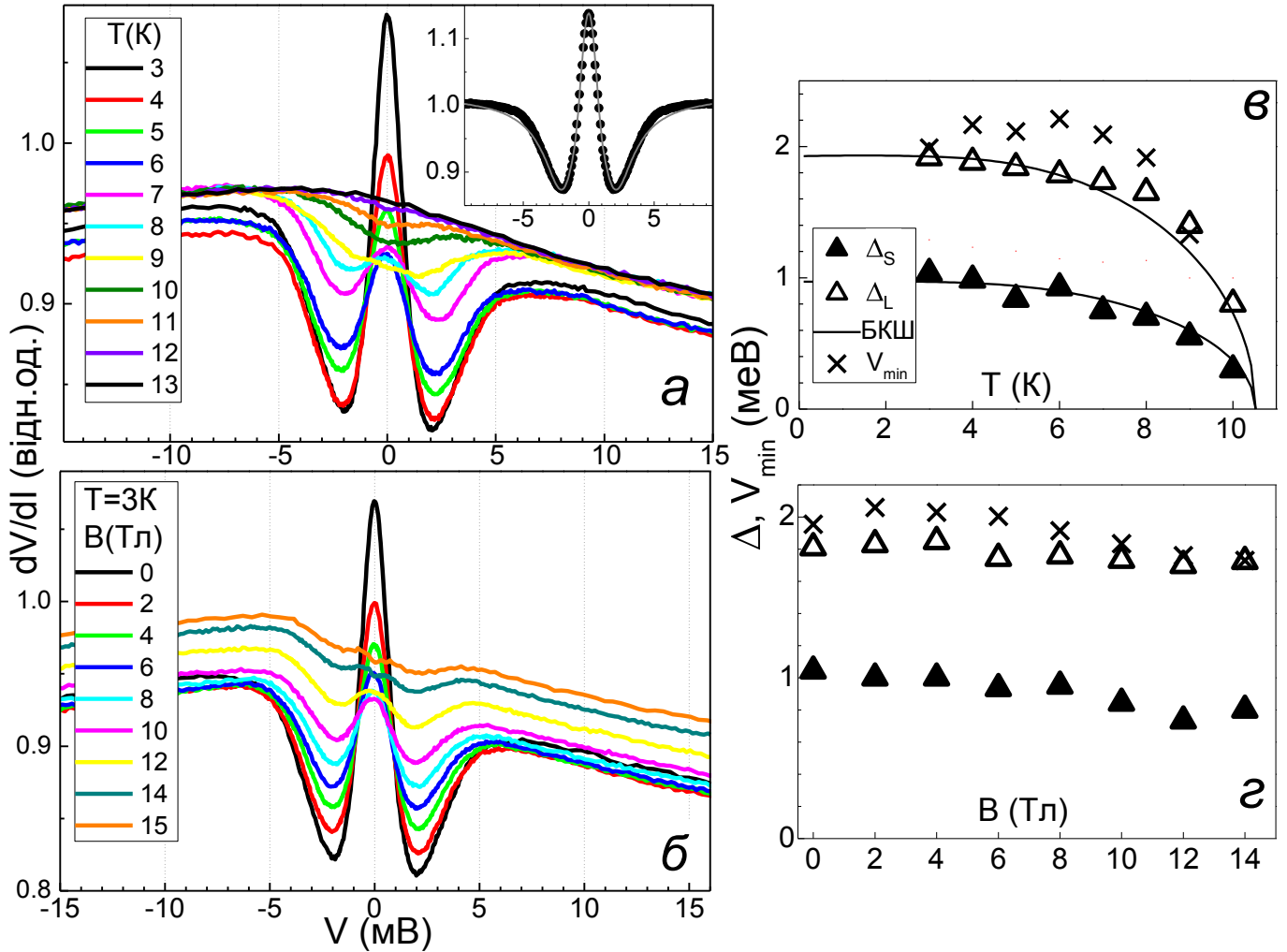


Рис. 5. Серія dV/dI спектрів, виміряних при різних температурах (а) і величинах магнітного поля (б) точкового контакту на основі $FeSe$, $R=1,45 \text{ Ом}$. На вставці: приклад підгонки розрахункової кривої (суцільна) до експериментальної (кружки), виміряної при найнижчій температурі в рамках моделі БТК. Температурна (в) та магнітопольова (г) залежності надпровідних щілин та положень подвійних мінімумів відповідно до графіків ліворуч.

Табл.1. Усереднені дані розрахунку надпровідних щілин у $FeSe$. V_{min} – положення подвійних мінімумів на dV/dI спектрах, Δ_L та Δ_S – величини більшої та меншої надпровідних щілин, Z – параметр висоти бар'єру, w – вклад у провідність від меншої щілини, Δ_{aver} – усереднена величина надпровідної щілин, $\Delta_{aver} = (1-w)\Delta_L + w\Delta_S$.

V_{min} [meV]	Δ_L [meV]	Δ_S [meV]	Z	w	Δ_{aver} [meV]	$2\Delta_L/k_B T_c$	$2\Delta_S/k_B T_c$	$2\Delta_{aver}/k_B T_c$
1.75 ± 0.25	1.8 ± 0.4	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1	0.17 ± 0.13	1.6 ± 0.3	4.2 ± 0.9	2.3 ± 0.5	3.7 ± 0.7

Табл.2. Величини надпровідних щілин у FeSe, отримані за допомогою мікроконтактної спектроскопії андреевського відбиття (два нижніх рядки) у порівнянні з літературними даними. Методи досліджень: STS – скануюча тунельна спектроскопія, ARPES - фотоелектронна спектроскопія з кутовим розділенням, MAR – метод багаторазового андреевського відбиття, BQPI – метод Боголюбовської квазічастинкової інтерференції.

Метод	Δ_1 (meV)	Δ_2 (meV)	Літературні джерела
STS	2.2		Song et al. Science 332, 1410 (2011)
STS	2.5	3.5	Kasahara et al. Proc.Nat.Acad.Sci.USA. 111, 16309 (2014)
STS	2.3		Moore et al. PRB 92, 235113 (2015)
STS	0.25	1.1 - 2.24	Jiao et al. Sci.Rep.7, 44024, (2017)
ARPES	1.2	1.5	Borisenko et al. Nat.Phys. 12, 311 (2016)
MAR	0.8	2.75	Ponomarev et al. J. Exp. Theor. Phys.113, 459 (2011)
BQPI	0.5 – 1.5	0.5 – 2.2	Sprau et al., Science 357, 75 (2017)
PC	2.5	3.5	Naidyuk et al. LTP 42, 42 (2016).
Soft PC	1 +/- 0.2	1.8 +/- 0.4	Naidyuk et al. PRB 96, 094517 (2017)

Одним із центральних результатів роботи є експериментально одержана інформація про залежності надпровідних щілин у FeSe від температури (рис. 5 в) та магнітного поля (рис. 5 з). Температурна поведінка обох щілин близька до стандартної БКШ залежності. Інтенсивність андреевських особливостей на спектрах пригнічується зі збільшенням величини магнітного поля, в той час як положення мінімумів практично не залежать від поля. У результаті виявилось, що величина визначених у рамках моделі БТК надпровідних щілин зменшується в магнітному полі доволі слабо.

Основні результати підрозділу 4.3 опубліковано в роботах [1, 7].

У п'ятому розділі «Аналіз мікроконтактних спектрів залізовмісних надпровідників у тепловому режимі» проаналізовано мікроконтактні спектри точкових контактів на основі монокристалів KFe_2As_2 , $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) та FeSe в тепловому режимі протікання струму через контакт. При мікроконтактних вимірюваннях тепловий режим реалізується, коли енергетична довжина релаксації електронів стає менше розміру (діаметру) контакту. Це призводить до росту температури контакту T_{PC} пропорційно до прикладеної напруги зміщення V :

$$T_{PC}^2 = T_{bath}^2 + V^2/4L_0, \quad (2)$$

де $L_0 = \pi^2 k_B^2 / 3e^2$ – число Лоренца, T_{bath} - температура ванни. У цьому випадку проведено аналіз отриманих вольт-амперних характеристик та їхніх перших і других похідних згідно з теорією теплового режиму з метою визначити додаткові параметри, що характеризують зазначені зразки.

У підрозділі 5.1 проаналізовано спектри KFe_2As_2 у тепловому режимі. Показано, що форма мікроконтактних спектрів варіює від контакту до контакту та якісно подібна до температурної залежності похідної питомого опору dp/dT (рис. 6), що впливає з визначення вольт-амперної характеристики контакту у рамках теорії теплового режиму:

$$I(V) = Vd \int_0^1 \frac{dx}{\rho(T_{PC}(1-x^2)^{1/2})} \quad , \quad (3)$$

де d – діаметр контакту.

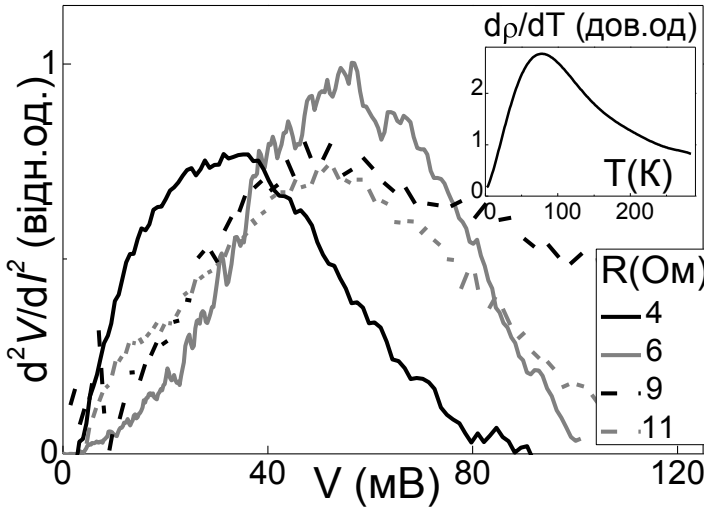


Рис. 6. Мікроконтактні спектри сполуки KFe_2As_2 у тепловому режимі для кількох контактів. На вставці: температурна залежність похідної питомого опору.

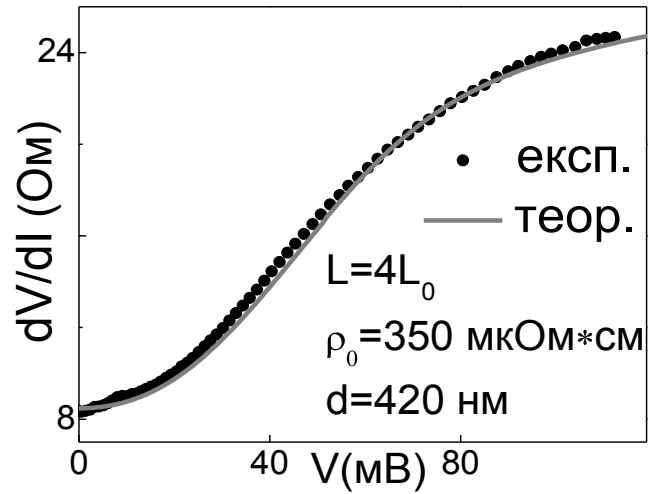


Рис. 7. Розрахований (суцільна крива) та вимірний (кружки) dV/dI спектри точкового контакту на основі KFe_2As_2 ($R=8$ Ом, $T_{bath}=4,2$ К).

На основі формул (2) і (3) виконана підгонка теоретичних dV/dI спектрів до експериментальних, як показано на рис. 7, для 8 різних контактів. Визначені число Лоренца L , що дорівнює $4L_0$, залишковий опір ρ_0 , що має величину від кількох сотень до тисяч мкОм·см та діаметр контакту d , що коливається у межах кількох мікрон. Зі співвідношення $\rho l \approx 1.3 \cdot 10^4 n^{-2/3}$ у моделі вільних електронів, де n – концентрація електронів, обчислена довжина вільного пробігу електронів l , величина якої складає від 0,3 до 2 нм для різних контактів. Завищені значення ρ_0 та d обумовлені деградацією поверхні внаслідок порушення стехіометричного складу через хімічно активний та летючий лужний метал К і пов'язаним із цим зменшенням густини електронів у приповерхневому шарі. Занижене значення l є наслідком порушення кристалічної структури поверхні KFe_2As_2 при створенні притискних контактів при низьких температурах та/або зазначеної деградація поверхні.

Основні результати підрозділу 5.1 опубліковано в роботах [5, 12].

У підрозділі 5.2 проведено аналогічний вищезазначеному аналіз dV/dI спектрів $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) у тепловому режимі. На рис. 8 показано, що розрахована за формулами (2) і (3) крива добре узгоджується з експериментальною в усьому діапазоні за винятком малої ділянки при малих напругах зміщення, де на спектрі проявляються надпровідні особливості зразка. Розраховані значення числа Лоренца, залишкового опору (легенда на рис. 8) відповідають очікуваним величинам для масиву.

Основні результати підрозділу 5.2 опубліковано в роботі [4].

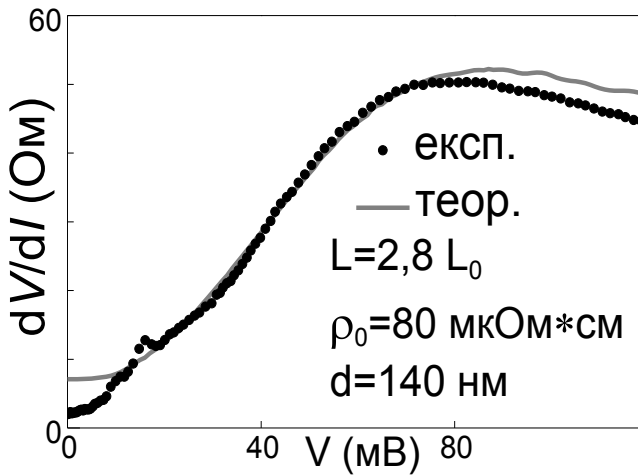


Рис. 8. Розрахований (суцільна крива) та вимірний (кружки) dV/dI спектри точкового контакту на основі $Ba_{0.65}Na_{0.35}Fe_2As_2$ ($R=1.8$ Ом, $T_{bath}=4.5$ К).

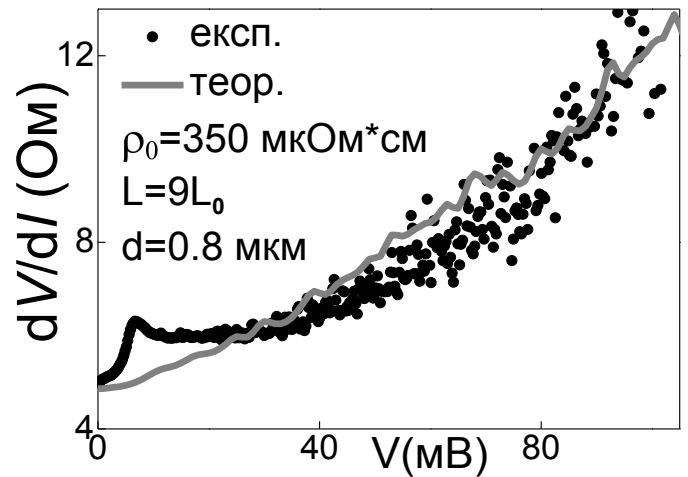


Рис. 9 Розрахований (суцільна крива) та вимірний (кружки) dV/dI спектри точкового контакту на основі $FeSe$ ($R=5$ Ом, $T_{bath}=5$ К).

У підрозділі 5.3 проведено аналіз dV/dI спектрів $FeSe$ у тепловому режимі. Як і у випадку з $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$) розрахований dV/dI спектр добре накладається на експериментальний за областю при малих напругах зміщення, де проявляються надпровідні особливості $FeSe$ (рис. 9). При цьому значення числа Лоренца та залишкового опору (легенда на рис. 9) завищені в порівнянні з масивом із тих самих причин, що й у випадку з KFe_2As_2 : ймовірно за рахунок деградації поверхні зразка та пов'язаного з цим зменшенням густини електронів.

Основні результати підрозділу 5.3 опубліковано в роботах [1,2].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі узагальнені результати оригінальних досліджень ряду надпровідних сполук $FeSe$, KFe_2As_2 , $Ba_{1-x}Na_xFe_2As_2$ ($x=0,35$), $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$, використовуючи мікроконтактну спектроскопію Янсона та андреєвського відбиття. Основні результати можна сформулювати наступним чином:

1. Вперше виявлено одиночну 20 меВ бозонну моду на мікроконтактних спектрах Янсона у KFe_2As_2 . Враховуючи розрахунки функції електрон-фононної взаємодії та специфіку зонної структури KFe_2As_2 , запропоновано нову модель непрямих «екситонних» збуджень у KFe_2As_2 , яка описує отримані спектри.
2. Виявлено виражений максимум на мікроконтактних спектрах Янсона у $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0.8}Ag_{0.2})Sb_2$, положення якого знаходиться в діапазоні від 10 до 20 меВ. Встановлено, що даний максимум викликаний електрон-фононною взаємодією, а варіювання його положення пов'язано з анізотропією фононного спектра цих сполук. Оцінка енергії Дебая зі

спектрів обох сполук складає 40 меВ. Розраховано константу електрон-фононої взаємодії для LaCuSb_2 , нижня границя для якої складає $0,20 \pm 0,03$.

3. Отримано виражені андреєвські особливості на dV/dI спектрах точкових контактів на основі $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$). Розраховано усереднений параметр $2\Delta/k_B T_c = 3,6 \pm 1$ за допомогою аналізу в рамках моделі БТК. Показано, що температурна залежність надпровідної щілини у $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$) близька до БКШ-залежності.

4. Вперше виміряні добре відтворювані андреєвські спектри точкових контактів на основі FeSe . Виявлено реалізацію двощілинного надпровідного стану із приведеними параметрами $2\Delta/k_B T_c$, що складають $2,3 \pm 0,5$ та $4,2 \pm 0,9$ для меншої та більшої щілин відповідно та усереднений параметр $2\Delta/k_B T_c$, що становить $3,7 \pm 0,7$. Таким чином FeSe відноситься до типу сильно зв'язаних надпровідників.

5. Вперше одержано дані щодо температурної та магнітопольової залежностей 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.

6. Проаналізовано мікроконтактні спектри KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x=0,35$) та FeSe в тепловому режимі. Показано, що форма dV/dI спектрів визначається поведінкою питомого опору. Згідно з теорією теплового режиму визначені число Лоренца, залишковий питомий опір та діаметр контакту, завищені значення яких у випадку KFe_2As_2 і FeSe пов'язуються з деградацією поверхні зразків.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Yu.G. Naidyuk, O.E. Kvitnitskaya, **N.V. Gamayunova**, D.L. Bashlakov, L.V. Tyutrina, G. Fuchs, R. Hühne, D.A. Chareev, and A.N. Vasiliev, "Superconducting gaps in FeSe studied by soft point-contact Andreev reflection spectroscopy," *Phys. Rev. B*, vol. 96, no. 9, pp. 094517-1- 094517-7, Sept. 2017.

2. Yu.G. Naidyuk, **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, G. Fuchs, D.A. Chareev, and A.N. Vasiliev, "Analysis of nonlinear conductivity of point contacts on the base of FeSe in the normal and superconducting state," *Low Temp. Phys.*, vol. 42, no. 1, pp. 31-35, Jan. 2016.

3. Yu.G. Naidyuk, O.E. Kvitnitskaya, **N.V. Gamayunova**, L. Boeri, S. Aswartham, S. Wurmehl, B. Büchner, D.V. Efremov, G. Fuchs, and S.-L. Drechsler, "Single 20 meV boson mode in KFe_2As_2 detected by point-contact spectroscopy," *Phys. Rev. B*, vol. 90, no. 9, pp. 094505-1-094505-9, Sept. 2014.

4. V.V. Fisun, O.P. Balkashin, O.E. Kvitnitskaya, I.A. Korovkin, **N.V. Gamayunova**, S. Aswartham, S. Wurmehl, and Yu.G. Naidyuk, "Josephson effect and Andreev reflection in $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x = 0.25$ and 0.35) point contacts," *Low Temp. Phys.*, vol. 40, no. 10, pp. 919-924, Oct. 2014.

5. **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, N.L. Bobrov, and Yu.G. Naidyuk, “Analysis of point-contact spectra of KFe_2As_2 in the thermal regime,” (in Ukrainian), *Вісник ХНУ. Серія «Фізика»*, vol. 19, no. 1076, pp. 16-19, Dec. 2013.
6. **N.V. Gamayunova**, D.L. Bashlakov, O.E. Kvitnitskaya, A.V. Terekhov, Z. Bukowski, M. Babij, and Yu.G. Naidyuk, “Yanson Point-Contact Spectroscopy of Electron-Phonon Interaction in Ternary Rare-Earth Copper Antimonides LaCuSb_2 and $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$,” in *Book of Abstracts 6th Int. Conf. on Superconductivity and Magnetism*, Beldibi/Antalya, Turkey, 2018, p. 676.
7. **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, D.L. Bashlakov, L.V. Tyutrina, and Yu.G. Naidyuk, “Andreev Reflection Investigation of FeSe by Soft Point-Contact Spectroscopy,” in *Book of Abstracts 5th Int. Research and Practice Conf. “Nanotechnology and Nanomaterials”*, 2017, Chernivtsi, Ukraine, p. 480.
8. **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, and Yu.G. Naidyuk. Study of Point-Contact Spectra of FeSe in the Normal and Superconducting States. presented at Int. Young Scientists Forum on Applied Physics YSF-2015 [CD-ROM]. Available: Forum Proc. CD-ROM. - NM-5.
9. **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, Yu.G. Naidyuk, D.A. Chareev, and A.N. Vasiliev, “Analysis of point-contact spectra of FeSe,” in *Book of Abstracts 5th Ukrainian-German Symp. on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology*, 2015, Kyiv, Ukraine, p. 183.
10. Yu.G. Naidyuk, O.E. Kvitnitskaya, **N.V. Gamayunova**, L. Boeri, S. Aswartham, S. Wurmehl, B. Büchner, D.V. Efremov, G. Fuchs, and S.-L. Drechsler, “Exploring of point-contact spectra of KFe_2As_2 in the normal state,” in *Book of Abstracts III Int. Workshop on Point-Contact Spectroscopy*, 2014, Kharkiv Ukraine, p. 25.
11. **N.V. Gamayunova**, O.E. Kvitnitskaya, and Yu.G. Naidyuk, “Analysis of Point-Contact Spectra of Iron-Based Superconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ in the Normal and Superconducting States,” in *Book of Abstracts 5th Int. Conf. for Young Scientists “Low Temperature Physics”*, 2014, Kharkiv, Ukraine, p. 57.
12. **Н.В. Гамаюнова**, О.Е. Квитницькая и Ю.Г. Найдюк, “Анализ микроконтактных спектров KFe_2As_2 в тепловом режиме,” в *Матеріали XI Міжн. наук. конф. «Фізичні явища в твердих тілах»*, 2013, Харків, Україна, с. 80.
13. **Н.В. Гамаюнова**, О.Є. Квітницька, М.Л. Бобров та Ю.Г. Найдюк, “Дослідження мікроконтактних спектрів залізовмісного надпровідника KFe_2As_2 ,” у *Book of Abstracts Int. Conf. of Young Scientists and Post-Graduates IEP-2013*, Uzhhorod, Ukraine, pp. 249-250.
14. **Н.В. Гамаюнова**, О.Є. Квітницька та Ю.Г. Найдюк, “Мікроконтактна спектроскопія залізовмісного пікнітида KFe_2As_2 ,” у *Book of Abstracts Int. Conf. of Student and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2013*, Lviv, Ukraine, p. A7.
15. **N.V. Gamayunova**, D.L. Bashlakov, O.E. Kvitnitskaya, A.V. Terekhov, Yu.G. Naidyuk, Z. Bukowski, and M. Babij, “Electron-Phonon Interaction in Ternary Rare-Earth Copper Antimonides LaCuSb_2 and $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ probed by

Yanson Point-Contact Spectroscopy,” in *Proc. 2017 IEEE 7th International Conf. NAP-2017*, part 1, pp. 137-1-137-4.

АНОТАЦІЯ

Гамаюнова Н.В. Мікроконтактні дослідження залізовмісних надпровідників. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, Харків, 2018.

У дисертації представлені результати експериментальних досліджень залізовмісних надпровідних сполук KFe_2As_2 , $Ba_{0,65}Na_{0,35}Fe_2As_2$ та $FeSe$, а також рідкісноземельних мідних антимонідів $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0,8}Ag_{0,2})Sb_2$, ізоструктурних до 112-класу сполук на основі заліза, методом мікроконтактної спектроскопії Янсона та мікроконтактної спектроскопії андреевського відбиття.

Виявлено одиночну бозонну моду в KFe_2As_2 при енергії 20 меВ і запропоновано модель непрямих «екситонних» збуджень, яка описує отримані спектри.

Отримано та проаналізовано спектри електрон-фононої взаємодії в $LaCuSb_2$ та $La(Cu_{0,8}Ag_{0,2})Sb_2$ із максимумом в діапазоні 10–20 меВ та граничною енергією 40 меВ.

Виміряні спектри андреевського відбиття у $Ba_{0,65}Na_{0,35}Fe_2As_2$, визначена величина надпровідної щілини та показана її БКШ температурна залежність. Отримано та проведено аналіз мікроконтактних спектрів андреевського відбиття у $FeSe$. Виявлено дві надпровідні щілини у $FeSe$ з $2\Delta/k_B T_c = 2,3 \pm 0,5$ і $4,2 \pm 0,9$ та БКШ температурною залежністю.

Проведено аналіз мікроконтактних спектрів KFe_2As_2 , $Ba_{0,65}Na_{0,35}Fe_2As_2$ та $FeSe$ на основі теорії теплового режиму.

Ключові слова: залізовмісні надпровідники, мікроконтактна спектроскопія Янсона, електрон-квазічастинкова взаємодія, мікроконтактна спектроскопія андреевського відбиття, надпровідна щілина.

АННОТАЦИЯ

Гамаюнова Н.В. Микроконтактные исследования железосодержащих сверхпроводников. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Физико-технический институт низких температур имени Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2018.

В диссертации представлены результаты исследований железосодержащих сверхпроводящих соединений KFe_2As_2 , $Ba_{0,65}Na_{0,35}Fe_2As_2$ и $FeSe$, а также редкоземельных медных антимонидов $LaCuSb_2$ и $La(Cu_{0,8}Ag_{0,2})Sb_2$, изоструктурных к 112-классу сверхпроводников на основе железа методом микроконтактной спектроскопии Янсона и микроконтактной спектроскопии андреевского отражения.

Обнаружена одиночная бозонная мода в KFe_2As_2 при энергии 20 меВ и предложена модель непрямых «экситонных» возбуждений, описывающая полученные спектры.

Получены и проанализированы спектры электрон-фононного взаимодействия в LaCuSb_2 и $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ с максимумом в диапазоне 10–20 меВ и граничной энергией 40 меВ.

Измерены спектры андреевского отражения в $\text{Ba}_{0.65}\text{Na}_{0.35}\text{Fe}_2\text{As}_2$, определена величина сверхпроводящей щели и ее БКШ температурная зависимость. Получены и проведен анализ микроконтактных спектров андреевского отражения в FeSe . Обнаружены две сверхпроводящие щели в FeSe с $2\Delta/k_B T_c = 2,3 \pm 0.5$ и $4,2 \pm 0.9$ и БКШ температурной зависимостью.

Проведен анализ микроконтактных спектров KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{0.65}\text{Na}_{0.35}\text{Fe}_2\text{As}_2$ и FeSe в рамках теории теплового режима.

Ключевые слова: железосодержащие сверхпроводники, микроконтактная спектроскопия Янсона, электрон-квазичастичное взаимодействие, микроконтактная спектроскопия Андреевского отражения, сверхпроводящая щель.

ABSTRACT

Gamayunova N.V. Point-contact investigation of iron-based superconductors.

– Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics (PhD) by speciality 01.04.07 – solid state physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation presents the experimental results of the point-contact investigation of the following superconducting single crystals: FeSe ($T_c = 9$ K) belonging to the 11-group of iron-based superconductors (IBS), KFe_2As_2 ($T_c = 3,8$ K) and $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ with $x=0.35$ ($T_c = 29$ K) belonging to the 122-group of IBS, and ternary rare-earth copper antimonides LaCuSb_2 and $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ ($T_c = 1$ K and 0.5 K respectively) which are related systems to the compounds of 112-group of IBS with the same structural type. The features of the electron-quasiparticle interaction and the superconducting state of these systems are studied by Yanson point-contact spectroscopy (PCS) and point-contact Andreev reflection spectroscopy (PCAR).

The low-temperature superconductors KFe_2As_2 , LaCuSb_2 , and $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ have been investigated by Yanson PC spectroscopy method.

The PC spectra (or the second derivatives of current-voltage characteristics d^2V/dI^2) of the PCs on the basis of KFe_2As_2 demonstrate a single 20 meV bosonic mode. Phonon and non-phonon (excitonic) nature of the maximum are discussed. According to the calculations of electron-phonon interaction and the specificity of the band structure of KFe_2As_2 an alternative model of indirect excitonic excitations is suggested to explain the experimental results.

The d^2V/dI^2 spectra of the PCs on the basis of LaCuSb_2 and $\text{La}(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.2})\text{Sb}_2$ demonstrate a pronounced maximum in the range of 10 ÷ 20 meV on the spectra of different contacts for both samples. The feature is caused by the electron-phonon interaction in these materials. The variation of the maximum position is likely

connected with anisotropic phonon spectrum in these layered compounds. The calculation of electron-phonon interaction constant λ for LaCuSb_2 gives the low limit of 0.20 ± 0.03 for its value.

The superconducting state in $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ with $x = 0.35$ and FeSe has been investigated by PC Andreev reflection spectroscopy.

The spectra of differential resistance (or the first derivatives of current-voltage characteristics dV/dI) of $\text{Ba}_{0.65}\text{Na}_{0.35}\text{Fe}_2\text{As}_2$ demonstrate the Andreev-like double minima structure in the range of low bias at the temperatures much lower than the superconducting transition temperature T_c . The calculations within the Blonder–Tinkham–Klapwijk (BTK) model gives the value $2\Delta/k_B T_c = 3.6 \pm 1$. The temperature dependence of the superconducting gap is close to the BCS curve.

Point-contact Andreev reflection study of FeSe is carried out using the contact formation by the needle-anvil and shear techniques as well as by the soft method. The analysis of PC Andreev reflection spectra of FeSe within the two-gap BTK model reveals the existence of two superconducting gaps. Using “soft” PCs the well-reproduced Andreev reflection spectra of FeSe have been obtained. The calculation within the two-gap BTK model gives the values of the reduced superconducting gaps $2\Delta_L/k_B T_c = 4.2 \pm 0.9$ and $2\Delta_S/k_B T_c = 2.3 \pm 0.5$. The temperature dependence of the both gaps is close to the standard BCS behavior. The Andreev reflection double-minimum structure gradually decreases in magnetic field, but the position of the minima has a weak field dependence leading to almost field independent gaps value.

The PC spectra of KFe_2As_2 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x = 0.35$) and FeSe in the thermal regime of current flow through the contact have been analyzed according to the existing theory.

For all compounds the form of dV/dI spectra measured in the thermal regime is determined by the $\rho(T)$ behavior of the samples. Such parameters as the Lorentz number L , the residual resistivity ρ_0 , and the diameter d of the contact are obtained for each sample. The values of L , ρ_0 , and d for KFe_2As_2 and FeSe are higher than expected ones, which could be due to surface degradation and the corresponding decrease in electron density.

Key words: iron-based superconductors, Yanson point-contact spectroscopy, electron-quasiparticle interaction, point-contact Andreev reflection spectroscopy, superconducting gap.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 427-18.
Підписано до друку 14.09.2018. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.