

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені В.Н. КАРАЗІНА

ЯКОВЕНКО ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.315.592 – 539.922.924

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ НВЧ – ДІАПАЗОНУ В
НЕОДНОРІДНИХ ПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

01.04.03 - радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук**

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті „Молнія” при Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Загородній Анатолій Глібович,
Інститут теоретичної фізики ім. М.М.Боголюбова НАН України
(м.Київ), директор;

доктор фізико-математичних наук, професор
Колчигін Микола Миколайович,
Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри теоретичної радіофізики;

доктор фізико-математичних наук, професор
Гордієнко Юрій Омелянович,
Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв.

Провідна установа: Національний науковий центр „Харківський фізико-технічний інститут” Інститут плазмової електроніки і нових методів прискорення Міністерства освіти і науки України (м.Харків).

Захист відбудеться 25 грудня 2003 р. о 14.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розісланий 14 листопада 2003

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ляховський А.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з головних проблем сучасної радіофізики є необхідність освоєння субміліметрового та короткохвильової частини міліметрового діапазонів електромагнітних хвиль. Ці діапазони частот важливі не тільки для розвитку досліджень у різних галузях фізики, але і в біології, медицині, а також для багатьох технічних застосувань: радіолокації, радіонавігації, техніки зв'язку, обчислювальної техніки і т.і.

На першому місці у цій проблемі безумовно стоїть задача створення джерел випромінювання електромагнітних хвиль. При розв'язанні цієї задачі визначилися два сучасних підходи. З одного боку, проводяться дослідження, направлені на використання в субміліметровому діапазоні лазерного принципу генерування і підсилення електромагнітних хвиль, який успішно реалізовано в оптиці (наприклад, в напівпровідникових лазерах). З іншого боку, здійснюються спроби удосконалення пристроїв, які працюють у більш низькочастотній частині спектра, а саме, транзисторів, діодів Ганна, лавино-пролітних діодів. Це стосується також досліджень плазмово-хвильових ефектів, резонансів та нестійких станів у твердих тілах. Інтерес до них визначається пошуком нових можливостей генерування коливань у цих діапазонах, а також задачами радіоспектроскопії плазмоподібних твердих тіл.

Природно, необхідною умовою успішного розв'язання поставлених задач, є наявність відповідної елементної бази, створеної на основі матеріалів із прогнозованими параметрами.

Сучасна технологія дозволяє створювати твердотільні провідні структури: плівки, напівпровідники з надграткою і двомірним (2D) електронним газом, а також структури типу метал – діелектрик – напівпровідник (МДН) тощо. При визначенні механізмів формування ультратонких прошарків важливим є вивчення електронних властивостей і плазмових коливань, обумовлених колективною поведінкою зарядів.

Досить важливим також для їх діагностики та практичних застосувань (наприклад, мікро- і наноелектроніка) є питання про взаємодію плазмових коливань із потоками заряджених частинок. Справа в тім, що в обмежених середовищах виникають нові гілки електромагнітних коливань, виникає поєднання різного роду коливань через наявність зовнішніх меж. Крім того, у структурах, які мають субмікронні розміри, реалізується балістичний механізм переносу заряду. Тому в них можуть проявлятися нестійкості, в основі яких лежать ефекти черенковського, перехідного та гальмівного випромінювання частинок. Нарешті, результати досліджень хвильових процесів в обмеженій плазмі твердих тіл можуть бути використані для безконтактних методів діагностики електронних спектрів носіїв зарядів та властивостей поверхні.

Таким чином, інтерес до фундаментальної проблеми сучасної радіофізики - збудження, підсилення, згасання, поширення та перетворення електромагнітних хвиль субміліметрового та короткохвильової частини міліметрового діапазонів визначає актуальність роботи „Електромагнітні коливання та хвилі НВЧ діапазону в неоднорідних провідних середовищах”.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в межах планів комплексної науково-дослідної програми Міністерства освіти і науки України; НДР: „Розробка наукових основ прогнозування характеристик напівпровідникових структур у складі радіоелектронних пристроїв в умовах електромагнітного впливу”. Дисертаційна робота містить результати досліджень, отриманих автором у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті „Молнія” при Національному технічному університеті „ХПІ” Міністерства освіти і науки України, які входять у науково-технічні звіти НДР (номери держреєстрації):

№ 0198 U 000358 (виконавець); № 0101 U 003807 (виконавець); № 0201 U 005261 (виконавець); № 0101 U 003806 (науковий керівник).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії кінетичних та гідродинамічних механізмів збудження, поширення та згасання електромагнітних коливань, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в обмежених провідних середовищах; визначення особливостей впливу неоднорідних властивостей поверхні провідних твердих тіл на

енергетичні спектри носіїв, закони дисперсії електромагнітних коливань та умови їх взаємодії між собою.

Досягнення цієї мети здійснюється розв'язанням таких задач:

- дослідження механізмів беззіткнувального згасання поверхневих електромагнітних коливань та умов його обернення (виникнення нестійкостей), пов'язаних із взаємодією хвиль та заряджених частинок на межі провідних твердих тіл;
- отримання та розв'язання кінетичних рівнянь, що визначають зміну кількості бозонів (власних електромагнітних коливань плазмоподібних структур), яка обумовлена ефектами перехідного та черенковського випромінювання заряджених частинок;
- визначення та аналіз спектральних характеристик електромагнітних коливань та отримання виразів для інкрементів гідродинамічних пучкових нестійкостей у шарово-періодичних структурах (напівпровідникових класичних надгратках) та структурах з балістичними механізмами переносу заряду, що містять плазмові середовища;
- дослідження механізмів виникнення поверхневих електронних станів на нерівній межі провідних твердих тіл та визначення змін законів дисперсії поверхневих поляритонів, виникнення яких обумовлено даними станами;
- дослідження впливу неоднорідних властивостей поверхні провідних твердих тіл (наявність періодичних та випадкових нерівностей, неоднорідного розподілу потенціалу) на спектральні характеристики перехідного випромінювання електромагнітних хвиль;
- знаходження нелінійних ефектів, що стабілізують нестійкості електромагнітних коливань у пучково-плазмових системах, де має місце трансформація кінетичної енергії заряджених частинок в енергію коливань середовища.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси взаємодії електромагнітних полів з зарядженими частинками в матеріальних середовищах.

Предметом дослідження є спектри, декременти, умови нестійкості та інкременти електромагнітних коливань НВЧ діапазону в неоднорідних провідних середовищах, в тому числі середовищах, які містять потоки електронів або межують з потоками.

Методи дослідження. В роботі застосовувались аналітичні методи розв'язання системи рівнянь Максвелла для плазмоподібних середовищ у межах гідродинамічного та кінетичного наближень. При дослідженні квантових ефектів використано рівняння для матриці щільності або рівняння Шредінгера для хвильової функції електронів.

Результати, що пов'язані із пучковими нестійкостями, отримано завдяки застосуванню методів теорії збуджень у гідродинамічному наближенні. Застосовано також кінетичний опис взаємодії хвиль та заряджених частинок на межі напівпровідникової плазми, в основі якої лежить ефект перехідного випромінювання.

Задачі стабілізації плазмових нестійкостей розглядалися із застосуванням нелінійних рівнянь та розв'язувалися чисельним методом.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано кінетичну теорію беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів, обумовленого їх взаємодією з електронами на межі провідних твердих середовищ, яка розширює існуючі класичні уявлення стосовно цих ефектів до квантової межі.

2. Встановлено механізм згасання поверхневих коливань, що базується на моделі хвиль Ван-Кампена. Проведені в межах цієї моделі дослідження взаємодії електромагнітних коливань та заряджених частинок з урахуванням процесів дифузії відрізняються фізичною коректністю в порівнянні з традиційним гідродинамічним описом.

3. Побудовано квантово-механічну теорію взаємодії заряджених частинок з поверхневими коливаннями в обмежених плазмоподібних середовищах, яка дозволяє отримати нові критерії нестійкостей електромагнітних коливань.

4. Досліджено механізми беззіткнувального згасання поверхневих геліконів в умовах черенковської взаємодії зі джерелами випромінювання електромагнітних хвиль, що рухаються вздовж межі напівпровідникової плазми; отримано вирази для декрементів, що дає можливість розробки нових методів реєстрації магнітоплазмових коливань.

5. Визначено умови розвитку гідродинамічних нестійкостей електростатичних коливань у системах, що містять напівпровідникові середовища скінченної довжини з різними електромагнітними властивостями. Досліджено нові механізми нестійкостей, розвиток яких забезпечується ефектами черенковського та перехідного випромінювань.

6. Отримано співвідношення, що пов'язують характеристики напівпровідникових надграток та параметри потоків заряджених частинок і забезпечують виникнення нестійкостей типу Ахієзера-Файнберга. Визначено вирази для інкрементів такого роду нестійкостей в умовах, коли потік частинок рухається крізь надгратку або вздовж її поверхні.

7. Розв'язано задачу розвитку початкового збудження функції розподілу носіїв при їх проходженні крізь межу розподілу середовищ. Отримані результати визначають умови стійкості або розвитку нестійкостей у системах плазма твердого тіла - електронний потік.

8. Досліджено нелінійний механізм стабілізації нестійкостей поверхневих плазмонів в умовах, коли взаємодія електромагнітних коливань та заряджених частинок потоку забезпечується при перетинанні ним межі розподілу середовищ. Показано, що стабілізація плазмонів обумовлена взаємозв'язком їх амплітуди та густини частинок на межі.

9. Визначено специфічні особливості спектральних характеристик перехідного випромінювання заряджених частинок, що пов'язані з наявністю неоднорідностей поверхні провідних твердих тіл.

10. Досліджено новий фізичний механізм виникнення поверхневих електронних станів, одержано їх дисперсійні характеристики, які визначаються нерівностями межі розподілу провідних твердих тіл періодичного або випадкового характеру.

11. Одержано та досліджено закон дисперсії поверхневих поляритонів у неоднорідній плазмі на межі твердого тіла з періодичними та випадковими нерівностями.

12. Побудовано кінетичну теорію збудження електромагнітних коливань у напівпровідникових структурах з неоднорідним потенціалом на межі розподілу середовищ. Одержано вирази для інкрементів нестійкостей поверхневих плазмонів та визначено зміни, що обумовлені існуванням потенційного бар'єру.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів дисертаційної роботи визначаються тим, що представлені задачі досліджувалися на основі моделей, які допускають аналітичні розв'язки. Усі використані наближення аргументуються.

Правильність результатів контролювалася шляхом порівняння з граничними випадками, відомими в літературі.

Сукупність нових теоретичних результатів, наведених у роботі, є внеском у розвиток фізичних уявлень про взаємодії електромагнітних хвиль та заряджених частинок у плазмі та неоднорідних плазмоподібних та провідних твердих тілах. Отримані результати є необхідним кроком у вивченні електромагнітних процесів збудження, поширення, підсилення та реєстрації коливань НВЧ – діапазону та побудові їх адекватної математичної моделі.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Отримані в роботі критерії виникнення та розвитку нестійкостей поверхневих плазмонів, що пов'язані з нерівноваженістю електронних систем, реалізуються в існуючих твердотільних структурах. Тому вони можуть бути застосовані при розробці активних пристроїв напівпровідникової електроніки НВЧ – діапазону, що призначені для генерації, підсилення та перетворення коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів.
2. Проведений в дисертації порівняльний аналіз інкрементів пучково – плазмових нестійкостей різних гілок електростатичних коливань при русі потоку частинок уздовж або по нормалі до межі розподілу середовищ дозволяє розв'язати задачі оптимізації умов збудження коливань у структурах, що застосовуються у сучасній радіофізиці (структури МДН, р-п та гетеропереходи).
3. Один із напрямків підвищення функціональної можливості та швидкодії радіофізичних пристроїв базується на застосуванні багат шарових структур із визначеними електричними та магнітними властивостями. У роботі досліджено механізми пучково – плазмових нестійкостей,

коли об'єктом збудження є поверхневі хвилі з малими фазовими швидкостями, що підвищує ефективність взаємодії хвиль та заряджених частинок.

4. В результаті проведених досліджень механізмів взаємодії поверхневих коливань та заряджених частинок на межі розподілу середовищ із періодично – нерівною поверхнею визначено можливості значного підвищення рівня енергії випромінювання за рахунок застосування електронних пучків, модульованих на частоті поверхневих хвиль. Аналіз густини енергії поверхневих хвиль для різних типів випромінюючих систем показав перевагу структур типу вакуум – ідеальний провідник в короткохвильовій частині міліметрового діапазону.
5. Побудована в роботі теорія перехідного випромінювання при наявності потенційного бар'єра на межі розподілу середовищ дозволяє розв'язати низку прикладних задач напівпровідникової електроніки. За її допомогою отримано вираз для спектральної густини випромінювання заряду в неоднорідних напівпровідниках, виявлено залежності між параметрами напівпровідника та електронного потоку, що дає можливості визначення дефектів кристалічної ґратки.
6. При застосуванні магнітоактивних властивостей напівпровідникової плазми у прикладній радіофізиці значний інтерес викликають поверхневі гелікони, механізми збудження яких побудовано в даній роботі. Це пов'язано з їх специфічними особливостями. Вони існують у широкому діапазоні частот незалежно від співвідношення між частотою сигналу та частотою зіткнення електронів провідності і мають відносно невеликі фазові швидкості, що дозволяє забезпечити їх ефективну взаємодію з потоками заряджених частинок.
7. На відміну від відомих механізмів виникнення поверхневих електронних станів, пов'язаних із розривом періодичності потенціалу, у полі якого рухається частинка (моделі Шоклі та Тамма), у дисертації завбачено існування поверхневих станів, які обумовлені наявністю малих нерівностей поверхні. Тому отримані в роботі дисперсійні характеристики поверхневих поляритонів у неоднорідній плазмі, неоднорідність якої створено такого роду поверхнями, можуть бути застосовані при розв'язанні задач спектроскопії поверхні та діагностики межі розподілу провідних твердих тіл.

Особистий внесок здобувача. Роботи [1, 10, 12, 15, 21] виконані автором самостійно. В роботах, виконаних автором із співавторами, його особистий внесок полягає:

- в отриманні виразів для декрементів поверхневих плазмонів в умовах їх взаємодії з електронами на межі розподілу середовищ [2, 3, 4];
- у визначенні механізмів згасання та нестійкостей поверхневих коливань при їх взаємодії з потоками заряджених частинок [5, 8, 9, 11, 13, 14];
- у визначенні взаємозв'язків між неоднорідним розподілом потенціалу на межі розподілу середовищ та інкрементами пучкових нестійкостей [16, 17, 18, 19, 20];
- у визначенні спектральних характеристик поверхневих електронних станів на межі провідних твердих тіл [6, 7, 23, 26];
- в отриманні виразів для інкрементів нестійкостей магнітоплазмових коливань [25];
- у визначенні впливу неоднорідностей межі розподілу середовищ на спектр енергії перехідного випромінювання потоків заряджених частинок [22, 24].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації були представлені та обговорені на таких конференціях та симпозіумах:

- II International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves”, (Ukraine, Kharkov, 1994).
- XX International Conference in Infrared and Millimeter Waves (Florida, U S A, 1995).
- European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, (Kiev, Ukraine, 1996).
- III International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves”, (Ukraine, Kharkov, 1998).
- IV International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves”, (Ukraine, Kharkov, 2001).
- International Conference MMET – 2002 ”Mathematical methods in electromagnetic theory”, (Kiev, Ukraine, 2002).

- Наукова конференція, присвячена 50-літтю радіофізичного факультету Харківського національного університету, (Україна, Харків, 2002).

Публікації. За темою дисертації автором опубліковано **26** статей (з них **5** статей одноосібних) та 7 тез доповідей на конференціях. Статті опубліковано в національних та іноземних фахових наукових журналах та збірниках наукових праць, які увійшли до переліку наукових фахових видань України, де можуть публікуватися результати дисертацій на здобуття наукових ступенів.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 294 сторінки та містить у собі 274 сторінки основного тексту і 3 рисунка. Повністю займають всю площу сторінки 3 рисунка на 3 сторінках. Список використаних джерел на 17 сторінках налічує 183 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтована актуальність проблеми, визначені мета роботи, методи досліджень, а також наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі**, що носить оглядовий характер, обговорюються основні, відомі в літературі, механізми взаємодії електромагнітних коливань з зарядженими частинками в плазмі твердого тіла.

У цій частині дисертації приведено основні апробовані методи та уявлення сучасної радіофізики та плазмової електроніки, що знайшли своє застосування при розв'язанні задач даної роботи. Треба відзначити, що із фізичних явищ, пов'язаних з поведінкою електромагнітних коливань та заряджених частинок в плазмових середовищах, основна увага у даному розділі приділялась ефектам, механізми яких визначаються наявністю межі розподілу середовищ. До такого роду ефектів, що визначають механізми трансформації енергії заряджених частинок в енергію електромагнітних коливань в обмежених середовищах, належать процеси беззіткнувального згасання поверхневих поляритонів. Ці питання складають зміст **другого розділу** дисертації.

У першому підрозділі розглядалися електромагнітні коливання, що існують на межі розподілу середовищ, які відрізняються електромагнітними властивостями – поверхневі поляритони (хвилі Фано). При цьому використовувалися рівняння електродинаміки: рівняння Максвелла, матеріальні рівняння та граничні умови, за допомогою яких визначаються закони дисперсії поверхневих електромагнітних коливань. Спектр поверхневих поляритонів визначався в умовах наближення холодної плазми та відсутності їх зіткнувального затухання.

У другому підрозділі для опису механізму згасання поверхневих плазмонів, обумовленого їх взаємодією з електронами провідності на межі розподілу середовищ, застосовувалися рівняння електродинаміки в умовах нехтування ефектами запізнювання. Це пов'язано з тим, що швидкість носіїв заряду відносно швидкості світла мала. Для одержання матеріального рівняння застосовувалось кінетичне рівняння для електронів з самоузгодженим полем. Задача розв'язувалася за умов слабкої просторової дисперсії, коли глибина проникнення поля поверхневого коливання перевищує дебаєвський радіус електронів плазми.

Для розкриття механізму беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів в роботі застосовано поняття хвилі Ван – Кампена (ХВК). У попередніх роботах припускалось, що це згасання аналогічне згасанню Ландау в безмежному середовищі [1]. При цьому поле поверхневої хвилі в умовах дзеркального відбиття електронів від межі розподілу подавалося у вигляді набору просторових гармонік, що поширюються в безмежному середовищі. Згасання кожної гармоніки відбувалося внаслідок черенковського резонансу (рівності швидкості частинки та фазової швидкості гармоніки). Повне згасання поверхневих коливань є наслідком підсумовування згасання просторових гармонік. При цьому підході роль межі виявляється тільки у формуванні поверхневих хвиль. Такий метод використовується, як правило, в умовах дзеркального відбиття електронів від межі.

ХВК – це просторово-часові утворення, сформовані матеріальною точкою, що рухається з незмінною швидкістю. Заряджена частинка або група частинок малої густини формують

електромагнітні хвилі цього типу; їх фазова швидкість дорівнює швидкості частинки (групи частинок). На межі розподілу середовищ виникає перетворення поверхневих коливань у ХВК, які поширюються вглиб середовища. Таким чином, беззіткнувальне згасання плазмонів обумовлене збудженням ХВК, які відносять їх енергію від межі. Коефіцієнт перетворення залежить від поведінки електронів на поверхні плазмподібного середовища.

У другому підрозділі розглядалися можливості перетворення енергії поверхневих коливань в енергію ХВК в умовах, коли на межі має місце дифузне відбиття електронів. Задача розв'язувалася в класичному наближенні в умовах слабкої просторової дисперсії. Для одержання матеріального рівняння застосовувалося кінетичне рівняння. Його розв'язок дозволяв отримати зв'язок між полем поверхневої хвилі та ХВК за допомогою додаткових умов дифузного відбиття електронів на межі. У цьому підрозділі одержано вираз для декременту γ поверхневих плазмонів в умовах дифузного відбиття електронів від межі напівпровідник – вакуум у випадках максвелівського розподілу електронів γ_M та виродженого електронного газу γ_F :

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + \varepsilon_d}} + i\gamma; \quad \gamma_M = -\frac{(1+\delta)}{\sqrt{2\pi}}|q_x|v_T; \quad \gamma_F = -\frac{3(1+\delta)}{16}|q_x|v_F. \quad (1)$$

Тут: ω - частота поверхневих плазмонів, ω_0 - ленгмюрівська частота електронів

провідності, v_T, v_F - теплова та фермієвська швидкість електронів, q_x - хвильовий вектор, δ - коефіцієнт дифузії, $\varepsilon_0, \varepsilon_d$ – відповідно діелектрична стала кристалічної ґратки напівпровідника та діелектрика.

У підрозділі 2.3 розглянуто механізми взаємодії поверхневих електроакустичних хвиль та електронів на межі плазмове середовище – п'єзоелектрик. Показано, що беззіткнувальне згасання поверхневих коливань обумовлене перетворенням їх енергії в енергію ХВК. Одержано вираз дисперсійного рівняння для зв'язаних електроакустичних та плазмових коливань, а також вираз для його декременту, виявлено умови виникнення резонансу, при якому на межі виникає поверхнева плазмове – акустична хвиля, аналогічна хвилі на межі п'єзонапівпровідник - вакуум.

Механізми беззіткнувального згасання поверхневих коливань, що ґрунтуються на застосуванні ХВК, обмежено класичним наближенням: $\hbar\omega \ll T$ ($\hbar\omega$ - енергія плазмона, T - теплова енергія електрона). Разом з тим, останнім часом в різних галузях радіофізики все більше застосовують структури з великою концентрацією носіїв, де виконуються умови квантового наближення - $\hbar\omega \gg T$. До них належать: напівпровідникові ґратки, 2D електронні системи, структури МДН, тонкі металеві плівки. Проведені в роботі дослідження визначають механізми беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів внаслідок їх взаємодії з електронами середовища в діапазоні електронних температур, включаючи квантову межу. Ці результати наведені в підрозділі 2.4. У квантовому наближенні струм провідності складався з двох частин: одна з них визначала локальний зв'язок між струмом та полем, а друга – нелокальний. Друга складова описувала переходи між електронними станами внаслідок їх непружного розсіювання на потенціалі поверхневого плазмону. Струм, обумовлений цим нелокальним зв'язком, визначається завдяки збуреному недіагональному доданку до рівноважної діагональної матриці густини (функції розподілу електронів). Сам доданок визначається з рівняння руху для матриці густини. В роботі визначено механізм беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів на межі провідних середовищ. Знайдено декременти коливань в квантовому та класичному наближеннях. Так, на межі напівпровідник - діелектрик декремент поверхневих коливань в квантовому наближенні має вигляд:

$$\Delta\omega = -\sqrt{2}|q_x|v_T \sqrt{\frac{T}{\hbar\omega}}; \quad (\hbar\omega \gg T). \quad (2)$$

Показано, що в класичному наближенні електронні переходи, що пов'язані з поглинанням та випромінюванням поверхневих плазмонів, призводять до збудження ХВК, а декремент коливань визначається формулою (1), де $\delta = 1$.

У п'ятому підрозділі, методом вторинного квантування одержано кінетичне рівняння для поверхневих плазмонів (бозонів). Воно описує зміну їх кількості при взаємодії з електронами провідності в умовах, коли електрони дзеркально відбиваються від межі розподілу середовищ:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{k_1 k_2} [W_{k_1 q k_2}]^2 \delta(E_{k_1} - E_{k_2} - \hbar\omega_q) \{ (N_q + 1)n_{k_1}(1 - n_{k_2}) - N_q n_{k_2}(1 - n_{k_1}) \}. \quad (3)$$

Тут $N_q; n_k$ - відповідно кількість плазмонів та електронів у станах з хвильовими векторами -

$q; k_1; k_2$; $E_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ - енергія електрона, m - його ефективна маса. $W_{k_1 q k_2}$ - матричний елемент гамільтоніану взаємодії електронів та плазмонів:

$$W_{k_1 q k_2} = \left[\frac{8\pi e^2 q \hbar^3}{m^2 L^2 S(\varepsilon_0 + \varepsilon_d) \omega} \right]^{1/2} \frac{k_{1y} k_{2y} (k_1^2 - k_2^2) q_x}{[q^2 + (k_{1y} + k_{2y})^2][q^2 + (k_{1y} - k_{2y})^2] |q_x|}. \quad (4)$$

Тут k_y - нормальна компонента хвильового вектора електрона L - довжина зразка вздовж осі y ; S - площа поверхні; q_x, q_z, k_x, k_z - відповідно тангенційні складові хвильових векторів плазмона та електрона. Квадрат матричного елемента описує імовірність переходу електрона із стану k_1 до стану k_2 та в зворотному напрямку з випромінюванням та поглинанням плазмонів. На відміну від ефекту Вавілова - Черенкова особливість цієї взаємодії полягає в тому, що закони збереження виконуються тільки для тангенційних складових хвильових векторів \vec{q} ; \vec{k} . Для нормальних складових ці закони не виконуються через неоднорідність простору уздовж y . За допомогою рівняння (3) в роботі отримано вирази для декременту поверхневих плазмонів у випадку виродженого та невиродженого електронного газу $\gamma = \frac{\partial N_q}{2N_q \partial t}$ в умовах, коли

$$N_q \ll 1, n_k = const.$$

Так, у випадку невиродженого електронного газу при умовах $|k_{1y} - k_{2y}| \gg q$; $k_x \gg q$ вираз для декременту має вигляд :

$$\gamma = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} q v_T \frac{T}{\hbar\omega} (\exp(-\frac{\hbar\omega}{T}) - 1) \int_0^{+\infty} x^2 \sqrt{x^2 + \frac{\hbar\omega}{T}} \exp(-x^2) dx. \quad (5)$$

Треба зазначити, що на відміну від рівняння руху для матриці густини, кінетичне рівняння типу (3) дозволяє визначати не тільки процеси індукованого випромінювання та поглинання, але і спонтанне випромінювання поверхневих плазмонів електронами провідності [2]. У даному підрозділі показано, що спонтанне випромінювання безпосередньо пов'язане з втратами енергії зарядженої частинки на збудження поверхневих коливань на межі плазмоподібного середовища.

Оскільки розглянуті механізми згасання поверхневих коливань є беззіткнувальними, то виникає питання про можливість обернення цього згасання, що призводить до зростання амплітуди поверхневих коливань в нерівноважному середовищі. Таким середовищем в **третьому розділі** виступає плазма з потоком заряджених частинок.

Ця частина дисертації присвячена взаємодії потоків заряджених частинок, що рухаються по нормалі до межі розподілу середовищ із різними електромагнітними властивостями, з поверхневими електромагнітними хвилями. Ця взаємодія базується на ефекті перехідного випромінювання. Як відомо [3], цей ефект полягає в тому, що електромагнітне поле зарядженої частинки, яка рухається в матеріальному середовищі, визначається не тільки її швидкістю та кількістю заряду, але й електромагнітними властивостями середовища. Коли ці властивості змінюються, наприклад, при проходженні частинки через межу розподілу середовищ з різними електромагнітними властивостями з постійною швидкістю, має місце зміна поля, утвореного частинкою. Виникають вільні поля, які не “прив’язані” до частинки. Їх роль можуть виконувати поля поверхневих хвиль. Перехідне випромінювання цих хвиль можна розглядати таким чином. Заряджена частинка потоку являє собою набір ХВК, а збудження поверхневої хвилі має місце при збігу її частоти з однією із частот ХВК.

У підрозділі 3.1 розглянуто питання взаємодії потоку частинок із поверхневими плазмонами на межі напівпровідник – вакуум. Властивості електронів пучка визначались кінетичним рівнянням. Показано, що енергія поверхневих плазмонів перетворюється в енергію ХВК потоку частинок, які виносять її вглиб простору. Це призводить до згасання поверхневих коливань. В роботі одержано вираз для спектру та декременту γ поверхневих плазмонів:

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + 1}} + i\gamma; \quad \gamma = -\frac{2\omega_b^2}{\omega_0^2} q_x \nu_0; \quad q_x > 0; \quad \nu_0 > 0. \quad (6)$$

Тут $\omega_0^2 \gg \omega_b^2$; ω_b - ленгмюрівська частота електронів потоку, ν_0 - швидкість електронів потоку. Можна показати, що при зміні ν_0 на $-\nu_0$ необхідно замінити q_x на $-q_x$.

У попередніх роботах такого роду задачі розв’язувались в умовах гідродинамічного опису, що вимагало додаткових умов на межі для хвиль просторового заряду потоку частинок [4]. При цьому на межі крім електродинамічних умов виконувались дві додаткові умови для потоків частинок та їх імпульсів. Амплітуда однієї з хвиль просторового заряду була наростаючою при збільшенні відстані від межі, що не задовольняє умовам на нескінченність. Тому, при гідродинамічному описі враховувалася тільки хвиля поверхневого заряду, амплітуда якої зменшується при збільшенні відстані від поверхні розподілу середовищ, а декремент плазмонів був вдвічі менший, ніж у формулі (6). Застосований у дисертації метод виявляється більш коректним, оскільки при отриманні декременту, всі величини виявляються скінченними величинами при збільшенні відстані від межі. При цьому застосовується єдина додаткова умова на поверхні розподілу середовищ.

У другому підрозділі проведено дослідження еволюції початкового стану холодної напівобмеженої плазми та електронного моноенергетичного пучка, що перетинає поверхню. Таким чином розв’язується початково – гранична задача. Показано, що стійкість такої системи відносно малих збурень густини $N(r, t)$, швидкості $u(r, t)$ та функції розподілу електронів пучка $f(r, t)$ залежить від початкових умов. Якщо в момент часу $t = 0$ задана густина електронів плазми, що локалізована на поверхні розподілу середовищ $y = 0$, $N(r, 0) = N_s \delta(y)$, а $u(r, 0) = f(r, 0) = 0$, то система виявляється стійкою. В системі виникають згасаючі поверхневі коливання (плазмони) та об’ємні хвилі - ХВК, що рухаються вглиб плазми. Декремент коливань визначається формулою (6).

Якщо густина носіїв плазми не дорівнює нулю в усій області напівпростору, а $u(r, 0) = f(r, 0) = 0$, то система нестійка. Нестійкість обумовлюється взаємодією частинок електронного пучка та коливань холодної плазми (нестійкість Ахієзера – Файнберга). При цьому амплітуда поля зменшується за експонентою при віддаленні від межі в область $y < 0$. Виникнення коливань на ленгмюрівській частоті у цій області обумовлене трансформацією на межі зв’язаних

об'ємних коливань холодної плазми та електронного пучка, що існують в області $y > 0$. Подібним чином у системі розвивається нестійкість, якщо $N(r,0) = u(r,0) = 0$; $f(r,0) \neq 0$.

У підрозділі 3.3 досліджувалася взаємодія поверхневих плазмонів з потоком заряджених частинок, що рухається вздовж нормалі до межі розподілу плазмоподібних середовищ у квантовому наближенні. У даному випадку енергія плазмонів значно перевищує температуру електронів пучка та плазми. Властивості електронів пучка визначаються рівнянням руху для матриці густини. Завдяки хвильовій природі частинок пучка механізм їх взаємодії з плазмонами відрізняється від класичного наближення (підрозділ 3.1). У роботі показано, що імовірність переходів електронів з основного стану " k_0 " у стан з випромінюванням поверхневого плазмона перевищує імовірність їх переходів з поглинанням плазмона. При цьому амплітуда поля поверхневої хвилі зростає. Так, на межі розподілу двох плазмоподібних середовищ, що відрізняються діелектричними сталими ґратки та електронною густиною за умови, що кінетична енергія частинки значно більша ніж енергія плазмону, інкремент нестійкості дорівнює:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 \omega_s^2 q_x \nu_0}{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}) [\omega_s^2 + (q_x \nu_0)^2]^2}; \quad q_x > 0, \nu_0 > 0 \quad . \quad (7)$$

$$\text{Тут } \omega_s^2 = \frac{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}; \quad \omega_{0i} - \text{ плазмова частота } (i=1,2), \quad \varepsilon_{0i} - \text{ діелектрична стала}$$

ґратки. Треба підкреслити, що ХВК у цьому випадку виникають перед межею розподілу і частинки взаємодіють з поверхневими плазмонами в усій області локалізації поля. Видно, що інкремент має

$$\text{максимум } \gamma_{\max} = \frac{3\sqrt{3}\omega_b^2}{8(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})\omega_s} \quad \text{за умови} \quad \nu_0 = \frac{\omega_s}{q_x \sqrt{3}}, \quad \text{коли приблизно збігаються час}$$

прольоту електроном області локалізації поля і період коливання.

У підрозділі 3.4 для опису властивостей електронів пучка при їх взаємодії з поверхневими плазмонами застосовано рівняння Шредінгера та враховуються умови на межі для хвильових функцій електронів, збурених полем поверхневої хвилі. Висота потенційного бар'єру, що поділяє середовища, була менша в порівнянні з енергією частинки. Але своєрідним бар'єром для електронів є вектор – потенціал поля поверхневих коливань. Він призводить до появи відбитих електронних хвиль, амплітуди яких визначаються вектор-потенціалом завдяки умовам на межі. Урахування відбитих електронних хвиль призводить до зменшення інкремента (7) у два рази. Це зумовлено тим, що ХВК виникають на межі, що зменшує простір взаємодії поверхневих хвиль та частинок. У цьому підрозділі розглянута також нелінійна взаємодія заряджених частинок потоку та поверхневих плазмонів. Нелінійність обумовлена додатковим потенціалом у рівнянні Шредінгера для хвильової функції електронів основного стану. Чисельний аналіз рівняння Шредінгера та рівнянь електромагнітного поля показав, що в системі встановлюється стаціонарний коливальний режим, при якому амплітуда поля та густина електронів осцилюють з частотою, яка значно менша ω_s .

У **четвертому розділі** дисертації досліджуються кінетичні та гідродинамічні нестійкості власних коливань твердотільних структур, що взаємодіють із потоками заряджених частинок, коли вони рухаються вздовж або по нормалі до межі розподілу середовищ. У першому підрозділі визначено дисперсійні характеристики електростатичних коливань у системі, що є плазмовим шаром (діелектриком), оточеним середовищами з різними або однаковими електромагнітними властивостями. У гідродинамічному наближенні досліджено нестійкості типу Ахієзера – Файнберга в умовах, коли електронний потік рухається вздовж двох плазмоподібних середовищ з однаковими властивостями. Іншими словами, в плазмі твердого тіла існує безмежно широка щілина, яка містить електронний потік. В умовах резонансу, коли збігаються фазова швидкість хвиль зі швидкістю електронів, отримано вирази для інкрементів електростатичних коливань з

симетричним та антисиметричним розподілом тангенційної складової електричного поля у шарі з діелектричною сталою ε_d . Для симетричної моди частота ω_1 та інкремент нестійкості γ_1 мають вигляд :

$$\frac{\gamma_1}{\omega_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\omega_b^2 \operatorname{th}(qd)}{2\omega_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad \omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + \varepsilon_d \operatorname{th}(qd)}}, \quad (8)$$

де $2d$ - товщина шару, ε_0 , ω_0 - діелектрична стала ґратки та плазмова частота середовищ.

Аналогічний вигляд мають інкремент та частота антисиметричної моди. Вони відрізняються від формули (8) зміною $\operatorname{th}(qd)$ на $\operatorname{cth}(qd)$. Показано, що в умовах, коли товщина зазору між плазмподібними середовищами значно менша від довжини хвилі, то інкремент антисиметричної моди домінує. Це пов'язано з тим, що для антисиметричної моди густина збурених носіїв локалізована на межах плазмодібних середовищ. У цьому підрозділі в гідродинамічному наближенні було досліджено механізми взаємодії власних електростатичних коливань структури такого роду (діелектрик – напівпровідник – діелектрик) з потоком заряджених часток, що рухаються по нормалі до межі розподілу середовищ. Коливання можуть зростати або згасати в залежності від співвідношення між часом прольоту $\tau = 2d/v_0$ частинкою шару та їх частотою.

Якщо $\omega \tau = (2l+1)\pi/2$, $l=1,2,3\dots$ то інкремент антисиметричної (симетричної) моди має максимум при l парних (непарних).

Гідродинамічна нестійкість може розвиватися також у МДН – структурах. При цьому інкремент досягає максимальних розмірів $\gamma = \frac{\omega_b^2}{4\omega_0^2} \frac{\omega}{qd}$ при такому ж зв'язку між ω та τ при парних l .

В цій частині роботи для структур такого роду проведені також дослідження кінетичних нестійкостей, що ґрунтуються на принципах вторинного квантування, тобто квантування енергії плазмових коливань та потоку електронів. Вони дозволяють урахувати два випадки: енергія плазмона більша чи менша за температуру електронів пучка. В роботі знайдено інкременти кінетичних нестійкостей у випадках коли потік частинок рухається як по нормалі до межі розподілу середовищ, так і вздовж межі.

Аналіз отриманих у цьому розділі дисертації результатів показав, що максимальний інкремент нестійкості мають антисиметричні коливання при взаємодії з моноенергетичним потоком, що рухається вздовж межі розподілу плазмподібних середовищ в умовах черенковського резонансу.

При проходженні через провідну пластину моноенергетичного потоку нестійкості виникають в залежності від параметрів потоку та твердотільної структури. Показано, що інкремент нестійкостей у гідродинамічному наближенні значно перевищує інкременти кінетичних нестійкостей. В той же час в умовах, коли довжина напівпровідникової пластини значно менша довжини ХВК, нестійкість власних коливань структури виникає тільки в умовах квантового наближення.

В підрозділі 4.2 було досліджено взаємодію власних електростатичних коливань періодичного неоднорідного плазмового середовища з моноенергетичним потоком заряджених частинок. Властивості пучка та нерухомого плазмового середовища визначалися рівняннями гідродинаміки.

Показано, що наявність періодичності структури обумовлює зв'язок між власними коливаннями потоку – хвилями просторового заряду та плазмовими коливаннями структури. Було одержано дисперсійне рівняння для системи потік заряджених частинок – напівпровідникова надґратка в умовах, коли частинки потоку проходять крізь середовище з постійною швидкістю.

Знайдено власні частоти коливань, сформульовано умови розвитку нестійкостей та отримано вирази для різних окремих випадків.

Нестійкість коливань такої структури виникає, коли діелектрична проникність одного з її шарів має частотну дисперсію і менша за нуль. Як і у випадку однорідної плазми найбільший інкремент виникає, коли частота ХВК збігається з власною частотою системи при однакових хвильових векторах; інкремент нестійкості в умовах черенковського резонансу між фазовою швидкістю частинки та заряду відрізняється від інкремента нестійкості Ахієзера – Файнберга параметрами надгратки та є меншим ніж у випадку однорідного середовища. Проте в однорідній плазмі, завдяки тому, що довжина вільного пробігу електронів провідності мала, умови нестійкості Ахієзера – Файнберга є важко здійсненими. У цьому відношенні шарувато – періодичне середовище має перевагу через те, що у цьому випадку довжина вільного пробігу електрона значно перевищує довжину плазмового шару і виконання умов резонансу більш імовірне.

З практичної точки зору заслуговує на увагу питання про резонансну взаємодію хвиль та частинок в умовах, коли потік електронів та періодична структура розділені у просторі.

У другому підрозділі цієї частини роботи були досліджені механізми взаємодії власних поверхневих коливань напівпровідникової надгратки з потоками заряджених частинок, коли потік рухається над поверхнею надгратки. Показано, що на межі надгратки - діелектрик існують поверхневі електростатичні хвилі і було визначено їх спектр. Вони поширюються під великим кутом до осі надгратки (скісні хвилі). Наявність потоку заряджених часток, що рухалися над поверхнею надгратки, визначала зміну умов на межі для нормальних складових вектора індукції внаслідок виникнення поверхневого заряду. Було отримано вирази для інкрементів нестійкостей з урахуванням залежностей від параметрів напівпровідникових структур в умовах черенковського резонансу:

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\omega_b^2 \omega_p}{2\varepsilon_p} \right)^{1/3}; \quad \omega_p = q_z v_0;$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\omega_{01}^2 d_1 + \omega_{02}^2 d_2}{\varepsilon_p d_1}}; \quad \varepsilon_p = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_{01} d_1 + \varepsilon_{02} d_2}{d}. \quad (9)$$

Тут $d = d_1 + d_2$ - період ґратки, d_1, d_2 - розміри плазмових шарів з діелектричними

проникностями: $\varepsilon_i = \varepsilon_{oi} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$, ($i=1,2$) ; $\varepsilon_1 \varepsilon_2 < 0$, ε_0 - діелектрична стала діелектрика;

$q_z \parallel v_0$ - складова хвильового вектору вздовж осі ґратки.

Перевага періодичної структури над однорідним середовищем полягає в тому, що в ній можливе існування хвиль з малою фазовою швидкістю (частоти зіткнення носіїв малі) [4]. Внаслідок цього, в періодичних структурах можна забезпечити виконання резонансних умов між швидкістю частинок та фазовою швидкістю хвиль, що збуджуються.

У **п'ятому розділі** дисертації були розглянуті питання впливу потенційного бар'єру на механізми взаємодії електромагнітних коливань та потоків заряджених частинок. Треба відзначити, що умови, коли межа розподілу середовищ є прозорою для частинок пучка (потенційний бар'єр відсутній) та потенційний бар'єр безмежний (випадок дзеркального відбиття), на теперішній час розглянуто досить досконально. В той же час питання впливу потенційного бар'єра скінченних розмірів на механізми перехідного випромінювання поверхневих плазмонів залишаються відкритими. В даному розділі розглянуто два аспекти цього впливу: по - перше, наявність потенційного бар'єра призводить до зміни параметрів потоку частинок; по-друге, потенційний бар'єр призводить до появи двомірних електронних шарів, що мають власний спектр поверхневих коливань.

У першому підрозділі були визначені механізми взаємодії потоку заряджених частинок з поверхневими плазмонами в умовах, коли потенціал $U(y)$ має вигляд: $U(y) = 0$ при $-\infty < y < 0$, $U(y) = U_0$ при $0 \leq y < \infty$. Задача розв'язувалась методом послідовних наближень за умови малості густини носіїв пучка у порівнянні з густиною електронів холодної плазми. Кінетична енергія частинок значно перевищувала енергію плазмонів та висоту потенційного бар'єра. Інкремент нестійкості поверхневих плазмонів має вигляд:

$$\gamma = \gamma_0 \left[1 + 2 \frac{v_1 - v_2}{v_1} \right]. \quad (10)$$

Тут γ_0 - інкремент нестійкості в умовах відсутності потенційного бар'єра; v_1 - швидкість частинки в середовищі $y < 0$; $v_2 = \sqrt{v_1^2 - \frac{2U_0}{m}}$ - швидкість частинки у середовищі $y \geq 0$. При $v_1 > v_2$ отримаємо $\gamma > \gamma_0$. Таким чином, урахування впливу потенційного бар'єра призводить до збільшення інкремента. Це збільшення обумовлено тим, що внесок у повне випромінювання частинок потоку, крім перехідного, додає також гальмівне випромінювання, яке пов'язане із зміною швидкості частинок на межі.

У другому підрозділі розглядалась взаємодія поверхневих плазмонів з потоком заряджених частинок, які рухаються по нормалі до межі розподілу двох плазмподібних середовищ із застосуванням енергетичного підходу. Іншими словами, було одержано кінетичне рівняння, що визначає залежність зміни кількості поверхневих плазмонів від часу при їх взаємодії з падаючою, відбитою та прохідною компонентами електронного потоку. Хвильові функції електронів потоку для падаючої, відбитої та прохідної компонент пучка визначались, як розв'язки рівняння Шредінгера з умовами на межі розподілу середовищ. Їх значення залежало від розмірів потенційного бар'єра. Було показано, що коли кінетична енергія електронів потоку більша, ніж енергія плазмону, то процеси випромінювання плазмонів електронами домінують над процесами їх поглинання частинками потоку у квантовому наближенні $\hbar\omega \gg T$.

Було одержано вираз для інкремента нестійкості поверхневих плазмонів, який залежить від коефіцієнтів відбиття та проходження частинок крізь бар'єр.

Показано, що він відрізняється від (10), а інкремент виявляється меншим, ніж у випадку відсутності потенційного бар'єра. Це викликано тим, що наявність потенційного бар'єра призводить до перерозподілу числа частинок в потоці, а кінетичне рівняння описує взаємодію поверхневих плазмонів та електронів як процес зіткнення частинок (бозонів та ферміонів) для кожного парціального потоку незалежно. При цьому в кінетичному рівнянні складаються квадрати матричних елементів гамільтоніана взаємодії плазмонів з відповідним числом електронів у парціальному потоці, в той час як при відсутності бар'єра складаються самі матричні елементи електронів, що падають на межу та проходять через неї.

В роботі, виходячи з рівняння Шредінгера з потенціалом $U(y) = -U_0$ при $-a \leq y \leq a$ $U(y) = 0$ при $a < y, y < -a$ (потенційна яма) і граничних умов для хвильової функції електрона, показано, що в такій системі виникають поверхневі електронні стани -2D електронний газ. (Задача аналогічна задачі поширення електромагнітної хвилі в нескінченно широкому діелектричному хвилеводі).

Одержано дисперсійне рівняння, яке пов'язує тангенційну складову імпульсу електрона, область локалізації хвильової функції, глибину та ширину потенційної ями. Знайдено спектр поверхневих електронних станів, умова існування яких визначається нерівністю $\frac{\hbar^2}{2m_e a^2} \gg U_0$.

При виконанні цієї нерівності потенційну яму (потенційний бар'єр) можна описувати функцією $U(y) = -V_0 \delta(y)$, де $V_0 = 2U_0 a$.

В роботі розв'язано також електродинамічну задачу та показано, що в шарі з 2D газом, оточеним середовищами з діелектричними сталими ε_1 та ε_2 , можуть існувати поверхневі плазмові коливання з частотою $\omega = \omega_s$.

$$\omega_s = \left[\frac{4\pi e^2 N_0 q d}{m_e (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2}; \quad d = \frac{\hbar^2}{2m_e U_0 a}; \quad qd \ll 1. \quad (11)$$

Тут N_0 - густина електронів шару, d - глибина локалізації поверхневого електронного стану, q - тангенційна складова хвильового вектора, m_e - ефективна маса електрона у шарі. Формула (11) збігається з відомим виразом для частоти поверхневих плазмонів, якщо $N_0 d = N_s$, де N_s - поверхнева густина заряду.

Далі в цьому підрозділі за допомогою рівняння Шредінгера було досліджено взаємодію плазмових коливань ω_s із моноенергетичним потоком заряджених частинок, що проходить крізь 2D електронний газ.

Визначено інкремент нестійкості поверхневих плазмонів. При виконанні умов $\omega_s^2 \gg q^2 v_0^2$, він має вигляд:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2}{\omega_0^2} \frac{v_0}{d} \left(1 + 4 \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Тут ω_0 - плазмова частота електронів у шарі. Величина інкремента обернено пропорційна часу прольоту частинок крізь 2D електронну систему $\gamma \approx 1/\tau$, де $\tau = d/v_0$, $d \gg a$.

У четвертому підрозділі одержано кінетичне рівняння для поверхневих плазмонів 2D системи, яке описує їх взаємодію з електронним потоком, що рухається по нормалі до межі розподілу середовищ. Припускається, що газ локалізований поблизу дельтаподібної потенціальної ями $U(y) = -V_0 \delta(y)$. Знайдено інкремент нестійкості. Він описується формулою (12), якщо в ній замінити $U_0 a$ на $2V_0$.

У шостому розділі дисертації досліджуються поверхневі електронні стани, що виникають на межі розподілу середовищ із різними електромагнітними властивостями при наявності малих нерівностей межі; виявлені фізичні механізми їх утворення, умови існування та спектри поверхневих плазмових коливань, які їм відповідають.

Відомі механізми поверхневих станів заряджених частинок провідних твердих тіл, у більшості випадків, пов'язані з розривом періодичності потенціалу кристалічної структури, у полі якого вони знаходяться. При цьому, в залежності від вибору моделі відрізняють стани Шоклі (розрив структури атомів на межі) та стани Тамма (зміна ходу періодичності потенціалу кристалічної ґратки на межі кристал - вакуум).

У дисертації розглянуто інший механізм виникнення поверхневих електронних станів в умовах, коли рух електрона обмежений поверхнею з малими нерівностями, яка утворює безмежно високий потенційний бар'єр. Було досліджено два типи нерівної поверхні, коли нерівності мали періодичний або випадковий характер. У першому підрозділі розглянуто нерівності одномірні, у другому – двомірні. Малість нерівностей визначалась тим, що їх амплітуда була набагато менша за період або довжину кореляції. В результаті хвильова функція визначалась як розв'язок рівняння Шредінгера. В умовах періодичності межі розподілу середовищ її амплітуда є сумою безмежної кількості просторових гармонік. Дисперсійне рівняння визначалось за допомогою умов рівності нулю потоку частинок крізь поверхню твердого тіла, коли похідна хвильової функції по нормалі до межі дорівнює нулю. Через те що амплітуда нерівностей значно менша за їх період, виникає

можливість обмежитись розглядом взаємодії трьох гармонік. При цьому амплітуда нульової гармоніки максимальна. Розв'язок дисперсійного рівняння визначався методом послідовних наближень за малим параметром, який дорівнює відношенню амплітуди нерівностей до їх періоду. Коли нерівності відсутні, дисперсійне рівняння описує поширення трьох незалежних гармонік. Перше наближення дозволяє визначити додатак до хвильового вектора нульової гармоніки, пов'язаний з параметрами межі та отримати закон дисперсії поверхневих електронних станів:

$$E_k = \frac{\hbar^2}{2m_e} [k_z^2 (1 - \frac{1}{4} \xi_0^2 G_z^2 k_z^2) + k_x^2]; \quad G_z > k_z; \quad k_z > 0; \quad G_z > 0. \quad (13)$$

Тут ξ_0 - висота, $\frac{2\pi}{G_z}$ - період нерівностей. При цьому нормальна компонента хвильового вектора

нульової гармоніки має вигляд :

$$k_{y0} = \frac{i}{2} (\xi_0 k_z)^2 G_z. \quad (14)$$

Вона досягає максимального значення $k_{y0} = \frac{i}{4} \xi_0 G_z^2$ в умовах резонансу, коли збігаються

хвильові вектори та частоти нульової та сусідніх з нею гармонік $k_{y1}; k_{y-1}$ при $k_z = \pm \frac{1}{2} G_z$

(максимально локалізований електронний стан).

У короткохвильовому наближенні поверхневі електронні стани не виникають. Компонента нульової гармоніки при цьому має комплексне значення, що відповідає квазістаціонарним станам електронів:

$$k_z^2 \gg G_z^2; \quad k_{y0} = (i-1) \xi_0^2 (k_z G_z)^{3/2}. \quad (15)$$

При дослідженні нерівної поверхні, яка носила випадковий характер, припускалось, що амплітуда відхилень випадкової функції поверхні від однорідної межі мала в порівнянні з довжиною кореляції і закон дисперсії визначався методом послідовних наближень за цим малим параметром. Розв'язок дисперсійного рівняння при цьому описує електронні стани: поверхневі (у довгохвильовому випадку), квазістаціонарні (у наближенні коротких хвиль). Вони аналогічні виразам для станів електронів в умовах періодичної межі, але характерним розміром є не період нерівностей, а довжина кореляції. Проведені дослідження механізмів виникнення поверхневих електронних станів в умовах наявності двомірних нерівностей показали, що ніяких якісних особливостей у порівнянні з одномірними не виникає.

У третьому підрозділі були отримані та досліджені вирази для дисперсійних характеристик поверхневих поляритонів у неоднорідній плазмі, виникнення неоднорідності якої обумовлене поверхневими електронними станами на межі провідних твердих тіл із малими періодичними неоднорідностями. При виконанні умови (14) густина електронів для виродженого газу має вигляд:

$$n(y) = \frac{2}{S} \sum_k |k_{y0}| n_k \exp(-2|k_{y0}| y). \quad (16)$$

Тут S - площа поверхні зразка. Спектр поверхневих поляритонів визначався за допомогою умов на межі для тангенційних компонентів електричного поля та нормальних компонентів вектора індукції з урахуванням поверхневих електронних станів. Показано, що для електростатичних коливань у цьому випадку виникає залежність їх власної частоти від хвильового вектора. Так, на межі діелектрик – плазмове середовище їх закон дисперсії, при виконанні умови (14) має вигляд:

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + \varepsilon_d}} \left[1 - \frac{\pi G_z}{6q_x} \frac{n_0 \xi_0^2 k_F^2}{N_0 + n_0} (\varepsilon_0 + \varepsilon_d) \right]; \quad q_x > 0. \quad (17)$$

Тут $\omega_0 = \frac{4\pi e^2 (N_0 + n_0)}{m_e}$, N_0 - концентрація електронів однорідної плазми (при відсутності

нерівностей поверхні), n_0 - концентрація електронів неоднорідної плазми, $k_F^2 = \frac{16\pi n_0}{\xi_0^2 G_z}$;

$\hbar k_F$ - Фермі-імпульс.

Таким чином, неоднорідність плазми, що обумовлена періодичною чи випадковою нерівністю межі, призводить до зміни спектра поверхневих електростатичних коливань, фазова швидкість яких менша за швидкість поверхневих поляритонів, що поширюються вздовж однорідної поверхні плазми.

У третьому та четвертому розділах дисертації процеси перехідного випромінювання розглядалися як можливий механізм генерації та підсилення електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів. При цьому, як об'єкти досліджень, виступали плазмоподібні структури, в яких досліджувалась область взаємодії поверхневих хвиль та заряджених частинок. Разом із тим, задачі перетворення енергії заряджених частинок в енергію електромагнітних коливань набувають іншого аспекту у системах, де розглядаються об'ємні хвилі. У цьому випадку досліджено спектральну густину енергії випромінювання.

У **сьомому розділі** дисертації було досліджено механізми впливу властивостей поверхні провідних твердих тіл на спектральні характеристики перехідного випромінювання.

У першому підрозділі цієї частини роботи досліджувались процеси перехідного випромінювання заряджених частинок, що рухаються по нормалі до межі періодично неоднорідної поверхні ідеального провідника. Метою дослідження було визначення закону дисперсії електромагнітних коливань такої системи та умови їх збудження, коли розмір нерівностей поверхні

ξ_0 значно менший за період $d = \frac{2\pi}{G_x}$. Задача розв'язувалася методом послідовних наближень за

малим параметром $\xi_0 G_x \ll 1$. З умови рівності нулю тангенційної складової електричного поля на межі провідника було отримано дисперсійне співвідношення для трьох просторових гармонік електромагнітного поля. Розв'язок дисперсійного рівняння визначав смугу непроникнення коливань, області існування поверхневих та об'ємних коливань. В роботі визначено закон дисперсії поверхневих електромагнітних хвиль та знайдено втрати енергії зарядженої частинки на їх збудження. Завдяки застосуванню виразу для енергетичних втрат, визначено імовірності електронних переходів у потоці частинок з випромінюванням та поглинанням поверхневих поляритонів та отримано кінетичне рівняння для коливань такого роду. Його розв'язок дозволяє знайти інкремент нестійкості поверхневих поляритонів за умов, коли моноенергетичний потік електронів рухається по нормалі до ідеально провідної поверхні з регулярними нерівностями.

В умовах резонансу, коли довжина півхвилі збігається з періодом ґратки, інкремент досягає максимальних значень і має вигляд :

$$\gamma = 2 \frac{\omega_b^2}{c^2} v_0 \xi_0. \quad (18)$$

Цей механізм може бути застосованим для генерування електромагнітних хвиль на частоті

$\omega_0 = \frac{c G_x}{2}$. Так, наприклад, $\omega \approx 3 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$ при $G_x = 2 \times 10^3 \text{ см}^{-1}$.

У другому підрозділі досліджувався вплив потенційного бар'єра на спектральну густину енергії перехідного випромінювання об'ємних та поверхневих хвиль зарядженою частинкою, що рухається по нормалі до межі розподілу середовищ з різними діелектричними проникностями. Було отримано вирази для спектральних характеристик інтенсивностей випромінювання електромагнітних хвиль для різних типів потенційних бар'єрів: прямокутна потенційна стінка, бар'єр скінченної ширини та δ - подібний бар'єр. Визначено, що поле випромінювання складається із трьох складових: перша обумовлена зміною діелектричної проникності та існує без потенційного бар'єра, друга пов'язана із зміною швидкості частинки без урахування відбиття частинок від межі, третя складова визначає долю випромінювання, що пов'язана з хвилею де-Бройля, відбитою від межі.

Так, при проходженні частинки над бар'єром скінченної ширини a крізь межу середовищ з однаковими діелектричними проникностями, спектральна густина випромінювання об'ємних електромагнітних хвиль в елементі тілесного кута $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ дорівнює:

$$\frac{d^2W}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2 \beta^2 U_0^4 \sin^3\theta}{8cE^2 (E - U_0)^2} \sin^4 \frac{a}{\hbar} \sqrt{2m(E - U_0)} . \quad (19)$$

Тут $\beta = v_0/c$; $E = mv_0^2/2$; θ - кут між траєкторією частинки та лінією, що з'єднує точку

спостереження та точку перетину межі частинкою; $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Густина випромінювання у цьому випадку осцилює та дорівнює нулю, коли на ширині бар'єра вміщується ціле число півхвиль.

У третьому підрозділі досліджувалися механізми збудження поверхневих поляритонів потоком заряджених частинок, модульованим на частоті поверхневої хвилі, за умов, коли він рухається по нормалі до межі провідних твердих тіл. При розв'язанні цієї задачі припускалось, що спектр потоку частинок містить дві хвилі просторового заряду. Їх амплітуди визначалися за допомогою додаткових умов для густини та швидкості носіїв на площині, яка знаходиться над межею розподілу середовищ. Застосування цих додаткових умов дозволяє визначити поля перехідного випромінювання через параметри модуляції.

В роботі отримано вираз для густини потоку енергії перехідного випромінювання поверхневої хвилі:

$$S_x = S_0 \left(4 \cos^2 \beta + \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \sin^2 \beta \right). \quad (20)$$

Тут $\beta = \frac{\omega_b}{v_0} l$, S_0 - компонента густини потоку енергії, що визначається законом дисперсії

поверхневих хвиль та параметрами матеріального середовища. Густина потоку енергії поверхневої хвилі осцилює в залежності від співвідношення між періодом ленгмюрівських коливань пучка та часом проходження частинкою простору l , що відділяє площину модуляції від межі розподілу середовищ. Це пов'язано з тим, що ленгмюрівські коливання переносяться у просторі із швидкістю

v_0 і довжина хвилі дорівнює $\frac{2\pi v_0}{\omega_b}$. Завдяки умовам модуляції при $y = -l$ потік частинок

мінімальний. Таким чином, при $\beta = N\pi$ площина модуляції знаходиться від межі на відстані l

кратній цілій кількості півхвиль і S_x - мінімальна. При $\beta = \frac{\pi}{2} (2N + 1)$ довжина l дорівнює

цілій непарній кількості четвертин хвиль. У цьому випадку S_x досягає максимальної величини,

тому що $\frac{\omega^2}{\omega_b^2} \gg 1$. В роботі отримано значення S_0 при взаємодії електронного потоку з поверхневими хвилями для різних провідних середовищ. Так, для поверхневих плазмових хвиль (хвилі Фано):

$$S_0 = \frac{2\pi\beta^2 j_s^2}{c|\varepsilon(\omega)|}, \quad j_s = e\nu_1 n_0 b d. \quad (21)$$

Тут ν_1 - швидкість електронів при модуляції пучка, d - товщина пучка. На ідеально провідній поверхні з регулярними нерівностями на частоті $\omega = \frac{cG_x}{2}$ маємо:

$$S_0 = \frac{\pi \beta^2}{8c} (j_s G_x \xi_0)^2. \quad (22)$$

Порівняння виразів для густини потоку енергії при наявності нерівностей та без них показує, що випромінювання поверхневих хвиль над періодично нерівною поверхнею провідника може перевищувати випромінювання поверхневих поляритонів у плазмовому середовищі з високою густиною електронів провідності. При цьому амплітуда нерівностей має перевищувати довжину поверхневої електромагнітної хвилі $\xi_0 > \frac{c}{\omega_0}$ при $\omega_0 \approx 5 \times 10^{15} \text{ c}^{-1}$ (ω_0 - ленгмюрівська частота електронів в металі). Але кількісні оцінки показують, що на частотах $\omega \approx 10^{12} \text{ c}^{-1}$ найбільші значення S_0 приймає для поверхневих плазмових хвиль у напівпровідниках типу *InSb*.

Як відомо, при наявності постійного магнітного поля у магнітоактивній напівпровідниковій плазмі виникають додаткові типи електромагнітних коливань. До них належать об'ємні та поверхневі гелікони, механізми збудження яких були предметом досліджень **восьмого розділу** дисертації. Цей тип коливань має ряд особливостей, які дозволяють застосовувати їх при розв'язанні практичних задач радіофізики. По-перше, гелікони існують у широкому частотному діапазоні незалежно від співвідношення між частотою сигналу та частотою зіткнень носіїв заряду. По-друге, вони мають відносно невеликі фазові швидкості, що дозволяє забезпечити механізми їх збудження акустичними коливаннями та потоками заряджених частинок. Крім того, оскільки поширення поверхневих геліконів залежить від напрямку постійного магнітного поля, з'являється можливість фільтрації електромагнітних коливань в електронних приладах (ефект невзаємності).

У першому підрозділі досліджено механізми взаємодії об'ємного гелікона та зарядженої частинки, що рухається у магнітоактивній плазмі по гвинтовій траєкторії зі швидкістю ν_{0z} відносно постійного магнітного поля H_0 ($\nu_{0z} \parallel H_0 \parallel Oz$). В роботі визначено напруженості електричного та магнітного полів, які утворює частинка, та отримано вираз для енергетичних втрат частинки на збудження геліконів:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{M_{0z}^2 q_0^4 \nu_{0z}}{8}. \quad (23)$$

Тут $M_{0z} = \frac{m v_{\varphi}^2}{2 H_0}$ - магнітний момент, утворений зарядженою частинкою, $v_{\varphi}^2 = v_{0x}^2 + v_{0y}^2$,

$q_0 = \frac{4\pi n_0 v_{0z}}{H_0 c}$ - значення хвильового вектора гелікона $q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}$ в умовах черенковського

резонансу $\omega = q_0 v_{0z}$, де $\omega = \frac{q q_z c H_0}{4\pi e n_0}$ частота гелікона, n_0 - концентрація електронів плазми.

Таким чином, втрати енергії частинки на випромінювання Вавілова – Черенкова можна трактувати як взаємодію магнітного диполя з магнітним полем хвилі, що ним створюється. Втрати енергії частинки на збудження гелікона дорівнюють потужності спонтанного випромінювання електронів провідності середовища. Це дозволяє отримати вираз для матричного елемента взаємодії геліконів і частинок та сформулювати кінетичне рівняння типу (3), що описує зміну кількості геліконів при їх взаємодії з електронами. В роботі отримано кінетичне рівняння для геліконів та знайдено вираз для декременту геліконів при їх взаємодії з електронами провідності. Цей вираз збігається з відомим виразом для беззіткнувального згасання геліконів (магнітне згасання Ландау [5]). В цьому підрозділі розглянуто також взаємодію геліконів з пучком електронів, функція розподілу яких має вигляд:

$$f = \frac{n_{ob}}{(2\pi m T_b)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_o)^2}{2m T_b}\right). \quad (24)$$

Тут n_{ob} - густина електронів пучка, T_b - їх температура в енергетичних одиницях. Розв'язок кінетичного рівняння визначає інкремент геліконів, який дорівнює

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \frac{n_{ob}}{n_o} \sqrt{\frac{m T_b}{m_e T}} \left(1 - \frac{q_z v_{0z}}{\omega_q}\right) \frac{q^3 c^2 v_T}{\omega_0^2} \cos\theta \sin^2\theta. \quad (25)$$

Тут $v_T = \sqrt{\frac{T}{m_e}}$ - теплова швидкість електронів, θ - кут між напрямком магнітного поля та

напрямком розповсюдження хвилі: $q_z = q \cos\theta$, $q_x = q \sin\theta$; $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Підсилення геліконів стає можливим, якщо швидкість пучка вздовж постійного магнітного поля перевищує фазову швидкість хвилі.

У другому підрозділі визначено механізми взаємодії зарядженої частинки, що рухається по спіралі на відстані a у вакуумі над поверхнею магнітоактивної плазми вздовж постійного магнітного поля H_0 з постійною швидкістю v_{0z} , з поверхневими геліконами. В роботі було визначено втрати енергії частинки на збудження поверхневих геліконів:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{M_{0z}^2 v_{0z}}{2a^4}. \quad (26)$$

Порівняння формул (23) та (26) показує, що втрати енергії частинки на збудження об'ємних геліконів в $\frac{1}{4}(q_0 a)^4$ разів менші, ніж втрати енергії на збудження поверхневих геліконів. Це

пов'язано з тим, що частинка, що рухається у вакуумі збуджує TE та TH хвилі одночасно. (У випадку об'ємних геліконів збуджується лише TE хвиля). У цій частині роботи визначено також втрати енергії магнітного диполя, що рухається в вакуумі на збудження поверхневих геліконів (за

порядком величини вони визначаються формулою (23)). Зменшення втрат у цьому випадку обумовлено тим, що магнітний диполь втрачає енергію на збудження тільки TE хвилі.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є теоретичним дослідженням кінетичних та гідродинамічних механізмів збудження, поширення та згасання електромагнітних коливань, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в обмежених провідних середовищах та особливостей впливу неоднорідних властивостей поверхні провідних твердих тіл на енергетичні спектри носіїв, закони дисперсії електромагнітних коливань та умови взаємодії заряджених частинок та коливань між собою.

Основні результати дисертації сформульовано у таких висновках:

1. Побудовано квантову теорію беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів для слабкої просторової дисперсії середовища. В її межах визначено структури електромагнітних полів та механізми їх згасання у квантовому та класичному наближеннях. При цьому:

- визначено декременти згасання поверхневих плазмонів і електроакустичних хвиль в умовах дифузного та дзеркального відбиття електронів провідності від межі розподілу середовищ;
- в класичному наближенні досліджено еволюцію збурень густини носіїв напівобмеженої плазми твердого тіла, коли її поверхню перетинає потік електронів (сформульовано умови стійкості та нестійкості системи пучок-плазма);

2. Запропоновано теорію кінетичних нестійкостей власних електромагнітних коливань плазмоподібних структур, які обумовлені їх взаємодією з потоками заряджених частинок, що рухаються по нормалі до межі розподілу середовищ:

- одержано кінетичні рівняння для електростатичних та електромагнітних коливань (бозонів) у неоднорідних системах, таких, як плазмовий шар, оточений провідними середовищами або діелектриками, метал-діелектрик-напівпровідник, двомірний електронний газ, вакуум-ідеальний провідник з періодично нерівною межею, знайдено вирази для інкрементів нестійкості та проаналізовані їх особливості;
- розв'язано задачу про пучкову нестійкість поверхневих плазмових коливань при наявності потенційного бар'єра на межі розподілу середовищ;
- визначено механізми нелінійної взаємодії поверхневих плазмонів та заряджених частинок; показано, що стабілізація плазмонів обумовлена взаємозв'язком їх амплітуди та густини частинок, який виникає при розв'язанні рівняння Шредінгера для хвильової функції основного стану.

3. Проведено теоретичні дослідження гідродинамічних пучкових нестійкостей у твердотільних плазмових структурах. При цьому:

- досліджено механізми нестійкостей при взаємодії потоків заряджених частинок з електростатичними коливаннями у системі, що є плазмовим шаром (діелектриком), оточеним середовищами з різними електромагнітними властивостями, одержано умови зростання коливань, коли частинки проходять паралельно або перпендикулярно межах розподілу середовищ, досліджено зв'язок режимів їх згасання або зростання з фазовими співвідношеннями між полем плазмона та потоком електронів;
- досліджено механізми взаємодії потоку заряджених частинок, що рухаються в періодично-неоднорідному плазмовому середовищі (напівпровідникової надгратки) по нормалі до межі розподілу, з електричним полем об'ємних коливань і визначено умови виникнення нестійких станів;
- розв'язано задачу про резонансну взаємодію електростатичних коливань напівпровідникової надгратки з потоком заряджених частинок, що рухаються над її поверхнею, визначено спектр та інкремент нестійкості поверхневих коливань.

4. Проведено теоретичні дослідження впливу малих нерівностей на поверхні провідних твердих тіл на закони дисперсії заряджених частинок та електромагнітних коливань:

- визначено спектральні характеристики поверхневих електронних станів, що виникають на межах провідних твердих тіл з безмежним потенційним бар'єром, малі нерівності поверхні яких мають періодичний або нерегулярний характер;
- одержано закон дисперсії поверхневих поляритонів у неоднорідній плазмі, неоднорідність якої виникає завдяки поверхневим електронним станам на нерівній межі;
- показано, що неоднорідність плазми призводить до дисперсії поверхневих коливань.

5. Запропоновано теорію перехідного випромінювання електронного потоку у структурах із неоднорідними властивостями поверхні:

- визначено особливості спектральних характеристик енергії перехідного випромінювання об'ємних хвиль при наявності потенційного бар'єра; знайдено вирази для додаткових складових полів випромінювання об'ємних хвиль при наявності потенційного бар'єра та вирази для додаткових складових полів випромінювання, пов'язаних із зміною швидкості частинок та виникненням відбитих компонентів потоку; проведено аналіз осциляцій густини випромінювання, що визначається розмірами потенційного бар'єра у твердотільних структурах;
- досліджено механізми збудження поверхневих електромагнітних коливань на межі твердотільної плазми в умовах модуляції електронного потоку, одержано вираз для спектральної густини випромінювання поверхневих хвиль та умови її збільшення завдяки параметрам модуляції.

6. Досліджено взаємодію геліконів і заряджених частинок в магнітоактивній плазмі:

- знайдено характеристичні втрати енергії зарядженої частинки, що рухається по гвинтовій траєкторії на збудження об'ємних та поверхневих геліконів;
- показано, що випромінювання Вавілова-Черенкова зарядом об'ємних геліконів рівнозначно випромінюванню магнітного моменту, який направлений та рухається вздовж зовнішнього магнітного поля, і що цей ефект лежить в основі беззіткнувального магнітного згасання геліконів у плазмових середовищах;
- сформульовано умови виникнення пучкової нестійкості геліконів і знайдено інкремент;
- показано, що втрати енергії частинки на збудження поверхневих геліконів значно перевищують ті, що виникають при взаємодії її з об'ємними геліконами і відрізняються від втрат енергії магнітного диполю.

Цитована література

1. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Колебания и волны в плазменных средах. - М.: Издательство Московского университета, 1990. - 272 с.
2. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. - Киев: Наукова думка, 1991. – 216 с.
3. Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. - М.: Наука, 1984. – 360 с.
4. Bass F.G., Bylgakov A.A. Kinetic and Electromagnetic Phenomena in Classical and Quantum Semiconductor Superlattices. - New York.: Nova Science Publishers, 1997. – 498 p.
5. Ахиезер А.И., Ахиезер И.А., Половин Р.В., Ситенко А.Г., Степанов К.Н. Электродинамика плазмы. – М.: Наука, 1974. – 719 с.

Основні публікації на тему дисертації

1. Яковенко И.В. Взаимодействие потока заряженных частиц с поверхностной звуковой волной на границе раздела сред вакуум – идеальный проводник // Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Киев: Наукова думка. - 1988. – С. 252 – 255.

2. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Взаимодействие поверхностных плазмонов с электронами при их отражении от границы раздела сред // ДАН Украины. - 1993. - № 3. - С. 91 – 94.
3. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Interaction of surface plasmons with charge carriers at media interface // Physics Letters. - 1994. - A . 196. - P. 290 – 294.
4. Нескородов Г.Ф., Князев В.В., Федченко Т.Ю., Яковенко И.В. Збудження поверхневих плазмових коливань в структурах зарядами, що рухаються вздовж межі розподілу середовищ // Український фізичний журнал. – 1995.- Т.40 , № 3. - С. 215 – 217.
5. Буртыка М.В., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Взаимодействие потоков заряженных частиц с плазмонами в двумерном электронном газе // Физика низких температур. – 1995. – Т.21, №6. – С. 628 – 632 .
6. Pogrebnyak V.A., Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Electronic surface States at the irregular interface of media // Physics Letters.- 1995. - A. 209. – P. 103 – 106.
7. Погребняк В.А., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Поверхностные электронные состояния на неровной границе раздела двух сред // Физика твердого тела. – 1998. – Т.68, №1. - С. 11- 14.
8. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Бесстолкновительное затухание поверхностных геликонов в плазмоподобных средах // Доповіді НАН України. – 1997. - №12.-С. 59 – 61.
9. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Бесстолкновительное затухание поверхностных колебаний и возможности его обращения в плазмоподобных средах // Изв.ВУЗов. Радиофизика. – 1998. – Т.XLI, № 6. - С. 735 – 745.
10. Яковенко И.В. Взаимодействие заряженных частиц с поверхностными волнами на периодически – неровной идеально-проводящей поверхности // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. – 1998. – Т.3, №1. – С. 7 – 11.
11. Фалько В.Л., Ханкина С.И., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Переходное излучение заряда в средах с неоднородным потенциалом // Журнал технической физики. – 1998. – Т.68, №1. – С. 11 – 14.
12. Яковенко И.В. Затухание поверхностных плазмонов при взаимодействии с потоком заряженных частиц // Доповіді НАН України.- 1998. - №8. – С. 96 - 100.
13. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Колебания полуограниченной плазмы и электронного пучка проходящего через границу раздела // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. – 1998. – Т.3, №3. – С. 94 – 99.
14. Яковенко В.М., Яковенко И.В. О бесстолкновительном затухании поверхностных плазмонов // Физика плазмы . – 1999. – Т.25, №6. - С. 558 - 561.
15. Яковенко И.В. Взаимодействие потоков заряженных частиц с поверхностными колебаниями в неоднородных плазменных средах // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины.- 1999. – Т.4, №2. - С. 86 – 90 .

16. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Электростатические колебания в плазмоподобных структурах, содержащих потоки заряженных частиц // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т.4, №4. – С. 376 – 378.
17. Яковенко В.М., Яковенко И.В. О резонансном взаимодействии плазменных колебаний с потоком заряженных частиц в слоисто – периодических средах // Доповіді НАН України. - 2000. - №10. – С. 87 - 92.
18. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Нелинейное взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц, проходящих через границу // Доповіді НАН України. - 2000. - №1. – С. 70 - 74.
19. Яковенко В.М., Яковенко И.В. Неустойчивость поверхностных плазмонов, вызванная потоком заряженных частиц в средах с неоднородным потенциалом // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. – 2000. – Т.5, №3. - С. 65 – 69 .
20. Фалько В.Л., Ханкина С.И., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Бесстолкновительное затухание поверхностных колебаний в плазмоподобных средах // Зарубежная радиоэлектроника. – 2001. - №7. - С. 54 – 79.
21. Яковенко И.В. Взаимодействие поверхностных плазмонов и заряженных частиц на границе с неоднородным потенциалом // Доповіді НАН України. - 2001. - №7. – С. 74 - 80.
22. Яковенко В.М., Яковенко И.В. О переходном излучении поверхностных поляритонов модулированным потоком заряженных частиц // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. - 2001. – Т.6, №1.– С.97 – 102.
23. Ханкина С.И., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Поверхностные плазменные волны на неровной границе твердого тела // Изв.ВУЗов. Радиофизика. – 2002. – Т.XLV, № 10. – С. 887 – 893.
24. Яковенко В.М. Яковенко И.В. О взаимодействии потока заряженных частиц с двумерным электронным газом // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. – 2002. – Т.7, № 1. – С. 95 –97.
25. Ханкина С.И., Яковенко В.М., Яковенко И.В. Потери энергии заряженной частицы на возбуждение геликонов в плазме твердого тела // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. – 2002. - Т.7, № 2. – С. 342 – 346.
26. Ханкіна С.І., Яковенко В.М., Яковенко І.В. Електромагнітні хвилі у твердотільній плазмі з нерівною межею // Український фізичний журнал. – 2003. - Т.48, № 2. – С. 108 – 114.

Результати дисертації додатково висвітлені в таких працях:

27. Яковенко В.М. Яковенко И.В. Бесстолкновительное затухание поверхностных плазмонов и возможности его обращения в проводящих твердых телах // Вісник Харківського національного університету. Радіофізика та електроніка. - 2002.– Вип.2, № 570. – С. 60 – 61.
28. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Instability of surface plasmons at the interaction with charge carriers at media // Proc. International Symposium “Physics and Engineering of millimeter and submillimeter waves”.- Kharkov (Ukraine). – 1994. - P. 163- 164.

29. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Surface helicons in plasma like media and their collisionless damping // Proc. European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics.- Kiev (Ukraine).- 1996. - P. 1407 -1410.
30. Yakovenko V.M.,Byrtyka M.V, Yakovenko I.V. Interaction of charged particle flows with plasmons in two-dimensional electron gas // Proc. Digest of tehcnical papers from the XX International Conference on Infrared and Millimeter Waves. - International Jornal of Infrared and Millimeter Waves.- 1996. - Vol.17, №3. - P. 559 – 568.
31. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. On Collisionless damping of surface plasmons // Proc. International Symposium “Physics and Engineering of millimeter and submillimeter waves”. -Kharkov (Ukraine). – 1998. – P. 286 -288.
32. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Surface plasmons instability brought about the flux of charged particles in the media with inhomogeneous potential // Proc. International Symposium “Physics and Engineering of millimeter and submillimeter waves”.- Kharkov (Ukraine) – 2001. - P. 311 -313 .
33. Yakovenko V.M., Yakovenko I.V. Collisionless damping of surface plasma oscillations and possibilities at its reverse at the interaction with charged particle flouss // Proc. International Conference (ММЕТ – 2002) ”Mathematical methods in electromagnetic theory”. - Kiev(Ukraine). – 2002. - P. 650 – 652.

Анотація

Яковенко І.В. Електромагнітні коливання та хвилі НВЧ – діапазону в неоднорідних провідних середовищах.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико – математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. - Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2003.

Дисертація присвячена розвитку теорії взаємодії електромагнітних коливань НВЧ –діапазону та заряджених частинок в обмежених плазмоподібних середовищах; розвинуто теорію беззіткнувального згасання поверхневих плазмонів у квантовому та класичному наближеннях, визначені умови його обернення при проходженні потоку заряджених частинок крізь межу розподілу середовищ, визначені механізми кінетичних та гідродинамічних пучкових нестійкостей в твердотільних структурах, які застосовуються в сучасній радіофізиці.

Запропонований новий механізм, який пояснює виникнення поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих тіл. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного випромінювання. Запропоновані нові механізми збудження поверхневих магнітоплазмових коливань джерелами електромагнітного випромінювання, що рухаються вздовж межі розподілу середовищ.

Ключові слова: електромагнітні поля, хвилі, коливання, заряджені частинки, плазма, напівпровідник, надградка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенківське та перехідне випромінювання, гелікони.

Аннотация

Яковенко И.В. Электромагнитные колебания и волны СВЧ – диапазона в неоднородных проводящих средах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико – математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.- Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина , Харьков, 2003.

Диссертация посвящена развитию теории взаимодействия электромагнитных полей и заряженных частиц в ограниченных плазмоподобных структурах, применяемых в современной радиофизике.

В работе в классическом и квантовом приближениях построена теория бесстолкновительного затухания поверхностных плазмонов для слабой пространственной дисперсии полуограниченной среды. Получены выражения для декрементов поверхностных плазмонов и электроакустических поверхностных волн при диффузном и зеркальном отражении электронов проводимости от границы раздела сред. Определены декременты поверхностных плазмонов в условиях квантового приближения, когда энергия плазмона превышает температуру электронного газа.

Построена кинетическая теория взаимодействия поверхностных плазменных колебаний с потоками заряженных частиц, пересекающих границу раздела сред вакуум – полупроводник. Показано, что затухание колебаний обусловлено тем, что его поле преобразуется в волны Ван-Кампена, которые уносят энергию поверхностных колебаний вглубь среды и получено выражение для декремента. В классическом приближении исследована эволюция возмущений плотности электронов полуограниченной твердотельной плазмы, когда её границу пересекает поток заряженных частиц. Сформулированы условия неустойчивости такой системы.

Предложена теория кинетических неустойчивостей собственных электромагнитных колебаний ряда твердотельных структур при их взаимодействии с потоками заряженных частиц, движущихся по нормали к границам. Получены выражения для структуры полей и токов и показано, что возможность развития неустойчивостей в такой системе реализуется только в условиях, когда энергия плазмона превышает температуру электронов пучка и плазмы. Определены инкременты собственных колебаний электрического поля в следующих структурах: вакуум - полуограниченная плазма, металл – диэлектрик - полупроводник, двумерный электронный газ, вакуум - идеальный проводник с периодически неровной поверхностью и др. Исследован механизм стабилизации неустойчивости поверхностных плазмонов, обусловленный их нелинейным взаимодействием с потоком заряженных частиц, проходящих через границу раздела сред. Нелинейность обусловлена дополнительным потенциалом в уравнении Шредингера для волновой функции электрона в основном состоянии. Численный анализ решений уравнений Шредингера и электромагнитного поля показывает, что в системе устанавливается стационарный колебательный режим, при котором амплитуда и плотность частиц пучка осциллируют с частотой малой по сравнению с частотой собственных колебаний.

Проведены исследования гидродинамических неустойчивостей при движении электронного пучка в щели полупроводника, а также при прохождении пучка через плазменный слой. Показано, что в гидродинамическом приближении можно получить неустойчивость собственных колебаний в структуре металл – диэлектрик - полупроводник. В слоисто-периодической среде (сверхрешетке) возникает своеобразная связь между собственными колебаниями потока (волнами пространственного заряда) и плазменными колебаниями, что приводит к возникновению неустойчивых состояний. Обнаружено, что на границе сверхрешетка - диэлектрик существуют поверхностные электростатические волны, распространяющиеся под углом к оси сверхрешетки (косые волны), найден их спектр и инкремент в условиях черенковского резонанса между волной и частицей при движении электронного пучка над сверхрешеткой.

Изучено влияние границ с регулярными или случайными малыми неровностями на электромагнитные свойства проводящих сред. Показано, что в таких системах существуют поверхностные электронные состояния и найден их спектр. Наличие поверхностных состояний приводит к образованию неоднородной плазмы и к изменению закона дисперсии поверхностных поляритонов.

Развита теория переходного излучения заряженных частиц с учетом потенциального барьера на границе сред. Обнаружено, что поле излучения объемных волн обусловлено не только скачком диэлектрической проницаемости на границе, но и изменением скорости электрона, вызванного присутствием потенциального барьера. Рассмотрены особенности излучения

поверхностных волн модулированным электронным пучком. Показано, что плотность потока энергии волн испытывает осцилляции в зависимости от соотношений между периодом ленгмюровских колебаний электронов пучка и временем пролета электроном пространства между плоскостью модуляции и границей раздела сред.

Найдены потери энергии заряженных частиц, движущихся по винтовой линии относительно внешнего магнитного поля, на возбуждение объёмных и поверхностных геликонов, имеющих в плазме твердого тела малые фазовые скорости. Эти результаты позволяют получить кинетическое уравнение для геликонов и определить декремент их бесстолкновительного затухания при взаимодействии с электронами проводимости. Показана возможность усиления геликонов потоком заряженных частиц в условиях, когда скорости частиц превышают фазовую скорость волны.

Ключевые слова: электромагнитные поля, волны, колебания, заряженные частицы, плазма, полупроводник, сверхрешетка, бесстолкновительное затухание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны.

Abstract

Yakovenko I.V. Electromagnetic oscillations and microwaves in inhomogeneous conducting media .
– Manuscript .

A dissertation submitted for a Doctor of Science degree in Physics and Mathematics
(speciality code 01.04.03 – Radio Physics).

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2003.

The thesis deals with the development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid-state structures applied in the present microwave electronics.

A new mechanism of initiation of surface at uneven surfaces of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximation is elaborated and the conditions of its conversion are determined.

The effect of inhomogeneous properties of the surfaces of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. New mechanisms of excitation of surface magnetoplasma oscillations by the moving radiation source are suggested.

Key words: electromagnetic fields, waves, oscillations, charged particles, plasma, semiconductor, superlattice, collisionless damping, kinetic and hydrodynamics instabilities, generation, cerencov radiation, transition radiation, helicons.