

Рецензія

провідного наукового співробітника відділу мікроконтактної спектроскопії
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, доктора фізико-математичних наук,

професора

Соловйова Андрія Львовича

на дисертаційну роботу Леги Олександра Олександровича

«Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних
структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі», представлену
на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 - «Фізика та
астрономія»

з галузі знань 10 – «Природничі науки»

Швидкий розвиток технологій потребує запровадження нових підходів та інновацій. Що стосується електроніки, дедалі частіше використовуються низькотемпературні пристрої та елементи. Це пов'язано з потребою збільшити ступінь інтеграції схем, зменшити їхнє енергоспоживання, а також шум та тим підвищити чутливість аж до квантового рівня, що особливо важливо на тлі ростучого інтересу до квантових технологій. Такі можливості дає застосування надпровідників, які мають нульовий електричний опір на постійному струмі та малі втрати на високих частотах, ідеальний діамagnetизм та унікальну колективну квантову поведінку на макроскопічному рівні розмірів. Компоненти або пристрої з низькотемпературних чи високотемпературних надпровідників включають до себе індуктивності (котушки), пасивні лінії передачі, резонатори, антени, фільтри, активні елементи (джозефсонівські контакти, джозефсонівські осцилятори та надпровідні квантові інтерферометри (НКВІДи)) та елементи новітніх матеріалів з надзвичайними властивостями – метаматеріалів. Але для повноцінного впровадження надпровідних елементів і пристроїв невизначеними залишаються багато питань, зокрема, поведінки таких елементів у електромагнітних полях.

Дисертаційна робота О. О. Леги присвячена вивченню впливу електромагнітного НВЧ поля на поведінку різноманітних елементів надпровідної електроніки. Зокрема проведено дослідження розвитку резистивного стану в тонкоплівкових надпровідних структурах, які є основою сучасних планарних схем кріогенної електроніки. Ще один важливий аспект дисертаційної роботи – це вивчення властивостей надпровідних спіральних резонаторів, які можуть бути використані в магнітних та електромагнітних метаматеріалах. Також було проведено дослідження характеристик ВЧ НКВІДу у зовнішньому НВЧ електромагнітному полі. Тому **актуальність** теми дисертаційної роботи не викликає сумнівів, адже в роботі отримано низку нових унікальних результатів.

Дисертація базується на трьох статтях, які опубліковано в журналі Low Temperature Physics з квантилем Q3 згідно SCImago Journal та Country Rank, та п'яти тезах міжнародних конференцій. Всі статті та тези опубліковано у співавторстві, втім особистий внесок здобувача переважно був визначальним, особливо у обробці та аналізі експериментальних даних, моделюванні та підготовці обладнання до експериментів. Дисертант брав участь у написанні статей та презентував особисто матеріали досліджень на міжнародних конференціях з усними доповідями.

Основні результати дисертаційної роботи.

Дисертація традиційно складається із вступу та **трьох** розділів. Як зазначено у **вступі**, метою дисертаційної роботи є вивчення та аналіз нової інформації про основні електродинамічні процеси, які визначають поведінку надпровідників у електромагнітних НВЧ полях.

Розділ 1 присвячений огляду та аналізу літератури, що стосується теми дисертації. У ньому розглядаються основні явища, які виникають у надпровідних структурах. Аналізуються різні типи структур та елементів сучасної низькотемпературної електроніки, які досліджуються в дисертації, зокрема тонкі надпровідні плівки, надпровідні спіральні резонатори та надпровідні квантові інтерференційні детектори (НКВІДи, SQUIDs –

Superconducting Quantum Interference Device). Показані обмеження, що виникають при використанні таких структур, включаючи проблему розподілу надпровідних струмів, особливості формування резистивних і нормальних станів у надпровідних плівках та поведінку НКВІДів. Особливу увагу приділено актуальним проблемам застосування елементів надпровідних резонуючих структур для створення електромагнітних метаматеріалів. Обговорюються основні мікроскопічні методи дослідження надпровідних структур, зокрема метод лазерної скануючої мікроскопії та особливості його застосування при низьких температурах – низькотемпературній лазерній скануючій мікроскопії (НТЛСМ).

Розділ 2 присвячений експериментальному дослідженню переходу тонкоплівкових надпровідників у нормальний стан. Використовуючи метод НТЛСМ, було показано, що під впливом постійного транспортного струму та НВЧ випромінювання надпровідник у процесі переходу проходить через нестабільний нерівноважний резистивний стан, що характеризується утворенням ліній проковзування фази (ЛПФ) та наступним формуванням нормальних локалізованих доменів (НЛД). Експериментально встановлено, що вплив НВЧ поля та постійного струму на тонкоплівкову надпровідну структуру є неадитивним. У сильних НВЧ полях виникають дискретні НЛД, які не змінюють форми вольт-амперних характеристик (ВАХ). Стандартний підхід дослідження ВАХ не дозволяє розкрити всі деталі процесу переходу, тому НТЛСМ є унікальним методом, який дозволяє візуалізувати утворення стаціонарних, але нерівноважних нормальних структур – НЛД, на місці ЛПФ. Показано, що процес проковзування фази властивий не лише квазіодновимірним надпровідним плівкам, а й 2D і 3D надпровідним структурам. На прикладі двовимірної структури зі змінним перерізом – містка Даєма – методом НТЛСМ візуалізовано утворення ЛПФ у формі дуг концентричних кіл.

Розділ 3 присвячений вивченню розподілу надпровідних екрануючих струмів у спіральному надпровідному резонаторі. Це дослідження є ключовим для розуміння можливостей використання таких резонаторів при створенні електромагнітних метаматеріалів, оскільки їх характеристики значною мірою залежать від резонансних властивостей метаатомів.

Представлено новий метод візуалізації просторового розподілу струмів у об'ємі надпровідних спіральних резонаторів. Було розроблено спеціальний режим роботи низькотемпературного лазерного скануючого мікроскопа для отримання даних про фазу екрануючих струмів у надпровіднику, що дозволяє визначити їх напрямки. Фазочутливий контраст досягається завдяки синхронізації модульованого лазерного випромінювання з резонансними гармоніками НВЧ-сигналу, що проходить через зразок. У такому випадку втрати, індуковані лазерним променем у зоні освітлення, сильно залежать від локальної різниці фаз між ВЧ-несучим сигналом і просторово-часовою структурою лазерного коливання. Цей підхід усуває апаратні обмеження традиційної методики радіочастотної мікроскопії та підвищує точність фазочутливої демодуляції до рівня, необхідного для дослідження фізики надпровідних метаматеріалів.

У нефазочутливому, або «скалярному», режимі НТЛСМ було виявлено, що на високих модах стоячих хвиль розподіл надпровідних струмів стає анізотропним, що свідчить про втрату резонатором властивостей зосередженого елемента і його непридатність для використання як структурного елемента метаматеріалів на певних частотах. У фазочутливому режимі експериментально досліджено розподіл струмів для перших декількох мод стоячих хвиль у спіральному резонаторі та визначено напрямки їх поширення в зразку.

У **розділі 4** досліджено, як НВЧ електромагнітне поле впливає на амплітудно-частотні характеристики високочастотного (ВЧ) НКВІДу, і проведено експериментальну перевірку цих ефектів.

Виявлено, що при низькому значенні критичного струму в джозефсонівському контакті ВЧ НКВІДу та відповідно низькому значенні параметра β_L , його поведінка добре відповідає теоретичним прогнозам. Для оцінки впливу НВЧ поля використовувалася базова схема, де інтерферометр індуктивно з'єднаний із резонансним контуром, що збуджується ВЧ-струмом на частоті, яка близька до резонансної. Результати показали, що параметр β_L , який визначає режим роботи пристрою—з гістерезисом або без—можна точно налаштувати за допомогою високочастотного поля з амплітудою і частотою, що значно перевищують резонансну частоту контуру. Експеримент підтвердив, що ВЧ НКВІД можна перевести з гістерезисного режиму в режим, що нагадує безгістерезисний, при цьому значно підвищивши коефіцієнт перетворення і чутливість пристрою.

Не буду повторювати всі інші результати, котрих чимало. Хочу тільки підкреслити що всі результати отримані дисертантом вперше.

Також хочу додати, що дисертаційна робота написана ясно та послідовно, кожен розділ дисертації є доповненням попереднього, автор приділив значну увагу точності формулювань. Але є невеличкі зауваження. 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.

Але істотних зауважень до дисертаційної роботи у мене немає.

Загальні висновки

Представлені в дисертації результати і стиль доповіді здобувача свідчать про високий рівень володіння предметом. Виходячи з цього можна констатувати, що О. О. Лега вже є сформованим науковим працівником.

Таким чином, дисертаційна робота Леги О.О. «Нестационарные процессы в просторово-неоднородных сверхпроводящих структурах в надвысокочастотном

електромагнітному полі», є оригіальною та завершеною науковою працею, яка повністю відповідає спеціальності 104 – «Фізика та астрономія», а її автор Лега Олександр Олександрович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Рецензент: провідний науковий співробітник
відділу мікроконтактної спектроскопії
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Соловійов А.Л.



Соловйова А.Л.

Саминенко О.М.