

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

До захисту допущено:

В.о. завідувача 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: «Захисне покриття середньочастотного 5G діапазону на основі метаматеріалів»

Виконав:

студент 4 курсу, групи ДП-92

Данилюк Олег Вадимович _____

Керівник: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Діденко Юрій Вікторович _____

Консультант з нормоконтролю: ст.викл.каф.МЕ, к.т.н.,

Королевич Любомир Миколайович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Діденко Юрій Вікторович _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2023 року

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__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Данилюку Олегу Вадимовичу

1. Тема роботи «Захисне покриття середньочастотного 5G діапазону на основі метаматеріалів», керівник роботи доц.каф.МЕ, к.т.н., доц., Діденко Юрій Вікторович, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р.
№ _____

2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2023

3. Вихідні дані до роботи

Вихідні данні до роботи є теоретична інформація, теоретична документація. З практичної частини: частотний діапазон 2,4 ГГц – 3,7 ГГц; коефіцієнт відбивання менше -10 дБ.

4. Зміст пояснювальної записки

Дипломна робота включає розроблення та моделювання захисного покриття.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Використання моделі структури за основу із публікацій.

6. Консультанти розділів роботи

7. Дата видачі завдання 17 квітня 2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Інструктаж з ТБ	17 квітня 2023 – 23 квітня 2023	
2	Огляд літературних джерел за темою роботи	17 квітня 2023 – 30 квітня 2023	
3	Ознайомлення із ПЗ для моделювання метаструктур	24 квітня 2023 – 7 травня 2023	
4	Розроблення та моделювання захисного покриття середньочастотного 5G діапазону на основі метаматеріалів	1 травня 2023 – 21 травня 2023	
5	Закінчення моделювання та оформлення дипломної роботи	15 травня 2023 – 21 травня 2023	

Студент

Олег ДАНИЛЮК

Керівник

Юрій ДІДЕНКО

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: «Захисне покриття середньочастотного 5G діапазону на основі метаматеріалів».

Текстова частина дипломної роботи: 51 сторінок, 9 рисунків, 15 джерел.

Об'єкт дослідження: середньочастотний 5G діапазон, частотний діапазон 2,4 ГГц – 3,7 ГГц.

Мета роботи: Розроблення та моделювання захисного покриття з коефіцієнтом відбивання менше -10 дБ в частотному діапазон 2,4 ГГц – 3,7 ГГц.

Значимість роботи: Розвиток 5G технологій пропонує значне поліпшення якості зв'язку та нові можливості в медицині, автомобільній промисловості, телекомунікаціях і багатьох інших галузях. Однак, проблемами є проникнення хвиль 5G через будівлі та зниження якості зв'язку через перешкоди. Випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G може мати шкідливий вплив на здоров'я та екосистему. Використання метаматеріалів може знизити вплив перешкод та випромінювання шляхом створення захисного покриття, що поглинає, розсіює або відбиває хвилі 5G. Метаматеріали мають незвичайні фізичні властивості, що дозволяють досягти ефективного захисту та зниження впливу на середовище.

Середньочастотний 5G діапазон є найбільш вживаним для бездротових мереж стандарту Wi-Fi, Bluetooth, мобільний зв'язок, супутникова комунікація, радіоаматори, радіорелейні зв'язки, радіолокація.

Ключові слова: метаструктура, метаматеріал, частота, 5G діапазон.

ANNOTATION

Research topic: "Protective coating of the 5G mid-frequency range based on metamaterials".

The text part of the diploma work: 51 pages, 9 figures, 15 sources.

Object of study: 5G mid-frequency band, frequency range 2,4 GHz – 3,7 GHz.

Purpose of the study: Development and modelling of a protective coating with a reflection coefficient of less than -10dB in the frequency range 2,4 GHz – 3,7 GHz.

Significance of the work: The development of 5G technologies offers significant improvements in communication quality and new opportunities in medicine, automotive, telecommunications and many other industries. However, the challenges are the penetration of 5G waves through buildings and the reduction of communication quality due to interference. Radiation from the 5G mid-frequency sub-band can have harmful effects on health and the ecosystem. The use of metamaterials can reduce the impact of interference and radiation by creating a protective coating that absorbs, scatters or reflects 5G waves. Metamaterials have unusual physical properties that allow for effective shielding and reduced environmental impact.

The 5G medium-frequency band is the most widely used for Wi-Fi, Bluetooth, mobile communications, satellite communications, amateur radio, radio relay communications, and radar.

Keywords: metastructure, metamaterial, frequency, 5G band.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ , ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
1.МЕТАМАТЕРІАЛИ	10
1.1. Опис принципу дії метаматеріалів та їх властивостей	10
1.2. Огляд застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці.....	15
1.3. Огляд основних методів виготовлення метаматеріалів	19
2. ЗАХИСТ ВІД ВИПРОМІНЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЧАСТОТНОГО ПІДДІАПАЗОНУ 5G: МЕТОДИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ.	24
2.1. Загальна характеристика 5G діапазону.....	24
2.2. Піддіапазони 5G	26
2.3. Використання середньочастотного піддіапазону 5G	27
2.4. Шкідливий вплив випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G на навколишнє середовище	30
2.5. Методи захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G	31
3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	35
3.1. Огляд застосування метаматеріалів у технологіях 4G та 5G	35
3.2. Розгляд проблем технічної реалізації метаматеріалів у практичному застосуванні	38
3.3. Аналіз результатів наукових досліджень щодо використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку.....	40

4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ СЕРЕДНЬОЧАСТОТНОГО 5G ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ	43
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	50

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ , ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

МС - метаструктура

ПІ плівка - поліімідна плівка

Метаматеріали - це штучно створені матеріали, які мають надзвичайні властивості, що не зустрічаються у природі. Принцип дії метаматеріалів полягає в тому, що вони мають мікроструктуру, що повторюється від однієї точки до іншої, наближаючись до розмірів довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Така структура матеріалу може здатна змінювати напрямок і швидкість поширення хвилі, що дозволяє метаматеріалам мати надзвичайні електромагнітні властивості.

Основними властивостями метаматеріалів є:

Негативна діелектрична проникність - здатність матеріалу відштовхувати електричне поле, яке зазвичай притягується ізоляторами.

Негативна магнітна проникність - здатність матеріалу відштовхувати магнітне поле, що зазвичай притягує феромагнітні матеріали.

Гіперболічна дисперсія - здатність матеріалу мати дві різні складові ефективної проникності, що дозволяє матеріалу мати надзвичайні електромагнітні властивості.

ВСТУП

Розвиток телекомунікаційних технологій продовжується з кожним роком, і одним з найактуальніших напрямів є впровадження мереж п'ятого покоління (5G). Завдяки підвищеній швидкості передачі даних, низькій затримці та більшій пропускній здатності, 5G може значно поліпшити якість зв'язку та забезпечити нові можливості в різних галузях, включаючи медицину, автомобільну промисловість, телекомунікації та багато іншого.

Проте, розвиток 5G зазнав перешкод через певні технічні виклики. Один з головних проблем - це проникнення хвиль 5G в будівлі та інші перешкоди. Середньочастотний діапазон 5G може виявлятися особливо вразливим до цього, оскільки хвилі цього діапазону можуть погано проникати через стіни та інші перешкоди, що призводить до втрати сигналу та зниження якості зв'язку.

Стандарти 4G та 5G також викликають певні проблеми, зокрема пов'язані зі здоров'ям людей та впливом на навколишнє середовище. Один з таких проблемних аспектів - це випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G, яке може мати шкідливий вплив на здоров'я людей та екосистему.

Для розв'язання цієї проблеми може бути використано метаматеріали - штучні матеріали, які можуть керувати поширенням електромагнітних хвиль, включаючи хвилі середньочастотного діапазону 5G. За допомогою метаматеріалів можна створити захисне покриття, яке може поглинати, розсіювати або відбивати хвилі 5G, що дозволяє зменшити вплив перешкод на якість зв'язку. А також метаматеріали - мають незвичайні фізичні властивості та можуть здійснювати непередбачувані фізичні ефекти. Застосування метаматеріалів може допомогти знизити випромінювання та забезпечити більш ефективний захист від шкідливого впливу середньочастотного піддіапазону 5G.

1. МЕТАМАТЕРІАЛИ

1.1. Опис принципу дії метаматеріалів та їх властивостей

Метаматеріали - це штучно створені матеріали, які мають надзвичайні властивості, що не зустрічаються у природі. Принцип дії метаматеріалів полягає в тому, що вони мають мікроструктуру, що повторюється від однієї точки до іншої, наближаючись до розмірів довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Така структура матеріалу може здатна змінювати напрямок і швидкість поширення хвилі, що дозволяє метаматеріалам мати надзвичайні електромагнітні властивості [1].

Основними властивостями метаматеріалів є:

Негативна діелектрична проникність - здатність матеріалу відштовхувати електричне поле, яке зазвичай притягується ізоляторами. Це означає, що матеріал виявляє неподібну до традиційних діелектриків поведінку. Матеріали з негативною діелектричною проникністю можуть виникати в деяких специфічних системах, наприклад, в рідких кристалах, наноструктурах або композитах. В таких матеріалах ефекти, пов'язані з взаємодією електромагнітного поля зі зарядженими частинками або інтерфейсами, можуть спричиняти негативну діелектричну проникність. Це не типова характеристика для більшості матеріалів і викликає певний інтерес в дослідженнях і можливих застосуваннях.

Негативна магнітна проникність - здатність матеріалу відштовхувати магнітне поле, що зазвичай притягує феромагнітні матеріали. Це означає, що матеріал виявляє неподібну до традиційних магнетиків поведінку. В матеріалах з негативною магнітною проникністю, таких як деякі метаматеріали або магнітні композити, можуть спостерігатися ефекти, що суперечать класичним законам магнетизму. Негативна магнітна проникність може бути досягнута шляхом

використання спеціальної геометрії, структури або композиції матеріалу, що впливає на взаємодію з магнітним полем. Це приводить до цікавих властивостей, таких як негативна залежність магнітної проникності від частоти чи обороту магнітного поля. Матеріали з негативною магнітною проникністю мають потенціал для різноманітних застосувань, включаючи розробку метаматеріалів для керування хвильовими процесами, антенних систем, оптичних пристроїв та інших технологій.

Гіперболічна дисперсія - здатність матеріалу мати дві різні складові ефективної проникності, що дозволяє матеріалу мати надзвичайні електромагнітні властивості. Гіперболічна дисперсія відноситься до особливого типу дисперсії, який виникає у деяких матеріалах або структурах. Зазвичай, дисперсія визначає залежність фазової швидкості чи індексу заломлення від частоти світла чи іншої хвильової довжини. У випадку гіперболічної дисперсії, ця залежність має характеристики гіперболи, а не лінійної або квадратичної залежності.

У матеріалах з гіперболічною дисперсією, індекс заломлення по одній координаті (наприклад, паралельної до площини) зростає з частотою, тоді як по іншій координаті (наприклад, перпендикулярній до площини) він зменшується з частотою. Це призводить до нетрадиційної поведінки світла, так як воно може бути фокусоване або розсіяне у залежності від його напрямку та частоти.

Гіперболічна дисперсія має важливі наслідки для фотоніки, оптики та метаматеріалів. Вона може бути використана для створення дивовижних ефектів, таких як суперрозсіювання світла, контроль за випромінюванням та підвищенням роздільної здатності. В деяких випадках, гіперболічна дисперсія може бути досягнута шляхом використання спеціальних метаматеріалів або структур з нестандартними оптичними властивостями.

Ці властивості роблять метаматеріали корисними в різних застосуваннях, включаючи бездротовий зв'язок, оптичну та мікрохвильову техніку, медицину та інші галузі.

Принцип дії метаматеріалів базується на їхній структурі та взаємодії з електромагнітним полем. Вони складаються зі штучно створених підвищеної

чутливості до електромагнітного випромінювання елементів, які повторюються відносно невеликими масштабами. Ці елементи, які називаються "метаатомами" або "метациліндрами", мають властивості, які можуть впливати на поширення світла або іншого видимого або невидимого електромагнітного випромінювання.

Основна принципова властивість метаматеріалів - це негативний індекс заломлення, що означає, що вони можуть мати властивості, які дозволяють їм взаємодіяти з електромагнітним полем унікальним способом. Наприклад, метаматеріали можуть мати здатність заломлювати світло в протилежному напрямку від заломлення в природних матеріалах, що створює "невидимість" об'єктів або властивості розсіювання світла, які можуть бути недоступні для звичайних матеріалів.

Крім негативного індексу заломлення, метаматеріали також можуть мати інші цікаві властивості, такі як непередбачувана дисперсія, магнітна або електрична резонанси, великий коефіцієнт поглинання, позитивний або від'ємний показник заломлення, ефект плямистості і т.д. Ці властивості роблять метаматеріали цікавими для широкого спектру застосувань у технологіях 4G та 5G.

Одним з основних застосувань метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку є поліпшення характеристик антен. Метаматеріали можуть бути використані для створення антен, які мають більшу напрямленість, ширший діапазон частот, знижену взаємодію з навколишнім середовищем і відмінні властивості пропускання сигналів. Вони можуть покращити якість зв'язку, збільшити швидкість передачі даних і забезпечити більшу надійність бездротових систем зв'язку.

Крім антен, метаматеріали можуть бути використані для покращення ефективності радіочастотних фільтрів, розсіювачів сигналів, пристроїв збору енергії, оптичних комунікаційних систем і багатьох інших пристроїв бездротового зв'язку. Вони можуть забезпечити зменшення втрат сигналу, зниження електромагнітних перешкод, підвищення розширювальних можливостей та унікальних функцій пристроїв.

Однак, використання метаматеріалів у технологіях 4G та 5G також стикається з викликами. Вони вимагають складних технічних рішень і викликають певні проблеми в практичній реалізації. Одна з основних проблем полягає у тому, що метаматеріали мають високу дисперсію і втрати сигналу, особливо в мікроволновому та міліметровому діапазонах. Це може призвести до зниження ефективності та обмеження використання метаматеріалів у практичних застосуваннях.

Додатково, виробництво метаматеріалів є складним технологічним процесом. Вони вимагають високо точного контролю розмірів, форми і розташування мікро- або наноструктур, що утворюють їхню структуру. Це може бути викликом з точки зору виробництва на великій масштабі та масового впровадження метаматеріалів у промисловості.

До інших технічних викликів відносяться такі як взаємодія метаматеріалів з навколишніми об'єктами або структурами, їхня стійкість до екстремальних умов роботи, проблеми із сумісністю з іншими компонентами бездротових систем, а також висока вартість виробництва і обмежена доступність.

Однак, не дивлячись на ці виклики, дослідники та інженери продовжують працювати над розробкою нових технічних рішень для подолання цих проблем. Це включає вдосконалення технологій виготовлення метаматеріалів, розробку нових архітектур і структур, а також оптимізацію їхніх властивостей для покращення ефективності та розширення області їхнього застосування у технологіях бездротового зв'язку.

У сфері виготовлення метаматеріалів проводяться дослідження для розробки більш ефективних і масштабованих методів виробництва. Використання нових матеріалів, технологій нанофабрикації, 3D-друку та інших інноваційних підходів може сприяти покращенню якості та зниженню вартості метаматеріалів [2].

Для розширення області застосування метаматеріалів проводяться дослідження з розробки нових архітектур і структур, що дозволяють досягати певних властивостей, таких як більш широкий діапазон частот, зменшення втрат

сигналу або велика масштабованість. Дослідження також спрямовані на використання метаматеріалів у нових галузях, включаючи медичну технологію, енергетику, авіацію та інші.

Оптимізація властивостей метаматеріалів полягає в пошуку оптимальних параметрів, структур та компонентів, які можуть покращити їхню ефективність у конкретних застосуваннях. Це включає використання комп'ютерного моделювання, алгоритмів оптимізації та експериментального дослідження для знаходження найкращих рішень.

Покращення ефективності та розширення області застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку може принести значні переваги і прогрес у багатьох аспектах.

Одна з головних переваг полягає в покращенні якості і швидкості передачі даних. Метаматеріали можуть підвищити пропускну здатність та зменшити інтерференцію сигналів, що дозволяє передавати більше інформації на більші відстані зі збереженням якості сигналу. Це особливо важливо у високошвидкісних бездротових мережах, де потрібна велика пропускна здатність для передачі великого обсягу даних.

Крім того, метаматеріали можуть покращити напрямленість та заломлення сигналів. Завдяки своїм унікальним властивостям, вони можуть створювати антени з більшою напрямленістю та ефективністю. Це дозволяє забезпечити кращий прийом та передачу сигналів, зменшити втрати сигналу та покращити зону покриття бездротових мереж.

Метаматеріали також можуть забезпечити зниження електромагнітних перешкод. Вони можуть бути використані для створення екранів, які зменшують вплив електромагнітного шуму та перешкод на передачу сигналів. Це дозволяє покращити якість зв'язку та забезпечити стабільну роботу бездротових систем в умовах високого електромагнітного навантаження.

Застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку також може сприяти зниженню розмірів та ваги пристроїв. Їхні унікальні властивості

дозволяють створювати компактні та ефективні бездротові пристрої. Зменшення розмірів і ваги пристроїв є важливим фактором в сучасних технологіях, особливо в мобільних пристроях, датчиках, мікророботах та інших портативних пристроях. Використання метаматеріалів дозволяє досягнути високої функціональності та продуктивності при одночасному зменшенні розмірів пристроїв, що сприяє їхній більш ефективній і зручній інтеграції в різноманітні пристрої та системи.

Окрім того, метаматеріали відкривають нові можливості для розвитку передових технологій, таких як бездротова енергія та зарядка. Вони можуть бути використані для створення безконтактних систем передачі енергії, які дозволяють заряджати пристрої без потреби в проводах або фізичному контакті. Це може відкрити нові можливості для розробки бездротових та мобільних пристроїв, які не потребують постійного підключення до джерела енергії [3].

У підсумку, метаматеріали мають великий потенціал для революції бездротових технологій. Вони можуть покращити ефективність передачі даних, забезпечити кращу якість зв'язку, знизити електромагнітні перешкоди та забезпечити компактність та портативність пристроїв. Інженери та дослідники продовжують працювати над вирішенням технічних викликів та розробкою нових інноваційних рішень, щоб максимально використати потенціал метаматеріалів.

1.2. Огляд застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці

Метаматеріали мають широке застосування в технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці. Вони можуть бути використані для покращення якості передачі сигналів, зменшення втрат енергії та забезпечення більш ефективного використання радіочастотного спектру.

Одним з прикладів використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку є розробка антен, що забезпечують високу напрямленість сигналу та зменшення відбивання сигналу. Застосування метаматеріалів у таких антенах дозволяє досягти кращої ефективності, що може бути корисним у різних видах комунікації, таких як мобільний зв'язок, супутникова комунікація, Wi-Fi і т.д.

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для підвищення точності локації. Вони можуть забезпечити покращену здатність до розрізнення об'єктів на основі відбитого від них сигналу. Застосування метаматеріалів також може допомогти зменшити електромагнітні перешкоди, що можуть впливати на якість передачі сигналів.

У сучасних системах метаматеріали також використовуються для забезпечення більш ефективного використання радіочастотного спектру. Зокрема, вони можуть бути використані для підвищення кількості каналів зв'язку та зменшення взаємного впливу між ними. Використання метаматеріалів також дозволяє зменшити відбивання сигналу та знизити інтерференцію між різними каналами зв'язку.

Отже, використання метаматеріалів в технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці має потенціал для покращення ефективності та якості зв'язку, зменшення спотворень та перешкод та забезпечення стійкості передавання даних.

Однією з основних властивостей метаматеріалів є їх здатність до зміни електромагнітних характеристик, таких як діелектрична проникність та магнітна проникність. Це дозволяє метаматеріалам бути використаними для створення антен, які мають більшу ефективність та точність, ніж традиційні антени. Застосування метаматеріалів у вигляді поверхневих покриттів може також знизити рівень спотворень та ехо, що часто виникає в результаті взаємодії хвиль з різними поверхнями.

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для створення фокуруючих систем та забезпечення керованого розподілу енергії сигналу. Це

може бути корисним для забезпечення якісного зв'язку в місцях з високою концентрацією користувачів, таких як великі міста або торгові центри.

Застосування метаматеріалів також може забезпечити важливі переваги в інших аспектах бездротового зв'язку, таких як забезпечення безпеки та захисту від інтерференції. Наприклад, метаматеріали можуть бути використані для створення екранувальних покриттів, які зменшують електромагнітну інтерференцію та забезпечують стійкість передавання даних.

У цілому, застосування метаматеріалів в технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці відкриває широкі можливості для покращення продуктивності та якості зв'язку. Метаматеріали можуть бути використані для зменшення електромагнітних перешкод, що забезпечує збільшення пропускної здатності та покращення якості сигналу. Крім того, вони можуть бути використані для розробки компактних та ефективних антен, що дозволяє забезпечити оптимальне використання електромагнітного спектру.

Застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку та антенотехніці може також забезпечити покращення енергоефективності та економії ресурсів. Це можливо завдяки зниженню рівня випромінювання та підвищенню точності направлення сигналу, що дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити продуктивність зв'язку.

Одним з важливих напрямків застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку є розробка антен для мобільних пристроїв. Метаматеріали можуть бути використані для створення компактних та потужних антен, що дозволяє збільшити зону покриття мережі та покращити якість зв'язку в будь-яких умовах [4].

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для забезпечення бездротового зв'язку на великих відстанях, наприклад, в космічних дослідженнях. Їх можна використовувати для розробки потужних антен та систем зв'язку, що забезпечують стійкість та надійність зв'язку в умовах високих відстаней та складних атмосферних умов.

Декілька причин, чому метаматеріали можуть бути кращим вибором:

Тунелювання електромагнітного поля: Метаматеріали можуть бути спроектовані таким чином, щоб керувати поширенням електромагнітного поля. Завдяки своїм структурним властивостям, вони можуть створювати специфічні ефекти взаємодії з електромагнітним випромінюванням, такі як тунелювання або фокусування, що дозволяє контролювати його напрямок та розподіл.

Маніпулювання електромагнітним спектром: Метаматеріали можуть мати нелінійні електромагнітні характеристики, що дозволяє їм контролювати спектральний склад сигналів. Це дозволяє ефективно поглинати енергію в певному діапазоні частот і знижувати рівень сигналу, що проходить через покриття.

Масштабування та вага: Метаматеріали можуть бути розроблені з наноструктур, що дозволяє їх виготовлення в компактному розмірі. Вони можуть бути тонкими, гнучкими і легкими, що полегшує їх інтеграцію у різні пристрої та системи без значного збільшення маси та обсягу.

Напрявленість покриття: Метаматеріали можуть бути спроектовані таким чином, щоб забезпечувати напрямлене покриття, яке фокусується на певній області або об'єкті. Це дозволяє забезпечити кращу ефективність покриття та знизити розсіювання сигналу в непотрібних напрямках.

Гнучкість та маневреність: Метаматеріали можуть бути адаптовані та перепрограмовані для зміни їх характеристик, що надає їм гнучкість та маневреність. Це дозволяє адаптувати покриття до змінних умов і вимог, що є важливим для розвитку мобільних мереж із змінними потребами.

Витрати та ефективність: Використання метаматеріалів може бути більш ефективним з економічної точки зору порівняно з використанням суцільних поглинаючих шарів. Метаматеріали можуть мати меншу вагу та обсяг, а також вимагати менше матеріалів для виготовлення. Це може призвести до зниження витрат на виробництво та встановлення захисного покриття.

Можливості поєднання з іншими функціями: Метаматеріали можуть бути використані як частина більш складних систем, які комбінуються з іншими функціями. Наприклад, вони можуть використовуватися в сполученні з антенами або іншими пристроями для поліпшення їх характеристик та забезпечення комплексного покриття.

Враховуючи ці переваги, метаматеріали можуть бути привабливим варіантом для реалізації ефективного та гнучкого захисного покриття в середньочастотному 5G діапазоні.

1.3. Огляд основних методів виготовлення метаматеріалів

Методи виготовлення метаматеріалів можуть бути різними і залежать від конкретної метаматеріальної структури, яку необхідно створити. Проте, серед основних методів виготовлення метаматеріалів можна виділити наступні:

Лазерна обробка - цей метод зазвичай використовується для виготовлення металевих метаматеріалів. Лазер знімає шар металу з поверхні підкладки, що дозволяє сформувати дужки і спіральки з металевої фольги на поверхні підкладки. Такий метод дає можливість створювати дужки і спіральки різної форми і розміру, що дозволяє створювати метаматеріали з різними властивостями.

При взаємодії інтенсивного лазерного випромінювання з речовиною відбуваються різні теплофізичні процеси, які можна зобразити у вигляді схеми, показаної на рисунку 1. Характер цих процесів і результат взаємодії суттєво залежать від коефіцієнта поглинання матеріалу на конкретній довжині хвилі лазерного випромінювання, його пікової потужності та тривалості впливу на матеріал.

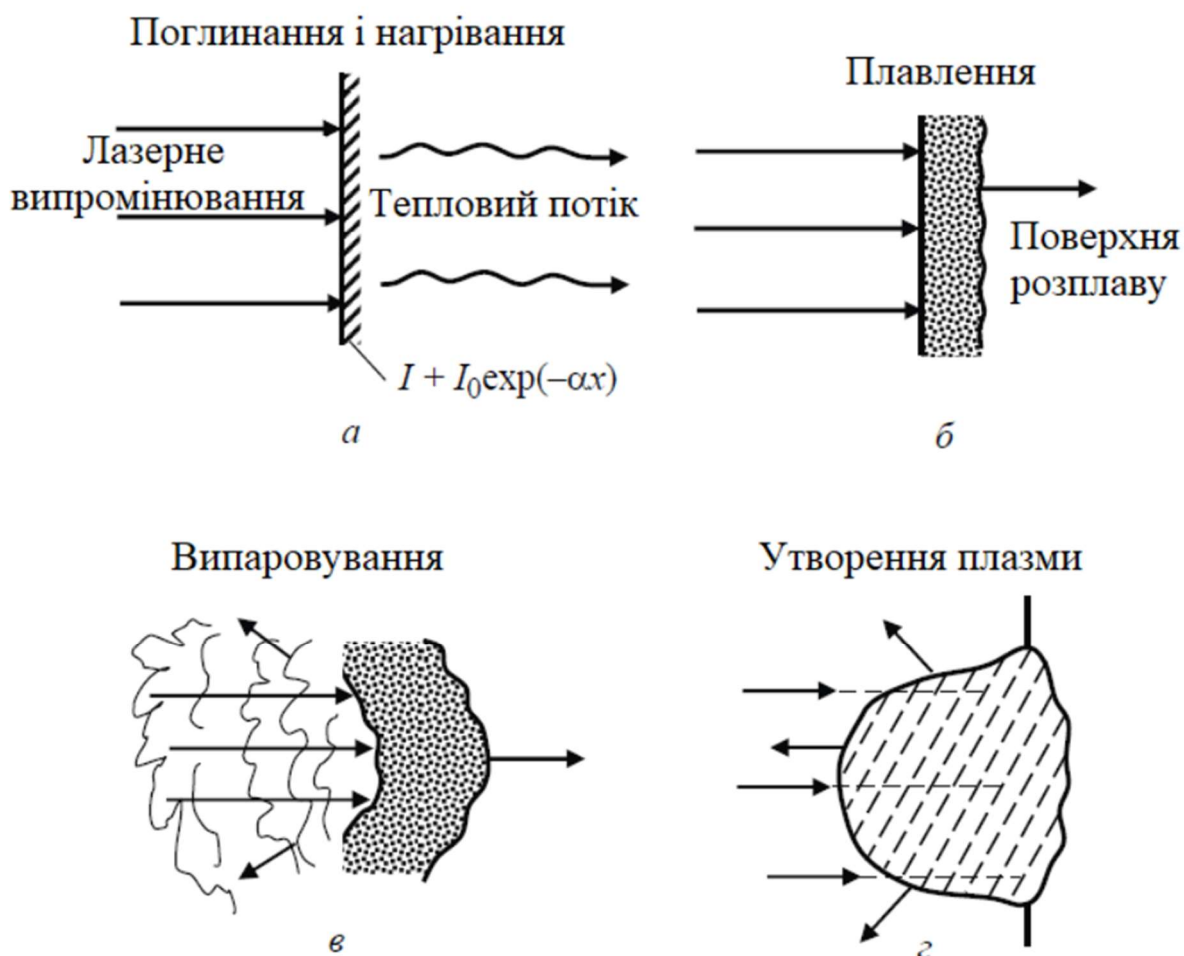


Рисунок 1 - Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною [5]

При взаємодії лазерного випромінювання з оброблюваною поверхнею відбувається поглинання світла згідно з експоненціальним законом Бугера-Ламберта.

Під час цієї взаємодії випромінювання, яке падає на оброблювану поверхню, виділяє тепло, яке потім поширюється вглиб матеріалу через теплопровідність (рис. 1, а). Внаслідок цього матеріал нагрівається, а коли температура досягає точки плавлення, починається формування рідкої фази всередині матеріалу (рис. 1, б). При подальшому опроміненні матеріал продовжує нагріватися, цього разу до температури кипіння. Коли ця температура досягається, починається процес випаровування речовини з оброблюваної поверхні (рис. 1, в). Цей процес супроводжується іонізацією поверхневих домішок і забруднень, які майже завжди присутні на поверхні матеріалу. Після цього випромінювання поглинається

головним матеріалом, і якщо його інтенсивність недостатньо висока, матеріал починає плавитися, випаровуватися, а пари стають іонізованими. Внаслідок тиску парів в матеріалі утворюється отвір.

У разі, коли інтенсивність випромінювання є дуже великою, в результаті випаровування утворюється непрозора високотемпературна плазма. Ця новоутворена плазма може розповсюджуватись у напрямку лазерного променя, утворюючи індуковану лазером хвилю поглинання. Хмара плазми поглинає падаюче лазерне випромінювання і фактично заслоняє поверхню зразка, перешкоджаючи подальшому впливу лазера на матеріал (рис. 1, г). Це негативний ефект його потрібно уникати в процесі лазерної обробки матеріалів.

Тому, при розробці будь-якого технологічного процесу, який залучає використання лазера, важливо враховувати теплофізику лазерного нагрівання.

Електронно-променева літографія - цей метод використовується для створення метаматеріалів з діелектричних матеріалів, таких як полімери та кераміка. Літографічний процес полягає у використанні електронного променя для запису зображення на поверхні матеріалу, що знаходиться на підкладці. Таким чином можна створити різні структури, такі як дужки, спіралі, пластинки та інші, що необхідні для створення метаматеріалів.

Електронолітографія використовує вибіркове експонування чутливого маскуючого покриття, такого як електронорезист, за допомогою потоку електронів. Існує три основні варіанти електронної літографії: експонування всього шаблону одночасно, растрове або векторне сканування. У всіх трьох варіантах основу складає взаємодія пучка електронів з фоторезистом або електронорезистом, що призводить до збудження та іонізації молекул резистів.

Для електронно-променевого експонування використовуються вакуумні установки з електронною гарматою, яка є тришаровим фотокатодом і виступає як джерело електронів та шаблон. Цей вид електронолітографії називається проєкційним. Для створення фотокатода використовується полірована кварцева пластина, на яку наноситься рисунок з діоксиду титану у масштабі 1:1.

На поверхню діоксиду титану наноситься товстий шар паладію (до 4 мкм). Електрони прискорюються електричним полем і за допомогою фокуруючої системи зображення проєктуються на шар фоторезиста.

Суміщення шаблону з пластиною досягається за допомогою відхиляючої системи, яка дозволяє зсувати проєктоване зображення на площині пластини. Схема електронно-променевої літографічної установки зображена на рис. 2 [6].

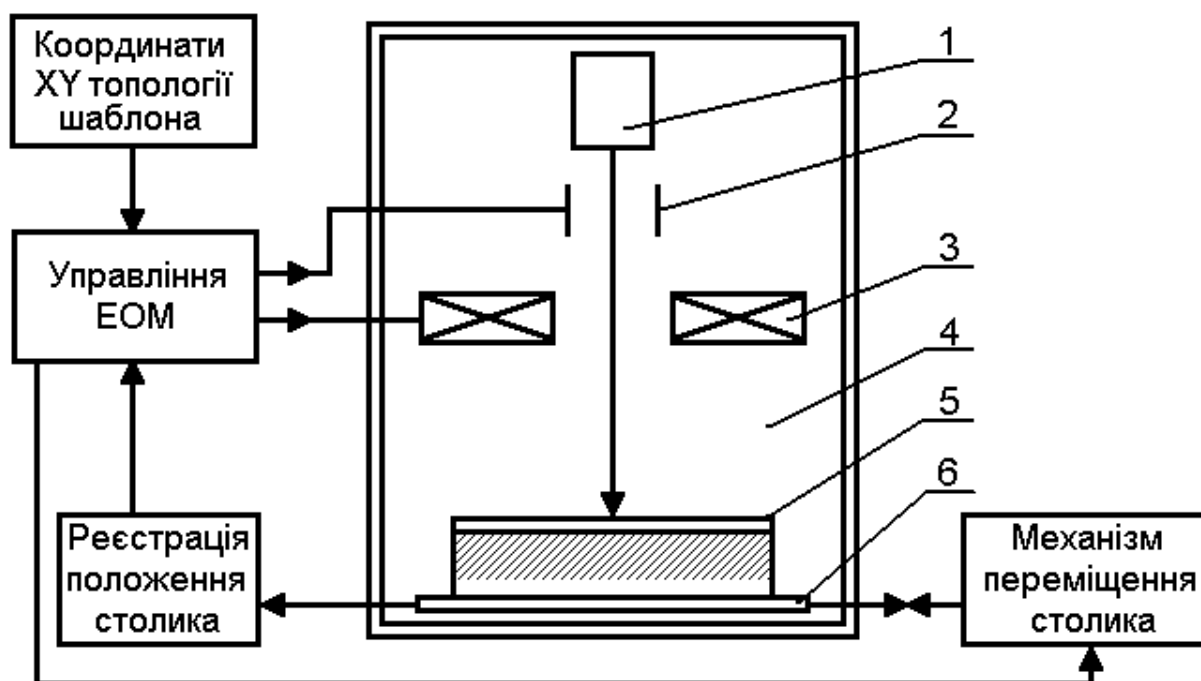


Рисунок 2 - Спрощена схема установки для електронно-променевої літографії:
1 - електронна гармата; 2 - переривач променя; 3 - відхиляючі котушки лінзи; 4 - вакуумна камера; 5 - підкладка з нанесеним електрорезистом; 6 – столик [6]

Для здійснення суміщення шаблону з пластиною використовується відхиляюча система, яка дозволяє зміщувати проєктоване зображення на площині пластини.

Електронна літографія має кілька переваг: висока роздільна здатність (0,2-0,3 мкм), яка обмежена властивостями електронорезистів; точність суміщення до 0,05 мкм; можливість корекції дефектів, пов'язаних з викривленням пластин.

Однак, метод має свої недоліки, такі як висока вартість обладнання і низька продуктивність. Це пояснюється значним часом експонування, але частково цей недолік компенсується за допомогою багатопроменевих установок, які використовуються для електронної літографії.

Метод самоорганізації - цей метод полягає у використанні природних процесів самоорганізації матеріалу для створення метаматеріалу. Цей метод зазвичай використовується для створення метаматеріалів з наночастинок золота та срібла. Змішуючи ці наночастинки з рідким матеріалом та піддаючи їх дії електричного поля, можна отримати метаматеріали зі структурами, які забезпечують бажані властивості.

Інший метод - нанодрук, дозволяє створювати метаматеріали з використанням технології друкування на основі наночастинок. Цей метод дозволяє швидко та ефективно створювати метаматеріали з властивостями, що задовольняють потреби конкретної задачі.

Також, метод гарячого витягування дроту може бути використаний для створення метаматеріалів. В цьому методі провідний матеріал обертається, формуючи спіральну форму, що може бути використана для створення метаматеріалів з бажаними властивостями.

Кожен з цих методів виготовлення метаматеріалів має свої переваги та недоліки і використовується в залежності від конкретної задачі, що потребує вирішення.

2.ЗАХИСТ ВІД ВИПРОМІНЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЧАСТОТНОГО ПІДДІАПАЗОНУ 5G: МЕТОДИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

2.1.Загальна характеристика 5G діапазону

5G діапазон - це п'яте покоління мобільних телекомунікаційних систем, яке використовує широкий діапазон частот для передачі високошвидкісних бездротових даних. Він пропонує значні поліпшення в порівнянні з попередніми поколіннями (такими як 2G, 3G та 4G), забезпечуючи більшу пропускну здатність, нижчу затримку, вищу швидкість передачі даних та покращену якість зв'язку.

Основні характеристики 5G діапазону:

Висока пропускну здатність: 5G діапазон використовує більш широкий спектр частот, що дозволяє передавати велику кількість даних високою швидкістю. Це дозволяє підтримувати велику кількість підключених пристроїв та передавати стрімінгове відео в якості 4K і навіть 8K.

Низька затримка: 5G пропонує набагато меншу затримку передачі даних порівняно з попередніми поколіннями. Це важливо для використання високопродуктивних додатків в реальному часі, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), інтернет речей (IoT) та автономні автомобілі.

Велика ємність мережі: 5G мережі здатні обробляти велику кількість одночасних підключень і передачу даних, що дозволяє підтримувати розширені можливості для IoT пристроїв та споживачів контенту.

Висока якість зв'язку: Завдяки 5G діапазону покращується якість зв'язку, забезпечуючи стабільний сигнал і мінімальні втрати даних.

Підтримка масового підключення пристроїв: 5G діапазон розроблений таким чином, щоб забезпечити підтримку великої кількості підключених пристроїв одночасно. Це важливо для розвитку інтернету речей (IoT), де велика кількість

пристроїв, від домашніх пристроїв до сенсорів у містах, можуть бути підключені до мережі.

Підвищена надійність і доступність: 5G діапазон пропонує вдосконалені алгоритми для керування мережею, що покращує надійність і доступність зв'язку. Це особливо важливо для критичних застосунків, таких як телемедицина, автономні автомобілі та інші системи, які вимагають неперервної і стабільної комунікації.

Підтримка нових технологій і додатків: 5G діапазон розроблений з урахуванням майбутніх технологій і додатків, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), хмарні послуги, штучний інтелект (AI) та інші. Він надає інфраструктуру, необхідну для розвитку цих передових технологій.

Покращена енергоефективність: 5G діапазон розроблений з метою зниження споживання енергії пристроями і мережами. Це дозволяє продовжити час роботи пристроїв, покращити тривалість роботи батарей та зменшити екологічний вплив.

Глобальний стандарт: 5G діапазон базується на глобальних стандартах, що забезпечує сумісність мереж і пристроїв у всьому світі.

Розширені можливості для промисловості: 5G діапазон відкриває нові перспективи для промисловості, дозволяючи впровадження індустрії 4.0 та інших передових технологій. Він підтримує високопродуктивні системи автоматизації, моніторингу, управління та підключення промислових пристроїв.

Збільшена безпека: 5G діапазон включає в себе покращені механізми безпеки, що дозволяють захищати передачу даних та забезпечувати приватність користувачів. Використання шифрування та аутентифікації допомагає запобігати несанкціонованому доступу та зловживанню.

Розвиток "Розумного міста": 5G діапазон є ключовою технологією для розвитку "Розумних міст", де використовуються IoT пристрої, сенсори та мережі для забезпечення ефективного управління ресурсами, покращення громадських послуг, моніторингу довкілля та забезпечення безпеки містського середовища.

Сприяння інноваціям: 5G діапазон відкриває нові можливості для розвитку інноваційних технологій та додатків. Швидкий обмін даними, низька затримка та висока пропускна здатність стимулюють створення нових продуктів і сервісів, що сприяє економічному зростанню та конкурентоспроможності.

2.2. Піддіапазони 5G

Основні діапазони, які використовуються для 5G мереж, включають:

Діапазон низьких частот (Sub-1GHz): Цей діапазон використовує частоти нижчі за 1 ГГц, від 600 МГц до 850 МГц. Він забезпечує велику покриття та проникнення сигналу, що дозволяє забезпечувати широкий доступ до 5G в сільських та віддалених районах.

Діапазон середніх частот (1-6 ГГц): Цей діапазон включає частоти від 1 ГГц до 6 ГГц, найчастіше використовуються 2,4 ГГц - 3,7 ГГц. Він забезпечує баланс між покриттям та пропускною здатністю, що робить його популярним для міських та півміських областей.

Пропускна здатність: Діапазон середніх частот забезпечує значну пропускну здатність, що дозволяє передавати великі обсяги даних з високою швидкістю. Це особливо важливо в міських областях з великою кількістю користувачів та високим попитом на швидкий бездротовий доступ до мережі.

Покриття: Діапазон середніх частот забезпечує більшу дальність покриття порівняно з високочастотними діапазонами, що дозволяє забезпечувати стабільний сигнал на більшій території. Це робить його ефективним для покриття міських районів та розташування базових станцій на значній відстані одна від одної.

Вплив нашкоджень: Діапазон середніх частот менш вразливий до впливу перешкод, порівняно з високочастотними діапазонами, такими як міліметровий

діапазон. Він дозволяє кращу передачу сигналу через перешкоди, такі як стіни будівель.

Витрати енергії: Діапазон середніх частот має вигоду в енергоефективності порівняно з високочастотними діапазонами. Використання середніх частот дозволяє знизити споживання енергії при передачі даних, що важливо для мобільних пристроїв з обмеженою ємністю акумулятора.

Здатність проникнення: Діапазон середніх частот має кращу здатність проникнення через перешкоди, такі як стіни будівель, порівняно з високочастотними діапазонами. Це дозволяє забезпечити стабільне покриття всередині будівель і сприяє покращенню якості зв'язку в приміщеннях.

Комбінація з іншими діапазонами: Діапазон середніх частот може ефективно співіснувати з іншими діапазонами 5G, такими як високочастотний міліметровий діапазон (mmWave) або низькочастотний діапазон. Це дозволяє оптимізувати покриття та пропускну здатність в різних зонах та умовах.

Підтримка різних послуг: Діапазон середніх частот підтримує різноманітні послуги, включаючи широкосмуговий доступ до Інтернету, стрімінг відео, ігри в реальному часі та Інтернет речей (IoT). Він забезпечує необхідну пропускну здатність та надійність для різних застосувань у мобільних мережах.

Діапазон високих частот (міліметровий діапазон): Цей діапазон використовує високі частоти від 25 ГГц до 39 ГГц. Він забезпечує надзвичайно велику пропускну здатність, але має обмежену дальність покриття та вимагає більшої кількості приймачів.

2.3. Використання середньочастотного піддіапазону 5G

Середньочастотний піддіапазон 5G є одним з ключових компонентів п'ятої генерації мобільного зв'язку. Він охоплює частотний діапазон від 2 ГГц до 6 ГГц і

виступає як проміжний шар між низькочастотним і високочастотним піддіапазонами 5G.

Однією з головних переваг використання середньочастотного піддіапазону є його комбінація хорошої проникності та достатньої пропускної здатності. Завдяки цьому, він може забезпечити стабільний зв'язок на відносно великій відстані та підтримувати високу швидкість передачі даних. Крім того, середньочастотний діапазон дозволяє ефективно використовувати наявну інфраструктуру зв'язку, зокрема вже наявні вежі та антени.

Використання середньочастотного піддіапазону 5G дозволяє покращити характеристики бездротового зв'язку, такі як швидкість передачі даних, покриття та надійність. Технологія 5G забезпечує значно більшу пропускну здатність, що дозволяє передавати відео високої якості, стрімінгові послуги та виконувати інші завдання з високими вимогами до пропускної здатності [7].

Крім того, середньочастотний піддіапазон 5G дозволяє покращити якість зв'язку в густонаселених місцях та в приміщеннях з великою кількістю перешкод. Технологія 5G використовує багатоантенну систему передачі даних (MIMO), яка дозволяє зменшити вплив перешкод на якість зв'язку та забезпечити більш стійкий сигнал.

Узагалі, використання середньочастотного піддіапазону 5G дозволяє покращити характеристики бездротового зв'язку та відкриває нові можливості для розвитку різних технологій, таких як розумне місто, автономні транспортні засоби, медичні технології та інші.

Він може забезпечити високу ємність підключених пристроїв і масштабування зв'язку для великої кількості користувачів одночасно. Це важливо у сучасному світі, де інтернет речей (IoT) та підключені пристрої стають все поширенішими. Середньочастотний піддіапазон 5G може підтримувати велику кількість пристроїв, включаючи смартфони, датчики, розумні пристрої вдома, автомобілі та інші, що використовуються в різних галузях.

Покращена ємність та масштабованість в середньочастотному піддіапазоні 5G також сприяють розвитку нових технологій та застосувань. Наприклад, вони створюють базу для розвитку "розумних" міст, де підключені системи управління міським середовищем, енергетикою, транспортом та інфраструктурою можуть працювати ефективніше та взаємодіяти одна з одною. Також вони сприяють розвитку високоякісних мультимедійних послуг, таких як відео- та аудіострімінг у високій чіткості, віртуальна реальність та доповнена реальність, які потребують швидкого та стабільного зв'язку.

Однак, використання середньочастотного піддіапазону 5G також вимагає вирішення певних викликів. Наприклад, ефективна використання частотного спектру, управління перехресними перешкодами та забезпечення безпеки зв'язку є важливими завданнями для максимізації потенціалу цього піддіапазону. Технологічний розвиток та дослідження в цій галузі включають розробку нових методів керування спектром, вдосконалення антенних систем та розумного управління ресурсами. Одним з напрямків роботи є розробка технологій масивного введення та виведення (MIMO), які використовують багатоантенні системи для підвищення продуктивності та ефективності передачі даних.

Крім того, важливими аспектами є розробка нових алгоритмів керування ресурсами, що дозволяють ефективно розподіляти пропускну здатність та забезпечувати оптимальну якість зв'язку для різних користувачів і пристроїв. Технології, такі як умовне ресурсне блокування та динамічне розподілення ресурсів, використовуються для забезпечення ефективного використання доступного спектру і оптимізації продуктивності мережі.

Крім того, важливо забезпечити безпеку та конфіденційність передачі даних у середньочастотному піддіапазоні 5G. Розробка механізмів шифрування та аутентифікації, контроль доступу та захист від зловживань є невід'ємною частиною цього процесу. Забезпечення приватності користувачів та захисту їхніх особистих даних стає все важливішою задачею в епоху підключеного світу.

Усі ці дослідження та розвиток технологій в середньочастотному піддіапазоні 5G спрямовані на досягнення мети - створення швидкого, стабільного та ефективного зв'язку, що задовольняє високі вимоги сучасного світу.

2.4. Шкідливий вплив випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G на навколишнє середовище

Технології 5G стали все більш поширеними в різних куточках світу, але одночасно виникли опасення щодо можливого впливу випромінювання на здоров'я людей та навколишнє середовище. Особлива увага приділяється середньочастотному піддіапазону 5G, який працює на частотах від 3 ГГц до 30 ГГц.

Більшість науковців погоджуються з тим, що випромінювання на частотах 5G в основному не є шкідливим для здоров'я людей на дозах, які зазвичай зустрічаються в реальних умовах. Однак, існують певні дослідження, які показують можливість впливу середньочастотного піддіапазону 5G на навколишнє середовище, зокрема на птахів, комах та інші тварини.

На даний момент дослідження щодо впливу випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G на навколишнє середовище є неоднозначними і потребують подальших досліджень. Інші дослідження також зосереджують увагу на можливому впливі випромінювання на здоров'я людей, зокрема на можливість збільшення ризику онкологічних захворювань або інших захворювань, таких як головні болі, депресія та інші.

У будь-якому випадку, оскільки технології 5G все ще розвиваються, важливо продовжувати дослідження впливу випромінювання на навколишнє середовище та здоров'я людей, щоб зробити належні висновки та розробити рекомендації для зменшення можливого впливу [8].

Реалізація цих цілей вимагає співпраці між різними галузями, включаючи виробників обладнання, операторів зв'язку, наукові установи та нормативні органи. Важливо проводити випробування, стандартизацію та впровадження нових технологій, щоб забезпечити їх сумісність та взаємодію на різних рівнях.

Крім того, важливо враховувати соціальні та економічні аспекти впровадження середньочастотного піддіапазону 5G. Наприклад, потрібно вирішувати питання доступності зв'язку для всіх верств населення, уникати цифрового розриву та забезпечувати зручні тарифні плани для користувачів.

Застосування середньочастотного піддіапазону 5G має потенціал значно покращити бездротовий зв'язок, розширити межі технологій та сприяти з'єднаному світові. Він може забезпечити швидкість, пропускну здатність та надійність, необхідні для інноваційних додатків та послуг, таких як розумні міста, автономні автомобілі, розумні домогосподарства, віртуальна реальність та інше.

Загалом, середньочастотний піддіапазон 5G відіграє важливу роль у розвитку мобільного зв'язку і сприяє зростанню інтернету речей та підключених пристроїв. Його використання вимагає постійного вдосконалення технологій, досліджень та співпраці всіх зацікавлених сторін, щоб забезпечити найкращу продуктивність, надійність та ефективність у бездротовому зв'язку.

2.5. Методи захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G

Використання методів захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G є важливим аспектом забезпечення безпеки та мінімізації можливих впливів на людей та навколишнє середовище. Одним з ефективних методів захисту є використання метаматеріалів.

Метаматеріали є штучно створеними матеріалами, які мають унікальні електромагнітні властивості, недоступні для природних матеріалів. Вони складаються з набору штучних структур, які навмисно маніпулюють проходженням електромагнітних хвиль. Завдяки цьому, метаматеріали можуть керувати розповсюдженням електромагнітного випромінювання, включаючи піддіапазон 5G.

Один з можливих методів захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G - використання метаматеріалів, що можуть бути виготовлені з використанням різних технологій.

Метаматеріали можуть бути спеціально розроблені для блокування випромінювання піддіапазону 5G, завдяки їхнім унікальним властивостям. Наприклад, метаматеріали можуть бути спроектовані з такими параметрами, що забезпечують поглинання та розсіювання електромагнітної енергії в цьому діапазоні.

Також метаматеріали можуть бути використані для створення екранів, що забезпечують ефективний захист від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G. Ці екрани можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як металеві мережі, карбонові нанотрубки або композитні матеріали.

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для створення спеціальних антен, які можуть поглинати енергію випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G та передавати її в інші напрямки. Це може допомогти зменшити рівень випромінювання в навколишньому середовищі.

Важливою властивістю метаматеріалів є їх здатність до нелінійного розташування. Це означає, що їх електромагнітні властивості можуть змінюватися залежно від інтенсивності випромінювання. Така можливість дає можливість створювати метаматеріали, які реагують на електромагнітне випромінювання, забезпечуючи захист лише тоді, коли це необхідно. Наприклад, вони можуть автоматично блокувати сильне випромінювання, але пропускати слабке, забезпечуючи баланс між захистом та доступністю зв'язку.

Важливим аспектом застосування метаматеріалів у захисті від випромінювання 5G є їх гнучкість і легкість у використанні. Вони можуть бути виготовлені у вигляді тонких плівок або гнучких матеріалів, що дозволяє їх легко застосовувати на різних поверхнях, включаючи будівлі, пристрої, антени та інше.

Незважаючи на потенційні переваги, використання метаматеріалів як методу захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G також стикається з певними викликами. Для їх успішної реалізації потрібно вирішити декілька технічних та технологічних викликів. Одним з них є виробництво метаматеріалів великого масштабу з необхідною точністю і стабільністю їхніх електромагнітних властивостей. Розробка процесів виготовлення метаматеріалів з високою репродуктивністю є важливим завданням для їх масового використання.

Додатковим викликом є оптимізація властивостей метаматеріалів для досягнення максимальної ефективності захисту від випромінювання 5G. Це включає дослідження різних геометричних конфігурацій, розташування та взаємодію метаматеріалів з електромагнітним полем. Інженерія метаматеріалів з потрібними параметрами може знадобитись для досягнення оптимального ефекту захисту від випромінювання.

Практична реалізація застосування метаматеріалів для захисту від випромінювання 5G також вимагає вирішення питань взаємодії з існуючими технологіями та стандартами. Потрібно забезпечити сумісність метаматеріалів з апаратним і програмним забезпеченням, що використовується в бездротових комунікаціях. Також слід враховувати ефективність використання метаматеріалів у реальних умовах, таких як змінна погода, проникнення сигналу через різні матеріали та інші фактори.

Важливим аспектом є також витрати на впровадження метаматеріалів як методу захисту. Виробництво та застосування метаматеріалів потребують значних інвестицій в дослідження та розробку, встановлення виробничих ліній, а також виробництво масштабних кількостей. Ці витрати можуть ставити певні обмеження

на широкомасштабне впровадження метаматеріалів у захисті від випромінювання 5G.

Додатково, важливим фактором є стандартизація та регуляторні аспекти використання метаматеріалів для захисту від випромінювання 5G. Розробка стандартів щодо вимог до ефективності та безпеки застосування метаматеріалів допомагає забезпечити їхню надійність та сумісність з існуючими системами. Крім того, встановлення правових рамок та регуляційних положень може бути необхідним для забезпечення безпеки використання метаматеріалів і захисту прав споживачів.

Незважаючи на ці виклики, застосування метаматеріалів як ефективного методу захисту від випромінювання середньочастотного піддіапазону 5G має великий потенціал. Воно може сприяти створенню безпечніших та здорових середовищ для користувачів бездротових технологій. Дослідження, розробка та впровадження нових технологій, включаючи метаматеріали, важливі для забезпечення сталого розвитку безпроводового зв'язку та мінімізації його впливу на людей та навколишнє середовище.

3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

3.1. Огляд застосування метаматеріалів у технологіях 4G та 5G

У технології 4G метаматеріали можуть бути використані для покращення якості зв'язку в умовах обмеженої пропускну здатності. Оскільки зв'язок в 4G використовує хвилі високої частоти, він чутливий до перешкод і має обмежену зону покриття. Метаматеріали можуть бути використані для створення антен, які забезпечують покращення діапазону покриття та зменшення втрат сигналу при його поширенні.

У технології 5G, метаматеріали можуть знайти застосування в різних аспектах, таких як підвищення пропускну здатності, зменшення затримки передачі даних та підвищення надійності зв'язку. Одним з основних принципів технології 5G є використання великої кількості малих комірок, які можуть забезпечувати безперервний зв'язок з високою швидкістю передачі даних. Метаматеріали можуть бути використані для створення антен та комутаційних пристроїв, які забезпечують високу точність при налаштуванні сигналів та зменшення взаємовпливу між ними.

Незважаючи на те, що технології 4G та 5G вже використовуються відносно широко, багато експертів вважають, що вони не досягли свого повного потенціалу, і можуть бути ще більш ефективними. Використання метаматеріалів у технологіях 4G та 5G може забезпечити високу швидкість передачі даних та забезпечити покращення якості зв'язку. Наприклад, метаматеріали можуть допомогти забезпечити більш точне направлення сигналу, що зменшить його розсіювання та енерговитрати.

Однією з головних переваг використання метаматеріалів у технологіях 4G та 5G є можливість зменшення впливу електромагнітного випромінювання на

навколишнє середовище та здоров'я людей. Метаматеріали можуть зменшити випромінювання та відхилити його від житлових та інших областей.

Застосування метаматеріалів у технологіях 4G та 5G може також забезпечити розширення діапазону частот, що може покращити доступність зв'язку для користувачів в окремих географічних областях або в умовах з обмеженим доступом до мережі.

Загалом, застосування метаматеріалів у технологіях 4G та 5G є потенційно важливим напрямком розвитку бездротового зв'язку, що може забезпечити покращення якості зв'язку та зменшення впливу на довкілля.

Для реалізації потенційних переваг метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку необхідно вирішити декілька технічних та фінансових викликів. Один з основних технічних викликів полягає у створенні метаматеріалів, які можуть працювати на високих частотах, які використовуються в технологіях 4G та 5G. Це вимагає високоточних інструментів та матеріалів високої якості, які можуть бути досить дорогими.

Другим викликом є розробка практичних технічних рішень для виробництва масштабованих метаматеріалів. На даний момент, більшість досліджень зосереджені на створенні метаматеріалів в лабораторних умовах, і виробництво цих матеріалів на промисловому рівні може бути досить складним та дорогим.

Крім того, для ефективного використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку потрібні складні системи розподілу сигналів та антенні системи, які можуть бути дорогими та складними в розгортанні.

Нарешті, фінансові виклики пов'язані з витратами на дослідження та розробку метаматеріалів, їх виробництво та розгортання. Необхідно велике фінансування для розв'язання технічних проблем та впровадження метаматеріалів у практичне застосування.

Однак, не зважаючи на ці виклики, науковці продовжують працювати над розробкою технічних рішень для забезпечення більш ефективного та практичного використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку.

Одним з викликів є виробництво метаматеріалів у великих масштабах. Наразі, більшість досліджень проводиться на невеликому масштабі, і їх виробництво може бути дорогим та складним процесом. Для забезпечення масового використання метаматеріалів, необхідно розробити ефективні методи виробництва та оптимізації процесів.

Іншим викликом є розробка технічних рішень для інтеграції метаматеріалів у практичні пристрої. Наприклад, метаматеріали можуть вимагати особливих конструкцій та складних систем керування, які можуть бути важкими для реалізації у практичних пристроях.

Крім того, використання метаматеріалів може вимагати складніших систем розподілу сигналів, що може призвести до додаткових витрат на обладнання та налаштування.

Незважаючи на ці проблеми, дослідники продовжують працювати над технічними рішеннями для забезпечення більш ефективного та практичного використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку. Потенційні переваги, такі як збільшення пропускної здатності та покращення якості зв'язку, роблять цей напрямок досліджень досить перспективним для майбутнього розвитку технологій бездротового зв'язку.

Метаматеріали також знайшли широке застосування в технологіях 4G та 5G. Один з головних викликів, який стоїть перед інженерами, які розробляють бездротові системи зв'язку, полягає у забезпеченні якісного сигналу при високій швидкості передачі даних та віддаленому розташуванні від передавача.

Використання метаматеріалів може допомогти вирішити ці проблеми, забезпечуючи більш ефективну передачу даних та збільшення дальності сигналу. Одним з прикладів є використання метаматеріалів для створення антен, які можуть підсилювати сигнал та покращувати якість зв'язку.

Крім того, метаматеріали можуть бути використані для створення екранів, що зменшують втрати сигналу та знижують вплив електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Також, метаматеріали можуть бути використані для створення компактних та легких пристроїв, що є особливо важливим для портативних пристроїв, таких як смартфони та планшети. Використання метаматеріалів дозволяє створювати пристрої, які мають менший розмір та вагу, при цьому забезпечуючи ефективну роботу та високу якість зв'язку.

Отже, використання метаматеріалів в технологіях 4G та 5G є важливим елементом, який допомагає покращити ефективність та якість бездротового зв'язку, зменшити вплив електромагнітного випромінювання та створити більш компактні та легкі пристрої.

3.2. Розгляд проблем технічної реалізації метаматеріалів у практичному застосуванні

Технічна реалізація метаматеріалів у практичному застосуванні може бути викликана деякими технічними труднощами. Одна з основних проблем полягає в тому, що метаматеріали мають складну структуру, яка потребує точної настройки, щоб досягти бажаних властивостей. Крім того, виготовлення метаматеріалів зазвичай вимагає високоточного обладнання та дорогих матеріалів, що робить їх витратними.

Ще одна проблема полягає в тому, що метаматеріали можуть бути досить вразливими до зовнішніх впливів, таких як механічні пошкодження або зміни температури. Це може призвести до порушення їх структури та зниження ефективності використання.

Нарешті, ще однією проблемою є те, що метаматеріали можуть бути важкими та не зручними для використання у практичних застосуваннях. Наприклад, для використання метаматеріалів у мобільних пристроях, вони мають бути досить

малими та легкими, що може бути складно досягти з використанням традиційних методів виготовлення.

Незважаючи на ці проблеми, дослідники продовжують працювати над технічними рішеннями для забезпечення більш ефективного та практичного використання метаматеріалів у технологіях 4G та 5G.

Наприклад, одним із способів вирішення проблеми з розмірами метаматеріалів може бути використання нових матеріалів зі зменшеною діелектричною проникністю. Це дозволить створити більш компактні метаматеріали, що можуть бути використані у більш широкому спектрі пристроїв. Крім того, використання нових матеріалів може допомогти у зменшенні витрат на виробництво метаматеріалів.

Ще однією проблемою є нестабільність метаматеріалів, яка може виникнути внаслідок змін температури, вологості чи інших зовнішніх факторів. Для вирішення цієї проблеми можуть бути застосовані методи контролю за параметрами метаматеріалу, такі як електронний контроль, температурна компенсація або використання стійких до зовнішніх факторів матеріалів.

Крім того, існують проблеми зі сумісністю метаматеріалів з іншими компонентами бездротових пристроїв, такими як антени та інші елементи систем. Для вирішення цієї проблеми можуть бути застосовані різні техніки, такі як оптимізація форми та розміру метаматеріалу, що дозволить зменшити його вплив на інші компоненти пристроїв.

Загалом, технічні проблеми та виклики, пов'язані з використанням метаматеріалів у технологіях 4G та 5G, все ще потребують подальшого дослідження та розвитку. Проте, з урахуванням потенційних переваг у відношенні збільшення пропускної здатності та покращення якості зв'язку, метаматеріали можуть стати важливим компонентом у подальшому розвитку бездротових технологій. Наприклад, у 5G мережах використовується велика кількість малих базових станцій, що створює проблеми зі забезпеченням потрібного рівня покриття та сигналу. Використання метаматеріалів у вигляді антен може допомогти

вирішити ці проблеми шляхом збільшення напрямленості та ефективності передачі сигналу. Крім того, метаматеріали можуть бути використані у вигляді елементів фільтрів та резонаторів, що може сприяти покращенню якості зв'язку та зменшенню завад.

Зважаючи на потужний потенціал метаматеріалів у бездротовій технології, дослідники займаються розв'язанням технічних проблем, пов'язаних з їх виготовленням та практичним використанням. У майбутньому можна очікувати більш широке застосування метаматеріалів у технологіях 4G та 5G, що сприятиме збільшенню продуктивності та ефективності бездротового зв'язку.

3.3. Аналіз результатів наукових досліджень щодо використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку

Дослідження проводилися з метою покращення характеристик і якості зв'язку у технологіях бездротового зв'язку.

У результаті цих досліджень було встановлено, що використання метаматеріалів може покращити якість та надійність зв'язку, збільшити пропускну здатність та зменшити електромагнітне випромінювання. Було проведено дослідження використання метаматеріалів для створення антен, які мали більшу дальність зв'язку та забезпечували кращу якість сигналу, в порівнянні з традиційними антенами.

Також, були проведені дослідження використання метаматеріалів для зменшення перешкод та взаємодії з іншими пристроями, що також позитивно впливає на ефективність технологій бездротового зв'язку.

Основна ідея використання метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку полягає в тому, щоб покращити якість та ефективність зв'язку, а також зменшити вплив електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище.

Дослідження в цій області продовжуються, і вже було проведено значну кількість наукових досліджень.

Один з дослідів з журналу [9], показав, що за допомогою метаматеріалів можна забезпечити кращу якість сигналу в технології 4G. Дослідження виявило, що метаматеріали можуть зменшити втрати сигналу від порушень та перешкод на шляху передачі, що може покращити ефективність та збільшити зону покриття.

Ще одне дослідження, проведене в Університеті Шеффілда в Великобританії, показало, що метаматеріали можуть зменшити вплив електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище. Дослідження виявило, що метаматеріали можуть зменшити рівень випромінювання на значення, які відповідають вимогам стандартів безпеки, що робить їх перспективним методом захисту від шкідливих впливів на здоров'я людей та навколишнє середовище.

Крім того, було проведено дослідження з використанням метаматеріалів для покращення якості зв'язку в технології 5G. Дослідження показало, що метаматеріали можуть зменшити втрати сигналу та забезпечити кращу якість передачі даних в технології 5G.

Отже, наукові дослідження показали, що застосування метаматеріалів у технологіях бездротового зв'язку може привести до значного покращення якості та ефективності зв'язку. Наприклад, за допомогою метаматеріалів можливо збільшити пропускну здатність системи зв'язку, що дозволить передавати більше даних за короткий проміжок часу.

Крім того, метаматеріали можуть допомогти у покращенні якості зв'язку в умовах обмеженого простору або поганої якості сигналу. Наприклад, застосування метаматеріалів у внутрішніх приміщеннях може зменшити вплив перешкод на якість зв'язку, що дозволить отримати більш стабільний та надійний зв'язок.

Однак, на жаль, на даний момент технічна реалізація метаматеріалів є досить складною та коштовною. Для досягнення більш ефективного використання метаматеріалів необхідно розробити більш прості та економічні способи їх виробництва та застосування.

В цілому, використання метаматеріалів в технологіях бездротового зв'язку має потенціал для покращення якості та ефективності зв'язку, а також зменшення впливу електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище. Проте, для досягнення цих цілей необхідно продовжувати наукові дослідження та розробки в галузі метаматеріалів та їх застосування в бездротовому зв'язку.

4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ СЕРЕДНЬОЧАСТОТНОГО 5G ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ.

У роботі було розроблено захисне покриття середньочастотного 5G діапазону на основі метаматеріалів. Як базову, було використано комірку метаматеріалу з (рис. 3) [10].

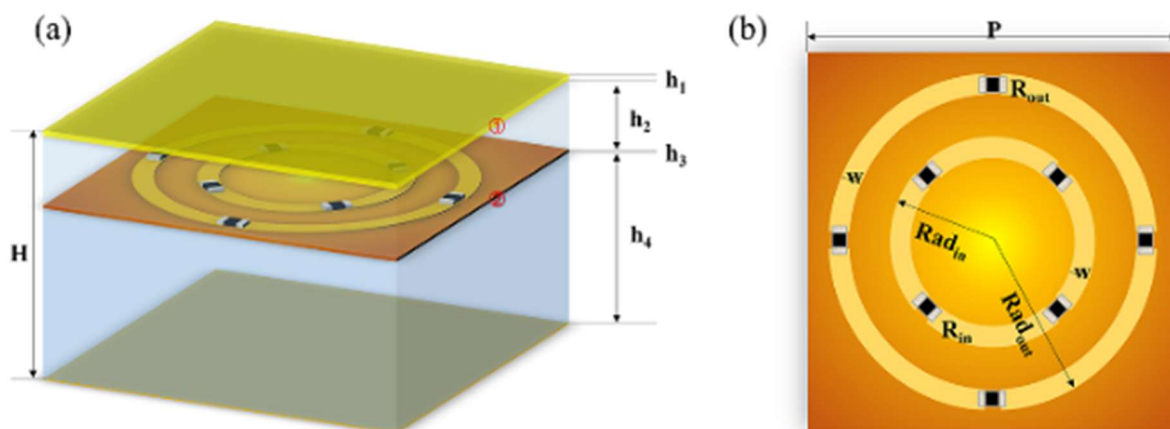


Рисунок 3 - Елементарна комірка запропонованого МС [10]

На рисунку 3 [10] показано елементарну комірку запропонованого МС, що являє собою металеві кільця, надруковані на плівці ПІ. Період $P=20.20$ мм, радіус великого кільця $Rad_{out}=8.00$ мм, радіус малого кільця $Rad_{in}=5.00$ мм, ширина двох кілець $w=0.60$ мм, опір резисторів, навантажених на велике кільце, $R_{out}=300$ Ом, опір резисторів, навантажених на мале кільце, $R_{in}=240$ Ом, висота верхнього шару FR4, $h_1=0.30$ мм, висота верхнього шару пінопласту PMI, $h_2=2.80$ мм, товщина плівки PI, $h_3=0.13$ мм, висота нижнього шару пінопласту PMI, $h_4=6.80$ мм.

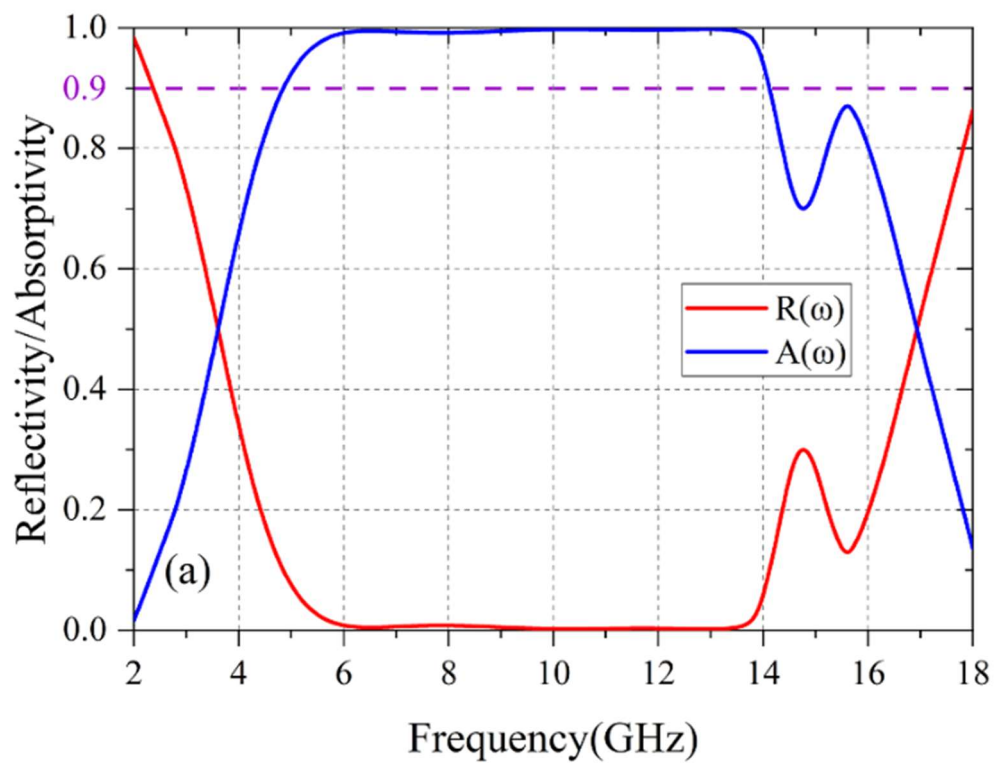


Рисунок 4 - Залежність потужності хвилі у відносних одиницях від частоти [10]

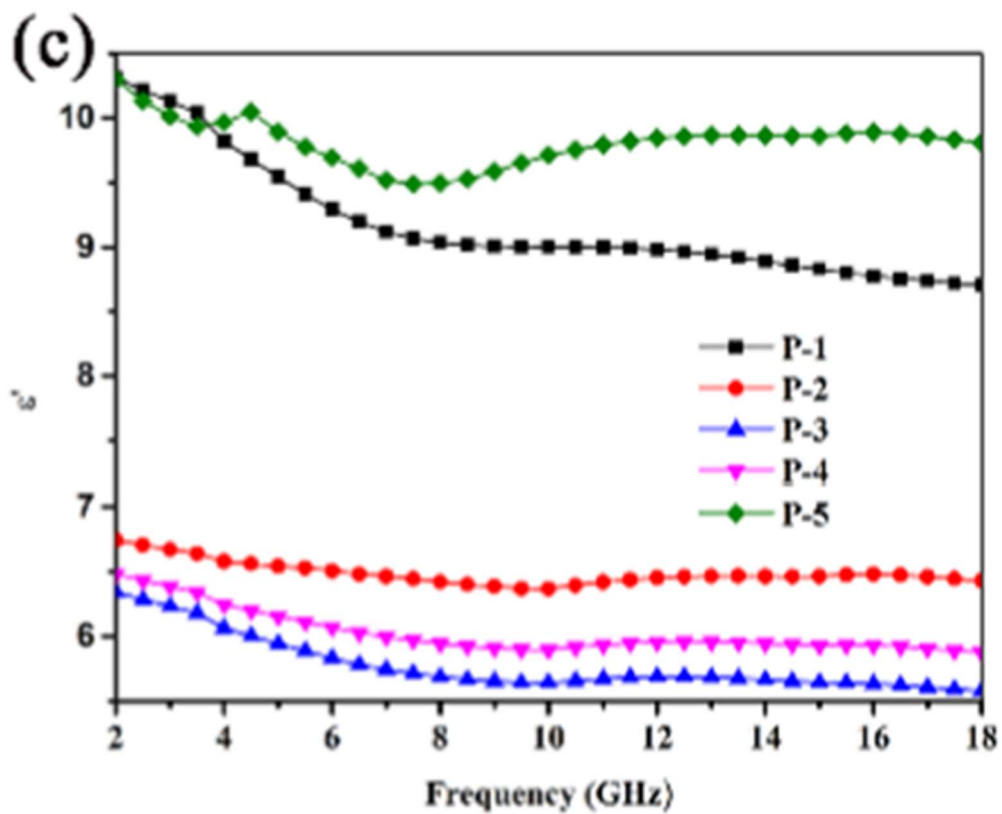
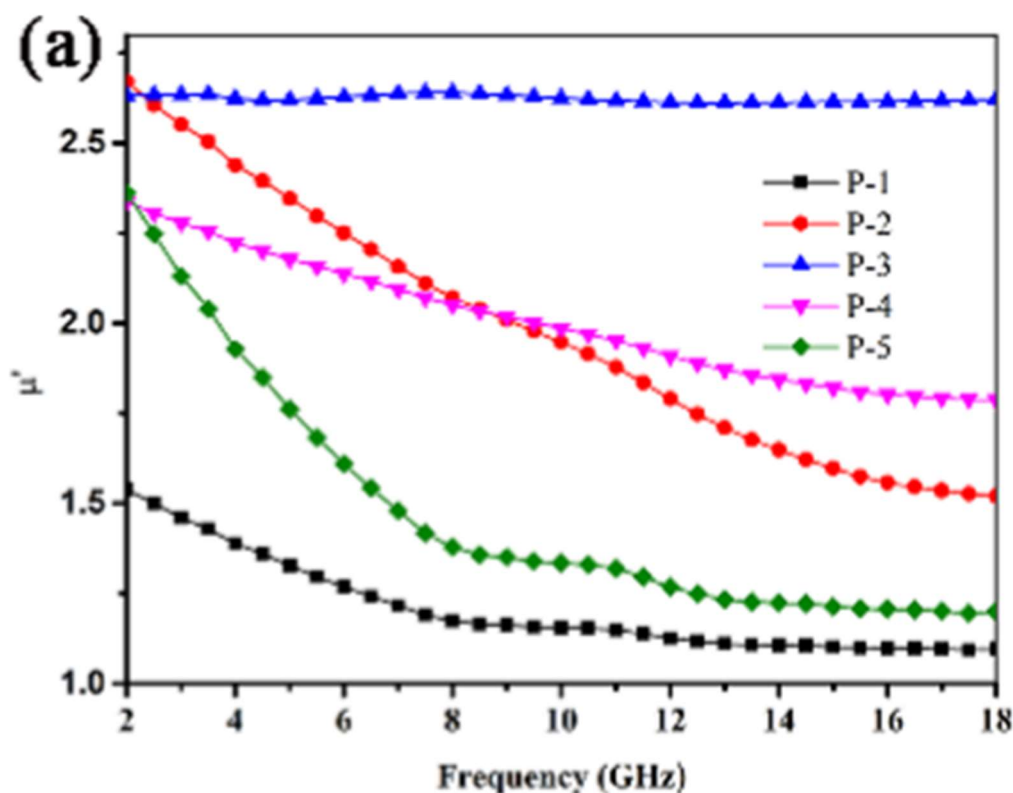


Рисунок 5 - Залежність діелектричної проникності ϵ від частоти [11]Рисунок 6 - Залежність потужності хвилі магнітної проникності μ від частоти [11]

Як ми бачимо з рис. 4 [10] графіки для діапазону 6 ГГц -14 ГГц чудові, тому я взяв за основу саме цю комірку. В даній комірці був використаний структурний шар пінопласт.

Для зменшення коефіцієнту відбивання метаповерхні було запропоновано замість пінопласту використати нанокompозит NiO–Ni (Ni - 52%, NiO - 48%) як поглинальний шар. У діапазоні частот від 2 ГГц до 4 ГГц даний матеріал (позначається, як P-3) має значення діелектричної проникності $\epsilon = 6$ (рис. 5) [11] і магнітної проникності $\mu = 2,625$ (рис. 6) [11].

Дослідники виявили, що вміст феромагнітного нікелю (Ni) впливає на магнітні властивості нікелевого оксиду (NiO) і насичення намагніченості. Плівка Ni на підкладці NiO змінює цикл гістерезису після охолодження, що пояснюється ефектом перенесення обміну. З'єднання антиферомагнітного шару NiO з

ферромагнітним шаром Ni викликає ефект закріплення. Проведені експерименти показали, що Ni наночастинки на краю та сторонах нанопластинки сприяють більш щільному розподілу ліній магнітного потоку. Зразки P-1 та P-5 мають різну магнітну проникність, а P-3 виявляє слабший магнітний ефект порівняно з P-5. Частотно-залежний аналіз показав, що μ' та μ'' для NiO (P-1) падають у діапазоні 2 ГГц - 8 ГГц, а для нікелю (P-5) спостерігається загальна тенденція до зниження. Значення μ' для P-3 є стабільним у діапазоні 2-18 ГГц завдяки ефекту закріплення між антиферромагнітним шаром (NiO) та ферромагнітним шаром (Ni). Зміни ϵ' і ϵ'' були дуже малі для всіх п'яти зразків, особливо для нанокompозитів P-1 і P-5, що пов'язано з їх високою електропровідністю на інтерфейсі [12] [13] [14] [15].

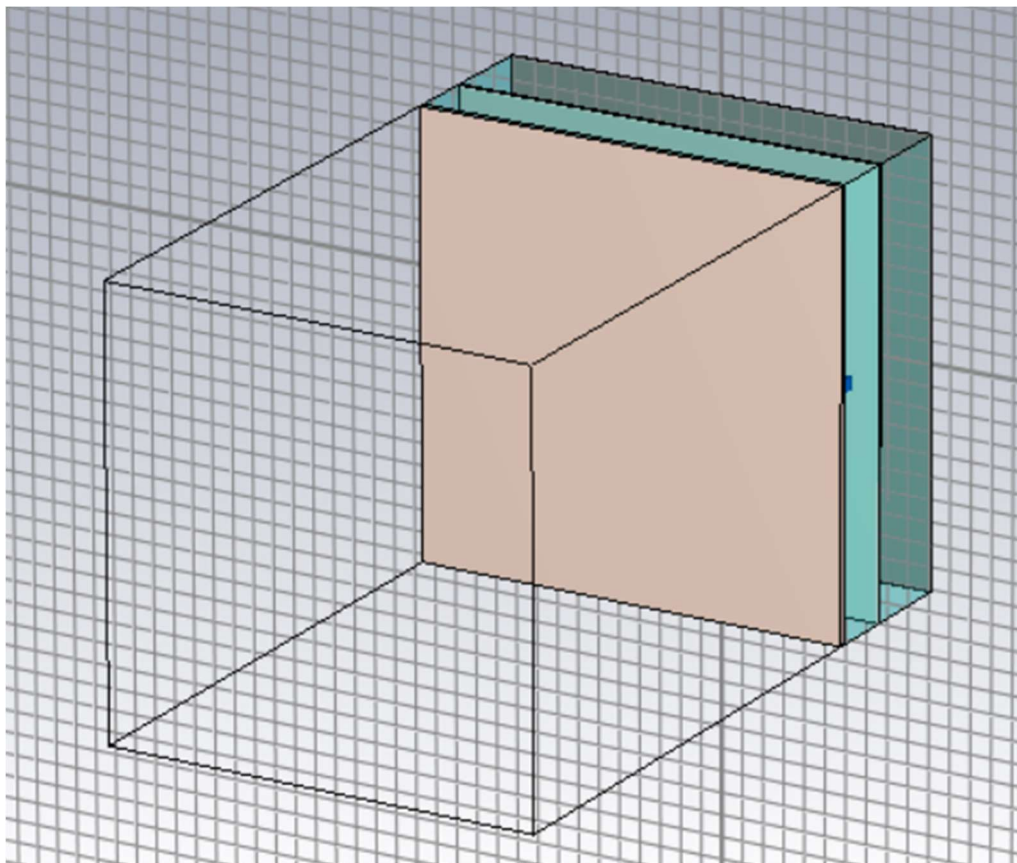


Рисунок 7 - Елементарна комірка змодельована в спеціалізоване програмне забезпечення для електромагнітного аналізу

На рисунку 7 показано елементарну комірку запропонованого МС, що являє собою металеві кільця, надруковані на плівці ПІ. Період $P=20.20$ мм, радіус великого кільця $Rad_{out}=8.00$ мм, радіус малого кільця $Rad_{in}=5.00$ мм, ширина двох кілець $w=0.60$ мм, опір резисторів, навантажених на велике кільце, $R_{out}=300$ Ом, опір резисторів, навантажених на мале кільце, $R_{in}=240$ Ом, висота верхнього шару FR4, $h_1=0.30$ мм, висота верхнього шару NiO–Ni нанокompозиту, $h_2=2.80$ мм, товщина плівки PI, $h_3=0.13$ мм, висота нижнього шару NiO–Ni нанокompозиту, $h_4=4.625$ мм, товщина металу та кільця із металу $h_m=0.035$ мм.

Було використано спеціалізоване програмне забезпечення для електромагнітного аналізу

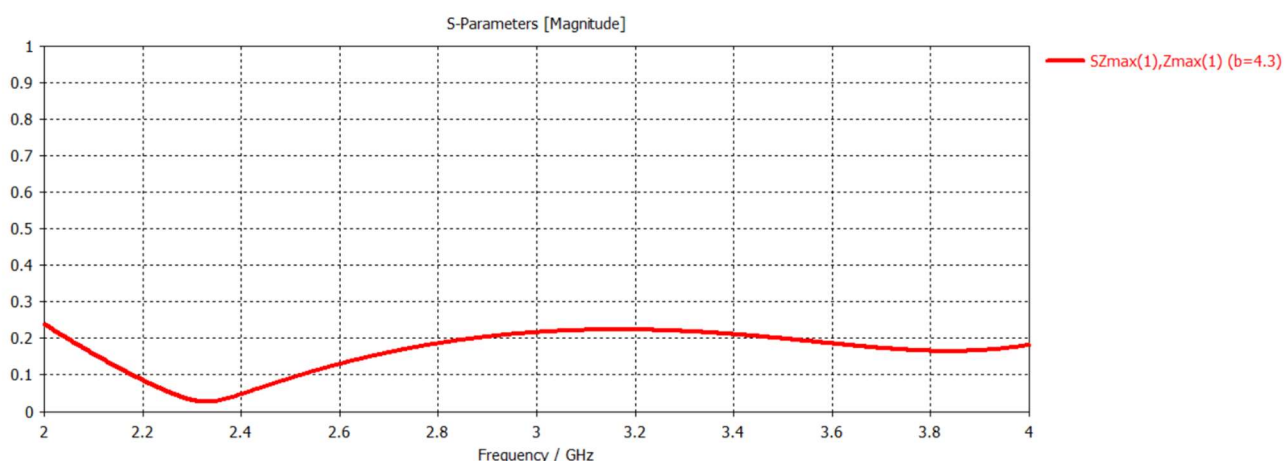


Рисунок 8 - Залежність потужності хвилі у відносних одиницях від частоти

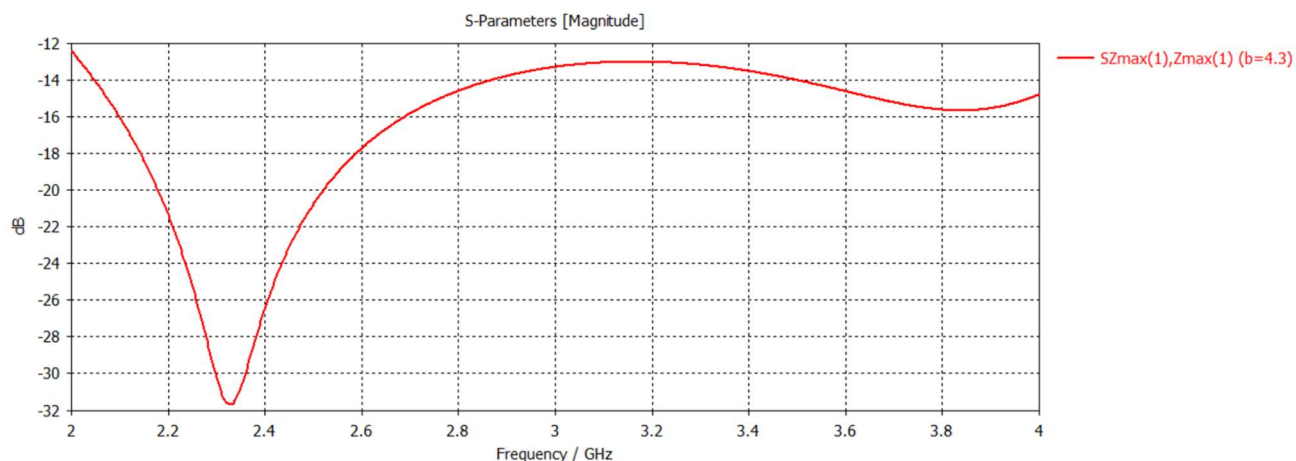


Рисунок 9 - Залежність потужності хвилі (у дБ) від частоти

Результати моделювання (рис. 9) показали, що метаповерхня із таких елементарних комірок забезпечує коефіцієнт відбивання електромагнітних хвиль середньочастотного піддіапазону 5G менше -10 дБ.

ВИСНОВКИ

1. Метаматеріали є потужним інструментом для застосування у технологіях бездротового зв'язку, зокрема в технологіях 4G та 5G. Вони демонструють унікальні властивості, такі як негативний індекс заломлення, непередбачувана дисперсія, антенні властивості та контроль хвильового фронту. Ці характеристики дають можливість забезпечувати покращену якість зв'язку, збільшену пропускну здатність та зниження впливу електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище.

2. Описано перспективи застосування електромагнітних хвиль 5G діапазону. Встановлено, що даний діапазон є найбільш вживаним для бездротових мереж стандарту Wi-Fi, Bluetooth, мобільний зв'язок, супутникова комунікація, радіоаматори, радіорелейні зв'язки, радіолокація.

3. Показано, що метаматеріали є перспективними структурами для створення захисних покриттів.

4. Розроблено елементарну комірку метаматеріалу для створення захисного покриття середньочастотного 5G діапазону.

5. Промодельовано захисні властивості покриття на основі метаматеріалу від випромінювання середньочастотного 5G діапазону. Показано, що розроблене покриття забезпечує коефіцієнт відбивання електромагнітних хвиль менше -10 дБ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Wikipedia - стаття про метаматеріали. Посилання:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>
2. Choudhury P. K. *Metamaterials: Technology and Applications*. Taylor & Francis Group, 2021. 24 с.
3. *Wave Dynamics, Mechanics and Physics of Microstructured Metamaterials* / ed. by M. A. Sumbatyan. Cham: Springer International Publishing, 2019. URL:
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-17470-5>
4. Cui T. J. *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*. Boston, MA: Springer-Verlag US, 2010. 45 с.
5. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Лазерна Поверхнева Обробка Матеріалів. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 5-10 с.
6. Електронно-променева літографія. StudFiles. URL:
<https://studfile.net/preview/7416342/page:6/>
7. Ukrinform. Світле майбутнє 5G - не таке вже й світле. Укрінформ - актуальні новини України та світу. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2710448-svitle-majbutne-5g-ne-take-vze-j-svitle.html>
8. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions / R. N. Kostoff et al. *Toxicology Letters*. 2020. Vol. 323. P. 35–40. URL: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020>
9. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. Vol. 70, no. 4. P. C3. URL: <https://doi.org/10.1109/tap.2022.3158861>
10. Zheyipei Ma et al 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55 485501
11. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, 10, 15104–15111 с.
12. Ding, Y.; Zhang, L.; Liao, Q.; Zhang, G.; Liu, S.; Zhang, Y. Electromagnetic Wave Absorption in Reduced Graphene Oxide Functionalized with Fe₃O₄/Fe Nanorings. *Nano Res.* 2016, 9, 2018–2025 с.

13. You, W.; Bi, H.; She, W.; Zhang, Y.; Che, R. Dipolar Distribution Cavity Gamma- Fe₂O₃@C@Alpha- MnO₂ Nanospindle with Broadened Microwave Absorption Bandwidth by Chemically Etching. *Small* 2017, 13, No. 1602779
14. Liu, Q.; Cao, Q.; Bi, H.; Liang, C.; Yuan, K.; She, W.; Yang, Y.; Che, R. CoNi@SiO₂@TiO₂ and CoNi@Air@TiO₂ Microspheres with Strong Wideband Microwave Absorption. *Adv. Mater.* 2016, 28, 486.
15. You, W.; She, W.; Liu, Z. W.; Bi, H.; Che, R. C. High Temperature Annealing of an Iron Microplate with Excellent Microwave Absorption Performance and Its Direct Micromagnetic Analysis by Electron Holography and Lorentz Microscopy. *J. Mater. Chem. C* 2017, 5, 6047–6053.