

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В.Н. КАРАЗІНА

Ольховський Євгеній Олександрович

УДК 537.876

**ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ УЗДОВЖ ГРАНИЦІ
РОЗПОДІЛУ ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків-2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор *Булгаков Олексій Олександрович*, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла, м. Харків.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор *Аркуша Юрій Васильович*. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій;

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник *Поєдинчук Анатолій Юхимович*. Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу теорії дифракції і дифракційної електроніки, м. Харків.

Захист відбудеться “ 25 ” січня 2008 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (61077, м. Харків, пл. Свободи, 4, аудиторія 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 “ 11 ” грудня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.Ф. Ляховський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Шаруваті середовища тривалий час привертають увагу дослідників. Це пов'язано з тим, що вони часто зустрічаються в природі, а їхні властивості відрізняються від однорідних матеріалів. Штучні шаруваті структури являють собою нові матеріали, властивостями яких можна керувати як за допомогою технології отримання, так і в результаті впливу зовнішніх полів. Інтерес становлять періодичні, квазіперіодичні та випадкові шаруваті структури. Основними фізичними особливостями є зонна структура спектра електромагнітних хвиль, можливість зменшення (або збільшення, якщо необхідно) загасання хвиль, особливості в поширенні та розподілі по шарах потоків енергії.

Періодичні структури широко використовуються в сучасній техніці міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль, антенній техніці, оптиці та оптоелектроніці, у рентгенівській техніці. Особливість періодичних структур полягає в тому, що порушення симетрії приводить до виникнення нових типів хвиль. Такими є, наприклад, поверхневі хвилі, енергія яких локалізована в області порушення симетрії. Інтерес до властивостей таких хвиль пов'язаний з можливістю передачі інформації уздовж границь поділу шаруватих середовищ в інформаційних системах, безконтактного аналізу якості періодичних структур у технологічному процесі та ін. Крім того, характеристики цих хвиль досить чутливі до стану поверхні, а, отже, у багатьох випадках поверхневі хвилі виявляються ефективним інструментом дослідження властивостей поверхонь і тонких плівок.

Відомо, що електродинамічними властивостями шарувато-періодичних напівпровідникових структур можна ефективно керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля. Такими властивостями є дисперсія власних хвиль, зміна конфігурації зонної структури залежно від зовнішнього магнітного поля, ефективне „керування” коефіцієнтами проходження та відбиття в обмежених періодичних зразках і т.п.

Актуальність даного питання зростає з розвитком тонкоплівкової електроніки і зокрема, наноелектроніки. Задачі, що відносяться до створення мікро- та наноматеріалів, а також до розвитку мікро- і нанотехнологій, займають у цей час домінуюче становище практично у всіх галузях сучасної науки і техніки. Для успішного вирішення цих задач необхідні нові фундаментальні дослідження в різних напрямках, наприклад, для створення надшвидкодійних квантових інтегральних схем і квантового комп'ютера.

Актуальність теми обумовлена тим, що запропоновані в даній роботі методи аналізу і вивчені властивості шарувато-періодичних структур можуть бути основою для методики розрахунку нових радіофізичних пристроїв, які керуються зовнішніми електричними й магнітними полями: вузькосмугові та багатосмугові фільтри, лінії передачі. Отримані в роботі результати

описують нові фізичні особливості зонної структури спектра і нові типи хвиль. Обчислювальні програми дозволяють розраховувати електромагнітний спектр, загасання та нелінійні властивості різних типів одномірних періодичних структур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики відповідно до двох планових завдань науково-дослідного відділу Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, а також одного гранта:

1. „Розробка фізичних основ технологій, які збільшують ефективність, надійність і економічність фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії” (2003-2005р., номер державної реєстрації 0103U001540).

2. „Розробка фізичних основ технології ефективних гнучких та двосторонньо чутливих сонячних елементів на основі телуриду кадмію” (2005-2008 р., номер державної реєстрації ДРН 0106U001515).

3. „Теорія нелінійних процесів в активних та пасивних періодичних структурах” (2006р., грант ДФФД Міністерства освіти і науки України № Ф 16/16).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є теоретичне вивчення електродинамічних властивостей електромагнітних поверхневих хвиль, які поширюються на границі розподілу двох різних шарувато-періодичних структур. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Отримання в аналітичному вигляді та дослідження дисперсійного співвідношення для поверхневих хвиль для випадку контакту двох діелектричних періодичних структур.

2. Дослідження дисперсійного співвідношення для поверхневих хвиль, що поширюються уздовж границі двох напівпровідникових періодичних структур. Аналіз впливу дисипативних процесів на фазову швидкість поверхневої хвилі, що виникає поблизу частоти поверхневих плазмонів одного з напівпровідникових шарів.

3. Дослідження дисперсійних властивостей поверхневих магнітоплазмових хвиль на границі двох напівпровідникових решіток при наявності зовнішнього магнітного поля.

4. Отримання та аналіз дисперсійних співвідношень для поверхневих хвиль для випадку контакту двох напівпровідникових періодичних структур. Ці структури розташовані у зовнішньому магнітному полі, якщо вектор магнітного поля лежить у тій же площині, у якій відбувається поширення електромагнітних хвиль.

5. Одержання та аналіз умов синхронізму для трихвильової взаємодії в діелектричній шарувато-періодичній структурі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес поширення поверхневої електромагнітної хвилі, яка спрямована уздовж границі розподілу двох періодичних решіток.

Предмет дослідження. Предметом даного дослідження є електродинамічні властивості контакту двох шарувато-періодичних структур з різними товщинами шарів та діелектричними проникностями.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз зонного спектра об'ємних і поверхневих хвиль у досліджуваній шарувато-періодичній структурі ґрунтується на розв'язанні рівнянь Максвелла для кожного із шарів і матеріальних рівнянь із урахуванням граничних умов, які полягають у безперервності тангенційних компонентів електричного та магнітного полів на всіх границях. Для одержання дисперсійних співвідношень, що описують властивості періодичних систем, використовується метод матриці перетворення, який полягає в тім, що поля на початку координат виражаються через їхні значення на кінці цього ж шару. Періодичність для безмежних періодичних структур враховується за допомогою теореми Флоке. Для дослідження трихвильової нелінійної взаємодії використовується методика, у якій нелінійна система матеріальних рівнянь і рівнянь Максвелла зводиться до системи вкорочених диференціальних рівнянь для амплітуд взаємодіючих хвиль. Для одержання указаної системи використовується формула Гріна, що дозволяє врахувати нелінійні властивості обмежених шарів і періодичність структури.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше розглянуто поверхневі хвилі, які поширюються уздовж границі поділу двох шарувато-періодичних структур. Обвідні амплітуд полів поверхневих хвиль спадають за експоненціальним законом в обидва боки від площини поділу решіток.

2. Вивчено вплив дисипативних процесів на фазову швидкість поверхневої хвилі, що виникає поблизу частоти поверхневих плазмонів одного з напівпровідникових шарів. Показано, що чим менша частина енергії зосереджена в дисипативнім шарі, тим менше загасання хвилі і тим менше мінімальна фазова швидкість хвилі.

3. Проаналізовано поширення поверхневих хвиль у випадку, коли вектор магнітного поля паралельний площині шарів структури, а хвилі поширюються в перпендикулярній йому площині. Показано, що в аналізованій геометрії з'являються нові характерні частоти, до яких асимптотично наближаються дисперсійні криві поверхневих хвиль. Дані частоти залежать від величини зовнішнього магнітного поля, тому зміна величини зовнішнього магнітного поля дозволяє керувати властивостями структури.

4. Уперше розглянуто поширення геліконових хвиль у періодичній структурі. Інтерес до цих хвиль пов'язаний з тим, що загасання геліконів обернено пропорційно величині зовнішнього магнітного поля. Тому у досить сильних магнітних полях гелікони мають відносно мале загасання.

5. Виявлено, що на частотах нижче плазмової частоти напівпровідникового матеріалу утворюється система вузьких зон, у яких можливе поширення геліконових хвиль. Показано, що поблизу границь цих зон існує поверхнева геліконова хвиля.

6. Визначено особливості нелінійної взаємодії хвиль у періодичній діелектричній структурі. Отримано в аналітичному вигляді та чисельно проаналізовано умови синхронізму (умови на частоту і компоненти хвильових векторів взаємодіючих хвиль) для об'ємних та поверхневих хвиль.

7. Показано, що, крім брегівського резонансу, який характерний для періодичного середовища, нелінійний резонанс істотно збільшує ефективність взаємодії. Цей резонанс має місце в тому випадку якщо набіг фаз взаємодіючих хвиль такий, що відсутня залежність від координати уздовж напрямку періодичності.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення проведеного дослідження полягає в перспективності використання поверхневих хвиль як засобу передачі інформації уздовж границь поділу шаруватих середовищ в інформаційних системах. Дисперсійні властивості хвиль, що поширюються в розглянутих структурах, вказують на доцільність застосування їх у техніці інфрачервоного, оптичного, рентгенівського діапазонів для обробки інформації (наприклад, оптичний комп'ютер), а також для підвищення ефективності нових типів фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. Значний інтерес обумовлений тим, що розглянуті діапазони мають велику інформаційну ємність, що є істотним для Інтернет-систем.

Особистий внесок здобувача. Автором виконано аналітичні розрахунки та отримано дисперсійні співвідношення для поверхневих хвиль, які поширюються уздовж границі поділу двох напівпровідниково-діелектричних структур. Автором докладно викладено методику для отримання дисперсійного співвідношення для поверхневих геліконових хвиль. Автором виведено і чисельно досліджено умови синхронізму при нелінійній взаємодії як для об'ємних, так і поверхневих хвиль. Особисто автором складено програми для ЕОМ, проведено чисельні дослідження отриманих співвідношень і зроблено висновки. Автор брав участь в обговоренні вибору методики розрахунку та фізичної інтерпретації результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації пройшли апробацію на наступних конференціях: Третя конференція молодих вчених „Радиофизика и СВЧ электроника” (Харків, Україна, 2004); Fifth International Kharkov Symposium „Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (Харків, Україна, 2004); Четверта конференція молодих науковців „Радиофизика и СВЧ электроника” (Харків, Україна, 2004); The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (Ялта, Україна, 2005); 15-а Міжнародна Кримська конференція „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, Україна, 2005); Другий Міжнародний радіоелектронний форум „Прикладная радиоэлектроника, Состояние и перспективы развития” (Харків, Україна, 2005). The 11th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Харків, Україна, 2006); The 22nd Symposium on Plasma Physics

and Technology (Прага, Чехія, 2006); Шоста конференція молодих науковців „Радиофизика и электроника” (Харків, Україна, 2006).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 11 друкованих праць, у тому числі 6 статей у спеціалізованих наукових журналах і збірниках наукових праць і 5 у збірниках доповідей конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків. Повний обсяг дисертаційної роботи - 130 сторінок. Дисертація містить 39 рисунків, список використаних літературних джерел зі 126 найменувань на 12 сторінках та один додаток на 3 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми в області досліджень, безпосередньо пов'язаних з темою дисертації. Сформульовано мету, завдання роботи, наукову новизну отриманих у роботі результатів та їхню практичну цінність. Визначено особистий внесок здобувача, а також наведено відомості, пов'язані з апробацією результатів дисертаційної роботи.

Перший розділ дисертації присвячений огляду літератури із проблем, розглянутих у дисертації, сформульовано основні напрямки досліджень. У цьому розділі аналізується існуюча література, присвячена теоретичному та експериментальному вивченню властивостей шарувато-періодичних структур. Зокрема, проаналізовано літературу, у якій вивчаються властивості періодичних структур, розташованих у зовнішньому магнітному полі. Відзначається, що досить обмежено число публікацій, у яких періодичні структури розташовані у магнітному полі, вектор якого лежить у тій же площині, у якій відбувається поширення електромагнітних хвиль. Розглянуто роботи, у яких досліджується поширення поверхневих хвиль у різних структурах. Наведено огляд робіт, присвячених вивченню нелінійної взаємодії електромагнітних хвиль. На основі аналізу наявних літературних джерел було виявлено, що в літературі практично відсутні роботи, у яких вивчаються нелінійні ефекти, пов'язані із взаємодією електромагнітних хвиль у періодичних структурах.

Другий розділ дисертації „Поверхневі електромагнітні хвилі на границі двох напівпровідниково-діелектричних періодичних структур” присвячено вивченню спектральних властивостей поверхневих хвиль, які поширюються уздовж границі розподілу двох діелектричних і напівпровідникових періодичних структур.

Розглянуто випадок, коли кожна зі структур утворена періодичним повторенням двох шарів діелектриків з різними значеннями проникності. Діелектричні проникності однієї з решіток („лівої”) $\varepsilon_1^{(l)}$ і $\varepsilon_2^{(l)}$, а для іншої решітки („правої”) – $\varepsilon_1^{(r)}$ і $\varepsilon_2^{(r)}$. Передбачалось, що вісь Oz

спрямована перпендикулярно границям шарів, а осі Ox і Oy – паралельні шарам. Поширення хвиль досліджувалося в площині xOz .

Поширення електромагнітних хвиль у розглянутій структурі описується рівняннями Максвелла для кожного шару структури. На границях розподілу шарів і на границі, що розділяє обидві структури, повинні виконуватися граничні умови, що складаються в безперервності тангенціальних складових електричних і магнітних полів. Для урахування періодичності структур використовується теорема Флоке.

За допомогою методу матриці перетворення отримано дисперсійне співвідношення для контакту двох шарувато-періодичних структур:

$$\frac{m_{12}^{(R)} \exp(i\bar{k}^{(R)} d^{(R)})}{(1 - m_{11}^{(R)} \exp(i\bar{k}^{(R)} d^{(R)}))} + \frac{m_{12}^{(L)} \exp(i\bar{k}^{(L)} d^{(L)})}{(1 - m_{11}^{(L)} \exp(i\bar{k}^{(L)} d^{(L)}))} = 0, \quad (1)$$

де $m_{11}^{(L)}$, $m_{12}^{(L)}$, $m_{11}^{(R)}$, $m_{12}^{(R)}$ – елементи матриць перетворення періоду лівої та правої решіток, $d^{(L)}$, $d^{(R)}$ – періоди лівої та правої структур, $\bar{k}^{(L)}$, $\bar{k}^{(R)}$ – блохівські хвильові числа решіток, які знаходяться із дисперсійних співвідношень для кожної безмежної структури. З фізичної точки зору блохівське хвильове число є усередненим хвильовим числом шарів, що складають решітку [1].

На рис. 1 представлено зонні структури обох решіток, які отримані чисельним шляхом для наступних значень параметрів: $d_1^{(l)} = 2,7 \cdot 10^{-2}$ см, $d_2^{(l)} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ см, $d_1^{(r)} = 3,1 \cdot 10^{-2}$ см, $d_2^{(r)} = 1,7 \cdot 10^{-2}$ см, $\varepsilon_1^{(l)} = 10,5$, $\varepsilon_2^{(l)} = 4,35$, $\varepsilon_1^{(r)} = 8,5$, $\varepsilon_2^{(r)} = 2,5$. Зони, у яких можливе поширення електромагнітних хвиль, заштриховано.

Дисперсійні криві поверхневих хвиль відзначено на графіку товщеними лініями. Ці криві розташовані в зонах непропускання обох решіток. Необхідно відзначити, що деякі дисперсійні криві поверхневих хвиль лежать поблизу країв зон пропускання, тому на графіку ці криві накладаються на краї зон. З рисунка видно, що точки закінчення кривих пов'язані з тим, що в одній зі структур (на лівому або на правому графіках) ці криві переходять у зони пропускання. Фізично це означає, що хвиля втрачає поверхневий характер в одній із решіток.

Розглянуто розподіли полів у шарах решіток для поверхневих хвиль різних зон. На рис. 2 представлені електромагнітні поля, які розраховані для значень ψ і k_x , що відповідають точці 1 рис. 1. Показано, що існує три типи поверхневих хвиль: 0-моди, p -моди та змішані моди. Характер розподілу полів в 0-моді повторюється в решітках через один період, в p -моді – через два періоди, а розподіл полів у змішаній моді в одній з решіток повторюється через один період, а в іншій – через два періоди.

На наведеному графіку, на вставці, представлено електромагнітні поля для одного періоду. Необхідно відзначити, що всередині шарів амплітуди полів можуть носити коливальний або експонентний характер. Це пов'язано зі значенням поперечного хвильового числа шара

$k_{z1,2}^{(l,r)} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{1,2}^{(l,r)} - k_x^2}$. Якщо значення якого-небудь поперечного хвильового числа дійсне, то розподіл полів у цьому шарі має хвильовий характер, якщо - уявне, то розподіл поля носить поверхневий характер (амплітуди полів спадають від границі у глиб відповідного шару за експоненціальним законом).

У даному розділі також досліджено електродинамічні властивості поверхневої електромагнітної хвилі, що поширюється уздовж контакту між двома шарувато-періодичними напівпровідниковими структурами. Діелектрична проникність напівпровідника, у цьому випадку, залежить від частоти, тому дисперсійне співвідношення та властивості хвиль істотно будуть залежати від дисперсійних властивостей шарів. Зазначимо, що на відміну від контакту діелектричних решіток, у цьому випадку з'явилися поверхневі хвилі, які пов'язані із плазмовими властивостями шарів.

Вивчено вплив дисипативних процесів на фазову швидкість поверхневої хвилі, що виникає поблизу частоти поверхневих плазмонів одного з напівпровідникових шарів. Показано, що загасання хвилі залежить від частини енергії, що зосереджена в дисипативному шарі. Тому є можливість зменшити загасання, якщо дисипація в одному із шарів мала.

У третьому розділі „Дослідження поверхневих хвиль на границі двох напівпровідникових структур, розташованих у зовнішньому магнітному полі” розглядаються поверхневі хвилі, що поширюються уздовж контакту двох періодичних напівпровідникових решіток, розташованих у зовнішньому магнітному полі. Залежно від напрямку постійного зовнішнього магнітного поля, напрямку періодичності та площини, у якій поширюються хвилі, властивості поверхневої хвилі істотно розрізняються.

У цьому розділі розглянуто випадок, коли вектор магнітного поля паралельний площині шарів структури, а хвилі поширюються в перпендикулярній площині. В аналізованій геометрії з'являються нові характерні частоти, до яких асимптотично наближаються дисперсійні криві поверхневих хвиль. Дані частоти залежать від величини зовнішнього магнітного поля, тому зовнішнє магнітне поле дозволяє керувати властивостями структури. Показано, що в даній структурі уздовж границі розподілу двох решіток можуть поширюватись поверхневі електромагнітні хвилі.

Крім того, проаналізовано випадок, у якому вектор магнітного поля розташований у тій же площині, у якій відбувається поширення електромагнітних хвиль. На відміну від розглянутих раніше випадків тепер рівняння Максвелла не розділяються на два типи хвиль, тому необхідно враховувати всі 6 компонент полів. Дисперсійне співвідношення для власних хвиль безмежної напівпровідникової структури, розташованої в зовнішньому магнітному полі, має вигляд:

$$\exp(4i\bar{k}d) + F_1 \cdot \exp(3i\bar{k}d) + F_2 \cdot \exp(2i\bar{k}d) + F_3 \cdot \exp(i\bar{k}d) + 1 = 0. \quad (2)$$

Отримане рівняння є рівнянням четвертого порядку відносно $\exp(i\bar{k}d)$. У даному співвідношенні F_1, F_2, F_3 виражаються через різні комбінації елементів матриці перетворення періоду решітки. У роботі проведено чисельне дослідження, у якому використовувалися різні значення величин, що входять в F_1, F_2, F_3 . У всіх випадках виявилось, що $F_1 = F_3$. У результаті цього рівняння (2) може бути представлено у вигляді двох рівнянь другого порядку:

$$\cos \bar{k}_1 d = \frac{t_1}{2}, \quad (3)$$

$$\cos \bar{k}_2 d = \frac{t_2}{2}, \quad (4)$$

$$\text{де } t_{1,2} = \frac{F_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{F_1}{2}\right)^2 - F_2 + 2}.$$

З фізичної точки зору вирази (3), (4) означають, що в розглянутій структурі існують два незалежних спектри власних хвиль. Кожний зі спектрів характеризується дисперсійним співвідношенням і блохівським хвильовим числом $\bar{k}_{1,2}$.

При чисельному розрахунку виконувалися наступні співвідношення для параметрів напівпровідникових шарів:

$$|\varepsilon_3^{(s)}| \square |\varepsilon_1^{(s)}| > |\varepsilon_2^{(s)}|, \quad \varepsilon_1^{(s)} \approx \varepsilon_0^{(s)}, \quad \varepsilon_2^{(s)} \rightarrow 0, \quad (5)$$

де $\varepsilon_1^{(s)}, \varepsilon_2^{(s)}, \varepsilon_3^{(s)}$ – компоненти тензора діелектричної проникності.

Ці умови відповідають поширенню геліконів у напівпровіднику [2]. Гелікони - це хвилі, вектори магнітних і електричних полів яких обертаються в тім же напрямку, що й електрони. У зовнішньому магнітному полі особливість геліконів полягає в тому, що ці хвилі мають мале загасання. Величина загасання обернено пропорційна величині зовнішнього магнітного поля.

Результати чисельного рішення дисперсійних рівнянь (3), (4) представлено на рис. 3.

Розглянуто область, в якій частота хвилі менше плазмової частоти ($\omega < \omega_p^{(s)}$). Ця область цікава тим, що хвилі, які поширюються в даному інтервалі частот, є геліконовими хвилями, тому що задовольняють співвідношенням (5). З рис. 3а видно, що при великих значеннях хвильового числа ($k_x > 100 \text{ см}^{-1}$) відсутні зони пропускання, а на рис. 3б у цій області існують численні вузькі зони пропускання. У цих зонах розподіл геліконів характерний тим, що виконується умова розмірного резонансу, тобто на товщині напівпровідникового шару укладається ціле число напівхвиль.

Отримано та досліджено дисперсійне співвідношення для поверхневої геліконової електромагнітної хвилі, що поширюється уздовж границі розподілу двох напівпровідникових решіток. Показано, що поблизу границь зон пропускання об'ємних геліконів існує поверхнева геліконова хвиля. Виявлено нову властивість цих хвиль - поворот дисперсійної кривої, що виникає в

точках перетинання різних типів хвиль. Електродинамічними властивостями геліконових хвиль можна керувати, змінюючи зовнішнє магнітне поле.

У четвертому розділі „Нелінійні трихвильові взаємодії електромагнітних хвиль у періодичній структурі” проведено аналітичне дослідження нелінійної трихвильової взаємодії електромагнітних хвиль у періодичній діелектричній структурі. Розглянуто задачу в наближенні слабкої нелінійності, тобто коли енергія взаємодії хвиль багато менше енергії самих хвиль.

Відмінна риса даної задачі полягає в тому, що для однорідного діелектрика рівняння Максвелла розпадаються на дві незалежні поляризації, а в нелінійному діелектрику нелінійні доданки для компонентів полів однієї поляризації входять до складу рівнянь іншої поляризації:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\varepsilon_{xx}}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{8\pi}{c} \chi_{14} \frac{\partial}{\partial t} (E_z E_y) \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\varepsilon_{zz}}{c} \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{8\pi}{c} \chi_{36} \frac{\partial}{\partial t} (E_x E_y) \\ -\frac{1}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = 0 \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\varepsilon_{yy}}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{8\pi}{c} \chi_{14} \frac{\partial}{\partial t} (E_z E_x) \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{1}{c} \frac{\partial H_x}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0 \end{array} \right. . \quad (6)$$

Матеріалом з такими нелінійними властивостями ε , наприклад, KDP (KH_2PO_4).

Нелінійну систему рівнянь можна представити у вигляді:

$$\hat{L}f = \hat{H}(f, f). \quad (7)$$

У цьому виразі \hat{L} – лінійний диференціальний оператор, що являє собою квадратну матрицю, яка складається з операторів лінеаризованої системи рівнянь, \hat{H} – оператор-стовпець, складений з нелінійних доданків, f – рішення лінеаризованої системи рівнянь $\hat{L}(f) = 0$.

Методика полягає в тому, що поля виражаються через амплітуди, які залежать від часу [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_{\omega, k_x=-\infty}^{\infty} C_k(t) (\mathbf{e}(z) + \mathbf{e}^{(ad)}(z)) \exp(-i\omega_k t + ik_x x), \\ \mathbf{H} &= \sum_{\omega, k_x=-\infty}^{\infty} C_k(t) (\mathbf{h}(z) + \mathbf{h}^{(ad)}(z)) \exp(-i\omega_k t + ik_x x). \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $C_k(t)$ – амплітуда хвилі; $\mathbf{e}(z)$, $\mathbf{h}(z)$ – поля цієї гармоніки, що залежать від координати z ; $\mathbf{e}^{(ad)}$ і $\mathbf{h}^{(ad)}$ – додаткові доданки, які описують ухилення напрямку полів від лінійних, викликані дією нелінійних механізмів.

Рівняння (8) є диференціальними (а не алгебраїчними, як в однорідному нелінійному середовищі [4]), тому методика ґрунтується на формулі Гріна:

$$\int_a^b \left[\tilde{f}^* \cdot (Lf) - (Lf)^* \cdot f \right] dv = f f^* \Big|_a^b, \quad (9)$$

де $\tilde{\hat{L}}$ – транспонований оператор \hat{L} , f, \tilde{f}^* – власні функції операторів \hat{L} і $\tilde{\hat{L}}$ відповідно, v – координатний простір, у якому діють оператори \hat{L} й $\tilde{\hat{L}}$, a і b – границі нелінійного шару.

У результаті інтегрування виразу (7), отримано рівняння для амплітуд взаємодіючих хвиль:

$$\frac{d(C_k)^{TM}}{dt} = W_{k,k',k''} (C_{k'})^{TM} (C_{k''})^{TE}, \quad \frac{d(C_k)^{TE}}{dt} = W_{k,k',k''} (C_{k'})^{TM} (C_{k''})^{TM}, \quad (10)$$

де $W_{k,k',k''}$ – матричні елементи для ТМ і ТЕ хвиль:

$$(W_{k,k',k''})^{TM} = -\frac{4\pi}{c} \frac{\omega' + \omega''}{S} \times \int_0^{d_1} \left[\chi_{14} \left(e_{x1}^{*(k)} e_{z1}^{(k')} e_{y1}^{(k'')} + e_{x1}^{*(k)} e_{y1}^{(k')} e_{z1}^{(k'')} \right) + \chi_{36} \left(e_{z1}^{*(k)} e_{x1}^{(k')} e_{y1}^{(k'')} + e_{z1}^{*(k)} e_{y1}^{(k')} e_{x1}^{(k'')} \right) \right] dv \quad (11)$$

$$(W_{k,k',k''})^{TE} = -\frac{4\pi}{c} \frac{\omega' + \omega''}{S} \int_0^{d_1} \chi_{14} \left(e_{y1}^{*(k)} e_{z1}^{(k')} e_{x1}^{(k'')} + e_{y1}^{*(k)} e_{x1}^{(k')} e_{z1}^{(k'')} \right) dv, \quad (12)$$

де χ_{14} , χ_{36} – елементи тензора нелінійної сприйнятливості.

У цих виразах k' належить до хвилі із частотою ω' , хвильовим числом k'_x і блохівським хвильовим числом \bar{k}' , k'' – до хвилі з ω'' , k''_x і \bar{k}'' , без штрихів – відповідає хвилі з ω , k_x і \bar{k} .

Відзначимо, що при інтегруванні даних співвідношень виникають умови синхронізму:

$$\omega' + \omega'' - \omega = 0, \quad k'_x + k''_x - k_x = 0, \quad \bar{k}' + \bar{k}'' - \bar{k} + 2\pi n / (d_1 + d_2) = 0. \quad (13)$$

Особливість цих співвідношень полягає в тому, що відсутній закон збереження для поперечних хвильових чисел $k_{z1}, k'_{z1}, k''_{z1}$, але з'явився новий закон для компонентів блохівських векторів. Для поперечних хвильових чисел при інтегруванні виникають доданки наступного вигляду:

$$\frac{\sin(\pm k_{z1} \pm k'_{z1} \pm k''_{z1})z}{\pm k_{z1} \pm k'_{z1} \pm k''_{z1}}. \quad (14)$$

Це співвідношення виявляється великим, коли одна з комбінацій дорівнює нулю. Фізичний зміст цього полягає в тому, що сумарне поле в шарі не залежить від z , а, отже, інтеграли у співвідношеннях (11) та (12) мають найбільше значення.

Чисельно досліджено умови синхронізму з урахуванням дисперсійних співвідношень, як для об'ємних, так і для поверхневих хвиль. Показано, що трихвильові нелінійні взаємодії ТЕ коливань відбуваються тільки при наявності компонентів ТМ-полів, а ТМ-хвилі взаємодіють із полями ТМ і ТЕ хвиль, тобто має місце зміна поляризації хвиль у результаті нелінійної взаємодії. На рис. 4 зірочкою, точками та трикутниками представлене рішення умов синхронізму (13) для ТЕ хвиль.

Найбільший інтерес представляють ті рішення рівнянь синхронізму, при яких хвилі розпаду потрапляють на границю зон непропускання, тому що в цьому випадку є бреггівський резонанс і нелінійний матричний елемент є максимальним. У структурі також виконується нелінійний

резонанс, що полягає в тому, що виконується умова рівності для поперечних хвильових чисел шарів (14).

Розглянуто нелінійну трихвильову взаємодію поверхневих хвиль. На відміну від безмежної структури, у цьому випадку відсутня умова синхронізму для блохівського хвильового числа. Проведено чисельне дослідження умов синхронізму для поверхневих хвиль. Показано, що для поверхневих хвиль також можлива трихвильова взаємодія.

ВИСНОВКИ

Сформулюємо основні результати дисертаційної роботи:

1. У роботі показано можливість існування нового типу електромагнітних хвиль, які поширюються уздовж границі розподілу двох різних шарувато-періодичних структур. Обвідні амплітуд полів поверхневих хвиль спадають по експоненті в обидва боки від площини розподілу решіток, а усередині шарів амплітуди можуть носити коливний або експонентний характер.

2. Розглянуто електродинамічні властивості поверхневих хвиль на границі розподілу двох діелектричних структур. Отримано дисперсійне співвідношення для поверхневих хвиль для даного випадку. Дисперсійні криві поверхневих хвиль розташовуються в зонах непропускання обох решіток. Показано, що існує три типи поверхневих хвиль: 0 -моди, π -моди та змішані моди. Проаналізовано розподіл електромагнітних полів і потоку енергії у поверхневій хвилі по шарах решіток. Максимальний потік енергії спостерігається в шарах першого періоду кожної решітки, тобто в шарах, що прилягають до границі поділу двох решіток.

3. Досліджено властивості поверхневої електромагнітної хвилі, що поширюється між двома шарувато-періодичними напівпровідниковими структурами. Показано, що в напівпровідникових решітках існують поверхневі хвилі, частоти яких асимптотично прагнуть до плазмової частоти. Фазова швидкість цих хвиль може бути малою. Для вивчення цього питання проведено дослідження впливу дисипативних процесів на фазову швидкість поверхневої хвилі. Причиною зростання мінімальної фазової швидкості є збільшення долі енергії в шарах цього напівпровідника по мірі наближення частоти до частоти поверхневого плазмона, що поширюється уздовж границі напівпровідникового й діелектричного шарів лівої та правої решіток.

4. Проаналізовано електродинамічні властивості контакту двох напівпровідникових решіток, розташованих у зовнішньому магнітному полі. Розглянуто випадок, коли вектор магнітного поля паралельний площині шарів структури, а хвилі поширюються в перпендикулярній йому площині. Показано, що в аналізованій геометрії з'являються нові характерні частоти, до яких асимптотично

прагнуть дисперсійні криві поверхневих хвиль. Дані частоти залежать від величини зовнішнього магнітного поля, тому зовнішнє магнітне поле дозволяє керувати властивостями структури.

5. Вперше вивчено поширення геліконових хвиль у безмежних напівпровідниково - діелектричних структурах. Відмітними властивостями геліконових хвиль є можливість поширення в плазмі твердого тіла в широкому діапазоні частот і постійних магнітних полях, крім того, загасання цих хвиль обернено пропорційно величині зовнішнього магнітного поля. Тому в великих магнітних полях гелікони мають відносно мале загасання. Показано, що в безмежній напівпровідниковій структурі існують два незалежних спектри власних хвиль. Цікавою особливістю для геліконових хвиль у періодичній структурі є те, що на частотах нижче плазмової частоти напівпровідникового матеріалу утворюється система вузьких дозволених зон.

6. У роботі запропоновано методику для отримання дисперсійного співвідношення для поверхневих геліконових хвиль. Показано, що поблизу границь зон пропущення об'ємних геліконових хвиль існує поверхнева геліконова хвиля.

7. Проведено аналітичне дослідження нелінійної трихвильової взаємодії електромагнітних хвиль у періодичній діелектричній структурі. Розглянуто випадок, коли в процесі нелінійної взаємодії відбувається зміна поляризації хвиль. Виявлено, що крім брегівського резонансу, що є характерним для періодичного середовища, нелінійний резонанс істотно збільшує ефективність взаємодії. Проведено чисельне дослідження умов синхронізму з урахуванням дисперсійних співвідношень, як для об'ємних, так і для поверхневих хвиль. Проведено аналіз співвідношень синхронізму для поверхневих хвиль. Показано, що під впливом нелінійних механізмів у періодичних структурах можливий розпад поверхневої хвилі накачування на дві поверхневі хвилі з іншою поляризацією.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
2. Ханкина С.И., Яковенко В.М. К теории поверхностных геликонов в полупроводниковой плазме // ФТП. – 1979. – Т. 13, № 9. – С. 1795-1798.
3. Белецкий Н.Н., Булгаков А.А., Ханкина С.И., Яковенко В.М. Плазменные неустойчивости и нелинейные явления в полупроводниках.. – К.: Наукова думка, 1984. – 192 с.
4. Галеев А.А., Карпман В.И. Турбулентная теория слабонеравновесной разреженной плазмы и структура ударных волн // ЖЭТФ. – 1963. – Т. 44, № 2. – С. 592-602.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Булгаков А.А., Мериуц А.В., Ольховский Е.А. Поверхностные электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектрических сверхрешеток // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, №10. – С. 103-107.
2. Булгаков А.А., Ольховский Е.А. Электродинамические свойства поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы двух слоисто-периодических полупроводниковых структур // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. – Харьков, 2005. – Т. 10, № 1. – С.7-12.
3. Ольховский Е.А., Шрамкова О.В. Поверхностные магнитоплазменные волны на границе раздела двух полупроводниковых сверхрешеток // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. – Харьков, 2005. – Т. 10, № 2. – С.261-265.
4. Olkhovskiy Y., Bulgakov A., Shramkova O. The dispersion properties of bulk and surface helicons in the periodic structure with plasma-like layers // Czechoslovak journal of physics. – 2006. – Vol. 56B. – P. B976-B981.
5. Булгаков А.А., Ольховский Е.А., Шрамкова О.В. Дисперсионные свойства геликонов в периодической полупроводниковой структуре // Доповіді Національної Академії Наук України. – 2007. – №3. – С. 83-88.
6. Булгаков А.А., Ольховский Е.А., Шрамкова О.В. Трехволновые взаимодействия электромагнитных волн в слоисто-периодической структуре // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. – Харьков, 2007. – Т. 12, № 1. – С.163-167.

Результати дисертації додатково висвітлені в таких роботах

7. Bulgakov A.A., Meriutz A.V., Olkhovskiy Y.A. Investigation of electrodynamic properties of two dielectric superlattices contacts // Proc. of the fifth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves". June 21-26, 2004, Kharkov, Ukraine. – P. 380-382.
8. Bulgakov A. A., Olkhovskiy Y. A., Shramkova O. V. Investigation of helicon waves in the semiconductor superlattices // Proc. of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. September 12-17, 2005, Yalta, Crimea, Ukraine. – Vol.2. – P. 52-55.
9. Ольховский Е.А., Шрамкова О.В.. Исследование электродинамических свойств поверхностных магнитоплазменных волн на контакте двух полупроводниковых сверхрешёток // Труды 15-ой Международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. 12-16 сентября, 2005, Севастополь, Украина. – С. 625-626.
10. Olkhovskiy Y.A., Shramkova O.V. Surface magnetoplasma waves on the interface of two semiconductor layered-periodic structure // Сборник научных трудов Международной конференции „СВЧ и оптоэлектроника” 2-го Международного радиоэлектронного форума

„Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. 19-23 сентября, 2005, Харьков, Украина. – Т. 5. – С. 116-118.

11. Bulgakov A.A., Olkhovskiy Y.A., Shramkova O.V. Three-wave interaction in a dielectric periodic structure // Proc. of the 11th International Conference on Mathematical Methods on Electromagnetic Theory. June 26–29, 2006, Kharkov, Ukraine.– P. 469-471.

АНОТАЦІЯ

Ольховський Е.О. Поширення поверхневих електромагнітних хвиль уздовж границі розподілу періодичних структур. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика - Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2007.

Дисертація присвячена вивченню нового типу поверхневих електромагнітних хвиль, які поширюються уздовж границі розподілу двох різних шарувато-періодичних структур. Отримано дисперсійне співвідношення для поверхневих хвиль.

Розглянуто електродинамічні властивості контакту двох напівпровідникових решіток, розташованих у зовнішньому магнітному полі. Проаналізовано поширення геліконових хвиль. Показано, що поблизу границь зон пропускання об'ємних геліконів існує поверхнева геліконова хвиля.

Проведено аналітичне дослідження нелінійної трихвильової взаємодії електромагнітних хвиль у періодичній діелектричній структурі. Показано, що крім брегівського резонансу істотно збільшує ефективність взаємодії нелінійний резонанс. Чисельно досліджено умови синхронізму з урахуванням дисперсійних співвідношень, як для об'ємних, так і для поверхневих хвиль. Показано, що хвилі розпаду можуть знаходитися в різних зонах пропускання.

Ключові слова: поверхнева хвиля, шарувато-періодична структура, дисперсійне співвідношення, магнітне поле, геліконова хвиля, трихвильова взаємодія, умови синхронізму.

АННОТАЦИЯ

Ольховский Е.А. Распространение поверхностных электромагнитных волн вдоль границы раздела периодических структур. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2007.

Диссертация посвящена изучению нового типа электромагнитных волн, которые распространяются вдоль границы раздела двух различных слоисто-периодических структур.

Получено дисперсионное соотношение для поверхностных волн, которые распространяются вдоль границы двух полупроводниково – диэлектрических структур. Рассмотрено распределение электромагнитных полей и потоков энергии в исследуемой структуре. Огибающие амплитуд полей поверхностных волн убывают по экспоненте в обе стороны от плоскости раздела решёток, а внутри слоев амплитуды могут носить осциллирующий или экспоненциальный характер. Максимальный поток энергии наблюдается в слоях первого периода каждой решётки, то есть в слоях, прилегающих к границе раздела двух решеток.

Исследована зависимость минимальной фазовой скорости поверхностной волны от частоты столкновений в полупроводнике. Показано, что затухание поверхностной волны зависит от распределения потоков энергии в слоях, при этом, чем меньшая часть энергии сосредоточена в диссипативном слое, тем меньше затухание волны.

Рассмотрены электродинамические свойства контакта двух полупроводниковых решёток, помещенных во внешнее магнитное поле. Показано, что в случае, когда вектор магнитного поля параллелен границам слоев структуры, а волны распространяются в перпендикулярной ему плоскости, появляются новые характерные частоты, к которым асимптотически стремятся дисперсионные кривые поверхностных волн. Данные частоты зависят от величины внешнего магнитного поля. В случае, в котором вектор магнитного поля расположен в той же плоскости, в которой происходит распространение электромагнитных волн, исследуется распространение геликоновых волн. Отличительной особенностью спектра геликоновых волн является то, что образуются многочисленные узкие разрешенные зоны. Показано, что вблизи границ зон пропускания объемных геликонов существует поверхностная геликоновая волна.

Проведено аналитическое исследование нелинейного трехволнового взаимодействия электромагнитных волн в периодической диэлектрической структуре. Предполагалось, что нелинейность малая, то есть энергия нелинейного взаимодействия меньше энергии взаимодействующих волн. Показано, что кроме брэгговского резонанса, который характерен для периодической среды, существенно увеличивает эффективность взаимодействия нелинейный резонанс. Этот резонанс характеризуется равенством нулю алгебраической суммы поперечных

волновых чисел взаимодействующих волн одного из слоев. Физически это условие соответствует наибольшему значению энергии, запасаемой волнами в данном слое.

Численно исследованы условия синхронизма с учетом дисперсионных соотношений, как для объемных, так и для поверхностных волн. Показано, что волны распада могут находиться в различных зонах пропускания. Отличительная особенность соотношений синхронизма для объемных волн состоит в том, что отсутствует закон сохранения для поперечных компонент волновых векторов, и появился закон сохранения для компонент блоховских векторов.

Ключевые слова: поверхностная волна, слоисто-периодическая структура, дисперсионное соотношение, магнитное поле, геликоновая волна, трехволновое взаимодействие, условия синхронизма.

ABSTRACT

Olkhovskiy Y.A. Propagation of the surface electromagnetic waves along the interface of the periodic structures. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2007.

The dissertation has been devoted to the investigation of the new type electromagnetic waves, which propagate along the interface of two different layered-periodic structures. The dispersion relation for the surface waves has been obtained.

The electrodynamics properties of two semiconductor lattices contact placed into the external magnetic field have been considered. Propagation of helicon waves has been analysed. It has been shown, that the surface helicon wave exists near the boundary of the transmission zone of bulk helicons.

The analytical study of the nonlinear three-wave interaction of electromagnetic waves in the periodic dielectric structure has been made. It has been shown, that the nonlinear resonance other than Bragg resonance increases the interaction effectiveness. The synchronism conditions both for the bulk wave and for the surface waves with taking into account the dispersion relation have been numerically investigated. It has been shown, that disintegration waves can be located in the various transmission bands.

Keywords: surface wave, layered-periodic structure, dispersion relation, magnetic field, helicon wave, three-wave interaction, synchronism conditions.