

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

АПОСТОЛОВ СТАНІСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 538.945, 537.876, 538.977

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ТА ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНСПОРТ
У НАДПРОВІДНИХ СТРУКТУРАХ**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків — 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України
Ямпольський Валерій Олександрович,
Інститут радіофізики та електроніки
імені О. Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу теоретичної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Філь Дмитро Вячеславович,
Інститут монокристалів НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу теорії конденсованого стану речовини;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Шевченко Сергій Миколайович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б. І. Веркіна НАН України, завідувач відділу
надпровідних і мезоскопічних структур;

доктор фізико-математичних наук, професор
Ходусов Валерій Дмитрович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна МОН України,
завідувач кафедри теоретичної ядерної фізики
та вищої математики імені О. І. Ахієзера.

Захист відбудеться «15» січня 2019 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

Автореферат розісланий «___» грудня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
канд. фіз.-мат. наук

Кірдин А. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні десятиліття надпровідники знаходять все більше застосування не тільки у науковій сфері, але й у нових галузях техніки, де надпровідні матеріали використовуються для створення надсильних магнітних полів, кабелів, здатних передавати великі потоки енергії без втрат, потужних електричних генераторів і двигунів. Все більшого значення набувають надпровідники в області мікро- та наноелектроніки як елементи приладів унікальної чутливості, заснованих на ефекті Джозефсона, болометрів, параметричних перетворювачів частоти, генераторів когерентного випромінювання та навіть класичного та квантового комп'ютерів. Особлива увага при цьому приділяється високотемпературним надпровідникам (ВТНП) з критичними температурами вище температур кипіння рідкого водню 20,28 К та рідкого азоту 77,4 К.

Окрім високих критичних температур, ВТНП мають деякі специфічні властивості, які роблять їх цікавим предметом для дослідження та можливого використання. По-перше, до теперішнього часу не існує послідовної теорії формування конденсату електронних пар у ВТНП. Дійсно, мікроскопічна теорія надпровідності передбачає критичну температуру не більше 30 К. З іншого боку, існують теорії, які передбачають критичну температуру у квазіодновимірних надпровідниках до 2000 К. Це викликає великий інтерес дослідників до розробки послідовної теорії, яка може відкрити шлях для створення надпровідників з критичної температурою вище кімнатних температур.

По-друге, усі ВТНП мають незвичний тип спаровування надпровідних електронів. Якщо для купратних ВТНП вважається експериментально встановленим, що спаровування має структуру так званого d -спаровування, то для відносно недавно відкритих ВТНП на основі заліза тип спаровування залишається остаточно не з'ясованим. Очікується, що найбільш ймовірний механізм, так зване s^{\pm} -спаровування, може призводити до деяких незвичних явищ, притаманних лише цьому типу спаровування.

Нарешті, важливим аспектом дослідження ВТНП є те, що в них формується особливий вид нелінійної анізотропної плазми. Це пов'язано зі специфічною кристалічною структурою ВТНП — тонкі надпровідні шари (з товщиною порядку 0,2 нм) чергуються з більш товстими діелектричними або металевими шарами (з товщиною порядку 2 нм), причому між надпровідними шарами виникає нелінійний зв'язок завдяки ефекту Джозефсона, що й визначає назву — джозефсонівська плазма. Нелінійність може призвести до ряду нетривіальних явищ, таких як самоіндукована прозорість та самофокусування світла, що представляють інтерес як для фундаментальної, так і для прикладної науки. Окрім того, електромагнітні хвилі, що можуть поширюватися у такій плазмі, так звані джозефсонівські плазмові хвилі (ДПХ), належать до важливого з прикладної точки зору терагерцового частотного діапазону, від $3 \cdot 10^{11}$ Гц до $3 \cdot 10^{13}$ Гц. В

даний час цей частотний діапазон все ще є важкодоступним для електронних і оптичних приладів, хоча має широкий спектр потенційних застосувань від неінвазивного зондування та томографії у медицині до контролю навколишнього середовища та використання у системах безпеки та комунікації.

Низка невирішених фундаментальних і прикладних проблем щодо електронного та електромагнітного транспорту у надпровідних структурах визначають важливість і актуальність досліджень, проведених в даній дисертації. Зокрема, досліджено електронний транспорт у системах, які містять сучасні метаматеріали, ВТНП на основі заліза і топологічні ізолятори, та виявлено характерні особливості такого транспорту. Також передбачено ряд лінійних та нелінійних транспортних ефектів при взаємодії терагерцових хвиль із купратними ВТНП, серед яких самоіндукована прозорість, явище крос-поляризації, резонансне збудження локалізованих ДПХ. Показано, що локалізовані ДПХ можуть мати аномальну дисперсію, що відкриває можливості спостерігати явище негативної рефракції та, завдяки нелінійності, явище, аналогічне «зупинці світла». Крім того, у дисертації розвинено метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту в шаруватому надпровіднику при його взаємодії з незмінним у часі магнітним полем, що має важливе прикладне значення для електроніки терагерцового діапазону.

Мета і завдання дослідження. Основна мета дисертаційної праці полягає у виявленні специфічних особливостей електронного транспорту у сучасних метаматеріалах, ВТНП на основі заліза та топологічних ізоляторах, з урахуванням ефектів Джозефсона та андреєвського відбиття, а також у побудові теорії електромагнітного хвильового транспорту у структурах, що містять шаруваті надпровідники, з урахуванням специфічних особливостей джозефсонівської плазми і в дослідженні різноманітних лінійних та нелінійних ефектів в таких структурах.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- модифікувати теорію ефекту близькості та ефекту Джозефсона для ланцюгів, що містять надпровідники із s^{\pm} -спаруванням, та виявити роль такого спарування у формуванні щільності електронних станів і залежності джозефсонівського струму від різниці фаз;
- дослідити явище багатократних андреєвських відбиттів, що виникає між двома надпровідниками, з'єднаними за допомогою двовимірного топологічного ізолятора, обчислити щільність електронних станів та з'ясувати вплив мікроскопічних процесів, зокрема, нормального відбиття та розсіювання, на електронний транспорт у двовимірному топологічному ізоляторі;
- побудувати теорію транспорту лінійних та нелінійних електромагнітних хвиль у шаруватому надпровіднику;
- дослідити явище самоіндукованої прозорості шаруватого надпровід-

ника;

- сформулювати та обґрунтувати аналог принципу суперпозиції для нелінійних хвиль у шаруватих надпровідниках;
- знайти дисперсійні рівняння для ДПХ, які локалізовані в пластині шаруватого надпровідника та поширюються під прямим кутом до надпровідних шарів, та визначити діапазони параметрів, за яких може спостерігатися аномальна дисперсія таких хвиль;
- дослідити резонансні ефекти, зокрема, резонансну прозорість та вудівські аномалії, що виникають при збудженні локалізованих ДПХ, та модифіковані за рахунок аномальної дисперсії та нелінійності;
- дослідити електромагнітний транспорт через фотонний кристал, який містить дефект у вигляді пластини шаруватого надпровідника;
- розвинути теорію електромагнітного транспорту у шаруватому надпровіднику при його взаємодії з незмінним у часі магнітним полем.

Об'єктом дослідження є транспортні електронні ефекти, що виникають у ланцюгах, що містять звичайні надпровідники, ВТНП на основі заліза та топологічні ізолятори, а також транспортні електромагнітні ефекти, що відбуваються при поширенні та збудженні лінійних та нелінійних ДПХ в сильно анізотропних шаруватих ВТНП.

Предметом дослідження є джозефсонівський струм, щільність електронних станів, коефіцієнти нормального та андреевського відбиття, лінійні та нелінійні ДПХ, поверхневий реактанс та прозорість шаруватого надпровідника, коефіцієнти крос-поляризації хвиль, дисперсія локалізованих ДПХ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертації задач були використані наступні методи теоретичної фізики: методи аналітичного рішення нелінійних диференціальних рівнянь, квазікласичний метод ВКБ (Вентцеля – Крамерса – Бриллюена) для розв'язання рівнянь з малим параметром при старшій похідній, методи знаходження міжшарової різниці фаз параметра порядку у шаруватому надпровіднику за допомогою вирішення системи зв'язаних калібрувальних інваріантних синусоїдальних рівнянь Гордона, метод трансфер-матриць для дослідження електромагнітного транспорту, метод обчислення функцій Гріна у надпровіднику за допомогою рівнянь Узаделя, метод обчислення коефіцієнтів андреевського та нормального відбиття за допомогою рівнянь Боголюбова – де Жена, метод інтегралу зіткнень у квантовомеханічному рівнянні Больцмана.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше отримано аналітичні вирази для залежності щільності електронних станів від енергії та співвідношення між струмом та різницею фаз у ефекті Джозефсона в ланцюгах, які включають звичайний надпровідник і надпровідник з s^{+-} або s^{++} -спаруванням, з'єднаних нормальним або фе-

ромагнітним дротом. Показано, що щільність станів демонструє особливості поблизу надпровідникових щілин при високих енергіях, а співвідношення між струмом та різницею фаз виявляє $0-\pi$ переходи для широкого діапазону параметрів. Такі специфічні ознаки можуть бути покладені в основу метода розмежування s^{+-} - та s^{++} -спарування у ВТНП на основі заліза в експерименті.

2. Вперше запропоновано модель електронного транспорту між двома надпровідниками, з'єднаними за допомогою двовимірного топологічного ізолятора зі спін-орбітальною взаємодією, в якій враховані ефекти багатократних андреевських та нормальних відбиттів, а також електрон-домішкового розсіювання. В рамках моделі вперше за допомогою рівнянь Боголюбова – де Жена отримано коефіцієнти нормального та андреевського відбиттів. Використовуючи цей результат, обчислено функції розподілу електронів за енергіями та визначено їх характерні особливості, які можуть бути використані для визначення ролей розсіювання та нормального відбиття в електронному транспорті у топологічному ізоляторі.

3. Вперше передбачено ефект самоіндукованої прозорості шаруватого ВТНП, який виникає внаслідок нелінійного зв'язку джозефсонівського 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.

4. 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.

5. Вперше розглянуто ефекти самоіндукованої прозорості та крос-поляризації для зразків шаруватих ВТНП як нескінченних, так і скінченних розмірів, що відповідає постановці можливого експерименту. При цьому показано, що ці ефекти, які передбачено для зразків нескінченних розмірів, можуть спостерігатися і у зразках скінченних розмірів, які розташовано у прямокутному хвилеводі.

6. Вперше показано, що ДПХ, локалізовані на пластині шаруватого надпровідника, надпровідні шари якого перпендикулярні поверхні пластини, можуть мати аномальну дисперсію. Вперше отримано дисперсійні рівняння як для лінійних локалізованих ДПХ у такій геометрії, так і для нелінійних, і тео-

ретично передбачено, що завдяки аномальній дисперсії у нелінійному випадку можливо спостерігати явище, аналогічне «зупинці світла» у нелінійній оптиці.

7. Вперше досліджено такі резонансні ефекти у шаруватих ВТНП, як посилення прозорості, що супроводжується збудженням локалізованих ДПХ з аномальною дисперсією, та пригнічення коефіцієнта відбиття (вудівські аномалії), що супроводжується збудженням нелінійних локалізованих ДПХ. Теоретично показано, що коефіцієнт прозорості проявляє незвичну залежність від кута падіння хвилі, пов'язану з аномальною дисперсією локалізованих ДПХ, а нелінійність призводить до можливості управління вудівськими аномаліями за рахунок зміни амплітуди хвилі.

8. Вперше теоретично досліджено електромагнітний транспорт через фотонний кристал, що містить дефект у вигляді пластини шаруватого надпровідника, надпровідні шари якого ортогональні шарам фотонного кристалу. Отримано дисперсійні співвідношення для електромагнітних мод, локалізованих на такому дефекті, та аналітичний вираз для коефіцієнта прозорості. Показано, що прозорість у забороненій зоні фотонного кристала може бути істотно посилена за рахунок резонансного збудження локалізованих мод.

9. 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.

Практичне і наукове значення отриманих результатів полягає в тому, що результати досліджень доповнюють і розширюють наявні уявлення про електронний транспорт у ланцюгах, що містять звичайні надпровідники та ВТНП, та про електромагнітний транспорт в шаруватих ВТНП. Зокрема, за допомогою ефекту Джозефсона запропоновано в експерименті відрізнити тип спаровування електронів у ВТНП на основі заліза. Також у дисертації розглянуті зразки шаруватих ВТНП скінченних розмірів та взаємодія незмінного у часі магнітного поля з джозефсонівськими плазмовими хвилями, що відповідає постановці можливого експерименту. З іншого боку, отримані у дисертації результати можуть бути використані при розробці приладів електроніки терагерцового діапазону. Наприклад, ефекти самоіндукованої і резонансної прозорості та крос-поляризації можуть бути використані у детекторах та фільтрах терагерцового випромінювання. У свою чергу, контроль за цими явищами за допомогою незмінного у часі магнітного поля може значно спростити налаштування таких приладів у заданий режим роботи. Це дуже важливо тому, що терагерцові технології мають безліч потенційно важливих практичних застосувань в різних областях, зокрема в системах безпеки, медичній діагностиці, контролі навко-

лишнього середовища. Відзначимо також, що у дисертації досліджені локалізовані електромагнітні хвилі та можливість керування їх поширенням за допомогою нелінійності та неоднорідного магнітного поля. Завдяки високій локалізації енергії такі хвилі можуть бути застосовані для управління приповерхневими фізико-хімічними процесами такими як фотокаталіз, літографія та ін.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, викладені в дисертації, отримані дисертантом самостійно. В дослідженнях, що виконувалися зі співавторами, здобувачеві належить визначальна роль у постановці задач, вирішених у дисертації, формулюванні основних ідей та методів дослідження, проведенні найбільш складних аналітичних і чисельних розрахунків, а також виконанні контролю та перевірки результатів, отриманих іншими співавторами.

У статті [1] здобувачем було запропоновано метод відокремлення двох різних типів електронного спаровування у ВТНП на основі заліза. Він показав, що щільність станів та джозефсонівський струм у ланцюгах, які включають такий ВТНП, може виявляти специфічні ознаки s^{++} - або s^{+-} -спаровування. У працях [2, 3] здобувачем запропоновано модель електронного транспорту у ланцюгу, що складається з надпровідників та двовимірного топологічного ізолятора, з урахуванням як андреевського, так і нормального відбиття на контактах та електрон-домішкового розсіювання. Зокрема, у статті [3] здобувач визначив величини коефіцієнтів андреевського та нормального відбиття на границі між надпровідником і топологічним ізолятором. На підставі запропонованої моделі здобувачем визначено характерні особливості, що можуть дозволити в експерименті визначати співвідношення ролей вказаних процесів.

У статтях [4, 5], які ввійшли у кандидатську дисертацію здобувача [1*], було отримано аналітичні вирази, що описують гістерезисну залежність фази електромагнітних хвиль, відбитих від пластини шаруватого ВТНП, від амплітуди хвиль, що падають симетричним чином на пластину. Для досить товстих пластин у статті [5] здобувачем розроблено підхід до вирішення зв'язаних синусоїдальних рівнянь Гордона, заснований на використанні нового класу розривних просторових розподілів калібрувально-інваріантної різниці фаз параметра порядку.

У статті [6] здобувачем показано, що ефект гістерезисної поведінки фази електромагнітної хвилі, відбитої від пластини шаруватого надпровідника, зберігається і у випадку однобічного опромінення пластини. У статтях [7, 8] здобувачем передбачено самоіндуковану прозорість пластини шаруватого надпровідника. Зокрема, ним показано, що, змінюючи амплітуду хвилі, можливо змінювати прозорість пластини у широкому діапазоні від практично нуля до одиниці, причому ефект самоіндукованої прозорості має місце як для нескінченних пластин [7], так і для зразків скінченного розміру, розташованих у хвилеводі [8].

У статті [9] здобувачем передбачено явище крос-поляризації при лінійному електромагнітному транспорті через зразок шаруватого надпровідника. Визначено типи хвиль, для яких можлива повна зміна поляризації на ортогональну. У статті [10] здобувачем сформульовано ідею і обґрунтовано специфічний аналог принципу суперпозиції для нелінійних ДПХ у шаруватих надпровідниках та запропоновано пояснення цього принципу, що базується на різній фізичній природі струмів уздовж та поперек шарів. У статті [11] здобувач запропонував використати вказаний принцип дослідження транспорту поперечно-електричних і поперечно-магнітних хвиль через шаруватий надпровідник та встановив, що ступінь крос-поляризації відбитої хвилі залежить від амплітуди падаючої хвилі.

В статтях [12, 13, 14] здобувачем отримані дисперсійні рівняння для лінійних [12], слабо лінійних [13] та сильно нелінійних [14] ДПХ, локалізованих у пластині шаруватого надпровідника. Ним показано, що у певному діапазоні параметрів такі ДПХ мають аномальну дисперсію. У статтях [13, 14] здобувачем показано, що оскільки дисперсійні співвідношення містять амплітуду хвилі, то виникає можливість спостерігати явище, аналогічне «зупинці світла» у нелінійній оптиці.

В статті [15] здобувачем досліджені вудівські аномалії у пластині шаруватого надпровідника, які виникають за рахунок резонансного збудження нелінійних локалізованих ДПХ. У статті [16] здобувачем досліджено ефект резонансної прозорості пластини шаруватого надпровідника та показано, що аномальна дисперсія локалізованих ДПХ призводить до незвичної залежності коефіцієнта прозорості пластини від кута падіння хвилі.

В статті [17] здобувачем за допомогою методу трансфер-матриць отримані дисперсійні рівняння для хвиль, локалізованих у фотонному кристалі на дефекті у вигляді пластини шаруватого надпровідника. У статті [18] здобувачем досліджено резонансне проходження електромагнітних хвиль крізь такий фотонний кристал, яке виникає за рахунок збудження хвиль, локалізованих на дефекті у вигляді пластини шаруватого надпровідника.

У статтях [19, 20, 21, 22] здобувачем розроблено метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту у зразку шаруватого надпровідника при взаємодії його з незмінним у часі магнітним полем. На основі цього методу ним показано, що за допомогою магнітного поля можна контролювати ступінь прозорості шаруватого надпровідника [20], керувати ефектом крос-поляризації [21] та змінювати дисперсійні характеристики локалізованих ДПХ [22]. Зокрема, у статті [20] здобувачем визначена величина магнітного поля, за якої пластини шаруватого надпровідника стає повністю прозорою. У статті [21] ним визначені умови повної крос-поляризації хвиль при відбитті від півнескінченного зразка, які взаємодіють з незмінним у часі магнітним полем. У статті [22] здобувач отримав та проаналізував дисперсійні рівняння для локалізованих ДПХ

за наявності магнітного поля, а також передбачив можливість внутрішнього відбиття ДПХ у неоднорідному магнітному полі.

Статті [8, 9, 10, 11, 19], окрім результатів, представлених у основних положеннях даної дисертації, містять результати, які були представлені у кандидатській дисертації Т. М. Рохманової [2*]. Результати, отримані Т. М. Рохмановою, не перетинаються з результатами, отриманими здобувачем. У статтях [8, 9, 10, 11, 19] здобувачем визначені основні методи та ідеї дослідження, зроблені принципові аналітичні розрахунки, виконаний контроль та перевірка результатів, отриманих співавторами, а також проведений аналіз та узагальнення результатів. У свою чергу, у статтях [8, 9, 10, 11, 19] Т. М. Рохманова виконувала аналітичні та чисельні розрахунки, а також проводила аналіз отриманих залежностей від параметрів задачі. Нижче більш детально викладено результати здобувача та результати Т. М. Рохманової.

У статті [8] здобувач розвинув ідею самоіндукованої прозорості для скінченного зразка шаруватого надпровідника, яка була раніше передбачена ним у статті [7] для нескінченної пластини. У статті [8] ним сформульований основний метод розв'язання синусоїдального рівняння Гордона, що базується на виразах для різниці фаз параметру порядку, яке здобувач перетворив у диференціальні рівняння з відповідними граничними умовами. У свою чергу, у статті [8] Т. М. Рохманова, використовуючи результати, отримані здобувачем у статтях [7, 8], знайшла коефіцієнт проходження нелінійних хвиль і провела аналіз його залежності від амплітуди падаючої хвилі, розв'язуючи чисельно вищевказані диференціальні рівняння з граничними умовами. На базі проведеного аналізу у статті [8] здобувачем виявлені умови для спостереження ефекту самоіндукованої прозорості та вибрані параметри, для яких побудовані відповідні графіки залежності прозорості від амплітуди падаючої хвилі.

У статті [9] здобувачем передбачене явище крос-поляризації при лінійному електромагнітному транспорті через зразок шаруватого надпровідника. Він запропонував розглянути декілька типів хвиль та проаналізував можливість повної крос-поляризації цих хвиль. У свою чергу, у статті [9] Т. М. Рохманова аналітично розрахувала коефіцієнти відбиття, проходження та трансформації лінійних хвиль, знайшла їх залежності від частоти та товщини зразка, а також зробила чисельний розрахунок цих коефіцієнтів.

У статті [10] здобувач сформулював та обґрунтував аналог принципу суперпозиції для нелінійних хвиль, який полягає в тому, що спеціальні типи електромагнітних хвиль не взаємодіють при транспорті через сильно анізотропний шаруватий надпровідник. Здобувач знехтував малим параметром анізотропії у рівняннях, що пов'язують електромагнітні поля у вакуумі та шаруватому надпровіднику, та отримав спрощені рівняння, що є обґрунтуванням вказаного принципу. Також у статті [10] здобувач запропонував пояснення цього принципу, що

базується на різній фізичній природі струмів уздовж та поперек шарів. У свою чергу, у статті [10] Т. М. Рохманова, використовуючи обґрунтований здобувачем аналог принципу суперпозиції, провела чисельне розв'язання задачі про трансформацію поляризації нелінійних хвиль і сформулювала оригінальний метод розв'язання задач відбиття, проходження та трансформації нелінійних хвиль з довільними поляризаціями у шаруватих надпровідниках.

У статті [11] здобувач запропонував використати вищевказаний принцип для дослідження транспорту поперечно-електричних і поперечно-магнітних хвиль через шаруватий надпровідник та встановив, що ступінь крос-поляризації відбитої хвилі залежить від амплітуди падаючої хвилі. У свою чергу, у статті [11] Т. М. Рохманова докладно описала проведене дослідження взаємної трансформації поперечно-електричних і поперечно-магнітних хвиль.

У статті [19] здобувачем розпочато розробку методу теоретичного дослідження електромагнітного транспорту у зразку шаруватого надпровідника при його взаємодії з незмінним у часі магнітним полем. Цей метод був у подальшому розвинутий здобувачем у статтях [20, 21, 22]. Здобувач представив різницю фаз у вигляді суми незмінної у часі та змінної складових, отримав рівняння, яке визначає розподіл змінної складової, та знайшов його аналітичний розв'язок. У свою чергу, у статті [19] Т. М. Рохманова, спираючись на розроблений здобувачем метод, отримала аналітичний вираз для коефіцієнту відбиття поперечно-магнітних хвиль при наявності зовнішнього магнітного поля та дослідила його залежність від параметрів задачі.

Таким чином, особистий внесок здобувача у вирішенні задач, поставлених у дисертації, є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на семінарах відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, кафедри теоретичної фізики ім. І.М. Ліфшиця Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, а також на наступних всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях та школах: 9-а та 13-а Міжнародні конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (Україна, Харків, 1-4 грудня 2009 та 5–8 грудня 2017); Міжнародна наукова конференція молодих вчених «Фізика низьких температур» МКМУ–ФНТ (Україна, Харків, 7–11 червень 2010); The international summer school nanotechnology: from fundamental research to innovations and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Ukraine, Bukovel, 25 August-1 September 2013); 13th and 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Ukraine, Kharkiv, 2-6 December 2013 and 14-17 October 2014); APS March Meeting (USA, Denver, Colorado, 3–7 March 2014, Baltimore, Maryland, 18–22 March 2013); 5th International Conference for Young Scientists “Low temperature physics” (Ukraine, Kharkiv, 2-6 June 2014);

International Conference of Physics Students (Germany, Heidelberg, 10-17 August 2014); Condensed matter in Paris 2014, CMD 25-JMC 14 (France, Paris, 24-29 August 2014); 58th Scientific Conference for Students of Physics and Natural Sciences (Lithuania, Vilnius, 24-27 March 2015); 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Ukraine, Kharkiv, 21-24 June 2016); International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2016 (Ukraine, Kharkiv, 10-14 October 2016); International Jubilee Seminar «Current problems in Solid State Physics» (Ukraine, Kharkiv, 22-23 November 2016); 17-та Всеукраїнська школа-семинар та Конкурс молодих вчених (Україна, Львів, 8-9 червня 2017); IEEE 17-th International conference on Mathematical methods in electromagnetic theory (Ukraine, Kyiv, 2-5 July 2018).

Зв'язок праці з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана у відділі теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України. Вона є складовою частиною наступних проєктів:

- науково-дослідна робота Відділення фізики та астрономії 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., виконавець);

- науково-дослідна робота Відділення фізики та астрономії НАН України “Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами” (номер державної реєстрації 0112U000211, термін виконання 2012 – 2016 рр., виконавець);

- цільова програма НАН України “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., виконавець);

- проєкт Державного фонду фундаментальних досліджень України “Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів” (номер державної реєстрації 0113U006217, термін виконання – 2013 р., виконавець);

- науково-дослідна робота Відділення фізики та астрономії НАН України “Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами” (номер державної реєстрації 0117U004038, термін виконання 2017 – 2021 рр., виконавець).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 43 наукових працях: у 22 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях та у 21 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів основного тексту з 86 рисунками, висновків, списку використаних джерел із 170 найменувань та одного додатку. Обсяг загального тексту дисертації складає 335 сторінок, з них список використаних джерел займає 19 сторінок, додаток займає 6 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, основні задачі та методи досліджень, представлено положення і результати роботи, їхню наукову новизну і практичне значення. Наведено також дані про апробацію результатів дисертаційної роботи, відзначено особистий внесок здобувача і описано структуру дисертації.

У **першому розділі** подано огляд літератури, обговорюються найбільш фундаментальні роботи інших авторів, тісно пов'язані з питаннями, що вивчаються в дисертації, висвітлено стан розглянутих проблем на момент написання дисертації та встановлено роль і місце досліджень, проведених дисертантом. Подається короткий опис розвитку теорії надпровідності та деякі ефекти, які виникають у надпровідниках та надпровідних структурах, такі як ефект Джоузефсона, ефект близькості, андреєвське відбиття. Також наводяться основні відомості про високотемпературні надпровідники (ВТНП).

Зокрема, зауважено, що усі ВТНП, по-перше, мають шарувату структуру, що зумовлює назву — шаруваті надпровідники, а по-друге, відрізняються від звичайних надпровідників незвичним спаровуванням надпровідних електронів. На відміну від звичайного s -спаровування, вважається експериментально встановленим, що спаровування в купратних ВТНП має структуру синглетного d -спаровування. Окрім того, тип електронного спаровування у ВТНП на основі заліза на даний час не визначений остаточно. Більшість дослідників вважають, що надпровідність у таких ВТНП може виникати за рахунок так званих s^{+-} -або s^{++} -спаровувань [3*]. Вищевказані види спаровування виникають тому, що ВТНП на основі заліза мають декілька незв'язаних поверхонь Фермі. Поблизу кожної поверхні Фермі виникає свій надпровідний конденсат. Якщо обидві надпровідні компоненти мають s -симетрію та зсув фази між ними дорівнює π , то такий вид носить назву s^{+-} -спаровування тому, що компоненти параметра порядку мають протилежні знаки. Якщо зсув відсутній, то маємо s^{++} -спаровування. Зазначимо, що теоретичні розрахунки показують, що вищевказані види спаровування можуть переходити один в інший при зміні ступеня легування. Тому одна з важливих задач, що виникає перед дослідниками — це постановка експерименту, що дозволив би вирізнити їх між собою.

З іншого боку, завдяки шаруватій структурі струмові властивості шаруватих

ВТНП виявляються анізотропними, причому не тільки за абсолютною величиною (струми вздовж надпровідних шарів в сотні разів перевищують струми впоперек шарів), але і за фізичною природою [4*]. А саме, густина струму вздовж надпровідних шарів, тобто вздовж кристалографічної площини \mathbf{ab} , має ту ж природу, що і струму в звичайних надпровідниках, і може бути описана в термінах лондонівської моделі $J_{\parallel} = -(c/4\pi\lambda_{ab}^2)A_{\parallel}$, де λ_{ab} — лондонівська глибина проникнення магнітного поля перпендикулярно надпровідним шарам та \vec{A} — векторний потенціал електромагнітного поля. Густина струму J_{\perp} поперек шарів, тобто вздовж кристалографічної осі \mathbf{c} , має іншу природу — вона є джозефсонівською, $J_{\perp} = J_c \sin \varphi$, де J_c — максимальна густина джозефсонівського струму, а φ — різниця фаз параметра порядку між шарами. Завдяки цьому електронна плазма, яка формується у шаруватих надпровідниках, отримала назву — джозефсонівська плазма.

Взаємодія джозефсонівського струму, що протікає впоперек шарів, з електромагнітним полем приводить до існування особливого виду елементарних збуджень — джозефсонівських плазмових хвиль (ДПХ). Такі збудження не мають аналогів в масивних надпровідниках і є характерною особливістю лише шаруватих надпровідних систем. Як і в звичайній плазмі, в спектрі джозефсонівських плазмових хвиль є щілина: ДПХ поширюються з частотами ω вище деякої критичної, так званої джозефсонівської плазмової частоти ω_J . Частоти поширення цих хвиль належать терагерцовому діапазону, що охоплює інтервал від 300 ГГц до 30 ТГц. Рівняння для ДПХ в шаруватому надпровіднику зводяться до системи так званих зв'язаних синусоїдальних рівнянь Гордона, яка у континуальному наближенні, коли довжина хвилі поперек шарів набагато більша за товщину шару, може бути записана у наступній формі:

$$\left(1 - \lambda_{ab}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \left[\frac{1}{\omega_J^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\omega_r}{\omega_J^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sin \varphi \right] - \lambda_c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

де $\lambda_c = c/\omega_J\sqrt{\varepsilon_s}$ має зміст лондонівської глибини проникнення магнітного поля вздовж шарів, а $\omega_r = 4\pi\sigma_c/\varepsilon_s$ — частота релаксації, обумовлена дисипативною провідністю σ_c квазічастинок поперек шарів, ε_s — проникність діелектричних шарів.

Нелінійність джозефсонівської плазми може призвести до ряду нетривіальних явищ, наприклад, таких як самоіндукована прозорість та самофокусування світла, що представляють інтерес як для фундаментальної, так і для прикладної науки. На відміну від нелінійної оптики, рівняння електродинаміки шаруватих надпровідників є нелінійними за рахунок нелінійного зв'язку $J \propto \sin \varphi$ джозефсонівського струму з міжшаровою різницею фаз параметра порядку φ . В сильно нелінійному режимі, коли $\varphi \sim \pi$, синусоїдальне рівняння Гордона має розв'язки у вигляді солітонів та бризерів. Однак навіть у випадку малих ам-

плітуд, коли $|\varphi| \ll 1$ і $\sin \varphi$ можна розписати як $\varphi - \varphi^3/6$, у шаруватих надпровідниках можуть сильно проявитись нелінійні ефекти. Зокрема, при частотах ω , близьких до джозефсонівської плазмової частоти ω_J , нелінійний член $\omega_J^2 \varphi^3$ в рівнянні (1) може мати той же порядок малості, що і сума лінійних членів:

$$\left| \frac{\partial \varphi^2}{\partial t^2} + \omega_J^2 \varphi \right| \simeq (\omega_J^2 - \omega^2) |\varphi| \sim \omega_J^2 |\varphi|^3.$$

Лінійні доданки практично компенсують один одного, а малий нелінійний член φ^3 може грати ключову роль у задачі. Таким чином, навіть слабка нелінійність може істотно впливати на поширення ДПХ, якщо частота хвиль близька до джозефсонівської плазмової частоти.

У **другому розділі** досліджено електронний транспорт у системах, що містять сучасні матеріали – ВТНП на основі заліза та двовимірні топологічні ізолятори. Основна увага при дослідженні приділяється можливості визначення мікроскопічних властивостей цих матеріалів за допомогою ефекту Джозефсона, ефекту близькості та багаторазового андреєвського відбиття у таких системах.

У першому підрозділі вивчено ефект близькості у ланцюгах, які включають звичайний надпровідник і ВТНП на основі заліза, розділені нормальним або феромагнітним дифузним дротом. Припускаючи, що ВТНП на основі заліза має s^{+-} - або s^{++} -спарування, у дисертації запропонована модель для дослідження ефекту близькості у таких системах. За допомогою рівнянь Узаделя з граничними умовами Купріянова – Лукічова, узагальнених на випадок двокомпонентного параметру порядку, обчислено аналітичні вирази для залежності щільності електронних станів у дроті від енергії та співвідношення між джозефсонівським струмом і різницею фаз в ефекті Джозефсона.

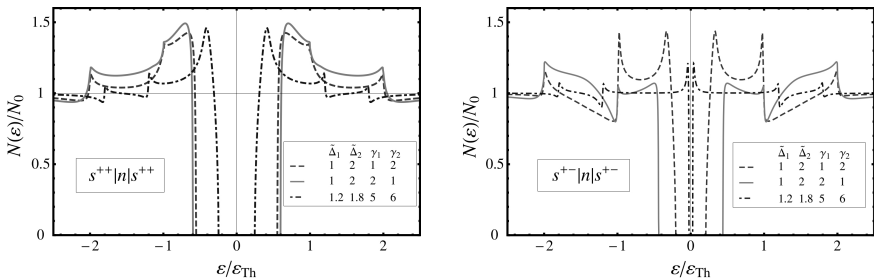


Рис. 1. Характерний профіль щільності електронних станів $N(\varepsilon)/N_0$ як функції енергії ε , нормованої на енергію Таулеса ε_{Th} , у середині дроту з нормального металу, що з'єднує два однакових надпровідника з s^{++} - (ліва панель) або s^{+-} -спаруванням (права панель). Параметри вказані в вставці, де $\tilde{\Delta}_{1,2} = \Delta_{1,2}/\varepsilon_{Th}$.

Показано, що залежність щільності станів від енергії демонструє так звану щілину Таулеса при низьких енергіях та особливості поблизу надпровідних щілин при більш високих енергіях, див. рис. 1. Поведінка щільності станів при

низьких енергіях у наведених ланцюгах схожа, але індукована енергетична щільність ε_g зменшується для ланцюга з s^{+-} -надпровідником за рахунок ефекту «анти-близькості»: дві компоненти параметру порядку, різниця фаз між якими дорівнює π , компенсують одна одну. Концептуальну різницю можна побачити поблизу надпровідних щілин $\Delta_{1,2}$, де замість піків для s^{++} -надпровідника виявляються Фано-подібні антисиметричні особливості для s^{+-} -надпровідника. Ця важлива деталь є специфічною для випадку s^{+-} симетрії і може слугувати відмінною рисою, яку можна шукати в експерименті за допомогою сканувальної тунельної спектроскопії.

Окрім того, співвідношення між струмом та різницею фаз для різних конфігурацій ланцюга виявляє $0-\pi$ переходи для широкого діапазону параметрів. Звідси випливає, що такий ланцюг може використовуватись як фазоінвертор в надпровідних схемах. Зауважимо, що така особливість поведінки джозефсонівського струму не є унікальною для надпровідників з s^{+-} -спаровуванням і може бути реалізована в інших складних гібридних схемах із звичайними надпровідниками.

У другому підрозділі досліджується електронний транспорт між двома надпровідними електродами, з'єднаними за допомогою двовимірного топологічного ізолятора, який визначається багатократними андреевськими відбиттями. У дисертації запропоновано модель електронного транспорту з урахуванням як андреевського, так і нормального відбиття на контакті, а також електрондомішкового розсіювання у топологічному ізоляторі, та обчислено функції розподілу f_{ε}^{\pm} електронів за енергією ε , де \pm позначає напрям руху електронів.

Зауважимо, що топологічні ізолятори — це нові матеріали, які не є звичайними ізоляторами та напівпровідниками [5*]. Вони являють собою ізолятори всередині та можуть проводити струм за рахунок специфічних крайових станів, аналогічних квантовому ефекту Холла. Такі крайові стани у двовимірному топологічному ізоляторі поширюються у взаємно протилежних напрямках і несуть протилежні спіни, що зумовило виникнення терміна — спіральні електронні стани. За рахунок симетрії обернення часу спіральні стани мають топологічний захист від пружного зворотнього розсіювання електрона на немагнітній домішці. Однак за наявності спин-орбітальної взаємодії відкривається новий канал для непружного розсіювання, а саме, зворотне розсіювання електрона на домішках без збереження імпульсу, що супроводжується збудженням електрон-діркової пари, яке і розглядається у запропонованій моделі.

По-перше, в рамках моделі за допомогою рівнянь Боголюбова — де Жена обчислено коефіцієнти $\mathcal{R}_{\varepsilon}$ та $\mathcal{A}_{\varepsilon}$ — нормального та андреевського відбиттів на границі надпровідника скінченної ширини та топологічного ізолятора із спин-орбітальною взаємодією відповідно. По-друге, розсіяння на домішках враховано за допомогою квантово-кінетичного рівняння Больцмана $df_{\varepsilon}^{\pm}(x)/dx =$

$\pm \lambda I_{\varepsilon}^{\pm}(x)/L$ з інтегралом зіткнень I_{ε}^{\pm} , який визначається вищезгаданим непружним процесом розсіювання електронів. Тут L – відстань між надпровідниками, λ – безрозмірний параметр, що визначає силу розсіювання. По-третє, на надпровідних контактах записані спеціальні граничні умови:

$$f_{\varepsilon \pm u}^{\mp}(\pm L/2) = \mathcal{A}_{\varepsilon}[1 - f_{-\varepsilon \pm u}^{\pm}(\pm L/2)] + \mathcal{R}_{\varepsilon} f_{\varepsilon \pm u}^{\pm}(\pm L/2) + \mathcal{T}_{\varepsilon} f_{\varepsilon}^0, \quad (2)$$

де $\mathcal{T}_{\varepsilon} = 1 - \mathcal{A}_{\varepsilon} - \mathcal{R}_{\varepsilon}$ позначає ймовірність електрона пройти наскрізь надпровідний контакт, $f_{\varepsilon}^0 = [1 + \exp(\varepsilon/T)]^{-1}$ – рівноважний розподіл Фермі, T – температура, $u = eV/2\Delta$, V – різниця потенціалів між контактами, Δ – надпровідна щільна.

Розв'язуючи рівняння Больцмана з граничними умовами (2), обчислено функції розподілу електронів за енергіями. На рис. 2 представлені залежності функції розподілу f_{ε}^{+} при нульовій температурі $T = 0$ (нижнє сімейство кривих, нижня та права шкали) та при кінцевій температурі $T = \Delta/50$ (верхнє сімейство кривих, верхня та ліва шкали), для надпровідних електродів з шириною $l/\xi = 4/3$ та напруги $eV = \Delta/2$.

Ненульове значення коефіцієнта нормального відбиття $\mathcal{R}_{\varepsilon}$ призводить до помітного зсуву розривів у функції розподілу в абсолютних величинах, але не в положеннях за енергією. Важливо відмітити, що наявність нормальних відбиттів призводить також до появи нових розривів, див. штрихову криву ($\gamma \neq 0$ та $\lambda = 0$) у порівнянні з пунктирною кривою ($\gamma = 0$ та $\lambda = 0$) на рис. 2. Це приводить до цікавого висновку, що, хоча специфічна структура функцій розподілу є наслідком процесів андреевського відбиття, процеси нормального відбиття роблять цю структуру більш чіткою.

Основна роль непружного розсіювання у топологічному ізоляторі полягає в тому, що розриви у функції розподілу дещо зменшуються. Якісно це схоже з ефектом розмиття при наявності температури, але це не призводить до замивання структури розривів, див. штрих-пунктирну криву ($\lambda \neq 0$ та $\gamma = 0$) у порівнянні з пунктирною кривою ($\lambda = 0$ та $\gamma = 0$) на рис. 2. В залежності від співвідношення між ефектами розсіювання та нормального відбиття у функції розподілу простежуються та чи інша вищезгадані особливості або їх комбінація, див. суцільну криву ($\lambda \neq 0$ та $\gamma \neq 0$) у порівнянні з іншими на рис. 2.

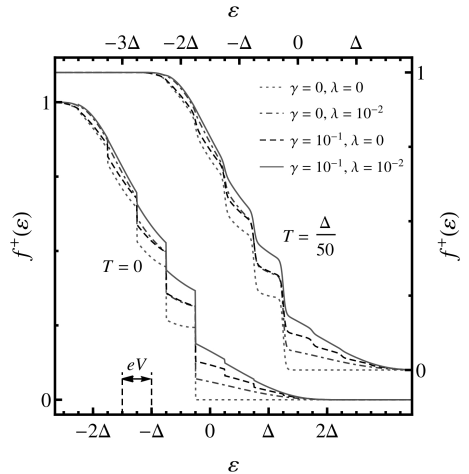


Рис. 2. Нерівноважні функції розподілу f_{ε}^{+} у випадку топологічного ізолятора зі спин-орбітальною взаємодією.

Досліджені особливості можуть бути покладені в основу методу визначення співвідношення вкладів від нормального відбиття на надпровідному контакті та від електрон-домішкового розсіювання у топологічному ізоляторі.

У **третьому розділі** досліджено проходження електромагнітних хвиль терагерцового діапазону крізь шаруваті надпровідники, коли частота хвиль близька до джозефсонівської плазмової частоти або частоти відсічення. У цьому випадку навіть слабка нелінійність, $J_c \sin \varphi \approx J_c(\varphi - \varphi^3/6)$, призводить до сильно нелінійних ефектів.

Розглянуто наступні конфігурації шаруватого надпровідника: нескінченна пластина та зразок скінченних розмірів, розміщений у вакуумному прямокутному хвилеводі. Вибрана така поляризація хвиль, яка не змінюється при проходженні та відбитті. Ефект крос-поляризації розглянутий у розділі 4. Передбачено, що прозорість шаруватого надпровідника може змінюватися в широкому діапазоні, від майже непрозорості до повної прозорості, при зміні амплітуди хвилі, що падає. Таким чином, зміна амплітуди може викликати повну прозорість шаруватого надпровідника, тобто спостерігається ефект самоіндукованої прозорості. Крім того, прозорість, так само як і поверхневий реактанс, залежить від амплітуди неоднозначним чином, що може призводити до гістерезисних стрибків між різними гілками цієї залежності.

У першому підрозділі передбачено ефект самоіндукованої прозорості для нескінченної пластини шаруватого надпровідника, шари якого паралельні граням пластини, див. рис. 3. Монохроматична електромагнітна плоска хвиля, що поширюється з частотою ω та поперечномагнітною (ТМ) поляризацією, коли магнітне поле напрямлено паралельно надпровідним шарам, падає на верхню поверхню пластини під кутом θ , частково відбивається і частково проходить крізь пластину.

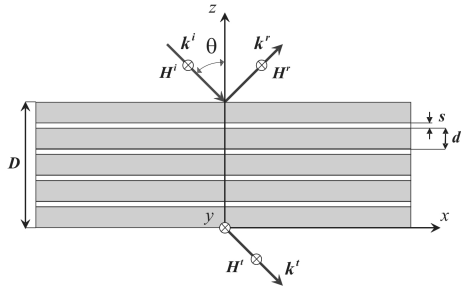


Рис. 3. Пластина шаруватого надпровідника, яка опромінюється з верхньої сторони електромагнітною хвилею ТМ-поляризації.

Для визначення залежності коефіцієнта прозорості від амплітуди треба визначити розподіл електромагнітних полів у системі. Він визначається за допомогою синусоїдального рівняння Гордона (1), в якому різниця фаз представлена у вигляді хвилі з невідомими амплітудою a та фазою η , які залежать від координати поперек пластини. Відповідні диференціальні рівняння для a та η повинні бути доповнені граничними умовами, які являють собою умови неперервності тангенціальних компонент електричного і магнітного полів на поверхнях пла-

стини. В результаті коефіцієнт прозорості може бути представлений у вигляді:

$$T = \frac{\lambda_{ab}\kappa}{\lambda_c\sqrt{\varepsilon_s}\cos\theta} \frac{\eta'h^2}{h_0^2}, \quad (3)$$

де $\kappa = \lambda_c k_x / |1 - \Omega^2|^{1/2}$ – нормована проекція k_x хвильового вектору вздовж шарів, $\Omega = \omega/\omega_J$ – нормована частота, h_0 – нормована амплітуда падаючої хвилі, $h = \pm a - a^3/8$ – безрозмірна амплітуда магнітного поля у шаруватому надпровіднику, а знак \pm відповідає знаку величини $(1 - \Omega)$.

Нелінійність рівняння Гордона (1) призводить до багатозначної залежності коефіцієнта прозорості від амплітуди хвилі, що падає. На рис. 4 представлена залежність коефіцієнту прозорості T від нормованої амплітуди h_0 хвилі, що падає під кутом $\theta = 45^\circ$, для деяких значень нормованої частоти: $\Omega = 1 - 5 \cdot 10^{-5}$ (суцільна крива), $\Omega = 1 - 5 \cdot 10^{-4}$ (штрихова крива), $\Omega = 1 - 5 \cdot 10^{-3}$ (пунктирна крива). На вставці показано збільшену область поблизу точки 1. На рис. 4 можна побачити дві особливості. По-перше, зміною амплітуди хвилі можна досягнути повної прозорості пластини (див. точку 5, де $T = 1$), а по-друге, залежність коефіцієнта прозорості від амплітуди хвилі має гістерезисний характер. Зауважимо, що такий характер залежності коефіцієнта проходження від амплітуди падаючої хвилі був недавно експериментально виявлений в роботі [6*].

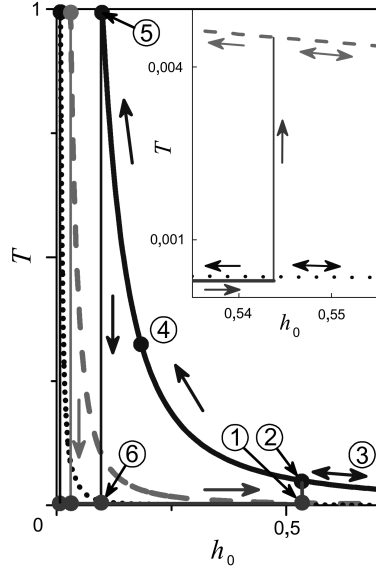


Рис. 4. Пластина шаруватого надпровідника, яка опромінюється з верхньої сторони електромагнітною хвилею ТМ-поляризації.

У другому підрозділі передбачено ефект самоіндукованої прозорості для зразків шаруватих надпровідників скінченного розміру, які розміщено у прямокутному хвилеводі. Розглянуто дві геометрії: шари надпровідника перпендикулярні чи паралельні осі хвилевода. У першому випадку результати якісно аналогічні результатам, отриманим у попередньому підрозділі для нескінченної пластини, і відрізняються лише кількісно. У другому випадку показано, що залежність коефіцієнта прозорості від амплітуди падаючої хвилі стає більш складною та має декілька гілок. Тим не менш, ця залежність є неоднозначною, що може призводити до гістерезисних стрибків між різними гілками цієї

залежності, та зміною амплітуди можливо досягти повної прозорості зразка шаруватого надпровідника.

У четвертому розділі досліджується лінійний та нелінійний електромагнітний транспорт хвиль довільної поляризації через зразок шаруватого надпровідника, розміщений у прямокутному хвилеводі, див. рис. 5.

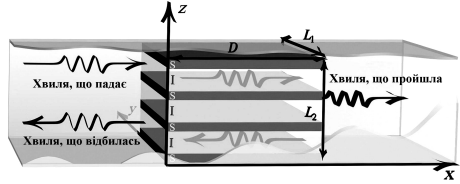


Рис. 5. Схематичне зображення скінченного зразку шаруватого надпровідника, який розміщено у прямокутному хвилеводі.

У лінійному випадку розглянуто декілька пар взаємно ортогональних поляризацій та досліджено ефект крос-поляризації цих хвиль при транспорті через шаруватий надпровідник. Виявлено, що для хвиль, поляризація яких узгоджена з віссю y , не відбувається крос-поляризація. А саме, хвиля, в якій магнітне поле перпендикулярно осі y , повністю відбивається від зразка шаруватого надпровідника тому, що викликає сильні струми екранування вздовж кристалографічної площини ab . Така хвиля отримала назву H_{\perp} -хвиля. У свою чергу, хвиля, в якій електричне поле перпендикулярно осі y , частково відбивається і частково проходить крізь зразок, не змінюючи своєї поляризації. Вона отримала назву E_{\perp} -хвиля.

Виявилось, що ці два типи хвиль грають важливу роль при дослідженні нелінійного транспорту через шаруваті надпровідники. У другому підрозділі сформульовано ідею своєрідного аналогу принципу суперпозиції: H_{\perp} - та E_{\perp} -хвилі відбиваються та проходять крізь зразок сильно анізотропного шаруватого надпровідника незалежним чином навіть при урахуванні нелінійності у джозефсонівській плазмі. Також у дисертації представлено обґрунтування цього принципу. Для цього в граничних умовах, що пов'язують електромагнітні поля у вакуумі та шаруватому надпровіднику, потрібно знехтувати малим параметром анізотропії λ_{ab}/λ_c . Отримані рівняння можуть бути розподілені на дві групи, кожна з яких незалежно визначає транспорт H_{\perp} - та E_{\perp} -хвиль, що і підтверджує обґрунтування принципу суперпозиції. Зауважимо, що завдяки цьому принципу вдається суттєво спростити дослідження нелінійного транспорту, оскільки для цього достатньо розкласти хвилю зада-

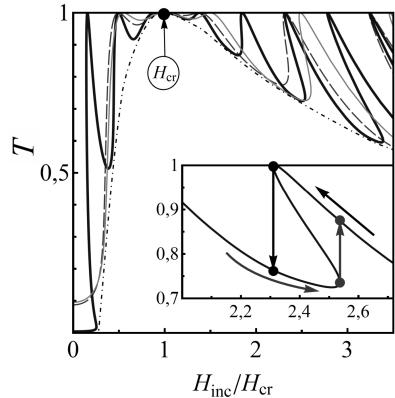


Рис. 6. Залежність коефіцієнта проходження T від нормованої амплітуди H_{inc}/H_{cr} падаючої E_{\perp} -хвилі для декількох значень товщини зразка. Параметри: $D = 30\lambda_c$ (суцільна товста крива), $D = 15\lambda_c$ (суцільна тонка крива), $D = 15\lambda_c$ (штрихова крива).

ної поляризації на суму H_{\perp} - та E_{\perp} -хвиль, потім дослідити транспорт кожної складової окремо, і, наприкінці, знову повернутися до заданої поляризації.

Як вже було зазначено, H_{\perp} -хвиля майже повністю відбивається від зразка шаруватого надпровідника, а E_{\perp} -хвиля частково проходить, а частково відбивається. На рис. 6 зображено залежність коефіцієнта проходження T від амплітуди E_{\perp} -хвилі, що падає, яка нормована на деяке критичне значення H_{cr} , вибране таким чином, щоб усі криві залежності мали спільну обвідну, позначену штрих-пунктирною лінією на рис. 6. Використовуючи цей результат та вищезазначений аналог принципу суперпозиції, у дисертації досліджено крос-поляризацію поперечно-електричних і поперечно-магнітних хвиль. Зокрема, визначені умови найбільш ефективної крос-поляризації.

Зауважимо, що сформульований принцип може бути застосований не лише для скінченного зразка шаруватого надпровідника у прямокутному хвилеводі, а і для нескінченного зразка у незмінному у часі магнітному полі, що і зроблено у дисертації, докладніше див. у розділі 7.

У **п'ятому розділі** досліджуються локалізовані ДПХ поперечно-магнітної поляризації, що можуть розповсюджуватися вздовж пластини шаруватого надпровідника, шари якого перпендикулярні границі пластини, див. рис. 7. Отримано дисперсійні співвідношення для лінійних, слабо нелінійних та сильно нелінійних локалізованих хвиль. Показано, що такі хвилі мають аномальну дисперсію у широкому діапазоні параметрів, та визначено умови, за яких їх групова швидкість обертається в нуль.

Дисперсійні криві $\Omega(\kappa)$ представлені на рис. 8, де $\Omega = \omega/\omega_J$ – нормована частота, а $\kappa = q\lambda_{ab}$ – нормована поздовжня проекція хвильового вектора. В області частот $1 < \Omega < \gamma$ дисперсійні криві складаються з двох частин: з нормальною, $\partial\Omega/\partial\kappa > 0$, та аномальною, $\partial\Omega/\partial\kappa < 0$, дисперсією. Це явище пов'язано з наступною властивістю шаруватих надпровідників. У вказаній області частот компоненти тензора ефективної діе-

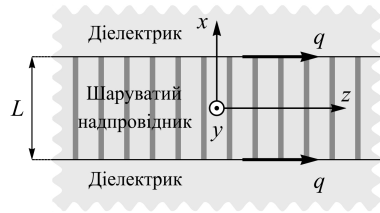


Рис. 7. Пластина шаруватого надпровідника, яка знаходиться в однорідному діелектричному оточенні, та вздовж якої може поширюватися локалізована хвиля з поздовжньою проекцією хвильового вектора q .

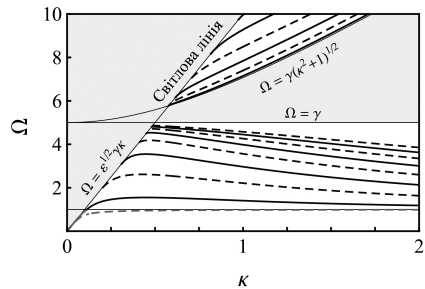


Рис. 8. Дисперсійні криві $\Omega(\kappa)$ для симетричних (суцільні криві) і антисиметричних (штрихові криві) локалізованих мод. Параметри: $\gamma = \lambda_c/\lambda_{ab} = 5$, $\epsilon_s/\epsilon_d = 4$, $L = \lambda_c$.

лектричної проникності мають різні знаки:

$$\varepsilon_{xx}(\omega) = \varepsilon_{yy}(\omega) = \varepsilon_s(1 - \gamma^2/\Omega^2) < 0, \quad \varepsilon_{zz}(\omega) = \varepsilon_s(1 - 1/\Omega^2) > 0. \quad (4)$$

У нелінійному випадку показано, що незважаючи на симетрію системи, у пластині можуть існувати як симетричні й антисиметричні, так і несиметричні за магнітним полем локалізовані моди. Такі моди характеризуються несиметричним розподілом електромагнітного поля поперек пластини. Причина існування таких мод пов'язана з специфічною нелінійністю джозефсонівської плазми: рівняння, яке визначає розподіл амплітуди поля поперек пластини, має вигляд рівняння для нелінійного осцилятора Дюффінга. Аналіз фазових траєкторій цього рівняння дозволив виявити несиметричні за магнітним полем локалізовані моди. Окрім того, у дисертації отримані дисперсійні співвідношення для нелінійних локалізованих хвиль в аналітичній формі з використанням еліптичних функцій Якобі. Показано, що оскільки дисперсійні співвідношення для нелінійних локалізованих мод містять амплітуду моди, то, разом із аномальною дисперсією, відкривається можливість для спостереження у шаруватих надпровідниках явища, аналогічного «зупинці світла» у нелінійній оптиці.

У шостому розділі досліджується резонансний електромагнітний транспорт через зразок шаруватого надпровідника, при якому збуджуються локалізовані ДПХ. Для дослідження таких явищ у дисертації розглядається конфігурація Отто, в якій пластина шаруватого надпровідника відокремлена від двох діелектричних призм вакуумними або просторовими проміжками, див. рис. 9.

У першому підрозділі розглянуто ефект резонансного пригнічення коефіцієнту відбиття (так звані вудівські аномалії) при опроміненні пластини шаруватого надпровідника симетричним чином двома плоскими електромагнітними хвилями, див. рис. 9. Хвилі поширюються в призмах так, що їх кути падіння θ перевищують кут θ_t повного внутрішнього відбиття. Згадані хвилі проникають у просторові проміжки та можуть збуджувати локалізовані ДПХ. Такий метод збудження відомий як метод порушення повного внутрішнього відбиття. Завдяки нелінійності джозефсонівської плазми коефіцієнт

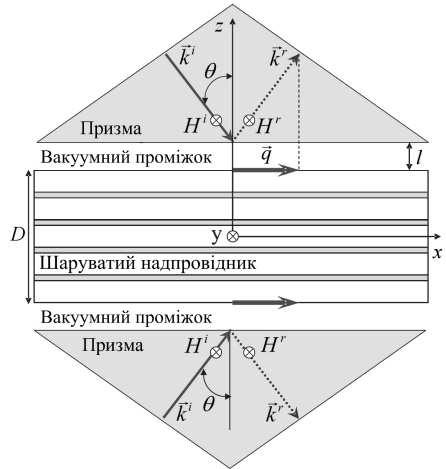


Рис. 9. Схематичне зображення системи, де пластина шаруватого надпровідника розташована між двома призмами та відділена від них просторовими проміжками.

відбиття залежить не тільки від частоти та кута падіння хвилі, але також і від її амплітуди. Показано, що повне пригнічення коефіцієнту відбиття може бути досягнуто шляхом відповідного вибору частоти, кута падіння й амплітуди хвилі.

У другому підрозділі досліджено ефект резонансної прозорості пластини шаруватого надпровідника, шари в якій перпендикулярні поверхні пластини. Для цього розглядається конфігурація Отто, аналогічна показаній на рис. 9, але електромагнітна хвиля опромінює систему лише з одного боку. У загальному випадку проходження хвилі через систему експоненційно пригнічено, оскільки у просторових проміжках хвиля згасає. Якщо частота і кут падіння хвилі такі, що у пластині збуджується локалізована ДПХ, то проходження хвилі резонансно посилюється. Окрім того, резонансна прозорість шаруватого надпровідника проявляє специфічні особливості, пов'язані з аномальною дисперсією локалізованих ДПХ: залежність коефіцієнта прозорості від кута падіння хвилі може мати як один резонансний пік, так і два резонансних піки, які з підвищенням частоти хвилі зливаються в широкий одиничний пік.

На рис. 10 градієнтом зображена залежність коефіцієнта прозорості T від кута падіння хвилі θ та нормованої частоти $\Omega = \omega/\omega_J$, де темніший тон відповідає більшому значенню T . Параметри такі ж, як на рис. 8. Суцільна крива зображує дисперсійну криву для локалізованої ДПХ. Рисунок 11 представляє криві залежності $T(\theta)$ для кількох значень частоти, позначених горизонтальними прямими на рис. 10. Кругок відповідає вершині широкого піку при θ_{\max} і $T_{\max} = 1$ на рис. 11 та точці θ_{\max} і Ω_{\max} на рис. 10.

Криві на рис. 11 показують зміну характеру залежності $T(\theta)$ при збільшенні частоти. Ця залежність має лише один відносно вузький резонансний пік з $T = 1$ в максимумі при менших значеннях частоти (див. штрих-пунктирну

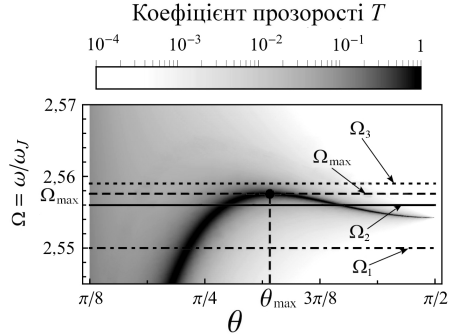


Рис. 10. Залежність коефіцієнта прозорості T від кута падіння θ та нормованої частоти $\Omega = \omega/\omega_J$.

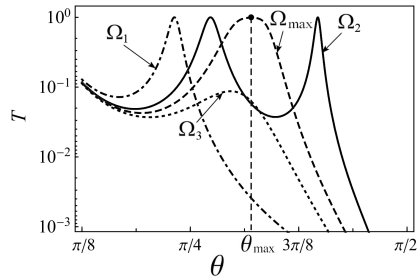


Рис. 11. Залежність коефіцієнта прозорості T від кута падіння θ для декількох значень частоти, відмічених на рис. 10.

криву на рис. 11 при $\Omega = 2,55$), який відповідає зростаючій частині дисперсійної кривої з нормальною дисперсією. При збільшенні частоти додатково до вказаного піку виникає другий вузький пік з $T = 1$, що відповідає аномальній дисперсії (див. суцільну криву на рис. 11 при $\Omega = 2,556$). Коли нормована частота досягає критичного значення $\Omega = \Omega_{\max}$, при якому на дисперсійній кривій є максимум, позначений кружком на рис. 10, два піки зливаються в один широкий пік з $T = 1$ (див. штрихову криву на рис. 11 при $\Omega = 2,5576$). Нарешті, при подальшому збільшенні частоти залежність $T(\theta)$ виявляється експоненційно пригніченою ($T \ll 1$) і не викликає збудження локалізованої хвилі (див. пунктирну криву на рис. 11 при $\Omega = 2,559$).

У третьому підрозділі представлено дослідження резонансної прозорості фотонного кристалу з дефектом у вигляді пластини шаруватого надпровідника. Розвиваючи метод трансфер-матриць, отримано дисперсійні співвідношення для електромагнітних мод, локалізованих на такому дефекті, та аналітичний вираз для резонансного коефіцієнта проходження. Показано, що збудження локалізованих на дефекті мод призводить до резонансного посилення коефіцієнта прозорості. Отримано спрощений аналітичний вираз для резонансного коефіцієнта прозорості і проведено чисельне моделювання.

У **сьомому розділі** розроблено метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту через шаруваті надпровідники за наявності незмінного у часі магнітного поля. У дисертації розглядається випадок відносно слабких магнітних полів, коли джозефсонівські вихори ще не проникають у зразок шаруватого надпровідника. Зауважимо, що таке слабе магнітне поле проникає у шаруватий надпровідник лише на глибину порядку λ_c . Наприклад, у півнескінченний зразок шаруватого надпровідника незмінне у часі магнітне поле величини $H_0 < \mathcal{H}_0$ проникає у вигляді «хвоста» джозефсонівського вихору:

$$\varphi_0(x) = 4 \arctg \left\{ \exp[-(x + x_0)/\lambda_c] \right\}. \quad (5)$$

Тут зразок займає область простору $x > 0$, надпровідні шари перпендикулярні границі зразка, $x_0 = \lambda_c \operatorname{arch}(\mathcal{H}_0/H_0)$ визначає положення центру фіктивного джозефсонівського вихору та $\mathcal{H}_0 = \Phi_0/\pi d \lambda_c$ — характерне магнітне поле. Тут $\Phi_0 = \pi \hbar c/e$ — квант магнітного потоку, d — період структури шаруватого надпровідника.

Розглядається геометрія, в якій кристалографічна вісь \mathbf{c} паралельна поверхні зразка, тобто надпровідні шари перпендикулярні цій поверхні. Саме в цьому випадку магнітне поле може мати суттєвий вплив на поширення джозефсонівських плазмових хвиль (ДПХ). Ідея методу полягає у тому, що калібрувально-інваріантну різницю фаз φ можна представити у вигляді суми незмінної у часі та змінної складових, $\varphi(\vec{r}, t) = \varphi_0(\vec{r}) + \varphi_w(\vec{r}, t)$, перша з яких відповідає розподілу магнітного поля у шаруватому надпровіднику, а друга — ДПХ. Незмінну

у часі компоненту $\varphi_0(x, z)$ потрібно знаходити зі стаціонарного синусоїдального рівняння Гордона. Після цього рівняння для змінної компоненти $\varphi_w(x, z, t)$ в лінійному наближенні може бути записано у наступному вигляді:

$$\left(1 - \lambda_{ab}^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \left[\frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial t^2} + \varphi_w \cos \varphi_0 \right] - \lambda_c^2 \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial x^2} = 0. \quad (6)$$

Це рівняння описує лінійну хвилю, що поширюється на просторово-неоднорідному фоні, визначеному $\varphi_0(\vec{r})$, тобто незмінним у часі магнітним полем. На базі цього методу показано, що за допомогою магнітного поля можна контролювати транспортні характеристики шаруватого надпровідника. Зокрема, у першому підрозділі показано, що в залежності від значень кута падіння і частоти хвилі включення магнітного поля може призводити як до збільшення, так і до зменшення прозорості зразку. Причому завдяки варіюванню величини магнітного поля прозорість пластини шаруватого надпровідника може змінюватися в широкому інтервалі значень, практично від непрозорості до повної прозорості.

У другому підрозділі досліджено ефект крос-поляризації електромагнітної хвилі при відбитті від поверхні півнескінченного шаруватого надпровідника за наявності незмінного у часі магнітного поля. Отримано аналітичні вирази для коефіцієнтів відбиття і крос-поляризації, а також визначено параметри, при яких відбувається найбільш ефективна крос-поляризація для поперечно-електричних та поперечно-магнітних хвиль. На рис. 12 показано градієнтом максимальне значення коефіцієнта крос-поляризації $R_-^{tm \rightarrow te}$ для падаючої поперечно-магнітної хвилі, яке можливо досягти вибором оптимального значення зовнішнього магнітного поля, як функцію кутів θ_1 і θ_2 . Середина чорної області на діаграмі представляє лінію значень коефіцієнта крос-поляризації $R_-^{tm \rightarrow te}$, рівних 1, що відповідає наступному співвідношенню між кутами θ_1 і θ_2 :

$$\cos \theta_2 = 1 / \sqrt{2 + \operatorname{tg}^2 \theta_1}. \quad (7)$$

З рівняння (7), видно, що повної крос-поляризації можна досягти при кутах $\theta_2 \geq \pi/4$. При значенні θ_2 , визначеному рівнянням (7), умова для частоти

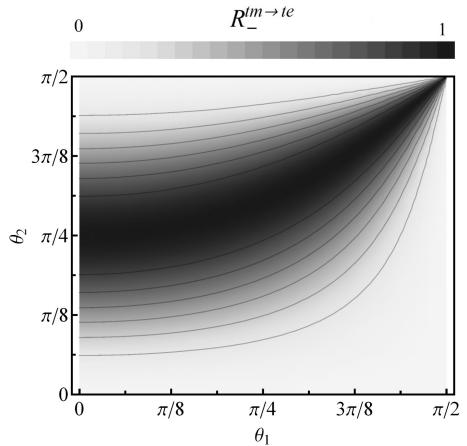


Рис. 12. Максимальний коефіцієнт крос-поляризації $R_-^{tm \rightarrow te}$ поперечно-магнітної хвилі (показаний градієнтом) в залежності від кута падіння θ_1 і кута повороту θ_2 площини падіння.

хвилі, при виконанні якої можливе повне перетворення поляризації, приймає вигляд:

$$\omega < \omega_J \left[1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\varepsilon_s (1 + \cos^2 \theta_1)} \right]^{-1/2}. \quad (8)$$

Таким чином, показано, що для заданих частоти ω і кута падіння θ_1 , що задовольняють умові (8), можна вибрати кут θ_2 повороту площини падіння з рівняння (7) і оптимальну величину зовнішнього магнітного поля, при яких коефіцієнт крос-поляризації дорівнює одиниці, тобто спостерігається повна крос-поляризація відбитої хвилі.

У третьому підрозділі проаналізовано вплив незмінного у часі магнітного поля на поширення ДПХ, локалізованих на пластині шаруватого надпровідника, яка розташована між двома діелектричними півпросторами та шари в якій перпендикулярні її границям. Отримано аналітичні вирази для дисперсійних співвідношень таких хвиль у квазікласичному наближенні та у точній формі в термінах спеціальних функцій Лежандра. Представлено чисельний аналіз впливу зовнішнього магнітного поля на дисперсію. Показано, що збільшення величини магнітного поля призводить до зсуву дисперсійних кривих у нижчі частоти, причому при високих і низьких частотах дисперсійні властивості локалізованих хвиль мають різний характер. При $\omega > \omega_J$ електромагнітне поле хвилі осцилює поперек пластини та магнітне поле лише злегка зміщує дисперсійні криві. При $\omega < \omega_J$ вплив магнітного поля є більш значущим: усі дисперсійні криві, що починаються при $\omega > \omega_J$, переходять в область низьких частот $\omega < \omega_J$ при відносно великих значеннях незмінного у часі магнітного поля.

Окрім того, показано, що в широкому діапазоні параметрів може спостерігатись аномальна дисперсія локалізованих ДПХ. Завдяки тому, що зміною магнітного поля можна контролювати дисперсію цих хвиль, відкривається можливість спостереження ефекту внутрішнього відбиття локалізованих хвиль, які поширюються у неоднорідному незмінному у часі магнітному полі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу задачу теоретичної фізики, а саме: виявлено специфічні особливості електронного транспорту у сучасних матеріалах, ВТНП на основі заліза та топологічних ізоляторах, з урахуванням ефектів Джозефсона та андреевського відбиття, а також побудована теорія електромагнітного хвильового транспорту у структурах, що містять шаруваті ВТНП, в яких формується специфічна анізотропна нелінійна джозефсонівська плазма, і досліджено ряд лінійних та нелінійних ефектів в таких структурах.

Основні результати дисертаційної роботи сформульовані в наступних поло-

женнях:

1. Досліджені ланцюги, які включають звичайний надпровідник і ВТНП на основі заліза, з'єднані нормальним або феромагнітним дротом. Для таких з'єднань отримані та проаналізовані вирази для залежності щільності електронних станів від енергії та співвідношення між джозефсонівським струмом та різницею фаз між надпровідниками. Зокрема, аналітичний результат для щільності станів демонструє особливості поблизу надпровідних щілин при високих енергіях, а співвідношення між струмом та різницею фаз виявляє 0- π переходи для широкого діапазону параметрів. Такі специфічні ознаки можуть бути використані в експерименті для розмежування s^{+-} - та s^{++} -спаровування у ВТНП на основі заліза.

2. Побудована модель електронного транспорту між двома надпровідниками, з'єднаними за допомогою двовимірного топологічного ізолятора зі спин-орбітальною взаємодією, в якій враховані як ефекти багатократних андреевських та нормальних відбиттів, так і електрон-домішкове розсіювання. На підставі цієї моделі за допомогою рівнянь Боголюбова – де Жена отримано коефіцієнти нормального та андреевського відбиттів. За допомогою рівняння Больцмана обчислено функції розподілу електронів за енергіями та визначено характерні особливості, що виникають в результаті зазначених процесів. Такі особливості можуть бути використані для визначення ролей розсіювання та нормального відбиття в електронному транспорті у топологічному ізоляторі.

3. Для шаруватих ВТНП передбачено ефект самоіндукованої прозорості, який виникає внаслідок нелінійного зв'язку джозефсонівського струму та калібрувально-інваріантної різниці фаз між шарами. Теоретично показано, що прозорість шаруватого надпровідника може змінюватися у широких межах від майже непрозорості до повної прозорості при варіюванні амплітуди падаючої хвилі. Крім того, прозорість, так само як і поверхневий реактанс шаруватого надпровідника, залежить від амплітуди неоднозначним чином, що може призводити до гістерезисних стрибків між різними гілками таких залежностей.

4. Сформульовано та 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. Окрім того, досліджено транспорт поперечномагнітних та поперечно-електричних хвиль через шаруватий надпровідник та показано, що ступінь крос-поляризації залежить не тільки від кута падіння та частоти хвилі, а також від її амплітуди.

5. Показано, що ефекти, передбачені для зразків та пластин нескін-

ченних розмірів, можуть спостерігатись і у зразках скінченних розмірів, розташованих у прямокутному хвилеводі, що краще відповідає постановці можливого експерименту. Зокрема, це показано для ефектів самоіндукованої прозорості та крос-поляризації.

6. Отримані та проаналізовані дисперсійні співвідношення для лінійних, слабо нелінійних та сильно нелінійних ДПХ, локалізованих на пластині шаруватого надпровідника, надпровідні шари якого перпендикулярні поверхні пластини. Показано, що такі ДПХ можуть мати аномальну дисперсію у широкому діапазоні параметрів. Передбачено, що завдяки аномальній дисперсії у нелінійному випадку можливо спостерігати явище, аналогічне «зупинці світла» у нелінійній оптиці.

7. Досліджені такі резонансні ефекти у шаруватих ВТНП, як посилення прозорості, що супроводжується збудженням локалізованих ДПХ з аномальною дисперсією, та пригнічення коефіцієнта відбиття (вудівські аномалії), що супроводжується збудженням нелінійних локалізованих ДПХ. Показано, що коефіцієнт прозорості проявляє незвичну залежність від кута падіння хвилі, яка пов'язана із аномальною дисперсією локалізованих ДПХ. Зокрема, передбачено існування двох резонансних піків цієї залежності та їх подальше злиття в широкий єдиний пік при збільшенні частоти хвилі. У свою чергу, нелінійність призводить до можливості керування вудівськими аномаліями за рахунок зміни амплітуди хвилі.

8. Досліджено терагерцовий електромагнітний транспорт через фотонний кристал, що містить дефект у вигляді пластини шаруватого надпровідника, надпровідні шари якого ортогональні шарам фотонного кристалу. За допомогою методу трансфер-матриць отримані дисперсійні співвідношення для електромагнітних мод, локалізованих на такому дефекті, та аналітичний вираз для коефіцієнта прозорості. Показано, що прозорість у забороненій зоні фотонного кристала може бути істотно посилена за рахунок резонансного збудження локалізованих мод, та отримано спрощений вираз для коефіцієнта прозорості поблизу резонансу.

9. Розроблено новий метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту через шаруватий надпровідник за наявності незмінного у часі магнітного поля. Цей метод базується на нелінійній взаємодії магнітного поля із джозефсонівською плазмою. За його допомогою теоретично показано, що таким магнітним полем можна контролювати транспортні характеристики шаруватих надпровідників. Зокрема, показано, що, варіюючи величину магнітного поля, можна змінювати прозорість пластини шаруватого надпровідника та ступінь крос-поляризації відбитої хвилі. Наявність незмінного у часі магнітного поля може призводити як до збільшення, так і зменшення цих транспортних характеристик. Визначено умови повної прозорості та повної крос-

поляризації. Теоретично показано, що за допомогою магнітного поля можна змінювати дисперсійні характеристики локалізованих електромагнітних мод. Це, разом із немонотонною дисперсією локалізованих мод, може призводити до ефекту внутрішнього відбиття у неоднорідному незмінному у часі магнітному полі.

Таким чином, усі поставлені завдання виконані, і мета дисертаційної роботи досягнута.

Одержані результати доповнюють і розширюють наявні уявлення про електронний транспорт у структурах, що містять звичайні надпровідники і ВТНП, та про електромагнітний транспорт в шаруватих ВТНП. Ці результати можуть бути використані при розробці електроніки терагерцового діапазону, що має потенційно важливі практичні застосування в різних областях, зокрема, в системах безпеки, медичній діагностиці, контролі навколишнього середовища. Наприклад, ефекти самоіндукованої та резонансної прозорості та крос-поляризації можуть бути використані у детекторах та фільтрах терагерцового випромінювання, а контроль цих явищ за допомогою незмінного у часі магнітного поля може значно спростити налаштування таких приладів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Apostolov S., Levchenko A. Josephson current and density of states in proximity circuits with s_{+-} superconductors. *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 86. P. 224501.
2. Apostolov S. S., Levchenko A. Nonequilibrium spectroscopy of topological edge liquids. *Phys. Rev. B*. 2014. Vol. 89. P. 201303.
3. Апостолов С. С. Многократное андреевское отражение в двухмерном топологическом изоляторе. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2015. Т. 1. С. 65–71.
4. Yampol'skii V. A., Slipchenko T. M., Mayzelis Z. A., Kadygrob D. V., Apostolov S. S., Savel'ev S. E., Nori F. Hysteretic jumps in the response of layered superconductors to electromagnetic fields. *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 78. P. 184504.
5. Apostolov S. S., Kadygrob D. V., Mayselis Z. A., Slipchenko T. M., Savel'ev S. E., Yampol'skii V. A. Hysteresis jumps of the surface reactance of a layered superconductor as the incident wave amplitude varies. *Low Temp. Phys.* 2010. Vol. 36, No. 1. P. 92–99.
6. Apostolov S. S., Bozhko A. A., Maizelis Z. A., Sorokina M. A., Yampol'skii V. A. Amplitude hysteresis of the surface reactance of a layered superconductor. *Low Temp. Phys.* 2016. Vol. 42, No. 4. P. 265–272.
7. Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Sorokina M. A., Yampol'skii V. A., Nori F. Self-induced tunable transparency in layered superconductors. *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 82. P. 144521.

8. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A., Nori F. Self-induced terahertz-wave transmissivity of waveguides with finite-length layered superconductors. *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88. P. 014506.
9. Apostolov S. S., Rokhmanova T. N., Khankina S. I., Yakovenko V. M., Yampol'skii V. A. Transformation of the polarization of THz waves by their reflection and transmission through a finite layered superconductor. *Low Temp. Phys.* 2012. Vol. 38, No. 9. P. 880–887.
10. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A., Nori F. Superposition principle for nonlinear josephson plasma waves in layered superconductors. *Phys. Rev. B*. 2014. Vol. 90. P. 184503.
11. Рохманова Т. Н., Апостолов С. С., Майзелис З. А., Ямпольский В. А. Нелинейная трансформация волн с различными поляризациями в ограниченных слоистых сверхпроводниках. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2015. Т. 2. С. 66–71.
12. Apostolov S. S., Havrilenko V. I., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Anomalous dispersion of surface and waveguide modes in layered superconductor slabs. *Low Temp. Phys.* 2017. Vol. 43, No. 2. P. 296–302.
13. Апостолов С. С., Кадыгроб Д. В., Майзелис З. А., Николаенко А. А., Шматько А. А., Ямпольский В. А. Нормальная и аномальная дисперсия слабонелинейных локализованных мод в пластине слоистого сверхпроводника. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22. С. 31–38.
14. Apostolov S. S., Kadygrob D. V., Maizelis Z. A., Nikolaenko A. A., Yampol'skii V. A. Nonlinear localized modes in a plate of a layered superconductor. *Low Temp. Phys.* 2018. Vol. 44, No. 3. P. 238–246.
15. Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Sorokina M. A., Yampol'skii V. A. Nonlinear Wood anomalies in the reflectivity of layered superconductors. *Low Temp. Phys.* 2010. Vol. 36, No. 3. P. 199–204.
16. Apostolov S. S., Makarov N. M., Yampol'skii V. A. Excitation of terahertz modes localized on a layered superconductor: Anomalous dispersion and resonant transmission. *Phys. Rev. B*. 2018. Vol. 97. P. 024510.
17. Apostolov S. S., Iakushev D. A., Makarov N. M., Shmat'ko A. A., Yampol'skii V. A. Terahertz transverse-magnetic-polarized waves localized on a layered superconductor defect in photonic crystals. *Радиофизика и электроника*. 2016. Vol. 21. P. 77–82.
18. Apostolov S. S., Makarov N. M., Yampolskii V. A. Resonant transparency of a photonic crystal containing layered superconductor as a defect. *Low Temp. Phys.* 2017. Vol. 43, No. 7. P. 848–854.
19. Рохманова Т. Н., Майзелис З. А., Апостолов С. С., Ямпольский В. А. Управление отражательной способностью слоистого сверхпроводника с по-

- мощью статического магнитного поля. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 19. С. 49–54.
20. Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Makarov N. M., Pérez-Rodríguez F., Rokhmanova T. N., Yampol'skii V. A. Transmission of terahertz waves through layered superconductors controlled by a dc magnetic field. *Phys. Rev. B*. 2016. Vol. 94. P. 024513.
 21. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Transformation of the polarization of the electromagnetic waves reflected from the layered superconductors in an external dc magnetic field. *Low Temp. Phys.* 2016. Vol. 42, No. 10. P. 916–923.
 22. Rokhmanova T., Apostolov S. S., Kvitka N., Yampol'skii V. A. Effect of a dc magnetic field on the anomalous dispersion of localized josephson plasma modes in layered superconductors. *Low Temp. Phys.* 2018. Vol. 44, No. 6. P. 552–560.
 23. Апостолов С. С., Сорокина М. А., Майзелис З. А., Слипченко Т. М., Ямпольский В. А. Гистерезисная амплитудная зависимость коэффициента прохождения электромагнитной волны через пластину слоистого сверхпроводника. *Фізичні явища в твердих тілах: матеріали 9-ї Міжнародної конференції* (м. Харків, 1–4 груд. 2009 р.). Харків, 2009. С. 41.
 24. Сорокина М. А., Апостолов С. С., Майзелис З. А., Ямпольский В. А. Self-induced transparency of layered superconductor. *Фізика низких температур: матеріали міжнародної научної конференції молодих учених* (г. Харків, 7–11 юнія 2010 г.). Харків, 2010. С. 62.
 25. Apostolov S., Levchenko A. Josephson current and density of states in proximity circuits with s_{+-} superconductors. *APS March Meeting 2013: Bulletin of the American Physical Society*, Baltimore, Maryland, USA, 18–22 March, 2013. Baltimore, 2013. P. M36.12.
 26. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Self-induced thz-waves transmissivity of waveguides with layered superconductors. *Nanotechnology and nanomaterials: Proceedings of the international summer school and practice conference*, Bukovel, Ukraine, 25 Aug – 1 Sept, 2013. Bukovel, 2013. P. 34.
 27. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Transformation of thz waves polarization via transmission through a finite slab of layered superconductor. *Nanotechnology and nanomaterials: Proceedings of the international summer school and practice conference*, Bukovel, Ukraine, 25 Aug – 1 Sept, 2013. Bukovel, 2013. P. 35.
 28. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Nonlinear thz-waves transmission through a finite-length layered superconductor placed inside a vacuum rectangular wave-guide. *Radiophysics, Electronics, Photonics and*

Biophysics: Proceedings of 13th Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, Ukraine, 2–6 December, 2013. Kharkiv, 2013. P. 17.

29. Apostolov S., Levchenko A. Nonequilibrium spectroscopy of topological edge liquids. *APS March Meeting 2014*: Bulletin of the American Physical Society, Denver, Colorado, USA, 3–7 March, 2014. Denver, 2014. P. A42.7.
30. Rokhmanova T. N., Maizelis Z. A., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Superposition principle for nonlinear waveguide modes in layered superconductors. *Low temperature physics – 2014*: Proceedings of 5th International Conference for Young Scientists, Kharkiv, Ukraine, 2–6 June, 2014. Kharkiv, 2014. P. 41.
31. Rokhmanova T. N., Maizelis Z. A., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Applying a dc magnetic field as a way to control the reflectance of layered superconductors. *ICPS 2014*: Proceedings of International Conference of Physics Students, Heidelberg, Germany, 10–17 August, 2014. Heidelberg, 2014. P. 22.
32. Rokhmanova T. N., Maizelis Z. A., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Superposition principle for nonlinear josephson plasma waves in layered superconductors placed inside a vacuum waveguide. *Condensed matter in Paris 2014*: Proceedings of the international conference, Paris, France, 24–29 August, 2014. Paris, 2014. P. 365–366.
33. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Applying a dc magnetic field as a way to control the reflectance of layered superconductors. *Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics*: Proceedings of 14th Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, Ukraine, 14–17 October, 2014. Kharkiv, 2014. P. 19.
34. Rokhmanova T. N., Maizelis Z. A., Apostolov S. S., Yampol'skii V. A. Transparency of finite-thickness layered superconductors controlled by dc magnetic field. *Open Readings 2015*: Proceedings of 58th Scientific Conference for Students of Physics and Natural Sciences, Vilnius, Lithuania, 24–27 March, 2015. Vilnius, 2015. P. 64.
35. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Shmat'ko A. A., Yampol'skii V. A. Effect of dc magnetic field on reflectivity of layered superconductors. *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*: Proceedings of 9th International Kharkiv Symposium, Kharkiv, Ukraine, 21–24 June, 2016. Kharkiv, 2016. P. 21.
36. Rokhmanova T. N., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Transmittance of thz waves through finite-thickness layered superconductors in the presence of external dc magnetic field. *Applied Physics and Engineering – 2016*: Proceedings of International Young Scientists Forum, Kharkiv, Ukraine, 10–14 October, 2016. Kharkiv, 2016. P. 23.

37. Апостолов С. С., Левченко А. А. Многократные андреевские и нормальные отражения в двумерном топологическом изоляторе. *Current problems in Solid State Physics: Proceedings of International Jubilee Seminar, Kharkov, Ukraine, 22–23 November, 2016. Kharkov, 2016. С. 13.*
38. Т. Н. Рохманова З. А. Майзелис, Апостолов С. С., Перес-Родригес Ф., Макаров Н. М., Ямпольский В. А. Отражение, прохождение и трансформация поляризации волн в слоистых сверхпроводниках. *Current problems in Solid State Physics: Proceedings of International Jubilee Seminar, Kharkov, Ukraine, 22–23 November, 2016. Kharkov, 2016. С. 40–41.*
39. Рохманова Т., Апостолов С. С. Керування прозорістю шаруватих надпровідників зовнішнім постійним магнітним полем. *ІФКС – 2017: матеріали 17-ї Всеукраїнської школи-семінару та Конкурсу молодих вчених (м. Львів, Україна, 8–9 червня 2017 р.). Львів, 2017. С. 17.*
40. A. A. Nikolaenko, A. A. Shmat'ko, S. S. Apostolov, Maizelis Z. A., Kadygrob D. V., Yampol'skii V. A. Weakly non-linear localized modes in layered superconductor plates. *Фізичні явища в твердих тілах: матеріали XIII міжнародної конференції (м. Харків, Україна, 5–8 грудня 2017 р.). Харків, 2017. Р. 37.*
41. Rokhmanova T., Apostolov S. S., Maizelis Z. A., Yampol'skii V. A. Dc magnetic field control of wave transformation in layered superconductors. *Фізичні явища в твердих тілах: матеріали XIII міжнародної конференції (м. Харків, Україна, 5–8 грудня 2017 р.). Харків, 2017. Р. 39.*
42. Apostolov S. S., Kadygrob D. V., Maizelis Z. A., Nikolaenko A. A., Yampol'skii V. A. Nonlinear localized waves in layered superconductors: Jacobi elliptic functions approach. *Mathematical methods in electromagnetic theory: Proceedings of IEEE 17-th international conference, Kyiv, Ukraine, 2–5 July, 2018. Kyiv, 2018. P. 177–180.*
43. Rokhmanova T., Apostolov S. S., Kvitka N., Yampol'skii V. A. Description of localized josephson plasma waves: Legendre functions vs WKB approximation. *Mathematical methods in electromagnetic theory: Proceedings of IEEE 17-th international conference, Kyiv, Ukraine, 2–5 July, 2018. Kyiv, 2018. P. 181–184.*

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Апостолов С. С. Електродинамічні й оптичні явища в нормальних і надпровідних наносистемах: дис. ... канд. фіз.-мат. наук / Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут». Харків, 2010. 113 с.
- 2*. Рохманова Т. М. Відбиття, проходження і трансформація електромагнітних хвиль у шаруватих надпровідниках скінченних розмірів: дис. ... канд. фіз.-

мат. наук / Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України. Харків, 2015. 142 с.

- 3*. Chubukov A. Pairing mechanism in Fe-based superconductors. *Annu. Rev. Con. Mat. Phys.* 2012. Vol. 3, No. 1. P. 57–92.
- 4*. Savel'ev S., Yampol'skii V. A., Rakhmanov A. L., Nori F. Terahertz josephson plasma waves in layered superconductors: spectrum, generation, nonlinear and quantum phenomena. *Rep. Prog. Phys.* 2010. Vol. 73, No. 2. P. 026501.
- 5*. Qi X.-L., Zhang S.-C. Topological insulators and superconductors. *Rev. Mod. Phys.* 2011. Vol. 83. P. 1057–1110.
- 6*. Dienst A., Casandru E., Fausti D. et al. Optical excitation of josephson plasma solitons in a cuprate superconductor. *Nature Mater.* 2013. Vol. 12, No. 6. P. 535–541.

АНОТАЦІЇ

Апостолов С. С. Електромагнітний та електронний транспорт у надпровідних структурах. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 – Фізика та астрономія). – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2019.

У дисертаційній роботі представлені результати дослідження електронного та електромагнітного транспорту у надпровідних структурах, що містять шаруваті надпровідники, високотемпературні надпровідники на основі заліза, звичайні надпровідники та топологічні ізолятори. Досліджено ряд лінійних та нелінійних ефектів в таких структурах та виявлено специфічні особливості вказаних матеріалів. Зокрема, дослідження електронного транспорту у системах, які містять такі матеріали, дозволило виявити характерні особливості, які можуть бути покладені в основу методів ідентифікації типів електронного спаровування у високотемпературних надпровідниках на основі заліза та співвідношення ролей нормального відбиття та електрон-домішкового розсіювання в топологічному ізоляторі. Окрім того, передбачено ряд транспортних ефектів при взаємодії терагерцових хвиль із шаруватими надпровідниками, серед яких самоіндукована прозорість, трансформація поляризації, резонансне збудження локалізованих електромагнітних хвиль. Показано, що локалізовані хвилі можуть мати аномальну дисперсію, що відкриває можливості спостерігати явища негативної рефракції та зупинки світла. Крім того, в дисертації розвинено метод теоретичного дослідження електромагнітного транспорту через шаруваті надпровідники, які взаємодіють з незмінним у часі магнітним полем, що має важливе фундаментальне і прикладне значення, зокрема, для електроніки тера-

герцового діапазону.

Ключові слова: ефект Джозефсона, андреевське відбиття, високотемпературний надпровідник, терагерцовий діапазон частот, поляризація, посилена прозорість, вудівські аномалії, локалізовані хвилі.

Апостолов С. С. Электромагнитный и электронный транспорт в сверхпроводящих структурах. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика» (104 – Физика и астрономия). — Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2019.

В диссертационной работе представлены результаты исследования электронного и электромагнитного транспорта в сверхпроводящих структурах, содержащих слоистые сверхпроводники, высокотемпературные сверхпроводники на основе железа, обычные сверхпроводники и топологические изоляторы. Исследован ряд линейных и нелинейных эффектов в таких структурах и выявлены специфические особенности указанных материалов. В частности, исследование электронного транспорта в системах, содержащих такие материалы, позволило выявить характерные особенности, которые могут быть положены в основу методов идентификации типов электронного спаривания в высокотемпературных сверхпроводниках на основе железа и соотношение ролей нормального отражения и электрон-примесного рассеяния в топологическом изоляторе. Кроме того, предусмотрен ряд транспортных эффектов при взаимодействии терагерцовых волн со слоистыми сверхпроводниками, среди которых самоиндуцированная прозрачность, кросс-поляризация, резонансное возбуждение локализованных электромагнитных волн. Показано, что локализованные волны могут иметь аномальную дисперсию, что открывает возможности наблюдать явления отрицательного преломления и остановки света. Кроме того, в диссертации развит метод теоретического исследования электромагнитного транспорта через слоистые сверхпроводники, взаимодействующие с постоянным во времени магнитным полем, что имеет важное фундаментальное и прикладное значение, в частности, для электроники терагерцового диапазона.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, андреевское отражение, высокотемпературный сверхпроводник, терагерцовый диапазон частот, поляризация, усиленная прозрачность, вудовские аномалии, локализованные волны.

Apostolov S. S. Electromagnetic and electronic transport in superconducting structures. — Manuscript copyright.

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics: Speciality 01.04.02 “Theoretical physics” (104 – Physics and Astronomy). – National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology” NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The Doctoral Thesis presents the results of the research on the electronic and electromagnetic transport in the superconducting structures containing the layered superconductors, the iron-based high-temperature superconductors, conventional superconductors and topological insulators. Some linear and nonlinear effects in such structures were studied and the specific features of these materials were identified.

In particular, the electronic transport in circuits, which includes a conventional superconductor and a iron-based high-temperature superconductor, connected by a normal or ferromagnetic wire, is studied. The obtained analytical result for the state density demonstrates features near the superconducting gaps at the high energies, while the relation between current and phase difference reveals $0-\pi$ transitions. Such specific features can be used in the experiment to distinguish s^{+-} - and s^{++} -pairing in the iron-based high-temperature superconductors.

The model of the electronic transport between two superconductors, connected by a two-dimensional topological insulator, which takes into account the effects of both multiple Andreev and normal reflections, as well as the electron-impurity scattering in the topological insulator, is introduced. In the framework of the model, the electron energy distribution functions are calculated and the characteristic features of these distribution functions caused by the above processes are determined. These features can allow to determine in the experiment the correlation between the normal reflection and the electron-impurity scattering in the electronic transport through the topological insulator.

The electromagnetic wave transport in the layered superconductors is studied. A special type of solid-state plasma, called the Josephson plasma, is formed in such superconductors. Due to the specific crystal structure of the layered superconductor this plasma is strongly anisotropic and nonlinear, because of the nonlinear Josephson relation between the superconducting layers. In such a plasma, the so-called Josephson plasma waves can propagate, which provide some non-trivial phenomena that are studied in the Thesis and are of interest for both fundamental and applied science.

The phenomenon of the self-induced transparency of the layered superconductors irradiated by the terahertz wave is predicted. It is shown theoretically that the transparency of the layered superconductor changes widely from the almost opacity to the total transparency varying the amplitude of the incident wave. In addition, the transmittance of a layered superconductor the amplitude in an ambiguous manner, which can lead to the hysteresis jumps between the different branches of these dependencies.

An analogue of the superposition principle for the nonlinear Josephson plasma waves has been formulated and proved. The use of this superposition principle allows to study theoretically the nonlinear electromagnetic transport through strongly anisotropic layered superconductors. On the basis of the principle, the phenomenon of the cross-polarization was studied.

It is shown that the effects predicted for the samples and plates of the infinite dimensions can also be observed for the finite samples located in a rectangular waveguide that match better a possible experimental setup. In particular, this is shown for the self-induced transparency and polarization transformation phenomena.

The dispersion relations for the linear, weakly nonlinear, and strong nonlinear electromagnetic modes localized on a plate of a layered superconductor, whose superconducting layers are perpendicular to the surface of the plate, are obtained and analyzed. It is shown that such modes may have anomalous dispersion over a wide range of parameters. It is predicted that in the nonlinear case the dispersion relations contain the amplitude of the localized mode that with anomalous dispersion opens up the possibility to observe a stop-light phenomenon.

The resonance effects involving excitation of the localized modes in the layered superconductors are studied. It is shown that the resonant transmittance have an unusual dependence on the angle of the incidence wave, which is related to the anomalous dispersion of the localized modes. In turn, the nonlinearity leads to the possibility of observing the resonance effects, like Wood anomalies, by changing not only the frequency and the incidence angle, but also the wave amplitude. Moreover, the resonant transmission through a photonic crystal containing a plate of a layered superconductor as a defect, whose superconducting layers are orthogonal to the layers of the photonic crystal, is studied. Using the transfer matrix method, it is shown that the transparency in the forbidden zone can be substantially enhanced by resonant excitation of the localized modes.

A new method for theoretical study of electromagnetic transport through a layered superconductor interacting with the DC magnetic field was developed. This method is based on the nonlinear interaction of the magnetic field with the Josephson plasma. The method shows the possibility to control the transport characteristics of the layered superconductors by means of such a magnetic field. In particular, it has been shown that the varying of the magnetic field magnitude can change the transparency of the layered superconductor plate and the cross-polarization degree of the reflected wave. The conditions of the total transparency and the total cross-polarization are determined. It is shown theoretically that it is possible to change the dispersion characteristics of localized electromagnetic modes by means of a magnetic field. That, together with the non-monotonic dispersion of localized modes, can lead to the effect of internal reflection in a non-homogeneous DC magnetic field.

Key words: Josephson effect, Andreev reflection, high-temperature superconductor, terahertz frequency range, polarization, enhanced transparency, Wood anomalies, localized waves.