

РІШЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ ПРО ПРИСУДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ДОКТОРА ФІЛОСОФІЇ

Спеціалізована вчена рада ДФ 64.175.013 Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків, прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» на підставі прилюдного захисту дисертації «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі» 14 жовтня 2024 року.

Лега Олександр Олександрович, 1996 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2019 році фізико-технічний факультет Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали». Навчається в аспірантурі Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України з 2020 р. Успішно виконав освітньо-наукову програму підготовки доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Дисертаційну роботу виконано у відділі надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України.

Наукові керівники: старший науковий співробітник відділу надпровідних та мезоскопічних структур ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, кандидат технічних наук **Ляхно Валерій Юрійович** та завідувач відділу надпровідних та мезоскопічних структур ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор **Шевченко Сергій Миколайович**.

Здобувач має 8 наукових публікацій за темою дисертації, з них 3 статті у міжнародному виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science), що належить до квартилю Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank:

1. **A.A. Leha**, A. P. Zhuravel, A. Karpov, A. V. Lukashenko and A. V. Ustinov, “Phase-resolved visualization of radio-frequency standing waves in superconducting spiral resonator for metamaterial applications”, *Low Temperature Physics*, 48 (2), 104–112 (2022), DOI: 10.1063/10.0009288 (Scopus, кuartиль Q3)
2. O. G. Turutanov, A. G. Sivakov, **A. A. Leha**, A. S. Pokhila, A. E. Kolinko and M. Grajcar, “Some aspects of the resistive-to-normal state transition caused by direct and microwave currents in superconducting thin films with phase slip lines”, *Low Temperature Physics*, 50 (4), 289–298 (2024), DOI: 10.1063/10.0025294 (Scopus, кuartиль Q3)
3. V. I. Shnyrkov, V. Yu. Lyakhno, O. A. Kalenyuk, D. G. Mindich, **O. O. Leha**, A. P. Shapovalov. “Control of the effective value of the critical current of the RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field”, *Low Temperature Physics*, 50 (6), 497–501, 2024, DOI: 10.1063/10.0026089 (Scopus, кuartиль Q3)

У дискусії взяли участь голова та всі члени спеціалізованої вченої ради:

1. Опонент **Касаткін Олександр Леонідович**, доктор фізико-математичних наук, професор, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу надпровідності Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України дав позитивний відгук із зауваженнями:

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. Зазначені зауваження не носять принципового характеру і не впливають на

загальну позитивну оцінку роботи.

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 ?

Зазначені зауваження не носять принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

2. Опонент **Гриб Олександр Миколайович**, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики низьких температур фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України надав позитивний відгук із наступними зауваженнями:

- 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 «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 «фотовідгую» 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.

Однак, слід вказати, що зазначені зауваження жодним чином не впливають на якість отриманих результатів дисертаційної роботи і на обґрунтованість висновків.

3. Рецензент **Соловйов Андрій Львович**, доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України надав позитивну рецензію із зауваженням:

- 1) Дисертант у літературному огляді розглядає метаматеріали, створені на базі НКВІДів, але це питання не має розвитку в основних розділах роботи, хоча і не є основною метою дослідження.

Але це зауваження ніяк не впливає на загальну високу позитивну оцінку роботи.

4. Рецензент **Терехов Андрій Валерійович**, кандидат фізико математичних наук, старший дослідник, завідувач відділу мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна

ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України надав позитивну рецензію із зауваженнями:

- 1) На 35 сторінці в другому абзаці знизу написано, що «транспортний струм більший критичного спричиняє перехід структури до резистивного стану за рахунок проникнення магнітного поля у надпровідник у вигляді квантованих вихорів (вихорами Абрикосова), бо тонкі плівки є надпровідниками 2-го роду.» Це не вірне висловлювання, тому що у тонких плівках, що перебувають у резистивному вихоровому стані, виникають перловські вихори [1, 2] (абрикосівські вихори виникають в об'ємному надпровіднику). [1] Pearl J. Current distribution in superconducting films carrying quantized fluxoids / J. Pearl // Appl. Phys. Lett. – 1964. – Vol. 5, № 4. – P. 65 – 66. [2] Kogan V.G. Pearl's vortex near the film edge / V.G. Kogan // Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 49, № 22. – P. 15874 – 15878.
- 2) На 37 сторінці в другому абзаці написано, що «Було показано, що при протіканні транспортного струму в таких вузьких плівках і каналах перехід до нормального стану відбувається через нерівноважний і нестационарний стан з резистивними локальними доменами, що отримали назву центрів проковзування фази (ЦПФ).» Потрібно замінити в цьому реченні «резистивні локальні домени» на «динамічне резистивне утворення», що більше відповідає природі ЦПФ. Домен це — просторова область, всередині якої певна фізична характеристика однакова, проте відрізняється від такої ж характеристики в сусідній області. ЦПФ чи ЛПФ це динамічне резистивне утворення. В області ЦПФ чи ЛПФ фізичні характеристики, як то надпровідна щілина, хімічний потенціал пар та квазічастинок, густина надпровідного струму та інше просторово змінюються.
- 3) Формула (1.22) на 47 сторінці така ж сама як й (1.21) на 46 сторінці. Перша формула відноситься до визначення резонансної частоти

спірального резонатора, а друга до резонансної частоти ВЧ НКВДу але позначення резонансних частот однакові - f_0 . Тому можна в формулі (1.22) змінити позначення f_0 , наприклад написати $f_{0\ SQUID}$ чи $f_{0\ os}$.

- 4) На 69 сторінці в другому абзаці мова йде про ВАХ ЛПФ. В той же час, зазвичай ЛПФ спостерігаються в широких плівках, в яких також спостерігаються ділянки ВАХ пов'язані з вихорами (рис.1.9 дисертаційної роботи). ВАХ рис.2.3 та 2.4 таких початкових ділянок не мають й при досягненні критичного струму спостерігається поява сходинок, що може бути пов'язано з тим що плівка в даному інтервалі температур поводить себе як вузький канал з ЦПФ, а не ЛПФ. Одна і та ж плівка поблизу температури переходу може поводити себе як вузький канал, а при більш низьких температурах як широка плівка. Це пов'язано з тим, що довжина когерентності та глибина проникнення магнітного поля експоненційно зростають зі зростанням температури.

Разом з цим слід зауважити, що вказані вище недоліки не впливають на загальне позитивне враження від роботи і не применшують її загальні переваги.

5. Голова ради **Колесніченко Юрій Олексійович**, доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник відділу мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України дав позитивну оцінку роботі, без зауважень.

Загальна оцінка роботи і висновок. Дисертація Леги Олександра Олександровича на тему «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі» є актуальним завершеним науковим дослідженням.

Дисертація присвячена вивченню впливу НВЧ електромагнітного поля на просторово-неоднорідні надпровідні структури. Результати роботи одночасно

розв'язують фундаментальні проблеми формування та перетворення мікрохвильового відгуку надпровідних структур на НВЧ опромінення та мають велике практичне значення для розвитку надпровідної електроніки та метаматеріалів.

Під час виконання цієї роботи було отримано ряд важливих результатів, одним з яких є детальний аналіз переходу надпровідних плівок із надпровідного стану до нормального. Давно відомо, що при протіканні через тонкі широкі надпровідні плівки постійного транспортного струму або змінного НВЧ струму процес надпровідного переходу супроводжується розвитком резистивного стану, який характеризується утворенням нестационарних і нерівноважних ліній проковзування фази (ЛПФ). Однак у цій роботі вперше показано, що одночасний вплив транспортного та НВЧ струму спричиняє монотонне зниження надлишкового струму в ЛПФ, що призводить до перетворення нестационарних і нерівноважних ЛПФ у нерівноважні, але стаціонарні нормальні локалізовані домени (НЛД), які мають розміри ЛПФ, що їх породили. Також уперше візуалізовано структуру резистивного стану з нееквідистантними ЛПФ на прикладі двовимірної плівкової структури зі змінною густиною струму (місток Даєма), що підтверджує універсальність механізму проковзування фази.

Окрема частина роботи присвячена дослідженню розподілу надпровідних мікрохвильових струмів у спіральних резонаторах. Надпровідні спіральні резонатори викликають значний інтерес завдяки можливості їх застосування як структурних елементів електромагнітних метаматеріалів. Тому надзвичайно важливо розуміти особливості їх резонансного мікрохвильового відгуку на електромагнітне опромінення. Для цього було досліджено розподіл надпровідних струмів у резонаторі та вперше виявлено анізотропію мікрохвильового відгуку на високих модах коливань, що допомагає визначити межі застосування цих структур. Однак для метаматеріалів і надпровідної електроніки в цілому, окрім амплітуди надпровідних струмів, важливою характеристикою є їх фаза. Здобувачем вперше був представлений фазочутливий метод низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії (НТЛСМ), а також вперше отримано розподіл

струмів у резонаторі з урахуванням їх фази.

У ході виконання дисертаційної роботи розглянуто можливість керування ефективним параметром ВЧ НКВІД за допомогою НВЧ електромагнітного поля. Вперше показано, що для ВЧ НКВІДу в гістерезисному режимі роботи можливе переналаштування в формально безгістерезисний режим за допомогою НВЧ поля значно більшої частоти. Такий спосіб керування параметрами НКВІД дозволяє налаштовувати надпровідні пристрої в необхідний режим роботи та, зокрема, покращує їх чутливість.

Варто зазначити, що під час проведення досліджень Лега О.О. використовував унікальний метод вивчення електродинамічних характеристик надпровідників — метод низькотемпературної лазерної сканувальної мікроскопії, що дозволило візуалізувати резистивні стани з ЛПФ та отримати розподіли ВЧ струмів у спіральних резонаторах. Для вивчення можливості керування параметрами ВЧ НКВІД застосовувався метод індуктивного вимірювання амплітудно-частотних характеристик ВЧ НКВІД резонансним методом.

Результати досліджень, наведені у дисертаційній роботі та опубліковані у наукових статтях, належать автору. Робота виконана з дотриманням усіх вимог академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. За кількістю і рівнем публікацій, апробацією на міжнародних конференціях дисертаційна робота відповідає вимогам «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.

Рада вважає, що дисертація Леги Олександра Олександровича на тему «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі», що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» є завершеним самостійним науковим дослідженням, сукупність результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення

для галузі знань 10 «Природничі науки», а за актуальністю, науковою новизною і практичною цінністю відповідає вимогам чинного законодавства України, «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23.03.2016 р. № 261 та «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 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 та від 03.05.2024 № 507, а здобувач Лега Олександр Олександрович заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Результати відкритого голосування:

«За» - 5 членів ради,

«Проти» - 0 членів ради,

«Утримались» - 0 членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ДФ 64.175.013 присуджує Лега Олександру Олександровичу ступінь доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Голова

разової спеціалізованої вченої ради,

доктор фіз.-мат. наук,

професор

Юрій КОЛЕСНИЧЕНКО

