

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кадигроба Дмитра Васильовича

«Поверхневі та хвилеводні джозефсонівські плазмові моди
у шаруватих надпровідниках»,

яка представлена на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.02 – «теоретична фізика»**

Головна мета дисертаційної роботи Кадигроба Д.В. полягає у теоретичному дослідженні резонансних електромагнітних явищ, що супроводжуються збудженням поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових електромагнітних хвиль у шаруватих надпровідниках. До шаруватих надпровідників відносяться майже всі відомі на сьогоднішній день високотемпературні надпровідники. Теоретичне дослідження властивостей таких структур не втрачає **актуальності** і по теперішній час у фізиці конденсованого стану. По-перше, це зумовлено інтересом з точки зору фундаментальних досліджень до властивостей джозефсонівської плазми, що формується у шаруватих надпровідниках. По-друге, анізотропія шаруватих надпровідників сприяє поширенню в них так званих джозефсонівських плазмових хвиль, частоти яких відносяться до перспективного, але все ще недостатньо дослідженого, терагерцового діапазону. Тому результати теоретичного дослідження шаруватих надпровідників можуть мати практичне застосування при створенні приладів, що працюють у терагерцовому діапазоні частот. Властивості анізотропної структури шаруватих надпровідників при певних умовах суттєво відрізняються від властивостей інших провідникових середовищ, наприклад, металів. Компоненти тензора діелектричної проникності шаруватого надпровідника можуть мати різні знаки при певних частотах, внаслідок чого в таких матеріалах може спостерігатися явище негативної рефракції об'ємних електромагнітних хвиль. Такі матеріали, що в фізиці зазвичай називають терміном «left-handed», мають багато прикладних застосувань у науці. Тому теоретичні дослідження шаруватих надпровідників мають інтерес не тільки для фізиків-теоретиків, але й для експериментаторів, що робить тему дисертації безумовно **актуальною**.

Слід зазначити, що **актуальність** досліджень у дисертації Кадигроба Д.В. підтверджується також тим, що вони виконані в рамках наукових державних програм та проектів, які виконувались в Інституті радіофізики та електроніки НАН України: «Дослідження лінійних і нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених частинок» (номер державної реєстрації 0106U011978, термін виконання 2007 – 2011 рр.), «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами» (номер державної реєстрації 0112U000211, термін виконання 2012-2016 рр.), «Теоретичні та

експериментальні дослідження властивостей періодичних і стохастичних модульованих наноструктур в оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному діапазонах спектру» (номер державної реєстрації 0110U005642, термін виконання 2010-2014 рр.), «Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів» (номер державної реєстрації 0113U006217, термін виконання 2013 р.).

Дисертація Кадигроба Д.В. складається з чотирьох розділів, перший з яких становить собою огляд літератури за темою дисертації, а у трьох останніх викладено оригінальні результати.

У **першому розділі** проведено огляд літератури, що присвячений найбільш важливим роботам інших авторів, тісно пов'язаним з питаннями, розглянутими в дисертації. Наведені основні електродинамічні властивості сильно анізотропних шаруватих надпровідників та виведені рівняння для опису так званих джозефсонівських плазмових хвиль. У **другому розділі** дисертації отримані дисперсійні співвідношення для поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль, що поширюються в напівнескінченних надпровідниках, з урахуванням струму зміщення вздовж шарів. Передбачене існування нової гілки в спектрі поверхневих хвиль, яка розташована вище джозефсонівської плазмової частоти. Показано, що спектр поверхневих хвиль має частотну щілину, яка пов'язана з принциповою особливістю джозефсонівської плазми, а саме, з тим, що природа струму уздовж і поперек шарів різна. Проведено аналіз нової гілки закону дисперсії поверхневих хвиль і знайдені оптимальні умови для їх збудження. У цьому ж розділі запропонована модифікація резонансної теорії збурень, за допомогою якої вирішена задача про збудження джозефсонівських плазмових хвиль, що поширюються поперек надпровідних шарів як у зовнішньому постійному магнітному полі, так і за його відсутністю. У **третьому розділі** передбачено, що в пластині шаруватого надпровідника можуть існувати власні моди двох типів: поверхневі моди, поля яких експоненціально згасають від межі зразка, та хвилеводні моди, електромагнітне поле яких має осцилюючий характер поперек шарів. Показано, що обидва типи мод в пластині шаруватого надпровідника можуть бути або симетричними, або антисиметричними відносно середини зразка. Досліджено спектр власних джозефсонівських плазмових мод, а також розв'язана задача про збудження цих мод методом порушеного повного внутрішнього відбиття. У **четвертому розділі** передбачене явище аномальної прозорості товстих модульованих пластин (з товщиною багато більшою ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників в терагерцовому діапазоні частот, обумовлене дифракцією падаючих хвиль і резонансним збудженням власних хвилеводних мод. Автором отримані та проаналізовані коефіцієнти відбиття і проходження терагерцового випромінювання через модульовану пластину шаруватого надпровідника, що знаходиться у вакуумі. Показано, що залежність коефіцієнта проходження від кута падіння хвилі має серії резонансних піків, що відповідають рівності хвильового вектора дифрагрованої хвилі хвильовому

вектору однієї з власних хвильоводних мод. Передбачений і проаналізований протилежний ефект — резонансне зменшення коефіцієнту прозорості тонких модульованих пластин (з товщиною багато меншою ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників, обумовлене резонансним збудженням власних мод.

Обґрунтованість та достовірність результатів роботи Кадигроба Д.В. не викликає сумнівів. Це моє ствердження базується на тому, що всі розрахунки проведено добре апробованими методами теоретичної фізики. Низка одержаних результатів є точними або асимптотично точними розв'язками відповідних рівнянь. Отримані дисертантом аналітичні результати і висновки теорії порівнювались і підтверджувались результатами чисельних розрахунків. Вони доповнюють і розширюють існуючі уявлення про електромагнітні процеси у шаруватих надпровідниках, що обумовлює **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів пов'язано, по-перше, з запропонованими новими методами для розв'язання задач дифракції терагерцових хвиль на просторових неоднорідностях шаруватих надпровідників. По-друге, розглянуті сильно анізотропні структури мають потенціальне застосування у пристроях терагерцового діапазону, тож отримані результати можуть бути застосовані при розробці таких пристроїв.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Кадигроба Д.В. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків), Національний науковий центр Харківського фізико-технічного інституту (м. Харків), Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (м. Харків), Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ).

Дисертаційна робота має багато нових результатів і справляє гарне враження. Найбільш цікавим у дисертаційній роботі мені здається підкреслена автором принципова різниця між процесами поширення електромагнітних хвиль у металах та у шаруватих надпровідниках. Це сприяє більш глибокому розумінню задачі. Також привертає увагу яскраво проілюстроване графічне подання результатів дослідження. Це значно збільшує інформативність поданого матеріалу. Загалом, робота викладена акуратно та послідовно. При розв'язанні та аналізі задачі дисертант використовує як аналітичні, так і чисельні методи.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У другому розділі автор використовує квазікласичний метод ВКБ (Вентцеля-Крамерса-Бриллюена) розв'язку рівнянь, при цьому вважається, що параметр $Q \gg 1$. Однак при $n = 0$ цей параметр не є великим, тому виникає питання про правомірність застосування

квазікласичного методу у цьому випадку.

2. У другому розділі описано збудження поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль (що розповсюджуються поперек шарів) при наявності зовнішнього постійного магнітного поля. Але залишається питання, чому геометрія задачі обрана саме таким чином? Як зміняться результати, якщо магнітне поле буде спрямовано перпендикулярно шарам?

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертації Кадигроба Д.В. Без сумніву, вона є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що побудована на ретельній і великій за обсягом роботі автора і в якій отримані нові обґрунтовані наукові результати. Основні результати дисертації викладено у 15 наукових працях, серед яких 6 статей у фахових вітчизняних і міжнародних журналах та 9 тез доповідей на наукових конференціях. Зміст автореферату вірно відбиває основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Оцінюючи дисертацію в цілому, можна зробити висновок, що за своїм обсягом і якісним оформленням, актуальністю тематики, обґрунтованістю і достовірністю висновків, новизною одержаних результатів та їхнім науковим і практичним значенням дисертація Кадигроба Д.В. «Поверхневі та хвилеводні джозефсонівські плазмові моди у шаруватих надпровідниках», безумовно, задовольняє вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам 9, 11 та 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,
професор, доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри теоретичної фізики
ім. І.М. Ліфшиця Харківського національного
університету ім. В.Н. Каразіна

В.О. Шкловський

