

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

ЯЧИН ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 537.874.6

РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА ТРИВИМІРНИХ
ДВОПЕРІОДИЧНИХ БАГАТОШАРОВИХ
МАГНІТОДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУРАХ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

Науковий консультант

доктор фізико-математичних наук, професор
Просвірнін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків),
завідувач відділу теоретичної радіофізики.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Кириленко Анатолій Опанасович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків),
головний науковий співробітник лабораторії
обчислювальної електродинаміки відділу теорії дифракції
і дифракційної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, професор
Нерух Олександр Георгійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри вищої математики;

доктор технічних наук, професор
Сухаревський Олег Ілліч,
провідний науковий співробітник наукового центру
Повітряних Сил Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба МО України

Захист відбудеться «27» квітня 2018 року в 14-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури 12, м. Харків, 61085.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури 12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий « 27 » березня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтерес до періодичних структур на сучасному етапі розвитку радіофізики формується, в основному, за рахунок досліджень, пов'язаних з розробкою фотоннокристалічних, частотно-селективних структур і різних видів метаматеріалів. До теперішнього часу дослідження зі створення різних типів фотонних наноструктур привели до великої різноманітності одно-, двох- і тривимірних магнітодіелектричних і металевих періодичних структур, які демонструють якісно нові і дивовижні лінійно-оптичні, нелінійно-оптичні і квантово-оптичні властивості. Такі структури забезпечують контроль поширення і взаємодії світла з речовиною. Експериментальні роботи з дослідження електродинамічних характеристик періодичних структур безпосередньо стимулювалися теоретичними концепціями, такими як тривимірні смугові заборонені зони і штучний магнетизм на оптичних частотах в метаматеріалах.

Вивчення шаруватих фотонних структур має велике практичне значення через планарну технологію їх виготовлення. Безліч шаруватих структур з подвійною періодичністю шарів є частиною пристроїв і систем, що представляють великий інтерес з точки зору як інженерної, так і фундаментальної фізики.

Відкриття Фарадеєм явища обертання площини поляризації лінійно поляризованої електромагнітної хвилі, що проходить через гіротропний шар в зовнішньому магнітному полі, тобто магнітооптичного ефекту (МО), відомо більше 150 років і використовується в різних магнітооптичних пристроях. Хоча МО явища слабкі, особливо в оптичному діапазоні, існує ряд можливостей їх посилення, не пов'язаних зі збільшенням зовнішнього магнітного поля. Одна з них – це використання резонансів різного походження.

Останніми роками велика увага приділяється вивченню метаматеріалів. Метаматеріали є новими штучними матеріалами з періодичною структурою, розробленими для досягнення унікальних властивостей, що зазвичай не зустрічаються в природі. Разом з метаматеріалами розглядаються і їх двовимірні аналоги – метаповерхні. На початку досліджень як метаматеріали розглядалися композитні матеріали і штучні діелектрики. Пізніше терміни метаматеріал і метаповерхня стали відносити до матеріалів, ефективна діелектрична проникність і ефективна магнітна проникність яких одночасно негативні на заданій частоті. Існує інший клас метаматеріалів, відмінною особливістю яких є наявність майже нульового показника заломлення, який зазвичай не зустрічається в природі. У цих метаматеріалах діелектрична або магнітна проникності мають дійсну частину, близьку до нуля. Метаматеріали мають широкий діапазон застосувань в електродинаміці на частотах від мікрохвильових до оптичних. Вони можуть використовуватися для створення нових типів антен, електронних перемикачів, "ідеальних лінз" і резонаторів.

Важливим завданням радіофізики є контроль параметрів розсіяння в періодичних структурах шляхом зміни температури, тиску, зовнішніх електричних і магнітних полів. Як повідомляється в нещодавно опублікованих періодичних

виданнях, в періодичних структурах, що реконфігуруються і перестроюються, і матеріалах на їх основі можна виділити такі методи керування електродинамічними характеристиками періодичних структур, як фізична (структурна) зміна, зміна стану матеріалу і використання керованих елементів в схемі структури періодичної комірки. Перші два методи охоплюють майже увесь частотний спектр від мікрохвиль до оптики, а третій застосовується тільки на мікрохвилях.

Таким чином, розробка на сучасному рівні різних електродинамічних пристроїв на базі періодичних структур вимагає вивчення і глибокого теоретичного осмислення різних аспектів взаємодії електромагнітних хвиль з періодичними структурами. Особливу роль в аналізі електродинамічних процесів в періодичних структурах грає резонансна взаємодія електромагнітних (ЕМ) хвиль і структури. Такий аналіз потребує створення адекватного математичного апарату, що враховує специфіку періодичних структур і метаматеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася у рамках досліджень відділу теоретичної радіофізики Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України відповідно до держбюджетних НДР, які виконувались за Цільовими програмами наукових досліджень Відділення фізики та астрономії НАН України: «Дослідження радіовипромінювання Землі та планет сонячної системи. Теорія дифракції та розповсюдження електромагнітних хвиль» (0100U006421), «Електродинаміка композиційних середовищ з плоскими періодично розташованими металевими включеннями резонансних розмірів» (0102U002485), «Дослідження радіовипромінювання планет сонячної системи. Теорія дифракції та розповсюдження електромагнітних хвиль» (0103U007919), «Гіпертонка структура мілісекундних сполохів та низькочастотні модуляції декаметрового радіовипромінювання планети Юпітер. Фізичні процеси розсіювання та випромінювання електромагнітних хвиль» (0107U000025), «Теоретичні та експериментальні дослідження резонансного збудження поверхневих хвиль у напів- та надпровідникових періодичних наноструктурах та визначення можливостей створення на цій основі нанофотонних та наноелектронних пристроїв. Розроблення дослідного зразка фільтру субміліметрового діапазону» (0110U004538), «Дослідження розсіювання електромагнітних хвиль складними періодичними структурами та метаматеріалами, розробка електродинамічних методів проектування мікrohrічкових та хвильоводних фазованих антенних решіток» (0111U000064), «Математичні моделі та фізичні основи розробки метаматеріалів на основі металевих та магнітодіелектричних періодичних структур, розробка електродинамічних методів проектування мікrohrічкових та хвильоводних антен» (0116U000036), «Нестационарні процеси в активних мікро- та наноструктурах, що містять плазмонні та підсилюючі компоненти» (0116U005693).

В.В. Ячин був учасником та виконавцем наукових проектів, які фінансувалися країнами, що входять до Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та/або Європейського Союзу (ЄС).

В.В. Ячин був виконавцем проекту ENCOMB-Extended Non-Destructive Testing of Composite Bonds (Project number 266225, call (part) identifier FP7-AAT-

2010-RTD-1) «Розширений неруйнівний контроль з'єднань композиційних матеріалів» (0110 U00665681).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є знаходження і дослідження нових фізичних явищ і закономірностей взаємодії електромагнітних полів з тривимірними багат шаровими періодичними структурами і середовищами (метаматеріалами). Одним з основних завдань дисертації є розробка нових періодичних структур, в яких, за рахунок спеціально підібраної структури елементарної комірки, виникають нові резонансні ефекти, що приводять до зміни поляризаційної структури поля і його інтенсивності.

Об'єктом дослідження дисертації є фізичний процес розсіяння електромагнітного поля тривимірними багат шаровими періодичними структурами і штучними середовищами, що мають складну структуру періодичної комірки, яка містить оптично-активні включення.

Предметом дослідження дисертації є закономірності взаємодії електромагнітних хвиль, характеристики процесів амплітудно-поляризаційного перетворення електромагнітних полів, природа резонансних режимів роботи в тривимірних періодичних структурах.

В дисертації розв'язано такі задачі:

1. Розв'язано векторну задачу розсіяння плоскої монохроматичної хвилі на двоперіодичному магнітодіелектричному шарі з довільним розподілом магнітної і діелектричної проникностей по елементарній комірці структури у багатомодовому режимі. Отримано вирази для розсіяних полів.
2. Розроблено нові рекурсивні схеми знаходження коефіцієнтів розсіяння для задачі дифракції плоскої монохроматичної хвилі на багат шаровій магнітодіелектричній двоперіодичній структурі з довільним розподілом магнітної і діелектричної проникностей по елементарному тривимірному періоду структури у багатомодовому режимі. Отримано вирази для розсіяних полів.
3. Розв'язано векторну задачу розсіяння плоскої монохроматичної хвилі на двоперіодичному гіротропному шарі з довільним розподілом магнітної і діелектричної проникностей по елементарній комірці структури у багатомодовому режимі. Отримано вирази для розсіяних полів.
4. Отримано аналітичні вирази для коефіцієнтів розсіяння для двоперіодичного гіротропного шару з довільним розподілом магнітної і діелектричної проникностей по елементарній комірці структури в квазістатичному наближенні.
5. Розв'язано задачі розсіяння тривимірного хвильового пучка Гауса з циліндричною симетрією розподілу поля на двоперіодичному магнітодіелектричному і гіротропному шарах з поляризаційно незалежними елементарними комірками структур в квазістатичному наближенні.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у дисертації задач було використано такі основні теоретичні і чисельні методи дослідження:

1. Методи розв'язання інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки, метод “інтегральних функціоналів”.

2. Методи дискретизації, метод Фур'є аналізу.
3. Методи розв'язання матричних диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтам.
4. Методи матричної алгебри.
5. Метод Галеркіна.

Наукова новизна одержаних результатів визначається новими фізичними ефектами, передбаченими в дисертаційній роботі, в результаті досліджень багатомодових процесів розсіювання електромагнітних хвиль на тривимірних багат шарових двоперіодичних структурах з довільною структурою елементарної комірки, що містить різні типи метало-магнітодіелектричних матеріалів. В дисертації отримано такі нові результати:

- Розроблено новий метод розв'язання векторних задач розсіювання плоских ЕМ хвиль на двоперіодичному магнітодіелектричному шарі у багатомодовому режимі в частотній області на основі об'ємних інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. Доведена єдиність рішення і проведена оцінка достовірності чисельних результатів.
- Запропоновано і досліджено новий клас частотно-селективних поверхонь, що являють собою періодично перфоровані ідеально провідні екрани з отворами у формі гамадйонів, що мають чотирикратну симетрію обертання, або С-подібні отвори. Показано, що на основі таких поверхонь можна створити ефективні режекторні фільтри, добротністю яких можна керувати шляхом зміни товщини екранів.
- Вперше отримано і досліджено ЕПП-подібний (електромагнітно індукована прозорість) резонанс при нормальному падінні плоскої хвилі на двоперіодичну повністю діелектричну структуру, який виникає при суміщенні ґраткових резонансів (аномалій Вуда) за допомогою зміни конфігурації періодів структури і її розмірів.
- Вперше для ТГц діапазону довжин хвиль запропоновано, теоретично обґрунтовано і експериментально досліджено диференціальні фазові секції для квазіоптичних хвилеводів на основі діелектричної структури, що складається з переміжних шарів слюди і лавсана або шарів полістиролу з повітряними проміжками.
- Розроблено нові рекурсивні схеми розв'язку векторних задач розсіювання плоских ЕМ хвиль на багат шарових двоперіодичних магнітодіелектричних структурах у багатомодовому режимі в частотній області на основі методу інтегральних функціоналів.
- Запропоновано і досліджено новий клас періодичних структур, які є ідеально провідними екранами із співвісними отворами, в яких можливий режим збудження замкненої моди. Розглянуто можливість використання таких структур як дихроїчних частотних фільтрів на резонансах замкненої і ґраткової мод.
- Передбачено, вивчено і експериментально підтверджено резонанс відбиття / проходження в схрещених решітках. Продемонстровано можливість механічного керування резонансними властивостями такої структури в над-

широкому частотному діапазоні.

- Запропоновано і досліджено новий клас метаматеріалів на основі періодично розташованих квадратних спіралей, розміщених в діелектричному шарі, що обертають площину поляризації ЕМ хвиль.
- Запропоновано нову теоретичну модель існуючих композитів, що являють собою армований вуглепластик. З використанням запропонованої моделі дані рекомендації з виявлення термічної деградації таких вуглепластиків.
- Вперше методом інтегральних функціоналів розв'язано векторну задачу дифракції плоскої ЕМ хвилі на двоперіодичному гіротропному шарі у багатомодовому режимі.
- Вперше розглянуто застосування перфорованого гіромагнітного шару як поляризатора Брюстера. Розроблено нові методики ефективного пошуку параметрів поляризатора Брюстера, що пропускає тільки TE - або TM -компоненти поля падаючої хвилі.
- Вперше продемонстровано явище екстраординарного збільшення ефекту Фарадея при використанні структур, які є перфорованими ідеально провідними шарами з отворами, заповненими залізо-ітрієвим гранатом. Показано, що резонанс відбувається на ґраткових модах і відноситься до резонансів магнітного типу.
- Вперше розв'язано задачу розсіювання тривимірного пучка Гауса з циліндричною симетрією розподілу поля на перфорованому магнітодіелектричному шарі і гіротропному шарі з поляризаційно незалежною формою отвору перфорації.
- Вперше виявлено ефект, який полягає в протилежному зміщенні максимумів x - і y - компонент поля, відбитого від гіромагнітного шару з отворами, при похилому падінні TE -поляризованого пучка Гауса.
- Вперше виявлено ефект повного проходження похило падаючого TM -поляризованого пучка Гауса без зміни його форми при певних товщинах шару фериту з малими квадратними отворами в широкій області кутів його падіння.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертаційній роботі розроблено новий метод розв'язання векторних задач розсіювання електромагнітного випромінювання на тривимірних багат шарових метало-магнітодіелектричних двоперіодичних структурах, що дозволило розглянути ряд практично важливих задач. Багат шарові періодичні структури з різних матеріалів широко використовуються в приладобудуванні в частотних діапазонах від мікрохвильового до оптичного. На основі таких структур можуть бути створені різного роду смугові фільтри, дільники пучка і диплексери для квазіоптичних і мікрохвильових пристроїв. Крім того, їх можна використовувати для створення слабо відбиваючих і поглинаючих покриттів. Багат шарові періодичні структури можуть служити складовими елементами трансформаторів поляризації, поляризаторів електромагнітного випромінювання, сенсорів і т.ін. Вони можуть бути використані як поляризаційні селективні невзаємні екрани та як дільники променя. В області інтегральної оптики ці структури можуть використовуватись для створення різних затворів і модуляторів, керованих зовнішнім електричним або магнітним полем.

Метаматеріали з механічним деформаційним настроюванням елементарної комірки можуть бути ефективними для керування характеристиками ЕМ хвиль і отримання адаптивного відгуку без зусиль із проектування і виготовлення періодичних структур з електронним настроюванням. Розроблений в дисертації метаматеріал дозволяє робити його механічне настроювання без необхідності зміни напруги зміщення, введення нелінійних компонентів і microelectromechanical systems (MEMS). При цьому частота резонансу може бути змінена в широких межах.

ТГц діапазон залишається діапазоном, який є слабо забезпеченим системами каналізації. Одним з елементів хвилеводного тракту, що служать для перетворення поляризації, є диференціальні фазові секції. В дисертації було запропоновано, розроблено і досліджено чвертьхвильові і напівхвильові широкосмугові диференціальні фазові секції в ТГц частотному діапазоні.

Створення моделі вуглепластика, що являє собою періодично укладені вуглецеві волокна в епоксидній матриці, дозволило ефективно моделювати електродинамічні процеси розсіяння для різних сценаріїв опромінення і температурного режиму. Така модель дозволяє вивчати фізичні явища, що спостерігаються у вуглепластику, визначати безконтактним способом його стан і деградацію матеріалу. Цей підхід має велике значення у виробництві і експлуатації сучасних літальних апаратів.

Ще одним практично важливим об'єктом досліджень цієї дисертаційної роботи є двоперіодична структура з гіротропного матеріалу або так званий магнітофотонний кристал. У такому кристалі існують різні види резонансів, що сприяють посиленню магнітооптичних ефектів. Величезну роль в техніці НВЧ грають прилади на основі таких ефектів. Особлива роль відводиться ефекту Фарадея. Завдяки істотному збільшенню кута обертання Фарадея в двоперіодичній структурі є можливість мініатюризувати прилади, наприклад, такі як модулятори або затвори. Крім того, передбачений ефект може бути використано для створення нових планарних елементів інтегральної оптики. Він також може бути застосований в 3D дисплеях і телекомунікаційних приладах.

Особистий внесок здобувача. У дисертації було використано наукові статті [1-20] і матеріали тез доповідей на конференціях [21-32]. В опублікованих із співавторами статтях [1,2,9,12] особистий внесок здобувача полягає в участі у виборі об'єктів дослідження, розробці методу розв'язку задач розсіяння, розробці відповідних комп'ютерних алгоритмів і налагодженню програм, проведенні числового моделювання, а також обговоренні отриманих результатів. У статтях [3,6,8,10,11,13,15,20] внесок здобувача полягає в участі у виборі об'єктів дослідження, розробці методу розв'язку задач розсіяння, а також обговоренні отриманих результатів. У статтях [14,16,17-19] запропоновано теоретичний метод розв'язку задач розсіяння, розробку відповідних комп'ютерних алгоритмів і налагодження програм, проведення числового моделювання, а також у обговоренні отриманих результатів. Статті [4,5,7] опубліковані дисертантом без співавторства.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи за темою дисертації доповідались і обговорювалися на семінарах відділу теоретичної радіофізики Радіоастрономічного інституту НАН України, на науково-кваліфікаційному семінарі

«Теорія дифракції та дифракційна електроніка» в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України і семінарі відділу квазіоптики в Інституті радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, а також на таких міжнародних конференціях і симпозіумах :

- The International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory “ММЕТ” (Kharkiv 1998, 2000, 2012; Kiev 2002, 2010; Dnipropetrovsk 2014; Lviv 2016)
- The International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic Theory "DIPED" (Lviv 1999, 2001, 2009);
- The International Symposium Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves “MSMW” (Kharkiv 2001, 2007, 2010, 2013, 2016)
- - The International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication “MIKON” (Gdansk 2014)
- The International Conference on Electronics and Nanotechnology “ELNANO” (Kiev 2016)
- The International Conference on Electrical and Computer Engineering “UKRCON” (Kiev 2017)

Публікації. Результати дисертації було опубліковано в 32 наукових роботах, у тому числі в 20 статтях [1-20] у профільних наукових журналах і в 12 збірниках доповідей на українських і міжнародних конференціях [21-32].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку цитованої літератури і додатка. Робота містить 235 сторінок, 73 рисунки, 2 таблиці і 327 бібліографічних посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність теми і обґрунтовано необхідність виконання роботи, позначено мету і об'єкт дослідження, сформульовано задачі і описано методи, необхідні для їх вирішення, приведено зв'язок роботи з науковими програмами, а також сформульовані наукова новизна і практична значущість одержаних результатів.

У **розділі 1** розглянуто електродинамічний аспект вивчення і використання періодичних структур, пов'язаний із взаємодією електромагнітного поля з такими об'єктами і перевипромінюванням його в простір. Відмічено, що електродинамічно пасивні 3D періодичні шаруваті структури знаходять широке застосування як частотно-селективні поверхні, фотонно-кристалічні пластини, метаматеріали. У розділі викладено теоретичні і експериментальні дані про такі структури, приведена градація періодичних структур по співвідношенню довжини падаючої хвилі і періоду структури. Згідно цієї градації описано методи моделювання періодичних структур для визначення їх властивостей і можливих технічних застосувань. Особлива увага приділена використанню включень з матеріалів, чутливих до різних зовнішніх впливів, які можуть міняти властивості періодичних структур. Коротко викладено основні методи обчислювальної електродинаміки, дано аналіз переваг і недоліків відомих чисельних алгоритмів моделювання електродинамічних процесів, а також розглянуто методи і способи виготовлення та вимірювання характеристик періодичних структур залежно від частотного діапазону.

У розділі 2 пропонується новий ефективний чисельний метод в частотній області, який застосовується для розрахунку різних електродинамічних характеристик як магнітодіелектричних, так і металевих решіток за одним і тим же алгоритмом. У методі використовується поняття двоперіодичного магнітодіелектричного шару як базового структурного елементу довільної тривимірної шаруватої періодичної структури. Для розв'язання використовуються об'ємні інтегральні рівняння для еквівалентних електричних і магнітних поляризаційних струмів цього періодичного шару у векторному вигляді у багатомодовому режимі

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi}(\nabla\nabla + k^2)\int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}^e(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' + \frac{ik}{4\pi}\nabla\times\int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}^m(\mathbf{r}')d\mathbf{r}', \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi}(\nabla\nabla + k^2)\int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}^m(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' - \frac{ik}{4\pi}\nabla\times\int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}^e(\mathbf{r}')d\mathbf{r}', \quad (2)$$

де $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ ($\mathbf{H}_0(\mathbf{r})$) – зовнішнє ЕМ поле, що породжується заданою системою струмів і зарядів, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ – функція Гріна вільного простору, ∇ – оператор набла. Положення точки $\mathbf{r}$ визначає сенс виразів (1), (2). Якщо $\mathbf{r} \in V$, ці вирази є інтегральними рівняннями, а якщо $\mathbf{r} \notin V$, вони визначають розсіяні поля. Ці рівняння є інтегральними рівняннями макроскопічної електродинаміки, які тотожні рівнянням Максвелла і відповідним граничним умовам. Геометрія задачі схематично показана на рис.1. З напівпростору ($z < 0$) на магнітодіелектричний двоперіодичний шар під кутом θ відносно осі z падає лінійно поляризована плоска хвиля одиничної амплітуди. Падаюча плоска хвиля може бути виражена як суперпозиція TE - і TM -по-

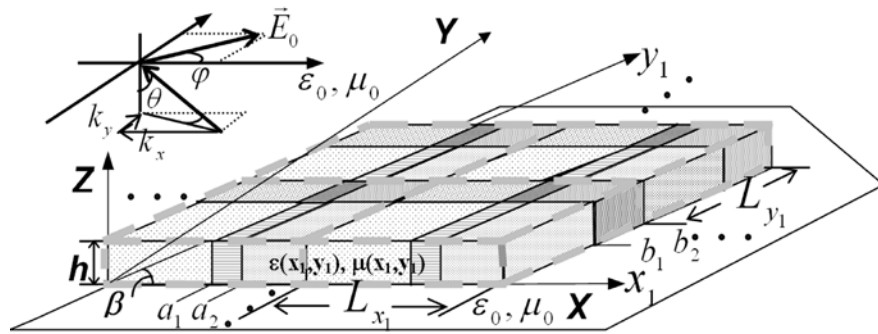


Рисунок 1– Двоперіодичний магнітодіелектричний шар завтовшки h , на який падає ЕМ-поляризована плоска хвиля. Просторово-періодична елементарна комірка з періодами L_{x_1} і L_{y_1} вздовж x_1 - і y_1 -осей складається з паралелепіпедів, що характеризуються комплексною відносною діелектричною і магнітною проникностями. Вісь x_1 паралельна осі x , тоді як вісь y_1 утворює кут β з віссю y

ляризованих хвиль. Для падаючої TE (TM) хвилі електричний (магнітний) вектор поля $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ ($\mathbf{H}_0(\mathbf{r})$) лежить в площині x_1Oy_1 під кутом φ відносно осі x_1 . Двоперіодичний шар завтовшки h складається з періодично розташованих паралелепіпедів в $x_1 - y_1 - z$ координатах. Відносна діелектрична проникність i -го паралелепіпеда в напрямку осі x_1 і j -го паралелепіпеда в

напрямку осі y_1 позначені як ε_{ij} і μ_{ij} , відповідно. Тоді еквівалентні електричні поляризаційні струми $\mathbf{J}_{ij}^e(x_1, y_1, z)$ і магнітні поляризаційні струми $\mathbf{J}_{ij}^h(x_1, y_1, z)$ у кожному з сегментів елементарної комірки пов'язані з електричними і магнітними полями в сегментах. Використовуючи теорему Флоке, поляризаційні струми періодичних сегментів можуть бути представлені таким чином:

$$\mathbf{J}_{ij}^{e(h)}(x_1, y_1, z) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z) e^{i(k_{x_1} + \frac{2\pi p}{L_{x_1}})x_1} e^{i(k_{y_1} + \frac{2\pi q}{L_{y_1}})y_1}, \quad (3)$$

де

$$\mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z) = \frac{1}{L_{x_1} L_{y_1}} \int_{b_{j-1}}^{b_j} \int_{a_{i-1}}^{a_i} e^{-i(k_{x_1} + \frac{2\pi p}{L_{x_1}})x_1} e^{-i(k_{y_1} + \frac{2\pi q}{L_{y_1}})y_1} \mathbf{J}_{ij}^{e(h)}(x_1, y_1, z) dx_1 dy_1, \quad (4)$$

$k_{x_1} = k \sin \theta \sin \varphi$, $k_{y_1} = k \sin \theta \sin(\varphi + \beta)$. Невідомі спектральні амплітуди поляризаційних струмів в (i, j) -ому сегменті позначено як $\mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z)$. Еквівалентний струм поляризації $\mathbf{J}^{e(h)}(x_1, y_1, z)$ двоперіодичного шару може бути виражений таким чином:

$$\mathbf{J}^{e(h)}(x_1, y_1, z) = \sum_{j=1}^{M_y} \sum_{i=1}^{M_x} \mathbf{J}_{ij}^{e(h)}(x_1, y_1, z) = \sum_{j=1}^{M_y} \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z) e^{i(k_{x_1} + \frac{2\pi p}{L_{x_1}})x_1} e^{i(k_{y_1} + \frac{2\pi q}{L_{y_1}})y_1}, \quad (5)$$

де M_x і M_y означають загальні числа сегментів на періодичній комірниці уздовж x_1 - і y_1 - осей координат, відповідно. Використовуючи (5), отримуємо таке співвідношення:

$$\int_V \mathbf{J}^{e(h)}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' = 2\pi i \sum_{j=1}^{M_y} \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} e^{i\xi_p x} e^{i\gamma_{pq} y} \mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z), \quad (6)$$

в якому

$$\mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z) = \frac{1}{\kappa_{pq}} \int_0^h \mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z') e^{i|z-z'|\kappa_{pq}} dz', \quad (7)$$

$$\xi_p = k_x + \frac{2\pi p}{L_{x_1}}, \quad \gamma_{pq} = k_y + \frac{2\pi q}{L_{y_1}} \left(\frac{q}{L_{y_1}} - \frac{p}{L_{x_1}} \cos \beta \right), \quad \kappa_{pq} = \sqrt{k^2 - \xi_p^2 - \gamma_{pq}^2}.$$

Інтегральні функціонали $\mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z)$ (7) відіграють важливу роль в цьому аналізі. Після того, як функціонали $\mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z)$ визначено, спектральні складові поляризаційних струмів $\mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z)$ можуть бути отримані з такого співвідношення:

$$\mathbf{F}_{ij,pq}^{e(h)}(z) = \frac{1}{2i} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z) + \kappa_{pq}^2 \mathbf{I}_{ij,pq}^{e(h)}(z) \right). \quad (8)$$

Скориставшись методом Галеркіна, ми отримуємо набір пов'язаних диференціальних рівнянь для невідомих інтегральних функціоналів, залежних від z . Загальні розв'язання для інтегральних функціоналів, що задовольняють рівнянням (1) і (2), є такими:

$$I_{x(y),pq}^e(z) = \sum_{m=1}^{2(2N+1)^2} (c_m^+ e^{\chi_m z} + c_m^- e^{-\chi_m z}) W_{x(y),pq,m}^e + \frac{2i}{k^2} E_{0x(0,y)} e^{ik_z z}, \quad (9)$$

$$I_{z,pq}^e(z) = \sum_{m=1}^{2(2N+1)^2} (c_{mm}^+ e^{\chi_m z} + c_m^- e^{-\chi_m z}) W_{z,pq,m}^e, \quad (10)$$

$$I_{\nu,pq}^h(z) = \sum_{m=1}^{2(2N+1)^2} (c_m^+ e^{\chi_m z} + c_m^- e^{-\chi_m z}) W_{\nu,pq,m}^h \quad (\nu = x, y, z). \quad (11)$$

В цих виразах $\{c_m^\pm\}$ є невідомими константами, нижній індекс m яких вказує на m -те власне значення і відповідний власний вектор. Треба зауважити, що існує $2(2N+1)^2$ власних значень χ_m^2 . Невідомі коефіцієнти $\{c_m^\pm\}$ визначаються за допомогою граничних умов.

Далі, по відомому внутрішньому полю, використовуючи (1) і (2), будуються вирази для розсіяних полів. Компоненти відбитого електричного поля записуються таким чином:

$$E_x^r(x, y, z) = -\frac{1}{4} \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N \frac{e^{i(\xi_p x + \gamma_{pq} y - \kappa_{pq} z)}}{\kappa_{pq}} \sum_{m=0}^{2(2N+1)^2} \left[c_m^+ (\chi_m - i\kappa_{pq}) - c_m^- (\chi_m + i\kappa_{pq}) \right] \left[(1 - \xi_p^2) W_{x,pq,m}^e \right. \\ \left. - \xi_p \gamma_{pq} W_{y,pq,m}^e + \xi_p \kappa_{pq} W_{z,pq,m}^e - \gamma_{pq} W_{z,pq,m}^h - \kappa_{pq} W_{y,pq,m}^h \right], \quad (12)$$

$$E_y^r(x, y, z) = -\frac{1}{4} \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N \frac{e^{i(\xi_p x + \gamma_{pq} y - \kappa_{pq} z)}}{\kappa_{pq}} \sum_{m=0}^{2(2N+1)^2} \left[c_m^+ (\chi_m - i\kappa_{pq}) - c_m^- (\chi_m + i\kappa_{pq}) \right] \left[(1 - \gamma_{pq}^2) W_{y,pq,m}^e \right. \\ \left. - \xi_p \gamma_{pq} W_{x,pq,m}^e + \gamma_{pq} \kappa_{pq} W_{z,pq,m}^e + \xi_p W_{z,pq,m}^h + \kappa_{pq} W_{x,pq,m}^h \right], \quad (13)$$

$$E_z^r(x, y, z) = -\frac{1}{4} \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N \frac{e^{i(\xi_p x + \gamma_{pq} y - \kappa_{pq} z)}}{\kappa_{pq}} \sum_{m=0}^{2(2N+1)^2} \left[c_m^+ (\chi_m - i\kappa_{pq}) - c_m^- (\chi_m + i\kappa_{pq}) \right] \left[(1 - \kappa_{pq}^2) W_{z,pq,m}^e \right. \\ \left. + \xi_p \kappa_{pq} W_{x,pq,m}^e + \gamma_{pq} \kappa_{pq} W_{y,pq,m}^e - \xi_p W_{y,pq,m}^h + \gamma_{pq} W_{x,pq,m}^h \right]. \quad (14)$$

Аналогічні вирази записуються для поля, що пройшло крізь структуру, в термінах власних значень χ_m і відповідних їм власних векторів $W_{\nu,pq,m}^{e(h)}$ ($\nu = x, y, z$) в області $z > h$.

Для підтвердження коректності отриманих за допомогою цього методу результатів ми також порівняли наші чисельні результати з експериментальними даними, отриманими для структури з мідної фольги товщиною $h = 10 \text{ мкм}$, періодично перфорованої хрестоподібними апертурами. Нормовані товщина, ширина шару, довжина апертури, а також період елементарної комірки $h/L = 0,012$, $w/L = 0,197$, $s/L = 0,617$ і $L = 0,81 \text{ мм}$ відповідно. Використовуючи ці геометричні параметри, ми обчислили залежності квадрата модуля коефіцієнта проходження гармоніки нульового порядку $|T_{00}|^2$ і фази коефіцієнта проходження гармоніки

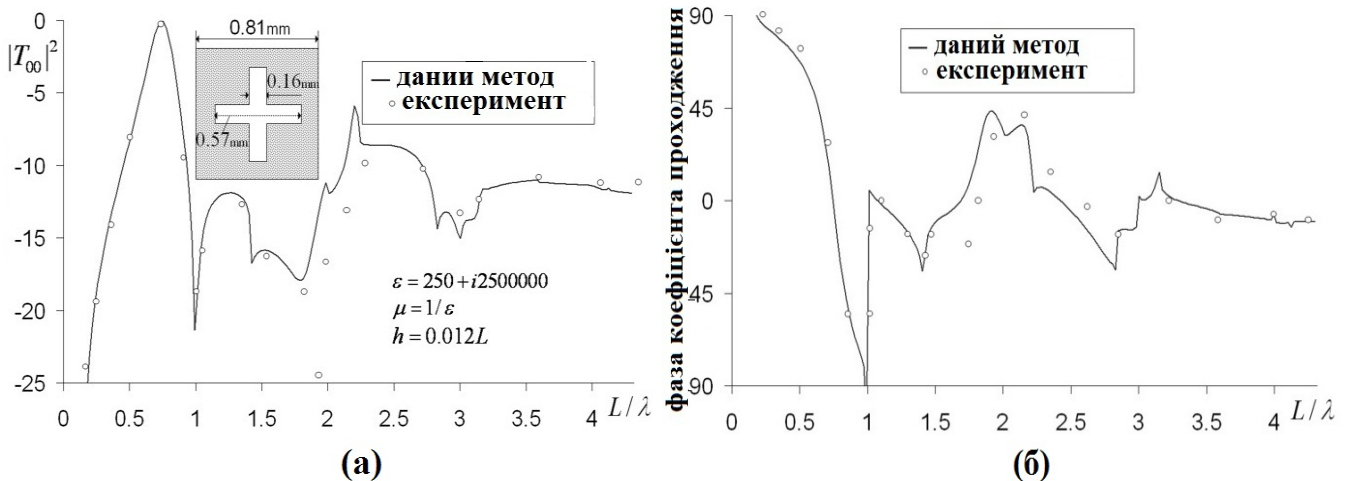


Рисунок 2 – Експериментальні (кола) і теоретичні (лінії) результати, отримані для залежностей квадрата модуля коефіцієнта проходження гармоніки нульового порядку $|T_{00}|^2$ (а) і фази коефіцієнта проходження гармоніки нульового порядку T_{00} (б) від нормованого періоду структури, розраховані для моделі РЕС-подібного магнітодіелектричного шару, періодично перфорованого хрестоподібними отворами. Періодична елементарна комірка і фактичні розміри апертури показані на вставці (рис. 2 (а))

нульового порядку T_{00} від нормованого періоду структури. Вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі направлений паралельно осі x . Одержані чисельні результати при $(2N+1)^2 = 121$ і експериментальні дані зображено на рис. 2. З рисунка випливає, що чисельні та експериментальні результати добре узгоджуються в широкому діапазоні довжин хвиль, аж до $L/\lambda = 4,32$. Очевидно, що використана для розрахунків perfectly electrically conductive (РЕС) шару модель, що описується параметрами $|\epsilon| \gg 1$ і $\epsilon\mu \approx 1$, є хорошим наближенням для структури з мідної фольги в суб-мм діапазоні довжин хвиль.

Розглянуто структурні резонанси на тривимірній двоперіодичній решітці з діелектричних паралелепіпедів (один паралелепіпед на елементарну комірку) за допомогою методу інтегральних функціоналів. Схематична модель розсіяння плоскої хвилі від двоперіодичної магнітодіелектричної структури з періодами L_x і L_y показана на рис. 1.

У розрахунках ми припускаємо, що даний двоперіодичний шар утворено діелектричними паралелепіпедами, розміщеними у вільному просторі. Така решітка є повністю діелектричною. Ми також припускаємо, що значення періоду уздовж осі y менше, ніж уздовж осі x ($L_y < L_x$), а товщина паралелепіпедів уздовж осі z істотно менше її періодів ($h \ll L_y, L_x$). В той же час діелектрична проникність паралелепіпеда вважається досить великою ($\epsilon_r = 10$) і такою, що структура не має втрат, тобто в мікрохвильовому діапазоні частот таку решітку можна розглядати, як виконану з тонких висушених дерев'яних або паперових пластин.

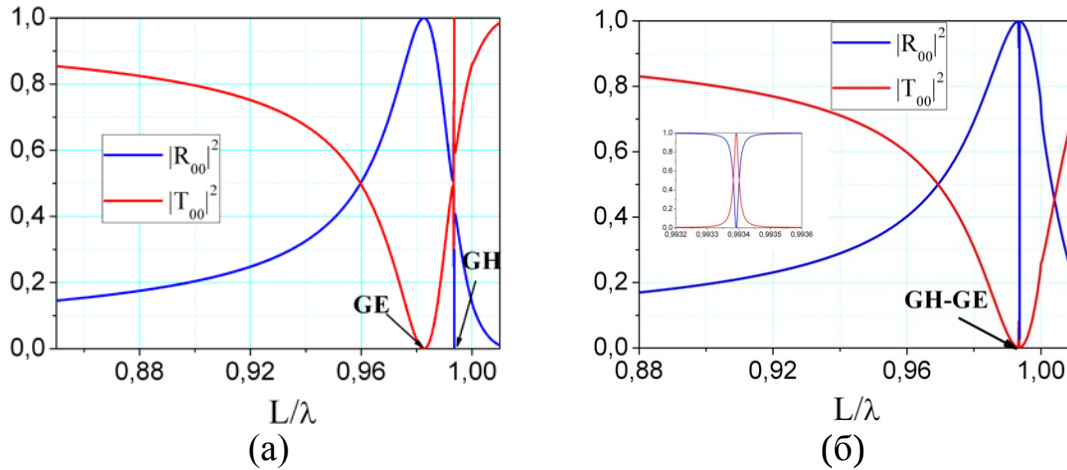


Рисунок 3 – Залежність квадрата модуля коефіцієнта проходження $|T_{00}|^2$ і коефіцієнта відбиття $|R_{00}|^2$ гармоніки нульового порядку при розсіянні нормально падаючої TE -поляризованої плоскої хвилі (вектор електричного поля паралельний осі y) на нескінченній двоперіодичній решітці з діелектричних паралелепіпедів, розташованих у вільному просторі від нормованого періоду решітки $\kappa = L_x/\lambda$, (а) Параметри решітки: $L_y = 0,86L_x$, $a_1 = 0,5L_x$, $b_1 = 0,59L_x$, $h = 0,07L_x$, $\alpha = 0^\circ$, $\varepsilon_r = 10$; (б) $L_y = 0,843L_x$, решта параметрів така ж як на рис. 3 (а)

На рис. 3 наведено залежності відносних потужностей проходження і відбиття гармоніки 0-го порядку від нормованого періоду решітки $\kappa = L_x/\lambda$ вздовж осі x у разі розсіяння TE -поляризованої плоскої хвилі, що нормально падає на нескінченну періодичну решітку. Ці величини пораховані в частотному діапазоні $L_x/\lambda < 1$. На більш високих нормованих частотах ($L_x/\lambda, L_y/\lambda \geq 1$) гармоніки ± 1 -го порядку будуть давати свій внесок в сумарну потужність розсіяння. Рис. 3 (а) демонструє два резонанси ґраткового типу з інтенсивними піками лівіше ± 1 -ї аномалії Релея. Перший резонанс широкий ($\kappa^{GE} = 0,9826$), а другий ($\kappa^{GH} = 0,993$) дуже вузький і, отже, має набагато більшу добротність. Такі типи резонансів було раніше проаналізовано для одновимірних решіток з тонких діелектричних і металевих смуг, а також з тонких діелектричних і металевих дрітків з круглим поперечним перерізом. Якщо решітка є двовимірною з періодами уздовж x - і y - осей, ґраткові резонанси E і H - типу, тобто GE (grating electric) і GH (grating magnetic), співіснують разом. Довжина хвилі ґраткового резонансу обумовлена, головним чином, періодом решітки, тому можна "пересунути" GE або GH резонанси, змінюючи періоди структури в y - або x - напрямках відповідно. На рис. 3 (б) ми досягли співпадіння таких резонансів при $\kappa^{GH} = \kappa^{GE} = 0,993398$, що відповідає $L_y = 0,843L_x$. На вставці рис. 3 (б) цей резонанс показано у збільшеному масштабі, до того ж, він демонструє явище повного проходження. Цей ефект називається електромагнітно-індукованою прозорістю (ЕІП).

У розділі 3 розглядається багатомодове розв'язання задачі розсіяння плоских електромагнітних хвиль на багатошарових двоперіодичних магнітодіелектричних структурах. У багатьох задачах, пов'язаних з дифракцією хвиль на періодичних структурах з тривимірною геометрією періоду, періодичні структури моделюються

пошарово. В цьому випадку функція матеріальних параметрів структури є двоперіодичною і кусочно-постійною у напрямі осі z . У такому поданні розв'язання задачі зводиться до розв'язання крайової задачі для системи лінійних диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами для кожного шару з подальшим спряженням полів на границях шарів.

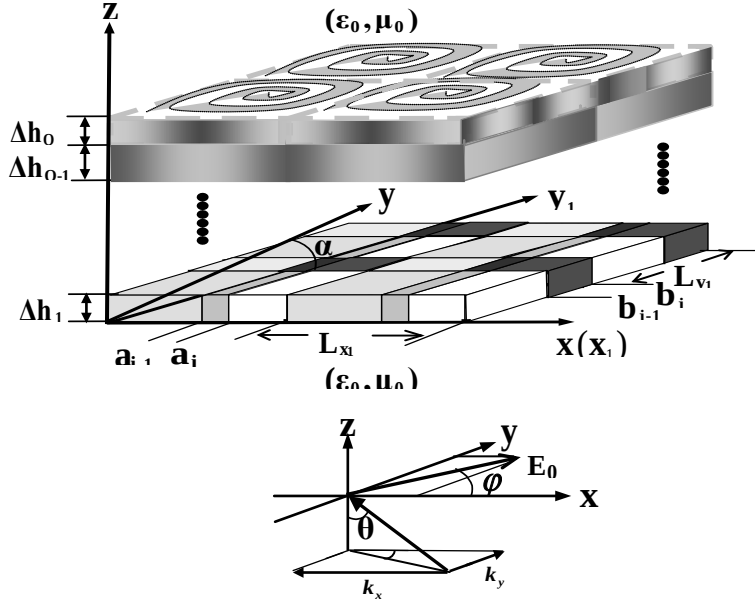


Рисунок 4 – Схематичне зображення Q- шарової двоперіодичної магнітодіелектричної структури, на яку падає плоска ЕМ хвиля. Зображено чотири елементарні комірки нескінченної періодичної структури

Після виконання умов спряження полів на границях шарів розбиття тривимірного періоду структури ми отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з квадратною блочно-діагональною матрицею. Для знаходження коефіцієнтів відбиття і проходження при розсіянні ЕМ хвилі від періодичної структури не потрібно знання усіх значень c_m^j , достатньо знайти значення невідомих $c_1^{j\pm}$ для першого і останнього $c_{M+1}^{j\pm}$ шарів. Для цього ми можемо скористатися так званим методом T матриць.

Форма періодичної комірки плоскошаруватої структури (рис. 4) визначає вигляд СЛАР для знаходження c_m^j .

$$\begin{pmatrix} c_1^+ \\ c_1^- \end{pmatrix} = T_1 \dots T_m \dots T_{M+1} \begin{pmatrix} c_{M+1}^+ \\ c_{M+1}^- \end{pmatrix}, \quad (15)$$

де T_m – матриця передачі m -го шару. В дисертації продемонстровано прості і більш ефективні рекурсивні схеми для знаходження $c_1^\pm$ або $c_{M+1}^\pm$. Через $c_{M+1}^\pm$ визначається коефіцієнт проходження при розсіянні плоскої ЕМ хвилі від структури, а через $c_1^\pm$ визначається коефіцієнт відбиття.

На рис. 5 зображено коефіцієнт відбиття $|R_{00}|$ при нормальному падінні плоскої хвилі на тришарову металеву пластину залежно від нормованої постійної решітки L/λ . Квадратні елементарні комірки тришарової РЕС-подібної пластини перфоровані круглими отворами, центри отворів кожного з шарів розташовані на одній лінії. Очевидно, що існують два резонанси, в яких проходження значно посилюється. Верхня резонансна частота відповідає частоті ґраткового резонансу, близького до аномалії Релея, як показано на рис. 5, і залежить від розміру отворів на першій і третій РЕС-подібних пластинах, які виступають в ролі вхідних і вихідних

портів каналу передачі. Обидва резонанси лежать на частотній осі в області позамежній для хвильоводів з радіусами $r_1 = r_3 = 0,25L$ і $r_2 = 0,44L$. Нижня резонансна частота сильно залежить від розміру отворів в середній пластині. По мірі збільшення товщини середньої пластини резонанс зсувається в довгохвильову частину спектру, і ефективність передачі в тришаровій структурі зменшується. Внаслідок цього, резонанс на цій частоті можна визначити як резонанс на замкненій моді. Такі структури можна, наприклад, застосовувати в побудові дихроїчних фільтрів.

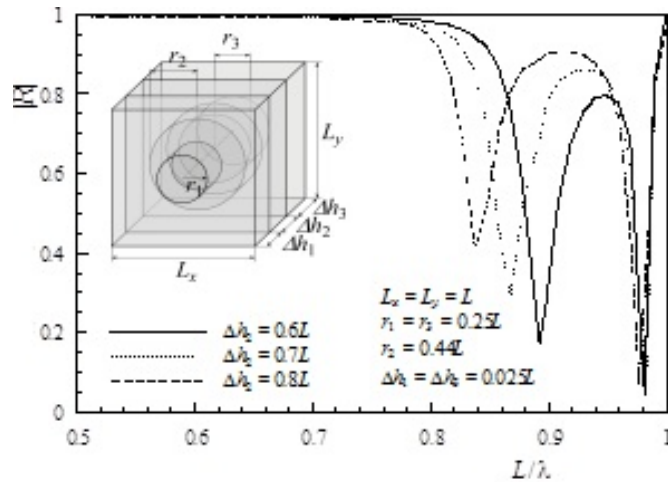


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта відбиття $|R_{00}|$ від нормованого періоду структури $L_x = L_y = L$, розрахована для нормального падіння плоскої хвилі на тришарову РЕС-подібну пластину, квадратні елементарні комірки якої перфоровані круглими отворами, для трьох різних товщин середнього шару Δh_2

Можливість механічної перебудови елементарної комірки періодичної структури і, тим самим, керування її резонансними властивостями грає величезну роль в створенні механічно перестроюваних фільтрів, сенсорів і нанофотонних приладів. З цією метою в дисертації розглянуто двошарові схрещені решітки, утворені одновимірними решітками з РЕС паралельних брусів прямокутного перерізу. На рис. 6 продемонстровано залежності коефіцієнтів відбиття і проходження при нормальному падінні плоскої хвилі з вектором електричного поля, паралельним осі x від нормованого періоду структури L . При кутах схрещування решітки $\beta = 30^\circ$, 45° і 60° з'являються y -компоненти розсіяного поля (рис. 6 (а), (б) і (с)). З іншого боку, завдяки симетричному характеру решітки, відбите поле і те, що пройшло крізь решітку з $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$, мають таку ж поляризацію як і падаюче поле. Результати для $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ зображено на рис. 6(г), вони добре узгоджуються з даними, наведеними для РЕС-подібних паралельних брусів і екранів з квадратними отворами.

Для підтвердження теоретично передбачених резонансів було проведено експериментальні дослідження. В експериментах використовувалася структура, що складається з двох однакових пластин, виконаних з високочастотного ламінату

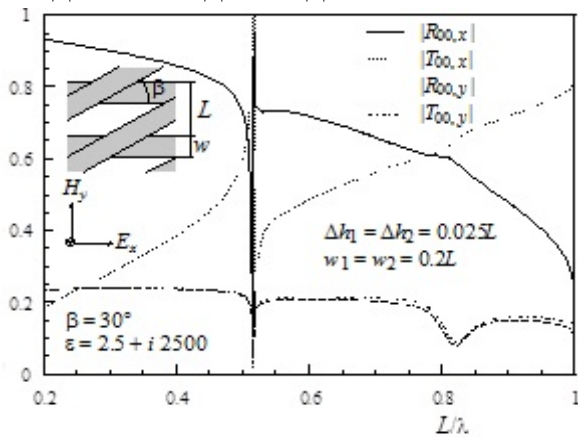
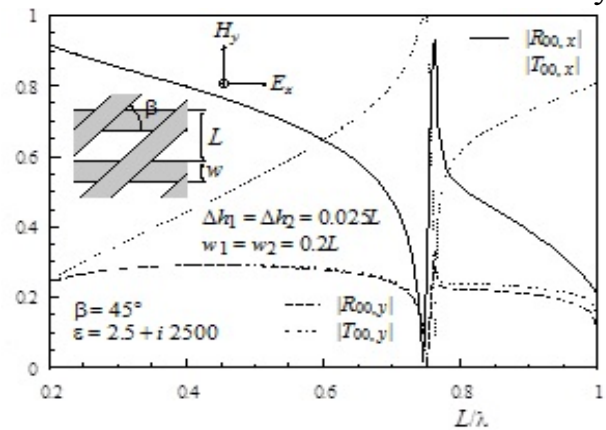
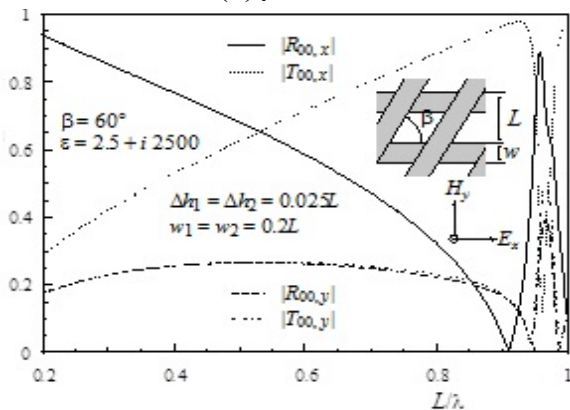
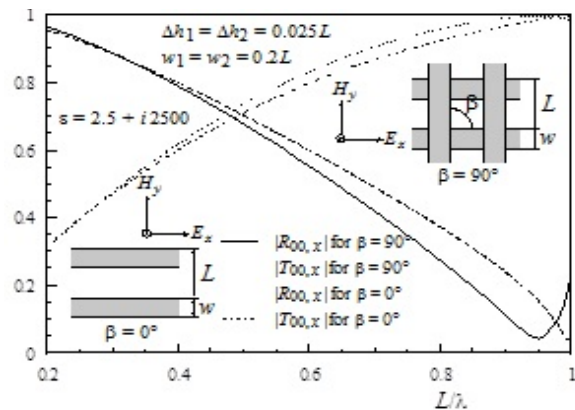
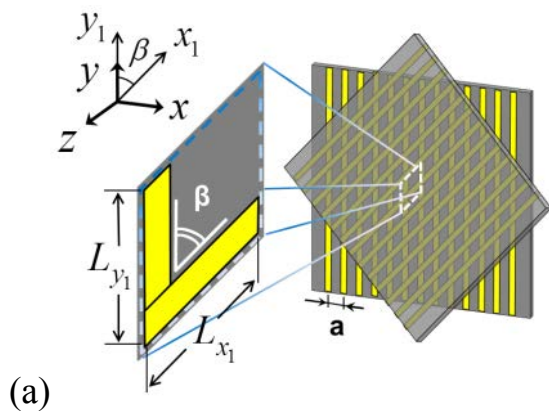
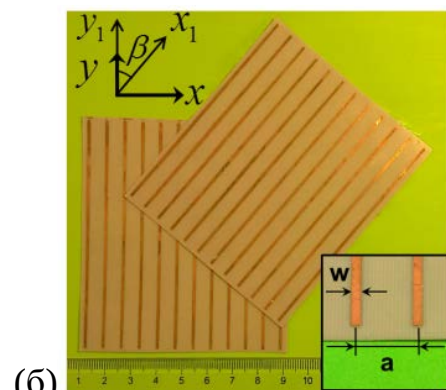
(a) $\beta = 30^\circ$ (б) $\beta = 45^\circ$ (v) $\beta = 60^\circ$ (г) $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 90^\circ$

Рисунок 6 – Залежності коефіцієнтів відбиття і проходження для двохшарової схрещеної решітки при нормальному падінні плоскої хвилі з вектором електричного поля, паралельним осі x , на структуру від нормованого періоду структури при різних кутах схрещування



(a)



(б)

Рисунок 7 – Планарний метаматеріал на основі схрещених решіток. Пунктиром позначена елементарна комірка структури (а). Фотографії двох металодіелектричних пластин у вигляді набору мідних стрічок, розміщених на діелектричній підкладці, що утворюють планарний метаматеріал. Верхня пластина є рухливою і освітлюється падаючим полем (б)

Тасоніс TLC-30-0200-CH/CH ($\epsilon'=3,0$, $\text{tg}\delta=0,0024$). Загальні розміри пластин $90\times 90\text{мм}^2$. Пластина складається з діелектричної підкладки завтовшки 0,5 мм з періодично нанесеними металевими стрічками, які виготовлені з міді завтовшки $\Delta h_i=18\text{ нм}$. Таким чином, кожна решітка складається з 12-ти стрічок шириною $w=1\text{ мм}$ і довжиною 90 мм. Період a між стрічками дорівнює 7 мм. Пластини розташовані одна під одною так, що стрічки перетинаються під певним кутом при безпосередньому контакті (рис. 7). Ці дві пластини фіксувалися пластинами з пінопласту ($\epsilon'=1,15$, $\text{tg}\delta=0,0024$) для кращого контакту металевих стрічок, які розташовувалися по обидві сторони планарного метаматеріалу і мали незначний вплив на частотну характеристику коефіцієнта проходження.

Криві, зображені на рис. 8(а), відповідають виміряним і теоретично розрахованим спектрам проходження плоскої хвилі від метаповерхні зі схрещених металевих стрічкових решіток. Теоретичні розрахунки здійснювалися методом інтегральних функціоналів при куті схрещування 45° . На рис. 8 (а) спостерігається дуже вузький резонансний відгук проходження поблизу частоти 27 ГГц, при цьому пік проходження падає приблизно до -20 дБ. Виміряний резонансний пік добре співпадає з теоретичними розрахунками. Добротність резонансу проходження складає 40 (ми визначаємо добротність Q як відношення резонансної частоти і повної ширини резонансу на половині мінімуму коефіцієнта передачі). За нашими оцінками, Q резонансних піків, що спостерігаються в метаматеріалі, знаходяться в діапазоні 40-60 для усіх розглянутих кутів схрещування стрічок. Такі Q резонансів набагато більші за значенням ніж ті, які характерні для традиційних плоских метаматеріалів на основі незв'язаних кільцевих split-ring-resonators.

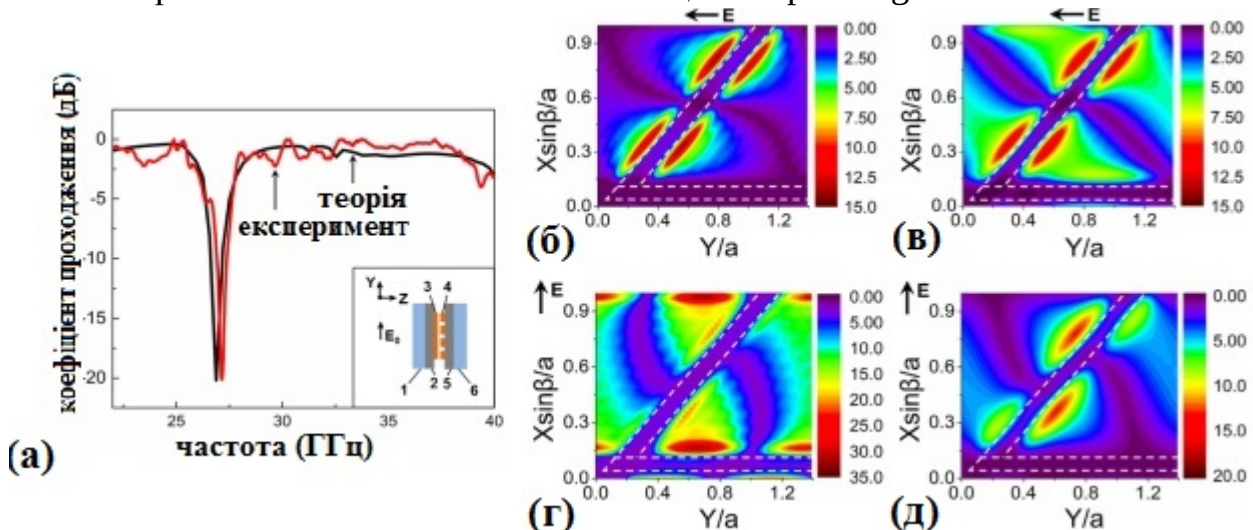


Рисунок 8 – Спектри проходження для метаповерхні на основі схрещених металевих стрічкових решіток ($\beta = 45^\circ$) у разі нормального падіння плоскої хвилі з вектором електричного поля, паралельним осі y (червона лінія-експеримент, чорна лінія-теорія) (а); компоненти розподілу електричного поля по елементарній комірці на відстані $0,001a$ від тіньової сторони метаповерхні, порашовані на резонансній частоті (б) - (д). Білими пунктирними лініями обкреслено металеві стрічки

На вставці схематично зображено структуру: дві діелектричні пластини (2, 5) з металевими стрічковими решітками (3, 4), які утворюють планарний метаматеріал, пластини пінопласту (1, 6).

Рис. 8(б) і 8(в) показують розподіл ближнього поля в резонансі (рис. 8(а)) для $|E_y|$ -компоненти і $|E_x|$ -компоненти поля, що пройшло крізь структуру на відстані 0,001а від тіньової сторони метаповерхні у разі нормального падіння плоскої хвилі з вектором електричного поля, паралельним осі у. На резонансній частоті таке електричне поле індукує дипольні коливання в основному уздовж стрічок рухливої решітки для обох компонент поля. З рисунка випливає, що поле практично не збуджується уздовж стрічок, паралельних напрямку поляризації падаючої хвилі, в той же час, падаюча хвиля з вектором електричного поля, паралельним осі x, індукує поле, що розподіляється по периметру періодичної комірки (рис. 8 (г) і 8 (д)), подібно до резонансних режимів шепочучої галереї або полів в кільцеподібних резонаторах. В цьому випадку добротність резонансу залежить від довжини взаємодії, і увесь периметр комірки є резонуючою частиною. Це приводить до більшої добротності резонансу і до більш інтенсивного поля, ніж на рис. 8 (б) і 8 (в), де тільки дві протилежні сторони ромба резонують. Слід зазначити, що для досліджуваної структури з кутами схрещування, більшими ніж 75 градусів, ґраткові резонанси зникають, тому криві для великих кутів на графіках не показані.

Резонансна частота монотонно зростає при збільшенні кута схрещування стрічок решіток (див. рис. 9). Таким чином, цей метаматеріал демонструє високу міру механічної перестроюваності резонансного відгуку в широкому діапазоні частот. Ця особливість може бути корисна при проектуванні частотно-селективних поверхонь з механічним перестроєнням резонансної частоти в надширокому діапазоні частот.

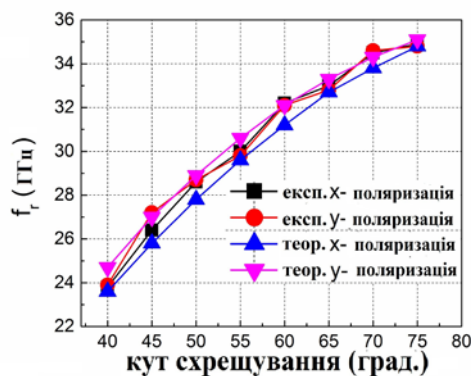


Рисунок 9 – Теоретична і експериментальна частота резонансу залежно від кута схрещування стрічкових решіток метаповерхні β

Відсутність природних магнітних матеріалів, що ефективно обертають площину поляризації в діапазоні терагерцевих частот, може бути успішно компенсована створенням метаматеріалів з бажаними властивостями. Наприклад, кругові поляризатори і датчики можуть бути реалізовані з використанням кіральних анізотропних структур, що мають обмеження на товщину і конфігурацію періодичної комірки.

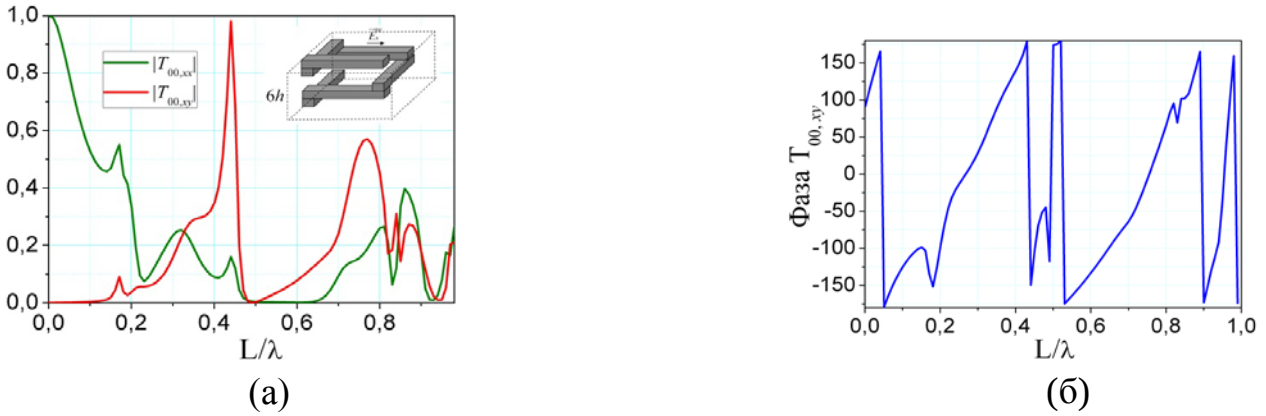


Рисунок 10 – Залежності величин коефіцієнтів проходження $|T_{00,xx}|$ (зелена лінія) і $|T_{00,xy}|$ (червона лінія) (а) і фази коефіцієнта проходження $T_{00,xy}$ (б) від нормованого періоду при розсіянні лінійно поляризованої плоскої хвилі, що нормально падає на періодичну структуру, яка складається з півторакрокових квадратних металевих спіралей, які, у свою чергу, складаються з металевих стрижнів з квадратним поперечним перерізом, вбудованих в діелектричний шар. $L_o = L_x = L$, $h = L/7$, $\varepsilon_r^{bar} = 2,5 + 2500i$, $\mu_r^{bar} = 1/\varepsilon_r^{bar}$, $\varepsilon_r^{layer} = 1,16 + 0,0024i$

Використання планарної технології може бути застосовано для синтезу кіральних багатошарових 3D-метаматеріалів з метою їх інтеграції в ультратонкі пристрої, які здатні перетворювати поляризацію і можуть представляти великий інтерес для нанофотоніки діапазону терагерцевих частот.

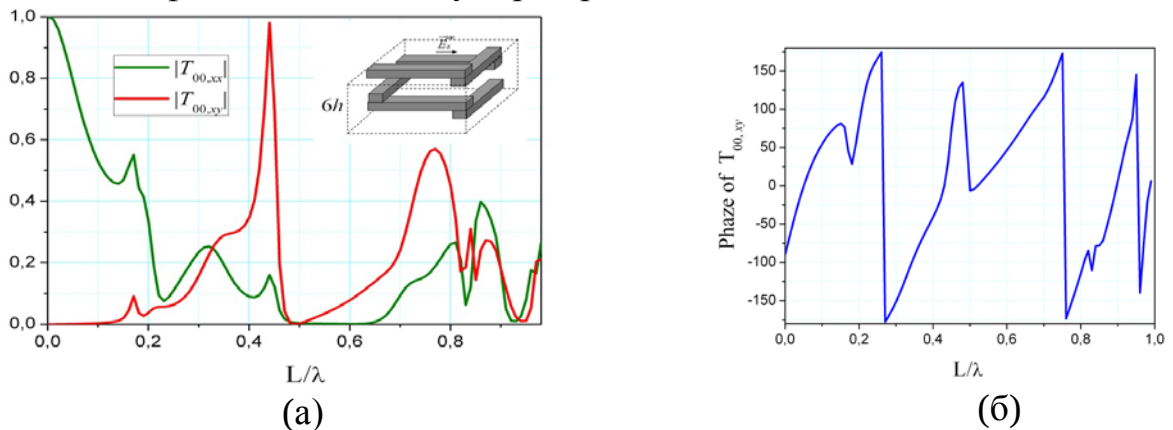


Рисунок 11 – Ті ж самі залежності, що і на рис. 10, але для випадку дзеркально симетричних півторакрокових спіралей, вбудованих в діелектричний шар

На рис. 10 (а) показані залежності співполяризованої компоненти, тобто співпадаючої по напрямку з вектором електричного поля падаючої хвилі і крос-поляризованої компоненти, тобто перпендикулярної цьому напрямку, від нормованої частоти для поля, яке пройшло крізь періодичну структуру металевих квадратних спіралей, вбудованих в діелектричний шар при розсіянні нормально падаючої лінійно поляризованої плоскої ЕМ хвилі. Решітка складається з півторакрокових спіралей, вбудованих в діелектричний шар, як показано на вставці на рис. 10 (а). В цьому випадку товщина діелектричного шару дорівнює шести висотам стрижня $6h$.

Залежність для коефіцієнта проходження кросс-поляризованої компоненти демонструє резонанс з максимальним значенням приблизно 0,98, коли нормований період дорівнює 0,44, а коефіцієнт для співполяризованої компоненти досягає 0,16. Таким чином, кут повороту вектора електричного поля для такої структури дорівнює 81° на резонансній частоті, тобто спостерігається майже повне перетворення поляризації. Слід також підкреслити, що, як і у випадку для решіток з однокрокових металевих квадратних спіралей, частотні залежності для дзеркально симетричних решіток, що складаються з півторакрокових спіралей, повністю співпадають (рис. 10 (а) і рис. 11 (а)), а різниця між фазами на резонансній частоті $L/\lambda=0,44$ складає близько 180° (рис. 10 (б) і рис. 11 (б)).

Композитні матеріали, армовані вуглецевими волокнами CFRP (carbon - fiber reinforced plastic), все ширше використовуються при виробництві різних виробів. В області аерокосмічної техніки при їх використанні підвищується міцність і зменшується вага виробів на 20-50% в порівнянні з виробами з традиційних матеріалів. Це дозволяє поліпшити аеродинамічні характеристики і понизити вагу літальних апаратів, і, як наслідок, істотно заощадити паливе, понизити шкідливі викиди в атмосферу і зменшити експлуатаційні витрати. Крім того, вуглепластики мають високу стійкість до корозії.

CFRP є квазіперіодичною багатошаровою структурою у вигляді тонких (завтовшки приблизно 8 мкм) щільно укладених шарів вуглецевих волокон з відстанню між сусідніми шарами приблизно 10 мкм, занурених в епоксидну матрицю. Для побудови моделі розсіяння плоских ЕМ хвиль на CFRP в частотній області в розділі 3 використовується метод інтегральних функціоналів із застосуванням рекурсивних схем для багатошарових структур.

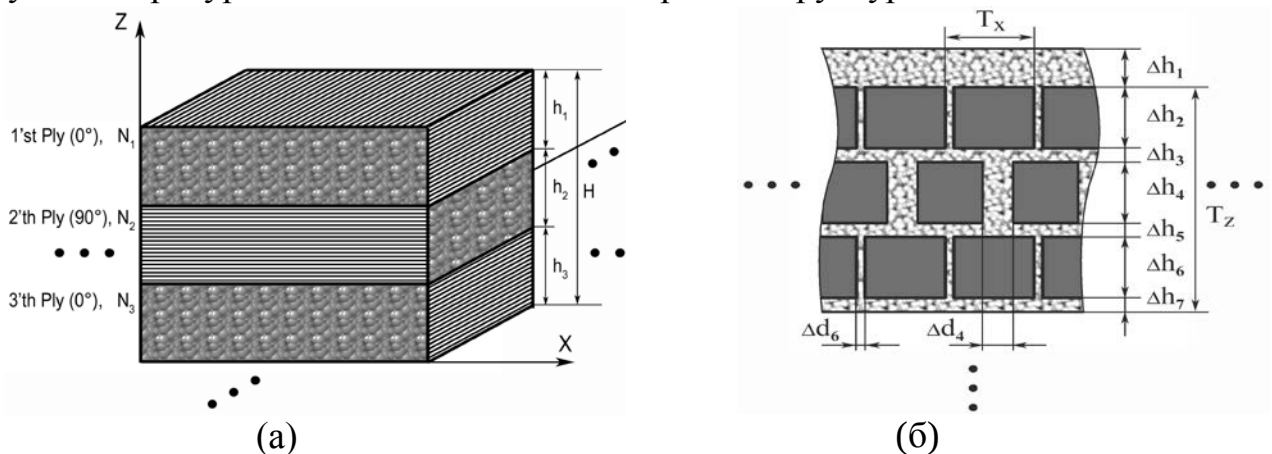


Рисунок 12 – Геометрія CFRP зразка (а), поперечний переріз елементарної багатошарової комірки CFRP (б)

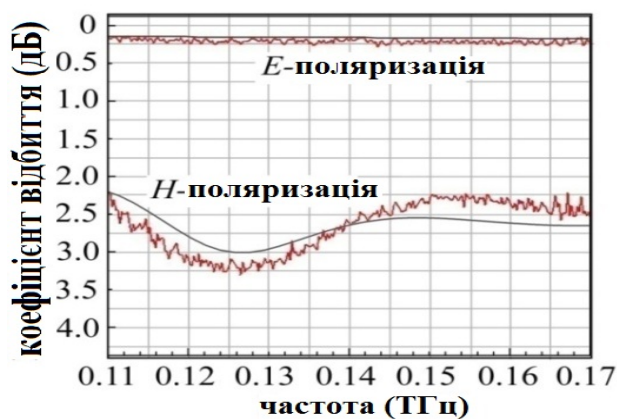
На рис. 12 (а) представлено схематичне зображення моделі CFRP зразка, використовуваної при розрахунках. Вона складається з 3-х шарів (N_1 , N_2 , N_3). Кожен шар включає 48 суб-шарів, що містять періодично щільно розташовані в епоксидній смолі вуглецеві волокна. Напрямок волокон шару N_2 складає кут 90° з напрямками волокон шарів N_1 і N_3 . На рис.12(б) зображено поперечний переріз елементарної багатошарової комірки з періодами T_x і T_z вздовж осей x і z . Вуглецеві волокна моделі мають прямокутні поперечні перерізи, позначені темними

прямокутниками на рисунку, хоча реальні волокна мають круглу форму перерізу. Таке допущення фізично виправдане, оскільки форма перерізу не грає істотної ролі, коли поперечний розмір волокна дуже малий в порівнянні з довжиною хвилі (саме цей випадок має місце), а прямокутна форма волокон дозволяє спростити розрахунки.

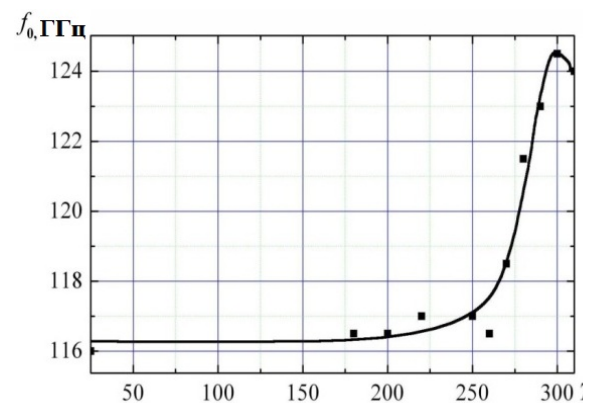
Представлене дослідження було сфокусоване на характеристиці термічної деградації CFRP, яка виникає в результаті теплового впливу на різні частини літального апарату, особливо на частини фюзеляжу поблизу сопел реактивного двигуна. Термічна деградація також може бути викликана локальним перегріванням або ударом блискавки. Це може призвести до втрати механічної міцності матеріалу через хімічну зміну його складу, особливо його епоксидної складової.

Для експерименту використовувалися два квазіоптичні рефлектометри: рефлектометр для діапазону частот 0,11...0,17 ТГц на основі векторного аналізатора кіл R4402R і рефлектометр для діапазону частот 0,17...0,22 ТГц на основі скалярного аналізатора кіл P2-139.

На рис.13 (а) наведені теоретичні (чорна лінія) і експериментальні (червона лінія) залежності коефіцієнта відбиття падаючої плоскої хвилі на зразок CFRP від частоти для Е-поляризації, коли площина поляризації опромінюючої хвилі паралельна напрямку вуглецевих волокон верхнього шару зразка і Н-поляризації, коли площина поляризації опромінюючої хвилі орієнтована ортогонально напрямку вуглецевих волокон верхнього шару зразка. Зміна властивостей епоксидної складової при нагріві призводить до зміщення інтерференційного мінімуму амплітудно-частотної характеристики відбитого сигналу, спостережуваного при опроміненні зразка Н-поляризованою хвилею (рис.13(б)).



(а)



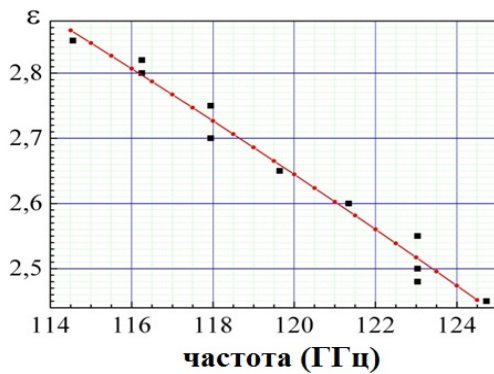
(б)

Рисунок 13 – Залежність коефіцієнта відбиття від частоти при нормальному падінні плоскої хвилі на зразок CFRP при кімнатній температурі (а), залежність частоти інтерференційного мінімуму від температури нагріву зразка CFRP (б)

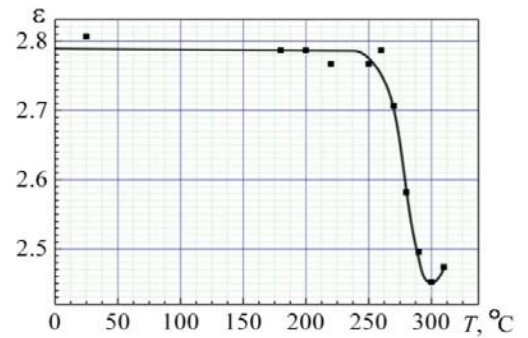
Експеримент показує, що нагрів CFRP вище 260°C призводить до зміщення частоти інтерференційного мінімуму коефіцієнта відбиття у бік високих частот. При температурах від 260°C до 290°C зміна частоти інтерференційного мінімуму обумовлюється впливом зміни діелектричної проникності епоксидної складової. На

рис. 13 разом з експериментальними наведено і теоретичні результати, які було отримано на основі розв'язання задачі розсіяння на вище описаній структурі CFRP методом інтегральних функціоналів. Цей метод і в подальшому використовувався для аналізу впливу нагріву на властивості епоксидного наповнювача.

На рис.14 (а) представлені розрахована діелектрична проникність епоксидної складової CFRP при заданих значеннях частоти інтерференційного мінімуму (квадрати чорного кольору) і її усереднювання поліномом другого ступеня (червоний колір).



(а)



(б)

Рисунок 14 – Частотна залежність розрахованої діелектричної проникності наповнювача CFRP (а), залежність діелектричної проникності наповнювача CFRP зразка від температури його нагріву (б)

Виходячи з представлених на рис.14 (а) результатів моделювання, а також експериментальної залежності на рис. 13 (б), побудована залежність діелектричної проникності епоксидної складової CFRP зразка від температури його нагріву (рис. 14 (б)). Таким чином, фактично розв'язано зворотну задачу. Як можна бачити, діелектрична проникність зменшується на 12%, якщо температура нагріву перевищує 250 °C.

У розділі 4 розглядається багатомодове розв'язання задачі розсіяння плоскої хвилі на двоперіодичному гіромагнітному шарі методом інтегральних функціоналів. У тому випадку, коли довжина хвилі падаючого поля порівнянна з періодом опромінюваного шару, результуючі матричні рівняння мають великі порядки і можуть бути розв'язані тільки чисельно. Геометрія задачі проілюстрована на рис. 15. *ТМ* - або *ТЕ*-поляризована плоска хвиля, що має одиничну амплітуду, падає з напівпростору $z < 0$ на двоперіодичний нескінченний шар, розташований у вільному просторі, під довільним кутом θ відносно осі z . Для *ТМ*-поляризованої хвилі ми вважаємо, що α — це кут між віссю x і вектором магнітного поля $\vec{H}_0$, що лежить в площині шару. Елементарна періодична комірка з періодами L_x і L_y уздовж осі x і y і завтовшки h складається з сегментів-паралелепіпедів, що характеризуються комплексною відносною діелектричною проникністю і тензорною магнітною проникністю. Тензорна магнітна проникність і діелектрична проникність j -го блоку в напрямі x і f -го блоку в напрямі y позначені як $\overline{\overline{\epsilon}}^{jf}$ і $\overline{\overline{\mu}}^{jf}$ відповідно.

$$\overline{\overline{\mu}}^{jf} = \begin{bmatrix} \mu^{jf} & -i\mu_g^{jf} & 0 \\ i\mu_g^{jf} & \mu^{jf} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z^{jf} \end{bmatrix}, \quad \overline{\overline{\varepsilon}}^{jf} = \begin{bmatrix} \varepsilon^{jf} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^{jf} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^{jf} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

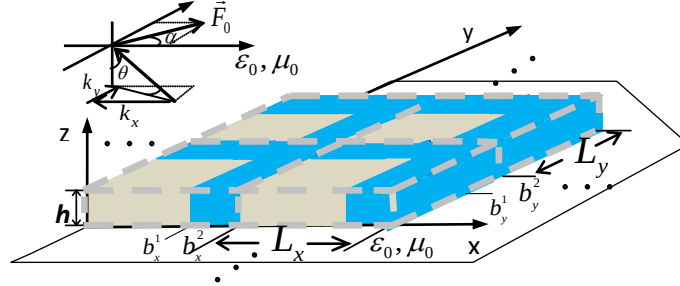


Рисунок 15 – Двоперіодичний гіротропний шар товщини h , на який падає TE -або TM -поляризована плоска хвиля. Показані чотири елементарні комірки нескінченного шару. Різні кольори заливки означають різні значення діелектричної і магнітної проникностей різних сегментів елементарної комірки

Еквівалентні електричний $\mathbf{J}^{e,jf}(x,y,z)$ і магнітний $\mathbf{J}^{h,jf}(x,y,z)$ струми поляризації на кожному сегменті елементарної комірки пов'язані з електричним і магнітним полями за допомогою таких виразів:

$$\overline{\mathbf{J}}^{m,jf}(x,y,z) = \begin{cases} J_x^{m,jf} = (\mu_{jf} - 1)H_x^{jf} - i\mu_{g,jf}H_y^{jf} \neq 0, \\ J_y^{m,jf} = i\mu_{g,jf}H_x^{jf} + (\mu_{jf} - 1)H_y^{jf} \neq 0, \\ J_z^{m,jf} = (\mu_{z,jf} - 1)H_z^{jf} \neq 0, \\ \text{якщо } b_x^{j-1} \leq x \leq b_x^j, b_y^{f-1} \leq y \leq b_y^f, \\ 0, \text{ на будь-якому іншому сегменті комірки,} \end{cases} \quad (17)$$

$$\overline{\mathbf{J}}^{e,jf}(x,y,z) = \begin{cases} (\varepsilon_{jf} - 1)E^{jf} \neq 0 \\ \text{якщо } b_x^{j-1} \leq x \leq b_x^j, b_y^{f-1} \leq y \leq b_y^f \\ 0, \text{ на будь-якому іншому сегменті комірки.} \end{cases} \quad (18)$$

Задача розв'язується, дотримуючись алгоритму, представленому в розділі 2.

Останнім часом стали інтенсивно досліджувати поляризатори Брюстера на основі анізотропних середовищ. Можливість зміни параметрів тензорів магнітної і діелектричної проникностей в широких межах, регулюючи силу намагнічуючого поля, дозволяє контролювати характеристики розсіяння структур, виготовлених на основі таких матеріалів.

В роботі представлено результати наших обчислень, спрямовані на поліпшення поляризаційно-селективних характеристик гіромагнітного шару з використанням періодичної перфорації квадратними отворами. Рис. 16 демонструє залежності фракцій потужності для E_x^{tr} (а) і E_y^{tr} (б) компонент TE -поляризованої і H_x^{tr} компоненти (с) TM -поляризованої плоских хвиль, що пройшли крізь шар,

перфорований квадратними отворами від кута падіння хвилі θ і нормованої товщини шару $\tau = k_0 h$. Оскільки величина H_y^r компоненти TM -поляризованої плоскої хвилі співпадає з величиною E_y^r компоненти TE -поляризованої плоскої хвилі, вона не зображена на рисунку. Коефіцієнт заповнення періодичної елементарної комірки структури визначався як $S = 1 - b_x^1/L_x \times b_y^1/L_y$ (квадратний отвір перфорації сірого кольору на рис. 16) і дорівнював 0,8464.

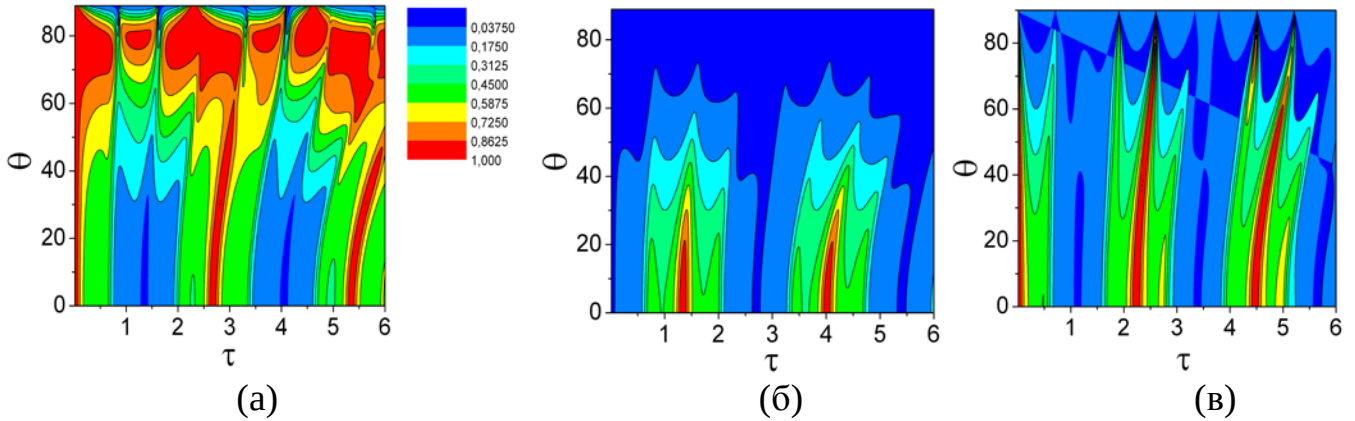


Рисунок 16 – Величини фракцій потужностей E_x^r (а) і E_y^r (б) компонент у випадку падіння TE -поляризованої хвилі і H_x^r компоненти (в) у випадку падіння TM -поляризованої плоскої хвилі на перфорований шар як функція кута падіння хвилі θ і товщини шару τ . $S=0,8464$, $\varepsilon_r=1,4$, $\mu_r=\mu_z=0,9998$, $\mu_g=10$, $\alpha=0^\circ$ (величина H_y^r компоненти така ж як на рис. 16 (б))

Ізолінії на рис. 16 дозволяють визначити товщину шару для кутів повного проходження плоских хвиль обох поляризацій. Проте для реалізації поляризаційно-селективних функцій шару повинні задовольнятися такі умови: відсутність у-компонент, що виникають в результаті обертання Фарадея, коли хвиля проходить крізь гіротропне середовище, і значне послаблення E_x^r або H_x^r компонент для поляризаторів, що пропускають TM - або TE -компоненти поля відповідно. Таким чином, можна помітити, що пропускна здатність шару залежить від його перфорації, часто істотно. На рис. 16 можна вибрати товщину шару, де кути розсіювання хвилі відповідають поляризаційно-селективним умовам, згаданим вище.

На рис. 17 зображено залежності фракцій потужностей x - і y - компонент плоскої хвилі, що пройшла крізь гіромагнітний перфорований шар (а) і суцільний шар (б) як функції кута падіння для шару з такими ж параметрами тензора магнітної проникності, що і на рисунку 16 при $\tau=5,05$. Кут падіння $\theta=76,5^\circ$ забезпечує реалізацію поляризатора Брюстера, що пропускає TE -поляризовані компоненти поля, через максимальну величину фракції потужності компоненти E_x^r , малу величину потужності фракції компоненти H_x^r і незначні величини потужностей H_y^r і E_y^r компонент. Останнє припускає, що кут обертання площини поляризації приблизно дорівнює $2\pi n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) при проходженні TE -поляризованої плоскої хвилі крізь шар. Можна використати такий же підхід для моделювання поляризатора

Брюстера, що пропускає тільки *ТМ*-поляризовану компоненту.

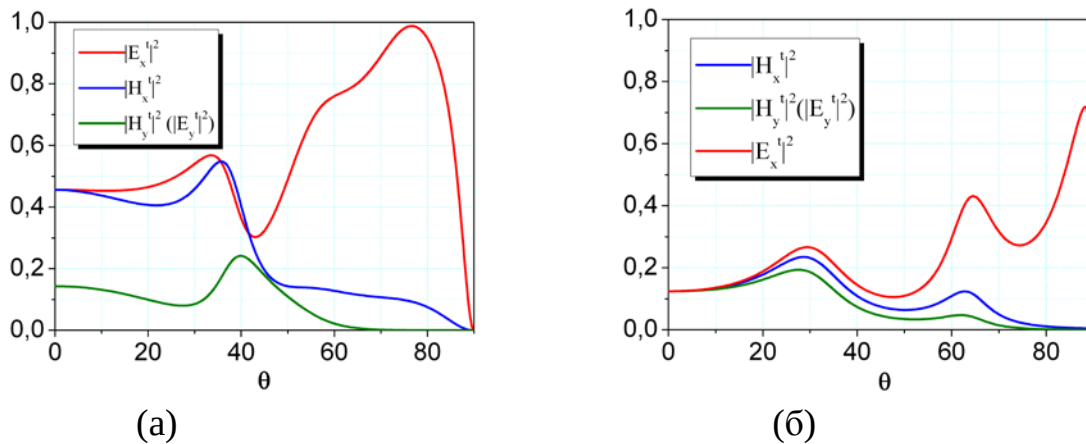


Рисунок 17 – Величини фракцій потужностей E_x^{tr} і E_y^{tr} -компонент (у випадку падіння *TE*-поляризованої хвилі) і H_x^{tr} компоненти (у випадку падіння *ТМ*-поляризованої хвилі), що пройшли крізь перфорований шар з коефіцієнтом заповнення $S=0,8464$ (а) і те ж саме для суцільного шару (б) як функції кута падіння хвилі. $\tau=5,05$, $\varepsilon_r=1,4$, $\mu_r=\mu_z=0.9998$, $\mu_g=10$, $\alpha=0^\circ$

Магнітооптичні ефекти (МО), такі як ефекти Фарадея, Керра в його різних конфігураціях, використовуються в різних магніто-оптичних пристроях. Хоча природні МО явища досить слабкі, особливо в оптичному діапазоні, існує ряд можливостей їх посилення, не пов'язаних зі збільшенням підмагнічування. Одна з них це - використання резонансних взаємодій різної природи.

Моди, що властиві періодичним структурам, на яких здійснюються так звані граткові резонанси, існуючі в періодичних структурах суб-хвильових розсіювачів як специфічних періодично структурованих відкритих резонаторів, також можуть мати значний вплив на МО-ефекти в різних періодичних розсіювачах з гіротропних матеріалів.

На рис. 18 (а) показана залежність величини кополяризованої E_x - компоненти поля, що пройшла крізь РЕС-подібний шар, перфорований квадратними апертурами, заповненими залізо-ітрієвим гранатом (ЗІГ), від нормованого періоду (суцільна лінія) і така ж залежність для суцільного ЗІГ шару (пунктирна лінія). Рисунок 18 (а) демонструє високودобротний резонанс на довжині хвилі трохи більшій, ніж довжина хвилі ± 1 -ої аномалії Рэлея ($\lambda = 7$ мм, $L/\lambda = 1$). На рис. 18 (б) зображено такі ж залежності, як на рис. 18 (а), тільки для кросполяризованої E_y - компоненти. Як ко-

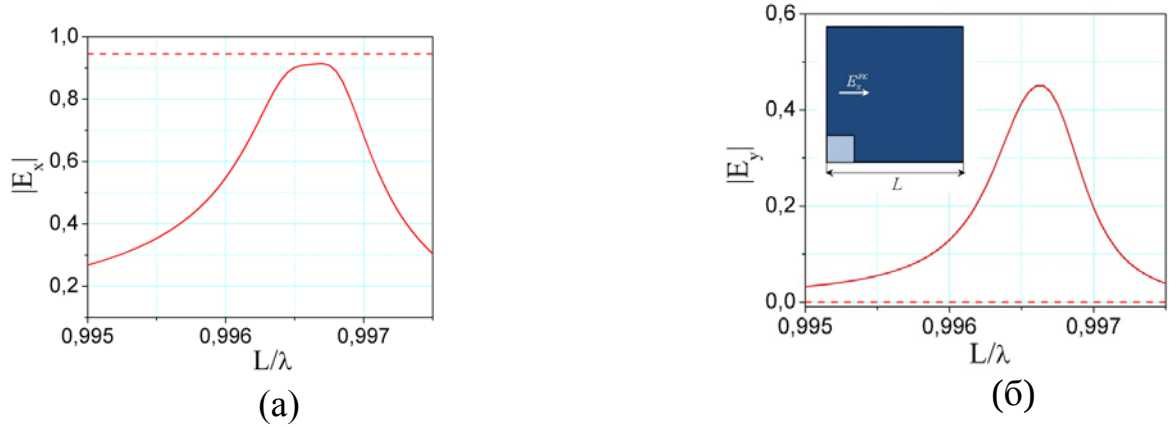


Рисунок 18 – Величина E_x -компоненти, що пройшла крізь структуру і є кополяризованою E_x -компоненті падаючої хвилі (а) і E_y -компоненти, що пройшла крізь структуру і є кросполяризованою E_x -компоненті падаючої хвилі (б) при розсіянні E_x -поляризованої нормально падаючої плоскої хвилі залежно від нормованого періоду РЕС- подібного шару ($\varepsilon_r = 2,5 + i2500$, $\mu = 1/\varepsilon$), періодично перфорованого квадратними апертурами, заповненими ЗІГ ($\mu = 0,866$, $\mu_g = 0,30285$, $\mu_z = 0,974 + i0,0055$, $\varepsilon_r = 13,2 + i0,0006$) (суцільні криві) і для однорідного шару ЗІГ (пунктирні криві). Параметри перфорованого шару: товщина $h/L_x = 0,025$, період $L = L_x = L_y = 7$ мм, розмір сторони квадратної апертури $a = 0,207 L$

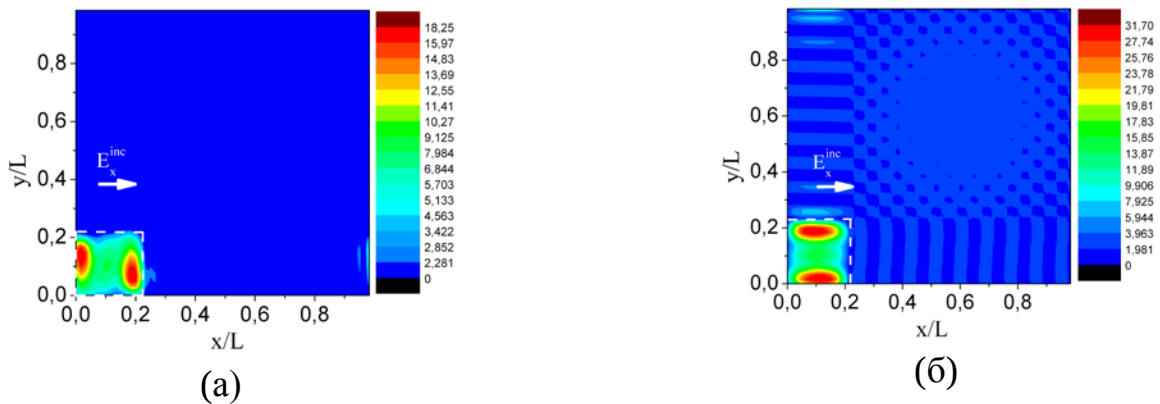


Рисунок 19 – Розподіл на елементарній комірці, зображений на вставці рис. 20 (б), ближнього поля кополяризованої E_x - (а) і кросполяризованої E_y - компонент (б), що пройшли крізь структуру на частоті граткового резонансу при $\kappa = 0,9967$ на відстані $L/1000$ від тіньової поверхні шару. Квадратна форма апертури обкреслена білими пунктирними лініями. Інші параметри такі ж, як на рис. 18

поляризована, так і кросполяризована компоненти демонструють резонанси на гратковій моді при одному і тому ж значенні κ . Порівняння з випадком суцільного шару ЗІГ тієї ж товщини показує екстраординарне посилення ефекту Фарадея у разі перфорованого шару. Кут повороту площини поляризації в резонансі граткового типу ($L/\lambda = 0,9967$) збільшується більш ніж в 1000 разів. На рис. 19 зображено розподіл ближнього поля на елементарній комірці для кополяризованої E_x (а) і кросполяризованої E_y (б) компонент поля, що пройшли крізь структуру на частоті

граткового резонансу ($L/\lambda = 0,9967$) з тіньової сторони шару. Конфігурація поля на квадратній апертурі вказує на магнітний тип граткового резонансу, оскільки петля струму зміщення, що пов'язана з циркуляційним розподілом електричного поля в резонансі, показаним на рис. 19 (а) і рис. 19 (б), є аналогом контуру струму провідності в SRR резонаторах з розірваним кільцем.

У розділі 5 досліджується розсіювання тривимірного пучка Гауса з круговою симетрією розподілу поля на проникних екранах.

Для каналізації ЕМ енергії від різного роду високочастотних джерел, таких як гіротрони, ЛЗХ, і т. ін., застосовуються квазіоптичні лінії передачі на основі порожнистих діелектричних хвильоводів різного типу. Нині існують технологічні можливості для виробництва різних хвильоводів з діелектричним покриттям стінок, що мають прийнятні параметри передачі енергії в інфрачервоному, міліметровому, ближньому міліметровому і субміліметровому діапазонах довжин хвиль. Основним типом коливань в таких хвильоводах є мода HE_{11} . Хорошою апроксимацією розподілу поля для моди HE_{11} є пучок з розподілом Гауса амплітуди поля по перерізу в напрямі, поперечному напрямку поширення пучка. Плоско-шаруваті магнітодіелектричні періодичні структури можуть служити як розсіювачі, що використовуються для керування характеристиками високочастотного поля в квазіоптичній лінії передачі.

Стандартним методом для моделювання поширення і взаємодії тривимірного пучка з різного роду розсіювачами є подання пучка у вигляді безперервного просторового Фур'є спектру плоских хвиль. В цьому випадку вважається, що для кожної хвилі коефіцієнти розсіювання від структури вже відомі. Поле розсіяного пучка може бути розраховане підсумовуванням усіх розсіяних хвиль з обчисленими коефіцієнтами розсіювання. У цьому розділі вирази для тривимірних розсіяних полів, представлених подвійними інтегралами, зводяться до однократних інтегралів, що істотно зменшує час розрахунку.

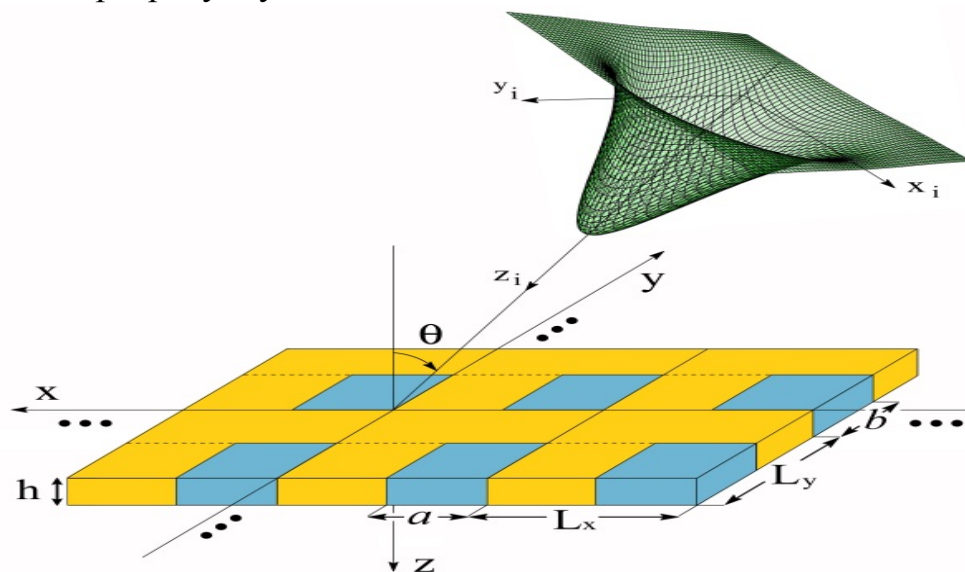


Рисунок 20 – Схематичне зображення двоперіодичного магнітодіелектричного шару, на який падає пучок Гауса. Показано тільки шість елементарних комірок нескінченної періодичної структури. Сегменти шару, що зафарбовані різними кольорами, мають різні матеріальні параметри

Поле довільно падаючого пучка Гауса в області $-d < z_i < 0$ виражається у формі подвійного інтеграла таким чином:

$$F_y^{inc}(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_y(k_x, k_y) \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z)] \times \\ \times \exp[i(k_x \sin \theta + k_z \cos \theta)d] (\cos \theta + \frac{k_x}{k_z} \sin \theta) dk_x dk_y. \quad (19)$$

Функція спектральної щільності $\Phi_y(k_x, k_y)$ у-компоненти пучка Гауса може бути аналітично виведена з перетворення Фур'є поля в перетяжці пучка

$$F(x_i, y_i, -d) = F_0 \exp[-(x_i^2 + y_i^2) / w_0^2]$$

як

$$\Phi_y(k_x, k_y) = \frac{F_0 w_0^2}{4\pi} \exp \left\{ -\frac{w_0^2}{4} \left[(k_x \cos \theta - k_z \sin \theta)^2 + k_y^2 \right] \right\}. \quad (20)$$

Крім того, кожна компонента плоскої хвилі падаючого пучка має бути представлена у вигляді суми двох компонент, одна з яких паралельна, а інша перпендикулярна площині падіння, наприклад $\vec{E}^{inc} = \vec{E}_{\perp}^{inc} + \vec{E}_{\parallel}^{inc}$ для падаючого перпендикулярно поляризованого пучка. Зважаючи на це твердження, а також властивості плоских хвиль $(\vec{k}, \vec{E}_{\perp}) = 0$, $(\vec{k}, \vec{E}_{\parallel}) = 0$, $(\vec{E}_{\perp}, \vec{E}_{\parallel}) = 0$ і той факт, що вираз для E_z^{inc} -компоненти може бути виведений з дивергентного рівняння Максвела, $\vec{E}_{\perp}^{inc}$ і $\vec{E}_{\parallel}^{inc}$ компоненти поля падаючого пучка можуть бути представлені як

$$\vec{E}_{\perp}^{inc}(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{-k_x k_y}{k_x^2 + k_y^2} \vec{x} + \frac{k_x^2}{k_x^2 + k_y^2} \vec{y} \right) \Phi_y(k_x, k_y) \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z)] \times \\ \times \exp[i(k_x \sin \theta + k_z \cos \theta)d] \left(\cos \theta + \frac{k_x}{k_z} \sin \theta \right) dk_x dk_y, \quad (21)$$

$$\vec{E}_{\parallel}^{inc}(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{k_x k_y}{k_x^2 + k_y^2} \vec{x} + \frac{k_y^2}{k_x^2 + k_y^2} \vec{y} - \frac{k_y}{k_z} \vec{z} \right) \Phi_y(k_x, k_y) \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z)] \times \\ \times \exp[i(k_x \sin \theta + k_z \cos \theta)d] \left(\cos \theta + \frac{k_x}{k_z} \sin \theta \right) dk_x dk_y. \quad (22)$$

Геометрію задачі зображено на рис. 20. 3-D пучок Гауса з круговою симетрією розподілу поля падає з напівпростору ($z < 0$) на двоперіодичний шар гіромагнітного матеріалу, розташованого у вакуумі, під кутом θ відносно осі z . Горловина пучка розташована на відстані d від початку координат (x, y, z) уздовж осі падаючого пучка z_i . Двоперіодичний шар товщини h складається з періодично розташованих

прямокутних паралелепіпедів. Елементарна комірка з періодами L_x і L_y уздовж x і y осей містить декілька сегментів, що є прямокутними паралелепіпедами, які характеризуються комплексною магнітною проникністю в тензорній формі. Відносні діелектрична і магнітна проникності j -го сегменту у напрямі осі x і f -го сегменту у напрямі осі y позначені як ε^{jf} і μ^{jf} відповідно.

Слід зазначити, що x -компонента розсіяного поля виникає внаслідок ефекту Фарадея при падінні пучка на гіромагнітний шар. Внаслідок взаємодії з гіромагнітним шаром вектор $\vec{E}^{inc}$ падаючої плоскої хвилі зазнає обертання і змінює свою довжину. В результаті, x і y компоненти відбитої плоскої хвилі для перпендикулярно поляризованої падаючої на гіромагнітний шар хвилі можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} E_{x\perp}^{ref}(x, y, z) &= R_{x\perp}^{ref}(x, y, z)E_{x\perp}^{inc}(x, y, z) - R_{y\perp}^{ref}(x, y, z)E_{y\perp}^{inc}(x, y, z), \\ E_{y\perp}^{ref}(x, y, z) &= R_{y\perp}^{ref}(x, y, z)E_{x\perp}^{inc}(x, y, z) + R_{x\perp}^{ref}(x, y, z)E_{y\perp}^{inc}(x, y, z), \end{aligned} \quad (23)$$

де $R_{x\perp}^{ref}$, $R_{y\perp}^{ref}$ - коефіцієнти відбиття x і y компонент плоскої хвилі від гіромагнітного шару при азимутальному куті $\alpha=0$, $E_{x\perp}^{inc}$ і $E_{y\perp}^{inc}$ - це x і y компоненти амплітуди падаючої плоскої хвилі.

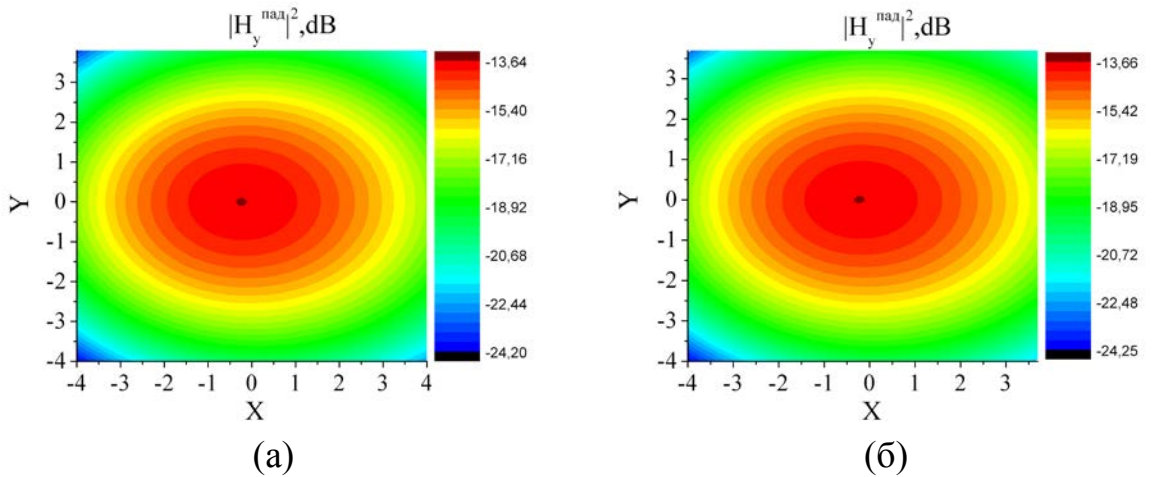


Рисунок 21 – Ізолінії фракцій потужності H_y -компоненти поля падаючого ТМ-поляризованого пучка при $z=0$ (а) і H_y -компоненти поля пучка, що пройшов крізь структуру на тіньовій стороні перфорованого шару при $z=h$ (б). $S=0,7744$, $\theta=30^\circ$, $d=18$ см, $h=0,59$ мм, $\varepsilon_r=14,2$, $\mu_r=\mu_z=0,9998$, $\mu_g=0,013$, $f=140$ ГГц, $w_0=0,51$ см, $\alpha=0^\circ$

У розділі 5 ми розглядаємо квазістатичний випадок, тобто довжина хвилі пучка набагато більша, ніж період розсіюючої структури. В цьому випадку тільки одна (основна) мода враховується при розкладанні розсіяних полів плоских хвиль в ряди Флоке.

Знаходження коефіцієнтів розсіяння компонент плоскої хвилі, що падає на періодичний гіромагнітний шар, є окремою задачею розсіяння. Для її розв'язання використовувався чисельно-аналітичний метод в частотній області, в основі якого лежать об'ємні інтегро-дифференціальні рівняння для еквівалентних електричного і магнітного поляризаційних струмів шару у векторній формі (див. розділ 4).

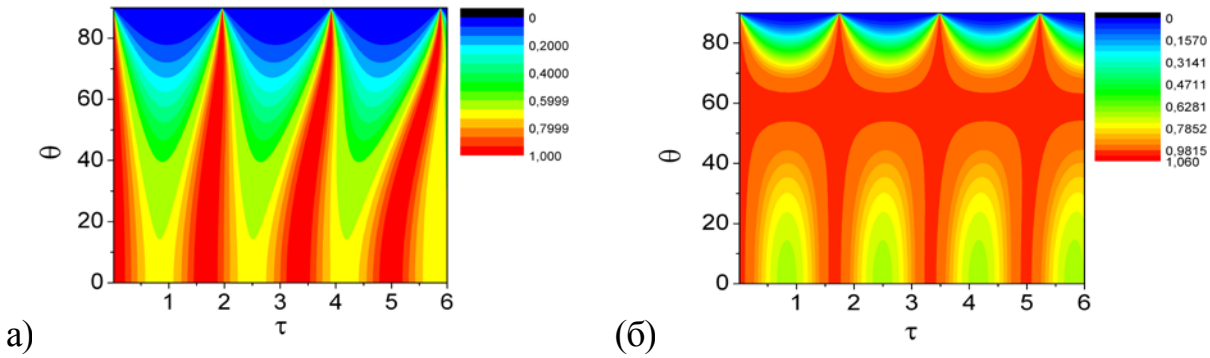


Рисунок 22 – Величини фракцій потужностей для E_y^{tr} -компоненти поля TE -поляризованої плоскої хвилі (а) і H_y^{tr} -компоненти поля TM -поляризованої плоскої хвилі (б), що пройшли крізь перфорований шар ЗІГ як функція кута падіння θ і товщини τ . $S=0,7744$, $\epsilon_r=14,2$, $\mu_r=\mu_z=0,9998$, $\mu_g=0,013$, $f=140$ ГГц, $\alpha=0^0$

На рис. 21 зображено ізолінії фракцій потужності H_y -компоненти поля падаючого TM -поляризованого пучка (а) і H_y -компоненти поля пучка, що пройшов крізь шар перфорованого ЗІГ (б). Тут H_x -компоненту поля пучка, що пройшов крізь структуру, не зображено, оскільки її фракція потужності незначна (менше, ніж – 50 дБ). При розрахунку цих ізоліній використовувалося значення нормованої товщини шару $\tau=k_0h=1,75$. Як впливає з рис. 22, ця товщина відповідає практично повному проходженню паралельно (рис. 22 (б)) і перпендикулярно (рис. 22 (а)) поляризованих плоских хвиль в дуже широкому інтервалі кутів їх падіння. Тому ізолінії H_y -компоненти поля пучка Гауса зберігають свою форму незмінною при проходженні крізь перфорований шар фериту (рис. 20). На рис. 22 показані величини фракцій потужностей для E_y^{tr} (рис. 22(а)) компоненти поля TE -поляризованої плоскої хвилі і H_y^{tr} (рис. 22(б)) компоненти поля TM -поляризованої плоскої хвилі, що пройшли крізь суцільний шар ЗІГ, як функції кута падіння хвилі θ і товщини шару τ . Для перфорованого ЗІГ шару (рис. 22) червоні області повного проходження при певній його товщині є ширшими і охоплюють практично увесь спектр кутів падіння від 0^0 до 90^0 . Таким чином, навіть незначна перфорація шару фериту при певній його товщині дозволяє практично повністю проходити пучку в широкій області його кутів падіння.

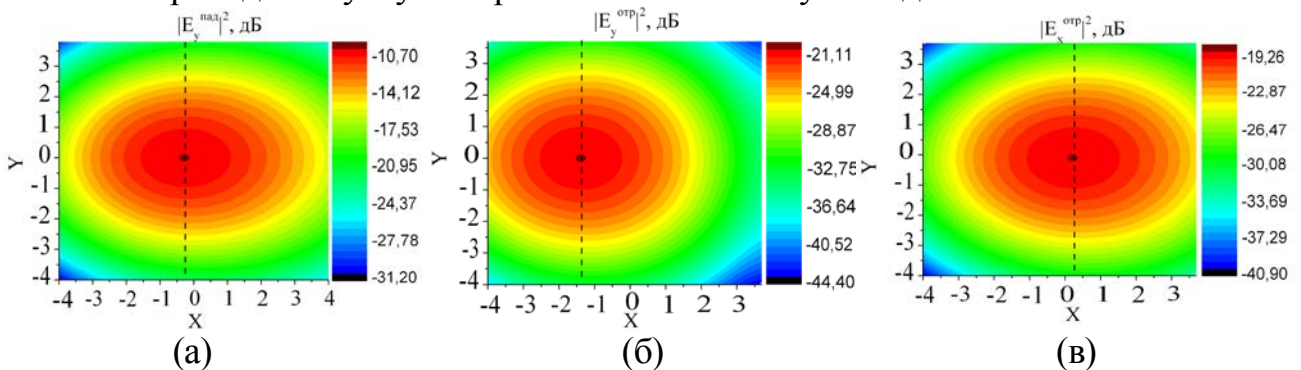


Рисунок 23 – Ізолінії фракцій потужностей E_y -компоненти падаючого поля (а), E_y -компоненти (б) і E_x -компоненти (в) поля відбитого пучка (в дБ) для суцільного шару. $S=1$, $\theta=45^0$, $d=18$ см, $f=110$ ГГц, $w_0=0,69$ см, $\epsilon_r=2,25$, $\mu_r=0,998$, $\mu_g=10$, $h=4,762$ мм, $z=0$

Також було виявлено, що максимуми фракцій потужностей E_y і E_x компонент поля відбитого пучка, відмічені на рис. 23 чорними крапками, можуть не співпадати і навіть зміщуватися в протилежних напрямках відносно максимуму фракції потужності E_y компоненти падаючого пучка при розсіянні TE -поляризованого пучка Гауса на гіромагнітному шарі.

ВИСНОВКИ

В дисертації досліджено резонансне розсіяння EM хвиль на складних 3D періодичних структурах. Дослідження було виконано за допомогою нового ефективного методу розв'язання векторних задач теорії розсіяння EM хвиль на двоперіодичних структурах, побудованого в дисертації на основі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. До наукового внеску, що належить дисертанту, можна віднести:

- 1) Розроблений новий метод розв'язання векторних задач розсіяння плоских EM хвиль на двоперіодичному магнітодіелектричному шарі у багатомодовому режимі в частотній області на основі об'ємних інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. Доведено єдиність розв'язку (за винятком частот збудження власних хвиль структури) і проведено оцінку достовірності чисельних результатів. Це дозволило
 - запропонувати і дослідити властивості нового класу частотно-селективних поверхонь, які є періодичними ідеально провідними екранами з отворами у формі гамадіонів, що мають чотириразову симетрію обертання, або C -подібними отворами; показати, що на основі таких поверхонь можна створити ефективні режекторні фільтри, добротність яких залежить від товщини екранів;
 - вперше дослідити ЕІП-подібний (електромагнітно індукована прозорість) резонанс при нормальному падінні плоскої хвилі на двоперіодичну повністю діелектричну структуру, що має місце при суміщенні ґраткових резонансів (аномалій Вуда) за допомогою зміни конфігурації періодів структури і її розмірів;
 - розробити і дослідити диференціальні фазові секції квазіоптичних хвилеводів для ТГц діапазону довжин хвиль на основі діелектричної структури, що складається з переміжних шарів слюди і лавсана або шарів полістиролу з повітряними проміжками, які застосовуються як широкосмугові перетворювачі поляризації.
- 2) Розроблені нові рекурсивні схеми розв'язання в частотній області векторних задач розсіяння плоских EM хвиль на багат шаровій двоперіодичній магнітодіелектричній структурі у багатомодовому режимі на основі методу інтегральних функціоналів. Це дало можливість
 - запропонувати і дослідити новий клас періодичних структур, що являють собою ідеально провідні екрани із співвісними отворами, в яких можливий режим збудження замкненої моди. Такі структури можуть бути використані як дихроїчні частотні фільтри на високдобротних резонансах замкненої і ґраткової мод;

- теоретично передбачити, вивчити і експериментально підтвердити існування резонансу відбиття/проходження в схрещених решітках; уперше показати можливість керування резонансними властивостями такої структури в надширокому частотному діапазоні шляхом простої зміни кута схрещування;
- запропонувати і дослідити новий клас метаматеріалів на основі періодично розташованих квадратних спіралей в діелектричному шарі, які обертають площину поляризації *ЕМ* хвиль;
- розробити нову теоретичну модель існуючого композиту, який являє собою армований вуглепластик, за допомогою запропонованої моделі провести дослідження і дати рекомендації по виявленню термічної деградації таких вуглепластиків.

3) Методом інтегральних функціоналів розв'язано векторну задачу дифракції плоскої *ЕМ* хвилі на двоперіодичному гіротропному шарі у багатомодовому режимі. Це дозволило

- уперше застосувати гіромагнітний шар з отворами як поляризатор Брюстера, розробити нові методики ефективного пошуку параметрів поляризатора Брюстера, що пропускає тільки *ТЕ*- або *ТМ*- компоненти поля падаючої хвилі;
- уперше продемонструвати явище екстраординарного збільшення ефекту Фарадея при використанні структур, що являють собою ідеально провідний шар з отворами, заповненими залізо-ітрієвим гранатом, і показати, що цей ефект пов'язаний з резонансом ґраткової моди і відноситься до резонансів магнітного типу, який характеризується циркуляційним розподілом електричного поля по периметру квадратного отвору.

4) Розв'язано задачу розсіяння тривимірного хвильового пучка Гауса з циліндричною симетрією просторового розподілу поля на магнітодіелектричному і гіротропному шарах з квадратними отворами. Це дало можливість

- уперше виявити ефект, що полягає в протилежному зміщенні максимумів x і y компонент поля, відбитого від гіромагнітного шару з отворами, при похилому падінні *ТЕ*-поляризованого пучка Гауса;
- уперше виявити ефект повного проходження похило падаючого *ТМ*-поляризованого пучка Гауса без зміни його форми при певних товщинах шару фериту з малими квадратними отворами в широкій області кутів падіння.

Таким чином, науковий внесок дисертанта має фундаментальну і прикладну сторони. Фундаментальна сторона наукового внеску полягає в розв'язанні векторних задач розсіяння для плоских хвиль і компактних джерел випромінювання новим методом. На підставі проведеного дослідження, прикладна сторона визначається можливістю, створювати високоефективні пристрої керування і каналізації *ЕМ* випромінювання в мікрохвильовому, ТГц і оптичному діапазонах довжин хвиль. Подальші дослідження з використанням цього методу можуть

проводитися в області розв'язання нелінійних задач розсіювання і задач розсіювання на неперіодичних структурах.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації висвітлено в **20 статтях** у профільних журналах:

1. **V.V. Yachin**, N.V.Ryazantseva, N.A.Khizhnyak, "The scattering of electromagnetic waves by a periodic magnetodielectric structures with arbitrary profiles and inhomogeneous media" *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol.11,No.11,1349-1366, 1997.
2. **V.V. Yachin** and N.V.Ryazantseva,"The scattering of electromagnetic waves by rectangular-cell double-periodic magnetodielectric gratings" *Microwave and optical technology letters*, Vol.23, No.3, November 5, pp.177-183, 1999.
3. N.V. Sidorchuk, **V.V. Yachin**, and S.L. Prosvirnin,"Low-Frequency Approximation for the Problem of Electromagnetic Wave Propagation in a Doubly- Periodic Magnetodielectric Layer" *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 59, No.5 pp. 52-59, 2003
4. **В.В. Ячин**, Исключение сингулярности в задачах рассеяния на трехмерных магнитодиэлектрических структурах с выделенным направлением, *Радиофизика и электроника*, Харьков, т.8, № 2, сс. 197-200, 2003.
5. **V.V. Yachin** "Suppression principle in the problems of scattering by double-periodic magneto-dielectric structures" *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 61, No.1 pp. 26-32, 2004.
6. **В.В. Ячин**, Н.В. Сидорчук, Рассеяние электромагнитных волн на двупериодическом магнитодиэлектрическом слое, *Радиофизика и радиоастрономия*, т.10, № 1, сс. 50-61, 2005.
7. **V.V. Yachin**, "Substantiation of the Field Functional Method as Applied to Scattering by a Doubly Periodic Magnetodielectric Structure," *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 46, No. 9, pp. 1668-1673, 2006
8. А.В. Грибовский, С.Л. Просвирнин, Н.В. Сидорчук, В.В. Хардинов, **В.В. Ячин**, Некоторые методы теории планарных метаматериалов, *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, т.10, № 3, сс. 27-31, 2007.
9. **V. Yachin** and K. Yasumoto, "Method of Integral Functionals for Electromagnetic Wave Scattering from a Double Periodic Magnetodielectric Layer," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 24, No. 11, pp. 3606-3618, 2007.
10. **В.В. Ячин**, Т.Л. Зиненко, В.К. Киселев, Квазистатическое приближение для рассеяния плоской волны на двухпериодическом гиротропном слое. *Радиофизика и радиоастрономия*, т.14, № 2, сс. 174-183, 2009.
11. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, V.K. Kiseliyov, S.N. Vorobyov "Diffraction of 3-D Gaussian beam with circular symmetry of the field space distribution on permeable screens at small angle of incidence" *RadioPhysics and RadioAstronomy*.v1.i3 pp. 241-247, 2010
12. **V. Yachin**, K. Watanabe and K. Yasumoto, " Method of Integral Functionals for Electromagnetic Wave Scattering from Three- Dimensional Gratings," *Advanced*

Techniques for Microwave Systems Editor: Giuseppe Schettini Part A. Transmission lines and Periodic Structures, Research Signpost, pp.85-102, 2011

13. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, V.K. Kiseliyov, "Diffraction of a three-dimensional Gaussian beam with a circular symmetry on penetrable screens," *Telecommunications and Radio Engineering*, vol.71, no.8, pp. 677-691, 2012.
 14. **V.V. Yachin**, V.K. Kiseliyov, Ye.M. Kuleshov, P.K. Nesterov, T.L. Zinenko Reflectometry of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) in Sub- Terahertz Frequency Range: Theory and Experiment. *Telecommunications and Radio Engineering*, 73(11) pp. 1005-1015, 2014.
 15. T.L. Zinenko, **V.V. Yachin**, & Marciniak, M. Brewster's angle polarizer design based on a gyrotropic double-periodic perforated layer. *Optical and Quantum Electronics*, 46(6), 779-790, 2014.
 16. V.I. Bezborodov, O. Kosiak, Y.M. Kuleshov, & **Yachin, V.V.** Differential phase sections based on form birefringence in The terahertz frequency range. *Telecommunications and Radio Engineering*, 74(8) pp. 735-744, 2015.
 17. V.I. Bezborodov, O. Kosiak, Y.M. Kuleshov, & **Yachin, V.V.** Form Birefringent Structures Matching to Free Space in the terahertz frequency range. *Telecommunications and Radio Engineering*, 74(19) pp. 1767-1776, 2015.
 18. P. K. Nesterov, **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, & Kuleshov, Y.M. Characterization of CFRP Thermal degradation by THz polarization-frequency reflectometry method in subterahertz frequency range. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 6(1), 91-98, 2016.
 19. **V. Yachin**, L. Ivzhenko, S. Polevoy, & Tarapov, S. Resonant response in mechanically tunable metasurface based on crossed metallic gratings with controllable crossing angle. *Applied Physics Letters*, 109(22), 221905, 2016.
 20. **V.V. Yachin**, & Zinenko, T.L. 3-D Gaussian beam scattering from a gyromagnetic perforated layer: Quasi-static approach. *Optics Communications*, 380, 425-433, 2016.
- та в 12 тезах**, опублікованих у збірниках доповідей на міжнародних конференціях:
21. **V. Yachin** and K. Yasumoto, " Analysis of Three-Dimensional Metallic Gratings Using the Method of Integral Functionals," Proceedings of 2009 1st International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology, Calcutta, Feb. 2009, pp. 10-19.
 22. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, "Three-Dimensional Gaussian Beam with Circular Cross Section Scattered from Double-Periodic Magneto-Dielectric Slab at a Small Angle of Incidence," Proceedings of International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagn. Theory, Lviv, Ukraine, Sept. 2009, pp. 135-138
 23. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, V. K. Kiseliyov, "Three-Dimensional Gaussian Beam with Circular Cross Section Scattered from Double-Periodic Magneto-Dielectric Slab at an arbitrary angle of incidence," Proceedings of 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter waves, June 2010, A-9 pp. 1-3
 24. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, V.K. Kiseliyov, "Three-Dimensional Gaussian Beam with Circular Cross Section Scattered from an Anisotropic Slab," Proceedings of 2010

- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2010, Kiev, Ukraine, NME-5, Sept. 6-8, pp. 1-4.
25. **V.V. Yachin**, V.K. Kiseliyov, Ye.M. Kuleshov, P.K. Nesterov, T.L. Zinenko, "Application of the method of integral functional for evaluation of the CFRP polarization-frequency response in sub-THz frequency range and experimental verification of the results," Proc. Int. Symp. Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves (MSMW-13), Kharkov, Ukraine, WT-3, June 2013. – P.82-84
 26. **V.V. Yachin**, T.L. Zinenko, V.K. Kiseliyov, M. Marciniak, "Optimization of gyrotropic double-periodic perforated layer for Brewster's angle polarization design," Proc. Int. Symp. Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves (MSMW-13), Kharkov, Ukraine, A-17, June 2013. – P.225-227.
 27. **V.V. Yachin**, P.K. Nesterov, T.L. Zinenko, "Experimental study of thermal degradation influence on carbon fiber reinforced plastics reflectivity in sub-terahertz frequency range", Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2014) 26-28, Dnipropetrovsk, Ukraine. – ET-8, August 2014, pp. 83-85.
 28. V.I. Bezborodov, O.S. Kosiak, E.M. Kuleshov and **V.V. Yachin**. "Differential phase sections based on form birefringence effect operating in the terahertz frequency range." *Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*, 2014 20th International Conference on. IEEE, 2014.
 29. **Yachin, Vladimir V.**, and Tatiana L. Zinenko. "Fano-shape grating resonances of 3D infinite double-periodic grating of thin dielectric bricks." *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2016 IEEE 36th International Conference on. IEEE, 2016.
 30. **V.V. Yachin**, & Zinenko, T. L. Plane wave scattering from a double-periodic gyrotropic layer. In *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, (2016, June), (pp. 1-4). IEEE.
 31. **V.V. Yachin**, & Zinenko, T.L. Plane wave scattering by a double-periodic gyromagnetic layer analyzed by the integral functional method: Full-wave solution. In *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2016 IEEE International Conference on IEEE, 2016, July, pp. 260-263, IEEE.
 32. **V.V. Yachin**, & Zinenko, T.L.. Polarization Conversion by Metamaterial Composed of a Periodic Array of Metallic Square Helixes Embedded in a Dielectric Layer In the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) ,2017, May-June.

АНОТАЦІЯ

Ячин В.В. Розсіяння електромагнітних хвиль на тривимірних двоперіодичних багатошарових магнітодіелектричних структурах. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2018.

Метою дисертації є розробка і дослідження штучних двоперіодичних структур з унікальними електродинамічними характеристиками. Використовуючи новий достовірний метод розв'язання векторної багатомодової задачі розсіювання на багатошаровій магнітодіелектричній двоперіодичній структурі в частотній області, було виявлено і проаналізовано ефекти резонансної взаємодії ЕМ хвиль в періодичних структурах. Досліджено нові явища і ефекти в резонансах замкненої моди, інтерференційних резонансах, резонансах, пов'язаних з аномаліями Вуда. Досліджено електродинамічні характеристики різних типів періодичних структур, таких як магнітодіелектричні одношарові структури з отворами у формі гамадіонів і С-подібними отворами, тришарова структура із співвісними отворами, 3D кіральні решітки, що перетворюють поляризацію, магнітооптичні фотонні структури, метаматеріал з механічною перебудовою геометрії елементарної комірки, CFRP вуглепластик. Запропоновано і досліджено диференціальні фазові секції на основі періодичних решіток. Розглянуто застосування перфорованого гіромагнітного шару як поляризатора Брюстера. Виявлено ефекти повного проходження похило падаючого пучка Гауса крізь перфорований шар фериту і зсув максимумів x - і y - компонент поля пучка, відбитого від гіромагнітного перфорованого шару, в протилежних напрямках. Одержані результати мають велику практичну цінність в галузі радіофізики, радіоелектроніки, оптоелектроніки і інтегральної оптики.

Ключові слова: періодичні структури, метод інтегральних функціоналів, фотонні кристали, метаматеріали, ефект Фарадея, кіральність, ґраткові резонанси.

АННОТАЦИЯ

Ячин В.В. Рассеяние электромагнитных волн на трехмерных двоякопериодических многослойных магнитодиэлектрических. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2018.

Целью диссертации является разработка и исследование искусственных двоякопериодических структур с уникальными электродинамическими характеристиками. Используя новый достоверный метод решения векторной многомодовой задачи рассеяния на многослойной магнитодиэлектрической двоякопериодической структуре в частотной области, были обнаружены и проанализированы эффекты резонансного взаимодействия ЭМ волн в периодических структурах. Исследованы новые явления и эффекты в резонансах запертой моды, интерференционных резонансах, резонансах, связанных с аномалиями Вуда. Исследованы электродинамические характеристики различных типов периодических структур, таких как магнитодиэлектрические однослойные структуры с отверстиями в форме гаммадионов и С-образными отверстиями, трехслойная структура с соосными отверстиями, 3D киральные решетки, вращающих плоскость поляризации, магнитооптические фотонные структуры, метаматериал с механической перестройкой геометрии элементарной

ячейки, CFRP углепластик. Предложены и исследованы дифференциальные фазовые секции на основе периодических решеток. Рассмотрено применение перфорированного гиромагнитного слоя в качестве поляризатора Брюстера. Выявлены эффекты полного прохождения наклонно падающего гауссовского пучка сквозь перфорированный слой феррита и смещение максимумов x - и y - компонент поля пучка, отраженного от гиромагнитного перфорированного слоя, в противоположных направлениях. Полученные результаты имеют большую практическую ценность в области радиофизики, радиоэлектроники, оптоэлектроники и интегральной оптики.

Ключевые слова: периодические структуры, метод интегральных функционалов, фотонные кристаллы, метаматериалы, эффект Фарадея, киральность, решеточные резонансы.

ABSTRACT

Yachin V.V. Electromagnetic waves scattering from three-dimensional double-periodic multilayered magnetodielectric structures. Manuscript.

Thesis for doctor of science degree in physics and mathematics by specialty 01.04.03 radiophysics. – O, Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS Ukraine; Kharkiv, 2018.

The thesis is aimed at the development and study of artificial double-periodic structures with unique electromagnetic characteristics. Using a new reliable method for solving full-wave vector problem of plane wave scattering from multilayered magnetodielectric double-periodic structure in the frequency domain, the effects of resonant interaction of EM waves in periodic structures are revealed and analyzed. New phenomena and effects in trapped-mode resonances, interference resonances, and resonances associated with Wood's anomalies are investigated. The electromagnetic characteristics of different types of periodic structures such as magnetodielectric single-layered structures with apertures in the form of gamadions and C-shaped openings, threelayered structure with coaxial apertures, polarization converters in the form of 3D chiral gratings, magneto-optical photonic structures, metamaterial with mechanically tunable elementary cell, carbon-fiber reinforced plastic are studied. The differential phase sections based on periodic gratings are proposed and investigated. The use of perforated gyromagnetic layer as a Brewster's polarizer is considered. The effects of the nearly total Gaussian beam transmission through perforated ferrite layer and the shift of the maxima of the x - and y - components of the beam field reflected from the gyromagnetic perforated layer in the opposite directions are revealed. The obtained results have great practical value in the field of radiophysics, radioelectronics, optoelectronics and integrated optics.

Keywords: periodic structures, the method of integral functionals, photonic crystals, metamaterials, Faraday effect, chirality, grating resonances.