

## 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»

з галузі знань 10 – «Природничі науки»

### **Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота О.О. Леги присвячена вивченню нестационарних процесів, які відбуваються під дією надвисокочастотного електромагнітного поля в просторово-неоднорідних надпровідних структурах. Такими структурами в дисертації є надпровідні плівки та містки зі струмом, спіральний надпровідний резонатор та високочастотний надпровідний квантовий інтерференційний детектор. **Метою** дисертаційного дослідження є вивчення впливу надвисокочастотного електромагнітного поля на просторово-неоднорідні надпровідні структури. Під дією електромагнітного поля в названих просторово-неоднорідних структурах виникають стаціонарні та нестационарні процеси, а саме, формуються лінії проковзування фази у надпровідних плівках та містках зі струмом, формуються резонансні стани та стоячі хвилі у надпровідних резонаторах, а у високочастотному надпровідному квантовому інтерференційному детекторі виникає відгук на збуджуюче випромінювання. Ці процеси вивчаються в дисертації. Вибрана тематика досліджень **актуальна** як для фундаментальної, так і для прикладної фізики, оскільки загальної теорії ліній проковзування фази в надпровідних плівках та містках в даний час не існує, і необхідно накопичити базовий експериментальний матеріал для її побудови, надпровідні спіральні резонатори є перспективними для побудови метаматеріалів

з заданими електромагнітними характеристиками, а гнучке керування нормадізованою індуктивністю високочастотного надпровідного квантового інтерференційного детектору (основним параметром цього детектору) дозволяє перейти з гістерезисного режиму роботи детектора до безгістерезисного і забезпечує збільшення коефіцієнта перетворення та чутливості. Актуальність теми також підтверджується тим, що дисертаційна робота О. О. Леги виконувалася в Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України за відомчими тематиками: «Надпровідні і мезоскопічні мікроструктури та прилади сучасної квантової електроніки на їх основі» (реєстраційний номер 0117U002291), «Квантові нано-розмірні надпровідні системи: теорія, експеримент, практична реалізація» (реєстраційний номер 0122U001503), за підтримки гранту Magnetism for Ukraine 2023, Україна, в рамках проекту «Development of Magnetic Coupling Readout Based on a Flux Qubit with RF SQUID for Nonlinear Quantum Magnonics» (реєстраційний номер 9918), а частина дисертаційної роботи була виконана за підтримки гранту Volkswagen Foundation, Німеччина, в рамках проекту «Фазочутливе зображення поширення мікрохвильового сигналу в надпровідних метаматеріалах», (реєстраційний номер Az97768).

### **Структура, оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.**

Дисертація О. О. Леги добре структурована і складається з анотації українською та англійською мовами, списку публікацій здобувача за темою дисертації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел (205 найменувань), та двох додатків, в яких є список публікацій здобувача за темою дисертації (додаток А) та відомості про апробацію результатів дисертації (додаток Б). Кожен з розділів має висновки за розділом. Робота викладена на 143 сторінках, містить 37 рисунків. У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з тематичним планом досліджень Фізико-технічного



інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, сформульовані мета дослідження, окреслені задачі дослідження, сформульовано об'єкт, предмет і методи дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведено особистий внесок здобувача, дані про публікації та апробацію результатів роботи, а також структура та обсяг дисертації.

**В першому розділі** наведений огляд та аналізу літератури за темою дисертації. Огляд включає теоретичні основи фізики надпровідності, фізики ефектів Джозефсона (ефекти Джозефсона, резистивно-ємнісна модель контакту Джозефсона, а також огляд надпровідних квантових інтерферометрів). Докладно розглянуто резистивні стани у надпровідних тонких плівках. Далі в огляді описано метаматеріали з резонаторами та спіральні резонатори, які є перспективними елементами структури метаматеріалів. Розвинута цікава точка зору на високочастотні надпровідні квантові інтерференційні детектори як елементи структури метаматеріалів. Обговорено методи дослідження надпровідних структур, зокрема метод низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії. Розділ завершено постановкою завдань дисертаційної роботи.

**У другому розділі** розглянуто проведені автором дисертації експериментальні дослідження особливостей переходу тонкоплівкових надпровідників у нормальний стан. Показано, що під впливом постійного транспортного струму та надвисокочастотного випромінювання в процесі переходу до нормального стану надпровідник проходить проміжний нестабільний і нерівноважний резистивний стан, при якому утворюються лінії проковзування фази, з подальшим утворенням нормальних доменів. Вивчаються формування центрів проковзування фази та ліній проковзування фази в надвисокочастотних полях та резистивні стани у плівках зі змінним перерізом.

**В третьому розділі** експериментально вивчається візуалізація стоячих хвиль у спіральному надпровідному резонаторі. Для дослідження розроблено фазочутливий режим роботи низькотемпературного лазерного скануючого

мікроскопа. Отримано векторні зображення просторового розподілу мікрохвильових струмів у спіральному резонаторі для різних мод стоячих хвиль. Розглянуто інтересний випадок анізотропії надпровідних надвисокочастотних струмів у спіральному резонаторі при великому індексі резонансної моди.

У четвертому розділі проведено аналіз впливу надвисокочастотного електромагнітного поля на амплітудно-частотні характеристики високочастотного надпровідного квантового інтерференційного детектору. Розглянуто теорію детектору в надвисокочастотному полі і проведено експериментальну перевірку цієї теорії.

Завершується робота **висновками, списком використаних джерел та додатками.**

Дисертація написана грамотно, викладена логічно та послідовно. Термінологія загальноприйнята, оформлення роботи акуратне. Все це забезпечує адекватне сприйняття результатів та висновків дисертації.

Таким чином, можна констатувати, що дисертаційна робота О. О. Леги є завершеною кваліфікаційною роботою, яка виконана здобувачем особисто.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність.**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, наведених у дисертації, забезпечується коректністю постановки мети та задач дослідження, високим рівнем експериментальної техніки та відтворюваністю результатів. Дослідження базуються на сучасних теоретичних та експериментальних підходах і методах. Висновки робіт випливають з результатів експериментальних та теоретичних досліджень, наведених у дисертації. Результати та висновки апробовані на п'яти міжнародних наукових конференціях. Результати досліджень узгоджені між собою та з результатами публікацій інших авторів.

**Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

Результати наукових досліджень, отриманих в дисертації, опубліковано в 3-х статтях у науковому журналі «Low Temperature Physics», який індексується в



міжнародних наукометричних базах SCOPUS та Web of Science і має третій квартиль (Q3), та у 5 тезах доповідей на конференціях в виданнях, чого достатньо для дисертаційної роботи доктора філософії, згідно встановленим вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 - «Фізика та астрономія» в галузі 10 – «Природничі науки». З дисертації є очевидним, що особистий вклад дисертанта в ці роботи є вирішальним.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Новизна підходу дисертанта до поставленої проблеми полягає у використанні унікальних методів детектування, а саме, методу низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії та розробці методу векторних (фазочутливих) вимірювань надвисокочастотного відгуку за допомогою низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії. Автором було отримано низку **нових** результатів, а саме:

1. Структура резистивного стану з нееквідистантними лініями проковзування фази у двовимірному надпровіднику з розтіканням транспортного струму (містку Дасма) була вперше візуалізована і проаналізована методом низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії.
2. Автор вперше показав за допомогою низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії, що перехід широкої надпровідної тонкої плівки з резистивного стану в нормальний під дією постійного транспортного струму та надвисокочастотного поля відбувається через монотонне зменшення надлишкового струму. Нестационарні нерівноважні лінії проковзування фази перетворюються в нерівноважні, але стаціонарні дискретні нормальні локалізовані домени, які мають такі ж розміри, як і лінії проковзування фази, що їх породили.
3. Удосконалено метод низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії і вперше продемонстрований метод векторних (фазочутливих) вимірювань

надвисокочастотного відгуку за допомогою низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії.

4. Вперше виявлено посилення анізотропії надпровідних надвисокочастотних струмів у спіральному резонаторі зі збільшенням індексу резонансної моди, а також перехід резонатора між режимами зосереджених та розподілених параметрів.
5. Вперше отримано векторні зображення просторового розподілу мікрохвильових струмів у спіральному резонаторі для другої та третьої моди стоячих хвиль.
6. Автором вперше доведено, що додаткове надвисокочастотне електромагнітне поле змінює характеристики високочастотного надпровідного квантового інтерференційного детектору, переводячи його з гістерезисного режиму роботи в безгістерезисний, що дозволяє отримати коефіцієнт перетворення, вищий за той, який характерний для гістерезисного режиму.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

Результати досліджень, представлених в цій дисертаційній роботі, розширюють наявні уявлення про особливості утворення нестационарних станів у просторово-неоднорідних надпровідних структурах у надвисокочастотному полі. Результати дослідження тонкоплівкових надпровідників дозволяють отримати нові знання про особливості переходу до нормального стану. Показано можливість керування значенням критичного струму джозефсонівського контакту, і, відповідно, ефективним параметром (нормалізованою індуктивністю) високочастотного надпровідного квантового інтерференційного детектора. Цей результат має велике значення для вибору параметрів при практичному застосуванні детектора.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В підрозділі дисертації 2.4. не наведена вольт-амперна характеристика досліджуваної плівки. Лінії проковзування фази повинні робити внесок в цю



вольт-амперну характеристику. Аналіз такої вольт-амперної характеристики був би важливим і для теорії точкових контактів.

2. На рисунку 2.9 (в) зображення другої (середньої) лінії проковзування фази симетрично розбивається на світлі ділянки, розділені темними смугами (дві світлих ділянки у верхній напівплощині зображення і дві у нижній напівплощині). Цей результат не прокоментовано у дисертації.
3. В розділі 3 розглянуто анізотропію надпровідних надвисокочастотних струмів у спіральному резонаторі. На мій погляд, сама асиметрична форма зображення фотовідгуку недостатньо проаналізована. Наприклад, чи можна зображення фотовідгуку на рисунку 3.6 (а) вважати анізотропним тому, що на лівій частині кола першої гармоніки фотовідгук сильніший, ніж на правій?
4. У розділі 4, на мій погляд, мало б сенс розрахувати оптимальні параметри системи та оптимальні частоти з розвиненої у підрозділі 4.3 теорії, і у підрозділі 4.4 порівняти ці результати з результатами експерименту.
5. Автор зловживає аббревіатурами, що приводить до речень, які досить складно зрозуміти і прочитати вголос. Як приклад наведу речення «Набір АЧХ ВЧ НКВІДу у НВЧ полі...» (з підпису до рисунку 4.5), або «ВАХ олов'яної смужки...при різних рівнях НВЧ опромінення, що ілюструють перехід від ЛПФ до НЛД...» (з підпису до рисунку 2.4). Навіть слово «фотовідгук» скорочено до аббревіатури «ФВ». Подібних речень у дисертації багато. Зауважу, що фізичний смисл таких речень бездоганний, просто не слід вживати багато скорочень в одному реченні.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертації. Науковий рівень дисертації є високим, отримані результати не викликають сумніву щодо їх достовірності, а висновки роботи є обґрунтованими.

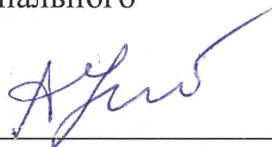
#### **Загальна оцінка та висновок.**

Дисертаційна робота О. О. Лега «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному

електромагнітному полі» с оригіальною, самостійною та завершеною науковою роботою, за своїм змістом та оформленням повністю 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 р. № 502 і від 03.05.2024 р. № 507, 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

Професор кафедри фізики низьких температур  
фізичного факультету Харківського Національного  
університету імені В. Н. Каразіна,  
доктор фіз.-мат. наук



Олександр ГРИБ

Підпис професора кафедри фізики низьких температур фізичного факультету Харківського Національного університету імені В. Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук Гриба Олександра Миколайовича засвідчую.

6.0 Начальник відділу кадрів  
Харківського Національного  
університету імені В. Н. Каразіна



Олена ГРОМИКО

