

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Апостолова Станіслава Сергійовича

«Електромагнітний та електронний транспорт у надпровідних структурах»,

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

У зв'язку з розвитком сучасних технологій, надпровідність стає не тільки предметом фундаментальних досліджень, а й знаходить все більше прикладних застосувань від створення надпровідних електромереж, що можуть транспортувати струми надвисокої щільності, до використання надпровідних ланцюгів в якості елементів квантового комп'ютера. Окрім того, верхня границя критичної температури постійно підвищується, що додатково посилює інтерес до дослідження та розвинення теорії надпровідності.

З іншого боку, швидкий розвиток прикладної науки та винайдення нових високотемпературних надпровідників ставить перед теоретичною фізикою низку невирішених питань, як відносно природи такої надпровідності, так і стосовно нових ефектів, що виникають у надпровідних структурах. Саме це визначає **актуальність** теми дисертаційної роботи Апостолова С. С., яка присвячена дослідженню електромагнітного та електронного транспорту в структурах, що містять звичайні, високотемпературні та шаруваті надпровідники та топологічні ізолятори. У роботі передбачено низку лінійних та нелінійних транспортних ефектів у таких структурах, які виникають завдяки специфічним властивостям вказаних матеріалів. Зокрема, незвичне спарування надпровідних електронів у високотемпературних надпровідниках на основі заліза приводить до особливостей у ефекті Джозефсона, який виникає при з'єднанні таких надпровідників. Крім того, сильна анізотропія і нелінійність твердотільної плазми, яка формується у шаруватих надпровідниках, так звана джозефсонівська плазма, зумовлює такі цікаві ефекти, як самоіндукована прозорість, нелінійна крос-поляризація та резонансне збудження локалізованих хвиль з аномальною дисперсією. Враховуючи те, що електромагнітні хвилі у джозефсонівській плазмі розповсюджуються за терагерцових частот, можна стверджувати, що тема досліджень проведених у дисертації є безумовно **актуальною**.

Треба зазначити, що **актуальність** проведених у дисертації Апостолова С.С. досліджень підтверджується тим, що вони виконані в рамках наукових державних програм та проектів, 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 і 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.), «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» (номер державної реєстрації 0117U004038, термін виконання 2017–2021 рр.).

Дисертація Апостолова С.С. складається з семи розділів, перший з яких являє собою огляд літератури за темою дисертації, а у шести останніх викладено оригінальні результати.

Перший розділ містить прекрасно написаний огляд літератури, в якому наведені результати найбільш фундаментальних робіт інших авторів, тісно пов'язаних з питаннями, що вивчаються у дисертації. Подається короткий опис розвитку теорії надпровідності та деяких ефектів, які виникають у надпровідниках та надпровідних структурах, такі як ефект Джозефсона, ефект близькості, андреєвське відбиття. Також наводяться основні відомості про високотемпературні надпровідники. Особлива увага приділена незвичним властивостям джозефсонівської плазми, яка формується у сильно анізотропних шаруватих надпровідниках.

У другому розділі дисертації досліджено електронний транспорт у надпровідних структурах, які містять звичайні надпровідники, надпровідники з s^+ або s^{++} спаровуванням та двовимірні топологічні ізолятори. Автором дисертації було виявлено характерні особливості такого транспорту та запропоновано використовувати ці особливості, по-перше, для розмежування типу електронного спаровування у високотемпературних надпровідниках на основі заліза, а по-друге, для визначення ролей розсіювання, нормального та андреєвського відбиття в електронному транспорті у топологічному ізоляторі.

Наступні розділи дисертації присвячені дослідженню електромагнітного транспорту хвиль терагерцового діапазону у шаруватих надпровідниках. Завдяки сильній анізотропії та нелінійності джозефсонівської плазми, яка формується у таких надпровідниках, виникають цікаві лінійні та нелінійні ефекти. **У третьому розділі** передбачено ефект самоіндукованої прозорості зразка шаруватого надпровідника. Показано, що завдяки нелінійності коефіцієнт прозорості залежить від амплітуди хвилі, яка опромінює зразок. Змінюючи амплітуду хвилі можна досягти повної прозорості зразку. Треба зауважити, що відносно нещодавно цей ефект був якісно підтверджений у

експерименті, про що у дисертаційній роботі є коротке зауваження.

У четвертому розділі досліджується лінійний та нелінійний ефект крос-поляризації хвиль при проходженні крізь зразок шаруватого надпровідника. У лінійному випадку визначено два типи хвиль ортогональних поляризацій, що не зазнають крос-поляризації при опроміненні зразку. У нелінійному випадку показано, що саме для цих типів хвиль виконується специфічний принцип суперпозиції: вони відбиваються та проходять крізь зразок сильно анізотропного шаруватого надпровідника незалежним чином навіть при урахуванні нелінійності у джозефсонівській плазмі. Використовуючи цей принцип визначені умови найбільш ефективної крос-поляризації поперечно-електричних і поперечно-магнітних хвиль при проходженні через зразок шаруватого надпровідника.

У п'ятому розділі дисертації здобувачем передбачено аномальну дисперсію електромагнітних хвиль, які локалізовані на пластині шаруватого надпровідника. Показано, що внаслідок сильної анізотропії джозефсонівської плазми компоненти тензора діелектричної проникності можуть мати різні знаки у певному діапазоні частот, що й призводить до аномальної дисперсії локалізованих хвиль. Окрім того, передбачено існування несиметричних нелінійних локалізованих хвиль та можливість спостереження ефекту аналогічного “зупинці світла” у нелінійній оптиці.

Шостий розділ присвячений дослідженню резонансних ефектів, що виникають внаслідок збудження локалізованих електромагнітних хвиль у пластині шаруватого надпровідника. Передбачено, що завдяки аномальній дисперсії резонансна прозорість шаруватого надпровідника специфічним чином залежить від кута падіння хвилі, а нелінійність призводить до можливості спостереження вудівських аномалій при зміні амплітуди хвилі, що падає, а не лише частоти та кута падіння. Окрім того, у цьому розділі досліджено резонансну прозорість фотонного кристалу із дефектом у вигляді платини шаруватого надпровідника.

У сьомому розділі дисертації розроблено та застосовано новий метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту через шаруватий надпровідник за наявності незмінного у часі магнітного поля. Взаємодія електромагнітної хвилі з незмінним магнітним полем виникає за рахунок нелінійності джозефсонівської плазми, що суттєво відрізняє її від звичайної твердотільної плазми. Використовуючи розроблений метод, передбачено ряд нових явищ, які виникають у шаруватих надпровідниках, та показано, що таким магнітним полем можна контролювати транспортні характеристики шаруватих надпровідників.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики, а також підтверджується ретельно зробленими

розрахунками, наведеними у тексті. Низка одержаних результатів є точними або асимптотично точними розв'язками відповідних рівнянь та підтверджуються результатами чисельних розрахунків.

Практичне і наукове значення отриманих результатів пов'язано, в першу чергу, з тим, що ці результати доповнюють і розширюють наявні уявлення про електронний транспорт у ланцюгах, що містять звичайні та високотемпературні надпровідники, та про електромагнітний транспорт в шаруватих надпровідниках. Низка нових ефектів, які передбачені у дисертації, може бути використана при розробці приладів електроніки терагерцового діапазону, а методи, що запропоновані у роботі, можуть бути застосовані для подальшого теоретичного дослідження.

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), 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).

Усі результати, одержані в роботі, є безумовно новими. На мій погляд, **найбільш цікавими науковими результатами** можна вважати такі:

1) Вперше передбачено ефект самоіндукованої прозорості шаруватого надпровідника, який виникає внаслідок нелінійного зв'язку джоузефсонівського струму та калібрувально-інваріантної різниці фаз параметра порядку між шарами. Теоретично показано, що прозорість шаруватого надпровідника може змінюватися у широких межах від майже непрозорості до повної прозорості при варіюванні амплітуди падаючої хвилі.

2) Вперше сформульовано і обґрунтовано аналог принципу суперпозиції для нелінійних ДПХ, використання якого дає можливість проводити теоретичне дослідження нелінійного електромагнітного транспорту через сильно анізотропні шаруваті надпровідники. Такий принцип суперпозиції має місце завдяки різній фізичній природі струмів уздовж та поперек шарів. На основі цього принципу було передбачено явище крос-поляризації хвиль, що відбиваються від межі шаруватий надпровідник – вакуум. При цьому ступінь крос-поляризації залежить не тільки від кута падіння та частоти хвилі, а також від її амплітуди.

3) Вперше розроблено метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту через шаруватий надпровідник при його взаємодії з незмінним у часі магнітним полем. На базі цього методу теоретично

показано, що за допомогою такого магнітного поля можна контролювати ступінь прозорості шаруватого надпровідника, керувати ефектом крос-поляризації та змінювати дисперсійні характеристики локалізованих ДПХ.

Ці результати найбільш чітко показують суттєву різницю між електродинамічними властивостями звичайної твердотільної плазми та джозефсонівської плазми, що формується у шаруватих надпровідниках, та однозначно показують, що шаруваті надпровідники мають перспективи як для фундаментальної науки, так для прикладних застосувань.

За змістом дисертації можна зробити такі зауваження:

1) У більшості задач, які розв'язані у дисертації, вважається, що у шаруватих надпровідниках відсутня дисипація. Винятком є лише шостий розділ, в якому враховується квазічастинкова провідність. З огляду на можливий експеримент, було би добре провести коректне врахування дисипації також у ефектах самоіндукованої прозорості та крос-поляризації.

2) У першому розділі вказано, що ефект порушення електронейтральності шаруватого надпровідника потрібно враховувати для хвиль, які розповсюджуються строго поперек надпровідних шарів. Але у п'ятому розділі розглядаються локалізовані хвилі, які поширюються у пластині, надпровідні шари у якій перпендикулярні її поверхні, тобто поширюються поперек надпровідних шарів. На мою думку, треба детальніше обґрунтувати, чому в цьому випадку можна нехтувати порушенням електронейтральності.

3) У сьомому розділі автор використовує квазікласичний метод ВКБ (Вентцеля-Крамерса-Бриллюена) розв'язку рівнянь, при цьому вважається, що хвильове число достатньо велике. Однак отримані дисперсійні співвідношення (7.98) містять праву частину, позначену літерою β , якою потрібно знехтувати при великих значеннях хвильового числа. У зв'язку з цим виникає питання, чи правомірно використовувати дисперсійні співвідношення (7.98) для подальшого аналізу?

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертаційної роботи Апостолова С.С. Без сумніву, вона є завершеною науковою працею, що відкриває нове вирішення важливої наукової проблеми. Робота виконана на високому науковому рівні, побудована на ретельній і великій за обсягом роботі автора та в ній отримані нові обґрунтовані наукові результати. Основні результати дисертації викладено у 43 наукових працях, серед яких 22 статті у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях, що рецензуються, та 21 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях. Зміст автореферату вірно відбиває основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.02 - теоретична фізика.

Вважаю, що за своїм рівнем, обсягом досліджень, новизною та науковим значенням результатів дисертаційна робота Апостолова С.С. «Електромагнітний

та електронний транспорт у надпровідних структурах» повністю відповідає усім вимогам МОН України, що ставляться до докторських дисертацій, зокрема пунктам 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а 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, професор,
завідувача кафедри теоретичної ядерної фізики
та вищої математики ім. О.І. Ахієзера
Харківського національного університету
ім. В.Н. Каразіна

Ходусов В. Д.

Підпис *V. D. Khodusev*
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар Харківського національного
університету імені В.Н.Каразіна

