НАЦІОНАЛЬНІЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

До захисту допущено: Завідувач кафедри _____ Дмитро ТАТАРЧУК «___»____20__р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Широкосмугові мікрохвильові метаматеріали»

Виконав: Студент IV курсу, групи ДП-91 Ремез Сергій Олександрович	
Керівник: проф.каф.МЕ, к.т.н., Орлов Анатолій Тимофійович	
Консультант з нормоконтролю: ст.викл.каф.МЕ, к.т.н., Королевич Любомир Миколайович	
Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., Діденко Юрій Вікторович	
Рецензент: доц.каф.ЕПП, к.т.н., Цибульский Леонід Юрійович	
Sachimuna I	

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів

без відповідних посилань.

Студент	
•	

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри _____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___»_____20___p.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Ремез Сергій Олександрович

1. Тема роботи «Широкосмугові мікрохвильові метаматеріали», керівник роботи Орлов Анатолій Тимофійович, проф.каф.МЕ, к.т.н., проф., затверджені наказом по університету від «____»_____ 20__ р. №____

2. Термін подання студентом роботи 09.06.2023

3. Вихідні дані до роботи

Широкосмугові мікрохвильові метаматеріали

4. Зміст роботи

<u>1. Метаматеріали та їх особливості.</u> 2. Програмне забезпечення. 3. Структура та елементи метаматеріалів. 4. Розробка фінального метаматеріалу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Презентація для виступу, ілюстрації роботи в програмному забезпеченні, графіки залежностей, ілюстрації налаштувань, таблиця теоретичної залежності кута відбивання від кута падіння.

6. Консультанти розділів роботи*

Прізрище, ініціали та посат	Прізвище ініціали та посала	Підпис, дата	
Розділ	прізвище, інціали та посада – консультанта	завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 17.04.2023

Календарний план

№ 3/П	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Проходження інструктажу з ТБ та ППБ. Вибір та встановлення необхідного програмного забезпечення.	17.04.2023 - 23.04.2023	
2	Вивчення особливостей метаматеріалів та вибір літератури. Тестування програмного забезпечення та симуляція метаповерхні. Аналіз отриманих результатів.	22.05.2023 - 07.05.2023	
3	Аналіз метаматеріалів з широкосмуговими властивостями. Проектування обраного метаматеріалу. Симуляція та аналіз результатів. Оформлення роботи, формулювання висновків.	08.05.2023 - 09.06.2023	

Студент

Сергій, РЕМЕЗ

Керівник

Анатолій, ОРЛОВ

^{*} Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 50 сторінках, вона містить 4 розділи, 55 ілюстрацій, 1 таблицю, 14 використаних джерел.

Об'єктом дослідження є широкосмугові метаматеріали в мікрохвильовому діапазоні.

Предмет роботи – аномальний кут відбивання у метаматеріалах, фазовий градієнт для створення метаматеріалів з таким кутом відбивання.

Мета роботи – дослідити широкосмугові мікрохвильові метаматеріали. Дослідити кут відбивання хвиль від поверхні, структуру, методи моделювання.

У першому розділі було описано загальна інформація про метаматеріали. Крім того, наведені класифікації матеріалів залежно від проникностей.

У другому розділі було описано моделювання тестового модельного метаматеріалу з поглинаючими властивостями. Описані залежність від поглинання та розрізи поля зі значеннями.

У третьому розділі були розглянуті елементи та структура метаматеріалів. Також описано метаматеріали з фазовим градієнтом, фазу Панчаратнама-Беррі, методи оптимізації симуляції, а також проаналізовано кут відбивання в залежності від фазового градієнту.

У четвертому розділі описано фінальний метаматеріал, його симуляцію, а також пов'язані з ним проблеми та тонкощі. Це дозволить більш точніше створювати нові метаматеріали в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics.

Отримано фінальний метаматеріал з кутом відбивання хвиль 31-33° для середини і 20-30° для країв діапазону (0,3..2 ГГц). Даний матеріал можна застосовувати для маскування від загоризонтних та старих радарів, що працюють в даному діапазоні.

Ключові слова: метаматеріал, симуляція, фазовий градієнт, комірки високого порядку, аномальний кут відбивання.

ABSTRACT

The work is presented on 50 pages and consists of 4 chapters, 55 illustrations, 1 table, and 14 reference sources.

The research object is broadband metamaterials in the microwave range.

The subject of the work is the anomalous reflection angle in metamaterials and the phase gradient for creating metamaterials with such reflection angles.

The objective of the work is to investigate broadband microwave metamaterials, study the angle of wave reflection from the surface, the structure, and the methods of modeling.

Chapter 1 provides a general overview of metamaterials, including classifications of materials based on permeability type.

Chapter 2 describes the modeling of a test model metamaterial with absorbing properties. Described dependence on absorption and the field profiles with corresponding values.

Chapter 3 discusses the elements and structure of metamaterials. It also describes metamaterials with a phase gradient, the Pancharatnam-Berry phase, simulation optimization methods, and an analysis of the reflection angle depending on the phase gradient.

Chapter 4 describes the final metamaterial, its simulation, as well as associated issues and considerations. This will allow more accurate creation for new metamaterials using COMSOL Multiphysics.

The obtained final metamaterial has a wave reflection angle of $31-33^{\circ}$ for the center and $20-30^{\circ}$ for the edges of the range (0,3-2 GHz). This material can be used for concealing from over-the-horizon and outdated radars operating in this range.

Keywords: metamaterial, simulation, phase gradient, high-order cells, anomalous reflection angle.

3MICT

Вступ	9
1. Метаматеріали та їх особливості	10
1.1. Історія терміну	10
1.2. Типи та властивості	11
1.3. Метаматеріали з оптичними властивостями	13
1.4. Метаматеріали та терагерцовий діапазон	15
1.5. Метаматеріали та мікрохвильовий діапазон	15
1.6. Інші використання метаматеріалів	16
2. Програмне забезпечення	
2.1. Використане програмне забезпечення	
2.2. Плюси та мінуси використання	19
2.3. Тестовий модельний метаматеріал	20
4.5. Методи оптимізації моделювання	33
3. Метаматеріали з фазовим градієнтом	39
3.1. Структура та елементи метаматеріалу	39
3.2. Конструктивні особливості метаматеріалів	41
3.3. Метаматеріал з фазовим градієнтом	43
3.4. PGM за допомогою фази Панчаратнама-Беррі	44
3.5. Залежність кута відбивання від фазового градієнту	45
4. Розробка фінального метаматеріалу	47
4.1. Розмірність елементів	47
4.2. Загальний вигляд поверхні з фазовим градієнтом	47
4.3. Пошук розмірності елементів метаматеріалу	48
4.4. Порівняння теоретичних матеріалів для виробництва	50

4.5. Моделювання	
Висновки	61
Перелік посилань	
Додатки	63

Перелік скорочень, символів, одиниць, умовних позначень і термінів

PML – perfectly matched layer (ідеально поглинаючий шар);

PGM – метаматеріал з фазовим градієнтом;

RHM/LHM – right/left-handed medium (ліво-/правоорієнтовні середовища);

ПВП – поверхня вищого порядку;

ВСТУП

Метаматеріали створені матеріали це штучно 3 унікальними властивостями, які не зустрічаються в природі. Широкосмугові мікрохвильові метаматеріали є одним з найбільш перспективних напрямків досліджень в області метаматеріалів, оскільки вони здатні працювати з сигналами високої частоти та мати широкі діапазони робочої частоти. У цій дипломній роботі досліджуються основні принципи широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів, їхні фізичні властивості та потенційні застосування. Також робота включає аналіз існуючих досліджень та визначення перспективних напрямків досліджень у майбутньому.

Зважаючи на важливість широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів у сучасних технологіях, дослідження в цій галузі є дуже актуальним. Розуміння принципів роботи та властивостей цих матеріалів може привести до створення нових, більш ефективних та перспективних пристроїв у різних галузях, таких як зв'язок, радіофізика, медицина та інші.

У цій дипломній роботі буде проведено аналіз існуючих досліджень у галузі широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів, включаючи властивості. Також теоретично будуть досліджені потенційні застосування цих матеріалів.

Завданням даної роботи є встановлення теоретичних основ та практичних можливостей широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів, їхніх потенційних застосувань та розробка метаматеріалу, здатного відхиляти електромагнітні хвилі, що падають, в діапазоні частот від 0,3 ГГц до 2 ГГц, кут відхилення відбитих хвиль якого становить ≥30° за умови нормального падіння ≤8°.

1. МЕТАМАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

1.1. Історія терміну

1999 року в Техаському університеті Роджером М. Уолсером було вперше синтезовано поняття «метаматеріал»:

«Макроскопічні композити, які мають синтетичну, трьохвимірну та періодичну клітинну архітектуру, розроблені для виготовлення комбінацій, недоступних в природі».

Але на сьогоднішній день даний опис не є достатньо повним, оскільки метаматеріали можуть бути структурно як періодичними так і неперіодичними, а також бути виготовлені хімічним або клітинним способами.



Рисунок 1.1 - Типові метаматеріали при мікрохвильовому збільшенні; (а) періодична клітинна структура, (б) неперіодична відцентрова клітинна структура [1]

Побудова метаматеріалів на клітинній структурі надає велику можливість для контролю різних параметрів, які не можна було б зустріти в природі. Зазвичай такими характеристиками є діелектрична (є) та магнітна (µ) проникності.

1.2. Типи та властивості

Найтоншим матеріалом в природі є пустий простір або повітря, проникності яких становлять ε_0 та μ_0 . На основі цих характеристик можна рахувати відносні проникності [6]:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{1.1}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{1.2}$$

Такі характеристики описують ще один важливий параметр матеріалу індекс заломлення:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \tag{1.3}$$

Найбільш цікавим є те, що в природних матеріалів магнітна проникність μ_0 більша за діелектричну проникність ε_0 . Але з розвитком метаматеріалів такі обмеження стали доступними та практично будь-які характеристики можна отримати за допомогою клітинного дизайну та використання різних матеріалів підкладки.

Для більш детального розуміння природи матеріалів наведено Рис. 1.1 із зображенням зон матеріалів в залежності від є та µ.

Терміни на графічному відображенні:

- Nihility (відсутність) термін який використовується в контексті метаматеріалів, що описує стан при якому електрична та магнітна проникливості матеріалу дорівнюють нулю.
- MNZ (µ-near zero) матеріали з близькою до нуля магнітною проникністю.
- ENZ (ε-near zero) матеріали з близькою до нуля діелектричною проникністю.
- Magnetic/Electric plasma (магнітна/електрична плазма) залежно від назви, плазма що проявляє відповідні назві електричні або магнітні властивості і відповідну провідність.

- 5) Left-oriented/Right-oriented medium (Ліво-орієнтовне/Право-орієнтовне середовище) - відповідає ситуації, коли напрямок електричного поля, магнітного поля та напрямок поширення хвилі утворюють відповідну до назви трійку.
- 6) Backward propagating waves (хвилі, що поширюються у зворотному напрямку) - це електромагнітні хвилі, які поширюються в напрямку, протилежному до напрямку звичайного поширення. У звичайному випадку, коли електромагнітні хвилі поширюються від джерела світла, вони рухаються у напрямку від джерела. Однак, в деяких випадках, хвилі можуть поширюватись у зворотному напрямку через зміну властивостей середовища, наприклад, через взаємодію з метаматеріалами, які мають негативну індекс заломлення.
- 7) Evanescent waves (еванесцентні хвилі) це електромагнітні хвилі, які не можуть поширюватись вільно в просторі, але зберігаються біля межі двох середовищ з різними властивостями. Ці хвилі зникають відносно швидко при віддаленні від межі середовища.



Рисунок 1.2 - Всі можливі варіанти ізотропних матеріалів в залежності від проникностей ε та μ [1]

Наприклад, точка $\mu = -\mu 0$ і $\varepsilon = -\varepsilon 0$ представляє собою анти-повітря у регіоні LHM, яке може створювати ідеальну лінзу; лінія $\mu = \varepsilon$ в обох регіонах RHM та LHM представляє матеріали з відповідним опором, які мають ідеальну відповідність опору повітря і не дають відбивань. Також, околиці точки $\mu = 0$ називаються матеріалами з близьким до нуля значенням μ (μ -near zero, MNZ), а околиці точки $\varepsilon = 0$ - матеріалами з близьким до нуля значенням ε (ε -near zero, ENZ), які мають спеціальні властивості.

Достатньо довго вченими вважалося що деякі метаматеріали представляють собою один і той самий клас матеріалів, але як виявилося пізніше, що кожен з них має відмінні властивості. Більшість властивостей матеріалів може бути досягнута за допомогою метаматеріалів, навіть для реалізації право-орієнтовних матеріалів.

Насправді ж, матеріали мають значно більше кількість властивостей ніж зазначено, наприклад в дослідженнях можна знайти низько- та високоанізотропні метаматеріали. Гнучкість у проектуванні різноманітних властивостей метаматеріалів разом з візуальною трансформацією дає можливість контролювати електромагнітні хвилі на власний розсуд.

1.3. Метаматеріали з оптичними властивостями

Метаматеріали з оптичними властивостями представляють собою нову та захоплюючу галузь науки і технологій, яка відкриває безліч можливостей для створення революційних пристроїв та систем, що працюють на основі світла [7].

Оптика використовується в багатьох сферах, включаючи телекомунікації, фотоніку, сонячні батареї та оптичну обробку сигналів. Однак, традиційні матеріали мають свої обмеження, що заважає досягти бажаних оптичних властивостей. Тут на сцену виходять метаматеріали. Вони складаються з наноструктур, що повторюються в мікроскопічному масштабі, і їхні оптичні властивості контролюються геометрією та складом структур. Одним з найцікавіших аспектів метаматеріалів є їхня здатність керувати пропусканням, відбиванням та поглинанням світла в широкому спектрі довжин хвиль. Це означає, що метаматеріали можуть бути використані для створення ультратонких лінз, які здатні докладно видавлювати світло і покращувати роздільну здатність оптичних систем.

Крім того, метаматеріали можуть забезпечити негативний індекс заломлення, що означає, що світло може поширюватися в протилежний спосіб до того, як воно поширюється в природних матеріалах. Це відкриває нові можливості для розробки інформаційних пристроїв, які працюють на основі фотоніки, де метаматеріали можуть забезпечити більш швидкий та ефективний обмін даними [9].

Одним 3 прикладів використання метаматеріалів оптичними 3 властивостями є розробка невидимих об'єктів. Завдяки особливим властивостям метаматеріалів, їх можна застосовувати для створення оболонок. які перехиляють світло навколо об'єкту, роблячи його непомітним для спостереження. Це відкриває нові можливості в області оборони, безпеки та розвідки [8].

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для створення ефективних сонячних батарей. Завдяки унікальним оптичним властивостям, метаматеріали можуть керувати поглинанням та розсіюванням світла, що сприяє збільшенню ефективності сонячних панелей та збору більшої кількості енергії.

Метаматеріали з оптичними властивостями також відіграють важливу роль у розвитку оптичних комунікацій. Вони можуть бути використані для створення компактних та швидких оптичних компонентів, які забезпечують високу пропускну здатність та мінімізують втрати сигналу. Це відкриває перспективи для створення більш потужних та швидких мереж передачі даних.

1.4. Метаматеріали та терагерцовий діапазон

Терагерцовий діапазон електромагнітного спектра відкриває нові можливості для бездротових комунікацій, обробки сигналів та образотворення. Однак, розвиток пристроїв для роботи в цьому діапазоні є складним завданням через обмеженість наявних компонентів. Терагерцовий твердотільний фазовий модулятор на основі метаматеріалів - це один з прикладів пристрою, який використовує метаматеріали для контролю фази терагерцових хвиль.

Цей фазовий модулятор заснований на використанні твердотільних метаматеріалів, що мають унікальні оптичні властивості в терагерцовому діапазоні. Він складається з металевих або напівпровідникових наноструктур, які можуть змінювати фазу терагерцового випромінювання при впливі зовнішнього електричного або магнітного поля [10].

Застосування такого фазового модулятора може бути різноманітним. Він може використовуватися для створення мікрохвильових пристроїв з високою роздільною здатністю, таких як радари, сенсори та зображувальні системи. Він також може бути використаний у бездротових комунікаціях для швидкого та надійного передачі сигналу.

1.5. Метаматеріали та мікрохвильовий діапазон

Метаматеріали та мікрохвильовий діапазон відіграють важливу роль у розвитку сучасних технологій і мають великий потенціал для застосування в різних галузях науки та промисловості.

Мікрохвильовий діапазон електромагнітного спектра охоплює частоти від 300 мегагерц до 300 гігагерц. Цей діапазон є особливим, оскільки він поєднує в собі переваги радіохвиль і оптичного спектра. Він дозволяє передавати інформацію з великою пропускною здатністю та забезпечує високу роздільну здатність при створенні зображень та датчиків. Однак, розвиток технологій в мікрохвильовому діапазоні стикається з деякими викликами та проблемами. Одна з найбільших проблем полягає в обмеженості наявних компонентів та матеріалів, які можуть працювати в цьому діапазоні. Традиційні матеріали, такі як метали та напівпровідники, мають обмежену ефективність та оптичні властивості в мікрохвильовому діапазоні. Метаматеріали дозволяють контролювати властивості світла, такі як фаза, поляризація та напрямок поширення, у мікрохвильовому діапазоні.

Проте, розробка та виробництво метаматеріалів для мікрохвильового діапазону також представляють складні виклики. Для вирішення цих проблем проводиться активне дослідження та розробка нових методів виготовлення та оптимізації метаматеріалів для мікрохвильового діапазону. Використання нових матеріалів, таких як графен, карбід кремнію та нанокристали, може поліпшити ефективність метаматеріалів та зменшити втрати сигналу.

Одним зі способів подолання проблем у мікрохвильовому діапазоні є оптимізація дизайну та структури метаматеріалів. Розробка нових геометрій, таких як спіральні, квазікристалічні або мультифункціональні структури, може покращити оптичні властивості метаматеріалів та забезпечити більшу ефективність [3].

Крім того, дослідники працюють над розробкою нових методів контролю та налаштування метаматеріалів, таких як використання електричного або магнітного поля для зміни їх оптичних властивостей. Це дозволить створювати перетворювачі та модулятори з високою швидкістю реакції та точністю.

1.6. Інші використання метаматеріалів

Для створення мікрохвильових лінз використовували провідні сфери, диски та періодично розташовані металеві смужки, які утворювали штучне середовище зі специфічним ефективним показником заломлення [7, 8]. Одною з успішних була ідея створення ізотропних метаматеріалів на основі діелектричних резонансних включень. Така гіпотетична регулярна структура складається з сферичних резонаторів, виконаних із магнітодіелектрика з однаковою величиною діелектричної та магнітної проникності. Також було запропоновано численні варіанти лише діелектричних структур, які складаються з резонаторів різної форми для терагерцового діапазону [5]. Природні матеріали з такими властивостями поки не були виявлені.

В 1999 році були створені експериментально речовини з негативним показником заломлення в радіодіапазоні електромагнітних хвиль. Нині вчені продовжують працювати над створенням та дослідженням матеріалів з негативним показником заломлення в оптичному діапазоні. Усі штучно створені матеріали з одночасно негативною діелектричною та магнітною проникностями в оптичному діапазоні є композитами, що містять металеві та діелектричні компоненти. Фотонні кристали, зокрема резонансні фотонні кристали, є перспективним класом таких матеріалів [9].

Матеріали з негативним показником заломлення мають великий потенціал для застосування в різних галузях, таких як оптика, електроніка, медицина, судова експертиза та інші. Зокрема, вони можуть бути використані для створення пристроїв оптичного маскування, передавання зображень з надвисокою роздільною здатністю, концентраторів-колекторів світлової енергії, спеціальних датчиків, широкосмугових НВЧ-поглиначів та поляризаторів, засобів ближньопольової мікроскопії та інших пристроїв [11].

2. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1. Використане програмне забезпечення

В даній дипломній роботі для моделювання метаматеріалів буде використано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics 6.

COMSOL Multiphysics є програмним забезпеченням для моделювання та розв'язання різних типів фізичних задач, зокрема теплопередачі, механіки, електродинаміки та хімії. Однією з ключових особливостей цієї програми є її здатність до моделювання збіжних задач з використанням різних методів, таких як скінченні елементи, скінченні різниці та елементи скінченного об'єму.

Однією з переваг COMSOL Multiphysics є його гнучкість та можливість налаштування на різні типи задач. Крім того, програмне забезпечення має інтуїтивний інтерфейс, що дозволяє користувачам легко створювати та редагувати моделі, включаючи зміну геометрії, матеріалів та умов межі. COMSOL Multiphysics також має широкий спектр фізичних модулів, що дозволяє користувачам моделювати задачі з різних галузей науки та техніки.

Однак, на жаль, програмне забезпечення COMSOL Multiphysics також має свої мінуси. Перш за все, це програмне забезпечення є дуже потужним і вимагає значних ресурсів комп'ютера. Крім того, воно може бути складним у використанні для початківців, які можуть потребувати значної кількості часу для того, щоб зрозуміти, як користуватися програмою. І серед інших недоліків програми можна відзначити високі вимоги до обчислювальних ресурсів та відносно тривалий час розв'язання складних задач. Крім того, вартість ліцензії на COMSOL Multiphysics також може бути досить високою для деяких користувачів. Однак, наявність безкоштовної тестової версії програмного забезпечення дозволяє користувачам перевірити його можливості перед покупкою.

Загалом, програмне забезпечення COMSOL Multiphysics є потужним інструментом для розв'язання складних фізичних задач, з високою гнучкістю та широким спектром фізичних модулів. Це робить його ідеальним вибором для дослідників та інженерів з різних галузей, таких як електротехніка, механіка, акустика, оптика, біоінженерія та інші. Крім того, COMSOL Multiphysics має велику спільноту користувачів і форум, де можна знайти відповіді на багато запитань і проблем.

2.2. Плюси та мінуси використання

Серед плюсів COMSOL Multiphysics використання можна зазначити:

- Легкий до використання інтерфейс (схожий з пакетом Microsoft Office, Рис. 2.1)
- 2) Гнучкість у використанні (комбінування різних функцій)
- 3) Експортування та імпортування з бібліотек
- 4) Варіативність 3D функціоналу
- 5) Розробка програми на потужних алгоритмах
- 6) Широкі налаштування системи та модулів
- 7) Хмарна інтеграція (зберігання на хмарному диску)

Серед інших мінусів теж присутні:

- Висока конкуренція (більшість користувачів знаходять інші забезпечення легшими для використання)
- 2) Високі технічні вимоги комп'ютера
- 3) Необхідність в навичках та тренуванні
- Висока кількість споживаної енергії та швидкодія (для хорошої швидкості необхідно мати відеокарту Nvidia RTX 3090 або подібну від AMD)

■ L 🍃 🛛 🔍 ト ち さ 目 🏦 🖷 🗰	😻 🖳 🗸 I	Untitled.mp	ph - COMSOL Multiphysics	- a ×
File Home Definitions Geometry Materials	Physics Mesh Study Results Developer	Electric Field (emw)		?
Plot Plot Plot	El Line E Arrow Line I Image S Contour I Mesh Streamline ₹ Annotation Plots · Add Plot	 Color Expression III Material Appearance Deformation Filter Transparency Attributes 	More More More Second Point for Cut Line Second Point for Cut Plane Norm	tic Galmage +til IIII Animation → nal 1/6 Export
Model Builder • ■ • ● ● ● Orinions ● ● ● ● Orinions • ◎ Grondry 1 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	Settings 3D Pict Group ■ Pict life ← ↔ → → = ▼ Label: Electric Field (ermw) ▼ Data Dataset: Study 1/Paramet Parameter value (lam (m)): 1E-5 Parameter value (lam (m)): 1E-5 Parameter value (lam (m)): 23.079 ▷ Selection ▷ Title ▼ Pict Settings View: Latomatic □ Popagate hiding to lower dimensions □ Popagate kings to lower dimensions □ Popagate kings to lower dimensions □ Pict dataset edges Color: From theme Frome Spatial (v, y, a) ▼ Color Legend ♥ Show winnum and minimum values ◎ Show winnum and minimum values ◎ Show wints Position: □ Fight Text color: From theme ▷ Number Format	ric Solutions 1 (sol2)	Graphics Q. Q. Q. + El + r In In In C. + Or - Or	4.13×10 ⁷ ×10 ⁴ M ×10 ⁵ M ×10 ⁵ M ×10 ⁵ M 4 4 3.5 - 2.5 - 2.5 - 1 - 3.5 - 1 - 0.5 - 0 - 0.5 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0
		1.78 GB 2.03 GB		

Рисунок 2.1 - Інтерфейс програми

2.3. Тестовий модельний метаматеріал

Метаматеріал для випробовування на Рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Структура модельного поглинаючого тестового метаматеріалу (шар золота, над ним підкладка з карбіду кремнію та елементи L-форми із золота)

Поверхня має періодичну структуру і повторюється по осям х та у. Всі виміри та константи для роботи з об'єктом наведено на Рис 2.3.

Спочатку в програмі зробимо геометрію для метаповерхні зі всіма шарами. Для цього створюється об'єкт «Block» і розбивається на шари з відповідною висотою по осі z. Детальніше на Puc. 2.4.

Name	Expression	Value	Description
td	0.27[um]	2.7E-7 m	Товщина SiC
tm	0.1[um]	1E-7 m	Товщина Au
Р	2.6[um]	2.6E-6 m	Період метаповерхні
d1	0.4[um]	4E-7 m	Вимір L-поверхні
L	0.8[um]	8E-7 m	Вимір L-поверхні
W	0.4[um]	4E-7 m	Вимір L-поверхні
Imin	4.5[um]	4.5E-6 m	Мін. довж. хвилі
lmax	10[um]	1E-5 m	Макс. довж. хвилі
lam	lmax	1E-5 m	Довж. хвилі
PML	0.1*lam	1E-6 m	Товщина PML шару
Air	lam/2	5E-6 m	Товщина шару повітря
Theta	45[deg]	0.7854 rad	Кут падіння
Phi	0[deg]	0 rad	Кут поляризації

Рисунок 2.3 - Головні константи та виміри для моделі

▼ Siz	ze and Shape		
Width	P		m
Depth	P		m
Height	t: tm+td+tm+Air+Pl	ML	m
▼ Pc	sition		
Base:	Corner		•
x:	0		m
y:	0		m
z:	0		m
▼ Ax	ris		
Axis ty	pe: z-axis		•
▼ Ro	otation Angle		
Rotatio	on: 0		deg
▼ Co	oordinate System		
Work	plane: xy-plane		▼ =
▼ La	yers		
₩ Lay	yer name	Thickness (m)	
Layer	1	tm	^
Layer	2	td	
Layer	3	tm+Air	~

Рисунок 2.4 - Характеристики головного блоку геометрії

Далі створюються два L-об'єкти, які можна зробити з об'єкту «Work Plane» а потім застосувавши «Extrude» до областей. Отримані структури на Рис. 2.5 та Рис. 2.6.



Рисунок 2.5 - Об'єднана структура для L-об'єктів



Рисунок 2.6 - Витіснені L-об'єкти

Далі для кожного об'єкту необхідно накласти його матеріал, умови та хвильове рівняння.

Для повітря використаємо вбудований в бібліотеку програми матеріал «Air». Для карбіду кремнію необхідно вписати його характеристики вручну. Список характеристик для нього наведений на Рис. 2.7.

**	Property	Variable	Value	Unit	Property group
\square	Relative permeability	mur_iso ;	1	1	Basic
\square	Loss tangent, dissipation factor	tanDelta	0.003	1	Loss tangent, dissipat
\square	Relative permittivity (real part)	epsilonPri	10.8	1	Loss tangent, dissipat

Рисунок 2.7 - Характеристики SiC

Для золота матеріал вводитися не буде, лише хвильове рівняння Друда-Лоренца та його характеристики.

Далі вводимо хвильові рівняння для всіх реальних матеріалів та періодичні умови для того щоб об'єкт представляв з себе періодичну метаповерхню. Всі області взяті з Рис. 2.2.

Для SiC налаштування наведені на Рис. 2.8, а для Au – на Рис. 2.9.



Рисунок 2.8 - Налаштування хвильового рівняння карбіду кремнію (всі стандартні, окрім заданих на зображенні)

 Electric Displacement Fi 	eld			
Electric displacement field mo	del:			
Drude-Lorentz dispersion m	odel		•	
$\epsilon_{\rm r} = \epsilon_{\infty} + \sum_{j=1}^{M} \frac{f_j \omega_{\rm p}^2}{\omega_{\rm 0j}^2 - \omega^2 + \omega_{\rm 0j}^2}$	$\frac{1}{i\Gamma_j\omega}, \ \sigma = 0$			
Relative permittivity, high-free	quency:			
ϵ_{∞} User defined			•	
1			1	
lsotropic			•	
Plasma frequency:				
ω _P 1.2e16[rad/s]			rad/s	
Oscillator strength (1)	Resonance frequency (rad/s)	Damping in time (rad/s)		
1	0	10.5e13[rad/s]		
↑↓+≔,► 😡				
 Magnetic Field 				
Constitutive relation:				
Relative permeability -				
$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$				
Relative permeability:				
$\mu_{ m r}$ User defined			•	
4				
1			1	

Рисунок 2.9 - Налаштування хвильового рівняння золота (всі стандартні, окрім заданих на зображенні)

 Periodicity Settings 	
Type of periodicity:	
Floquet periodicity	
k-vector for Floquet periodicity:	
From periodic port	

Рисунок 2.10 – Необхідні налаштування періодичності по ОХ та ОУ (зі стандартними налаштуваннями, умови не будуть брати до уваги порт падіючих хвиль, тому необхідно вказати що періодичність)

Далі налаштовуємо періодичні умови для граней по осях х та у, геометрія яких наведена на Рис. 2.11 та 2.12. Для даних умов необхідно додати, щоб вони мали періодичність саме з порту.



Рисунок 2.11 – Грані моделі по ОУ, виділені для умови періодичності



Рисунок 2.12 - Грані моделі по ОХ, виділені для умови періодичності



Рисунок 2.13 – Грань з повним розсіюванням



Рисунок 2.14 - Періодичний порт з електричним полем (падаюча хвиля)

Далі налаштовуємо періодичний порт та умови розсіювання на границі. Налаштування для порту на Рис. 2.14 та Рис. 2.15, а геометрія границі на Рис. 2.13.

₹ F	Port Properties			
Port	name:			
1				
Туре	of port:			
Pe	riodic		•	
Wave	e excitation at this port:			
Or	1		•	
E	nable active port feedback			
Port	input power:			
$P_{\rm in}$	1[W]		W	
√ /	Activate slit condition on interior port			
Slit t	ype:			
Do	omain-backed		•	
То	ggle Power Flow Direction			
₹ F	Port Mode Settings			
Mod	e field represents the outgoing wave.			
Inpu	t quantity:			
Ele	ectric field		•	
Elect	ric mode field amplitude:			
	0	x		
E ₀	1	у	V/m	
	0	z		
Eleva	ation angle of incidence:			
α_1	Theta		rad	
Azim	outh angle of incidence:			
α_2	Phi		rad	

Рисунок 2.15 - Умови для періодичного порту



Рисунок 2.16 - Геометрія РМL (штучнк розсіююче середовище)

Після всіх маніпуляцій з об'єктами ми маємо модель нашої метаповерхні, але її ще треба зробити сітку та засимулювати в програмі. Для мешування обрано сітку «Finer», що наведена на Рис. 2.17, а дані симуляції наведено на Рис. 2.18.



Рисунок 2.17 - Сітка для об'єкту в якій приховано шар з повітрям

Parametric Swe = Compute C	eep Update	Solution		
Label: Parametr	ric Sweep			Ē
 Study Setting 	gs			
Sweep type:	All com	binations		•
Parameter na	me	Parameter value list	Parameter unit	
lam (Довж. хв	илі) 🔻	range(Imin,(Imax-(Imin))/150,Imax)	m	

Рисунок 2.18 – Змінюваний параметр симуляції, а саме довжини хвилі

Далі після симуляції моделі маємо результати, які необхідно подати у вигляді графіків поглинання та розподілення електромагнітних хвиль. За налаштуваннями на Рис. 2.19 отримуємо залежність поглинання від довжини хвилі на Рис. 2.20.

▼ Data				
Dataset:	Study 1/Parametric Sol	utions 1 (so	12) -	
Solution parameters:	Manual			•
Parameter selection (lam):	All			•
Parameter selection (freq):	All			•
▼ y-Axis Data			$\leftarrow \rightarrow + \bullet$	₹ •
* Expression		Unit	Description	
1-abs(emw.S11)^2		1		
▼ x-Axis Data			i − 1	•
Axis source data:				
All solutions				•
Parameter:				
Expression				•
Expression:				
c_const/freq				
Unit:				
μm				•
Description:				
довжина хвилі				

Рисунок 2.19 - Налаштування залежності поглинання від довжини хвилі



Рисунок 2.20 - Залежність поглинання від довжини хвилі



Рисунок 2.21 - Округ з найбільшим поглинанням з Рис. 2.20

Як бачимо із залежності метаматеріал має дві смуги поглинання хвиль, але ще необхідно впевнитися що на заданій довжині хвилі метаматеріал поглинає в необхідних областях, а саме найбільш великі зміни повинна бути напруженість на L-об'єктах. Тому налаштуємо графічне відображення 3D розрізу поля на границі шару карбіду кремнію та L-об'єктів з золота. Налаштування наведені на Рис. 2.22. Розріз будемо проводити на довжині хвилі, поглинання якої близьке до 1. 3 Рис. 2.21 можемо побачити необхідний діапазон.

▼ Data	
Dataset:	Study 1/Parametric Solutions 1 (sol2)
Parameter value (lam (m)): 7.58E-6
Parameter value (freq (TH	z)): 39.55 🗸
 Expression 	← → 📺 ▼ 🔰 ▼
Expression:	
emw.Ez	
Unit:	
V/m	•
Description:	
Electric field, z-compone	nt
▷ Title	
 Multiplane Data 	
— X-planes	
Entry method: Numbe	er of planes 🔹
Planes: 0	
- Y-planes	
Entry method: Number	er of planes 🔹
Planes: 0	
Z-planes	
Entry method: Coordi	nates 🔹
Coordinates: tm+td	m 🛄

Рисунок 2.22 - Параметри 3D розрізу



Рисунок 2.23 - Розподіл поля по розрізу межі між шаром карбіду кремнію та L-об'єктами з золота для високого поглинання.



Рисунок 2.24 - Розподіл поля по розрізу межі між шаром карбіду кремнію та L-об'єктами з золота для низького поглинання

На Рис. 2.23 можемо бачити що напруженість сконцентрована на Lоб'єктах, а оскільки це періодична поверхня, то на інших можемо побачити таку ж ситуацію.

Тепер подивимося на довжину хвилі з найменшим поглинанням. З Рис. 2.20 можемо бачити що найменшим поглинанням володіє довжина 4,8..4,9 мкм. На Рис. 2.24 можемо побачити різницю на даній довжині хвилі.

Отже, з даного на Рис. 2.24 зображення бачимо, що на даній картинці загалом менша температура слайсу розподілу поля ніж на Рис. 2.23, а також на один порядок менше максимальне значення поля.

В подальшому опис моделювання буде вестися скороченіше, оскільки загальні налаштування займають багато місця в роботі.

4.5. Методи оптимізації моделювання

Оскільки програмно COMSOL Multiphysics використовує багато ресурсів, то необхідно виконувати моделювання швидко та не затратно в часі.

Першим із методів пришвидшення є вибір більш поганої по якості сітки. Основні види сіток, які доступні в COMSOL Multiphysics, включають:

- 1. Сітка трикутників (Triangular mesh): Це найпростіший тип сітки, який складається з трикутників. Використовується для моделювання двовимірних областей.
- 2. Сітка чотирикутників (Quadrilateral mesh): Цей тип сітки складається з чотирикутників і також використовується для моделювання двовимірних областей.
- Сітка тетраедрів (Tetrahedral mesh): Цей тип сітки використовується для моделювання тривимірних областей. Вона складається з тетраедрів, які охоплюють об'єм.

- Сітка гексаедрів (Hexahedral mesh): Цей тип сітки також використовується для моделювання тривимірних областей. Вона складається з гексаедрів, які заповнюють об'єм.
- 5. Сітка змішаного типу (Mixed mesh): У COMSOL Multiphysics також можна використовувати комбінацію різних типів сіток для складних геометрій. Наприклад, використовуються тетраедри для моделювання одних ділянок області і гексаедри для інших ділянок.

Кожен тип сітки має свої переваги і недоліки, і вибір залежить від конкретної задачі моделювання.

Також на вибір програмно налаштовано такі якості сіток:

- 1. «Extremely fine» (найкраща)
- 2. «Extra fine»
- 3. «Finer»
- 4. «Fine»
- 5. «Normal» (звичайна)
- 6. «Coarse»
- 7. «Coarser»
- 8. «Extra coarse»
- 9. «Extremely coarse» (найгірша)

Але при роботі необхідно врахувати факт того, що гірша сітка може видати неправильні значення при моделюванні. Приклад такого на Рис. 2.25 та 2.26.

При симуляції можна використати зміщення невеликої моделі, яка здатна поміститися в оперативну пам'ять. Наприклад, на Рис. 2.27-2.28 показано як при цьому виглядає процес симуляції.

Також для оптимізації можна зменшувати модель до найменших розмірів, якщо вона періодична, як і в випадку даної роботи.



Рисунок 2.25 – Розподіл поля при гіршій сітці



Рисунок 2.26 – Розподіл поля при кращій сітці та оптимізації (зібрано з трьох симуляцій зі зміщенням)

Label: Opt	imization parameters			,
 Parame 	eters			
Name	Expression	Value	Description	
xt	0[m]	0 m		
yt	0[m]	0 m		
zt	0[m]	0 m		

Рисунок 2.27. Оптимізаційні параметри

🐟 Default Model Inputs	🔼 📲 Build Selected 👻 🏢 Build All Objects 📳	
🌐 Materials		
🔺 🛅 Component 1 <i>(comp1</i>)	Label: Move 1	,=
Definitions	- lund	
Geometry 1	* Input	
🕎 Block 1 <i>(blk1</i>)	Input objects:	
A 😫 Work Plane 1 (wp1)	hil-1	
Plane Geometry		Ê
Circle 1 (c1)	exti	in the second se
Circle 2 (c2)		.Ψ. 100
$\Box Difference I (dif I)$		
Rectangle I (rl) Detete 1 (ret1)		
Difference 2 (dif2)		
\square Circle 2 (all 2)	🔲 Keep input objects	
Circle 4 (c4)		
Bectangle 2 (r2)	 Displacement 	
\square Rectangle 3 (r3)	Specify: Displacement vector	•
Notate 7 (rot7)	shamit.	
Union 1 (uni1)	x: xt	m
🄄 Copy 1 (copy 1)	y: yt	m 📖
State 2 (rot2)		
👏 Rotate 3 <i>(rot3)</i>	z: zt	m 📶
🏷 Rotate 4 (rot4)	- Constitute Cutom	
👏 Rotate 5 (rot5)	Coordinate System	
👏 Rotate 6 (rot6)	Work plane: xv-plane	▼ Ξ+
Array 1 (arr1)	with the second s	
Union 2 (uni2)	 Selections of Resulting Entities 	
View 2		
Extrude 1 (ext1)	Resulting objects selection	
IVIove I (mov I) Earm Union (fin)	Show in physics: Domain selection	
Materials	Color	
	Hone Hone	

Рисунок 2.28 – Об'єкт «Моve», який буде за значеннями оптимізаційних параметрів

зміщувати модель

mat1.mph (root) Image: Mathematical Action in the second secon	= Compute C Upda	te Solution	
Pi Parameters 1 Pi Parameters 2	 Study Settings 		
Pi Optimization parameters	Sweep type: 🛛 🔍 All d	combinations	•
🞸 Default Model Inputs 🏟 Materials	Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
Component 1 (comp 1)	xt 🔻	0	m
Definitions	vt •	0	m
Block 1 (blk1)	zt •	0	m
 ▲ Work Plane 1 (wp l) ▶ A Plane Geometry ▶ ₩ View 2 ₩ Extrude 1 (ext1) 	↑↓+ ≔ ⊾ ► — Memory settings for	🗲 🛄 🛄	
	Keep solutions: All		•
Materials	 Output While Solv 	ing	
Electromagnetic Waves, Frequency Doma Mesh 1	Plot	5	
🔺 👓 Study 1	Plot group: Electric	: Field (emw)	- 1
Parametric Sweep			
🕅 Step 1: Frequency Domain	Probes: All		•
Solver Configurations	Accumulated prob	e table	

Рисунок 2.29 – Зміна параметрів, яку можна використати для проходження моделі по необхідним проміжкам, які можна зібрати в загальну картину. Також необхідно встановити «All combiantions», щоб отримати всі комбінації



Рисунок 2.30 – Результати при зміні значень для оптимізації

Наприклад можна зменшити модель «6 рядків 6 стовпців» на Рис. 2.31 до «36 комірок» на Рис. 2.32.

Але при такому моделюванні не завжди красиво виходять розрізи через маленький розмір деяких, тому даний метод оптимізації ситуативний.



Рисунок 2.31 - Модель «6 рядків та 6 стовпців»



Рисунок 2.32 - Модель «36 комірок»

3. МЕТАМАТЕРІАЛИ З ФАЗОВИМ ГРАДІЄНТОМ

3.1. Структура та елементи метаматеріалу

Структура метаматеріалів складається з макроскопічно малих штучних елементів, розмір яких значно менше від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Кожен елемент метаматеріалу взаємодіє з електромагнітними полями в його навколишньому середовищі, що дозволяє досягти властивостей, недоступних для природних матеріалів.

Основні елементи структури метаматеріалів - це резонатори та петлі. Резонатори - це структури, які мають певну форму і розмір, що дозволяє їм резонувати на певних частотах. Петлі - це провідники, зв'язані з резонаторами, які допомагають створити мікроіндуктивності та мікроконденсатори, що відповідають за ефективну магнітну та діелектричну проникність метаматеріалу. Вони можуть мати різну форму та розміри, що дозволяє отримувати різні електромагнітні властивості метаматеріалу.

Крім того, структура метаматеріалу також може включати додаткові елементи, такі як діелектричні пластини, металеві дроти, джерела живлення та інші елементи, що допомагають досягти певних електромагнітних властивостей. Орієнтація та розміщення елементів метаматеріалу також можуть впливати на його електромагнітні властивості.

Розмір елементів метаматеріалу також грає важливу роль у їхній структурі та властивостях. Зменшення розміру елементів призводить до збільшення їхньої поверхні відносно об'єму, що дозволяє досягнути більш високої ефективності метаматеріалу. Крім того, зменшення розміру елементів також дозволяє працювати з вищими частотами, оскільки довжина хвилі електромагнітної хвилі скорочується при збільшенні частоти.

Окрім розміру та форми елементів, важливими параметрами структури метаматеріалу є взаємне розташування елементів та їхні орієнтації. Ці параметри

можуть бути використані для досягнення певних властивостей метаматеріалу, наприклад, залежно від типу метаматеріалу, можна досягнути негативної дисперсії, надзвичайного поглинання, або ефекту скорочення хвилі.

Останнім часом, дуже популярними стали метаматеріали зі структурою у вигляді періодичної решітки, що дозволяє досягнути додаткових ефектів, таких як ефект Доплера. При цьому, розмір періоду решітки є критичним параметром, адже він повинен відповідати довжині хвилі електромагнітної хвилі, що дозволяє отримати ефективну взаємодію між елементами решітки.

Один з головних елементів метаматеріалу - це мета-атом. Мета-атом - це електромагнітний резонатор з нестачею маси, який може взаємодіяти з електромагнітною хвилею на деякій певній частоті. Мета-атоми можуть мати різні форми і розміри, такі як круги, квадрати, трикутники, прямокутники тощо. Вони можуть бути також виготовлені з різних матеріалів, таких як метали, пластмаси, кераміка та інші.

Інший важливий елемент метаматеріалу - це мета-період. Мета-період - це структура, що складається з мета-атомів, які розташовані в певному порядку. Мета-період може мати різні форми та розміри, в залежності від призначення метаматеріалу. Найчастіше використовуються дво- та тривимірні мета-періоди.

Також, важливим елементом метаматеріалу є мета-поверхня. Метаповерхня - це структура, що складається з мета-атомів або мета-періодів, що розташовані на поверхні. Мета-поверхні можуть мати різні форми, такі як плоскі, конічні, сферичні та інші. Вони використовуються для керування хвильовими процесами.

Петлі та резонатори є базовими елементами метаматеріалів та метаповерхонь.

Петля - це звичайно кругла або еліптична форма з провідного матеріалу, яка може мати різні розміри та конфігурації. Петлі зазвичай використовуються як елементи для реалізації індуктивності.

Резонатор - це елемент, який може підсилювати або пригнічувати електромагнітні хвилі в залежності від його конструкції та параметрів. Резонатори можуть бути виготовлені з провідного матеріалу, наприклад, міді, або мати форму діелектричних структур. Резонатори зазвичай використовуються для реалізації ємності та індуктивності.

Петлі та резонатори використовуються в метаматеріалах для контролю характеристик електромагнітних хвиль, таких як фазовий градієнт, кут відхилення, поляризація тощо. Комбінуючи різні розміри та конфігурації петель та резонаторів, можна створити багато різних типів метаматеріалів зі специфічними характеристиками.

Форма петель та резонаторів може бути різною і залежить від конкретної задачі та вимог до метаматеріалу. Зазвичай петлі мають круглу або еліптичну форму, а резонатори можуть мати форму куба, кільця, квадрата тощо.

Залежно від конструкції метаматеріалу, петлі та резонатори можуть бути розташовані на поверхні матеріалу (у випадку метаповерхонь) або внутрішніми елементами метаматеріалу. Резонатори зазвичай розташовуються на поверхні матеріалу, в той час як петлі можуть бути внутрішніми елементами метаматеріалу.

За допомогою петель та резонаторів можна створювати різноманітні структури метаматеріалів, такі як негативні індексні метаматеріали, метаматеріали для керування поляризацією електромагнітних хвиль, метаматеріали для керування фазовим градієнтом та багато інших.

3.2. Конструктивні особливості метаматеріалів

Конструктивні особливості метаматеріалів включають [4]:

 Розмір та форма елементів: Розмір та форма елементів метаматеріалу визначають його електромагнітні властивості. Часто використовуються невеликі елементи, наприклад, петлі або резонатори, розмір яких менший за довжину хвилі. Форма елементів може бути круглою, квадратною, кільцеподібною або еліптичною.

- Матеріал елементів: Матеріал елементів метаматеріалу також впливає на його електромагнітні властивості. Зазвичай використовують металеві або діелектричні матеріали зі спеціальними властивостями, наприклад, зі змінними діелектричною проникністю або магнітними властивостями.
- 3. Розміщення елементів: Розміщення елементів метаматеріалу також важливе для досягнення певних електромагнітних властивостей. Елементи можуть бути розташовані на поверхні матеріалу або внутрішніми елементами метаматеріалу. Розташування елементів в різних шарах може створювати різні властивості метаматеріалу.
- Орієнтація елементів: Напрямок орієнтації елементів метаматеріалу також впливає на його електромагнітні властивості. Напрямок може бути змінюваним, що дозволяє створювати метаматеріали з різноманітними властивостями.
- 5. Геометричні параметри: Геометричні параметри метаматеріалу також впливають на його електромагнітні властивості. Наприклад, ширина та відстань між елементами можуть визначати діапазон частот, на яких метаматеріал буде працювати, а також його ефективну діелектричну проникність та магнітну проникність.
- 6. Композиція: Метаматеріали можуть бути виготовлені з різних матеріалів та їх комбінацій. Композиція матеріалів може впливати на ефективну діелектричну проникність та магнітну проникність метаматеріалу, а також на його ефективну віддачу.
- 7. Товщина: Товщина метаматеріалу також впливає на його електромагнітні властивості. Товщина поверхневого метаматеріалу може бути дуже тонкою, меншою за довжину хвилі, що дозволяє досягнути ефекту плоскої лінзи або метаповерхні.

3.3. Метаматеріал з фазовим градієнтом

Метаматеріал з фазовим градієнтом - це клас метаматеріалів, що характеризуються наявністю зміни фазового зсуву між різними точками в метаматеріалі. Це досягається за допомогою періодичного розташування мікрота наноструктур на поверхні матеріалу [3].

У звичайних матеріалах фазовий зсув характеризується взаємодією електромагнітної хвилі зі змінами електричної та магнітної поляризації матеріалу, які залежать від властивостей матеріалу та геометрії структури. У метаматеріалах з фазовим градієнтом, зміна фазового зсуву відбувається не тільки за рахунок властивостей матеріалу, але й за рахунок додаткової геометричної структури, що дозволяє досягти більш глибокої та точної контролю зсуву фази електромагнітної хвилі.

Метаматеріал з фазовим градієнтом для відхилення електромагнітних хвиль може складатися з двох шарів. Перший шар - це провідна пластина, на якій розміщується другий шар - періодична матриця з елементів.

Другий шар складається з квадратних пластинок, розташованих у вигляді решітки. Кожна пластинка має розміри, що залежать від потрібного фазового зсуву та частоти падаючої хвилі. Пластинки розміщуються зміщено відносно одна одної на кілька мікрометрів, що забезпечує різну фазу для різних точок у просторі.

Між пластинками може бути вакуум або діелектрик, що зменшує взаємодію між ними та підвищує ефективність метаматеріалу. Важливо забезпечити правильну геометрію та розташування пластинок для досягнення потрібного фазового зсуву та ефективності.

Така структура метаматеріалу з фазовим градієнтом може бути виготовлена за допомогою методів мікроелектроніки, наприклад, літографії, де спочатку на провідній пластині створюється шар резисту, а потім за допомогою експозиції та розмивання формуються пластинки. Для забезпечення високої точності та контролю розмірів можуть використовуватися методи нанолітографії та електронної мікроскопії.

Форма пластин другого шару метаматеріалу з фазовим градієнтом може бути квадратною, ромбовидною або шестикутною, в залежності від конкретного дизайну та вимог щодо ефективності. Головна вимога до форми пластин - їх повинно бути можливо точно і рівномірно розташувати у вигляді періодичної решітки для досягнення потрібного фазового зсуву. Крім того, розмір і ширина пластин може бути налаштована для досягнення бажаної ефективності відхилення електромагнітних хвиль.

3.4. PGM за допомогою фази Панчаратнама-Беррі

Завдяки багатофункціональності PGM, вони здобули значну увагу в останні роки, і було запропоновано різноманітні види. Ключовим аспектом при проектуванні є спосіб створення метаповерхні, що генерує фазовий градієнт при впливі електромагнітної хвилі.

Зазвичай для створення фазового градієнту на метаповерхні використовуються два методи.

Перший метод полягає у поступовій зміні розміру та форми резонаторів у різних одиницях, що дозволяє вводити відповідну резонансну фазову різницю між сусідніми одиницями. Цей підхід дозволяє створити метаповерхню з просторово-залежною фазовою відповіддю, яка генерує фазовий градієнт при падінні електромагнітної хвилі.

Другий метод полягає в поступовому обертанні анізотропних або хіральних резонаторів у різних одиницях, щоб вводити відповідну геометричну фазову різницю між сусідніми одиницями. У цьому випадку використовується так звана геометрична фаза Панчаратнама-Беррі, яка генерується при перехреснополяризованому передавальному або співполяризованому коефіцієнті відбиття при циркулярно-поляризованому випромінюванні. Ці методи дозволяють реалізувати різноманітні РGM, включаючи контроль форми фронту хвилі, перенаправлення відбитої або заломленої хвилі в бажаному напрямку, а також генерацію вихрових пучків та інші незвичайні явища. Для створення PGM з коефіцієнтом відбиття, наближеним до 1,0 при кругово-поляризованому випромінюванні, можна використовувати метод поступового обертання анізотропних резонаторів. Цей метод широко застосовується для проектування різних PGM, і багато PGM було запропоновано на основі різних відповідних метаповерхонь. Зокрема, на основі ультра-широкосмугової метаповерхні зі зміною поляризації або збереженням поляризації можна розробити PGM, яка працюватиме в ультраширокому діапазоні частот, оскільки геометрична фаза Панчаратнама-Беррі теоретично може бути згенерована при будь-якій частоті, і робочий діапазон розробленого PGM може зберігатися таким самим, як у вихідної метаповерхні.

3.5. Залежність кута відбивання від фазового градієнту

Закон Снелліуса, також відомий як закон заломлення, описує поведінку світла при переході з одного оптичного середовища в інше. Зокрема, закон Снелліуса встановлює зв'язок між кутами падіння і заломлення світлового променю на границі між двома середовищами з різними оптичними властивостями, такими як показник заломлення.

Закон Снелліуса можна записати у вигляді:

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2), \qquad (3.1)$$

де: n1 та n2 - показники заломлення першого та другого середовища відповідно; θ1 та θ2 - кути падіння та заломлення відповідно, вимірювані відносно нормалі до поверхні розділу середовищ.

У випадку фазового градієнту, показник заломлення залежить від координат у просторі, що призводить до зміни напрямку поширення світла в середовищі. В такому випадку, закон Снелліуса залишається справедливим на межі двох наближених точок у середовищі, але кути падіння і преломлення можуть змінюватися залежно від місця у просторі.

3 фазовим градієнтом можна спрощено описати даний закон [3]:

$$\sin(\theta_r) = \sin(\theta_i) \pm \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx},$$
(3.2)

де θ_r та θ_i – кути відбивання та падіння, λ_0 – довжина падаючої хвилі, $\frac{d\phi}{dx}$ – фазовий градієнт.

Якщо врахувати що у нас періодична поверхня, то фазовий градієнт можемо описати наступним чином [3]:

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{\varphi}{L_i},\tag{3.3}$$

при цьому поверхня вищого порядку має максимальний кут φ та довжину L_i .

Тепер можемо записати загальний вигляд формули кута відбивання:

$$\theta_r = \arcsin\left(\sin(\theta_i) \pm \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\varphi}{L_i}\right),$$
(3.4)

4. РОЗРОБКА ФІНАЛЬНОГО МЕТАМАТЕРІАЛУ

4.1. Розмірність елементів

Оскільки в завданні роботи вказувалося, що метаматеріал повинен працювати на частотах 0,3..2 ГГц, то розміри елементів повинні входити в довжину хвилі, а саме для таких частот довжини варіюються в діапазоні, який можна розрахувати за формулою [2]:

$$\lambda = \frac{c}{v},$$
(4.1)

$$\lambda_{1} = \frac{c}{v_{1}} = \frac{3 \cdot 10^{8} \frac{M}{c}}{0.3 \cdot 10^{9} \Gamma \mu} = 1 \text{ M},$$

$$\lambda_{2} = \frac{c}{v_{2}} = \frac{3 \cdot 10^{8} \frac{M}{c}}{2 \cdot 10^{9} \Gamma \mu} = 0.15 \text{ M},$$

З обчислень діапазон - від 0,15 до 1 м. При розрахунках та симуляції можливе коректування розмірів, тому точно сказати їх на даний момент неможливо.

4.2. Загальний вигляд поверхні з фазовим градієнтом

Структура складається з періодично накладених поверхонь вищого порядку, які складаються з n комірок (залежно від розміру простої комірки) та фіксованого кут Δφ.

Кожна наступна комірка за арифметичною прогресією має кут повороту більший ніж попередня на величину Δφ (максимум залежить від симетрії, на малюнку - 180°).

Вигляд такої ПВП можна побачити на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 - Вигляд накладених один на одного поверхонь вищого порядку (одна ПВП має 18 комірок, всього 18 рядів)

4.3. Пошук розмірності елементів метаматеріалу

Для пошуку розмірності будемо використовувати формулу (3.4) та простий скрипт на мові Python. За допомогою методу перебору значень знайдемо всі значення для таблиці залежності довжини комірки від кількості комірок ПВП. Значення в комірках таблиці – кількість кутів відбивання на проміжку частот 0,3..2 ГГц, які більше або рівні 30°. Скрипт наведено у додатках до дипломної роботи. До таблиці додано кольорову температуру, де червоний це найменше значення, а зелений - найбільше.

Варто зазначити, що при значенні n=1 немає фазового градієнту, що важливо для даної роботи, тому розглядати будемо лише діапазон 2..10. Також маловірогідним є розглядання n=2, оскільки фазовий градієнт при ньому слабший.

Р, м \		2			-	6	_		-	10
n	1	2	3	4	5	6	/	8 	9	10
0,06	0	20574	36308	48414	60522	72618	84720	96832	102933	88378
0,07	0	27919	42362	56480	70600	84720	98842	99993	78801	56463
0,08	687	32276	48414	64550	80686	96832	99993	75614	50086	24914
0,09	5016	36308	54464	72618	90774	102933	/8801	50086	22190	5500
0,1	10221	40342	60522	80686	100818	88378	56463	24914	5500	0
0,11	15433	44376	66568	88756	101/65	69229	34126	8118	45	0
0,12	20574	48414	72618	96832	88378	50086	15154	812	0	0
0,13	24762	52448	78670	103316	72421	30933	4402	0	0	0
0,14	27919	56480	84720	99993	56463	15154	194	0	0	0
0,15	30260	60522	90774	88378	40513	5500	0	0	0	0
0,16	32276	64550	96832	75614	24914	812	0	0	0	0
0,17	34298	68588	102481	62848	13155	0	0	0	0	0
0,18	36308	72618	102933	50086	5500	0	0	0	0	0
0,19	38330	76658	97650	37316	1290	0	0	0	0	0
0,2	40342	80686	88378	24914	0	0	0	0	0	0
0,21	42362	84720	78801	15154	0	0	0	0	0	0
0,22	44376	88756	69229	8118	0	0	0	0	0	0
0,23	46394	92790	59654	3435	0	0	0	0	0	0
0,24	48414	96832	50086	812	0	0	0	0	0	0
0,25	50408	100818	40513	0	0	0	0	0	0	0
0,26	52448	103316	30933	0	0	0	0	0	0	0
0,27	54464	102933	22190	0	0	0	0	0	0	0
0,28	56480	99993	15154	0	0	0	0	0	0	0
0,29	58504	94760	9641	0	0	0	0	0	0	0
0,3	60522	88378	5500	0	0	0	0	0	0	0
0,31	62538	81996	2596	0	0	0	0	0	0	0
0,32	64550	75614	812	0	0	0	0	0	0	0
0,33	66568	69229	45	0	0	0	0	0	0	0
0,34	68588	62848	0	0	0	0	0	0	0	0
0,35	70600	56463	0	0	0	0	0	0	0	0
0,36	72618	50086	0	0	0	0	0	0	0	0
0,37	74640	43701	0	0	0	0	0	0	0	0
0,38	76658	37316	0	0	0	0	0	0	0	0
0,39	78670	30933	0	0	0	0	0	0	0	0
0,4	80686	24914	0	0	0	0	0	0	0	0
0,41	82704	19664	0	0	0	0	0	0	0	0
0,42	84720	15154	0	0	0	0	0	0	0	0
0.43	86744	11320	0	0	0	0	0	0	0	0
0.44	88756	8118	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45	90774	5500	0	0	0	0	0	0	0	0
0.46	92790	3435	0	0	0	0	0	0	0	0
0.47	94812	1883	0	0	0	0	0	0	0	0
/	0 1014									

Таблиця 4.3.1 – Результати виконання скрипту на Python

4.4. Порівняння теоретичних матеріалів для виробництва

На стадії розробки було обрано саме FR-4, бо FR-4 (Fire Retardant-4) - це високоякісний, недорогий та широко застосовуваний ламінований склотекстоліт, який зазвичай використовується як основний матеріал для печатних плат. Його діелектрична проникність на частоті 1 МГц становить близько 4,4, а на частоті 1 ГГц - близько 4,3. Тангенс втрат на частоті 1 МГц становить близько 0,02, а на частоті 1 ГГц - близько 0,035.

Використання Al2O3 як матеріалу підкладки може мати свої переваги та недоліки порівняно з FR-4, залежно від конкретної задачі та вимог.

Основна перевага Al2O3 - це його висока твердість та міцність, що робить його більш стійким до механічних пошкоджень. Крім того, він має високу теплопровідність, що може бути корисною для певних застосувань.

Проте, є кілька недоліків у використанні Al2O3. По-перше, його діелектрична проникність зазвичай нижча, ніж у FR-4, що може призвести до зменшення ефективності деяких метаматеріалів, особливо тих, які використовують резонансні явища. Крім того, Al2O3 зазвичай дорожчий та складніше виготовляти, що може підвищити загальну вартість метаматеріалу.

У випадку з метаматеріалом, здатним відхиляти електромагнітні хвилі в діапазоні частот від 0,3 ГГц до 2 ГГц, можна зробити висновок, що FR-4 є досить підходящим матеріалом підкладки. FR-4 має діелектричну проникність близьку до вакууму, що забезпечує хорошу ефективність для багатьох типів метаматеріалів, включаючи ті, що використовують фазові градієнти. Крім того, FR-4 досить доступний та легко виготовляється, що дозволяє знизити вартість метаматеріалу.

Використано мідь як матеріал для резонаторів з декількох причин:

• Провідність: Мідь має дуже хорошу провідність для електромагнітних хвиль, особливо в радіочастотному діапазоні. Це дозволяє ефективно

використовувати мідь для створення резонансних структур, які реагують на падаючі хвилі та взаємодіють з ними.

- Електромагнітна сумісність: Мідь є електромагнітно сумісним матеріалом, що означає, що вона не викликає значних перешкод для проходження електромагнітних хвиль. Це дозволяє більш ефективно використовувати мідь для створення резонаторів, оскільки вона не впливає на їхню функціональність.
- Виготовлення: Мідь є доступним і широко використовуваним матеріалом, що дозволяє виготовляти резонатори з високою точністю та продуктивністю. Вона досить легко оброблюється та формується в потрібну геометричну конфігурацію.
- Термостабільність: Мідь має хорошу термостабільність, що дозволяє забезпечувати стабільну роботу резонаторів при зміні температури. Це особливо важливо для додаткової контролюється або зовнішньої змінної.

Враховуючи ці фактори, мідь є популярним вибором для резонаторів у багатьох метаматеріальних дослідженнях та застосуваннях. Проте, вибір матеріалу може залежати від конкретного дизайну та вимог системи, тому інші матеріали також можуть бути розглянуті залежно від контексту.

4.5. Моделювання

Для моделювання було обрано метаматеріал з поверхнею вищого порядку, що наведена на Рис. 4.2. Цей матеріал та його характеристики для високих частот було наведено в матеріалі «An ultra-wideband reflective phase gradient metasurface using Pancharatnam-Berry phase» [3]. Для зразку в даній роботі було змінено виміри, а також зроблено масштабування за допомогою множника. Для фазового градієнту було обрано 6 комірок для поверхні вищого порядку. А отже кожна наступна комірка буде мати кут повороту 30°, оскільки симетрія дозволяє використовувати максимальний кут в 180°.

Необхідні параметри для вимірів та змінних на Рис. 4.2-4.4.

 Parame 	eters		
* Name	Expression	Value	Description
P	100(mm)	0.1 m	Період метаматеріалу
n	6	6	Кількість комірок
PML	hair/20	0.29979 m	Товщина шару розсіюв.
hair	lmax*6	5.9958 m	Товщина шару повітря
hc	mult*1[mm]	0.0016667 m	Товщина шарів міді
I	mult*10(mm)	0.016667 m	Вимір комірки
g	mult*17[mm]	0.028333 m	Вимір комірки
w	mult*2[mm]	0.0033333 m	Вимір комірки
hs	mult*20(mm)	0.033333 m	Вимір комірки
r	mult*26(mm)	0.043333 m	Вимір комірки
mult	P/60[mm]	1.6667	Множник для розміру

Рисунок 4.2 – Блок параметрів основних вимірів

Setting: Parameter	s s		* 1
Label: Para	ameters 2		F
 Parame 	ters		
* Name	Expression	Value	Description
fmin	0.3[GHz]	3E8 Hz	Мінімальна частота хвилі
fmax	2[GHz]	2E9 Hz	Максимальна частота х
Imin	c_const/fmax	0.1499 m	Мінімальна довжина хв
Imax	c_const/fmin	0.99931 m	Максимальна довжина
Theta	8[deg]	0.13963 rad	Кут падіння
Phi	0[deg]	0 rad	Азимутальний кут падін

Рисунок 4.3 – Блок параметрів хвильових вимірів

abel: Para	ameters 3		
Parame	ters		
Name	Expression	Value	Description
dt.	0[m]	0 m	Оптимізаційна змінна
t	0[m]	0 m	Оптимізаційна змінна
vt	0(m]	0 m	Оптимізаційна змінна

Рисунок 4.4 – Блок параметрів оптимізаційних змінних

Також було створено наступну модель для симуляції, яку наведено на Рис. 4.5. Дана модель дозволить отримувати кут відбиття від поверхні без накладання хвиль одна на одну, що спричинено фазовим градієнтом.

Використані матеріали та області представлені на Рис. 4.6-4.9. Вибір даних матеріалів вже було пояснено раніше.



Рисунок 4.5 – Модель для симуляції

**	Material	Selection	
	FR4 (Circuit Board) (mat1)	Domain 2	
	Copper (mat2)	Domains 1, 6-41	
	Air (mat3)	Domains 3–5	

Рисунок 4.6 – Матеріали для симуляції



Рисунок 4.7 – Область FR-4



Рисунок 4.8 – Області міді





D-t-t-7 (+7)							
Kotate / (rot/) Union 1 (uni1)	Override and Contribution						
🔄 Copy 1 (copy 1)	▷ Equation						
Rotate 2 (rot2)		Port Properties					
Rotate 3 (rot3) Rotate 4 (rot4)							
Rotate 5 (rot5)	Port name:						
5 Rotate 6 (rot6)							
Union 2 (uni2)	Type of port:						
Array I (arr I)	User defined 🔹						
Extrude 1 (ext1)	Wave excitation at this port:						
Move 1 (mov 1)	0	On 🔹					
E Form Union <i>(fin)</i>	Enable active port feedback						
Materials	Port input power:						
FR4 (Circuit Board) (mat i)	Pin	P _{in} 1[W]					
Air (mat3)	v	Activate slit condition on interior port					
Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw)	Slit type:						
Wave Equation, Electric 1	Domain-backed						
Perfect Electric Conductor 1	То	agle Power Flow Direction					
Port 1							
Periodic Condition 1 X	 Port Mode Settings 						
Periodic Condition 1 Y	Mode field represents the outgoing wave. Input quantity:						
Electric Field 1							
Mesh 1	E	ectric field	•				
122 Parametric Sweep	Elec	Electric mode field:					
🕅 Step 1: Frequency Domain		cos(Theta)					
Solver Configurations	Eo	-sin(Theta)	V/m				
Solution 1 (sol1)		0 z					
ate Compile Equations: Frequency Domain	Pror	-	1				
Italian Solver 1	B	o					
Parametric Solutions 1 (sol2)	p 0 rad/m Mode phase:						
Parametric Solutions 2 (sol10)							
Parametric Solutions 3 (sol36)	θ_{in}	0	rad				

Рисунок 4.10 – Порт з вхідним полем, яке являє собою падаючу хвилю

Окрім стандартних налаштувань для хвиль, було додано ще два об'єкти на Рис. 4.10 та Рис. 4.11. Варто зауважити що умова періодичності накладається лише на ОХ.

Тепер необхідно зрозуміти яким чином теоретично буде працювати дана модель. На Рис. 4.12 наведено роботу даного зразку.

Також в її роботі є один нюанс, пов'язаний з програмним забезпеченням. COMSOL дозволяє робити сітку лише на один великий об'єкт, тому права частина це частина метаматеріалу без резонаторів. Якщо зробити об'єднання шару розсіювання для правої частини, не додаючи частину метаматеріалу, будемо мати помилку створення сітки, оскільки це не підтримується програмою.



Рисунок 4.11 – Умова періодичності (така ж сама як і в тестовому зразку)



Рисунок 4.12 - Схема теоретичної роботи моделі

Далі налаштовуємо параметри симуляції, такі як період метаповерхні. Дані наведено на Рис. 4.13 та Рис. 4.14.



Рисунок 4.13 – Змінювані параметри симуляції

Settings Frequency Domain = Compute C Update Solution				- 1			
Label: Frequency Domain				Ē			
 Study Settings 							
Frequency unit:	GHz			•			
Frequencies:	1			GHz 📊			
Load parameter values:	左 Browse 🔻	💽 Read	File	≣₀ ▼			
Reuse solution from previous step:	Auto			•			
Results While Solving							
▼ Physics and Variables Selection							
Modify model configuration for study step							
Physics interface	Solve for	Equation form					
● Electromagnetic Waves, Frequency Domai ✓ Automatic (Frequency domain)							
Values of Dependent Variables							
Mesh Selection							
Adaptation and Error Estimates							
Study Extensions							

Рисунок 4.14 – Хвильові параметри симуляції

Далі на Рис. 4.15-4.19 наведено розподіл хвиль та написано кути відбивання. Також всі хвилі, що будуть вважатися відбитими лежать в правій частині малюнку.



Рисунок 4.15 – Зразок з періодом 50 мм (не підходить через хаотичність поля)



Рисунок 4.16 – Зразок з періодом 60 мм (кут відбивання становить 30-31°)



Рисунок 4.17 – Зразок з періодом 70 мм (кут відбивання становить 25-26°)



Рисунок 4.18 – Зразок з періодом 80 мм (кут відбивання становить 19-20°)



Рисунок 4.19 – Зразок з періодом 90 мм (кут відбивання становить 16-17°)

Оскільки зі всіх зразків кут відбиття 30° та більше має 60 мм, а 50 мм вже має хаотичний розподіл. Значення більше 60 мм не є доцільними, бо кут падіння зменшується кожні 10 мм. Будемо обирати значення між 50 та 60 мм.



Рисунок 4.20 – Зразок з періодом 58 мм (кут відбивання становить 31-33°) (присутнє небажане відбиття, але відбиту хвилю все ж видно)

На Рис. 4.20 показано, що кут відбиття становить 31-33°, і це вже граничне значення, яке складно побороти.

Отже в результаті отримано метаматеріал з періодом 58 мм. Вигляд та структура описані на Рис. 4.21. Матеріали, на яких проводилися тести це підкладка з FR-4 та матеріал резонаторів - мідь.

На жаль, з теоретичними розрахунками фінальний метаматеріал не співпадає, тому вважаю їх бажаними, але недоцільними для практичного моделювання.



Рисунок 4.21 – Структура поверхні метаматеріалу

ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено дослідження широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics.

У розділі першому було розкрито загальну інформацію про метаматеріали, а також викладені класифікації матеріалів залежно від проникностей.

У другому розділі було проведено моделювання тестового модельного метаматеріалу, який мав поглинаючі властивості. Були досліджені залежності поглинання та розподіл поля зі значеннями.

Третій розділ присвячено детальному розгляду елементів та структури метаматеріалів. Також було описано метаматеріали з фазовим градієнтом, зокрема використану фазу Панчаратнама-Беррі.

У четвертому розділі було представлено фінальний метаматеріал, його симуляцію та висвітлено пов'язані з ним проблеми та нюанси.

Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics виявилося цінним інструментом для моделювання та аналізу широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів. Воно дозволило створити детальні моделі метаматеріалів та виконати чисельні розрахунки їх властивостей. Завдяки цьому, було можливо вивчити та оцінити різні параметри метаматеріалу, такі як кут відбиття та прохідність, що сприяло розумінню його ефективності та можливостей застосування.

У рамках роботи було спроектовано та зсимульовано широкосмуговий мікрохвильовий метаматеріал з аномальним кутом відбиття.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Cui T. J., Smith D. R., Liu R. Metamaterials: theory, design, and applications, Springer Science & Business Media, 2010. 376 p.
- 2. Eric LHeurette. Metamaterials and Wave Control, 2013. 240 p.
- Baoqin Lin. An ultra-wideband reflective phase gradient metasurface using Pancharatnam-Berry phase, 2017. Vol. 7, P. 13317-13325.
- 4. Zhou J., Koschny T., Kafesaki M., Soukoulis C. M. Magnetic and electric excitations in split ring resonators, 2009. Opt. Express 15, P. 17881-17890.
- 5. Padilla W. J., Taylor A. J., Zhang X. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies, 2006. P. 1-2.
- Zhang S., Liu N. Fundamentals of metamaterials, 2011. Vol.9(10), P. 3049-3070.
- 7. Chen H. T., Taylor A. J., Zhang X. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2009. Vol. 7, P. 13-24.
- Liu N., Guo H., Fu L., Kaiser S., Schweizer H., Giessen H. Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies, 2008. Nature Materials, 7(1), P. 31-37.
- Shalaev, V. M. Optical negative-index metamaterials, 2007. Nature Photonics, 1(1), P. 41-48.
- Chen H. T., Padilla W. J., Cich M. J., Azad A. K., Averitt R. D., Taylor A. J. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator, 2006. Nature Photonics, 3(3), P. 148-151.
- Holloway C. L., Kuester E. F., Baker-Jarvis J., Kabos P. A double negative (DNG) composite medium composed of magnetodielectric spherical particles embedded in a matrix, 2012. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 51(10), P. 2596-2603.

додатки

Додаток А

Код скрипту для розрахунку таблиці кутів відбивання

import math import numpy from openpyxl import Workbook

```
# functions
def angle1(phi, P, n, lamb, th_i):
    try:
        return math.asin(math.sin(th_i) + phase_grad(phi, lamb, P, n))
    except:
        return 5
```

```
def angle2(phi, P, n, lamb, th_i):
    try:
    return math.asin(math.sin(th_i) - phase_grad(phi, lamb, P, n))
    except:
    return 5
```

def phase_grad(phi, lamb0, P, n): return lamb0*phi/(2*math.pi*P*n)

def degr(th): deg = math.degrees(th) return abs(deg)

def isgreater30(th): return degr(th) > 30

constants and variables
phi = math.pi
c_const = 0.3*1e9
fmin = 0.3*1e9

```
fmax = 2*1e9
lmin = c const / fmax
lmax = c_const / fmin
th i1 = math.radians(-8)
th_i2 = math.radians(8)
step = 0.001
nums = numpy.arange(th_i1, th_i2, step)
nums2 = numpy.arange(lmin, lmax, step)
nums3 = numpy.arange(60/1000, lmax, 0.01)
# start of script
wb = Workbook()
ws = wb.active
ws.append(["] + [n for n in range(1, 11)])
for p in nums3:
  lst = [p]
  for n in range(1, 11):
     min_angle, max_angle = 0, 0
     min_len, max_len = 0, 0
     counter = 0
     for lambd in nums2:
       for i in nums:
          n1 = angle1(phi, p, n, lambd, i)
          n2 = angle2(phi, p, n, lambd, i)
          if n1 = 5 and n2 = 5 and isgreater30(n1) and isgreater30(n2):
            counter += 1
            if min len > 0:
               max\_len = lambd
            else:
               min_len = lambd
            if min_angle > 0:
               max_angle = i
            else:
               min_angle = i
     lst.append(counter)
     if counter > 0:
       # debug information
       print(f'p={p}, n={n}, count={counter}, '
           f'wavelen. range={max_len - min_len}, '
```

```
f'th_r range={max_angle - min_angle}, '
f'thr1={degr(angle1(phi, p, n, min_len, min_angle))}, '
f'thr3={degr(angle2(phi, p, n, min_len, min_angle))}, '
f'thr2={degr(angle1(phi, p, n, max_len, max_angle))}, '
f'thr4={degr(angle2(phi, p, n, max_len, max_angle))}, ')
else:
    print(f", end=")
print(f'------')
ws.append(lst)
```

```
wb.save('calculations.xlsx')
```