

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»
зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного
фільтра і гетеродину на основі діелектричних резонансних структур з
метаматеріальними властивостями»

Виконав:

студент VI курсу, групи ТЗ-21мп

Алісов Андрій Олександрович

Науковий керівник:

професор кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.,

Наритник Теодор Миколайович

Рецензент:

професор кафедри телекомунікаційних

систем та мереж Військового інституту телекомунікацій

та інформатизації імені Героїв Крут., д.т.н., професор

Сайко Володимир Григорович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Алісову Андрію Олександровичу

1. Тема дисертації «Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного фільтра і гетеродину на основі діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями», науковий керівник дисертації Наритнік Теодор Миколайович, професор, к.т.н., затверджені наказом по університету від «31» жовтня 2023 р. № 5075-с.
2. Термін подання студентом дисертації 05.01.2024 р.
3. Об'єкт дослідження: Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного фільтра і гетеродину з використанням метаматеріалів.

4. Предмет дослідження: Методи застосування діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями для покращення характеристик надвисокочастотних антен.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій в галузі бездротового зв'язку, звертаючи увагу на розробку антен надвисокочастотного діапазону.
2. Розглянути актуальні інноваційні рішення у побудові фільтрів та гетеродин, зосереджуючись на тих, що покращують характеристики антен надвисокочастотного діапазону за рахунок використання метаматеріалів.
3. Дослідити вплив використання резонансних структур з метаматеріалами на функціонування антен надвисокочастотного діапазону та визначити позитивні аспекти їхнього застосування.
4. Оцінити ефективність різних стратегій використання резонансних структур з метаматеріальними властивостями у розробці фільтрів та гетеродин з точки зору підвищення ефективності.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Тема, актуальність, мета та завдання дослідження.
2. Аналіз сучасного стану технологій у сфері надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів.
3. Аналіз важливості інновацій у проектуванні технологій для надвисокочастотного діапазону.
4. Визначення та аналіз необхідності використання метаматеріальних властивостей у розробці надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів для підвищення характеристик антен.
5. Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного генератора з використанням метаматеріалів.
6. Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного фільтра з використанням метаматеріалів.
7. Практичні висновки з використання метаматеріальних властивостей у розробці надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів
8. Загальні висновки та напрямки подальших досліджень у цій області.

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Дата видачі завдання “ 23 ” листопада 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз статей з розробкою антен надвисокочастотного діапазону.	28 грудня 2022р.	виконано
2	Огляд існуючих технологій використання резонансних структур з використанням метаматеріальних властивостей.	13 лютого 2022р.	виконано
3	Ретельний огляд методів розробки технологій у надвисокочастотному діапазоні.	7 квітня 2023р.	виконано
4	Аналіз можливості використання діелектричних резонансних структур з використанням метаматеріальних властивостей у розробці антен.	16 травня 2023.	виконано
5	Аналіз статей з інноваційними рішеннями в розробці антен надвисокочастотного діапазону.	18 липня 2023р.	виконано
6	Огляд методу застосування метаматеріалів для підвищення ефективності антен надвисокочастотного діапазону.	26 вересня 2023р.	виконано
7	Розробка стартап-проекту на основі матеріалів роботи	17 жовтня 2023р.	виконано
8	Підготовка звітної документації	20 грудня 2023р.	виконано

Студент

Андрій АЛІСОВ

Науковий керівник дисертації

Теодор НАРИТНИК

РЕФЕРАТ

Робота містить 69 сторінок, 23 таблиці, 1 формулу та 10 рисунків. Було використано 30 джерел.

Актуальність теми: Потреба в сучасних дослідженнях антен для застосування в бездротових мережах ґрунтується на їхньому високому коефіцієнті підсилення, широкій смузі пропускання та частотній реконфігурації.

В контексті сучасних досліджень у області обумовлена потребою у вдосконаленні функціональності та ефективності сучасних засобів зв'язку, радіолокації, медичної техніки та інших галузей, де використовуються високочастотні пристрої. Відкриття нових можливостей застосування метаматеріалів у цих областях веде до підвищення ефективності та розширення функціональних можливостей сучасної техніки.

Аналіз інноваційних рішень у цій сфері, зокрема тих, що базуються на технологіях розробки надвисокочастотних антен, дозволяє зрозуміти конкретні переваги використання метаматеріалів та їхній внесок у підвищення ефективності антен.

Мета дослідження: Ознайомлення з інноваційними рішеннями для розробки надвисокочастотного фільтра і гетеродину на основі діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями.

Основні задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій в галузі бездротового зв'язку, звертаючи увагу на розробку антен надвисокочастотного діапазону.
2. Розглянути актуальні інноваційні рішення у побудові фільтрів та гетеродин, зосереджуючись на тих, що покращують характеристики антен надвисокочастотного діапазону за рахунок використання метаматеріалів.

3. Дослідити вплив використання резонансних структур з метаматеріалами на функціонування антен надвисокочастотного діапазону та визначити позитивні аспекти їхнього застосування.
4. Оцінити ефективність різних стратегій використання резонансних структур з метаматеріальними властивостями у розробці фільтрів та гетеродин з точки зору підвищення ефективності.

Об'єкт дослідження:

Інноваційні рішення для розробки надвисокочастотного фільтра і гетеродину з використанням метаматеріалів.

Предмет дослідження:

Методи застосування діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями для покращення характеристик надвисокочастотних антен.

Методи дослідження:

Для дослідження використовувалися емпіричні методи, зокрема збір та аналіз конкретних даних, а також системний аналіз, для вивчення методів використання діелектричних структур з метаматеріальними властивостями у розробці надвисокочастотних антен.

Наукова новизна одержаних результатів:

Визначення інноваційних методів розробки фільтрів та гетеродин, що сприяє покращенню ефективності антени.

Практичне значення одержаних результатів

Розглянуті методики для впровадження діелектричних структур з метаматеріальними властивостями у конструкцію антен, що призводить до підвищення характеристик фільтрів та гетеродин надвисокочастотного діапазону, сприяючи тим самим підвищенню ефективності антен.

Ключові слова: інновації, діелектричні резонансні структури, метаматеріали, надвисокочастотний діапазон, гетеродин.

ABSTRACT

The work contains 69 pages, 23 tables, 1 formulas and 10 figures. The paper uses 30 sources.

Relevance of the topic:

The need for modern research on antennas for use in wireless networks is based on their high gain, wide bandwidth, and frequency reconfiguration.

In the context of modern research in the field, the need to improve the functionality and efficiency of modern communications, radar, medical equipment and other industries that use high-frequency devices is driven by the need to improve the functionality and efficiency of modern communications, radar, and other industries. The discovery of new possibilities for the use of metamaterials in these areas leads to an increase in the efficiency and expansion of the functionality of modern technology.

An analysis of innovative solutions in this area, in particular those based on UHF antenna development technologies, allows us to understand the specific advantages of using metamaterials and their contribution to improving antenna efficiency.

The purpose and objectives of the study

An introduction to innovative solutions for the development of an ultra-high-pass filter and heterodyne based on dielectric resonant structures with metamaterial properties.

To achieve the goal of the study, the following were set and solved main tasks:

1. Analyze the current state of technology in the field of wireless communication, paying attention to the development of ultra-high frequency antennas.

2. To consider current innovative solutions in the construction of filters and heterodyne, focusing on those that improve the performance of UHF antennas through the use of metamaterials.

3. To investigate the effect of the use of resonant structures with metamaterials on the functioning of UHF antennas and determine the positive aspects of their application.

4. To evaluate the effectiveness of different strategies for using resonant structures with metamaterial properties in the development of filters and heterodyne in terms of increasing efficiency.

Object of study:

Innovative solutions for the development of an ultra-high-pass filter and heterodyne using metamaterials.

Subject of study:

Methods of using dielectric resonant structures with metamaterial properties to improve the performance of ultra-high frequency antennas.

Research methods:

The research used empirical methods, including the collection and analysis of specific data, as well as system analysis, to study the methods of using dielectric structures with metamaterial properties in the development of ultra-high-frequency antennas.

Scientific novelty of the obtained results

Identification of innovative methods for designing filters and heterodyne, which improves antenna efficiency.

The practical significance of the obtained results

Methods for implementing dielectric structures with metamaterial properties in the design of antennas are considered, which leads to an increase in

the characteristics of filters and heterodyne in the ultra-high frequency range, thereby contributing to the efficiency of antennas.

Keywords: innovations, dielectric resonant structures, metamaterials, ultra-high frequency range, heterodyne.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1: Опис сучасного стану, проблематика та необхідність подальших досліджень технологій у сфері фільтрів і гетеродинів.....	17
1.1 Опис сучасного стану технологій у сфері надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів	17
1.2 Виклики у розробці надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів	18
1.3 Перспективність подальших досліджень	19
ВИСНОВКИ	20
РОЗДІЛ: 2. Важливість інновацій у проектуванні технологій для надвисокочастотного діапазону	21
2.1. Важливість розвитку фільтрів та гетеродин надвисокочастотного діапазону	21
2.2. Основні функції та перспективи застосування метаматеріалів	23
2.2.1. Основні застосування метаматеріалів у техніці	24
ВИСНОВКИ	26
РОЗДІЛ 3: Ознайомлення та аналіз інноваційних рішень у конструюванні генераторів надвисокочастотного діапазону	27
3.1. Інноваційний застосування масиву розділених резонансних кілець для підвищення сили генератора.....	27
3.1.1. Будова структури.....	27
3.1.2. Дослідження характеристик структури з метаматеріальними властивостями	29
3.1.3. Результати моделювання	32
ВИСНОВКИ	36
РОЗДІЛ 4: Октавно-широкопasmові терагерцові фільтри на основі метаматеріалів	38
4.1. Характеристики та схема фільтру на основі двошарового метаматеріалу	39
4.2. Результати дослідження та аналіз	43
4.2.1 Ефективність спектральної фільтрації.....	43

4.2.2. Конструкція 2BLMM	45
ВИСНОВКИ	47
РОЗДІЛ 5: Розроблення стартап-проєкту	48
5.1. Опис ідеї проєкту	48
ВИСНОВКИ	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BLMM	Bilayer Metamateria
CR	Closed metallic Ring
CRLH	Composite Right/Left-Handed
DNG	Double Negative
EFE	Electric Field Enhancement
ESA	Electrically Small Antennas
FDTD	Finite-Difference Time-Domain method
FWHM	Full Width at Half Maximum
FBW	Fractional Bandwidth
IoT	Internet of Things
MGN	Magnetically Negative
MIMO	Multiple Input Multiple Output
SRR	Split-Ring Resonator
THz-TDS	Terahertz Time-Domain spectroscopy
UHF	Ultra High Frequency
АСМ	Атомно-Силового Мікроскопа
ФВЧ	Фільтр Високих Частот

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій в галузі бездротового зв'язку, радіоелектроніки та високочастотної техніки вимагає постійного удосконалення інструментарію для створення ефективних систем передачі та обробки сигналів. Однією з важливих частин будь-якої бездротової мережі є антена. Конструкції антен повністю змінилися за останні кілька років. Потреба в сучасних дослідженнях фільтрів та гетеродин важливе для більш ефективного застосування антен в бездротових мережах, що ґрунтується на їхньому високому коефіцієнті підсилення, широкій смузі пропускання та частотній реконфігурації.

Застосування метаматеріалів у високочастотних технологіях відкриває нові можливості для унікального конструювання генераторів та фільтрів використовуючи такі особливості як від'ємний показник заломлення [1], ідеальне лінзування [2], ідеальне поглинання [3], субдифракційне зображення [4] та інші властивості, що стали плодами дослідження метаматеріалів. Це відкриває шлях до розробки нових концепцій та інновацій у створенні надвисокочастотних пристроїв.

Актуальність досліджень у цій області обумовлена потребою у вдосконаленні функціональності та ефективності сучасних засобів зв'язку, радіолокації, медичної техніки та інших галузей, де використовуються високочастотні пристрої. Відкриття нових можливостей застосування метаматеріалів у цих областях веде до підвищення конкурентоспроможності та розширення функціональних можливостей сучасної техніки.

Наразі використання метаматеріалів у покращенні характеристик генераторів та фільтрів має широкий спектр досліджень, такі як ТГц метаматеріали (що складається з масиву розділених кільцевих резонаторів (Split-Ring Resonator) над масивом замкнутих провідних кілець) зі

структурно керованою силою осцилятора і підсиленням електричного поля на ТГц частотах [5], мікросмужкова патч-антену на основі метаматеріалів, де метаматеріали використовуються у вигляді квадратної та кругової решітки як підкладка на основі мікросмужкової антени, що покращує коефіцієнт підсилення та смугу пропускання антени [6], реконфігурована антена на основі метаматеріалів з машинним навчанням для недорогих портативних електронних пристроїв [7].

РОЗДІЛ 1

ОПИС СУЧАСНОГО СТАНУ, ПРОБЛЕМАТИКА ТА НЕОБХІДНІСТЬ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ ФІЛЬТРІВ І ГЕТЕРОДИНІВ.

1.1 ОПИС СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ФІЛЬТРІВ І ГЕТЕРОДИНІВ

Наразі розвиток технологій у сфері надвисокочастотних фільтрів активно зосереджений на використанні фероелектричних та магнетоелектричних матеріалів, які сприяють мініатюризації та підвищенню ефективності пристроїв. Ці матеріали, разом зі зростаючим впровадженням мікрохвильової фотоніки, дозволяють розробляти фільтри з високою пропускнуою здатністю та мінімальними втратами, що є ключовим для досягнення кращої продуктивності в сучасних телекомунікаціях. Інтеграція цих фільтрів з розвинутими технологіями, такими як квантові комп'ютери та новітні бездротові мережі, відкриває нові можливості для передових застосувань у галузі.

У галузі гетеродинів, цифрова трансформація дозволяє розробляти пристрої, які можуть з більшою точністю та ефективністю обробляти сигнали. Зокрема, важливим стає розробка компактних та ефективних гетеродинних систем, які знайдуть застосування у портативних та космічних пристроях, де обмеження за розміром та вагою є критичними. Основний акцент робиться на підвищення широкосмуговості та ефективності обробки сигналів, що дозволяє розширити горизонти використання гетеродинів, особливо у сферах, таких як радіоастрономія та дистанційне зондування.

Можна виділити декілька напрямів, що вказують на значний прогрес у розробці надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів, відкриваючи нові перспективи для розвитку передових технологій у цій області.

- Вимоги сучасного зв'язку та даних: Зростаючий обсяг передачі даних та потреба в швидкісному бездротовому зв'язку, особливо з розвитком мереж 5G та 6G, вимагають високоефективних та точних надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів. Це робить дослідження в цій сфері вкрай актуальним та важливим.
- Застосування в різних галузях: Надвисокочастотні фільтри і гетеродини знаходять застосування в широкому спектрі областей, включаючи медицину (наприклад, у МРТ), космічні технології, військові системи, та радіоастрономію. Вдосконалення в цих технологіях може мати значний вплив на ці галузі.
- Виклики мініатюризації та енергоефективності: Сучасні технології вимагають компактних та енергоефективних рішень. Дослідження у цій сфері спрямовані на створення більш малогабаритних і енергоефективних компонентів, що є ключовим для портативних пристроїв та інтернету речей (IoT).
- Інновації та нові можливості: Розвиток діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями відкриває нові можливості для створення фільтрів і гетеродинів з покращеними характеристиками, такими як вища частотна селективність, менші втрати, та краще пригнічення шуму.
- Виклики безпеки та надійності: В контексті зростаючих загроз кібербезпеки, надійність та безпека надвисокочастотних систем стають все більш важливими, особливо у критичних застосуваннях, як-то оборонні та авіаційні системи.

1.2 Виклики у розробці надвисокочастотних фільтрів і ГЕТЕРОДИНІВ

Розробка надвисокочастотних фільтрів та гетеродинів стикається з низкою викликів:

- **Мініатюризація та інтеграція:** Однією з основних проблем є розробка компактних, високоефективних фільтрів і гетеродинів, які можуть бути інтегровані в складні системи з обмеженим простором, наприклад, в мобільних пристроях або космічних апаратах.
- **Інноваційні матеріали та технології:** Розробка та використання нових матеріалів і технологій, таких як метаматеріали, для покращення характеристик фільтрів і гетеродинів, вимагає глибокого розуміння нових фізичних принципів та їх практичного застосування.
- **Шумові характеристики:** Зниження рівня шуму є критично важливим, особливо для додатків, де необхідна висока точність і чутливість, наприклад, у наукових дослідженнях та військових системах.
- **Теплове управління:** Управління тепловиділенням у високочастотних компонентах є великою проблемою, оскільки високі частоти зазвичай генерують значне тепло, що може впливати на стабільність і довговічність компонентів.
- **Частотна селективність і взаємодія:** Висока частотна селективність необхідна для уникнення перехресних перешкод між різними каналами. Це включає розробку фільтрів, які можуть точно розділяти сигнали на бажаних частотах.

1.3 ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Необхідність подальших досліджень у цьому напрямку стоїть у потребі покращення ширини смуги пропускання, та зменшення втрат енергії, що є доволі важливим для фільтрів та гетеродин терагерцового діапазону. Проведення подальших досліджень у цьому напрямку стане

вагомим внеском у сучасну технічну науку та сприятиме розвитку передових технологій у галузі високочастотної електроніки.

Задачами для подальших досліджень можуть бути:

- Розробка та оптимізація геометрії фільтрів для максимізації ефективності та напрямленості в терагерцовому діапазоні з використанням метаматеріалів.
- Розвинення математичних моделей та програмних засобів для чисельного моделювання та симуляції роботи генераторів терагерцового діапазону з врахуванням взаємодії з метаматеріалами.
- Дослідження впливу різних умов навколишнього середовища, таких як атмосферні умови, вологість, температурні коливання, тощо на роботу генераторів терагерцового діапазону з використанням метаматеріалів.

ВИСНОВКИ

Даний розділ зосереджується на розвитку технологій у сфері надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів. Акцентується увага на використанні фероелектричних та магнетоелектричних матеріалів для мініатюризації і підвищення ефективності цих пристроїв, що має значний вплив на галузь телекомунікацій. Проводиться аналіз важливості цифрової трансформації гетеродинів для точнішої обробки сигналів у різних областях. Розділ висвітлює виклики, з якими стикаються Науковці та інженери, включаючи мініатюризацію, інноваційні матеріали, шумові характеристики, теплове управління та частотну селективність. Зазначається необхідність подальших досліджень для покращення характеристик антен терагерцового діапазону.

РОЗДІЛ 2

ВАЖЛИВІСТЬ ІННОВАЦІЙ У ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

2.1. ВАЖЛИВІСТЬ РОЗВИТКУ ФІЛЬТРІВ ТА ГЕТЕРОДИН НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

Терагерцові хвилі відносяться до електромагнітних хвиль з діапазоном частот від 0,1 до 10,0 ТГц і відповідною довжиною хвилі від 30 мкм до 3 мм. Вона знаходиться між міліметровим та інфрачервоним діапазонами в електромагнітному спектрі. Низькочастотна частина перетинається з міліметровим діапазоном, а високочастотна - з інфрачервоним, що робить терагерцову технологію прикордонною технологією в електроніці та фотоніці [9].

Терагерцові хвилі мають багато чудових характеристик, таких як низький рівень пошкодження, висока спектральна роздільна здатність і візуалізація. Завдяки низькому рівню потужності та низькому іонізуючому впливу на біологічні тканини, терагерц не є шкідливим для організму, що робить його широко використовуваним в перспективі в медичній галузі. Роздільна здатність зображення збільшується зі зменшенням довжини хвилі, а роздільна здатність в терагерцовому діапазоні є кращою, ніж в мікрохвильовій області. Через свою коротку довжину хвилі терагерцові хвилі можуть проникати крізь неметалеві або неполярні матеріали і зображати об'єкти, що знаходяться за ними. Терагерц може проходити крізь непрозорі об'єкти, що може забезпечити більш високу чіткість зображення[10]. Крім того, терагерцові хвилі мають переваги міліметрових хвиль і хвиль далекого інфрачервоного діапазону одночасно. У порівнянні з міліметровою хвилею, корисний діапазон частот ширший, напрямок променя сильніший, а конфіденційність і перешкодозахищеність кращі. У порівнянні з далеким інфрачервоним діапазоном, терагерцові хвилі мають

вищу ефективність і сильнішу проникаючу здатність [11]. Завдяки унікальним характеристикам терагерцових хвиль, терагерцові технології мають широкі перспективи застосування в галузях астрофізики, біомедицини, неруйнівного контролю, конфіденційного зв'язку, виявлення вибухівки, безпеки людини, пожежного моніторингу та національної оборонної безпеки[12].

Наука про терагерцовий діапазон знаходиться на перехідному етапі від макрофізики до мікроскопічної квантової теорії [13]. За останні 20 років терагерцові технології пережили справжній ренесанс з великим інтересом до застосування в космічній науці, молекулярній спектроскопії, медичній візуалізації та діагностиці плазми [14]. Для цих і майбутніх застосувань у терагерцовому зв'язку і спостереженні ефективна передача (прийом) терагерцових сигналів у вільному просторі має важливе значення і вимагає відповідної конструкції антени. [15].

Терагерцова антена є невід'ємною частиною виявлення терагерцових хвиль, а ефективність терагерцової антени безпосередньо впливає на якість роботи всієї системи виявлення. Серед параметрів антени, робоча смуга пропускання і коефіцієнт підсилення антени мають великий вплив на чутливість терагерцового детектора [16]. В даний час існує ще багато недоліків у дослідженні терагерцової антени. Оскільки терагерцова антена працює у високочастотному діапазоні, розмір антени значно зменшується порівняно зі звичайною антеною, наприклад, мікрохвильовою. Більшість терагерцових антен мають відносно високі втрати енергії та низьку точність виготовлення порівняно з мікрохвильовими антенами. Тому поліпшення характеристик терагерцового детектора є великим викликом. Багато в чому для поліпшення продуктивності детектора правильним рішенням є з'єднання більшої кількості енергії.

2.2. ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Метаматеріали проявляють якісно нові функції електромагнітного відгуку, які не зустрічаються в природі. Префікс "мета-" має грецьке походження і перекладається як "поза", що дозволяє трактувати термін "метаматеріали" як структури, ефективна електромагнітна поведінка яких виходить за межі властивостей компонентів, що її утворюють. Аналіз публікацій з різних аспектів технології метаматеріалів дозволяє класифікувати все різноманіття штучних середовищ в залежності від їх ефективних значень діелектричної проникності (ϵ) та магнітної проникності (μ) відповідно до класифікаційної схеми, представленої на рис. 1.

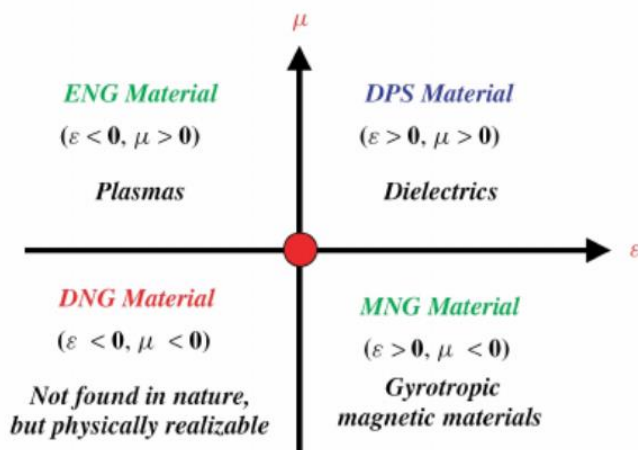


Рис. 2.1 Класифікація фізичних середовищ в залежності від їх ефективних значень діелектричної проникності (ϵ) та магнітної проникності (μ).

Використання ідеального метасередовища без втрат і частотної дисперсії забезпечує суттєве розширення смуги пропускання електрично малих антен (ESA) порівняно з межею Чу і менші значення реактивного опору фази, ніж це впливає з його фундаментальної межі. Однак перехід до реальних ознак метасередовища, що мають частотну дисперсію і втрати,

призводить до катастрофічного погіршення властивостей ідеальних фільтрів і гетеродин на основі метаматеріалів. Тому першочерговим завданням вдосконалення метаструктур є синтез таких середовищ, які б мали мінімальні втрати та дисперсійні властивості.

2.2.1. Основні застосування метаматеріалів у техніці

Основними застосуваннями метаматеріалів у техніці є:

- 1) виготовлення фільтрів у трактових антенах для досягнення ширини смуги пропускання та зменшення розмірів випромінювача;
- 2) компенсація електричного відгуку малих антен у широкій смузі частот, у тому числі тих, що перевищують фундаментальну межу Чу;
- 3) формування вузьких пучків елементарними випромінювачами, зануреними у метаматеріал;
- 4) зменшення взаємного зв'язку між елементами антенної решітки за допомогою фільтрів. Нижче буде розглянуто досягнуті результати на характерних прикладах відповідних конструкцій мета-антен.

Використання метаматеріалів як підкладок для друкованих антен створює можливість подальшого зменшення розмірів випромінювачів, збільшення їхньої смуги пропускання та ефективності випромінювання. Структура метаматеріалу, що утворює підкладку, може бути як однорідною, так і композитною (сформованою кількома типами середовищ). Так, в роботі [18] описано варіант використання гомогенної MNG-підкладки (рис. 1), яка формується з вирізаних квадратних SRR, занурених у діелектричну підкладку (рис. 2). Аналогічне рішення можливе також на основі DNG-середовища [19].

Серед композитних підкладок найбільш поширеними є структури, що поєднують правосторонні та лівосторонні сегменти. Однією з привабливих властивостей таких гібридних рішень є можливість реалізації в них частотно-селективного коефіцієнта заломлення. Наприклад, у низькочастотному діапазоні композитна речовина CRLH має від'ємний показник заломлення, а після підвищення певної частотної межі - додатний. Підбір розмірів право- і лівосторонніх сегментів дозволяє регулювати резонансну частоту друкованої антени.

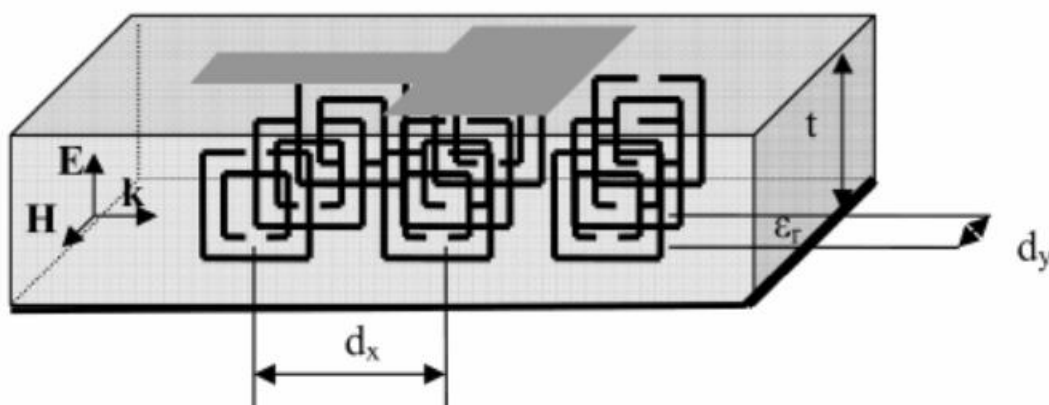


Рис. 2.2 Друкована антена з підкладкою з MGN.

Одним з перших прикладів практичного використання метаматеріалу для серійного виготовлення друкованих антен є конструкція антенної решітки Rayspan. Основна ідея полягає у використанні друкованої антени для виготовлення композитної CRLH-структури на основі інтервального випромінювання з від'ємним показником заломлення. Такий тип антен несуттєво відрізняється від друкованих прототипів за зовнішнім виглядом, але досягнуті результати виключають сумніви скептиків у перспективності подібних рішень.

Описані факти наголошують на значущості інновацій у конструюванні антен з використанням метаматеріалів для розвитку ефективних ESA, відкриваючи перспективи для подальшого дослідження конкретних випадків застосування та розробки антен. У наступному розділі

ми зосередимо увагу на детальному аналізі специфічних конструкцій та їх властивостей, що мають важливе значення для практичного використання метаматеріалів у телекомунікаціях.

Висновки

Розділ акцентує увагу на важливості розвитку терагерцових комплектуючих антен таких як фільтри та гетеродини, підкреслюючи їх унікальні характеристики та широкий спектр застосувань від астрофізики до медицини. Обговорюються технічні виклики, пов'язані з мініатюризацією та ефективністю антен терагерцового діапазону, а також важливість точної передачі та прийому сигналів у вільному просторі для їхнього ефективного використання.

Також описані основні характеристики метаматеріалів та звертається увага на їх перспективне застосування в техніці. Обговорюються основні функції та можливості метаматеріальних фільтрів та гетеродин у покращенні характеристик антен, таких як збільшення смуги пропускання, зменшення розмірів випромінювачів, та виготовлення антен поверхневих хвиль. Розглядається використання метаматеріалів для побудови фільтрів, що виконуватимуть функції зменшення взаємного зв'язку між елементами антенної решітки.

РОЗДІЛ 3

ОЗНАЙОМЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ У КОНСТРУЮВАННІ ГЕНЕРАТОРІВ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

3.1. ІННОВАЦІЙНИЙ ЗАСТОСУВАННЯ МАСИВУ РОЗДІЛЕНИХ РЕЗОНАНСНИХ КІЛЕЦЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СИЛИ ГЕНЕРАТОРА

Розглянемо статтю, що надає глибокий аналіз механізмів та принципів застосування структур з метаматеріальними властивостями для підсилення генерації терагерцових частот, відкриваючи нові можливості для просування в цій захоплюючій області. В статті представлено масив з розділених резонансних кілець зі структурно керованою силою осцилятора та локальним підсиленням електричного поля на терагерцових частотах. Ознайомлення з цією роботою є важливим для розуміння потенціалу використання резонансних структур з метаматеріальними властивостями у сучасних та майбутніх інноваційних технологічних рішеннях.

3.1.1. БУДОВА СТРУКТУРИ

У статті представлено двошарова структура з метаматеріальними властивостями зі структурно керованою силою осцилятора і посиленого електричного поля (electric field enhancement (EFE)). Будова досліджуваного в статті метаматеріалу складається з масиву SRR, розміщеного над масивом замкнутих провідних кілець (див. рис. 1)). Було виявлено, що бічний зсув у площині між SRR і замкнутими кільцевими решітками призводить до збільшення потужності генератора у 4 рази і зміни на 40% резонансного посилення електричного поля в ємнісних проміжках між SRR. Для підтвердження цих результатів наведено результати вимірювань терагерцової часової спектроскопії (THz-TDS) та чисельного моделювання. Показано, що спостережуваний електромагнітний відгук у цій структурі є

результатом зарядів зображення і струмів, індукованих у замкнених кільцях SRR.

Фотографії та розмірну схему досліджуваної структури представлено на рис. 1. Елементарна комірка структури складається з квадратного SRR, розміщеного над закритим металевим кільцем (CR) такого ж розміру. SRR і CR розділені поліамідною підкладкою товщиною 5 мкм ($\epsilon_r = 2,88$, тангенс кута діелектричних втрат $\tan(\delta) = 0,0313$). Потім обидва кільця вкриті поліамідною підкладкою товщиною 5 мкм. Періодичність елементарної комірки становить $P = 60$ мкм, довжина сторони SRR і CR $L_o = 40$ мкм, ширина металізації $w = 11$ мкм, а ширина ємнісної щілини SRR $g = 2$ мкм. Бічний зсув (L_{shift}) між SRR і CR варіюється між зразками від 0 мкм до 30 мкм. Розміри зразків такі, що зсув на 30 мкм дорівнює зсуву на половину елементарної комірки.

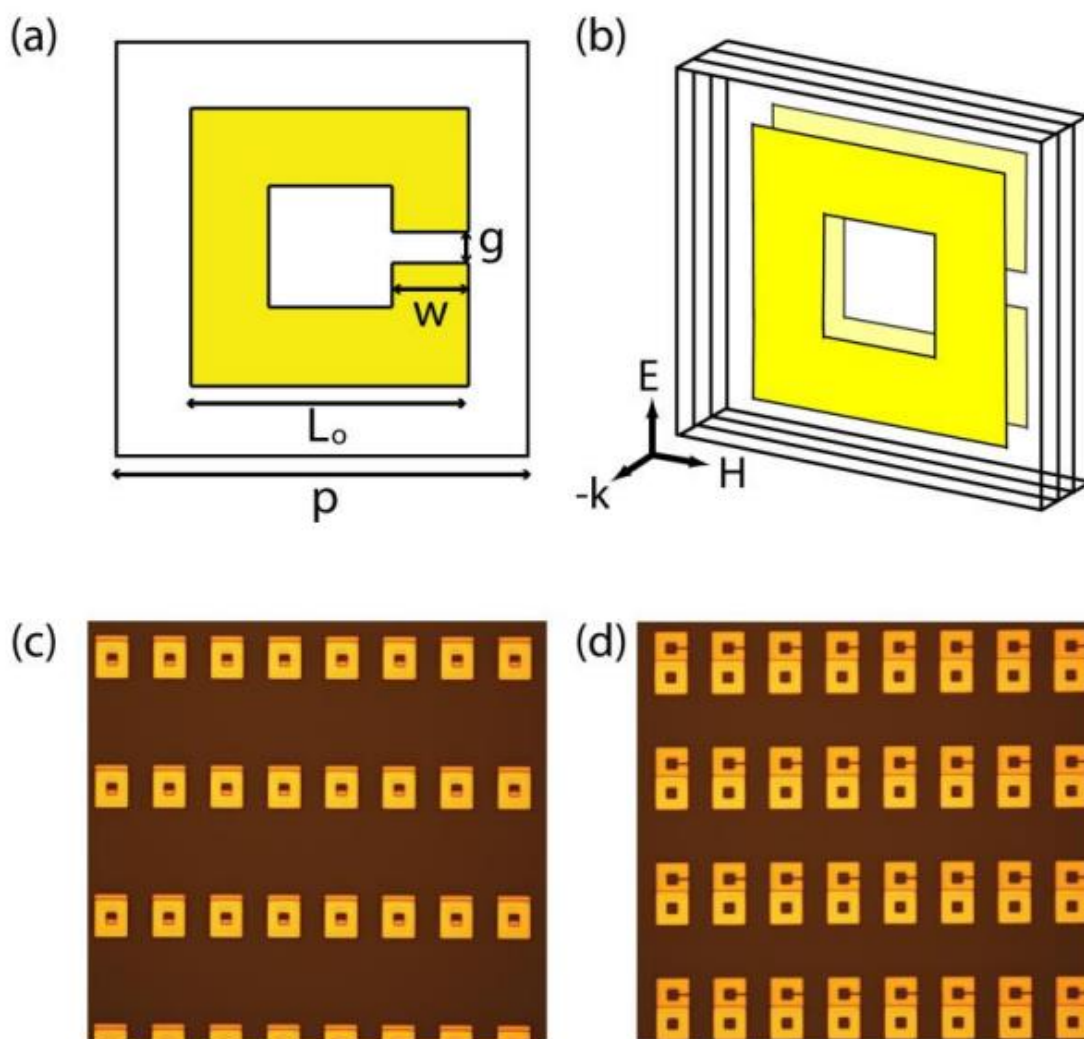


Рис. 3.1 (а) Схема SRR з розмірами. (b) Перспективне зображення елементарної комірки складеної структури SRR/CR, включаючи напрямок збудження та поляризацію. (c) і (d) Фотографії зразків SRR/CR структури зі змінним бічним зсувом, тобто змінним L_{shift} , між SRR і CR

3.1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРИ З МЕТАМАТЕРІАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Також були проведено вимірювання THz-TDS для характеристики відгуку структури. Широкосмуговий ТГц імпульс з електричним полем, поляризованим через ємнісний проміжок SRR, як на рис. 1(b), збуджував SRR через ТГц електричне поле. Результуючі спектри пропускання показані на рис. 2(a). На даних чітко видно мінімум пропускання, що відповідає

резонансу SRR LC. Резонансний мінімум пропускання показує сильну залежність від L_{shift} , зменшуючись на $\sim 50\%$ від $L_{\text{shift}} = 0$ мкм до $L_{\text{shift}} = 30$ мкм. Варіації L_{shift} також спричиняють невеликі зміни центральної частоти резонансу. Це пов'язано зі змінами в локальному оточенні SRR (та виходячи з цього, в об'єднаній ємності та індуктивності структури), коли CR віддаляється від SRR.

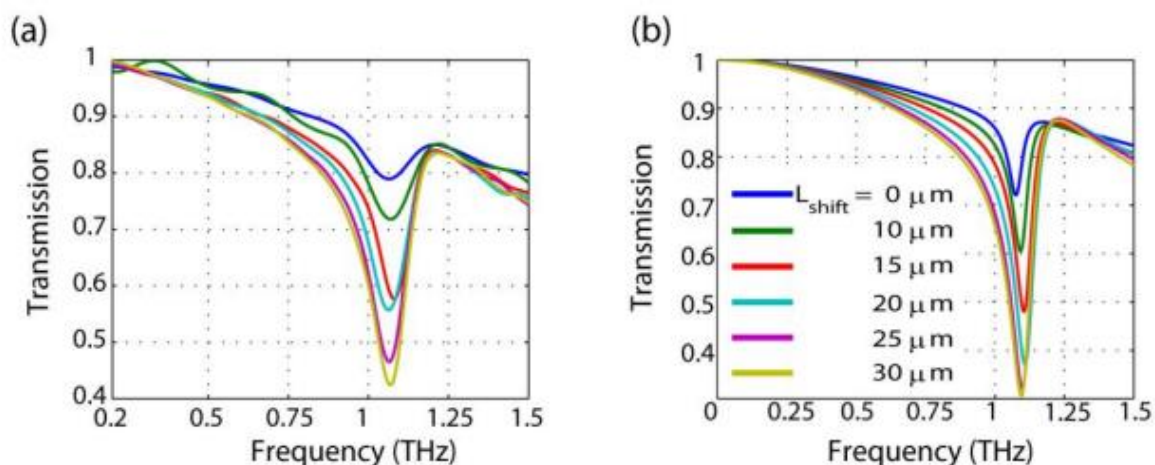


Рис. 3.1 (а) Експериментальні спектри пропускання THz-TDS для SRR/CR структури для різних значень L_{shift} . (b) Моделювання спектрів пропускання для SRR/CR структури, отриманих за допомогою CST Microwave Studio

Для подальшого дослідження залежного від L_{shift} відгуку структури дослідники виконали чисельне моделювання структури SRR/CR в програмному забезпеченні CST Microwave Studio. Змодельовані спектри пропускання представлені разом з експериментальними результатами на рис. 2(б). Відмінна відповідність між моделюванням і експериментом дозволяє більш детально проаналізувати внутрішню поведінку структури. Поєднання змодельованих даних з відомими методами вилучення параметрів 30 показує, що залежний від зсуву мінімум пропускання, що відповідає зміні потужності осцилятора. Виділена дійсна частина діелектричної проникності структури, що показана на рис. 3(а) і добре

описується дійсною частиною функції Лоренца, як показано в рівнянні 1, де ϵ_{∞} - високочастотна діелектрична проникність, ω_0 - резонансна частота, γ - частота затухання, а F - потужність генератора.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{F\omega_0^2}{\omega_0^2 + i\gamma\omega + \omega^2} \quad (3.1)$$

Резонансний максимум лоренцевих кривих діелектричної проникності сильно залежить від L_{shift} , що свідчить про те, що F залежить від відносного бокового зсуву між SRR і CR. Структура також має магнітний відгук через притаманну SRR біанізотропію. Однак цей відгук набагато слабший, ніж електричний відгук структури з метаматеріальними властивостями, оскільки в цій експериментальній геометрії падаюче ТГц випромінювання не зв'язується з SRR через магнітне поле.

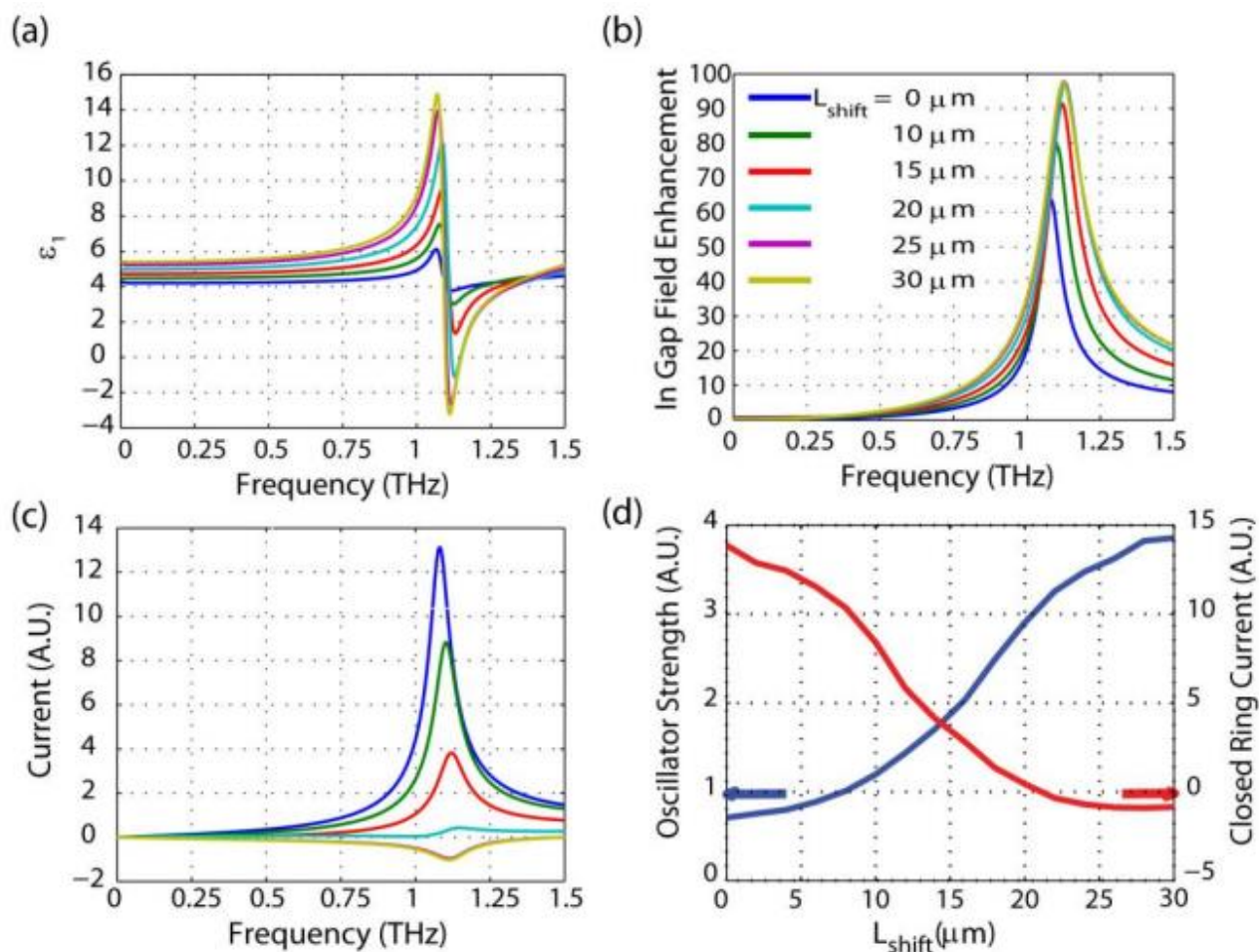


Рис. 2.3 Розширений аналіз відгуку SRR/CR за допомогою методів моделювання та вилучення параметрів. (а) Реальна частина екстрагованої діелектричної проникності метаматеріалу SRR/CR для різних значень L_{shift} . (б) Змодельоване резонансне підсилення електричного поля (EFE) в ємнісному проміжку SRR для різних значень L_{shift} . Посилення електричного поля зростає зі збільшенням L_{shift} . (с) Величина індукованого струму в CR для різних значень L_{shift} . Струм CR зменшується зі збільшенням L_{shift} . (д) Порівняння сили генератора і струму CR в залежності від L_{shift} .

3.1.3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Посилення електричного поля всередині ємнісного проміжку SRR також сильно залежить від L_{shift} . На рис. 3(б) показано залежності змодельованого посилення електричного поля в центрі ємнісного проміжку

SRR від частоти, розрахованої за допомогою локального польового зонда в розв'язувачі перехідних процесів CST, для різних значень L_{shift} . В режимі резонансу посилене електричне поле значно зростає, змінюючись на $\sim 40\%$, коли L_{shift} збільшується від 0 мкм до 30 мкм.

Слід зазначити, що хоча CR не має резонансу в смузі пропускання, яка нас цікавить, в ньому все ж таки індукується струм через взаємодію з SRR. Міра цього струму в CR, обчислена шляхом інтегрування потоку струму через поперечний переріз однієї з ніжок CR, показана на рис. 3(с). Слід бути обережним при інтерпретації цієї скалярної міри нерівномірного векторного розподілу струму. Загалом, кількісні значення струмів на рис. 3(в) будуть залежати від положення площини інтегрування в ніжках CR. Проте, ця міра струму все ще може дати два якісних уявлення про походження залежних від зсуву властивостей резонансної структури. Зокрема, зрозуміло, що індукований струм у CR резонує на резонансній частоті SRR LC 4 і зменшується за величиною зі збільшенням L_{shift} . На рис. 3(d) показано як пікове значення скалярного струму CR, так і величину сили осцилятора, обчислену за допомогою підстановки витягнутої діелектричної проникності структури у рівняння 1, в залежності від L_{shift} . Насправді, потужність осцилятора зростає приблизно в 4 рази зі зменшенням струму в замкненому кільці за приблизно зворотною тенденцією.

З цього випливає, що поведінка індукованого струму CR припускає, що взаємодія між SRR і CR відповідальна за залежні від L_{shift} властивості цієї структури. Схематична модель взаємодії між SRR і CR представлена на рис. 4(a) і 4(b). Розглянемо випадок малих значень L_{shift} . CR знаходиться безпосередньо над SRR, як показано на рис. 4(a). Падаюче терагерцеве електричне поле, поляризоване через ємнісний проміжок SRR, буде збуджувати циркулюючі струми в SRR, створюючи резонансні електричні і магнітні дипольні моменти в SRR. Для електричного збудження, як у цьому

експерименті, потужність осцилятора і внутрішньо щільне посилення електричного поля структури прямо пропорційне силі чистого індукованого електричного дипольного моменту, P_{net} , в елементарній комірці структури.

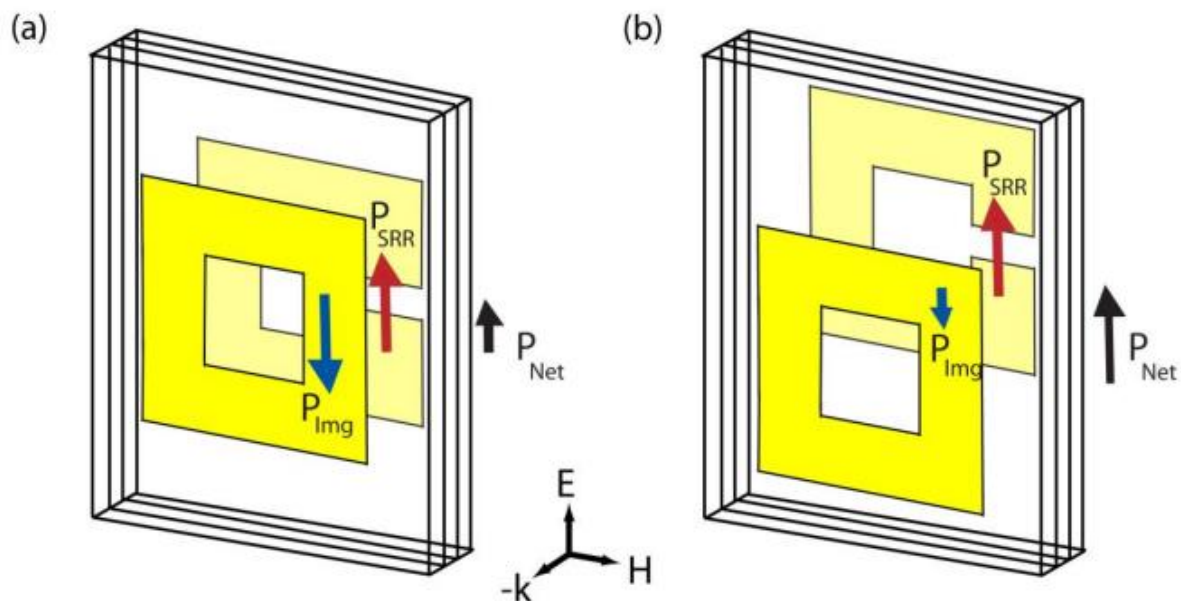


Рис. 3.3 Модель зв'язку для взаємодії між SRR і CR. (a) Резонансний електричний дипольний момент SRR, P_{SRR} , індукує диполь зображення P_{img} в CR. Ці дипольні моменти майже рівні за величиною і протилежні за напрямком для $L_{\text{shift}} = 0$ мкм, що призводить до малого P_{Net} . (b) Зсув CR від SRR зменшує зв'язок між SRR і CR, зменшуючи величину P_{img} , що збільшує P_{Net} . Більший P_{Net} призводить до більшої потужності осцилятора і більшого посилення електричного поля.

CR впливає на потужність осцилятора і посилення електричного поля, діючи як площа для зарядів і струмів зображення. Резонансний електричний дипольний момент SRR, позначений P_{SRR} на рис. 4, індукує заряди зображення в CR. Ці резонансні заряди зображення формують дипольний момент зображення, P_{img} , спрямований протилежно до P_{SRR} . Крім того, осцилюючі заряди зображення, індуковані в CR, призводять до виникнення асоційованих струмів зображення в CR, які осцилюються в

протилежному напрямку, ніж струми в SRR. Це струм, про який йшлося вище на рис. 3(c) і (d). На рис. 5 показано змодельовані резонансні розподіли струмів у CR для різних значень L_{shift} порівняно з резонансним розподілом струмів у SRR. "Дзеркальний" ефект CR чітко видно при збільшенні L_{shift} від 0 мкм на рис. 5(b) до 30 мкм на рис. 5(e).

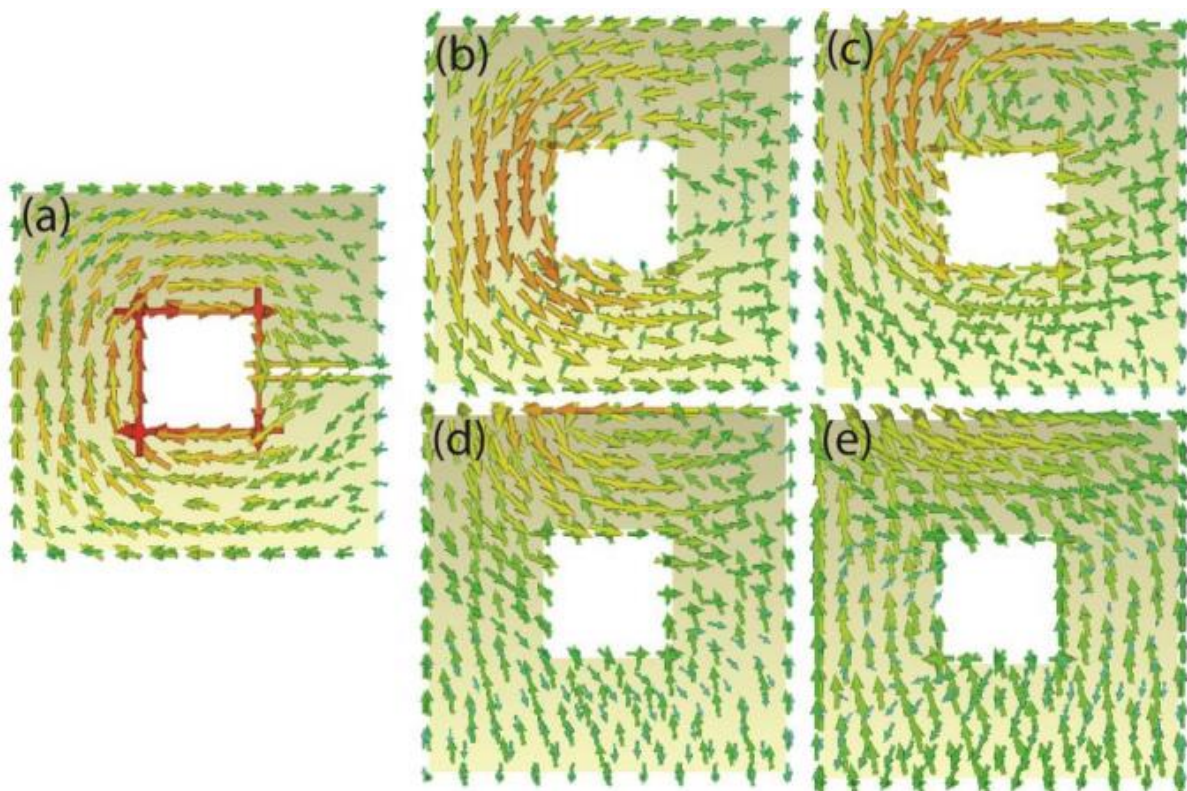


Рис. 3.4 Струми зображення, індуковані в CR, як функція зсуву. (a) Струмовий режим SRR LC (b) Струми зображення в CR для $L_{\text{shift}} = 0$ мкм, (c) $L_{\text{shift}} = 10$ мкм (d) $L_{\text{shift}} = 20$ мкм, і (e) $L_{\text{shift}} = 30$ мкм. При віддаленні CR від SRR струмовий режим CR залишається зосередженим у тому самому положенні, показуючи, що CR діє як площа зображення і дзеркально відображає струми в SRR.

Оскільки P_{SRR} і P_{Img} діють у протилежних напрямках, величина чистого дипольного моменту структури визначається $P_{\text{Net}} = P_{\text{SRR}} - P_{\text{Img}}$. Коли CR зміщується від SRR, як показано на рис. 4(b), SRR більше не знаходиться безпосередньо над площиною зображення CR. Таким чином, дипольний

момент більше не повністю відбивається від CR, що призводить до зменшення P_{Img} . Таким чином, збільшення L_{shift} зменшує P_{Img} , що призводить до збільшення P_{Net} , яке, в свою чергу, збільшує як потужність осцилятора, так і внутрішньо щільне посилення електричного поля.

Важливо зазначити, що хоча SRR взаємодіє з CR, індукуючи заряди зображення і струми в CR, SRR не зв'язаний з однією з резонансних мод CR. CR має два резонансні режими поблизу LC-резонансу SRR. Перший - це статичний, рівномірний режим струму на частоті 0 ТГц. Другий режим - це дипольний режим на частоті $\sim 2,5$ ТГц для розмірів, що використовуються в цьому дослідженні. Відсутність ємнісного зазору означає, що CR не має LC-резонансного режиму. Розподіл струму на рис. 5 показує, що густини струму CR не представляють жодного з можливих режимів CR, а натомість відображають резонансні струми SRR. Крім того, якби посилення електричного поля, обговорені вище, були результатом зв'язку між режимом SRR LC і режимом CR, то в даних був би присутній великий односпрямований зсув частоти в резонансному режимі структури, чого не спостерігається.

Висновки

Аналізуючи дослідження вище варто зазначити, що дослідники досягли значного прогресу в конструюванні генераторів на основі резонансних структур з метаматеріальними властивостями, використовуючи нелінійні властивості для генерації терагерцових частот. Було розроблено структуру з масиву розділених кільцевих резонаторів (SRR), яка при бічному зсуві відносно замкнутих провідних кілець значно підсилює електричне поле. На терагерцовій спектроскопії в часовій області та основі чисельного моделювання було досліджено електромагнітний відгук структури. Бічне зміщення масиву замкнутих кілець відносно масиву SRR зменшує струми зображення, індуковані в масиві замкнутих кілець, що

призводить до збільшення потужності осцилятора в 4 рази і до зміни на ~40% величини підсилення електричного поля в зазорі SRR.

Використання резонансних структур з метаматеріальними властивостями, такими як розділені кільцеві резонатори (SRR), забезпечило необхідну нелінійність для підсилення електричного поля, що дозволило дослідникам значно покращити характеристики генераторів, роблячи їх більш ефективними для застосувань на терагерцових частотах.

РОЗДІЛ 4

ОКТАВНО-ШИРОКОСМУГОВІ ТЕРАГЕРЦОВІ ФІЛЬТРИ НА ОСНОВІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

В статті [21] досліджуються гостроспрямовані смугові спектральні фільтри, що особливо важливі для виявлення сигналів, оскільки їх можна використовувати для виділення певних спектральних компонентів, відкидаючи небажані частоти, які вносять свій внесок у шум. У стандартних вимірюваннях з часовою дискретизацією, в яких всі частоти ефективно вирішуються одночасно, такий підхід може значно покращити чутливість виявлення в заданій спектральній області. Ефективність таких фільтрів зазвичай оцінюють за трьома основними критеріями: (i) максимальна потужність передачі в межах плоского вікна смуги пропускання, (ii) ефективність відсіювання частотних компонентів в області стоп-смуги, і (iii) перехід між смугою пропускання і стоп-смугою, який також називається згортанням, що в кінцевому підсумку дозволяє пристрою відрізняти бажані спектральні компоненти від тих сусідніх частот, які повинні бути заблоковані. У цій статті розглядаються широкосмугові ТГц-фільтрувальні властивості двошарового метаматеріалу (bilayer metamateria BLMM), який має такі характеристики $\sim 70\%$ пропускання енергії з відносно рівномірною і стабільною вершиною в октавній смузі пропускання. Затухання в стоп-смузі перевищує 10 дБ у спектральному вікні, що нас цікавить (0,5 дБ). спектральному вікні інтересу (0,3 - 5,8 ТГц), де загасання перевищує 20 дБ. Цей пристрій базується на двох ідентичних плазмонних метаповерхнях, обидві на основі періодичної решітки з квадратними дірками, розділеними прозорим полімерним шаром ("зв'язкою"). Конструкція BLMM вперше оптимізовано для широкосмугової передачі в ТГц діапазоні за допомогою чисельного FDTD моделювання, потім виготовляється за допомогою стандартних методами фотолітографії, і, нарешті, характеризується за

допомогою ТГц-системи в часовій області. Спостерігається чудове узгодження між теоретичними та експериментальними результатами. Крім того продемонстровано, що об'єднання двох ВЛММ різко покращує ефективність згортання в області стоп-смуги, тоді як максимальний коефіцієнт пропускання залишається відносно незмінним.

4.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА СХЕМА ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ ДВОШАРОВОГО МЕТАМАТЕРІАЛУ

На рис. 4.1 (а) показано схему широкосмугових фільтрів ВЛММ, які складаються з двох ідентичних плазмонних метаповерхонь, розділених тонким діелектричним шаром зв'язку. На рис. 4.1(b) і 4.1 (с) показано топографію виготовленої метаповерхні, виміряну за допомогою атомно-силового мікроскопа (АСМ) і оптичного мікроскопа, відповідно. Аналіз глибинного профілю структур, як показано на рис. 4.1 (d), вказує на рівномірну товщину алюмінію ~ 220 нм. Для створення більш крутого спаду смуги пропускання створюється "двопорожнинна" структура ВЛММ з використанням двох ідентичних метаповерхонь (описаних вище), в якій метаповерхневі шари розділені тонким діелектричним сполучним шаром. В якості діелектричних шарів використовуються двосторонні стрічки, що дозволяє легко з'єднувати два метаповерхневі пристрої.

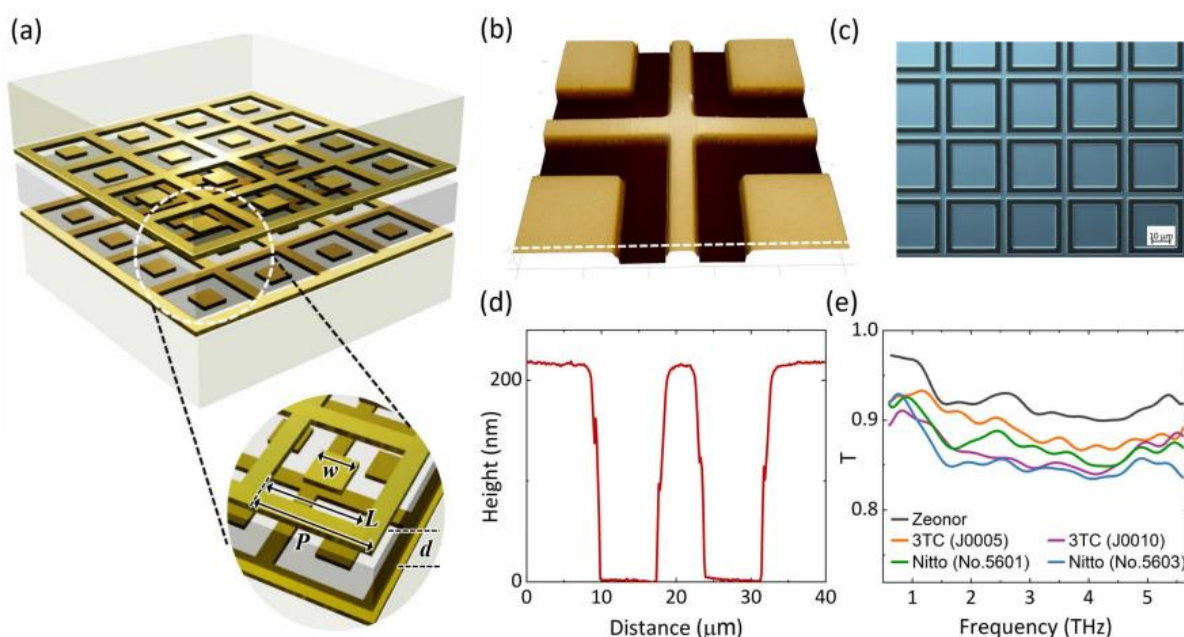


Рис. 4.1 (а) Загальна схема смугового фільтра на основі двошарового метаматеріалу (BLMM). Дві плазмові метаповерхні розміщені поруч одна з одною, розділені діелектричним зв'язуючим шаром товщиною d . Кожна метаповерхня складається з масиву металевих квадратних дірчастих структур, нанесених на прозору підкладку Zeonor, що працює в ТГц діапазоні. Крок решітки (P), довжина зовнішнього квадратного отвору (L) і довжина внутрішнього квадратного отвору (w) масиву позначені чорними стрілками. (b) Зображення 3D атомно-силового мікроскопа (АСМ) і (c) зображення оптичного мікроскопа пристрою S2, і (d) відповідний профіль глибини, що вказує на глибину металу ~ 220 нм. (e) Коефіцієнт пропускання енергії в ТГц комерційних двосторонніх клейких стрічок від Nitto і 3ТС, що використовувалися для виготовлення пристроїв BLMM і 2BLMM. У цьому експерименті двосторонні стрічки ламіновані на підкладці Zeonor, і спектральне пропускання, виміряне через цю підкладку, також показано (чорна лінія).

У цій роботі було використано стрічки від Nitto Denko Corp. (Осака) товщиною 10 мкм (№ 5601) і 33 мкм (№ 5603), а також стрічки від 3ТС [Taichen Corporate (Jiangxi) Co., Ltd.] товщиною 9 мкм (J0005) і 13 мкм

(J0010). У таблиці 4.1.1 наведено їх використання в різних пристроях, представлених у цій роботі. Товщину стрічок виміряно профілометром (Dektak, Bruker, Billerica), а їхнє ТГц-поглинання охарактеризовано за допомогою ТГц-вимірювань з часовою роздільною здатністю. на рис. 4.1 (е) показано спектральне пропускання в ТГц різних стрічок, ламінованих на підкладці Zeonor, а також стрічку, виміряну з голою підкладкою (позначеною як Zeonor). Було виконано чисельне моделювання за допомогою 3D скінченно-різницевого розв'язувача (FDTD) (Lumerical Inc.) для дослідження та оптимізації параметрів цільової конструкції і досягнення бажаних властивостей широкосмугової фільтрації в ТГц-області. Як показано на вставці на рис. 4.1 (а), геометрія металевої структури визначається кроком решітки (P), довжиною зовнішнього квадратного петлевого отвору (L), довжиною внутрішнього квадратного петлевого отвору (w) і товщиною шару діелектричного зв'язку (d), що розділяє дві метаповерхні. Ми моделювали стрічку як шар діелектрика з втратами з дійсною та уявною частинами показника заломлення, що відповідають n 1.65 та k 0.003, відповідно, які з невеликою похибкою є частотно-незалежними значеннями, отриманими за допомогою ТГц спектроскопії з часовою роздільною здатністю для всіх зразків стрічки.

Таблиця 4.1.

Геометричні параметри широкосмугового пристрою

Прилад	P (μm)	L (μm)	w (μm)	d (μm)	Стрічка	f_0 (THz)	Δf (THz)
S1	86	80	60	33	No. 5603	0.84	0.59
S2	70	66	48	33	No. 5603	1.00	0.77
S3	52	48	36	23	J0010 and No. 5601	1.46	0.86
S4	29	23	19	10	No. 5601	3.10	1.57
S5	28	24	16	10	No. 5601	3.17	2.02
S6	32	28	15	33	No. 5603	3.44	3.20

P - крок решітки, L - довжина зовнішньої квадратної щілини, w - довжина внутрішньої квадратної щілини і d - відстань між двома

метаповерхнями, як схематично показано на рис. 4.1 (а). Також перераховані стрічки, використані при виготовленні пристрою, а також центральна частота (f_0) смуги пропускання і її спектральна смуга пропускання (FWHM) (Δf)

Геометричні розміри, наведені в таблиці 4.1, були визначені за допомогою чисельного моделювання для отримання широкої, гострої та симетричної смуги пропускання з центрами на різних частотах. Завдяки масштабній інваріантності, зменшення розмірів усіх геометричних параметрів на однакову величину пропорційно зміщує профіль пропускання пристрою в бік коротших довжин хвиль (вищих частот). Структури S1, S2 і S3 засновані на спільному дизайні метаповерхні, що відображає подібні співвідношення між геометричними параметрами. Як результат, ці три фільтри мають схожі властивості з точки зору смуги пропускання, спадів і загального профілю пропускання. Обмеження процесу фотолітографії на підкладках не дозволили використовувати той самий дизайн фільтра на більш високих частотах, оскільки дефекти і просторова однорідність в пристроях відіграють більшу роль при зменшенні параметрів структури. Зокрема, було встановлено, що мінімальні розміри елементів P-L не повинні бути меншими за 4 мкм. Тому пристрої S4, S5 і S6 були розроблені з використанням іншої моделі для дослідження властивостей фільтрації в діапазоні частот близько 3 ТГц, при цьому мінімальний розмір елемента був достатньо великим, щоб забезпечити виготовлення високоякісних зразків. Зауважте, що параметр зчеплення d не можна повністю контролювати, оскільки він базується на товщині адгезійної області між двома метаповерхнями.

4.2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ

4.2.1 Ефективність спектральної фільтрації

Геометрія метаповерхні, що використовувалася для виготовлення шести пристроїв BLMM, позначених від S1 до S6, наведена в таблиці 4.1.1. на рис. 4.2(a) і 4.2(b) показано, що вимірний спектр пропускання в ТГц (кола), що відповідає кожній структурі, добре узгоджується з результатами моделювання FDTD (суцільні лінії). Ми бачимо, що співвідношення між найвищою і найнижчою частотами на половині максимуму пропускання відповідає 2, 2.2, 1.9, 1.7, 1.9 і 2.8 для пристроїв S1 - S6 відповідно. Таким чином, конструкції BLMM демонструють ширину смуги пропускання FWHM, яка відповідає приблизно одній октаві (або фактору 2). Спектри пропускання мають супергауссову форму з вимірним коефіцієнтом пропускання енергії $>70\%$ в області смуги пропускання. Цей відносно високий коефіцієнт пропускання частково пояснюється слабким відбиттям Френеля на межі розділу повітря-полімер, яке значно нижче, ніж зазвичай спостерігається на межі розділу повітря-напівпровідник. Крім того, прилади BLMM демонструють круті спади (виміряні з високочастотної сторони смуги пропускання) >50 дБ на октаву і до 100 дБ на октаву для S6. Такі значення спаду є більшими, ніж для інших двошарових метаматеріальних пристроїв на основі таких структур, як нахилені кільцеві щілини (30,2 дБ/октава), меандрові щілини (44,6 дБ/октава) та щілини єрусалимського хреста (58,3 дБ/октава). Ці спади також можна порівняти з тими, про які повідомлялося для більш складних багатошарових метаматеріальних структур. Як показано на рис. 4.2(b) для S1, S2 і S3, такий спад призводить до значного придушення пропускання, що наближається до 30 дБ в межах октави від центральної частоти передачі. Крім того, загасання цих пристроїв залишається відносно високим (>10 дБ) на частотах, що виходять за межі октави від області смуги пропускання. На рис. 4.2 (c) показано вимірний максимальний коефіцієнт пропускання (Т

тах) шести пристроїв як функцію частоти, де кружечками позначено центральну частоту смуги пропускання фільтрів, а горизонтальні лінії відповідають лінійній ширині на напіввисоті (FWHM) на пристроях. Іншим показником, який використовується для характеристики смугових фільтрів, є часткова смуга пропускання (FBW), що визначається як абсолютна смуга пропускання на частоті FWHM, поділена на центральну частоту. Як показано на рис. 4.2(d), наші структури мають $FBW > 50\%$, а для S6 - до 93%, що, наскільки нам відомо, є найбільшим значенням FBW для смугових фільтрів ТГц. Порівняно з одношаровими метаповерхневими структурами, конструкція BLMM забезпечує широку смугу пропускання з вищим загасанням в області стоп-смуги, більш плоску смугу пропускання і крутіші спади.

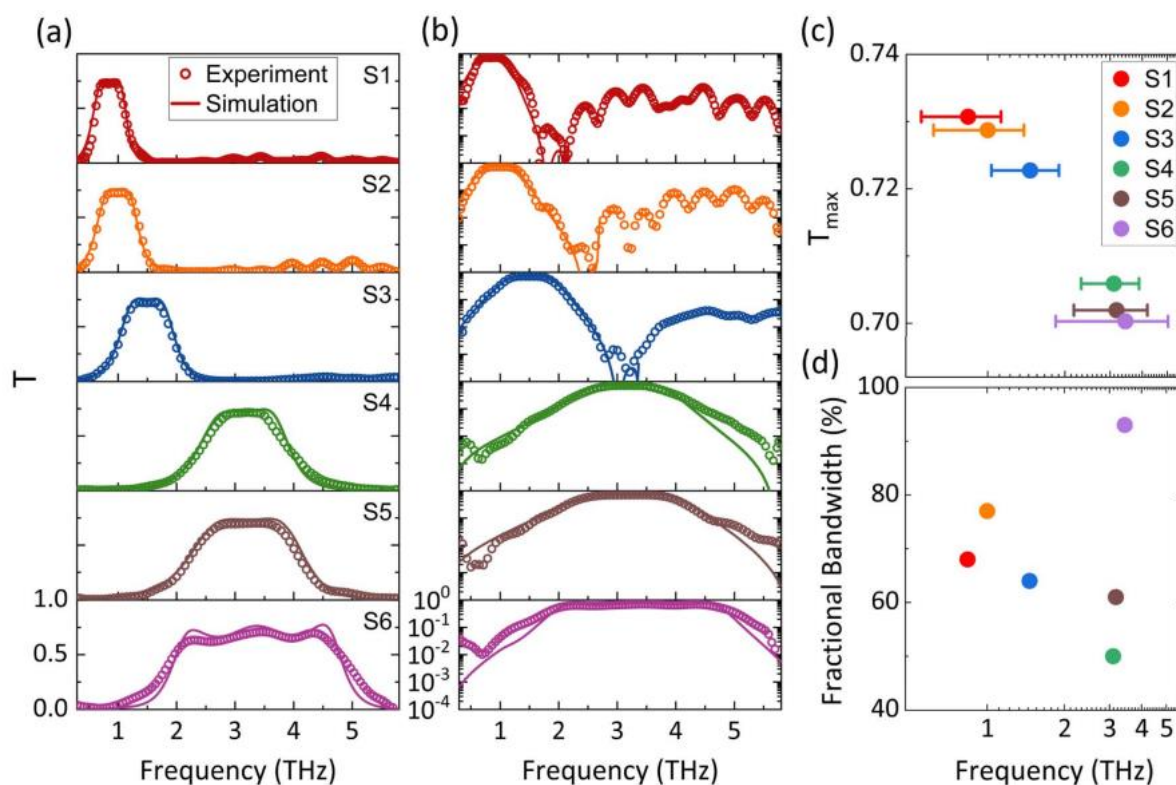


Рис. 4.2 Вимірний (кружечки) і змодельований (суцільні лінії) спектри пропускання широкосмугових фільтрів на основі BLMM у ТГц (а) у лінійному масштабі і (б) у напівлогарифмічному масштабі.

Експерименти виконано за допомогою системи спектроскопії в часовій

області ТГц і вони добре узгоджуються з результатами моделювання FDTD. (c) Вимірний максимум пропускання ($T_{\max}$) структур на центральній частоті в напівлогарифмічному масштабі, в якому смуги похибок представляють відповідну октавну ширину лінійки FWHM. (d) Розрахована часткова смуга пропускання (у відсотках) всіх пристроїв BLMM по частоті для результатів експерименту.

4.2.2. Конструкція 2BLMM

Для створення пристроїв з покращеними характеристиками спектральної фільтрації два BLMM були з'єднані разом за допомогою тонкої клейкої плівки (3ТС-J0005), щоб виготовити пристрій 2BLMM, схематично показаний на рис. 4.3(a). Виходячи з товщини підкладки Zeonor і клейкої плівки, дві структури BLMM розділені відстанню $D = 386$ мкм, яка є достатньо великою, щоб запобігти ефекту ближнього поля. Таким чином, конфігурація не залежить від взаємного вирівнювання та орієнтації поперечних структур. На рис. 4.3(b) і 4.3(c) ми порівнюємо пропускання в ТГц, виміряне за допомогою S2 і S4 як окремих пристроїв BLMM (сині криві), і пропускання, виміряне в конфігурації 2BLMM (помаранчеві криві). Пристрої 2BLMM демонструють кращі показники фільтрації з точки зору ослаблення фону. Наприклад, область стоп-смуги забезпечує сильніше ослаблення сигналу приблизно на два порядки (пунктирні лінії). Крім того, спади (виміряні з боку високих частот) тепер відповідають 86 дБ/октаву і 85 дБ/октаву для S2-2BLMM і S4-2BLMM, відповідно, що приблизно відповідає квадрату спадів, виміряних за допомогою відповідних пристроїв BLMM. Таке сильніше ослаблення в смузі затухання і більш різкі переходи між смугою пропускання і смугою затухання узгоджуються з конструкцією, заснованою на двох незалежних BLMM, де спектр пропускання тоді відповідає квадрату пропускання одного пристрою. Однак, є значні переваги в об'єднанні і зв'язуванні двох BLMM. По-перше, максимальний

коефіцієнт пропускання в смузі пропускання залишається відносно високим ($>65\%$), оскільки відсутній повітряний зазор, що дозволяє уникнути додаткових віддзеркалень Френеля. Сильніше, ніж очікувалося, ослаблення також спостерігається в області стоп-смуги. Для S2 коефіцієнт пропускання між 4 і 5,5 ТГц зменшується з 10^{-1} до $<5 \times 10^{-4}$ (або з 10 дБ до 33 дБ) при використанні геометрії 2BLMM, що перевищує очікуване зменшення сигналу на основі квадратичної залежності. Це посилене зменшення сигналу в області стоп-смуги може свідчити про дипольну взаємодію між двома пристроями BLMM, що індукує нову зв'язану моду, яка сприяє зменшенню коефіцієнта пропускання в цій спектральній області.

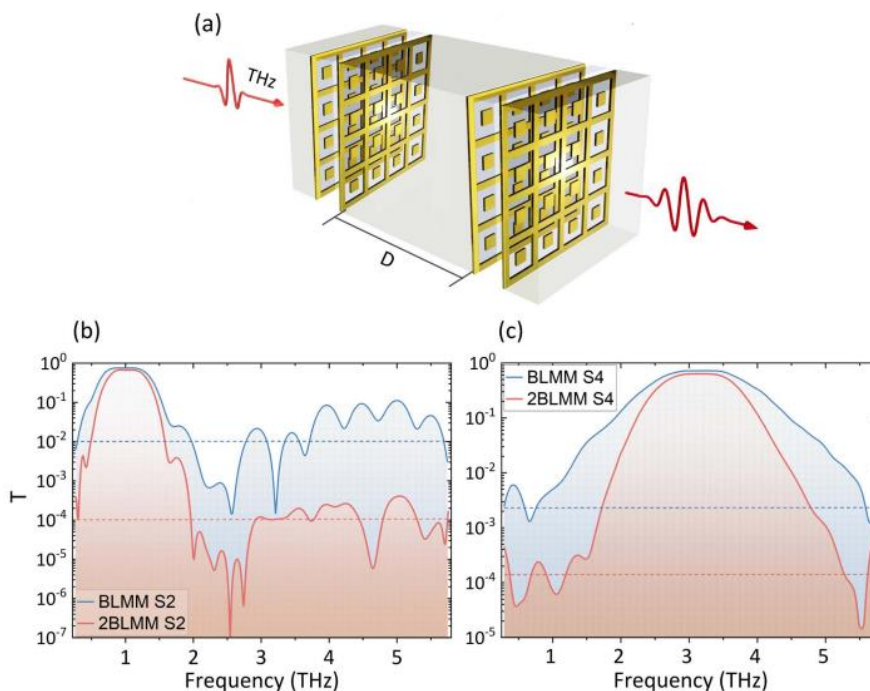


Рис. 4.3 (а) Схема пристрою 2BLMM, виготовленого з двох структур BLMM, скріплених між собою двостороннім скотчем (розділених відрізком D). Порівняння виміряного пропускання в ТГц пристроїв BLMM (синя крива) і 2BLMM (помаранчева крива) для (b) S2 і (c) S4. Пунктирні лінії показують усереднену нижню межу загасання.

Висновки

В цьому розділі розглянуто інноваційну ідею конструювання та дослідження характеристик смугового фільтру що складається з шести пристроїв з метаматеріального двошарового фільтру (BLMM) та покращень його характеристик об'єднанням двох таких фільтрів з властивостями смугової фільтрації в ТГц діапазоні. Ці пристрої мають відносно рівномірну і стабільну область смуги пропускання з центром на різних частотах, з максимальним коефіцієнтом пропускання, що перевищує 70%, і великою спектральною смугою пропускання, що відповідає приблизно одній октаві. В наслідок експерименту досліджено, що спектр пропускання має супергауссівський профіль з крутими спадами, в той час як область стоп-смуги забезпечує сильне придушення сигналу. Згідно з побудовою виготовлення пристроїв BLMM є відносно простим, оскільки воно базується на стандартному процесі фотолітографії. Крім того, було продемонстровано, що 2 прилади BLMM можуть бути об'єднані разом для покращення селективності спектральної фільтрації. Така конфігурація 2BLMM значно покращує придушення сигналу в області стоп-смуги, в той час як коефіцієнт пропускання залишається рівним і високим (>65%). Результати демонструють високу ефективність та потенціал для застосування у телекомунікаціях.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

У сучасному світі, де технології розвиваються стрімкими темпами, важливість інновацій у сфері високочастотної електроніки стає надзвичайно актуальною. Серед численних компонентів, що відіграють ключову роль у високочастотних системах, особливе місце займають фільтри. Вони відповідають за чистоту та якість сигналу, відфільтровуючи небажані частоти та забезпечуючи ефективне функціонування радіочастотних пристроїв.

Наш стартап-проект зосереджується на розробці персоналізованих надвисокочастотних фільтрів, що відкриває нові горизонти у використанні метаматеріалів та діелектричних резонансних структур. Цей підхід дозволяє не лише поліпшити характеристики існуючих фільтрів, але й створити індивідуальні рішення, адаптовані до конкретних потреб замовників.

У цьому розділі, буде детально розглянемо концепцію нашого стартапу, від інноваційного підходу до розробки фільтрів та практичних аспектів їх впровадження у різноманітні галузі. Ми обговоримо, як наші рішення можуть трансформувати ринок надвисокочастотних компонентів, забезпечуючи більшу ефективність та точність для різноманітних застосувань — від телекомунікацій до наукових досліджень.

5.1. ОПИС ІДЕЇ ПРОЕКТУ

Стартап проект пропонує революційний підхід до розробки надвисокочастотних фільтрів, який базується на використанні передових діелектричних резонансних структур з метаматеріальними властивостями. Ціль - створити фільтри, які не тільки перевершують існуючі стандарти

ефективності та точності, але й надають можливість кастомізації під специфічні потреби користувача.

Таблиця 5.1

Зміст ідеї стартап-проекту

№	Напрями застосування	Переваги для користувача
1	Телекомунікації	Покращена якість сигналу у мобільних мережах, зменшення перешкод та шумів, забезпечення стабільного та надійного зв'язку. Збільшення пропускної здатності мережі та покращити якість передачі даних.
2	Радіоастрономія	Використання у радіотелескопах для вивчення космічних радіосигналів з метою підвищити точність у відфільтровуванні радіочастот, що дозволить отримувати чистіші дані для наукових досліджень. Завдяки точному відбору частот, науковці можуть отримати більш точні дані про космічні об'єкти.
3	Медичне обладнання	Використання у високочастотному медичному діагностичному обладнанні, такому як МРТ. Підвищення точності та надійності діагностичних приладів, зниження впливу зовнішніх радіочастотних завад, що дозволить лікарям отримувати більш чіткі та деталізовані зображення для діагностики на діагностичному обладнанні, такому як МРТ.
4	Військові комунікації	Покращення надійності та безпеки військових зв'язків. Забезпечення ефективного придушення завад і шумів, що є критично важливим для військових операцій та передачі важливих даних.
5	Аерокосмічна промисловість	Надійність та стабільність сигналів у екстремальних умовах космічного простору, для використання у системах управління польотами та супутникових комунікаціях.

Таблиця 5.2

Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Технікоек ономічні характер истики ідеї	Мій проект	ТОВ «Радіан»	ТОВ «УНДІ КТ»	W (слабка сторон а)	N (нейтра льна сторона)	S (сильна сторона)
1.	Витрати на розробку та впровадж ення	Високі витрати на розробку та впровадж ення	Високий рівень витрат на розробку та впровадже ння.	Високий рівень в залежнос ті від обсягу та складнос ті впровадж уваних модулів та налаштув ань.	ТОВ «Радіан » має високі витрат и можуть бути обтяжл ивими	ТОВ «УНДІ КТ» має помірні витрати , може вимагат и значни х інвести цій	Мій проект володіє більш гнучким та бюджет ним ефектив ним рішення м
2.	Технологі чна інновацій ність	Високий рівень завдяки використа ння метамате ріальних структур.	Високий рівень для звичайних антен високого діапазону.	Високий рівень для антен високого діапазону .	ТОВ «Радіан » має менши й технол огічни й потенці ал.	ТОВ «УНДІ КТ» має нормал ьний технол огічної інновац ійності.	Мій проект володіє високим рівнем техноло гічної інноваці йності.
3.	Масштаб ованість	Середній рівень масштабу вання для відповіді на потреби різномані тних компаній	Високомас штабне рішення, може обслугову вати потреби як малих, так і великих підприємс тв	Середній рівень масштабу вання для відповіді на потреби різномані тних компаній	ТОВ «Радіан » менши й рівень масшта бовано сті	Мій проект володіє гнучко ю масшта бованіс ть.	ТОВ «УНДІ КТ» має високий рівень прибутк овості інвестиц ій

2) Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій для авторів проекту
Розробка надвисокочастотних фільтрів	Фотолітографія	Ексімерний лазер ArF	Доступний для використання
	3D-друк	3D-принтер	Доступний для використання та модифікації

Доступність цих технологій залежить від ресурсів та партнерських відносин. Важливо забезпечити співпрацю з університетами, дослідницькими лабораторіями та виробничими компаніями, які мають необхідне обладнання та знання.

Можливість технологічної реалізації проекту за допомогою 3D-друку та фотолітографії є високою. 3D-друк дозволяє створювати складні структури з високою точністю, що є ідеальним для персоналізованих фільтрів. Фотолітографія, у свою чергу, забезпечує виробництво деталей з мікророзмірами, що є критично важливим для високочастотних фільтрів. Обидві технології пропонують гнучкість у дизайні та можливість швидкої ітерації дизайну, що є ключовим для інноваційного проекту.

3) Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

У таблиці 5.4 наведено попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	Середня конкуренція (1-3 ключових гравців).
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Значний обсяг продаж (приблизно 5 млн гривень на рік).
3.	Динаміка ринку	Щорічний приріст на рівні 10-20% через зростання попиту.
4.	Наявність обмежень для входу	Висока вартість обладнання та витрати на розробку та маркетинг можуть бути обмеженням для нових учасників
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання стандартів безпеки: Розробка повинна відповідати високим стандартам безпеки та конструювання фільтрів.
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Середня рентабельність на рівні 20-25%.

У таблиці 5.5 наведено характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 5.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Інноваційні рішення для розробки точних та налаштов	Телекомунікаційні компанії (для покращення сигналу). Промислові підприємства (для контролю процесів).	Телекомунікації: Фокус на надійності та широкому частотному діапазоні. Промисловість: Потреба у високій точності та мінімізації помилок.	Висока точність та ефективність фільтрації. Можливість адаптації під конкретні потреби.

Продовження таблиці 5.5

1.	аних фільтрів для специфічних застосувань	Військові установи (для точності зв'язку). Медичні лабораторії (для діагностичного обладнання).	Військові: Високі вимоги до безпеки та стабільності. Медичні лабораторії: Фокус на точності та надійності.	Довговічність та надійність виробу. Конкурентоспроможна ціна
----	---	--	---	---

У табл. 5.6 показані фактори загроз реалізації стартапу.

Таблиця 5.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Сильні конкуренти з встановленими позиціями на ринку.	Розробка унікальних та інноваційних продуктів.
2.	Технологічні зміни	Швидкий розвиток технологій може зробити продукт застарілим.	Інвестування в неперервні дослідження та розробку.
3.	Законодавчі зміни	Нові нормативи та стандарти можуть потребувати додаткових витрат	Активне слідкування за законодавством та адаптація до нього.
4.	Фінансові ризики	Високі витрати на дослідження та розробку.	Залучення інвестицій та ефективне управління ресурсами.

У табл. 5.7 наведено фактори можливостей при реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Ринкові тенденції	Збільшення попиту на хмарні CRM-системи та росту сегменту	Інтенсифікація маркетингових заходів, розширення функціоналу та можливостей продукту, залучення нових клієнтів та партнерів.
2.	Технологічні Тенденції	Розвиток нових технологій та інновацій, що можуть покращити продукт	Інвестування в дослідження та розробку для впровадження передових технологій, активна співпраця з технологічними партнерами для реалізації нововведень.
3.	Глобальна Експансія	Зростання міжнародного попиту на хмарні рішення для управління відносинами з клієнтами	Встановлення стратегічних партнерств з міжнародними компаніями, локалізація продукту та підтримка для різних ринків, активний маркетинг та просування на нових територіях.

У таблиці 5.8 визначено особливості конкурентного середовища та його вплив на впровадження проекту.

Таблиця 5.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Монополістична	Наявність кількох виробників з унікальними продуктами.	Потреба у виділенні свого продукту через унікальні властивості.

Продовження таблиці 5.8

2. Національний та міжнародний.	Конкуренція з внутрішніми та зарубіжними компаніями.	Необхідність глобального маркетингу та адаптації до різних ринків.
3. Внутрішньогалузева	Конкуренція між компаніями у межах однієї галузі.	Зосередження на специфіці галузі та інноваціях.
4. Товарно-видова	Продукти з подібними характеристиками.	Необхідність підкреслювати унікальні особливості свого продукту.
5. Нецінова	Перевага через якість, інновації, бренд.	Важливість зосередження на інноваціях та брендингу.
6. Інтенсивність	Сильний брендовий імідж вирізняє компанії.	Розвиток сильного бренду для залучення та утримання клієнтів.

У таблиці 5.9 наведено аналіз конкуренції проекту в галузі за М.Портером

Таблиця 5.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товариза́мники
	Компанії, що спеціалізуються на високочастотних фільтрах	Компанії або стартапи, які можуть увійти на ринок з інноваційними рішеннями або кращими ціновими пропозиціями.	Виробники електронних компонентів, сировини для метаматеріалів, та інші постачальники, які впливають на вартість і якість кінцевого продукту.	Від телекомунікаційних компаній до військових контрагентів, клієнти визначають попит та вимоги до продукту.	Інші технології або продукти, які можуть виконувати схожі функції, створюючи конкуренцію за увагу клієнтів.

Продовження таблиці 5.9

Висновки:	Конкуренція може бути інтенсивною, потрібна унікальна цінність продукту.	Потреба в постійному у інноваційному розвитку та вдосконаленні продуктів.	Залежність від постачальників може вплинути на вартість та якість продукту.	Важливість розуміння специфічних потреб клієнтів для забезпечення успіху.	Необхідність відстежувати розвиток технологій та адаптуватися до змін у попиті.
-----------	--	---	---	---	---

У табл. 5.10 наведено фактори конкурентоспроможності та їх обґрунтування.

Таблиця 5.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Технологічна Інноваційність	Центральний фактор, оскільки унікальні технологічні рішення та інновації відрізняють продукт на ринку.
Якість продукту	Важлива для забезпечення надійності та довговічності фільтрів, що підвищує довіру клієнтів.
Гнучкість та адаптивність	Здатність швидко адаптуватися до змінних вимог ринку та потреб клієнтів.

Виходячи з аналізу представленого в таблиці бачимо, що конкурентоспроможність стартапу значною мірою залежить від інноваційності, якості продукту, гнучкості та адаптивності до вимог ринку, а також від ефективної цінової стратегії. Успіх на ринку вимагатиме постійного вдосконалення та адаптації продукту, а також здатності

збалансувати витрати та ціноутворення для приваблення цільових сегментів ринку.

У табл. 5.11 наведено сильні та слабкі сторони проекту.

Таблиця 5.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Технологічна Інноваційність	18						+	
2.	Якість продукту	16					+		
3.	Гнучкість та адаптивність	16					+		

Таблиця 5.12

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Інноваційність, спеціалізація, гнучкість продукту	Слабкі сторони: Обмежені ресурси, конкуренція, залежність від технологій
Можливості: Унікальні технологічні рішення. Фокус на вузькому сегменті ринку з високим потенціалом. Здатність адаптувати продукт під специфічні вимоги клієнтів.	Загрози: Обмежений доступ до капіталу та виробничих ресурсів. Висока конкуренція на ринку високочастотних фільтрів. Швидкі зміни у технологіях можуть впливати на релевантність продукту.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту наведені у табл. 5.13.

Таблиця 5.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Партнерство з великими технологічними компаніями	Висока	Середня
2.	Краудфандинг та спільнотні інвестиції	Середня	Середня
3.	Прямі продажі через інтернет-платформи	Середня	Короткі, до середніх

Обрана альтернатива: №1 – Партнерство з великими технологічними компаніями. Обрана альтернатива вибрана через високу ймовірність отримання ресурсів та середні строки реалізації у порівнянні з іншими альтернативами.

4) Розроблення ринкової стратегії проекту

Обґрунтування вибору цільових груп потенційних споживачів наведено у табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Телекомунікаційні компанії. Шукають рішення для поліпшення якості сигналу.	Висока	Великий	Висока	Складна
2.	Виробники медичного обладнання. Потребують точні фільтри для діагностичного обладнання	Висока	Середній	Середня	Середня
3.	Військово-промисловий комплекс. Зацікавлені в надійних фільтрах для обладнання.	Висока	Складний	Висока	Складна

Обрана стратегія, це диференційований маркетинг, а саме робота з кількома сегментами, наприклад, телекомунікаційні компанії, медичні

лабораторії, військово-промисловий комплекс, пропонуючи для кожного сегмента специфічні продукти та маркетингові стратегії. Це дозволить охопити широкий спектр потреб та максимізувати ринковий охоплення.

Визначення базової стратегії розвитку наведено у табл. 5.15.

Таблиця 5.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Диференційований маркетинг зі зосередженням на кількох ключових сегментах: телекомунікації, медицина, військова промисловість	Розробка та пропозиція специфічних продуктів для кожного сегмента, адаптованих під їх унікальні вимоги.	Інноваційність та висока якість продуктів, гнучкість у дизайні та можливість персоналізації, надійність та висока технічна експертиза.	Зосередження на інноваціях та якості продуктів, розширення ринку через цільові сегменти, і встановлення міцних відносин з ключовими клієнтами у кожному сегменті.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки наведено у табл. 5.16.

Таблиця 5.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Шукати нових споживачів та збирати існуючих	Так	Розширення первинного попиту

Визначення стратегії позиціонування наведено у табл. 5.17.

Таблиця 5.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту
1.	Висока точність, надійність, індивідуальний підхід до потреб клієнтів.	Зосередження на інноваціях, якості, та розробка продуктів згідно з унікальними вимогами ключових сегментів.	Інноваційність, технічна експертиза, висока якість продукції, гнучкість у дизайні.	Стартап має асоціюватися з високотехнологічними рішеннями, надійністю, індивідуальним підходом до потреб кожного клієнта.

5) Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Ключові переваги концепції потенційного товару наведено у табл. 5.18.

Таблиця 5.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Високоякісна фільтрація для специфічних технологічних та промислових застосувань.	Покращена точність та ефективність у фільтрації частот, налаштована під індивідуальні потреби клієнтів.	Інноваційність технології, гнучкість у дизайні, висока надійність, можливість швидкого адаптування до змінних вимог ринку.

Визначено три рівні моделі товару. Сутність та складові рівнів товару наведено у табл. 5.19.

Таблиця 5.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Базова потреба споживача: Ефективна фільтрація високочастотних сигналів для специфічних застосувань. Функціональна вигода: Висока точність та надійність у фільтрації, індивідуалізація під конкретні потреби користувача.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Інноваційність продукту	М	Тх
	2. Використання передових метаматеріалів	Нм	Е
	Якість: Відповідність міжнародним стандартам, перевірка надійності та ефективності.		
	Пакування: Захищене, екологічно чисте, зручне для транспортування.		
	Марка: "InnoFilter"		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: встановлення та інструктаж.		
	Після продаж: Технічна підтримка, гарантійне обслуговування, консультації щодо використання.		
Захист від копіювання через реєстрація назви та логотипу компанії як торгової марки.			

Визначення меж встановлення ціни на послугу наведено у табл. 5.20.

Таблиця 5.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товаризамінники	Рівень цін на товарианалоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	Недостатньо даних	Недостатньо даних	Високий	Недостатньо даних

Формування системи збуту послуги наведено у табл. 5.21.

Таблиця 5.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Клієнти шукають надійні, високотехнологічні рішення та цінують індивідуальний підхід.	Прямі продажі, партнерства з дистриб'юторами, технічна підтримка, післяпродажне обслуговування.	Комбінація прямих і непрямих каналів, залежно від потреб сегменту.	Гнучка система, яка дозволяє легко адаптуватися до потреб різних клієнтів і змін на ринку.

Концепції маркетингових комунікацій наведено у табл. 5.22.

Таблиця 5.22

Концепція маркетингових комунікацій

п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Технологічно освічені клієнти	Соціальні мережі, онлайн-форуми, технологічні публікації	Інноваційність, висока ефективність, інтеграція	Зацікавленість та усвідомлення переваг фільтрів з використанням метаматеріалів	Підкреслення технологічної переваги та індивідуального підходу до потреб кожного клієнта.
2.	Бізнес-лідери та власники підприємств	Ділові заходи, експертні вебінари, спеціалізовані журнали	Високий рівень обслуговування, налаштованість на потреби клієнта	Демонстрація практичного використання та підтримка обслуговування	Престижні та авторитетні комунікації для створення довіри та експертного статусу

Висновки

У розділі проведений аналіз стартап-проекту "InnoFilter" свідчить про його значний потенціал і високий рівень конкурентоспроможності. Зокрема, виявлено активний попит на ринку на більш ефективні фільтри високих та надвисоких частот. Динаміка ринку підтверджує важливість інновацій у цьому сегменті, що створює перспективи для успішного впровадження.

Цільові групи клієнтів, які охоплюються, це телекомунікаційні компанії, медичні лабораторії, військово-промисловий комплекс, , що охопити широкий спектр потреб та максимізувати ринковий охоплення. Аналіз бар'єрів входження, таких як конкурентна обстановка та витрати на маркетинг, вказує на необхідність стратегічного планування для успішного виходу на ринок.

Однак технологічна перевага проекту, зокрема його інноваційність у розробці фільтрів з використанням резонансних структур з метаматеріальними властивостями, створює можливість подолати труднощі виходу на ринок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У першому розділі магістерської дисертації було ретельно розглянуто сучасний стан розвитку технологій у сфері надвисокочастотних фільтрів і гетеродинів, акцентуючись на фероелектричних та магнетоелектричних матеріалах для підвищення ефективності цих пристроїв. Було проведено аналіз викликів з якими стикається прогрес галузі бездротових телекомунікацій у різних областях.

У другому розділі обговорено важливість розвитку антен терагерцового діапазону, необхідність використання метаматеріалів підкреслюючи їх унікальні характеристики та перспективи широкого спектру застосувань та важливість точної передачі та прийому сигналів у вільному просторі для їхнього ефективного використання. Було також описано основні характеристики метаматеріалів, основні функції та можливості метаматеріалів у покращенні характеристик антен, таких як збільшення смуги пропускання, покращення відсікання шумів. Що доводить перспективність використання резонансних структур з метаматеріальними властивостями для у галузі телекомунікацій.

У третьому розділі у контексті дослідження було ознайомлено з інноваційним рішенням в розробці генераторів на основі резонансної структури з метаматеріальними властивостями, використовуючи нелінійні властивості для генерації терагерцових частот. Досліджувалась структура з масиву розділених кільцевих резонаторів (SRR), яка при бічному зсуві відносно замкнутих провідних кілець (CR) значно підсилювала електричне поле. Також було представлено електромагнітний відгук структури за допомогою терагерцової спектроскопії в часовій області та чисельного моделювання. За результатами дослідження було виявлено, що бічне зміщення масиву замкнутих кілець відносно масиву SRR призводить до збільшення потужності осцилятора в 4 рази і до зміни на ~40% величини

підсилення електричного поля в зазорі SRR. На основі отриманих даних у розділі можна ознайомитись з основними принципами побудови резонансної структури з метаматеріальними властивостями на базі масиву SRR та побачити ефективність використання подібного методу.

У четвертому розділі дослідження було проаналізовано інноваційну ідею розробки та експериментального дослідження характеристик смугового фільтру, що складається з шести пристроїв з метаматеріального двошарового фільтру (BLMM) та покращень його характеристик об'єднанням двох таких фільтрів з властивостями смугової фільтрації в ТГц діапазоні. В наслідок аналізу вихідних даних експерименту виявлено, що спектр пропускання має супергауссівський профіль з крутими спадами, в той час як область стоп-смуги забезпечує сильне придушення сигналу (як правило, >20 дБ). Також варто зазначити, що виготовлення метаматеріального фільтру BLMM базується на стандартному процесі фотолітографії. Також у розділі було проведено дослідження фільтру, який конструюється методом об'єднання двох BLMM, що призводить до покращення селективності спектральної фільтрації, покращення придушення сигналу в області стоп-смуги, в той час як коефіцієнт пропускання залишається рівним і високим ($>65\%$). З цього випливає перспективність використання та можливості розробки інноваційних фільтрів на базі метаматеріалів.

У п'ятому розділі дослідження був проаналізований стартап-проект "InnoFilter", спрямований на розробку персоналізованих частотних фільтрів для підвищення ефективності антен терагерцового діапазону. Під час аналізу економічного ринку в Україні та за кордоном був виявлений високий потенціал у конструюванні фільтрів надвисокочастотного діапазону. Цей стартап ставить перед собою завдання революціонізувати підхід до розробки фільтрів надвисокочастотного діапазону, шляхом поєднання

передових технологій конструювання метаматеріалів. В наслідок аналізу динаміки ринку в розділі. Було підтверджено важливість інновацій у цьому сегменті, що створює перспективи для успішного впровадження. Було проаналізовано цільові групи клієнтів на які орієнтується проект та виконано аналіз можливих стратегії розвитку проекту для максимального охоплення ринку. Було виконано аналіз бар'єрів входу, в наслідок якого вказує на необхідність стратегічного планування для успішного виходу на ринок. Цей стартап ставить перед собою завдання революціонізувати підхід до розробки надвисокочастотних фільтрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, *Science* 292 (5514), 77-79 (2001).
2. S. A. Ramakrishna, J. Pendry, D. Schurig, D. Smith and S. Schultz, *Journal of Modern Optics* 49 (10), 1747-1762 (2002).
3. H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla and R. D. Averitt, *Physical Review B* 78 (24), 241103 (2008).
4. N. Fang, H. Lee, C. Sun and X. Zhang, *Science* 308, 534-537 (2005)
5. Keiser, G.R.; Seren, H.R.; Strikwerda, A.C.; Zhang, X.; Averitt, R.D. Structural control of metamaterial oscillator strength and electric field enhancement at terahertz frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105, 081112.
6. Sumathi, K.; Lavadiya, S.; Yin, P.Z.; Parmar, J.; Patel, S.K. High gain multiband and frequency reconfigurable metamaterial superstrate microstrip patch antenna for C/X/Ku-band wireless network applications. *Wirel. Netw.* 2021, 27, 2131–2146.
7. Patel, S.K., Surve, J., Katkar, V. et al. Machine learning assisted metamaterial-based reconfigurable antenna for low-cost portable electronic devices. *Sci Rep* 12, 12354 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16678-2>
8. Y. Shi, X. Zhang, Q. Qiu, Y. Gao, and Z. Huang, "Design of terahertz detection antenna with fractal butterfly structure," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113823–113831, 2021.
9. G. Wang, M.-d. Shi, Q.-h. Han, H.-b. Meng, and D.-b. Zeng, "Research Progress of Terahertz Wave Radiation Source," *Study On Optical Communications*, vol. 02, pp. 70-78, 2021, 10.13756/j.gtxyj.2021.02.014.
10. J. Grade, P. Haydon, and D. van der Weide, "Electronic terahertz antennas and probes for spectroscopic detection and diagnostics," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 8, pp. 1583-1591, 2007.

11. P. H. Siegel, "Terahertz technology," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 910-928, 2002.
12. A. S. Dhillon, D. Mittal, and E. Sidhu, "THz rectangular microstrip patch antenna employing polyimide substrate for video rate imaging and homeland defence applications," *Optik*, vol. 144, pp. 634-641, 2017
13. D. Li and Y. Hunag, "Comparison of terahertz antennas," in *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, 2006: IEEE, pp. 1-5.
14. P. H. Siegel, P. de Maagt, and A. I. Zaghloul, "Antennas for terahertz applications," in *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006: IEEE, pp. 2383-2386.
15. L. Prissette et al., "Radiation pattern measurements of an integrated transverse electromagnetic horn antenna using a terahertz photomixing setup," *IEEE microwave and wireless components letters*, vol. 21, no. 1, pp. 49-51, 2010.
16. T. Watanabe et al., "InP-and GaAs-based plasmonic high-electron-mobility transistors for room-temperature ultrahigh-sensitive terahertz sensing and imaging," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 89-99, 2012.
17. Slyusar V.I. METAMATERIALS ON ANTENNA SOLUTIONS
International Conference on Antenna Theory and Techniques, 6-9 October, 2009, Lviv, Ukraine pp. 19-24
18. Andrey Semichaevsky, and Alkim Akyurtlu, "Homogenization of Metamaterial-Loaded Substrates and Superstrates for Antennas," , Vol. 71, 129-147, 2007.doi:10.2528/PIER07021001
19. M. . -F. Wu, F. . -Y. Meng, Q. Wu, J. Wu and L. . -W. Li, "Miniaturization of a patch antenna with dispersive double negative medium substrates," *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, Suzhou, China, 2005, pp. 4 pp.-, doi: 10.1109/APMC.2005.1606177.

20. Ali Maleki, Avinash Singh, Ahmed Jaber, Wei Cui, Yongbao Xin, Brian T. Sullivan, Robert W. Boyd, and Jean-Michel M  nard, "Metamaterial-based octave-wide terahertz bandpass filters," *Photon. Res.* 11, 526-532 (2023)
21. ЛЬЧЕНКО М. Ю., НАРИТНИК Т. М., КАПШТИК С. В., АВДЕЄНКО Г. Л., КОРСУН В. І., ПРИСЯЖНИЙ В. І. ПЛАНУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В БЕЗПРОВОДОВИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЯХ : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 132-152 с.
22. Patel, S.K., Surve, J., Katkar, V. et al. Machine learning assisted metamaterial-based reconfigurable antenna for low-cost portable electronic devices. *Sci Rep* 12, 12354 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16678-2>
23. Wang, Wen-Qi & Fan, Shi-Wang & Xia, Jianping & Wang, Wei & Liu, Jinxi. (2023). Generation of high-order focused acoustic vortices and multiplexed beams using Dual-Channel metamaterials. *Applied Acoustics*. 214. 109715. 10.1016/j.apacoust.2023.109715.
24. Liu, Bingyi & Su, Zhaoxian & Zeng, Yong & Wang, Yongtian & Huang, Lingling & Zhang, Shuang. (2021). Acoustic Geometric-Phase Meta-Array. *New Journal of Physics*. 23. 10.1088/1367-2630/ac33f2.
25. Madannejad, A., Oberhammer, J. Channel Bounding modeling for THz Communication. (2023)
26. Chen, Tao & Zhang, Dapeng & Huang, Fengyu & Li, Zhi & Hu, Fangrong. (2020). Design of a terahertz metamaterial sensor based on split ring resonator nested square ring resonator. *Materials Research Express*. 7. 10.1088/2053-1591/abb496.
27. Kittlaus, Eric & Eliyahu, Danny & Ganji, Setareh & Williams, Skip & Matsko, Andrey & Cooper, Ken & Forouhar, Siamak. (2021). A low-noise photonic heterodyne synthesizer and its application to millimeter-wave radar. *Nature Communications*. 12. 10.1038/s41467-021-24637-0.

28. Beheshti Asl, Akbar & Rostami, Ali & Sadegh Amiri, Iraj. (2020). Terahertz band pass filter design using multilayer metamaterials. *Optical and Quantum Electronics*. 52. 10.1007/s11082-020-02268-x.
29. Joshi, G., Vijaya, R. Multiband, continuously tunable filter in 100–300 GHz range using a two-layer cavity of perforated, all-dielectric metasurfaces. *Opt Quant Electron* 55, 109 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04307-1>
30. Resen, Dheyaa & Hmood, Jassim K. & Altemimi, Mohammed Fawzi & Harun, Sulaiman. High sensitive temperature sensor based on narrow band-pass filters via optical heterodyne technique. *Optical and Quantum Electronics*. (2023). 55. 10.1007/s11082-023-04918-2.