

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

КАДИГРОБ ДМИТРО ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 538.945, 537.876, 538.9

**ПОВЕРХНЕВІ ТА ХВИЛЕВОДНІ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКІ
ПЛАЗМОВІ МОДИ У ШАРУВАТИХ НАДПРОВІДНИКАХ**

01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, м. Харків.

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

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Славін Віктор Валерійович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
ім. Б.І. Веркіна НАН України,
завідувач лабораторією чисельних методів
теоретичної фізики,

доктор фізико-математичних наук, професор
Шкловський Валерій Олександрович,
Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна, професор кафедри
теоретичної фізики ім. І.М. Ліфшиця.

Захист відбудеться «20» _____ червня _____ 2017 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 у Національному науковому центрі «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 «18» _____ травня _____ 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.845.02,
канд. фіз.-мат. наук



Кірдін А.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теорія поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ), що розповсюджуються уздовж межі метал-діелектрик, або, як їх ще називають в літературі, поверхневих плазмон-поляритонів, була побудована ще в минулому столітті. Науковий інтерес до вивчення таких хвиль пов'язаний з унікальними їх властивостями: можливістю значного посилення напруженості поля в ПЕХ і їх сильній просторовій локалізації. У металах ПЕХ можуть ефективно збуджуватися світлом на їх межах з діелектриками і істотно впливати на такі явища, як розсіяння світла адсорбованими на поверхні частинками, генерація другої гармоніки при дії лазерного випромінювання, зміна коефіцієнта прозорості металевих пластин, фотохімічні реакції, вудівські аномалії коефіцієнта дзеркального відбиття при дифракції світла на металевих ґратках.

Практичний інтерес до поверхневих електромагнітних збуджень обумовлений новими можливостями в спектроскопії, в мікроскопії надвисокого дозволу, а також в нелінійній оптиці. Висока локалізація поля в ПЕХ і можливості значного його посилення можуть бути використані при створенні нових ефективних джерел поля з розмірами багато меншими ніж довжина хвилі. Важливу і цікаву роль повинні грати ПЕХ в поверхневих і приповерхневих хімічних процесах. Оскільки поле ПЕХ максимальне на поверхні і швидко згасає по обидві сторони від неї, за допомогою ПЕХ можна проводити фотокаталітичні і фотохімічні реакції (наприклад, фотодисоціацію газу з осадженням одного з її продуктів на поверхню). Таким чином, фізику поверхневих поляритонів можна з упевненістю віднести до перспективних наукових напрямів.

В даний час одним з найбільш актуальних завдань представляється дослідження ПЕХ і резонансних ефектів, пов'язаних з їх збудженням, в шаруватих надпровідниках з метою з'ясування специфічних особливостей цих явищ. Існування і розповсюдження поверхневих мод в надпровідникових середовищах було теоретично передбачене відносно нещодавно. На відміну від металів, в шаруватих надпровідниках формується так звана джозефсонівська плазма, яка істотно відрізняється від плазми у звичайних провідникових середовищах. Для джозефсонівської плазми характерна сильна анізотропія електродинамічних властивостей: не тільки абсолютна величина, але і сама природа струмів вздовж і поперек надпровідникових шарів різна. На відміну від металів, де характерні власні частоти ПЕХ лежать в оптичному діапазоні, в шаруватих надпровідникових середовищах поверхневі хвилі можуть розповсюджуватися в терагерцовому діапазоні частот. В даний час цей частотний діапазон важкодоступний для електронних і оптичних приладів. Тому проблема створення генераторів, детекторів, фільтрів та інших пристроїв, що працюють в діапазоні частот від $3 \cdot 10^{11}$ Гц до $3 \cdot 10^{13}$ Гц, є актуальною і до цього дня.

Наявність невирішених проблем, пов'язаних з існуванням власних локалізованих мод в шаруватих надпровідниках, і резонансних ефектів, пов'язаних з їх збудженням, визначають важливість і актуальність проведених в роботі теоретичних досліджень. До таких ефектів відносяться, зокрема, вудівські аномалії коефіцієнта дзеркального відбиття терагерцових хвиль і посилення

прозорість модульованих надпровідникових пластин. Дуже важливо мати просту можливість управляти цими процесами. Тому в дисертації також досліджується можливість управління процесом збудження поверхневих хвиль за допомогою зовнішнього постійного магнітного поля. Саме це коло важливих завдань, які мають фундаментальне і прикладне значення, досліджується в даній дисертації, що робить її тему безумовно **актуальною**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України та є складовою частиною наступних проектів:

- науково-дослідна робота «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.);
- 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.);
- 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.);
- проект Державного фонду фундаментальних досліджень України «Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів» (номер державної реєстрації 0113U006217, термін виконання 2013 р.)

Мета і завдання дослідження. Основна мета дисертаційної роботи полягає в побудові теорії розповсюдження електромагнітних хвиль в шаруватих надпровідниках з урахуванням специфічних особливостей джозефсонівської плазми і в дослідженні різноманітних резонансних ефектів в таких структурах. Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- знайти дисперсійні рівняння для поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль (ДПХ), що розповсюджуються в напівнескінчених шаруватих надпровідниках з урахуванням струму зміщення уздовж шарів і розв'язати задачу про збудження цих хвиль методом порушеного повного внутрішнього відбиття (призмовий метод);
- модифікувати резонансну теорію збурень стосовно джозефсонівської плазми і використати цю теорію для дослідження дифракції електромагнітних хвиль на просторових неоднорідностях параметрів надпровідника як в присутності, так і у відсутності зовнішнього постійного магнітного поля;
- отримати дисперсійні рівняння для власних мод в пластині шаруватого надпровідника і дослідити процес їх збудження призмовим методом;
- побудувати теорію проходження електромагнітного випромінювання крізь періодично модульовані пластини шаруватих надпровідників;

- розв'язати задачу про проходження електромагнітних хвиль терагерцового діапазону крізь товсті і тонкі надпровідникові пластини (з товщиною багато більшою і багато меншою ніж глибина скін-шару).

Об'єктом дослідження є резонансні електромагнітні ефекти, що відбуваються при збудженні лінійних поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових мод в сильно анізотропних шаруватих надпровідниках.

Предметом дослідження є аномальне відбиття і проходження електромагнітних хвиль крізь шаруватий надпровідник, а також власні моди в пластині шаруватого надпровідника.

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 розв'язання системи пов'язаних калібровочно-інваріантних синусоїдальних рівнянь Гордона для міжшарової різниці фаз параметра порядку, метод резонансної теорії збурень стосовно задачі про збудження джозефсонівських плазмових хвиль в шаруватих надпровідниках, метод чисельного розв'язання нелінійних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримані загальні дисперсійні рівняння для поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль (ДПХ), що розповсюджуються в напівнескінченних шаруватих надпровідниках з урахуванням струму зміщення уздовж шарів. Вперше показано, що цей спектр має дві гілки. Раніше була відома тільки одна гілка спектру, що розташована нижче джозефсонівської плазмової частоти. Передбачена в дисертації нова гілка в спектрі поверхневих хвиль розташована вище джозефсонівської плазмової частоти.

2. Вперше встановлено, що в спектрі поверхневих ДПХ є частотна щілина, яка пов'язана з принциповою особливістю джозефсонівської плазми, а саме, з тим, що природа струмів вздовж і поперек надпровідникових шарів різна. Показано, що саме в цьому частотному проміжку може спостерігатися негативний коефіцієнт заломлення (negative refractive index) об'ємних хвиль. Таким чином, вперше показано, що два явища — розповсюдження поверхневих хвиль і негативне заломлення об'ємних електромагнітних хвиль в шаруватому надпровіднику виявляються в деякому відношенні додатковими по відношенню один до одного. Отримані рівняння, що дозволяють визначати оптимальні умови для збудження поверхневих ДПХ з частотами вище джозефсонівської плазмової частоти.

3. Модифікована резонансна теорія збурень стосовно сильно анізотропних середовищ, зокрема, стосовно джозефсонівської плазми. За допомогою цієї теорії вперше було вирішено задачу дифракції електромагнітних хвиль терагерцового діапазону на просторових неоднорідностях параметрів надпровідника як в присутності, так і у відсутності зовнішнього постійного магнітного поля. Вперше побудована теорія збудження поверхневих ДПХ, що розповсюджуються уперек надпровідних шарів, за допомогою призмового методу і методом модуляції

надпровідникових параметрів. Проведено теоретичний аналіз оптимальних умов збудження поверхневих ДПХ, що розповсюджуються упоперек надпровідникових шарів як у зовнішньому постійному магнітному полі, так і в його відсутності.

4. Передбачено, що в пластині шаруватого надпровідника можуть існувати власні моди двох типів. Одні з них є поверхневими модами, поля яких експоненціально згасають від межі зразка, а у мод іншого типу електромагнітне поле осцилює упоперек шарів. Вперше отримані і проаналізовані дисперсійні співвідношення для поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових мод в пластині шаруватого надпровідника в оптично м'якому і в оптично щільному оточеннях. Запропоновано призмий спосіб збудження цих мод і отримані рівняння для аналізу умов їх оптимального збудження.

5. Побудована теорія проходження електромагнітного випромінювання крізь періодично модульовані пластини шаруватих надпровідників. Передбачено явище аномальної прозорості товстих модульованих пластин (з товщиною багато більшою ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників в терагерцовому діапазоні частот, обумовлене дифракцією падаючих хвиль і резонансним збудженням власних хвилеводних мод. Вперше отримані та проаналізовані коефіцієнти відбиття і проходження терагерцового випромінювання крізь модульовану пластину шаруватого надпровідника, що знаходиться у вакуумі. Встановлено, що залежність коефіцієнта проходження від кута падіння хвилі має серію резонансних піків, що відповідають рівності хвильового вектору дифрагованої хвилі хвильовому вектору однієї з власних хвилеводних мод. Передбачено і проаналізовано протилежний ефект — резонансне зменшення прозорості тонких модульованих пластин (з товщиною багато меншою ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників, обумовлене резонансним збудженням власних мод.

Практичне і наукове значення одержаних результатів. Одержані в дисертації результати стосуються теоретичних досліджень власних електромагнітних мод в шаруватих надпровідниках в терагерцовому діапазоні частот. Розуміння фізики процесів збудження і поширення таких хвиль у шаруватих надпровідникових середовищах сприятиме створенню нового класу пристроїв терагерцового діапазону, таких як детектори, аналізатори спектру, фільтри і т.д.

Особистий внесок здобувача визначається тим, що він брав активну участь у проведенні всіх аналітичних і чисельних розрахунків, наведених у дисертації. У статті [1] здобувачем передбачено існування нової гілки в спектрі поверхневих хвиль, яка розташована вище джозефсонівської плазмової частоти. Показано, що спектр поверхневих ДПХ має щілину, яка пов'язана з принциповою особливістю джозефсонівської плазми, а саме, з тим, що природа струмів вздовж і поперек шарів різна. У роботі [2] здобувачем були отримані і проаналізовані рівняння для поверхневих ДПХ, що розповсюджуються упоперек надпровідних шарів. Знайдено оптимальні умови для збудження цих мод методом модуляції одного з параметрів, що входять в рівняння електродинаміки шаруватих надпровідників. У статті [3] здобувачем передбачено, що в пластині шаруватого надпровідника можуть існувати власні моди двох типів (поверхневі і хвилеводні). Знайдено

дисперсійні співвідношення для поверхневих і хвильоводних джозефсонівських плазмових мод в оптично м'якому і оптично щільному оточеннях. Вирішено задачу про збудження хвильоводних мод призмовим методом. Проаналізовано і знайдено оптимальні умови для збудження цих мод. У статтях [4,5] здобувачем передбачено явище аномальної прозорості товстих модульованих пластин (з товщиною багато більшої ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників в терагерцовому діапазоні частот. З цією метою автором був модифікований метод резонансної теорії збурень стосовно випадку сильно анізотропної джозефсонівської плазми. Знайдені коефіцієнти відбиття і проходження терагерцового випромінювання крізь модульовану пластину шаруватого надпровідника. Побудовані залежності коефіцієнта проходження від кута падіння хвилі. У роботі [6] здобувачем передбачено і проаналізовано протилежний ефект резонансного зменшення прозорості тонких модульованих пластин (з товщиною багато меншої ніж глибина скін-шару) шаруватих надпровідників, обумовлений резонансним збудженням власних мод.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися дисертантом на семінарах відділу теоретичної фізики ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, кафедри теоретичної фізики ім. І.М. Ліфшиця ХНУ ім. В.Н. Каразіна, а також на наступних наукових конференціях:

- 9th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Ukraine, Kharkiv, December 1-3, 2009);
- Міжнародний Ювілейний Семінар «Сучасні проблеми фізики твердого тіла», присвячений пам'яті члена-кореспондента НАН України Е.А. Канера і 55-річчю відкриття циклотронного резонансу у металах (Харків, 2011);
- 11th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Ukraine, Kharkiv, November 29 - December 1, 2011);
- X-та міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 6-9 грудня, 2011);
- International Workshop in celebration of 80-th Birthday of Victor V. Eremenko «Critical Phenomena under Extreme Impact», (Ukraine, Kharkiv, September 10-13, 2012);
- Young scientists conference «Problems of Theoretical Physics» (Ukraine, Kyiv, October 23-26, 2012);
- 12th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Ukraine, Kharkiv, December 4-7, 2012);
- 13th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Ukraine, Kharkiv, December 2-6, 2013);
- XI-та міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 3-6 грудня, 2013).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 15 наукових працях: 6 статей у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях [1-6] та 9 тез доповідей наукових конференцій [7-15].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний об'єм роботи складає 130 сторінок. Вона містить список використаних джерел з 122 найменувань на 14 сторінках та 28 рисунків в тексті.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено мету й задачі досліджень та методи їх досягнення, сформульовано основні положення і результати роботи, обговорена наукова новизна отриманих результатів і їх практичне значення, наведено дані про особистий внесок дисертанта, апробацію результатів роботи і описано структуру дисертації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений огляду літератури. У ньому наведені результати відомих теоретичних і експериментальних робіт, що стосуються досліджуваних в дисертації проблем. Описано історію розвитку високотемпературної надпровідності, обговорюються електродинамічні властивості сильно анізотропних шаруватих надпровідників. Особливу увагу приділено поширенню в таких матеріалах електромагнітних коливань в терагерцовому діапазоні частот — так званих джозефсонівських плазмових хвиль.

У розділі наведені основні рівняння електродинаміки шаруватих надпровідників. Зокрема, дається вивід зв'язаного синусоїдального рівняння Гордона, яке у континуальному наближенні має вигляд:

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

де φ — міжшарова калібровочно-інваріантна різниця фаз параметру порядку; ω_J — джозефсонівська плазмова частота; λ_{ab} і λ_c — лондонівські глибини проникання магнітного поля поперек і вздовж шарів, відповідно; $G = 1 - i v_{ab} \Omega - \Omega^2 \lambda_{ab}^2 / \lambda_c^2$; $\Omega = \omega / \omega_J$; v_{ab} та v_c — частоти релаксації, які обумовлені дисипативною провідністю квазічастинок вздовж і поперек шарів, відповідно; вісь z направлена поперек надпровідних шарів. У розділі зазначено, що у шаруватих надпровідниках крім об'ємних ДПХ можуть існувати і поверхневі хвилі. Електромагнітне поле таких хвиль локалізовано поблизу межі розділу двох середовищ і загасає по обидва боки від неї. Відповідні частоти цих коливань належать до терагерцового діапазону. У лінійному наближенні φ може бути виключено з системи рівнянь, яка включає синусоїдальне рівняння Гордона (1) та рівняння Максвелла. В цьому випадку електромагнітні властивості шаруватого надпровідника можуть бути описані в термінах анізотропного частотно-залежного тензора діелектричної проникності, діагональні компоненти якого поперек і вздовж шарів мають наступний вигляд:

$$\varepsilon_c(\Omega) = \varepsilon \left(1 - \frac{1}{\Omega^2} + i v_c \frac{1}{\Omega} \right), \quad \varepsilon_{ab}(\Omega) = \varepsilon \left(1 - \frac{1}{\Omega^2} \gamma^2 + i v_{ab} \frac{1}{\Omega} \gamma^2 \right), \quad (2)$$

де ε — діелектрична проникність міжшарових проміжків, $\gamma = \lambda_c / \lambda_{ab} \gg 1$. Реальні частини проникностей $\varepsilon_c(\Omega)$ і $\varepsilon_{ab}(\Omega)$ в частотному діапазоні $\omega_J < \omega < \omega_J \gamma$ (або

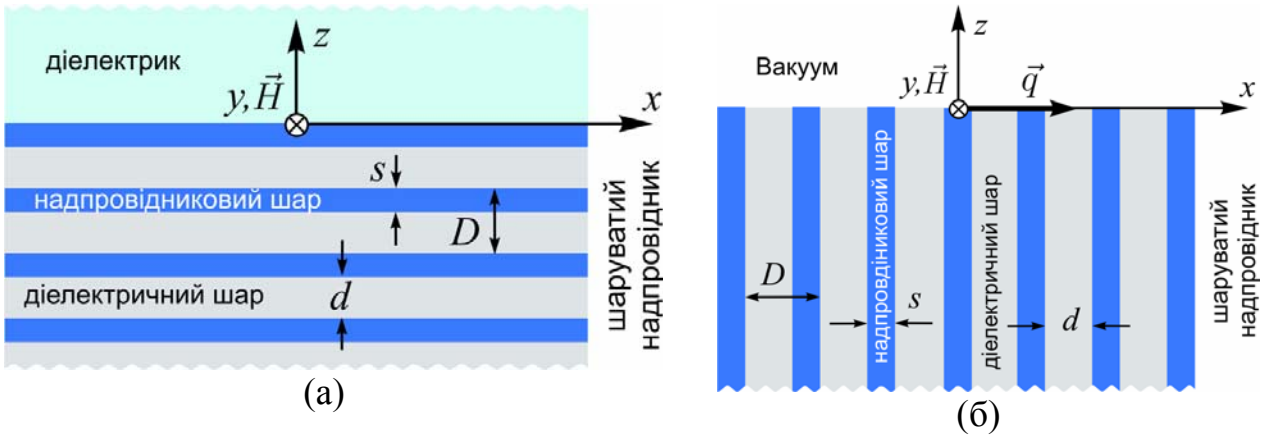


Рис. 1. Схематичне зображення шаруватого надпровідника і система координат.

$1 < \Omega < \gamma$) мають різні знаки. Такий специфічний вид діелектричної проникності шаруватих надпровідників дозволяє використовувати їх як кандидатів на роль середовищ з негативним показником заломлення. Також у розділі наведені результати відомих теоретичних і експериментальних досліджень, що стосуються механізму аномального проходження електромагнітної хвилі крізь товсті металеві пластини (з товщиною багато більшою глибини скін-шару).

У другому розділі дисертації теоретично досліджені поверхневі джозефсонівські плазмові хвилі, що поширюються на межі вакуум-шаруватий надпровідник і резонансні електромагнітні ефекти, пов'язані з їх збудженням. Розглянуто дві принципово різні геометрії: в одній з них поверхнева хвиля поширюється уздовж надпровідникових шарів, які паралельні межі зразка (рис. 1, а), а в іншій геометрії передбачається, що надпровідникові шари перпендикулярні межі зразка, а хвиля поширюється поперек шарів (рис. 1, б).

Поверхневі електромагнітні хвилі у шаруватих надпровідниках є хвилями *TM*-типу, або *p*-поляризованими: вектор електричного поля \vec{E} має дві складові, одну вздовж хвильового вектора хвилі $\vec{\kappa}_{sw}$ і другу – перпендикулярну поверхні; магнітний вектор \vec{H} перпендикулярний до напрямку поширення хвилі і лежить в площині поверхні.

У першій частині розділу розглянуто умови, які необхідні для спостереження негативного коефіцієнта заломлення у шаруватих надпровідниках. Якщо на шаруватий надпровідник з боку діелектрика з проникністю ϵ_{ext} падає плоска електромагнітна хвиля під кутом θ з тангенціальною компонентою хвильового вектора $q = (\epsilon_{ext}^{1/2} \omega / c) \sin \theta$, тоді негативний показник заломлення для таких хвиль може спостерігатися тільки при кутах падіння більших деякого критичного значення θ_{crit} , що визначається з рівняння

$$\sin(\theta_{crit}) = \sqrt{\epsilon_c(\Omega) / \epsilon_{ext}}. \quad (3)$$

Завдяки негативному знаку ϵ_{ab} в (2), падаюча хвиля проникає в надпровідник при $\theta > \theta_{crit}$ і повністю відбивається при кутах θ менших θ_{crit} , на протилежному відомому закону відбиття і заломлення хвиль в звичайних праворуких середовищах, де повне внутрішнє відбиття може спостерігатися при кутах падіння, що перевищують критичний кут. Зауважимо також, що джозефсонівська плазма є

особливим середовищем і в деяких відношеннях принципово відрізняється від ліворуких середовищ. У ліворуких середовищах напрямки хвильового вектора \vec{k} і вектора Пойнтінга \vec{S} антипаралельні, або, що те ж саме, антипаралельними є напрямки фазової і групової швидкостей. У нашому ж випадку в шаруватих надпровідниках вектори \vec{k}_s і \vec{S}_s утворюють гострий кут. При цьому вектор \vec{S}_s направлений в глибину надпровідника, а вектор \vec{k}_s – до межі надпровідник-діелектрик. При $\varepsilon_{ext} < \varepsilon$ вирази (2), (3) і нерівність $\sin(\theta_{crit}) \leq 1$ дають наступні

$$\text{умови:} \quad \omega_j < \omega < \omega_1 = \omega_j \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - \varepsilon_{ext}} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Таким чином, негативний коефіцієнт заломлення на межі шаруватого надпровідника і діелектрика з проникністю $\varepsilon_{ext} < \varepsilon$ може спостерігатися тільки в інтервалі частот $\omega_j < \omega < \omega_1 = \omega_j \Omega_1$, $\Omega_1 = \sqrt{\varepsilon / (\varepsilon - \varepsilon_{ext})}$.

В цьому ж розділі встановлено, що поверхневі хвилі, що поширюється уздовж надпровідникових шарів, які паралельні межі зразка (рис. 1, а), мають дисперсійне співвідношення, $\kappa(\Omega) = \Omega \left(\varepsilon_c(\Omega)(\varepsilon_{ext} - \varepsilon_{ab}(\Omega)) / (\varepsilon_{ext}^2 - \varepsilon_c(\Omega)\varepsilon_{ab}(\Omega)) \right)^{1/2}$, або в іншому вигляді, без урахування дисипативних членів:

$$\kappa(\Omega) = \Omega \left(\frac{\gamma^2 - \Omega^2 + \Omega^2 \varepsilon_{ext} / \varepsilon}{\gamma^2 - \Omega^2 + \Omega^4 \varepsilon_{ext}^2 / (\Omega^2 - 1) \varepsilon^2} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

де $\kappa = cq / \omega_j \varepsilon_{ext}^{1/2}$, q – хвильовий вектор ДПХ. Рівняння (5) описує дві гілки дисперсійних кривих поверхневих ДПХ (див. рис. 2). Перша, низькочастотна гілка з частотою в інтервалі $0 < \omega < \omega_j$, була раніше відома. Друга гілка, передбачена в даній дисертації, бере свій початок на світловій лінії $\omega = cq / \varepsilon_{ext}^{1/2}$ (або $\Omega = \kappa$) при $\omega = \omega_1$ (точка А на рис. 2), потім слідує практично вздовж цієї лінії і при частотах $\omega \sim \gamma \omega_j$ значно відхиляється від останньої і закінчується в точці з координатами $q = \gamma \omega_j \varepsilon^{1/2} / c$, $\omega = \gamma$ (точка В на рис. 2). Видно, що в спектрі ДПХ існує частотна щілина, $\omega_j < \omega < \omega_1$. Саме в цьому інтервалі частот, де не існують поверхневі хвилі, шаруватий надпровідник має негативний коефіцієнт заломлення. Таким чином, два явища – поширення поверхневих хвиль і негативне заломлення об'ємних хвиль в деякому відношенні доповнюють один одного.

У цьому ж розділі теоретично досліджено збудження поверхневих ДПХ, що відносяться до високочастотної гілки спектру. Розглянуто один з часто використовуваних методів, а саме, призмий метод збудження (геометрія Отто), заснований на явищі порушеного повного внутрішнього відбиття. Ідея така: електромагнітна хвиля, проходячи крізь призму з діелектричною проникністю ε_p , падає на її дно під кутом θ більшим, ніж кут повного внутрішнього відбиття, і потім у вигляді неоднорідної хвилі проникає до поверхні шаруватого надпровідника, відокремленого від призми тонким повітряним прошарком з товщиною δ . При деякому куті падіння θ тангенціальна компонента хвильового вектора падаючої хвилі стає рівною хвильовому вектору поверхневої ДПХ. В таких умовах відбувається резонансне збудження поверхневої хвилі, що

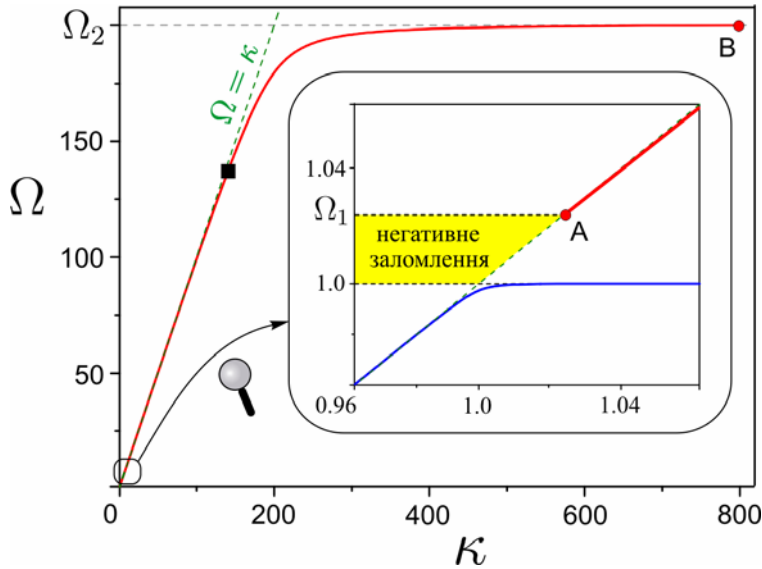


Рис. 2. Дисперсійні криві (залежність $\Omega = \omega / \omega_j$ від $\kappa = cq / \omega_j \varepsilon_{\text{ext}}^{1/2}$) поверхневих ДПХ на межі діелектрик-шаруватий надпровідник, $\gamma = 200$, $\varepsilon = 16$, $\varepsilon_{\text{ext}} = 1$. На вставці: збільшений фрагмент спектра поблизу точки ($\kappa = 1, \Omega = 1$). Точки А і В відповідають початку і кінцю височастотної гілки поверхневих ДПХ. Наклонна штрихова лінія відображає світлову лінію $\Omega = \kappa$.

супроводжується зменшенням коефіцієнта дзеркального відбиття об'ємних електромагнітних хвиль в призмі.

Зшиваючи тангенціальні компоненти електричного і магнітного полів на межах діелектрик-вакуум і вакуум-шаруватий надпровідник, отримуємо систему чотирьох лінійних алгебраїчних рівнянь для невідомих амплітуд хвиль. Вирішуючи цю систему рівнянь, знаходимо коефіцієнт відбиття хвилі від дна діелектричної призми,

$$R \equiv h^r = \frac{R_F (k_v / k - a) + (k_v / k + a) C(\delta, \theta)}{(k_v / k - a) + (k_v / k + a) R_F C(\delta, \theta)}, \quad R_F = \frac{k_d - ik_v \varepsilon}{k_d + ik_v \varepsilon}, \quad (6)$$

де R_F – френелівський коефіцієнт, що відповідає відбиттю хвилі від межі діелектрик-вакуум, $C(\delta, \theta) = \exp(-2k_v \delta)$ – параметр, який визначає зв'язок хвиль в діелектричній призмі і в шаруватому надпровіднику, $a \equiv a(\Omega, \theta, v_{ab}) = [\varepsilon_{ab} (q^2 / (k^2 \varepsilon_c) - 1)]^{1/2}$ – ефективний поверхневий імпеданс шаруватого надпровідника, $k_v = k \sqrt{\varepsilon_p \sin^2 \theta - 1}$, $q = k \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta$, $k_d = k \sqrt{\varepsilon_p} \cos \theta$. Показано, що повне заглушення дзеркального відбиття можна отримати зміною частоти падаючої хвилі при фіксованому куті падіння, або змінюючи кут падіння при заданій частоті, як показано на рис. 3 (а, б).

У другій частині розділу також розглянуто принципово іншу геометрію: надпровідникові шари перпендикулярні межі зразка, а хвиля поширюється поперек шарів, див. рис. 1, б. Досліджено два випадки: наявність та відсутність

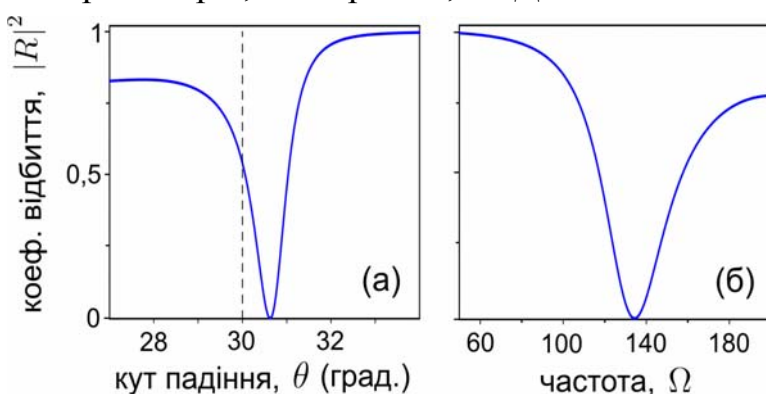


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбиття $|R|^2$ від: (а) кута падіння хвилі θ при $\Omega = 135$ і (б) частоти Ω при $\theta = 30.6^\circ$. Тут $v_{ab} = 10^{-3}$, $\gamma = 200$, $\varepsilon = 16$, $\varepsilon_p = 4$, $k\delta = 2\pi$. Ці ж параметри відповідають символу (зафарбований квадрат) на дисперсійній кривій на рис. 2.

зовнішнього постійного магнітного поля. У відсутності зовнішнього магнітного поля дисперсійне співвідношення має такий вигляд:

$$\sqrt{Q^2 - \frac{\lambda_{ab}^2 \Omega^2}{\lambda_c^2 \varepsilon}} = \frac{\lambda_{ab}^2 \Omega^2 \sqrt{1 + Q^2}}{\lambda_c \varepsilon \sqrt{1 - \Omega^2 - i\nu_c \Omega}}, \quad (7)$$

де $Q = q\lambda_{ab}$. Графічно ця залежність зображена на рис. 4, а.

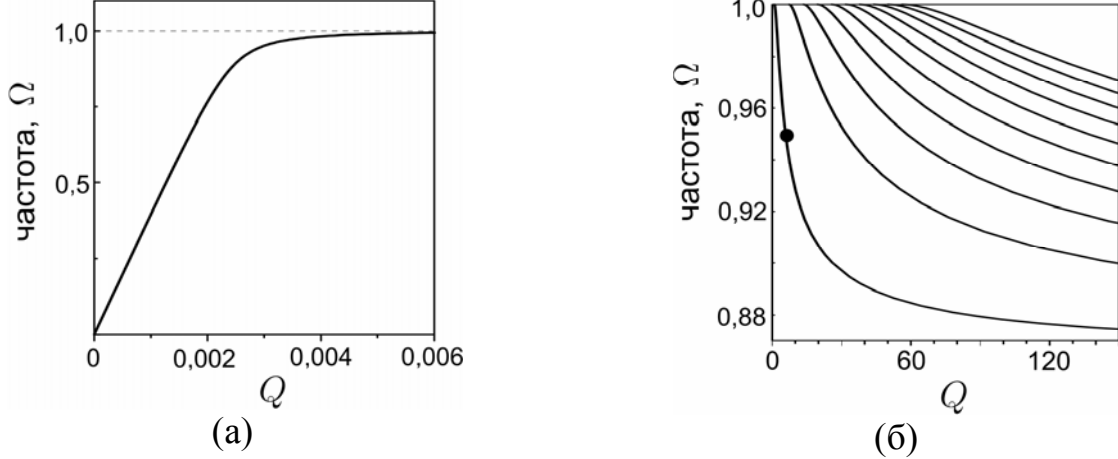


Рис. 4. Дисперсійні криві для поверхневих ДПХ, що поширюються поперек надпровідних шарів, за відсутності зовнішнього магнітного поля (а) та при його присутності (б). Значення параметрів такі: $\lambda_c / \lambda_{ab} = 100$, $\varepsilon = 16$.

Дисперсійне співвідношення для поверхневих ДПХ, що поширюються поперек надпровідникових шарів в зовнішньому постійному магнітному полі \vec{h}_0 , що паралельне надпровідниковим шарам та вісі y , має вигляд:

$$\frac{\sqrt{1+Q^2}}{\lambda_c} \int_{z_i}^0 dz' \sqrt{E(\Omega) - U(z')} = \pi \left(m + \frac{1}{4} \right), \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

де $Q = q\lambda_{ab}$, $h_c = \Phi_0 / \pi D \lambda_c$, $\lambda_{ab} / \lambda_c \varepsilon \ll 1$, $E(\Omega) = \Omega^2 - 1 + i\nu_c \Omega$, $U(z) = -2 / \cosh^2 [(z - z_0) / \lambda_c]$, $z_0 = \lambda_c \operatorname{arccosh}(h_c / h_0)$, $z_0 > 0$, $\Phi_0 = \pi \hbar c / e$, D – період шаруватої структури надпровідника. Точка $z = z_i$ визначається з рівняння:

$$1 - \Omega^2 = 2 / \cosh^2 [(z - z_0) / \lambda_c]. \quad (9)$$

Тут розглядається випадок відносно слабких магнітних полів, коли $h_0 < h_c$ і джозефсонівські вихори не проникають в надпровідник. Дисперсійні криві з $m = 0, 1, \dots, 9$ в присутності зовнішнього магнітного поля $h_0 / h_c = 0,357$ представлено на рис. 4, б.

Змінюючи амплітуду h_0 (при деякому фіксованому куті θ та частоті хвилі $\omega < \omega_j$) можна декілька разів перетнути дисперсійні криві на спектрі (8), див. рис. 4, б. Таким чином, наявність постійного магнітного поля дає можливість управляти процесом збудження поверхневих ДПХ не тільки змінюючи кут або частоту хвилі (як у випадку без h_0), але й амплітуду магнітного поля. Щоб показати це, наприкінці другого розділу досліджено збудження поверхневих хвиль методом резонансної дифракції на просторових неоднорідностях параметрів надпровідника у присутності зовнішнього постійного магнітного поля. Для вирішення цієї задачі використовувалась резонансна теорія збурень, яку було

модифіковано для застосування у шаруватих надпровідниках. Припускається, що лондонівська глибина проникнення магнітного поля λ_{ab} періодично промодульована в напрямку вісі x з просторовим періодом L . Показано, що коефіцієнт дзеркального відбиття стрімко йде до нуля при певному значенні магнітного поля h_0 при будь-якому виборі частоти з області $\omega < \omega_j$ і кута падіння θ .

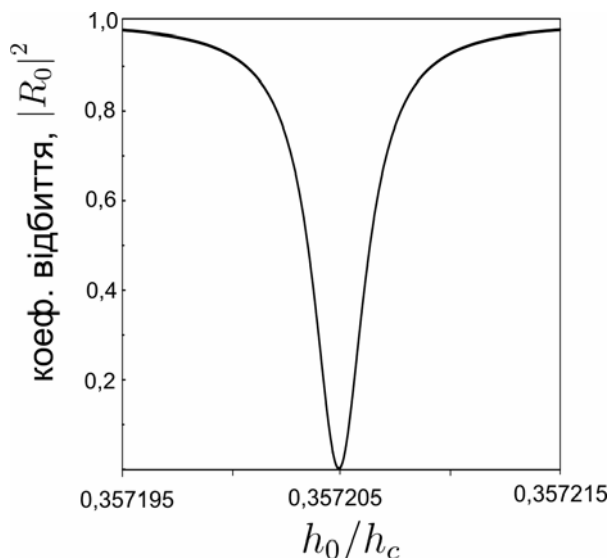


Рис. 5. Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття від зовнішнього постійного магнітного поля h_0 для першого дифракційного порядку ($r=1$). Параметри задачі: $\theta = 45^\circ$, $L = 2,75 \cdot 10^{-4}$ мм, $v_c = 1,15 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{ab} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ мм, $\lambda_c / \lambda_{ab} = 7$, $\varepsilon = 4$, $\Omega = 0,95$. Дисперсійна крива, яка відповідає параметрам задачі, зазначеним на даному рисунку, відзначена суцільним символом (зафарбоване коло) на рис. 4, б.

Рисунок 5 демонструє явище повного заглушення дзеркального відбиття при зміні зовнішнього постійного магнітного поля. Цього ж ефекту можна досягти і при фіксованому магнітному полі, але змінюючи кут θ .

У **третьому розділі** дисертації вивчені електромагнітні моди, що існують в обмежених шаруватих надпровідниках – пластинах скінченної товщини. Показано, що в пластині шаруватого надпровідника можуть існувати власні моди двох типів. Одні з них є поверхневі моди, поля яких експоненціально загасають від межі зразка, а у мод іншого типу електромагнітне поле осцилює поперек шарів. Моди другого типу ми будемо надалі називати хвилеводними модами. Обидва типи хвиль характеризуються експоненціально загасаючим полем зовні пластини. І поверхневі, і хвилеводні власні джозефсонівські плазмові моди в пластині шаруватого надпровідника можуть бути симетричними або антисиметричними щодо середини зразка. В даному розділі вивчено спектр власних джозефсонівських плазмових мод, а також вирішено задачу про збудження цих мод призмовим методом.

Електричне і магнітне поля у зразку і поза ним мають такі компоненти: $\vec{E} = \{E_x, 0, E_z\}$, $\vec{H} = \{0, H_y, 0\}$. Будемо шукати рішення синусоїдального рівняння Гордона (1) у вигляді хвилі $\varphi(x, z, t) = \varphi(z) \exp[i(qx - \omega t)]$, що поширюється вздовж вісі x . Амплітуда $\varphi(z)$ підпорядковується рівнянню:

$$\left(1 - \frac{\lambda_{ab}^2}{G} \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \varphi(z) + \frac{\lambda_c^2 q^2}{1 - \Omega^2 - i v_c \Omega} \varphi(z) = 0, \quad (10)$$

Тоді загальний розв'язок рівняння (10)

$$\varphi(z) = C_1 \sin(k_s z) + C_2 \cos(k_s z) \quad (11)$$

являє собою суперпозицію симетричних ($C_1 = 0$) і антисиметричних ($C_2 = 0$) мод, у яких $\varphi'(0) = 0$ та $\varphi(0) = 0$, відповідно (штрих означає похідну по z).

Враховуючи лінійний зв'язок фази з компонентами електромагнітних полів, знаходимо, що магнітне поле власних джозефсонівських плазмових мод у шаруватому надпровіднику описується виразом $H^s(x, z, t) = A(z) \exp[i(qx - \omega t)]$, з симетричною $A(z) = C_{\text{even}} \cos(k_s z)$ або антисиметричною $A(z) = C_{\text{odd}} \sin(k_s z)$ щодо середини пластини амплітудою $A(z)$. Поперечне хвильове число визначається рівнянням

$$k_s^2 = \frac{1}{\lambda_c^2} (\Omega^2 - \gamma^2 + i\Omega v_{ab}) \left(1 - \frac{\kappa^2}{\Omega^2 - 1 + i\Omega v_c} \right), \quad \kappa = q\lambda_c. \quad (12)$$

Реальна частина k_s^2 може бути як позитивною, так і негативною. Якщо $\text{Re}(k_s^2) > 0$, то поле осцилює уздовж координати z . В протилежному випадку, коли $\text{Re}(k_s^2) < 0$, поле експоненціально загасає в глибину пластини шаруватого надпровідника. Це рішення відповідає поверхневій моді. З виразу (12) можна знайти рівняння для сепаратрис в площині (κ, Ω) , які поділяють області поверхневих і хвилеводних власних мод. Нехтуючи дисипацією, отримуємо, $\Omega = 1$, $\Omega = \gamma$, $\Omega = \sqrt{1 + \kappa^2}$. Хвилеводні моди існують у областях $1 < \Omega < \gamma$, $\kappa^2 > \Omega^2 - 1$ та $\Omega > \gamma$, $\kappa^2 < \Omega^2 - 1$, а поверхневі моди існують у областях $0 < \Omega < 1$ та $1 < \Omega < \gamma$, $\kappa^2 < \Omega^2 - 1$.

Зшиваючи імпеданси середовищ на їх межах, отримуємо закони дисперсії симетричних,

$$\frac{k_d}{k_s} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_s} \frac{\Omega^2}{\Omega^2 - \gamma^2 + i v_{ab} \Omega} \tan\left(\frac{k_s L}{2}\right), \quad (13)$$

та антисиметричних ДПХ,

$$\frac{k_d}{k_s} = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_s} \frac{\Omega^2}{\Omega^2 - \gamma^2 + i v_{ab} \Omega} \cot\left(\frac{k_s L}{2}\right), \quad (14)$$

де $k_d = (\kappa^2 - \Omega^2 \varepsilon_d / \varepsilon_s)^{1/2} / \lambda_c$, $\varepsilon_d, \varepsilon_s$ – діелектричні проникності оточуючого середовища та шаруватого надпровідника, відповідно.

Структура спектру власних мод залежить від співвідношення між діелектричною проникністю зовнішнього діелектрика ε_d і міжшаровою діелектричною проникністю надпровідника ε_s . В третьому розділі дисертації досліджено окремо випадки оптично м'якого ($\varepsilon_d < \varepsilon_s$) і оптично щільного ($\varepsilon_d > \varepsilon_s$) оточень. На рис. 6 продемонстровані дисперсійні криві для симетричних поверхневих та хвилеводних мод у випадку оптично м'якого ($\varepsilon_d < \varepsilon_s$) оточення. Для прикладу у дисертації досліджено процес резонансного збудження симетричної хвилеводної моди з номером $n = 1$ призмовим методом. Показано, що резонансне зменшення коефіцієнта дзеркального відбиття можна спостерігати або змінюючи кут падіння хвилі при заданій її частоті, або шляхом зміни частоти при фіксованому куті падіння. Провал до нуля коефіцієнта відбиття відповідає ефекту повного заглушення дзеркального відбиття, що виникає в результаті збудження симетричної хвилеводної моди.

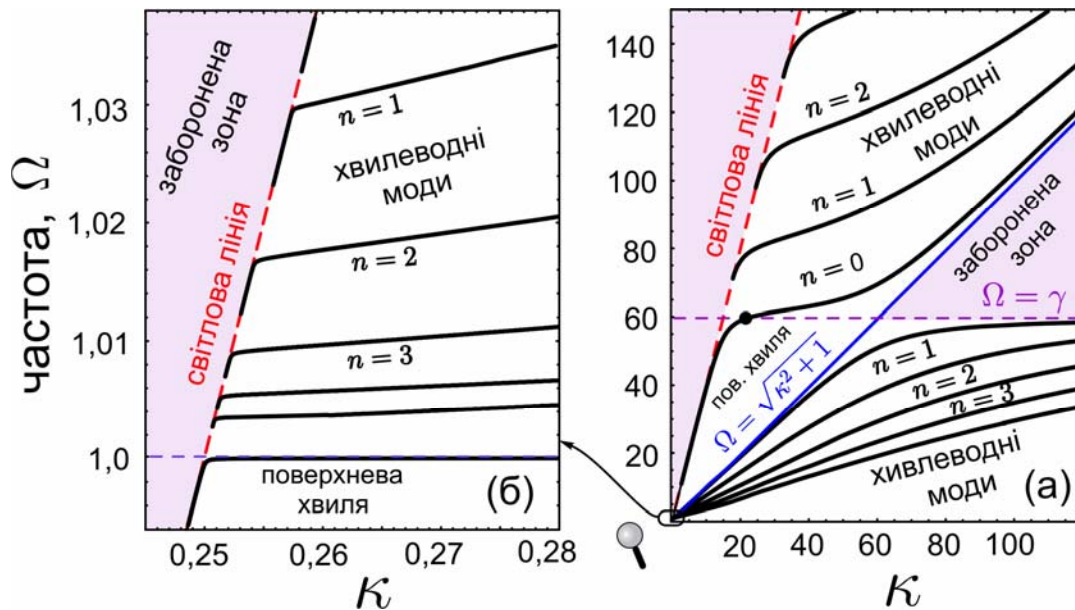


Рис. 6. Графіки законів дисперсії симетричних поверхневих і хвильоводних мод в пластині шаруватого надпровідника, що знаходиться в оптично м'якому оточенні (вакуумі). Червоні лінії на графіку відповідають сепаратрисам $\Omega=1$, $\Omega=\gamma$ і $\Omega=\sqrt{1+\kappa^2}$, а також світловій лінії $\Omega=\sqrt{\varepsilon_s/\varepsilon_d}\kappa$. Відтінені заборонені області спектра. На графіку (б) зображена в збільшеному масштабі дисперсійна крива для низькочастотної поверхневої хвилі і область початку дисперсійних кривих хвильоводних мод, що поширюються з частотами $\Omega < \gamma$. Параметри задачі: $\gamma=60$, $\varepsilon_s=16$ і $L/\lambda_{ab}=10$.

У **четвертому розділі** дисертації теоретично досліджені аномальні резонансні ефекти, пов'язані зі збудженням власних мод при проходженні електромагнітних хвиль крізь періодично модульовану пластину шаруватого надпровідника. Новий результат цього розділу – передбачено механізм аномального проходження електромагнітних хвиль крізь періодично модульовану надпровідникову пластину, пов'язаний з принциповою відмінністю ДПХ в сильно анізотропних шаруватих надпровідниках від електромагнітних хвиль, що поширюються в ізотропних середовищах, наприклад, у нормальних металах. На відміну від хвиль в металах, закон дисперсії ДПХ має «гіперболічного форму»:

$$\frac{k_{sx}^2 \lambda_c^2}{\omega^2 / \omega_j^2 - 1} - k_{sz}^2 \lambda_{ab}^2 = 1. \quad (15)$$

Тут k_{sx} і k_{sz} – компоненти хвильових векторів уздовж і поперек надпровідникових шарів, відповідно. З рівняння (15) випливає, що ДПХ можуть поширюватися поперек шарів тільки при частотах $\omega > \omega_j$. Більш того, поздовжня компонента хвильового вектора k_{sx} повинна бути досить велика:

$$k_{sx} > k_c = \frac{1}{\lambda_c} \sqrt{(\omega / \omega_j)^2 - 1}. \quad (16)$$

Саме в цій нерівності міститься принципова відмінність ефекту посиленого проходження світла в металах від шаруватих надпровідників. Для металів не тільки основна хвиля з $k_{sx} = (\omega/c) \sin \theta$, а й усі дифраговані хвилі з

$k_{sx} = (\omega/c)\sin\theta + ng$ експоненціально загасають до середини зразка (тут θ – кут падіння, g – період модуляції оберненої ґратки і ціле число n – дифракційний порядок). Навпаки, для шаруватих надпровідників основна (базова) хвиля з $(\omega/c)\sin\theta < k_c$ експоненціально загасає в глибину пластини, а дифраговані хвилі з $|(\omega/c)\sin\theta + ng| > k_c$ можуть розповсюджуватися поперек шарів. Таким чином, дифракція в металах може привести до резонансного збудження симетричних або антисиметричних поверхневих хвиль, в той час як дифракція в шаруватих надпровідниках може також призводити до резонансного збудження хвилеводних мод, що не згасають у глибину пластини, а осцилюють.

Вважається, що критична густина джозефсонівського струму J_c періодично промодульована уздовж шарів з просторовим періодом L . Модуляція джозефсонівського струму призводить до утворення дифрагованих хвиль, які при резонансі збуджують власні електромагнітні моди. Слабка модуляція критичного струму призводить до того, що джозефсонівська плазмова частота ω_j також виявляється періодично модульованою уздовж вісі x з періодом L :

$$\omega_j(x) = \omega_j [1 + f \cos(gx)], \quad g = 2\pi/L, \quad f \ll 1. \quad (17)$$

Нехай верхній бік пластини опромінюється падаючою під деяким кутом θ плоскою монохроматичною електромагнітною хвилею ТМ-поляризації, $\vec{E}^{inc} = \{E_x^{inc}, 0, E_z^{inc}\}$, $\vec{H}^{inc} = \{0, H^{inc}, 0\}$. Тангенціальна і нормальна компоненти її хвильового вектора \vec{k}^i виражаються через кут падіння: $k_x \equiv q = k \sin\theta$, $k_z = k \cos\theta$, $k = \omega/c$. Періодична модуляція (17) приводить до утворення дифрагованих хвиль з x -компонентами хвильових векторів $q_n = q + ng$. Для простоти розглянуто випадок резонансного збудження моди з хвильовим вектором κ близьким до $q_1 = q + g$ в умовах, коли виконуються нерівності $(\omega/c)\sin\theta < k_c < |(\omega/c)\sin\theta \pm g|$.

На рис. 7 продемонстровані серії резонансних піків залежностей

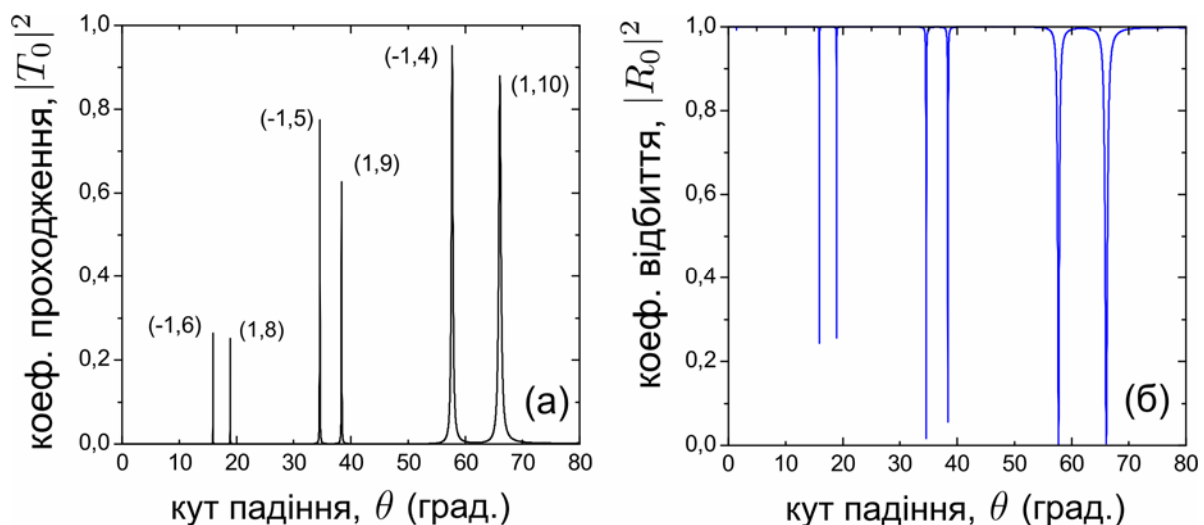


Рис. 7. Залежність коефіцієнта проходження $|T_0|^2$ і коефіцієнта дзеркального відбиття $|R_0|^2$ від кута падіння θ . Параметри задачі: $d = \lambda_c = 10\lambda_{ab}$, $\epsilon = 16$, $f = 0,2$, $\Omega = 1,1$, $gc/\omega = 3$.

коефіцієнтів проходження і відбиття від кута падіння для випадку товстої пластини, товщина якої в багато разів перевищує глибину скін-шару. Три пікових значення відповідають першому порядку дифракції, інші три піки відповідають мінус першому дифракційному резонансу. Перші числа в дужках вказують дифракційний порядок відповідного резонансу, а другі – номер хвилеводної моди, що збуджується.

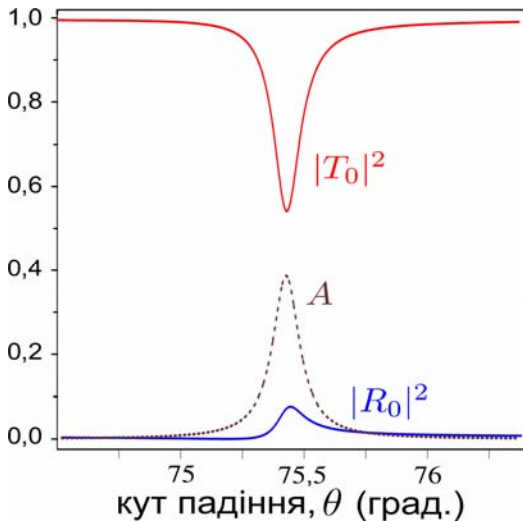


Рис. 8. Залежності коефіцієнтів проходження $|T_0|^2$, відбиття $|R_0|^2$ і поглинання $A=1-|R_0|^2-|T_0|^2$ від кута падіння θ . Параметри задачі: $\lambda_{ab}/d=10$, $\gamma=10$, $\varepsilon=16$, $\Omega=5$, $L=2\lambda_c$.

Як показує теоретичний аналіз, для тонких пластин (з товщиною багато меншою ніж глибина скін-шару) ефект зменшення прозорості найзручніше спостерігати при збудженні антисиметричних поверхневих мод. Як приклад такого ефекту було розраховано коефіцієнти проходження $|T_0|^2$, відбиття $|R_0|^2$ і поглинання $A=1-|R_0|^2-|T_0|^2$ від кута падіння θ , рис. 8. Видно, що резонансне збудження власних електромагнітних хвиль в тонкій пластині супроводжується значним збільшенням дисипації енергії і, як наслідок, помітним зменшенням коефіцієнта проходження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу задачу теоретичної фізики, а саме: знайдені загальні дисперсійні рівняння для поверхневих джозефсонівських плазмових хвиль, що розповсюджуються в шаруватих надпровідниках з урахуванням струму зміщення уздовж шарів, а також передбачено ряд нових ефектів, пов'язаних з їх збудженням. Показано, що завдяки сильній анізотропії струмової здатності джозефсонівської плазми в шаруватих надпровідниках можна спостерігати ефекти, які не спостерігаються в інших провідникових середовищах.

Основні результати дисертаційної роботи сформульовані в наступних пунктах:

1. Передбачено нову гілку в спектрі поверхневих хвиль, яка розташована вище джозефсонівської плазмової частоти. Показано, що спектр поверхневих ДПХ має частотну щілину, яка пов'язана з принциповою особливістю джозефсонівської плазми, а саме, з тим, що природа струмів вздовж і уперек надпровідникових шарів різна. Показано, що саме в цьому частотному інтервалі може спостерігатися негативний коефіцієнт заломлення (negative refractive index) об'ємних хвиль в

шаруватих надпровідниках. Таким чином показано, що два явища – розповсюдження поверхневих хвиль і негативне заломлення об'ємних електромагнітних хвиль в шаруватому надпровіднику виявляються в деякому відношенні додатковими по відношенню один до одного. Проаналізовано нову гілку спектру ДПХ з частотами вище за джозефсонівську плазмову частоту і знайдені оптимальні умови для їх збудження.

2. Модифікована резонансна теорія збурень для дослідження збудження ДПХ в сильно анізотропній джозефсонівській плазмі. За допомогою цієї теорії розв'язано задачу про збудження поверхневих ДПХ, що розповсюджуються упоперек надпровідникових шарів, як у присутності, так і за відсутності зовнішнього постійного магнітного поля, методом порушеного повного внутрішнього відбиття і методом модуляції параметрів надпровідника. Знайдені оптимальні умови для збудження поверхневих ДПХ, що розповсюджуються упоперек надпровідних шарів, як в зовнішньому постійному магнітному полі, так і за його відсутності, при яких мають місце вудівські аномалії, тобто повне заглушення дзеркального відбиття терагерцових хвиль.

3. Передбачено існування власних мод двох типів в пластині шаруватого надпровідника. Одні з них є поверхневими модами, поля яких експоненційно згасають від межі зразка, а у мод іншого типу, хвилеводних, електромагнітне поле осцилює упоперек шарів. Отримано і досліджено закон дисперсії поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових мод в пластині шаруватого надпровідника в оптично м'якому і оптично щільному оточеннях. Аналітично вирішено задачу про збудження хвилеводних мод методом порушеного повного внутрішнього відбиття і знайдені оптимальні умови для збудження цих мод.

4. Побудована теорія проходження електромагнітного випромінювання крізь періодично модульовані пластини шаруватих надпровідників.

5. Передбачено явище аномальної прозорості товстих модульованих пластин шаруватих надпровідників в терагерцовому діапазоні частот, що обумовлене дифракцією падаючих хвиль і резонансним збудженням власних мод. Отримано і проаналізовано коефіцієнти відбиття і проходження терагерцового випромінювання для модульованої пластини шаруватого надпровідника, що знаходиться у вакуумі. Показано, що у залежності коефіцієнта проходження від кута падіння хвилі повинні спостерігатися серії резонансних піків. Положення цих піків відповідають рівності хвильового вектора дифрагрованої хвилі хвильовому вектору однієї з власних хвилеводних мод. Передбачено і проаналізовано протилежний ефект – резонансне заглушення прозорості тонких модульованих пластин шаруватих надпровідників, що обумовлений збудженням власних мод.

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

Одержані результати поглиблюють розуміння електродинаміки сильноанізотропних високотемпературних надпровідників і можуть бути використані при розробці різних електронних пристроїв, таких, як терагерцові детектори, аналізатори спектру, фільтри та ін.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Surface Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors above the Plasma Frequency: Evidence for a Negative Index of Refraction / [V.A. Golick, D.V. Kadygrob, V.A. Yampol'skii, A.L. Rakhmanov, B.A. Ivanov, and F. Nori] // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 104. – P. 187003(1)-187003(4).
2. Excitation of surface plasma waves across the layers of intrinsic Josephson junctions / [D.V. Kadygrob, V.A. Golick, V.A. Yampol'skii, T.M. Slipchenko, D.R. Gulevich, and S.E. Savel'ev] // Phys. Rev. B. – 2009. – V.80. – P. 184512(1)-184512(10).
3. Surface and waveguide Josephson plasma waves in slabs of layered superconductors / [T.M. Slipchenko, D.V. Kadygrob, D. Bogdanis, V. A. Yampol'skii, and A.A. Krokhin] Phys. Rev. B – 2011. – V. 84. – P. 224512(1)-224512(8).
4. Enhanced Transmission of Terahertz Radiation through Periodically Modulated Slabs of Layered Superconductors / [D.V. Kadygrob, N.M. Makarov, F. Perez-Rodriguez, T.M. Slipchenko, V.A. Yampol'skii] New J. Phys. – 2013. – V. 15. – P. 023040(1)-023040(9).
5. Аномальная прозрачность периодически модулированных пластин слоистых сверхпроводников в терагерцевом диапазоне частот / [Д.В. Кадыгроб, Н.М. Макаров, Ф. Перес Родригес, Т.М. Слипченко, О.И. Любимов, В.А. Ямпольский] // Радиофизика и электроника. – 2013. – Т. 4, № 18. – С. 65–70.
6. Кадыгроб Д.В. Подавленная прозрачность тонких модулированных пластин слоистых сверхпроводников в терагерцевом диапазоне частот / Д.В. Кадыгроб, В.А. Ямпольский // Физика низких температур. – 2014. – Т. 40, № 8. – С. 910–914.
7. Распространение электромагнитных волн в слоистых сверхпроводниках с частотой выше джозефсон-плазменной / [В.А. Голик, Д.В. Кадыгроб, В.А. Ямпольский, А.Л. Рахманов, Ф. Нори] // Радіофізика та електроніка: ІХ Харківська конференція молодих науковців, 1-3 грудня 2009р.: тези доп. – Харків, 2009. – С. 63.
8. Джозефсоновские плазменные волны в слоистых сверхпроводниках / [С.С. Апостолов, Д.В. Кадыгроб, З.А. Майзелис, Т.М. Слипченко, М.А. Сорокина, В.А. Ямпольский] // Международный Юбилейный Семинар "Современные проблемы физики твердого тела", посвященный памяти члена-корреспондента НАН Украины Э.А. Канера и 55-летию открытия циклотронного резонанса в металлах, 16-18 ноября 2011г. : тезисы докладов. – Харьков, 2011. – С. 15.
9. Джозефсон-плазменные волны в пленке слоистого сверхпроводника / [Т.М. Слипченко, В.А. Ямпольский, Д.В. Кадыгроб, Д. Богданис] // Радіофізика та електроніка: ХІ Харківська конференція молодих науковців, 29 листопада – 1 грудня 2011 р.: тези доп. – Харків, 2011. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
10. Поверхностные и волноводные джозефсон-плазменные моды в пленке слоистого сверхпроводника / [Т.М. Слипченко, В.А. Ямпольский, Д.В. Кадыгроб, Д.Богданис] // Фізичні явища в твердих тілах. Матеріали Х-ої Міжнародної конференції, 6-9 грудня 2011р.: тези доп.– Харків, 2011. – С. 60.

11. Enhanced Transmission of Terahertz Radiation through Periodically Modulated Slabs of Layered Superconductors / [D.V. Kadygrob, N.M. Makarov, F. Perez-Rodriguez, T.M. Slipchenko, V.A. Yampol'skii] // Critical Phenomena under Extreme Impact, International Workshop in celebration of 80-th Birthday of Victor V. Eremenko, September 10-13, 2012: Book of Abstracts. – Kharkov, 2012. – P. 17.
12. Kadygrob D.V. Surface Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors above the Plasma Frequency: Evidence for a Negative Index of Refraction / D.V. Kadygrob, V.A. Golyk // IV Young Scientists Conference, Modern Problems of Theoretical Physics, October 23-26, 2012: Book of Abstracts. – Kyiv, 2012. – P. 64.
13. Аномальное прохождение терагерцового излучения через периодически модулированную пластину слоистого сверхпроводника / [Д.В. Кадыгроб, Н.М. Макаров, Ф. Перес Родригес, Т.М. Слипченко, В.А. Ямпольский] // Радіофізика та електроніка: XII Харківська конференція молодих науковців, 4-7 грудня 2012р.: тези доп. – Харків, 2012. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
14. Кадыгроб Д.В. Поверхностные джозефсоновские плазменные волны, распространяющиеся поперек сверхпроводящих слоев в слоистых сверхпроводниках / Д.В. Кадыгроб, В.А. Ямпольский // Радіофізика та електроніка: XIII Харківська конференція молодих науковців, 2-6 грудня 2013р.: тези доп. – Харків, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
15. Кадыгроб Д.В. Аномальная прозрачность периодически модулированных пластин слоистых сверхпроводников в терагерцевом диапазоне частот / Д.В. Кадыгроб, В.А. Ямпольский // Фізичні явища в твердих тілах. Матеріали XI-ої Міжнародної конференції, 3-6 грудня 2013р.: тези доп. – Харків, 2013. – С. 79.

АНОТАЦІЯ

Кадыгроб Д.В. Поверхневі та хвилеводні джозефсонівські плазмові моди у шаруватих надпровідниках. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2017.

У дисертаційній роботі теоретично досліджені дисперсійні характеристики поверхневих і хвилеводних джозефсонівських плазмових електромагнітних хвиль в шаруватих надпровідниках, а також передбачено ряд нових ефектів, пов'язаних з їх збудженням. Завдяки сильній анізотропії струмової здатності джозефсонівської плазми в шаруватих надпровідниках можна спостерігати ефекти, які не спостерігаються в інших провідникових середовищах. Зокрема, завдяки анізотропії на графіку дисперсійної залежності для поверхневих хвиль виникають дві гілки, між якими є частотна щілина, причому саме при частотах всередині цієї щілини може спостерігатися негативне заломлення об'ємних електромагнітних хвиль. Також в дисертації передбачено і проаналізовано резонансне посилення проходження електромагнітних хвиль через товсті (з товщиною багато більшою глибини скін-шару) періодично модульовані надпровідникові пластини. Показано, що в шаруватих надпровідниках на графіку залежності коефіцієнта проходження від кута падіння хвилі повинні спостерігатися серії резонансних піків замість

одного піку, що спостерігається в ізотропних металах. Передбачений і проаналізований протилежний ефект – резонансне зменшення прозорості тонких модульованих пластин шаруватих надпровідників, обумовлений збудженням власних локалізованих мод.

Ключові слова: шаруваті надпровідники, джозефсонівська плазма, поверхневі джозефсонівські плазмові хвилі, хвилеводні моди, вудівські аномалії.

АННОТАЦІЯ

Кадыгроб Д.В. Поверхностные и волноводные джозефсоновские плазменные моды в слоистых сверхпроводниках. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2017.

В диссертационной работе теоретически исследованы дисперсионные характеристики поверхностных и волноводных джозефсоновских плазменных электромагнитных волн в слоистых сверхпроводниках, а также предсказан ряд новых эффектов, связанных с их возбуждением. Благодаря сильной анизотропии токнесущей способности джозефсоновской плазмы в слоистых сверхпроводниках можно наблюдать эффекты, которые не наблюдаются в других проводящих средах. В частности, в диссертации предсказана новая ветвь в спектре поверхностных волн, которая расположена выше джозефсоновской плазменной частоты. Показано, что спектр поверхностных джозефсоновских плазменных волн (ДПВ) имеет частотную щель, которая связана с принципиальной особенностью джозефсоновской плазмы, а именно, с тем, что природа токов вдоль и поперек сверхпроводящих слоев различна. Показано, что именно в этом частотном зазоре может наблюдаться отрицательный коэффициент преломления (negative refractive index) объемных волн в слоистых сверхпроводниках.

Модифицирована резонансная теория возмущений для исследования возбуждения ДПВ в сильно анизотропной джозефсоновской плазме. С помощью этой теории решена задача о возбуждении поверхностных ДПВ, распространяющихся поперек сверхпроводящих слоев, как в случае присутствия, так и в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля, методом нарушенного полного внутреннего отражения и методом модуляции параметров сверхпроводника.

Предсказано существование собственных мод двух типов в пластине слоистого сверхпроводника (поверхностных и волноводных джозефсоновских плазменных мод). Получен и исследован закон дисперсии этих мод в пластине слоистого сверхпроводника в оптически мягком и оптически плотном окружениях. Аналитически решена задача о возбуждении волноводных мод методом нарушенного полного внутреннего отражения.

Построена теория прохождения электромагнитного излучения через периодически модулированные пластины слоистых сверхпроводников. Предсказано явление аномальной прозрачности толстых модулированных пластин

слоистых сверхпроводников в терагерцевом диапазоне частот, обусловленное дифракцией падающих волн и резонансным возбуждением собственных мод. Предсказан и проанализирован противоположный эффект — резонансное подавление прозрачности тонких модулированных пластин слоистых сверхпроводников, обусловленный возбуждением собственных мод.

Исследования, проведенные в диссертации, представляют собой качественное и количественное описание электромагнитных явлений, связанных с существованием в слоистых сверхпроводниках собственных электромагнитных мод. Полученные результаты углубляют понимание электродинамики сильноанизотропных высокотемпературных сверхпроводников и могут быть использованы при разработке различных электронных устройств, таких, как терагерцевые детекторы, анализаторы спектра, фильтры, и т.д.

Ключевые слова: слоистые сверхпроводники, джозефсоновская плазма, поверхностные джозефсоновские плазменные волны, волноводные моды, вудовские аномалии.

ABSTRACT

Kadygrob D.V. Surface and waveguide Josephson plasma modes in layered superconductors. – Manuscript copyright.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – National Scientific Center Kharkov Institute of Physics and Technology, NAS of Ukraine, Kharkov, 2017.

In the dissertation, the dispersion characteristics of surface and waveguide Josephson plasma electromagnetic waves in layered superconductors are theoretically studied and a series of new phenomena associated with their excitation are predicted. In layered superconductors, due to the strong anisotropy of the current density of the Josephson plasma, one can observe new effects that cannot be observed in other conducting media. In particular, two branches of the dispersion curves for surface Josephson plasma waves in layered superconductors appear due to the anisotropy. Specifically, within the frequency gap in the spectrum of surface waves, the negative refraction of bulk waves can be observed in layered superconductors. The enhanced transmissivity of modulated thick slabs of layered superconductors (with thicknesses significantly exceeding the skin depth) for terahertz radiation due to the diffraction of the incident wave and the resonance excitation of the eigenmodes is considered. It is shown that a series of resonance peaks can be observed in the dependence of the transmittance on the varying incidence angle instead of a single peak observed in isotropic metals. The opposite effect of the resonance suppression of the transparency is predicted for the modulated thin plates of layered superconductors. This effect is caused by the excitation of localized eigenmodes.

Key words: layered superconductors, Josephson plasma, surface Josephson plasma waves, waveguide modes, Wood anomalies.