

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»**

Дисертаційна робота Кадигроба Д.В. присвячена детальному дослідженню теорії розповсюдження поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових електромагнітних хвиль у шаруватих надпровідниках, а також резонансних електромагнітних явищ, що супроводжуються збудженням цих хвиль у терагерцовому діапазоні частот. У дисертаційній роботі отримані дисперсійні характеристики джозефсонівських плазмових електромагнітних хвиль, що розповсюджуються вздовж та поперек надпровідникових шарів, та показано, що явища, які спостерігаються в нормальних металах в оптичному діапазоні частот, повинні спостерігатися і в шаруватих надпровідниках, але вже в терагерцовому діапазоні. Шаруваті надпровідники представляють перспективний об'єкт дослідження в першу чергу завдяки незвичайно сильній токовій анізотропії. Властивості джозефсонівської плазми шаруватих надпровідників істотно відрізняються від властивостей інших провідникових середовищ, наприклад, металів. При певних частотах компоненти тензора діелектричної проникності шаруватого надпровідника можуть мати різні знаки, внаслідок чого в таких матеріалах може спостерігатися явище негативної рефракції об'ємних електромагнітних хвиль. Такі «лівосторонні» матеріали мають багато прикладних застосувань у фізиці, біології, астрономії, медицині. Результати дисертації мають інтерес як із загальнофізичної точки зору, так і з точки зору різних можливих застосувань, що роблять її тему безумовно **актуальною**.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи Кадигроба Д.В. підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наступних проєктів, які виконувались в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова 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.).

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів.

Перший розділ містить прекрасно написаний огляд літератури, в якому наведені результати відомих теоретичних і експериментальних робіт, що стосуються досліджуваних в дисертації проблем. Обговорюються електродинамічні властивості сильно анізотропних шаруватих надпровідників. Особливу увагу приділено поширенню в таких матеріалах електромагнітних коливань в терагерцовому діапазоні частот — так званих джозефсонівських плазмових хвиль. Наведені основні рівняння для поширення цих хвиль у шаруватих надпровідниках, які в наступних трьох розділах розв'язуються і аналізуються.

У **другому розділі** дисертації передбачено існування нової гілки в спектрі поверхневих хвиль у шаруватих надпровідниках, яка розташована вище так званої джозефсонівської плазмової частоти. Автором показано, що спектр поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль має не одну (як було відомо раніше), а дві гілки закону дисперсії, між якими є частотна щілина. Показано, що ця принципова особливість джозефсонівської плазми пов'язана з тим, що природа струмів вздовж і впоперек шарів різна. У роботі також встановлено, що саме в цьому частотному зазорі може спостерігатися явище негативної рефракції об'ємних електромагнітних хвиль шаруватого надпровідника. Таким чином, вперше показано, що два явища — поширення поверхневих хвиль і негативне заломлення об'ємних електромагнітних хвиль у шаруватому надпровіднику є в деякому відношенні додатковими по відношенню один до одного. Теоретично проаналізовано нову гілку закону дисперсії поверхневих хвиль (з частотою вище джозефсонівської плазмової частоти) і знайдені оптимальні умови для їх збудження. У цьому ж розділі також розв'язана задача про збудження поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль, що поширюються поперек надпровідникових шарів, як у випадку присутності, так і відсутності зовнішнього постійного магнітного поля. Запропоновано два методи збудження цих хвиль — призмовий метод та метод модуляції надпровідникових параметрів. Знайдені та проаналізовані оптимальні умови для збудження поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль, що поширюються поперек надпровідникових шарів, як у зовнішньому постійному магнітному полі, так і за його відсутністю. На прикладі цього аналізу можна побачити дуже високий рівень дисертації: явище вивчається і аналітично, і чисельно, наведені дуже якісні графічні зображення результатів, обговорюється фізичне обґрунтування процесу.

Третій розділ присвячений вивченню електромагнітних мод в обмежених шаруватих надпровідниках — пластинах скінченної товщини. Показано, що в пластині шаруватого надпровідника можуть існувати власні моди двох типів. Одні з них є поверхневими модами, поля яких експоненціально згасають від межі зразка, а у мод іншого типу електромагнітне поле осцилює поперек шарів (хвилеводні моди). Обидва типи хвиль характеризуються експоненціально загасаючим полем зовні пластини. І поверхневі, і хвилеводні власні джозефсонівські плазмові моди в пластині шаруватого надпровідника можуть бути симетричними або антисиметричними щодо середини зразка. Детально вивчено спектр власних

джозефсонівських плазмових мод, а також вирішено та проаналізовано задачу про збудження цих мод призмовим методом.

У четвертому розділі дисертації теоретично досліджені резонансні аномальні ефекти, що виникають при проходженні електромагнітних хвиль крізь періодично модульовану пластину шаруватого надпровідника внаслідок збудження власних мод. Детально розглянуто два часних випадки – товстої і тонкої пластини. У першому випадку передбачено явище посиленого проходження терагерцевого випромінювання крізь періодично модульовані пластини шаруватих надпровідників, обумовлене дифракцією падаючих хвиль і резонансним збудженням власних мод. Передбачається, що товщина пластини у багато разів перевищує глибину скін-шару, і у відсутності модуляції прозорість пластини дорівнює нулю з експоненціальною точністю. Показано, що у модульованій пластині електромагнітне поле переноситься від опроміненого боку до протилежного завдяки збудженню хвилеводних мод, що не згасають у глибину пластини, на відміну від металів, де явище посиленого проходження світла пов'язане зі збудженням поверхневих хвиль. В випадку тонких пластин розглянуто протилежний ефект, при якому прозорість модульованої тонкої пластини (з товщиною багато меншою глибини скін-шару) помітно зменшується за рахунок резонансного збудження власних мод.

Таким чином, в дисертаційній роботі шляхом аналітичного і чисельного розв'язання електродинамічних рівнянь (зв'язаних синусоїдальних рівнянь Гордона) для сильно анізотропних шаруватих надпровідників з урахуванням ефекту Джозефсона отримано ряд **нових** цікавих результатів. Зокрема показано, що властивості джозефсонівської плазми шаруватих надпровідників істотно відрізняються від властивостей інших провідникових середовищ, наприклад, металів — спектр поверхневих хвиль, що розповсюджуються уздовж напровідникових шарів має частотний зазор, в якому може спостерігатися явище негативної рефракції об'ємних електромагнітних хвиль шаруватого надпровідника. Вище цього частотного проміжку автором передбачена нова гілка поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль. В металах, наприклад, не має поверхневих хвиль, що розповсюджуються вище плазмової частоти, а як встановлено в дисертації — в шаруватих надпровідниках остання присутня. Тому ці результати надзвичайно цікаві і важливі для розробки нових пристроїв терагерцевого діапазону.

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 припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються чисельними розрахунками та якісними графічними зображеннями результатів. Більш того, за останній рік з'явилися експериментальні підтвердження (на

якісному рівні) деяких теоретичних результатів, що отримані в дисертації. Зокрема, це стосується четвертого розділу дисертації.

Практичне значення одержаних результатів, в першу чергу, пов'язано з можливим застосуванням шаруватих надпровідників у терагерцовій електроніці. Загалом, дослідження дисертаційної роботи доповнюють і розширюють існуючі уявлення про електромагнітні процеси у шаруватих надпровідниках, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Кадигроба Д.В. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна 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) У першому розділі (останній абзац п. 1.2.1.) вказано, що в дисертації розглядаються тільки лінійні явища. Бажано було б більш детально обґрунтувати і дати роз'яснення з приводу умов для застосування лінійного наближення та дати посилання.
- 2) При побудові графіків залежності коефіцієнтів проходження та відбиття в деяких випадках враховується дисипативний параметр для струму квазічастинок вздовж надпровідникових шарів, а в інших випадках цим параметром нехтують. При цьому в дисертації не наводиться доцільність цього знехтування.

Зазначені зауваження не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація прекрасно структурована і написана якісною науковою мовою. Основні результати опубліковані в 6 статтях, серед яких є роботи у таких відомих профільних журналах, як «Physical Review Letters», «New Journal of Physics», «Physical Review B» і «Фізика низьких температур». При цьому значний внесок в роботу належить особисто дисертанту. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи й автореферат повністю відображають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація Кадигроба Д.В. є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: розвинена теорія розповсюдження поверхневих і хвильоводних джозефсонівських плазмових електромагнітних хвиль у шаруватих надпровідниках (зокрема з частотами вище джозефсонівської плазмової частоти), а також передбачено ряд резонансних електромагнітних явищ, що супроводжуються збудженням цих хвиль у терагерцовому діапазоні.

Враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація задовольняє усім вимогам, які ставляться до кандидатських дисертацій МОН України, зокрема пунктам 9, 11 та 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а автор дисертації – Кадигроб Дмитро Васильович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика».

Офіційний опонент,

доктор фізико-математичних наук,

завідувач лабораторії чисельних

методів теоретичної фізики

Фізико-технічного інституту низьких

температур ім. Б.І. Веркіна НАН України

В.В. Славін

Підпис В.В. Славіна засвідчую.

Вчений секретар ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна

НАН України,

кандидат фіз.-мат. наук



О.М. Калиненко