

Рецензія

керівника відділу мікроконтактної спектроскопії ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника

Терехова Андрія Валерійовича

на дисертаційну роботу **Леги Олександра Олександровича**

«Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі »,

представлену на здобуття ступеня

доктора філософії за спеціальністю 104 - «Фізика та астрономія»

з галузі знань 10 - «Природничі науки»

Актуальність дисертаційної роботи.

Вивчення впливу електромагнітного НВЧ поля на надпровідні структури різної геометрії (структуровані надпровідні тонкі плівки, спіральні резонатори та ВЧ НКВІДи) є **актуальним** не тільки зараз, але і в майбутньому оскільки всі ці структури активно використовуються в сучасній квантовій метрології, квантових обчисленнях, надчутливих детекторах, магнітометрах та штучних мета-атомах в двовимірному середовищі площинних метаматеріалів. Тим не менше, ряд важливих моментів, зокрема процес руйнування надпровідності в таких структурах під впливом транспортного струму і НВЧ поля, який супроводжується розвитком нестационарних, і здебільшого нелінійних процесів, НВЧ електродинаміка метаматеріалів були вивчені не до кінця. Дисертаційна робота Леги О.О. частково закриває ці проблеми, тому ця робота є **актуальною**.

Оригінальні розробки, представлені у цій роботі, дозволили виявити ряд нових ефектів, що є вагомим внеском не лише у фундаментальну науку, а і відкривають перспективу їх застосувань у прикладних сферах.

Основні результати дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел з 205 посилань, двох додатків, та містить 37 рисунків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, та описано її **взаємозв'язок із науковими програмами**. Сформульовано мету і завдання роботи, визначено **об'єкт та предмет дослідження**, розглянуто **практичну цінність отриманих результатів** та їх **наукову новизну**, а також наведено дані про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ «Просторово-неоднорідні надпровідні структури та методи їх дослідження» присвячено огляду та аналізу літератури за темою дисертації. В цьому розділі розглянуто основні явища, які виникають у надпровідних структурах, зокрема в тонких плівках з різною геометрією. Були проаналізовані структури та елементи сучасної низькотемпературної надпровідної електроніки, які є предметом дослідження дисертаційної роботи, а саме – тонкі надпровідні плівки, надпровідні спіральні резонатори та надпровідні квантові інтерференційні детектори (НКВІДи). Окремо

обговорено проблеми одного із найбільш актуальних застосувань елементів надпровідних резонуючих структур, а саме – створення метаматеріалів. Обговорено основні мікроскопічні методи дослідження надпровідних структур. Особлива увага приділена методу низькотемпературної лазерної скануючої мікроскопії (НТЛСМ) та особливостям її застосування в області низьких температур.

У другому розділі «Дослідження резистивних станів надпровідних плівок» представлені результати дослідження особливостей переходу тонкоплівкових надпровідників різної геометрії (широкі та вузькі плівки та двовимірні структури зі змінним значенням перерізу – містки Даєма) у нормальний стан під дією транспортного струму та НВЧ. Розглянуто основні резистивні стани, через які проходить зразок в процесі переходу від надпровідного до нормального стану, висказано припущення про існування нового стану - нормальних локалізованих доменів (НЛД). Методом НТЛСМ візуалізовано деякі з резистивних станів.

Третій розділ «Візуалізація стоячих хвиль у спіральному надпровідному резонаторі. фазочутливий режим ЛСМ» присвячено дослідженню розподілу надпровідних екрануючих струмів у надпровідному спіральному резонаторі, що є актуальним для розуміння того, яким чином можна оптимально застосовувати такі резонатори для побудови електромагнітних метаматеріалів. В розділі було наведено новий метод візуалізації просторового розподілу струмів у надпровідних резонаторах, а саме метод НТЛСМ. За допомогою останнього отримано картину резонансів екрануючих надпровідних струмів до 38 моди стоячих хвиль надпровідного спірального резонатору.

В четвертому розділі «Аналіз впливу збуджуючого високочастотного випромінювання на параметри ВЧ НКВІДУ» детально проаналізовано вплив НВЧ електромагнітного поля на амплітудно-частотні та сигнальні характеристики високочастотного ВЧ НКВІДу в безгістерезисному та гістерезисному режимах. Показано яким чином можна керувати значенням критичного струму Джозефсонівського контакту, а, відповідно, і ефективним параметром роботи ВЧ НКВІДу.

У «Висновках» стисло представлено основні результати роботи.

Робота базується на трьох статтях у міжнародному журналі Low Temperature Physics з квантилем Q3 згідно з класифікацією SCImago Journal та Country Rank та індексованих в SCOPUS та Web of Science, у яких повністю опубліковано матеріали дисертаційної праці. Усі статті доповідалися здобувачем особисто на семінарах відділу теплових властивостей і структури твердих тіл та наносистем, на Проблемній раді ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, а також представлялися на вітчизняних та міжнародних конференціях.

Необхідно відмітити, що незважаючи на достатньо високий рівень написання дисертаційної роботи, в ній були присутні друкарські помилки в тексті та на рисунках, які були здебільшого виправлені.

До дисертаційної роботи Леги Олександра Олександровича є зауваження:

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. Домєн 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 щільність, 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 $f_{0\text{SQUID}}$ чи $f_{0\text{S}}$.
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 сходинки, 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.

Загальні висновки.

Підсумовуючи, маю відзначити, що дисертаційна робота Леги О.О. «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі» виконана на високому науковому рівні з використанням складної сучасної експериментальної техніки та методик розрахунків.

Оскільки структуровані надпровідні тонкі плівки, спіральні резонатори ВЧ НКВІДи та метаматеріали дуже широко використовуються в сучасній квантовій електроніці, результати роботи мають також важливе **практичне значення**.

На мою думку, за актуальністю, новизною, рівнем отриманих наукових результатів дисертаційна робота Леги **Олександра Олександровича** «Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі» 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», затверджену постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507, та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми «Фізика» ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Дисертація містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів, характеризується єдністю змісту та відповідає принципам академічної доброчесності.

Рецензент:

керівник відділу мікроконтактної спектроскопії
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник



Андрій ТЕРЕХОВ

