

Відгук
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Апостолова Станіслава Сергійовича
«Електромагнітний та електронний транспорт в надпровідних структурах»,
яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних
наук за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика»

Дисертаційна робота С. С. Апостолова присвячена детальному теоретичному опису розповсюдження електромагнітних хвиль у різних структурах на основі незвичайних надпровідників. Обговорюються високотемпературні надпровідники, залізовмісні надпровідники та топологічні ізолятори. Системи та явища, які вивчаються, важливі для перспективних елементів електроніки терагерцового діапазону. Таким чином, тема дисертаційної роботи С. С. Апостолова є безсумнівно **актуальною**. Варто відмітити, що дисертант зробив доповідь за матеріалами дисертації 20.11.2018 р. на семінарі нашого відділу Надпровідних і мезоскопічних структур у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, та співробітники відділу дали високу оцінку актуальності, новизні та рівню дисертації.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи С. С. Апостолова підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наступних проектів, які виконувались в Інституті радіофізики та електроніки в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України з 2007 по теперішній час (номери державної реєстрації: 0106U011978, 0112U000211, 0110U005642, 0113U006217, 0117U004038).

Дисертаційна робота складається з сьоми розділів. Розглянемо основні результати у відповідній послідовності.

Перший розділ містить прекрасно написане, детальне та послідовне виведення основних понять та рівнянь. Розглянуто важливі для подальшого ефект Джозефсона та андреєвське відбиття, високотемпературні надпровідники – купратні та залізовмісні. З цього огляду читач може дізнатися про розповсюдження електромагнітних хвиль в шаруватих надпровідниках, так звані джозефсонівські плазмові хвилі. Важливо для можливих практичних застосувань, що характерна частота цих збуджень належить до терагерцового діапазону. Показано, що ці збудження описуються так званими синусоїдальними рівняннями Гордона.

У другому розділі автор дисертації описує слабкий зв'язок між двома незвичайними надпровідниками. Надпровідники можуть бути залізовмісними, а слабкий зв'язок утворено нормальним чи феромагнітним металом. Розглядається дифузний (брудний) випадок, для опису якого застосовуються рівняння Узаделя. Також розглядається випадок слабкого зв'язку з топологічним ізолятором. Автор ураховує спін-орбітальну взаємодію та багатократні андреєвські і нормальні відбиття на границі розділу, які описуються рівнянням Боголюбова – де Жена. В цьому розділі отримано низку аналітичних результатів, які можуть бути корисні, наприклад, для опису симетрії параметру порядку надпровідника.

Вивченю проходження електромагнітних хвиль крізь шаруваті надпровідники присвячений третій розділ. Оскільки вирішуються нелінійні рівняння, отримано гістерезисні та багатозначні залежності від амплітуди хвилі. Розглянуто випадок, коли хвиля обмежена хвилеводом. В результаті показано, що коефіцієнт проходження хвилі залежить від її амплітуди. Цей коефіцієнт проходження змінюється майже від нуля до одиниці, важливо – що це для хвилі в терагерцовому діапазоні. З цього можна зробити важливий висновок, що така постановка задачі дає можливість контролювати проходження електромагнітної хвилі, причому в широкому діапазоні – майже від повного відбиття до повного проходження.

Четвертий розділ також присвячений вивченю проходження електромагнітної хвилі через шаруватий надпровідник, з акцентом на можливість трансформації хвилі, та у випадку поздовжньої орієнтації надпровідника у хвилеводі. Досліджено проходження хвиль різної поляризації та змінення поляризації на виході. Аналізується лінійне та нелінійне наближення для джозефсонівського члену струму поперек шарів. Обґрунтовано специфічний принцип суперпозиції для нелінійних хвиль. Продемонстровано сильну залежність коефіцієнтів проходження як від амплітуди, так і поляризації.

У **п'ятому розділі** вивчається розповсюдження електромагнітних хвиль в шаруватому надпровіднику, який знаходиться в діелектричному оточенні. Оскільки поле згасає в діелектрику, хвилі локалізовані в надпровіднику, тобто вивчаються власні моди такого поля. Суттєва анізотропія системи приводить до сильної аномальної дисперсії хвилі. Отримано аналітичні вирази для низькочастотних та високочастотних мод. Обговорюється вплив слабкої та сильної нелінійності. Показано, що сильна аномальна дисперсія може приводити до обернення в нуль групової швидкості локалізованих мод, тобто така хвиля не розповсюджується, а зупиняється – явище відоме як зупинка світла.

Шостий розділ присвячено резонансним ефектам у шаруватих надпровідниках. Розглядається шаруватий надпровідник, оточений вакуумним проміжком та діелектричними призмами. Специфіка розповсюдження електромагнітної хвилі у такій структурі пов’язана з аномальною дисперсією локалізованих хвиль. При такій постановці задачі важливою для контролю величиною стає кут падіння хвилі. Задачу сформульовано та вирішено за допомогою демонстративного та зручного методу трансфер-матриць. Отримано вирази для поля в різних областях за допомогою відповідних граничних умов. Важливий та ілюстративний аспект роботи – що тут аналітичні вирази добре узгоджуються з результатами чисельних розрахунків. Розв’язано також красиву задачу, коли надпровідник оточено гіперструктурою з шарів діелектриків двох типів, що чергуються між собою. Така структура є аналогом фотонного кристалу, а надпровідник відіграє роль дефекту в такому «кристалі».

В **сьомому розділі** автор вивчає вплив постійного магнітного поля на електромагнітні хвилі у шаруватих надпровідниках. Розглядаються слабкі поля, коли в надпровідниках немає вихорів, а поле проникає тільки на лондонівську глибину проникнення. Розглянуто випадки високої та низької частоти, проведено порівняння аналітичних результатів та чисельних розрахунків. Детальне теоретичне дослідження демонструє залежності коефіцієнтів відбиття та трансформації хвилі від її частоти, кута падіння, поляризації, товщини

надпровідника і величини магнітного поля. Показано таким чином, що магнітне поле є гнучким інструментом для контролю за характеристиками шаруватих надпровідників щодо відбиття та проходження електромагнітних хвиль. Okрім того, досліджено вплив постійного магнітного поля на аномальну дисперсію локалізованих хвиль.

Таким чином, в дисертаційній роботі Апостолова С. С. шляхом аналітичного і чисельного розв'язання зв'язаних синусоїdalьних рівнянь Гордона, рівнянь Боголюбова – де Жена та рівнянь Узаделя отримано ряд нових цікавих результатів та розроблені нові методи теоретичного дослідження. Дисертація повністю відповідає спеціальності 01.04.02 - «теоретична фізика».

На мою думку, **найбільш цікаві наукові результати**, що отримані у дисертації, пов'язані з можливістю фільтрації та детекції терагерцових електромагнітних хвиль. А саме, це ефекти самоіндукованої та резонансної прозорості шаруватого надпровідника. По-перше, показано, що завдяки нелінійності коефіцієнт прозорості змінюється у широкому діапазоні в залежності від амплітуди хвилі. Завдяки цьому можливо детектувати величину терагерцового випромінювання за проходженням його крізь зразок. По-друге, прозорість шаруватого надпровідника, у якому збуджуються локалізовані хвилі, залежить резонансним чином від кута падіння хвилі, причому ця залежність дуже гостра. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розроблені методи мають практичне значення**, що в першу чергу пов'язано з можливим застосуванням для розробки елементів електроніки терагерцового діапазону. Це важливо для перспективних систем безпеки, медичної діагностики та контролю навколошнього середовища. Загалом дослідження дисертаційної роботи доповнюють і розширяють існуючі уявлення про електромагнітні процеси у шаруватих надпровідниках, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики конденсованого стану, а також підтверджується ретельно зробленими викладками, наведеними у тексті. В рамках застосованих модельних припущенень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються чисельними розрахунками. Варто підкреслити, що автор віртуозно застосовує різні аналітичні та численні методи теоретичної фізики, такі як квазікласичний метод ВКБ, метод трансфер-матриць, метод інтегралу зіткнень у квантово-кінетичному рівнянні Больцмана, метод функцій Гріна.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Апостолова С.С. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ), Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Вєркіна НАН України (м. Харків), Національний науковий центр Харківського фізико-технічного інституту (м. Харків), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків), Інститут монокристалів НАН України (м. Харків).

По змісту дисертації можна зробити такі **зауваження**:

- 1) В роботі зроблено низку наближень. Зокрема: (а) застосування рівнянь Лондона означає локальне наближення, (б) модель параметра порядку не бере до уваги анізотропію, (в) параметр порядку в слабких зв'язках береться постійним, тобто вирішується несамоузгоджена задача, (г) для опису шаруватих структур зроблено перехід у рівняннях від скінчених різниць до похідних. Чи всі ці наближення можна застосовувати для опису високотемпературних надпровідників? Наприклад, для оксидних високотемпературних надпровідників параметр порядку є суттєво анізотропним. Треба було б підсумувати ці наближення та дати оцінку для їхніх застосувань.
- 2) У огляді літератури зауважено, що тип спаровування у високотемпературних надпровідниках на основі заліза досі залишається предметом дискусій, та вказано три типа спаровування: s^{+-} , s^{++} та $(s+d)$. Але у другому розділі, у якому досліджується електронний транспорт у ланцюгах, які містять такі надпровідники, представлено лише два з типів спаровування: s^{+-} та s^{++} . Треба було б дати пояснення, чому $(s+d)$ -спаровування залишено без уваги при виконанні дослідження.
- 3) Автор неодноразово дає посилання на можливі експерименти та спостерігання, наприклад, в пунктах 5 та 6 «Наукова новизна отриманих результатів». Також згадуються можливі застосування, такі як детектори та фільтри терагерцового випромінювання. Але в самій роботі цьому майже не приділяється уваги. Наприклад, характерним є ствердження, що особливості у щільності станів поблизу надпровідникових щілин можуть бути використані для розмежування спаровування в експерименті за допомогою сканувальної тунельної спектроскопії. Дійсно, якщо автор обчислює щільність електронних станів, то вона дає кондактанс, який вимірюють методом тунельної спектроскопії. Це важливо для теорії надпровідності, але з дисертації остается не зрозумілим чи це спостерігалося, було реалізовано, або чого не вистачає для спостереження таких особливостей на експерименті.

Однак зазначені зауваження не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація прекрасно структурована і написана доброю науковою мовою. Основні результати опубліковані в 22 статтях, більшість з яких у таких відомих профільних журналах як «Physical Review B» і «Low Temperature Physics». При цьому, очевидно, що значний внесок в роботу належить особисто дисертанту, що додатково підтверджується тим, що у більшості з цих статей він – перший автор. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи й автореферат повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація С. С. Апостолова є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: виявлено специфічні особливості електронного транспорту у сучасних шаруватих високотемпературних надпровідниках та топологічних ізоляторах; побудована теорія розповсюдження

електромагнітних хвиль у структурах, що містять високотемпературні надпровідники, в яких формується анізотропна нелінійна джозефсонівська плазма; досліджено низку лінійних і нелінійних ефектів в таких структурах.

Вважаю, що враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертація «Електромагнітний та електронний транспорт в надпровідних структурах» повністю задовольняє вимогам, що ставляться до докторських дисертацій МОН України, зокрема пунктам 9, 10 та 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор дисертації Апостолов Станіслав Сергійович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу
надпровідних і мезоскопічних структур
Фізико-технічного інституту низьких температур
ім. Б.І. Вєркіна НАН України

СМ

С.М. Шевченко

Підпис С.М. Шевченка засвідчує.

Вчений секретар ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна
НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук



О.М. Калиненко