

ВІДГУК

офіційного опонента Золочевського Івана Васильовича
на дисертаційну роботу Гриба Олександра Миколайовича
«Когерентна динаміка систем з джоузефсонівськими контактами»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.22 – надпровідність

Дисертаційна робота О.М. Гриба присвячена теоретичному та експериментальному дослідженню когерентних властивостей систем контактів Джоузефсона. В 1962 році ефект Джоузефсона був відкритий на кінчику пера і за 55 років пройшов блискучий шлях від чистої теорії до втілення в унікальні практичні пристрої. Але, незважаючи на це, в цій галузі науки і зараз існує низка проблем, яка чекає свого вирішення.

Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей утворення когерентного динамічного стану в системах контактів Джоузефсона та створення систем, в яких існують умови для когерентного випромінювання. Окрім академічного інтересу, це дослідження має прямий вихід на вирішення актуальних проблем управління когерентними властивостями ряду пристроїв надпровідної електроніки, а саме, ці дослідження можуть бути використані для створення приладів з системами когерентно випромінюючих контактів: джерел випромінювання в терагерцовому діапазоні та стандартних джерел напруги. У зв'язку з цим можна стверджувати, що напрямок наукових досліджень дисертаційної роботи О. М. Гриба є важливим і актуальним і представляє як теоретичний, так і практичний інтерес.

Дисертаційна робота, що обговорюється, є в певному сенсі синтетичною, так як в ній поєднано теоретичні дослідження систем контактів з різними системами зворотного зв'язку, чисельні дослідження динаміки осциляцій напруги в складних системах контактів та експериментальні дослідження електричних властивостей внутрішніх контактів Джоузефсона у високотемпературних надпровідниках. Таке поєднання теоретичних досліджень, чисельних розрахунків та експерименту дозволило автору перевірити його гіпотези та провести глибокий аналіз процесів синхронізації осциляцій напруги на контактах.

Новизна підходу дисертанта до проблеми полягає у розробці та використанні для синхронізації осциляцій напруги на контактах резонансних систем зворотного зв'язку, зокрема надпровідного резонатора та надпровідної довгої лінії. Такі структури дозволяють отримати синхронізацію навіть при максимальному (до 16%) розбігу критичних струмів контактів. Однак, наявна теорія електромагнітної взаємодії між контактами не давала адекватного опису синхронізації випромінювання контактів з кінцевим значенням ємності. У

дисертаційній роботі вплив резонансних систем зворотного зв'язку на синхронізацію розроблений теоретично, змодельований чисельно та перевірений експериментально.

Дисертація Гриба О.М. добре структурована і складається з вступу, семи розділів, висновків та переліку використаних джерел.

У вступі відзначені актуальність роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; сформульовані проблеми, які стояли перед початком роботи над дисертацією, цілі, завдання та методи дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Крім того, тут же відзначено особистий внесок дисертанта по всіх публікаціях, наведена структура і обсяг дисертації, показана апробація результатів роботи та наведена кількість публікацій.

У першому розділі проведено добротний огляд літератури за темою дисертації. Представлено опис теоретичних та експериментальних робіт з дослідження когерентної динаміки осциляцій напруги в системах контактів Джоузефсона і поставлені задачі, які повинні бути вирішені для досягнення мети дисертаційної роботи. Дисертант визначив, що серед головних задач, які необхідно вирішити у дослідженнях когерентної динаміки систем контактів Джоузефсона є наступні:

1. У відомій автору дисертації літературі бракує теоретичних досліджень впливу ємності контактів на їх синхронізацію. Тому, необхідно було розширити можливості методу амплітуд, які повільно змінюються, для дослідження синхронізації випромінювання контактів з кінцевим значенням ємності контактів. Крім того, необхідно було дослідити залежність сили синхронізуючого струму від частоти. На основі цього розширеного методу необхідно було проаналізувати синхронізацію випромінювання в різних типах кіл зворотного зв'язку в тому числі з резонансними системами, такими, як надпровідний резонатор та надпровідна довга лінія.
2. Треба розглянути синхронізацію випромінювання у стопках контактів Джоузефсона, з'єднаних з резонансними системами. На основі отриманих даних про механізми синхронізації треба було провести експеримент, у якому необхідно організувати коло зворотного зв'язку для внутрішніх контактів Джоузефсона у високотемпературному надпровіднику і дослідити його дію, так як (за окремими виключеннями), систематичних досліджень дії зворотного зв'язку на синхронізацію внутрішніх контактів Джоузефсона у високотемпературних надпровідниках не проводилося.
3. Треба докладно вивчити вплив неоднорідного розподілу температур в системах контактів на синхронізацію їх випромінювання. Ця задача є актуальною як для

аналізу експериментальних даних, так і для вирішення проблеми синхронізації контактів, які знаходяться при різних температурах.

4. Необхідно вивчити електричні властивості фрактальних структур контактів та ефект випрямлення напруги у таких структурах. Треба з'ясувати, як можна отримати інформацію щодо структури такої системи контактів із залежностей критичного струму системи від магнітного поля.

Дисертанту вдалося розв'язати ці проблеми, що ми й спостерігаємо у наступних розділах дисертації.

У другому розділі описуються методи проведення теоретичних досліджень та моделювання систем з контактами Джозефсона для знаходження механізмів когерентного випромінювання, а також методика проведення експерименту, описано процес виготовлення зразків високотемпературних надпровідників $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$ для вимірювання їх вольт - амперних характеристик. Для проведення теоретичних досліджень синхронізації випромінювання контактів Джозефсона був вибраний метод амплітуд, які повільно змінюються, оскільки цей метод дозволяє звести задачу до простих диференційних рівнянь, рішення яких відоме. Для проведення моделювання складних систем з контактами Джозефсона був вибраний стандартний чисельний метод Рунге - Кутта рішення диференційних рівнянь, оскільки він стабільний у межах параметрів задач і дозволяє отримати всі необхідні залежності. Для проведення експерименту по створенню систем контактів Джозефсона зі зворотнім зв'язком була вибрана оригінальна методика напилення плівок $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$, на підкладках зі зміщенням 20° . Для дослідження електричних властивостей зразків був вибраний стандартний метод вимірювання вольт - амперних характеристик. В основі аналізу можливостей отримання синхронізованого випромінювання лежить теоретично доведене і перевірене експериментально положення, згідно якому напруга на всіх контактах у системі однакова в тому інтервалі вольт - амперної характеристики, де контакти випромінюють когерентно.

В третьому розділі на основі методу амплітуд, які повільно змінюються проведено аналіз синхронізації осциляцій напруги на контактах Джозефсона у ланцюгах з двох контактів, з'єднаних з різними колами зворотного зв'язку, в тому числі з резонансними системами, такими, як надпровідний резонатор та надпровідна довга лінія. Вважаю дуже важливим, що дисертанту вдалося показати, що завдяки великому (відносно критичного струму) синхронізуючому високочастотному струму синхронізацію в цих резонансних системах можливо досягти навіть при великому (до 16%) розбігу критичних струмів контактів.

У четвертому розділі дисертації чисельними методами проводився аналіз

синхронізації осциляцій напруги на контактах Джозефсона у багатоконтактних системах, а саме в ланцюгу з 360 контактів у надпровідному резонаторі, у ланцюгу контактів у нескінченній довгій лінії, у ланцюгу контактів у резонансній довгій лінії та у стопці довгих внутрішніх контактів Джозефсона з резистивними краями. Ці результати мають значну практичну цінність, оскільки вони є запорукою створення приладів з системами контактів, які випромінюють когерентно.

У п'ятому розділі описано експеримент по вивченню електричних властивостей стопки шунтованих плівкою золота внутрішніх контактів Джозефсона у високотемпературних надпровідниках $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$, напилених на підкладці $LaAlO_3$ з кутом нахилу 20° площин CuO_2 відносно поверхні підкладки. Дисертант доводить, що на вольт - амперних характеристиках вимірених зразків існують самоіндуковані резонансні сходинки, які обумовлені взаємодією випромінювання внутрішніх контактів Джозефсона з стоячими хвилями, які виникають при частотах випромінювання, що співпадають з частотами геометричних резонансів у системі. Проведено модельний розрахунок, результати якого були порівняні з експериментальними результатами.

У шостому розділі чисельними методами досліджувався синхронізований стан контактів Джозефсона, які знаходяться при різних температурах, та вплив стоячої хвилі на просторовий розподіл синхронізованих контактів та втрати Джоуля. Дисертант показав, що осциляції напруги на контактах з різними критичними струмами, які знаходяться при різних температурах, можуть бути синхронізовані при оптимальних параметрах зовнішнього розігріву. На мій погляд, найбільш значущим є те, що дисертант показав, що стоячі хвилі в системах контактів Джозефсона, які знаходяться в довгій лінії, призводять до просторового розподілу перегрітих частин системи та частин, у яких контакти випромінюють когерентно, причому цей розподіл визначається модою геометричного резонансу. У цьому, зокрема, полягає фундаментальна значимість отриманих результатів.

В сьомому розділі наведені чисельні дослідження автора ефекту випрямлення напруги у фрактальних системах контактів Джозефсона. Дисертант довів, що фрактальну розмірність системи можна визначити з аналізу залежностей критичного струму системи або випрямленої напруги від магнітного поля. Представляє інтерес також показана дисертантом можливість застосування моделі асиметричного інтерферометра для аналізу асиметричних вольт - амперних характеристик контактів Джозефсона, виготовлених на основі пніктидів.

Обґрунтованість та достовірність результатів роботи Гриба О. М. не викликають сумнівів. Розрахунки у теоретичній частині роботи проведено за добре апробованими методами. По суті, в дисертаційній роботі побудований системний підхід до синхронізації осциляцій напруги в системах контактів Джозефсона у довгій лінії. Експериментальні

результати дисертанта погоджуються із окремими випадками, які досліджувалися до нього іншими авторами. Пояснення нових ефектів супроводжується викладенням механізмів їх виникнення. Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 13 міжнародних конференціях і обговорювалися із ведучими експертами в галузі контактів Джозефсона.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що теоретичні результати дисертаційної роботи дозволяють пояснити ефекти, які спостерігаються експериментально у складних структурах з контактами Джозефсона. Основні результати дисертації можуть бути використані для проектування і створення компактних локальних джерел випромінювання терагерцового діапазону на основі високотемпературних надпровідників, а також великих масивів контактів низькотемпературних надпровідників, синхронізованих у субтерагерцовому діапазоні для створення стандартних джерел напруги. Такі джерела можуть бути використані в молекулярній біології для вивчення спектрів молекул та у фізиці твердого тіла при вивченні спектрів збуджень та квазічастинок у кристалах високотемпературних надпровідників.

Дисертаційна робота містить низку нових результатів, які у сукупності вирішують важливу проблему фізики надпровідності щодо встановлення закономірностей утворення когерентного динамічного стану в системах контактів Джозефсона та створення умов для когерентного випромінювання.

В результаті експериментального дослідження електричних властивостей шунтованих внутрішніх контактів Джозефсона у високотемпературних надпровідниках, дисертант показав, що багатогілкова структура вольт - амперних характеристик у гістерезисній області може бути усунена завдяки резистивному шунту, що створює дуже сприятливі умови для синхронізації випромінювання. Цей результат має прикладне значення, оскільки його можна використати при створенні джерел когерентного випромінювання.

При чисельному дослідженні дисертантом було встановлено, що на вольт амперних характеристиках довгих внутрішніх контактів Джозефсона з нормальними (не надпровідними) краями утворюються сходинки нульового поля. Дисертантом був виявлений ефект розщеплення сходинки нульового поля на дві сходинки у результаті індуктивної взаємодії між двома довгими контактами Джозефсона з нормальними краями. Цей результат має фундаментальний характер і може бути використаний для побудови теорії самоіндукованих сходинок нульового поля у високотемпературних надпровідниках.

Дисертація досить вдало побудована так, що розглянуто спочатку прості ефекти синхронізації осциляцій напруги на двох контактах Джозефсона у різних (в тому числі і резонансних) системах зворотного зв'язку (третій розділ). Потім наводяться результати моделювання складних багатоконтактних систем (четвертий розділ). Після цього описано

експеримент (п'ятий розділ), результати якого осмислені на основі отриманих у попередніх розділах результатів. У наступних розділах отриманий раніше ефект дії стоячої хвилі на систему описаний в деталях. В цих розділах висвітлені також ефекти, які можуть виникнути в експерименті або завдяки складній будові системи (якщо контакти знаходяться при різних температурах або якщо структура з контактами має фрактальні властивості). Такий виклад матеріалу дозволяє дисертанту описати явище синхронізації системно та докладно. Нарешті, повертаючись до загального враження від роботи, зазначу, що дисертація викладена послідовно та системно. Кількість наведених рисунків достатня для пояснення отриманих результатів.

До дисертаційної роботи я хотів би висловити такі зауваження:

1. В дисертації не наведено паспортизацію досліджуваних зразків високотемпературних надпровідників $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$, зокрема, температурну залежність їх електричного опору, критичну температуру.
2. При дослідженні експериментально отриманих вольт - амперних характеристик внутрішніх контактів Джозефсона у високотемпературних надпровідниках не розглянуто можливих зв'язків між внутрішніми контактами у цих речовинах (індуктивного, резистивного, ємнісного), можливість яких дисертант припускає в огляді літератури.
3. Для опису вольт - амперних характеристик високотемпературних надпровідників дисертант розглядає резистивно - ємнісну модель опису контакту як базову. Однак, існують інші моделі для опису електричних властивостей високотемпературних надпровідників, однак дисертант не використовує їх в розрахунках.
4. Ряд результатів, отриманих теоретично та змодельованих чисельно не були перевірені дисертантом експериментально.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертації О.М. Гриба. Дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, яка відображає досить великий за обсягом об'єм теоретичних а також експериментальних досліджень автора. В дисертації отримані нові обґрунтовані наукові результати, які вирішують важливу проблему фізики надпровідності щодо встановлення закономірностей утворення когерентного динамічного стану в системах контактів Джозефсона та створення умов для когерентного випромінювання. Отримані дисертантом результати і висновки суттєво розширюють існуючі уявлення про динаміку контактів Джозефсона, зокрема - щодо утворення когерентних осциляцій напруги на контактах у резонансних структурах. Це обумовлює фундаментальне значення отриманих у дисертації результатів. Результати

дисертації викладені у 35 роботах: 22 статтях у фахових наукових виданнях, з них 10 без співавторів, та 13 тезах у збірниках доповідей міжнародних конференцій. Автореферат вірно і послідовно відображає основні положення дисертації.

У роботі не використовувались результати кандидатської дисертації.

Оцінюючи дисертацію в цілому, вважаю, що за своїм змістом та обсягом, актуальністю тематики, обґрунтованістю та достовірністю висновків, новизною одержаних результатів та їх науковим і практичним значенням дисертація О. М. Гриба «Когерентна динаміка систем з джоєфсонівськими контактами» задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема пп. 9, 10, 12 положень "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.22 - надпровідність.

Провідний науковий співробітник
відділу мікроконтактної спектроскопії
Фізико - технічного інституту низьких температур
ім. Б. І. Веркіна НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Золочевський І. В.

Підпис І.В. Золочевського засвідчую
Учений секретар ФТІНТ НАН України,
канд. фіз.-мат. наук



О. М. Калиненко

Вірюк навішмов
24 лютого 2017р.



№ 18. раці Д 64.175.03