

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Леги Олександра Олександровича
**«Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних
 структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі»**

Подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

За спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

(галузь знань 10 «Природничі науки»)

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Леги О.О. присвячена вирішенню наукової задачі – з'ясуванню впливу надвисокочастотного електромагнітного поля на характеристики просторово-неоднорідних надпровідних структур. Дедалі більше пристроїв сучасної електроніки базується на надпровідних елементах (квантові комп'ютери, магнітометри, однофотонні детектори), і особливо цікавою для дослідження є проблема їх поведінки в присутності зовнішніх електромагнітних полів. Знання про взаємодію надпровідників із зовнішніми полями дозволяє оптимізувати їх роботу, розширювати функціональність та покращувати енергоефективність сучасної електроніки.

Дисертаційна робота О.О. Леги присвячена вивченню резистивних станів в тонкоплівкових структурах, формуванню мікрохвильового відгуку в резонаторах і зміні параметрів ВЧ НКВІДів під впливом високочастотного поля. Таким чином, тема дисертаційної роботи є безсумнівно **актуальною** як для фундаментальної фізики надпровідності, так і в прикладному аспекті.

Актуальність теми також підтверджується тим, що дисертаційна робота Леги О.О. виконувалася у відділі надпровідних і мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України відповідно до бюджетних програм науково-дослідницьких робіт «Надпровідні і мезоскопічні мікроструктури та прилади сучасної квантової електроніки на їх основі» (номер держреєстрації 0117U002291) та «Квантові нано-розмірні надпровідні системи: теорія, експеримент, практична реалізація» (номер держреєстрації 0122U001503). Частина роботи була виконана за підтримки гранту Volkswagen Foundation в рамках проекту «Фазочутливе зображення поширення мікрохвильового сигналу в надпровідних метаматеріалах»,

реєстраційний номер Az97768 та гранту Magnetism for Ukraine 2023 в рамках проєкту «Development of Magnetic Coupling Readout Based on a Flux Qubit with RF SQUID for Nonlinear Quantum Magnonics», реєстраційний номер 9918.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, наведених у дисертації, забезпечується коректністю постановки мети та завдання дослідження, високим рівнем експериментальної техніки та доброю відтворюваністю результатів. Результати роботи опубліковані у рецензованих фахових виданнях за темою дисертації. Отримані результати обговорювались на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Усі результати узгоджуються між собою та з відповідними літературними теоретичними та експериментальними даними інших авторів.

Наукова повизна отриманих результатів

В ході виконання дослідження автором було отримано ряд нових наукових результатів, а саме:

- *вперше* за допомогою методу низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії (НТЛСМ) проведено візуалізацію переходу широкої надпровідної плівки з резистивного стану в нормальний під одночасною дією постійного та НВЧ струмів. Зокрема, за допомогою НТЛСМ візуалізовано структуру резистивного стану з нееквідистантними лініями проковзування фази (ЛПФ) у двовимірному надпровіднику з розтіканням транспортного струму;

- *вперше* продемонстровано фазочутливий режим НТЛСМ, за допомогою якого було проведено дослідження розподілу надпровідних струмів у спіральному резонаторі для другої і третьої моди стоячих хвиль. У нефазочутливому режимі було виявлено посилення анізотропії надпровідних НВЧ струмів зі збільшенням індексу резонансної моди, а також, перехід резонатора між режимами зосереджених та розподілених параметрів;

- *вперше* показано, що додаткове НВЧ поле трансформує характеристики ВЧ НКВІДу, переводячи його з гістерезисного режиму роботи в формально безгістерезисний, що дозволяє отримати коефіцієнт перетворення, вищий за той, що був характерний для гістерезисного режиму.

Наукова і практична цінність отриманих результатів

Автором були отримані нові наукові результати, що розширюють наявні уявлення про особливості утворення нестационарних станів у просторово-неоднорідних надпровідних структурах у НВЧ полі. Отримані результати створюють основу для нової концепції дослідження фазових характеристик НТЛСМ-відгуку двовимірних надпровідних метаматеріалів. Результати дослідження тонкоплівкових надпровідників надають нові знання про особливості переходу до нормального стану, а метод НТЛСМ дозволяє детально візуалізувати цей процес у надпровідних структурах. Вперше показано, що за допомогою НВЧ поля можна здійснювати керування значенням критичного струму Джозефсонівського контакту, що дозволяє покращити ефективність роботи ВЧ НКВІДу.

Повнота викладення у наукових публікаціях за темою дисертації

За результатами досліджень опубліковано 8 наукових праць, у тому числі: 3 статті у провідних фахових виданнях включених до наукометричних баз Scopus та Web of Science. 5 тез доповідей опубліковано в збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура, оцінка мови, стилю та оформлення дисертації

Дисертація Леги О.О. складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел (205 найменувань), а також додатків зі списком праць, що опубліковано за темою дисертації, та відомості про апробацію результатів дисертації. Робота викладена на 143 сторінках та містить 37 рисунків.

У вступі автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з тематичним планом Фізико-технічного-інститут низьких температур імені Б.І. Віркіна 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 обсяг дисертації.

У **першому** розділі проаналізовано літературні дані щодо фізичних властивостей досліджуваних об'єктів. Огляд включає теоретичні основи, що описують поведінку тонкоплівкових структур у надпровідному стані та процеси, які відбуваються під час їх переходу до нормального стану. Окремо розглянуто електромагнітні метаматеріали, зокрема властивості їхніх структурних елементів — метаатомів. Значну увагу приділено метаматеріалам на основі тонкоплівкових спіральних надпровідних резонаторів та ВЧ НКВІДів. Окрему увагу приділено методу НТЛСМ, з описом фізичних процесів, що лежать в основі цього методу, та аналізом режимів роботи мікроскопа, які дозволяють досліджувати різні характеристики надпровідників.

Другий розділ присвячено дослідженню резистивних станів тонких надпровідних широких плівок під впливом одночасної дії постійного транспортного струму та НВЧ-стимулюючого струму. За допомогою методу НТЛСМ було візуалізовано перехід цих структур з надпровідного стану до нормального через резистивний стан із утворенням ЛПФ. Показано, що ЛПФ трансформуються у НЛД внаслідок монотонного зменшення надлишкового струму в ядрі ЛПФ. Також проведено візуалізацію формування ЛПФ у двовимірній структурі зі змінною густиною струму (місток Дасма).

У **третьому** розділі продемонстровано фазочутливий метод НТЛСМ та досліджено характеристики надпровідних спіральних резонаторів. У нефазочутливому режимі НТЛСМ було отримано розподіл стоячих хвиль для вищих мод коливань НВЧ струмів. Встановлено, що при низьких модах резонатор зберігає властивості зосередженого елемента, тоді як на високих модах переходить до режиму розподілених параметрів. У фазочутливому режимі було досліджено просторовий розподіл НВЧ струмів для другої та третьої мод стоячих хвиль у спіральному резонаторі.

Четвертий розділ присвячено вивченню впливу НВЧ поля на характеристики ВЧ НКВІДу. Розглянуто теоретичну модель поведінки безгістерезисного режиму роботи ВЧ НКВІДу в НВЧ полі та наведено результати експерименту з дослідженням впливу НВЧ поля на ВЧ НКВІД у

гістерезисному режимі роботи. За допомогою експерименту виявлено, що додаткове НВЧ поле трансформує характеристики ВЧ НКВІДу, переводячи його з гістерезисного режиму роботи в безгістерезисний, при цьому спостерігається збільшення коефіцієнту перетворення.

Завершується робота загальними висновками, списком використаних джерел та додатками.

Дисертація написана грамотною мовою, викладена логічно та послідовно у традиційному науковому стилі. Оформлення роботи акуратне, термінологія загальноприйнята. Все це забезпечує адекватне сприйняття результатів та висновків дисертації.

Зауваження до дисертаційної роботи:

- 1) При високих струмах, коли виникають ЛПФ, незрозуміло, куди діваються вихори, що входять у плівку через її краї ($I > I_m$ на Рис. 1.9), і який залишається їхній внесок в опір резистивного стану.
- 2) На Рис. 2.3, як слідує з підпису, зображено ВАХ олов'яного містка з ЛПФ та сходами Шапіро під НВЧ опроміненням. Проте зображені особливості ВАХ виглядають нехарактерним чином (принаймні для ЛПФ). Бажано було б навести більш детальне пояснення особливостей отриманих ВАХ.
- 3) Процес перетворення ліній проковзування фази (ЛПФ) в нормальні локалізовані домени (НЛД) при збільшенні струму, зображений на Рис. 2.5., виглядає не досить переконливо і потребує додаткових роз'яснень. Зокрема, незрозуміло, яким чином візуально за допомогою НТЛСМ можна відрізнити ЛПФ від НЛД?
- 4) Є деякі незначні стилістичні огріхи та помилки. Наприклад – у позначенні осі ординат на Рис. 1.5 та помилки у підпису до Рис. 1.9

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

Загальний висновок стосовно дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Олександра Олександровича Леги «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в

надвисокочастотному електромагнітному полі» є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні. Автором отримано нові, науково обґрунтовані результати в області фізики надпровідників, надано їх інтерпретацію та узагальнення. Дисертація написана хорошою науковою мовою та оформлена відповідно існуючим вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Леги О.О. «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі» відповідає вимогам «Порядку 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 12.01.2022 № 44, а її автор, Лега Олександр Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - фізика та астрономія в галузі знань 10 - природничі науки.

Офіційний опонент:

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

О.Л. Касаткіна

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

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



М.І. Савчук