

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

«На правах рукопису»

УДК __629.31____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Метахвильові пристрої на базі комірок метаматеріалів для технології
IoT (Internet of Things)»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ТЗ-01мп

Пасічник Вячеслав Романович

Керівник:

Доцент кафедри ТК, к.т.н., доцент

Живков О.П.

Рецензент:

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

Студент _____

Київ – 2021 року

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

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Пасічнюку Вячеславу Романовичу

1. Тема дисертації «Метахвильові пристрої на базі комірок метаматеріалів для технології IoT (Internet of Things)», науковий керівник дисертації Живков Олександр Петрович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2021 р. № 3672-с.

2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2021 р.

3. Об'єкт дослідження – фільтр мікрохвильового діапазону.

4. Предмет дослідження – мікрохвильовий пристрій на базі комірок мета матеріалів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Переглянути та проаналізувати основні відомості про базові складові системи для технології IoT (Internet of Things).

2. Зрозуміти та описати Методологія. Маніпуляція над структурами та їх характеристики.

3. Розглянути поглиначі та їхні види. Базові характеристики та особливості.

4. Змоделювати мікрохвильового фільтру на базі комірки метаматеріалів.

5. Розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Графічне обґрунтування тематики дипломної роботи

2. Графічне зображення запропонованих алгоритмів

3. Графічне відображення результатів дипломної роботи

7. Орієнтовний перелік публікацій.

8. Дата видачі завдання “ 10” жовтня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підготовка і вивчення літератури.	10.10.2021 17.10.2021	виконано
2	Розробка вступу.	17.10.2021 20.10.2021	виконано
3	Розробка розділу: Основні відомості про базові складові системи для технології IoT (Internet of Things).	20.10.2021 27.10.2021	виконано
4	Розробка розділу: Методологія. Маніпуляція над структурами та їх характеристики.	27.10.2021 04.11.2021	виконано
5	Розробка розділу: Поглиначі та їхні види. Базові характеристики та їхні особливості.	04.11.2021 14.11.2021	виконано
6	Розробка розділу: Моделювання мікрохвильового фільтру на базі комірки метаматеріалів.	14.11.2021 21.11.2021	виконано
7	Розробка стартап-проекту	21.11.2021 25.11.2021	виконано
8	Написання висновків до роботи	10.11.2021 28.11.2021	виконано
9	Оформлення роботи	до 10.12.2021	виконано

Студент

Вячеслав ПАСІЧНЮК

Науковий керівник дисертації

Олександр ЖИВКОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Метахвильові пристрої на базі комірок метаматеріалів для технології IoT» складається з переліку умовних скорочень, вступу, основної частини, що містить 5 розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 82 сторінки. Робота містить 53 рисунки та 17 таблиць. Список використаних джерел включає 33 одиниці. У відповідності до поставленої мети у даній роботі було наведено основні відомості про базові складові системи для технології IoT, проаналізовано методологію та методику маніпуляцій на структурами та їхніми характеристиками, розглянуто принцип роботи поглиначів та їхні види, включно із базовими характеристиками та особливостями. Виконано моделювання мікрохвильового фільтра на базі комірок метаматеріалів.

Ключові слова: метаматеріали, поглиначі, фільтр, Інтернет речей, структура, комірка метаматеріалів.

ABSTRACT

Master's dissertation "Metawave devices based on cells of metamaterials for IoT technology" consists of a list of abbreviations, introduction, main part, containing 5 sections, conclusions and a list of sources used. The total volume of the work is 82 pages. The work contains 53 figures and 17 tables. The list of sources used includes 33 units. In accordance with this goal, this paper provides basic information about the basic components of the system for IoT technology, analyzes the methodology and techniques of manipulation of structures and their characteristics, considers the principle of absorbers and their types, including basic characteristics and features. Modeling of a microwave filter based on metamaterial cells is performed.

Key words: metamaterials, MPA, filter, Internet of Things, structure, cell of metamaterials.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1.	11
ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО БАЗОВІ СКЛАДОВІ СИСТЕМИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІОТ (INTERNET OF THINGS)	11
1.1. Види метаматеріалів.....	11
1.2. Інтернет речей. Загальні положення.....	12
1.3 Ідеальні поглиначі метаматеріалів.	15
1.3.1 Датчики.	16
1.3.2 Випрямні антени (Ректенни)	17
1.4 Особливості при використанні метаматеріалів.	19
1.5 Метаматеріал – ідеальний поглинач.....	20
1.6 Метаматеріальні плоскі структури «Метаповерхні».	21
1.7 Еквівалентні схеми для МРА.	25
Висновки	27
РОЗДІЛ 2.	28
МЕТОДОЛОГІЯ. МАНІПУЛЯЦІЯ НАД СТРУКТУРАМИ. ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	28
2.1 Методи посилення поглиначів. Характеристики.	28
2.2 Методи маніпуляції структурами.	28
2.2.1.Збільшення електричної довжини.	28
2.2.2. Додавання зосереджених елементів.	29
2.2.3. Повітряний зазор.	31
2.2.4. Мультирезонаторний поглинач.	32
2.2.5. Багатошарова структура.	34
2.2.6 Маніпулювання площиною землі.	34
2.2.7 Маніпулювання формою резонатора.....	36
2.2.8 Реконфігурована структура.	37
2.2.9 3D поглинач метаматеріалів.....	40
2.3 Порівняння ефективностей поглиначів.	43
Висновки	45
РОЗДІЛ 3.	46
ПОГЛИНАЧІ ТА ЇХНІ ВИДИ. БАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ	46
3.1 Поглинання небажаних частот.....	46
3.2 Терагерцові програми.	47
3.3 Поглинач теплових випромінень.	49

3.4 Оптичні перемикачі.....	51
3.5 Збір енергії	53
3.6 МРА, як датчик.....	55
3.7 Застосування метаматеріалів та поглиначів	57
Висновки	59
РОЗДІЛ 4.	60
МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ФІЛЬТРА НА БАЗІ КОМІРКИ	
МЕТАМАТЕРІАЛІВ	60
4.1 Моделювання мікрохвильового фільтра на базі комірки мета матеріалів.	60
4.2 Переваги моделювання мікрохвильового фільтра на базі комірки метаматеріалів в програмному забезпеченні AWR microwave office.	61
4.3 Виготовлення мікрохвильового фільтра, вимірювання, порівняння з моделями в AWR microwave office.	61
Висновки	65
РОЗДІЛ 5.	66
РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	66
5.1 Опис ідеї проекту	66
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	68
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	69
5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	75
Висновки	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	Internet of thing
MPA	Metamaterial perfect absorbers
DNG	Double negative
DPS	Double positive
SNG	Single negative
DZR	Double zero
Hi-Z	Impedance surfaces
MPA	Metamaterial perfect absorbers
TENG	Triboelectric nanogenerator
EM	Electromagnetic waves
DC	Direct current
ESA	Electically Small Antennas
FSS	Frequency-selective surfaces
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene

ВСТУП

З кожним днем метаматеріали все більше проникають у комунікації, а технологія IoT (росте неймовірними темпами). Можна з впевненістю сказати, що в майбутньому пристрої IoT будуть використовуватись повсюди. Для того, щоб дані твердження не змінювались і далі, необхідно розробити нові покоління IoT, які матимуть можливість працювати автономно. Для досягнення даної автономності в пристроях IoT, необхідно зробити їх бездротовими, як для передачі, так і для потужності. Для підвищення ефективності, наразі, вже розроблено декілька бездротових стандартів. Проте залишились незакриті питання, такі як: бездротове живлення пристроїв IoT, точність використаних сенсорів, а також ефективність даних електронних пристроїв.

Після появи досконалих поглиначів із та матеріалів (MPA), з'явилась можливість використовувати електромагнітні хвилі, як джерело енергії.

Актуальність роботи

Попри підвищений попит на використання та матеріалі пристроїв, як у технології IoT, так і в інших галузях, залишились питання, які можна вирішити, або покращити, використовуючи мікрохвильові пристрої на базі комірок мета матеріалів. Відкритими проблемами залишились:

- бездротове живлення пристроїв IoT;
- ефективність електронних пристроїв;
- точність електронних пристроїв;
- великі розміри фільтрів у пристроях для IoT.

Зважаючи, на фактори вказані вище, стає зрозуміло, що дана тема є актуальною, а покращення або вирішення будь-якої із вказаних вище проблем призведе до більш стрімкого поширення та розвитку даної технології в майбутньому.

Практична цінність

Розроблений прототип мікрохвильового фільтра на базі комірки 9ета матеріалів, можуть використати для подальшого дослідження та розробки у сфері IoT, зокрема, у пристроях де потрібно передавати або приймати сигнали. Даний прототип може використовуватись у пристроях, які повинні працювати – бездротово або

підзаряджатись, використовуючи хвилі. Варто вказати, що даний фільтр можна вдосконалювати, а напрацювання викладені у цій роботі використати у сфері телекомунікацій.

РОЗДІЛ 1.

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО БАЗОВІ СКЛАДОВІ СИСТЕМИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ IOT (INTERNET OF THINGS)

1.1. Види метаматеріалів.

Перш за все метаматеріали можна прокласифікувати за ступенем заломлення, який можна обчислити за допомогою (1.1). Тут c – швидкість світла у вакуумі, v – фазова швидкість світла у середовищі.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Одномірні. У даного виду заломлення може змінюватися лише в одному (єдиному) напрямку простору. Дані метаматеріали виконані з шарів елементів, які розташовані паралельно і мають відмінні ступені заломлення [1]. Унікальні властивості проявляються лише в одному напрямку простору.

Двомірні. Даний вид має змогу постійно змінюватись вже в 2-х напрямках простору. Дані матеріали, зазвичай виконують у формі прямокутної структури, яка має переломлення m_1 , а розташована у середовищі, в якому заломлення m_2 .

У цей же час елементи, які мають заломлення m_1 розташовані в 2-х мірній решітці з кубічною основою. В результаті дані матеріали демонструють свої особливі властивості вже в 2-х напрямках простору. Проте двомірність не обмежена лише прямокутником, існує можливість створити за формою еліпса, кола або ж довільною формою [1].

Трьохмірні. Аналогічно із попередніми варіантами постійно змінюється в трьох напрямках простору. Дані матеріали можна представити у вигляді певного масиву областей, який має об'ємне значення (куб або еліпс), розташовані у тривимірній решітці [1].

Наступна класифікація метаматеріалів:

- Провідники. Мають можливість переміщувати квазічастинки на великі довжини, при невеликих втратах.
- Діелектрики.

- Надпровідники. Квазічастинки переміщуються на майже необмеженій відстані.
- Напівпровідники. Відображають лише певну довжину хвилі квазічастинок.

Відмінність резонансних матеріалів від нерезонансних елементів заключається в тому, що діелектрична проникність може виникати лише на певній резонансній частоті [1].

Наступна класифікація мета матеріалів (за відносною проникністю):

- DNG – негативна проникність.
- DPS – позитивна проникність.
- DZR - проникність рівняється нулю.
- SNG – змішаний тип матеріалів
- Hi-Z – високоомні поверхні.

1.2. Інтернет речей. Загальні положення.

Абсолютно точно одна із тенденцій нинішнього десятиліття – це IoT (Інтернет речей, напевно не залишилось людини, яка не чула про дану індустрію, яка дуже стрімко розвивається і потребує впровадження нових технологій, однією із яких являються мікрохвильові пристрої на базі комірок мета матеріалів, найкраще, технологію IoT може проілюструвати рис. 1.1.



Рис. 1.1 Можливі застосування IoT

Давайте розглянемо більш детально дану технологію. Що таке Інтернет речей?

Головною концепцією даної технології являється можливість підключення будь-якого пристрою до мережі Internet або іншого пристрою через Internet, за умови наявності перемикача on/off.

Інтернет речей – це велика мережа людей та речей, які підключені до Глобальної мережі, для обміну та накопичення даних, про використання даних речей, а також про ситуацію у навколишньому середовищі.

Дана концепція включає в себе неймовірно велику кількість об'єктів різних за розміром та формою, починаючи розумним чайником, який починає нагрівати воду за 10 хвилин, до включення будильника на смартфоні, до нових типів автомобілів, датчики яких можуть виявляти та уникати об'єкти на своєму шляху без безпосередньої участі людини у даному процесі. Також значний вплив даної технології можна помітити у поліпшенні самопочуття людини. Яскравим прикладом, можна відокремити сучасні фітнес-браслети, які автоматично вимірюють серцевий ритм та дистанцію пройденої за день, для подальшого опрацювання отриманих даних та пропозиції альтернативи у вигляді плану фізичних вправ, які підійдуть саме для власника даного девайсу.

На рис. 1.2 зображено спрощену модель роботи IoT (Інтернету речей).



Рис. 1.2 Спрощена схема вирішення задачі комп'ютером.

Як це працює?

Пристрої та об'єкт із вбудованими датчиками, які під'єднано до платформи IoT, яка поєднує дані, які було отримано із різних пристроїв, використовуючи аналітику відбувається обмін найважливішою (цінною) інформацію, із додатками, які були створенні для вирішення заданих потреб.

Завдяки налаштованим алгоритмам платформи IoT, мають можливість класифікувати інформацію за ступенем важливості, якщо інформація являється неважливою, платформа автоматично проігнорує. Отриману інформацію можна використовувати для виявлення та класифікування закономірностей.

Окрім поліпшення життя пересічних громадян, дана технологія може використовуватись і вже використовується у бізнесі. Одним із прикладів можна навести, використання технології IoT у сфері продаж. Наприклад, якщо я власник магазину з одягом, завдяки даній технології я можу дізнатись, які із наявних на вітрині типів одягу найбільше подобаються відвідувачам.

Використовуючи датчики, які розміщені в залі, я можу:

- Зрозуміти, де клієнти проводять найбільше часу.
- Вивчивши дані від продаж, визначити найбільш ліквідний товар.
- Автоматично узгоджувати дані з продаж із пропозицією, автоматично замовляючи товар на склад.

На рис.1.3 проілюстровано 4 типи індустрії, як ми можемо побачити, наразі настав час індустрії 4.0, в тому числі й завдяки IoT.

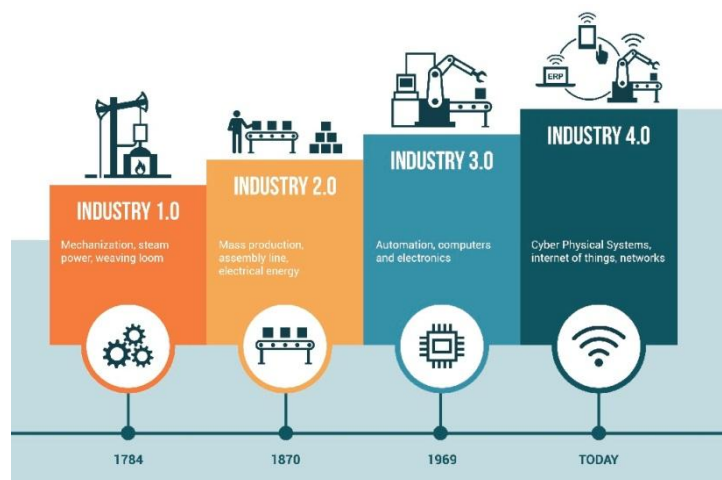


Рис. 1.4 перехід індустрій з типовими ознаками

На рис. 1.5 відображено більш детальну схему праці та реагування технології Інтернету речей (IoT)

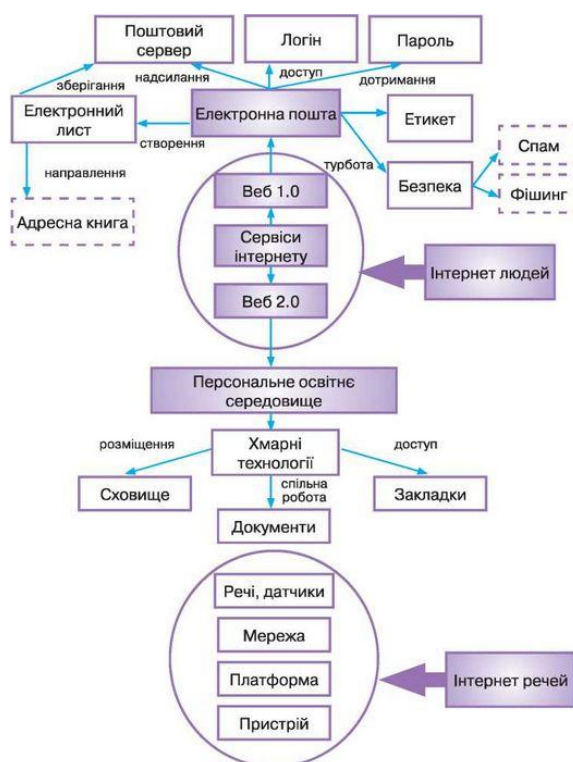


Рис. 1.5. Детальна схема IoT

1.3 Ідеальні поглиначі метаматеріалів.

Інтернет речей, як сучасна технологія стрімко увійшла у більшість аспектів життя, починаючи з проживання у будинку, в якому використовуються «Розумні» девайси, закінчуючи використанням наносервісів у різних промисловостях. Залежно від цілей програми Internet of things, відповідно виникають і різні типи проблем. Деякі із цих проблем являються специфічними, в залежності від заданих цілей.

Поширені проблеми:

- Взаємосумісність та співіснування.
- Продуктивність розробки.

Основні проблеми:

- Споживання енергії.
- Точність датчиків у пристрої.

Потужність – є одним із основних обмежень для датчиків, які розташовані у місцях віддалених від точок живлення. Досить непоганою альтернативою для вирішення даної проблеми являється збір енергії з навколишнього середовища.

Збір енергії з навколишнього середовища забезпечить зменшення витрат на обслуговування у технічному плані, зокрема, заміна батареї. Механічна, сонячна, теплова енергії являються одними з найбільш актуальних джерел енергії, які можна отримати з навколишнього середовища [3].

Метод отримання електричної енергії з теплової енергії навколишнього середовища досить поширений. У даному методі є 2 пластини Р та N типів температурний перепад між якими призводить до подальшого виробництва електроенергії.

Серед різних типів джерел навколишнього середовища електромагнітні хвилі (ЕМ) можуть бути використаними для заряджання пристроїв Інтернету речей малих потужностей. Значне поширення бездротових технологій, таких як WiFi та мобільні телефони, гарантують велику кількість доступної енергії із електромереж у навколишньому середовищі. Основними перевагами збирання енергії саме в ЕМ являється дешевизна та менша кількість інфраструктури, якщо порівнювати дане джерело із іншими видами джерел, які можливо отримати із навколишнього середовища [3].

Важливо, щоб техніка збирання енергії із навколишнього середовища, змогла забезпечити до сталого живлення пристрою, впродовж усього періоду його використання, що призведе до заміни нинішніх звичайних батарей.

1.3.1 Датчики.

Датчики являються важливою частиною технології Internet of Things, оскільки вони споживають значну кількість енергії у малопотужних пристроях, які використовуються у пристроях IoT.

Наразі у наземних датчиках використовуються різні методи живлення, наприклад: дріт, сонячні панелі або ж батарея можуть про гарантувати забезпечення

пристрій необхідною електроенергією. Попри зручність використання звичних типів живлення, вони мають низку недоліків:

- Дорога реалізація.
- Екологічні проблеми.
- Непридатність для використання у віддалених районах.
- Недоступність.

Саме для вирішення проблем вказаних вище можна використовувати енергію отриману із електромагнітної хвилі.

Перед використанням ЕМ у технології IoT, потрібно розглянути особливість, а саме ЕМ-хвилі потрібно перетворювати на постійний струм (DC).

Точність датчика, важливий пункт, який варто взяти до уваги при використанні у технології IoT.

Точність та чутливість датчиків псується з плином часу, вплив забруднювачів із навколишнього середовища та вартість матеріалів являється важливими проблемами.

Метаматеріали – штучна структура із властивостями, які потрібно використовувати для збору енергії, незалежно від суворості природніх умов та важко доступності до пристрою. Головна особливість метаматеріалів - здатність до поглинання випромінюваної енергії надзвичайно низької потужності із навколишнього середовища та здатність фіксувати незначні зміни необхідних параметрів.

1.3.2 Випрямні антени (Ректенни)

Випрямні антени – актуальне рішення для збору електромагнітної енергії через антену та подальше перетворення її в постійний струм [3].

Проте дві критичних проблеми, такі як:

- Великі розміри.
- Низька ефективність.

Також недоліком являється обмеженість функціональності приймача, для збору енергії електромагнітних хвиль із навколишнього середовища (різні кути падіння та поляризації).

Ректенна (випрамна антена) – особливий тип приймальної антени, яку використовують для перетворення ЕМ енергії в електрику постійного струму. Найчастіше даний тип антен використовують у системах для бездротової передачі електроенергії, у яких передача енергії відбувається за допомогою радіохвиль. Простий ректенний елемент складається з дипольної антени із РЧ-діодом, який з'єднаний через дипольні елементи. Діод випрамляє змінний зструм, індукований в антені мікрохвилями, для подальшого вироблення постійного струму [4].

Частіше за все, використовуються діоди Шотткі (зображений на рис. 1.6).



Рис. 1.6 Схема діоду Шотткі

Перевага даного діоду, заключається в тому, що у них найменше падіння напруги та найвищу швидкість, що призводить до найменшої втрати потужності [4].

Наразі проводяться дослідження з використання ректен у віддалених районах, для живлення датчиків.

Радіочастотні ректени використовують у декількох формах бездротової передачі енергії, експериментальні дослідження пристроїв показали перетворення потужності до 85-90% [4].

Рекордом ефективності перетворення для ректенни становить 90,6% для 2.45 ГГц, при меншій ефективності ефективність перетворення становить 82% на частоті 5,82 ГГц [4].

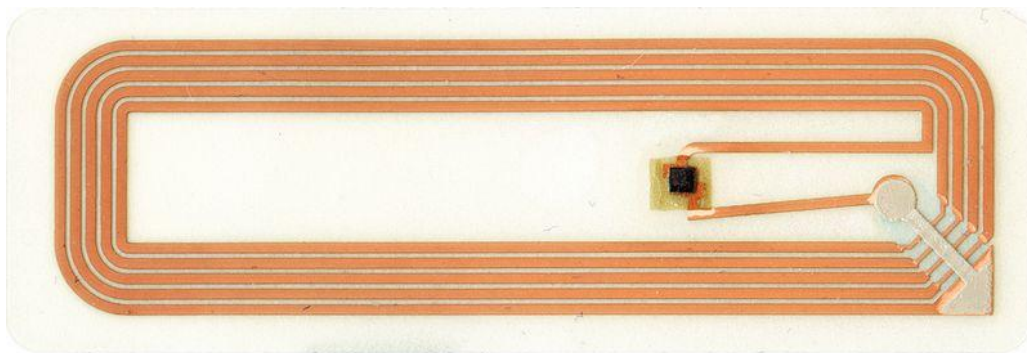


Рис. 1.7 Ректена для RFID – пристроїв

На рис. 1.7 проілюстровано приклад спроектованої антени, яка використовується для (Radio Frequency Identification) – радіочастотної ідентифікації.

1.4 Особливості при використанні метаматеріалів.

Метаматеріали – матеріали, властивості яких неможливо знайти в природі. Дані матеріали можуть складатись із однорідного чи неоднорідного малюнку на резонаторах, які розташовані на діелектричній підкладці.

МРА – ідеальний поглинач метаматеріалів – одна із низки структур метаматеріалів, які можна використовувати у технології Інтернету речей саме завдяки унікальним характеристикам. Можливе покращення функціональних пристроїв та датчиків Інтернету речей та підвищення їх чутливості.

В теорії, використання метаматеріальних структур посилить ефективність збирання енергії до 100%.

Чи можуть матеріали стати рішенням?

Метод конструювання МРА масрізий коефіцієнт поглинння, який може використовуватись для різних застосувань.

МРА – перспективне рішення, яке гарантує підвищення ефективності приймачів електромагнітних хвиль.

МРА – підвисить точність звичайних датчиків.

МРА – підвисить точність, ефективність, знизить вартість пристроїв, які використовуються для роботи в ТГц – діапазоні. Такими пристроями можуть бути: інфрачервоні пристрої, тепловипромінювачі або ж оптичні перемикачі [3].

МРА – ідеальний кандидат, якого можна використовувати для розробки ЕМ-пристроїв.

Отже, завдяки використанню МРА можна подолати згадані вище проблеми IoT – технології.

1.5 Метаматеріал – ідеальний поглинач.

Перші дослідження пов’язані із негативною проникністю було проведено у 1968 році В.Г. Веселаго, було виконано спостереження за поведінкою електромагнітних хвиль у DNG – подвійному негативному матеріалі. Негативні ϵ_{eff} та μ_{eff} змінюють знак ϵ та μ у рівнянні Максвелла. У зв’язку з чим магнітне поле H та електричне поле E перестають слідувати правилу правої руки. Крім цього, дані штучні матеріали не дотримуються закону Снеліуса.

$$\frac{\sin Q_1}{\sin Q_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

Де Q_1 – являється кутом падіння, Q_2 – кут заломлення, n_1 та n_2 – показники заломлення середовищ 1 та 2, відповідно. Схематичне зображення закону Снеліуса відображено на рис. 1.8.

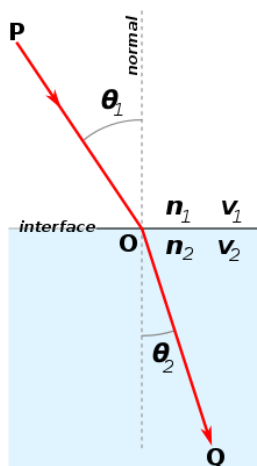


Рис. 1.8 Візуальне зображення закону Снеліуса

Із Закону Снеліуса можна зрозуміти, що якщо показник заломлення у другому середовищі являється більшим за показник заломлення середовища, з якого світло падає, то кут падіння більший за кут заломлення. Якщо показник заломлення другого

середовища являється меншим за показник заломлення середовища, з якого падає світло, то кут падіння менший за кут заломлення [5].

Заломлення світла пов'язують із зміною швидкості розповсюдження, на момент переходу з одного середовища в інше [5].

Іншими законами Снеліуса диктуються наступні твердження:

- Кут падіння дорівнює куту відбивання.
- У момент заломлення світла промінь, який падає на границю поділу, промінь який пройшов у інше середовище та промінь, який являється відбитим, лежать у одній площині [5].

$$n = -\sqrt{\epsilon\mu} \quad (1.3)$$

Показник заломлення (1.3) за законом Снеліуса.

Нестандартна поведінка та унікальні властивості подвійних негативних матеріалів, зацікавила дослідників, дані матеріали називаються «Метаматеріалами».

Перший дослід над метаматеріалами провів Шелбі у 2001 році. У його звіті було відображено причину поведінки метаматеріалів, яка пов'язана з електромагнітними хвилям. Завдяки даному звітові, було проведено подальші дослідження, які призвели до більш точних проектних рішень, що призвело до майбутньої реалізації складних проектів. Саме 2001й рік можна назвати роком еволюції метаматеріалів, з цього року почались численні дослідження та застосування. Наразі у проектах, які покращуються і тестуються знаходяться: ESA – малі електричні антени, суперлінзи, сенсорні програми, плащі-невидимки та інші.

1.6 Метаматеріальні плоскі структури «Метаповерхні».

«Метаповерхні» - метаматеріальні плоскі структури. Подібно до інших типів метаматеріалів, метаповерхні можна використовувати для маніпуляцій просторові ЕМ-хвилі в інших спектрах. Лінійні або нелінійні маніпуляції електромагнітними хвилями ають можливість для введення великої кількості додатків [3].

Дані структури являються ультратонкими та штучними, які можуть бути реалізованими для мінізації втрат у напрямку поширення ЕМ-хвилі. Цікавою особливістю мета поверхонь являється їхня здатність показувати пізні магнітні та

електричні реакції, в залежності від поляризації хвилі, яка падає, що гарантує різні функції та застосування:

- FSS (частотно-селективні поверхні).
- Поверхні, які мають високий опір.
- Відбиваючі поверхні.
- Ідеальні поглиначі.

Метаповерхні нелінійного типу надають назвичайні можливості та переваги, завдяки оєднанню нелінійних електромагнітних явищ та поєднанню метаповерхонь. Завдяки даній функції яляється можливість реалізувати:

- Частотні змішувачі.
- Надшвидкі комутатори.
- Генерація гармонік.

FSS – періодичні структури, які включають в себе масиви металевих субхвильових резонаторів та мета плівку, на діелектричній підкладці та провідній плівці, які введено для управління поширенням сигналів у навколишньому середовищі. Хвилі ні резонансних частотах, мають 2 варіанти або проходити через конструкція (режим передачі) або, так звану пастку (режим блокування). Дані структури використовуються у системах зв'язку, аерокосмічних технологіях та високо потужних мікрохвильових системах.

На рис.1.9 зображено першу мета матеріальні поглинаючу структуру, а саме схематичне зображення даного поглинача.

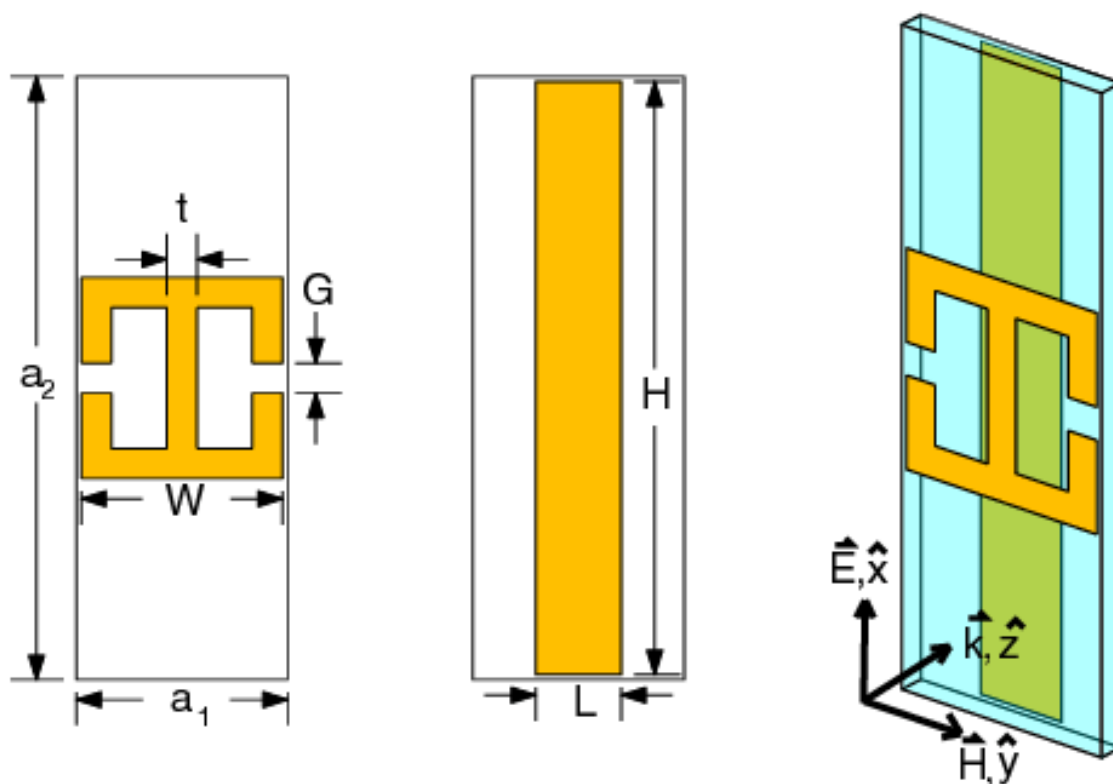


Рис. 1.9 Метаматеріальна поглинаюча структура [6].

Метаматеріальний поглинач зображений на рис. 1.9 вважається ідеальним варіантом, який було представлено у 2008 році. Дана специфічна FSS здатна «Ловити» падаючі хвилі, із майже ідеальною ефективністю поглинання, близькою до одиниці.

МРА включає в себе дві різних металевих структури, які мають діелектричні підкладки по обидві сторони. Як показано на рис. 1.9, перший МРА має включений ERR (електричний кільцевий резонатор), який розташовано зверху, діелектричний шар розташований посередині, знизу розташовано дріт, щоб отримати магнітний та електричний «відгук». У даній схемі магнітні та електричні реакції створюють поверхневий струм на ERR, а також зв'язок між 2-ма металевими структурами [3].

Завдяки мета матеріальним поглиначам з'явилась можливість замінити звичайні неефективні поглиначі, які зазвичай являються громіздкими, прикладами даних поглиначів можна назвати:

- Клиновидний поглинач.
- Ферит.

Головною перевагою над звичними поглиначами, мета матеріальні поглиначі маають надвисоку ефективність, низько профільну конструкцію, яка в той же час являється легкою.

Механізм МРА схожий на смуговий фільтр, а звичайні FSS розроблені, як смугові фільтри. Випромінюванні сигнали не мають можливості проходити, а також відображатись на частоті резонансу. Коефіцієнт поглинання поступово збільшується з пропусканням мулевої хвилі, як наведено у рівнянні 1.4:

$$Z(w) = \sum \sqrt{\frac{\mu(w)}{\varepsilon(w)}} = \sqrt{\frac{(1+S_{11}(w))^2 - S_{21}^2(w)}{(1-S_{11}(w))^2 - S_{21}^2(w)}} \quad (1.4)$$

Для ідеальної відповідності імпедансу вільного простору, $Z(w) = Z_0$. При проведенні розрахунку втрат при віддачі $Z(w) = Z_0$, що гарантує майже 100% відбиття від поверхності хвилі.

$$\Gamma(w) = \left| \frac{Z(w) - Z_0}{Z(w) + Z_0} \right|^2 \approx 0 \quad (1.5)$$

Головною ціллю при розробці математеріалів (досконалі поглиначі повинні отримувати електромагнітні сигнали, у момент поки відбувається розсіювання усередині даної конструкції). Окрім ідеального опору, який являється необхідним кількість переданих електромагнітних-сигналів, черездану структуру повинна являтись близькою до 0 на необхідних частотах. Для цієї мети використовується металева плівка, яка розташована на нижній частині наведеної вище структури – це перспективний метод для запобігання будь-якій можливій передачі.

Формула можливого поглинання (1.6):

$$A(w) = 1 - \Gamma(w) - T(w) = 1 - \left| \frac{Z_{in}(w) - Z_0}{Z_{in}(w) + Z_0} \right|^2 \quad (1.6)$$

Ще одним із варіантів обрахування коефіцієнту поглинання, являється обрахування на основі S-параметра $\Gamma(w) = |S_{11}|^2$ та $T(w) = |S_{21}|^2$, зважаючи на дану умову рівняння 1.6 можна переписати у наступному вигляді:

$$A(w) = 1 - \Gamma(w) - T(w) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2 \quad (1.7)$$

Необхідно згадати принципи ідеального мета матеріального поглинача, в якому зворотня втрати повинна рівнятися майже нулю.

$$\Gamma(\omega) = |S_{11}|^2 \approx 0 \quad (1.8)$$

Необхідно зазначити, мета матеріальні поглиначі – легкі, недорогі, їхні частоти поглинання легко відрегулювати завдяки особливостям конструкції.

1.7 Еквівалентні схеми для МРА.

Найкращим варіантом для дослідження МРА – використання еквівалентного ланцюга, який має два різних сценарія, все напряду залежить від форми резонатора. Лінія передачі створюється діелектричною підкладкою та металевою доріжкою [3].

Мікросмужковалінія моделюється R (резистором). Індуктивність обумовлена струмом петлі та змодельована індуктивністю L. Зазори, які існують в резонаторах, взаємодія металевої плівки та резонатора даають можливість обрахувати ємність заданої структури (C). Еквівалентна схема можу бути змодельована як паралельні або послідовні резонатори RLC, які у цей же час являються – комбінованими [3].

На рисунку 1.10 зображено приклад даного резонатора та його еквівалентна схема. На даному рисунку кожен із шматків металевого резонатора, який можна розглянути, як шлях струму, моделюється за використання індуктивностей L1 та L2. Зазори поміж резонаторами SRR (розрізний) та зовнішніми і внутрішніми кільцями C1 та C2 – відповідно.

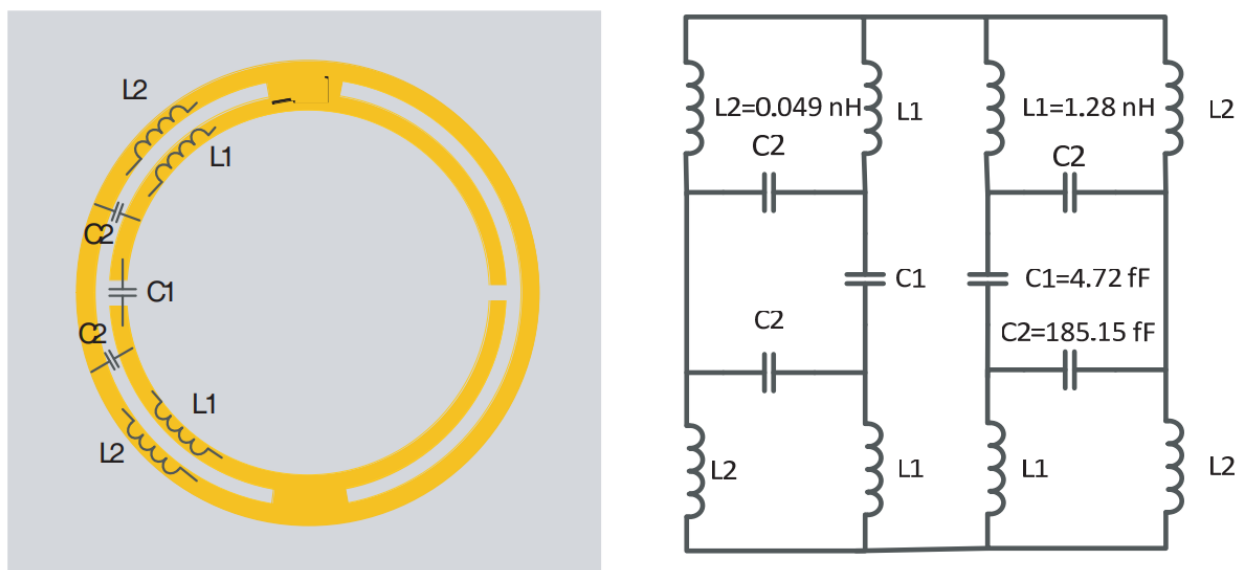


Рис. 1.10 Еквівалентна схема, основана на формі резонатора [7].

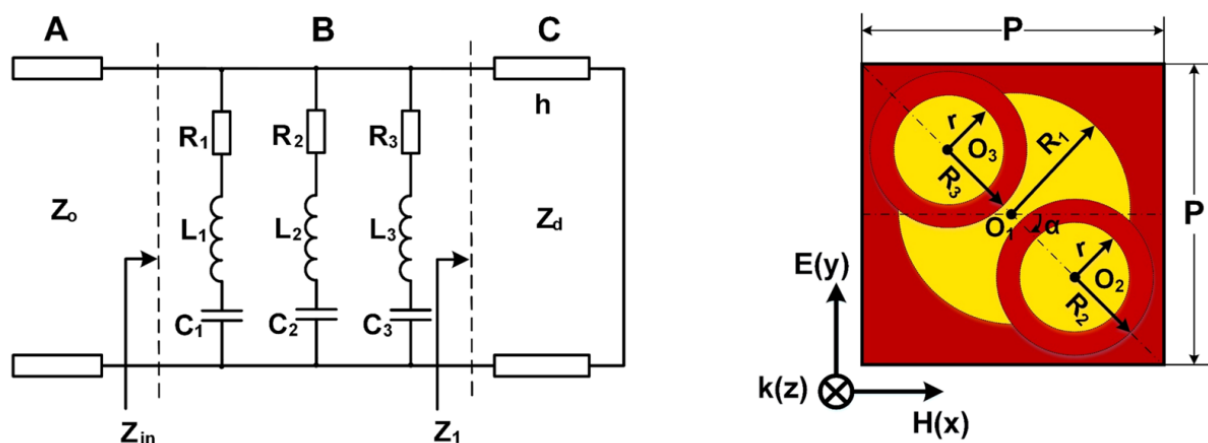


Рис. 1.11 Еквівалентна схема, основана на теорії лінії передачі [8].

Інший варіант – отримання еквівалентної схеми з лінії передачі. У даному методі враховуються МРА в 2-х окремих частинах:

Моделювання металевих резонаторів, RLC-схема.

Замикання лінії передачі, пов'язана з дією діелектрика, яка заснована на комбінації металевих плівок та основи.

Якщо резонатор складається з частин, які розділені, то еквівалентна схема буде послідовними ланцюгами RLC, які будуть паралельні один із одним (рис. 1.11). Як ми можемо побачити, МРА складається з 3-х частин. Кожна із частин змодельована послідовно, як RLC, 3 із секцій з'єднані – паралельно.

Висновки

У даному розділі було розглянуто проаналізовано види мета матеріалів, загальні положення Інтернету речей, вказано базові положення, умови та приклади ідеальних поглиначів мета матеріалів.

Було розглянуто складові систем, зокрема такі, як: ректени (випрямні антени) та датчики. Наведено особливості, які виникають при використанні мета матеріалів, розглянути принцип коли мета матеріал виступає в ролі – ідеального поглинача.

Загальні характеристики плоских структур, які називаються «Метаповерхнями», а також розглянуто еквівалентні схеми для МРА, детальніше про мета матеріальні поглиначі опиано у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДОЛОГІЯ. МАНІПУЛЯЦІЯ НАД СТРУКТУРАМИ. ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1 Методи посилення поглиначів. Характеристики.

В залежності від застосування метаматеріалів, поставлено особливі вимоги, які ґрунтуються на основі їхніх обмежень. Робоча частота, пропускна здатність, розмір елементарних комірок, поглинання смугою, здатність поглинати сигнали із різними кутами падіння та різними поляризаціями.

Пункти, які наведено вище необхідно враховувати при подальшому проектуванні. Наприклад, для збирання енергії, задля досягнення максимальної вих. потужності, високий коефіцієнт та широкий діапазон поглинання – вирішальні вимоги, у зв'язку з вхідними сигналами потужностей у навколишньому середовищі [3].

2.2 Методи маніпуляції структурами.

2.2.1. Збільшення електричної довжини.

Одна із головних проблем при проектуванні МРА – розмір структури, особливо це проявляється на діапазонах низької частоти.

При випроміненні Електромагнітних хвиль на поверхність метаматеріалів, магнітні та електричні поля, в залежності від форми та розміру структури створюють різні реакції, які проявляються в даній структурі. Дане твердження гарантує те, що будь-яка схема може бути промодельована, як RLC-ланцюг, де C – ємність, L – еквівалентна індуктивність елементарної комірки, відповідно C та L взаємопов'язані із кількістю витків піднесеною до квадрату N^2 , а також із площею поверхні, яка заповнена металом A . Це може призвести до збільшення довжини металевого шляху, які охоплюють більшу кількість ділянок, які розташовані на поверхні [3].

При дослідженні кривої Серпінського, було доказано, що існує межа, для максимуму можливого порядку кривої заповнення простору. При збільшенні порядку

кривої зменшується резонансна частота. Проте після настання 3-ого порядку охоплюється більша поверхність «абсорбера», це призводить до вищого відбиття, при нижчих коефіцієнтах поглинання, попри те, що частота поглинання знижується до найнижчого рівня.

2.2.2. Додавання зосереджених елементів.

А) Індуктори та конденсатори. Використання зосереджених елементів в мета матеріалах, ідеалні поглиначі також популярний метод, що дозволяє зменшити розміри елементарних комірок, які в той же час стимулюють нижні частоти. Звертаючи увагу, на еквівалентну схему ланцюга, при добавлянні зосереджених елементів та маніпуляції резонансом частоти, вводячи більшу ємність або індуктивність. Таким чином, резонансна частота може зміщуватись на нижчі або вищі частоти.

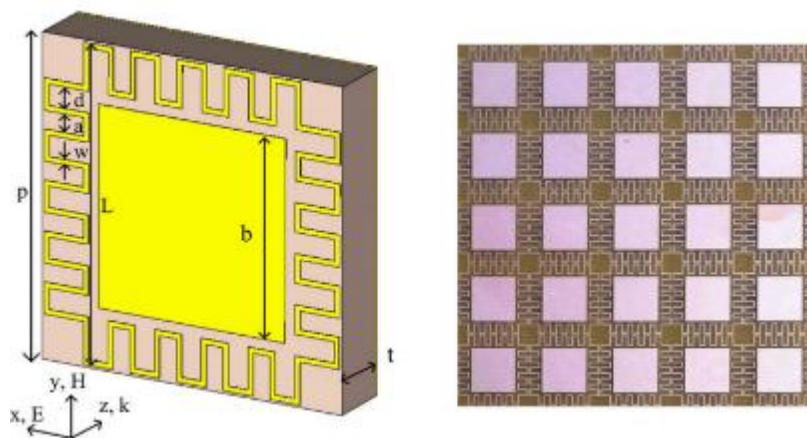


Рис. 2.1 (а) Форма змії навколо середнього резонатора [9] .

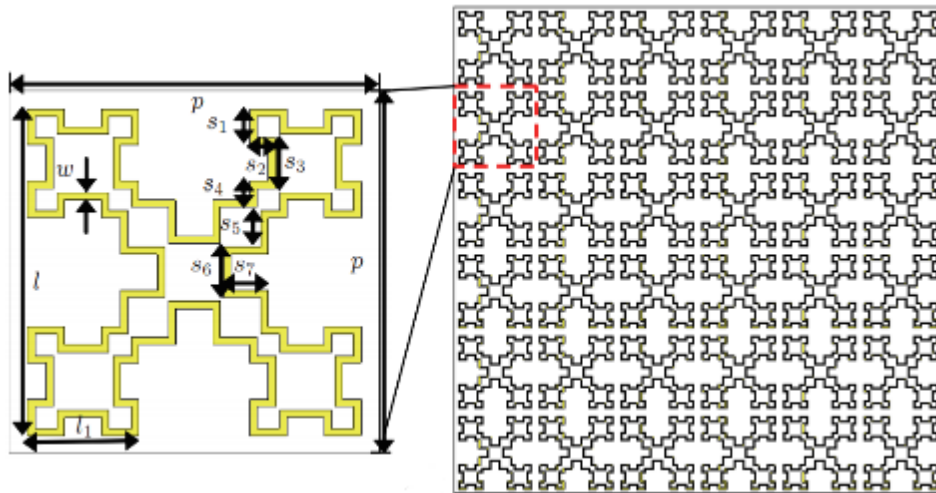


Рис. 2.1 (b) Форма змії навколо фрактального резонатора [10] .

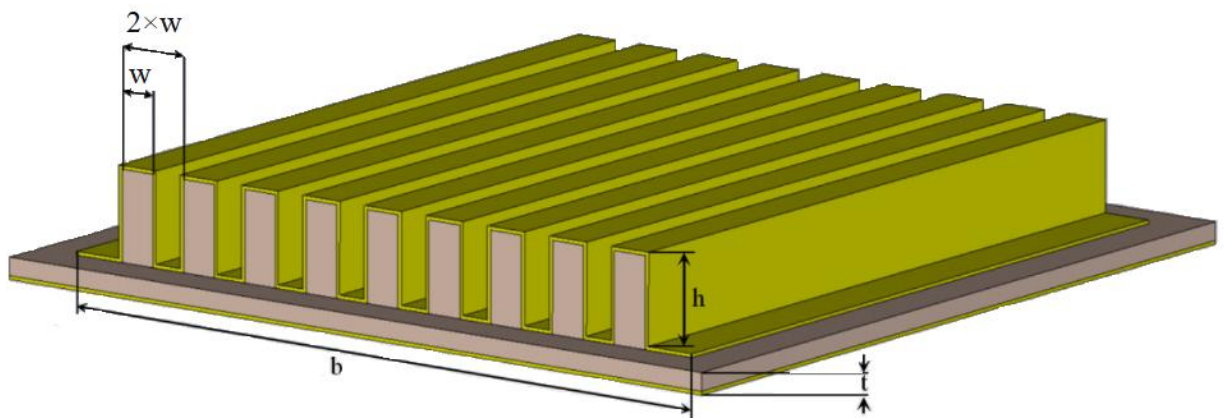


Рис. 2.1 (c) Комбінація рифленої поверхні та підкладки. 3D структура [11].

Б) Резистори. Правильне розташування зосереджених резисторів має можливість покращити коефіцієнт поглинання та розширення пропускної здатності.

Для вибору найкращого розташування резисторів, залежить від індукованих електричних зарядів по лініях а основі поверхневого струму.

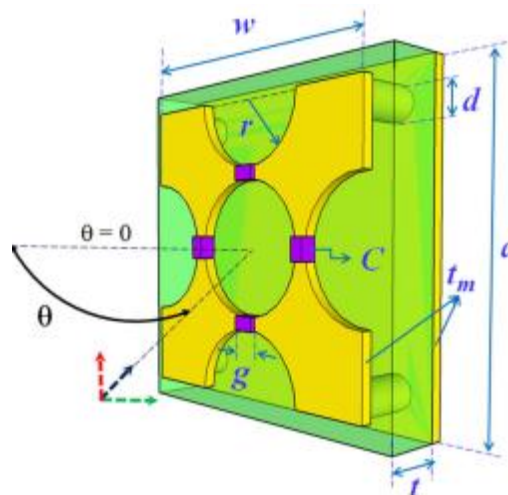


Рис. 2.2 (a) 4 зосереджених конденсатори, для зміщення частоти вниз [12] .

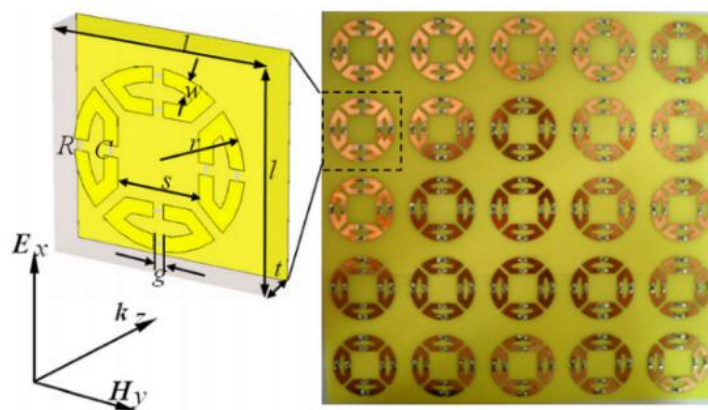


Рис 2.2 (б) комбінація конденсаторів і резисторів для зменшення частоти та покращення коефіцієнту поглинання [13] .

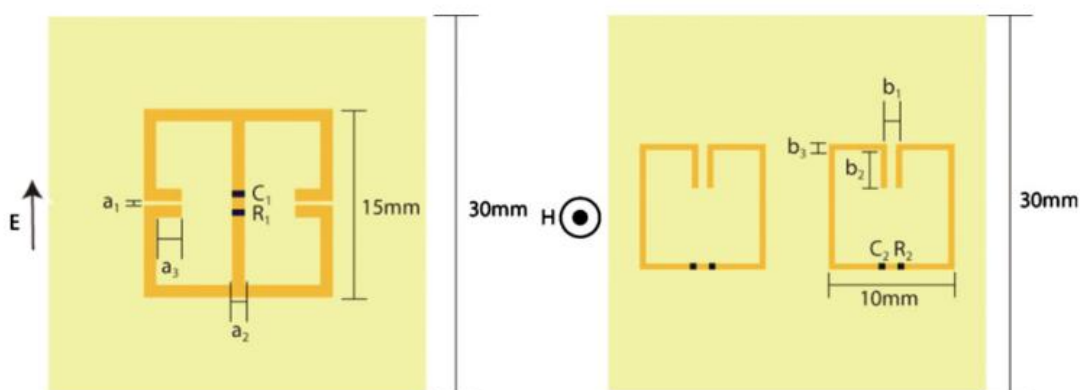


Рис 2.3 (с) комбінація резисторів та конденсаторів у різному розташуванні [14] .

2.2.3. Повітряний зазор.

Для підвищення ефективної ємності у структурі МРА можна використовувати додавання повітряного зазору поміж металевою півкою та підкладкою, при використанні даної техніки зменшуються розміри елементарної комірки на необхідному діапазоні частот. При поступовому мінімізуванні повітряного зазору у конструкції зростає поглинання частоти, завдяки більшій глибині проникнення та більшій енергії у вищих спектрах. Сигнали затримуються у повітряному зазорі, як у повітряній порожнині.

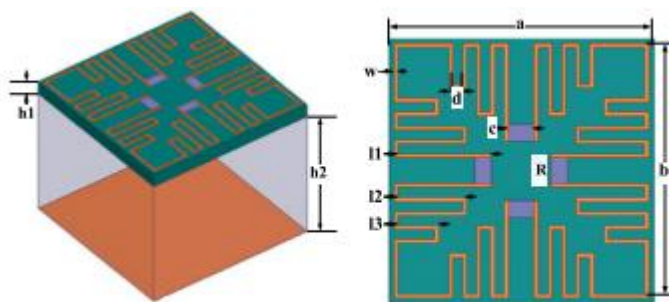


Рис 2.3 (а) поєднання зосереджених елементів та повітряних зазорів для RFID [15].

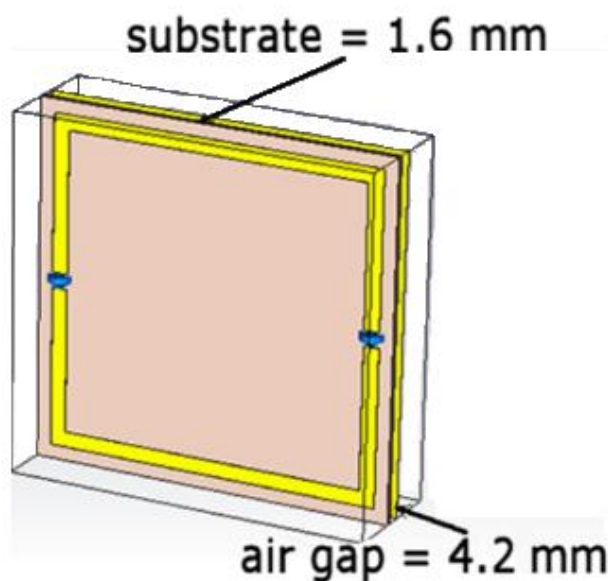
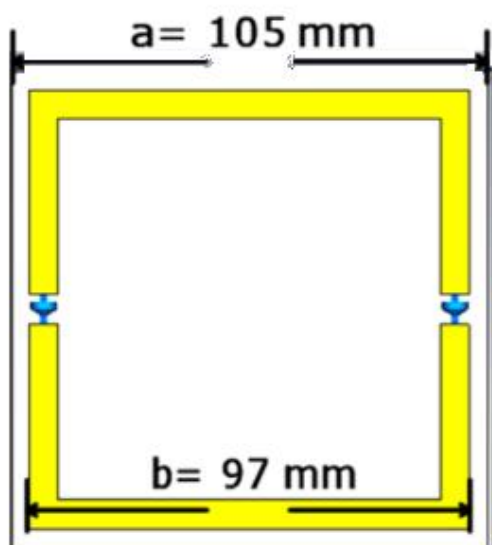


Рис 2.3 (б) Комбіноване зосередження резисторів та повітря для застосування енергії збирання [16].

2.2.4. Мультирезонаторний поглинач.

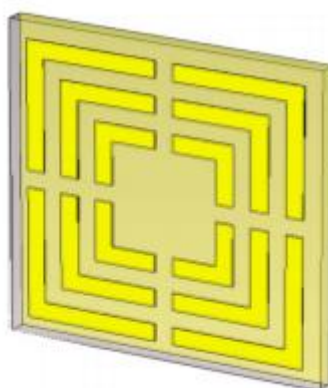
Форма та кількість резонаторів у структурі мета матеріалів мають значний вплив на подальші характеристики мета матеріалу, який використовується у різних сферах. У МРА – співвідношення поглинання та кількість смуг даного поглинання – важливі властивості, завдяки яким можна визначати подальшу кількість та форму резонаторів [3].

Існує багато різних методів для збільшення поглинання смуги. Найпоширенішим прийомом являється комбінування більш ніж одного резонаторі із роздільним кільцем (SRR) із різними розмірами та формами – найпоширеніший

прийом. У даному підході кожен із резонаторів або ж їхні комінації резонують різні частоти, що призводить до багатодіапазонності поглинача [3].

На рис. 2.4 (а) відображено використання трьох резонаторів для досягнення трьох смуг поглинання, у кінцевій структурі кожна смуга відповідає одному із резонаторів.

Широка смуга поглинання утворюється в разі перекриття резонансних частот. Наприклад, при використанні трьох мультирозщеплених кільця, які мають різні діаметри, було використано для структури елементарної комірки у проектуванні над широкосмугового МРА, побудована структура не проявляє чутливості на різні кути падіння хвиль та поляризації. Дана конструкція являється недорогим та порівнянно з іншими- простим варіантом. Проте кількість резонаторів повинна бути заздалегідь прорахована через взаємозв'язок із резонаторами та збільшення розмірів поглинача, що зображено на рис. 2.4 (б), на даному рисунку відображено використання 2-х замість 4-х пар кілець, які розташовані по черзі. При використанні чотирьох пар кілець, було досягнуто створення чотирьох смуг поглинання, розмір елементарної комірки – залишився незмінним. При реалізації мультирезонаторного поглинача, потрібно звернути увагу на ефект взаємозв'язку резонаторів та взаємощеплення, яке може призвести до зменшення коефіцієнту поглинання.



(а)

Рис 2.4 (а) квадратне розрізне кільце, при об'єднанні декількох резонаторів [17] .

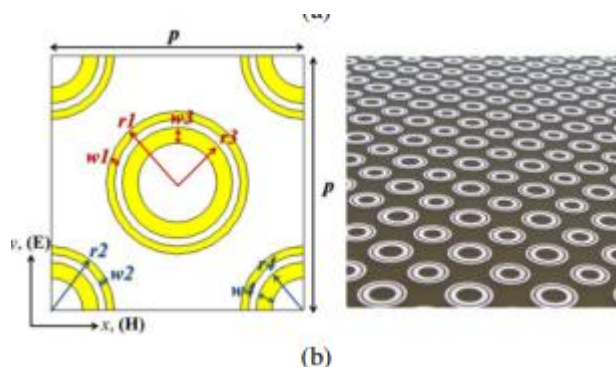


Рис 2.4 (б) суперкоміркова структура, утворена поєднанням двох наборів кільцевих резонаторів різних за розміром [18] .

2.2.5. Багатошарова структура.

Введення додаткових вертикальних шарів діелектрика також перспективне рішення для розширення або ж збільшення смуг поглинання та їхньої кількості. Кожен із даних шарів має можливість відповідати за поглинання сигналів лише на заданій (цільовій) частоті смуги, яка визначається шляхом збільшення кількості смуг поглинання. Кожен із даних шарів поглинає сигнали на цільовій частоті смуг, зважаючи на структуру резонаторів та товщину заданої структури.

При використанні багатошарової структури слід зазначити, що взаємозв'язок між резонаторами різних шарів значно нижче, якщо порівнювати із іншими структурами. З іншого боку і сам процес виготовлення являється більш довготривалим та складнішим. Також не можна ігнорувати, втрату верхніх шарів, особливо при зондуванні додатків. Отже, у падаючих хвиль відбувається процес ослаблення, при проходженні через верхній шар, це знижує точність сприйняття.

2.2.6 Маніпулювання площиною землі.

Ідея створення МРА – уловлення падаючих хвиль. Відповідно до кількості відбитих та переданих сигналів, можна отримати коефіцієнт поглинання. Якщо, ми будемо мати ідеальне узгодження індепендансу поміж структурою та внутрішнім опором у повітрі, можливо отримати покращення коефіцієнтів майже до 100%.

Якщо переглянути дану логіку, то можна із впевненістю сказати, що при використанні МРА, які являються однорідними та заземленими, потрібно уточнити, що даною металевою площиною потрібно маніпулювати для покращення характеристик МРА.

Також одним із підходів – це створення порожнини у підкладці під час використання металевої плівки. Дані порожнини використовуються, для стабілізації поглинання при різних кутах падіння та їх поглинання, а також збільшення коефіцієнту поглинання.

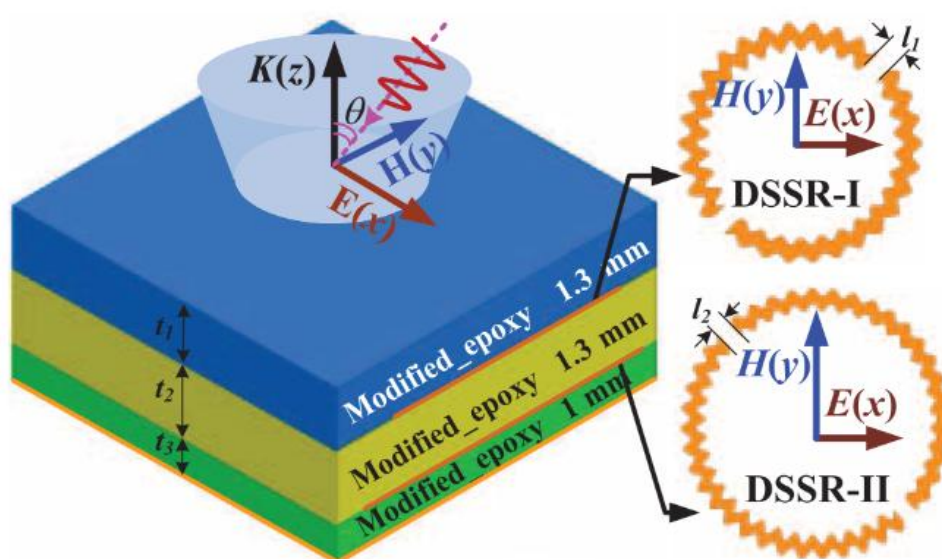


Рис 2.5 (а) Візерунок, який повторюється на різних розмірах та шарах.

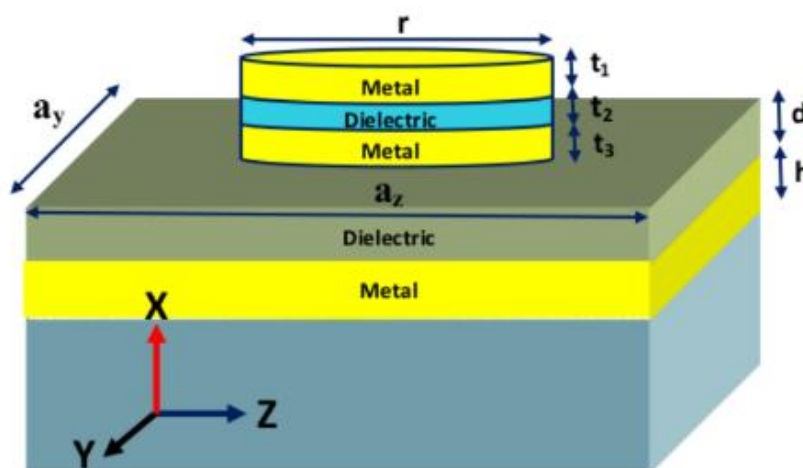


Рис 2.5 (б) Круговий діелектричний «Сендвіч» між резонаторами.

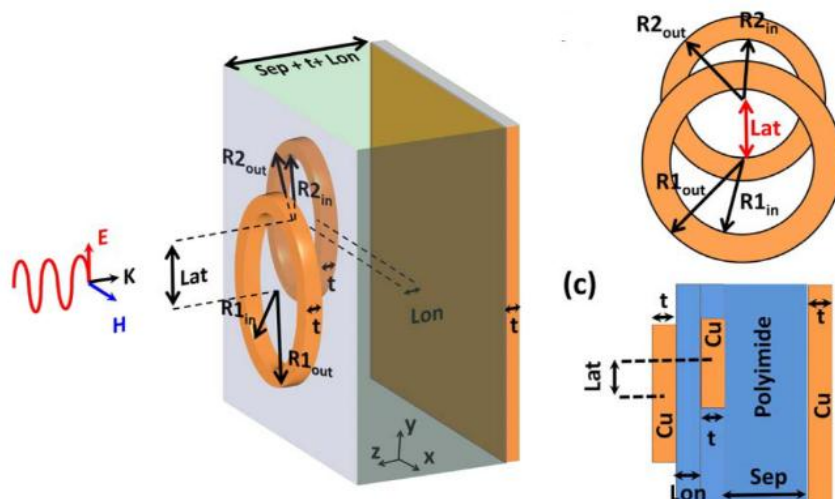


Рис 2.5 (в) Два кільця, які різні за розміром.

2.2.7 Маніпулювання формою резонатора.

Форма резонатора являється одним із фундаментальних елементів для управління. Більшість структур можуть поглинати сигнали, які мають різні кути падіння та поляризації, зазвичай дані структури є симетричними. На рис 2.5 (а) зображено схему із 8-ми круговими секторами.

Симетрична геометрія робить дану структуру більш стабільними при подальшому зіткненню із різними кутами поляризації. Додатковою особливістю являється те, що усі вісім секторів разом стають нечутливими до різних коефіцієнтів кута падіння. У інших підходах, поєднуються круглі та перпендикулярні форми, які реалізуються у трьох шарах структури для сигналів (кругової, вертикальної, горизонтальної поляризацій), які поглинаються структурою. Додатком до цієї комбінації, являється використання двох інших резонаторів, які розташовані на нижньому та верхньому шарах, що робить дану конструкцію симетричною. Даний МРА надає нечутливість до різних поляризацій та кутів [3].

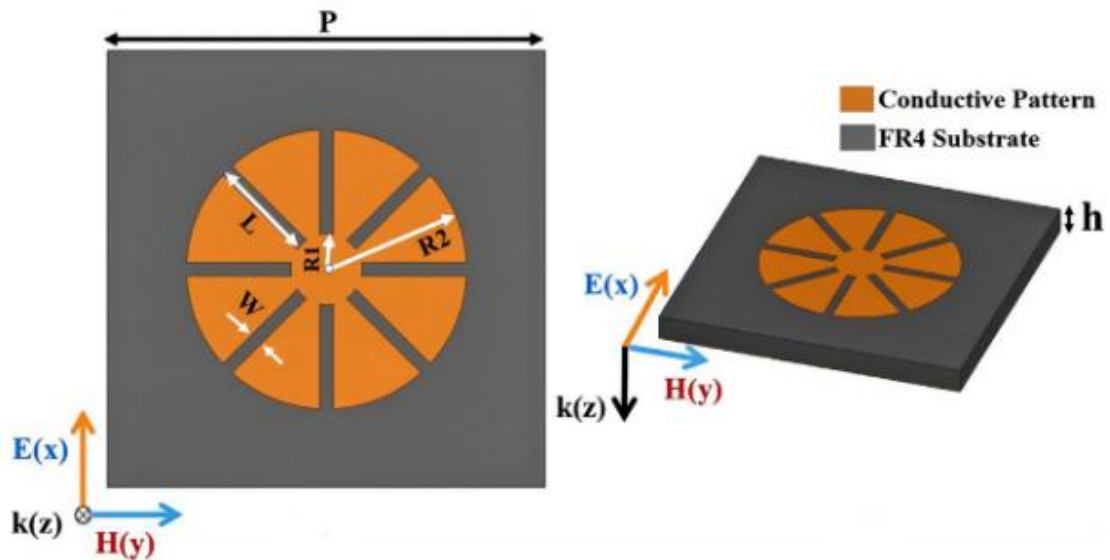


Рис 2.6 (а) Симетрична схема (нечутлива до кута поляризації) [19] .

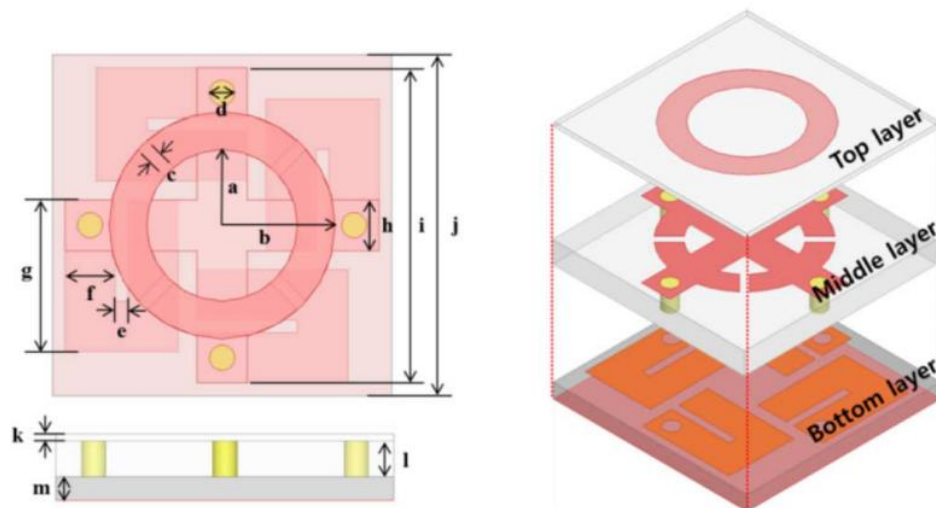


Рис 2.6 (б) Комбінація кількох резонаторів, на різних шарах [20] .

Форма резонатора – один із ключових факторів для поглинання. В залежності від форми структури можна відрегулювати різну кількість петель, різні зазори, які в подальшому призведуть до різних індуктивних та ємнісних властивостей.

2.2.8 Реконфігурована структура.

Для покращення сенсорних можливостей пристроїв, а саме для покращень характеристик та маніпуляцій використовуються реконфігуровані структури. Використання даної концепції в матеріалах математеріального типу гарантує зміну характеристик поглиначів, незважаючи на розмір структури. Дана особливість робить

їх перспективними для використання у надчутливих датчиках. При введенні іншого матеріалу у канали, змінюють їхні характеристики (частоту поглинання смугою та коефіцієнт поглинання) [3].

Дані структури можуть бути розроблені за допомогою змінних структур. Структура здатна продемонструвати різні властивості поглинання.

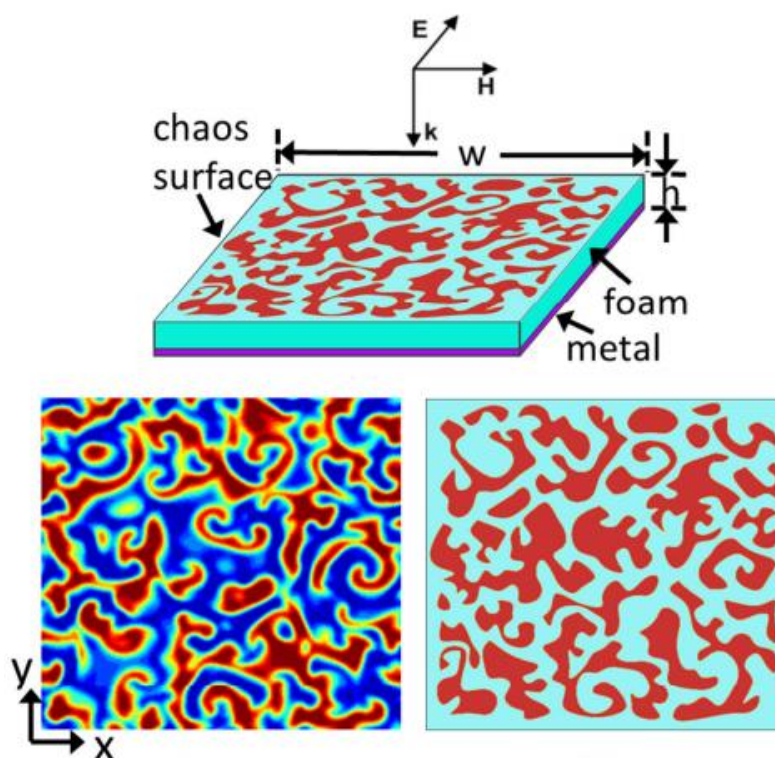


Рис 2.7 Структура резонатора (хаос) [21] .

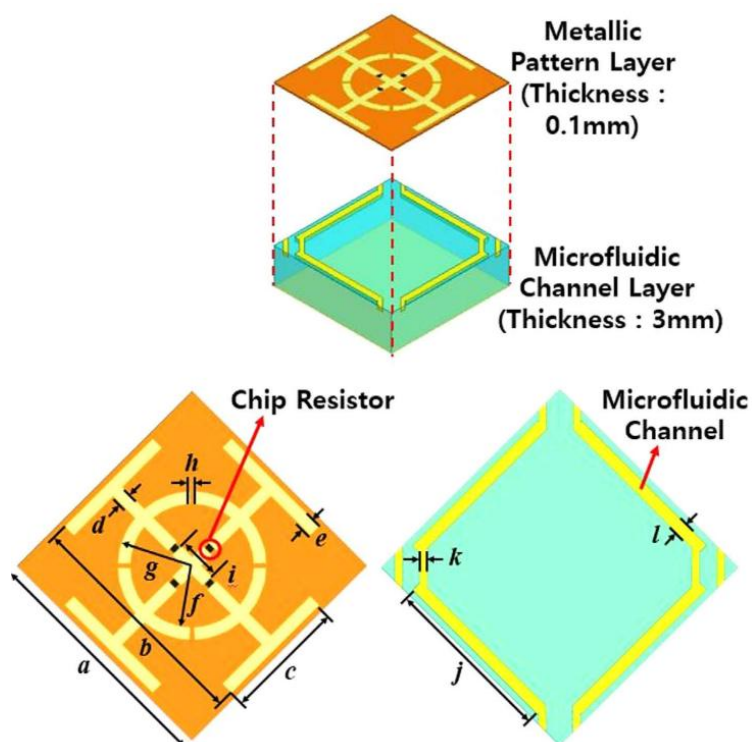


Рис. 2.8 Введення рідкого металу в конструкцію.

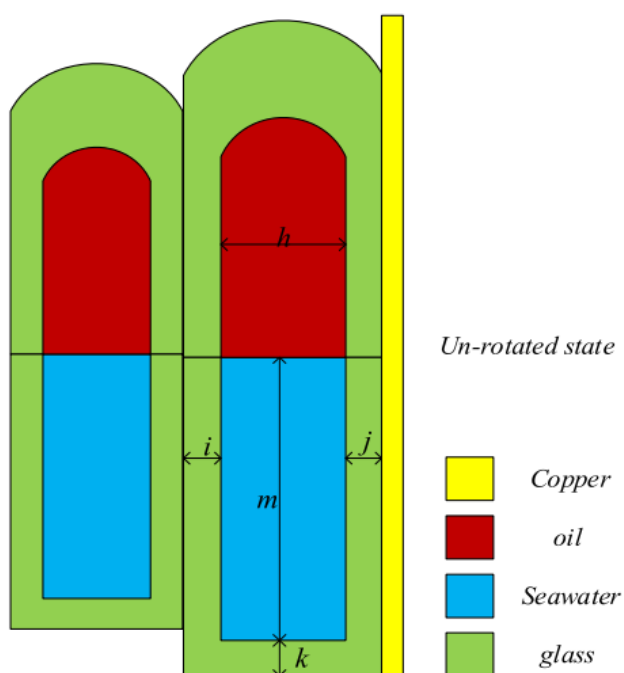


Рис. 2.9 Структура із двома рідинами різними за густиною [22] .

Замість звичайного діелектрика, можна використовувати дещо незвичні структури, для отримання еластичності. Прикладом такого гнучкого (еластичного) матеріалу PMDS, використовується для виготовлення мета матеріального поглиначу, даний матеріал гарантує стійкість до розтягування до 25% рівня.

Вода може являтися субстратом, завдяки високій діелектричній проникності. Водний субстрат можна використати для виготовлення термочутливих метаматеріалів, які показують терморегульовані та надширокосмугові властивості.

2.2.9 3D поглинач метаматеріалів.

Новітня технологія 3D-друку відкрила абсолютно новий підхід до проектування і в подальшому виготовлення поглиначів із метаматеріалів. Завдяки даній технології можна виготовляти конструкції в рази простіше, раніше дане завдання виконувалось шляхом розроблення на основі плат-поглиначів, які було заздалегідь надруковано. Зменшення площі поглинача метаматеріалів можна досягти різними методами, такими як вкладені резонатори, збільшення електричної довжини резонатора. Проте висока складність та вартість – одні із головних проблем, які стають на шляху виготовлення поглиначів. Окрім цього, компанії-виробники обмежують товщину підкладок, що робить виробництво в рази складнішим, тому виготовлення поглиначів, завдяки сучасній технології 3D-моделювання принтером – перспективне рішення для подолання проблем, які зазначені вище [3].

Завдяки використанню технології 3D-моделювання можна використовувати нові матеріали для МРА. Прикладом, такого матеріалу, можна назвати ABS (розшифрування у переліку зазначеному вище), даний вуглецевий полімер використовується для виготовлення діелектричних метаматеріалів (поглиначів), зберігаючи структури в заміну на невисоку вартість. На рисунках 2.10 відображено різні конструкції та різні методи розміщення компонентів.

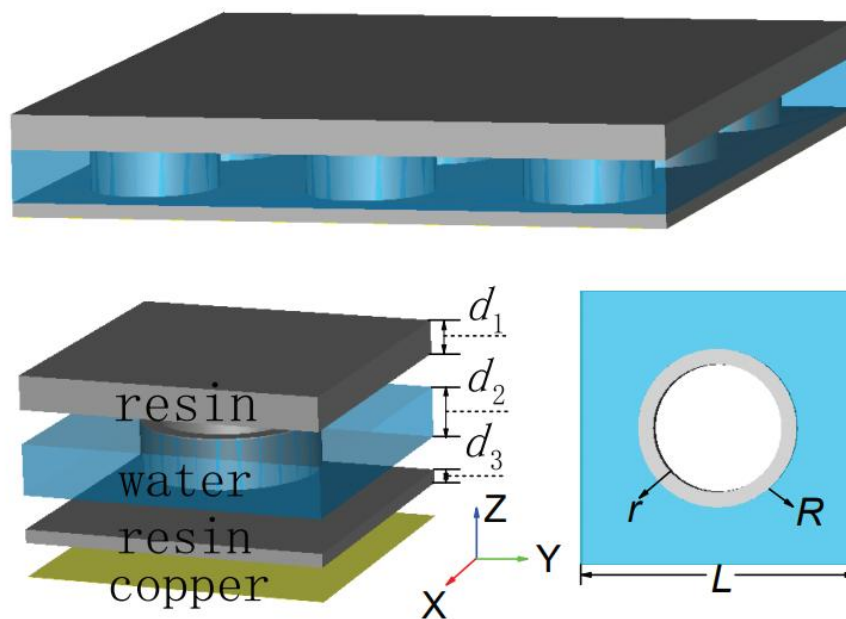


Рис. 2.10 (а) Надширокосмуговий мета матеріалів, вода, як субстрат.

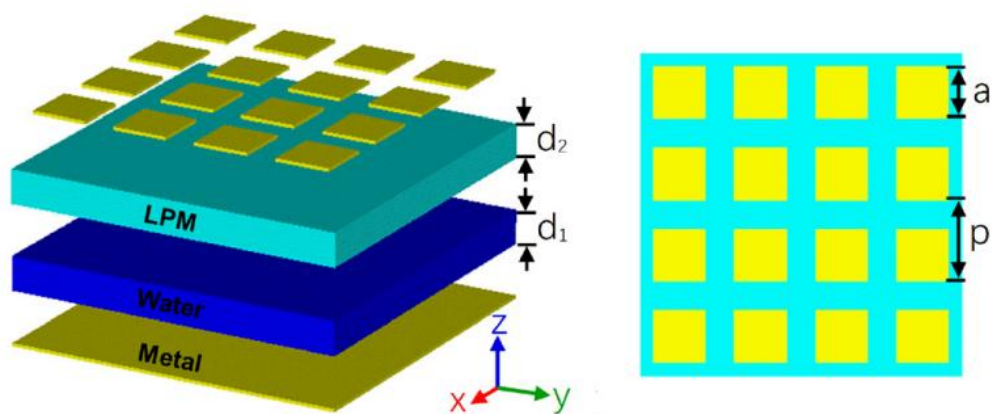


Рис. 2.10 (б) МРА, перебудований гляхом поєднання діелектричних підкладок та води.

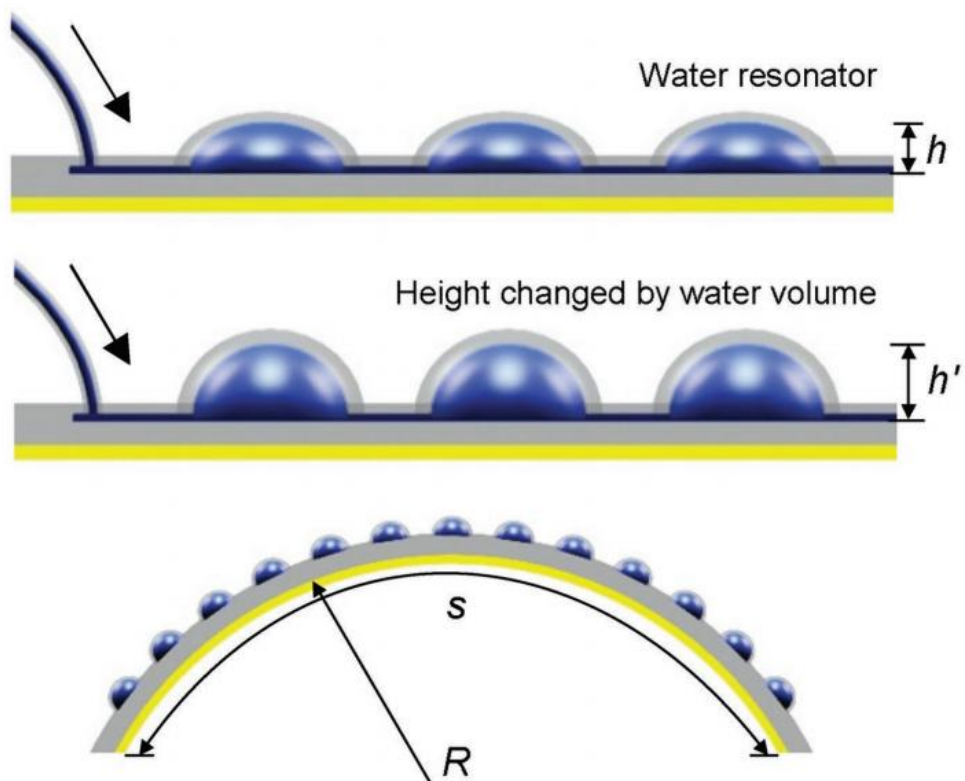


Рис. 2.11 Накопичення води в гумці, підкладка-резонатор [23].

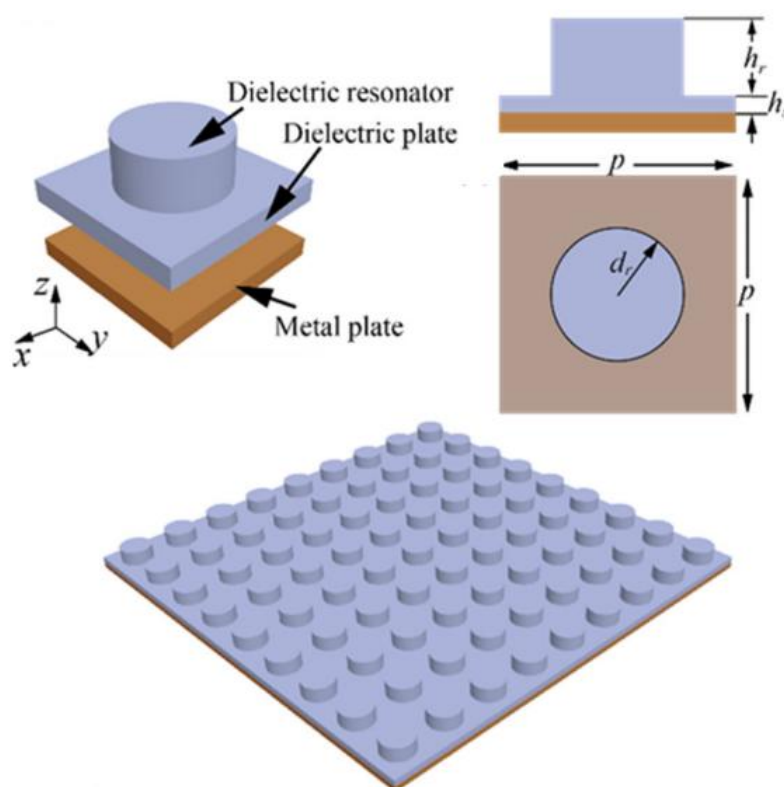


Рис. 2.12 діелектричний поглинач без резонатора зверху [24] .

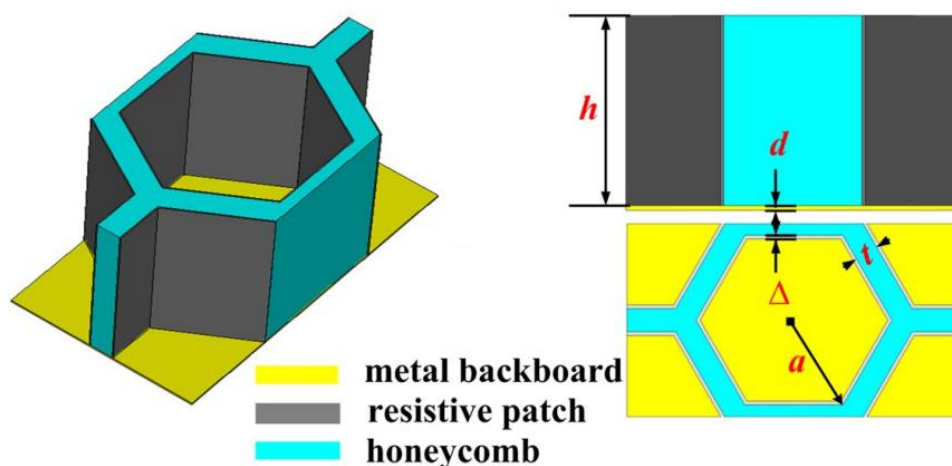


Рис. 2.13 поєднання резистивних та стільникових плівок, які розміщені на стінках [25].

2.3 Порівняння ефективностей поглиначів.

Для підсумку усіх методів наведених у пунктах раніше було сформовано таблицю 2.1. У даній таблиці використовуються наступні описи:

- Позитивний: при застосуванні заданого методу, вплив являється значним на відповідну характеристику.
- Умовний: метод впливає на характеристику.
- Нейтральний: даний метод не впливає на характеристики, які пов'язані.
- Негативний: зворотний вплив на характеристику.

Дана таблиця сформована для спрощення процедури під час проектування.

Додавання повітряних зазорів допомагає змінити ємність поглинача, це впливає на ефективність діелектричної проникності. Отже, частота, яка поглинається зміщується або вперед, або назад без додаткових додавань нових резонаторів [3].

Резонатори із різними резонансними частотами дозволяють збільшити кількість смуг для поглинання, окрім цього резонатори, які реконфігуровані можна використати для створення декількох смуг поглинання.

Таблиця 2.1

Ефективність методів підвищення якості підвищення поглиначів метматеріалів

Переваги Методи		Розширити пропускну здатність	Мініатюризація	Багаторазова смуга поглинання	Збільшити коефіцієнт поглинання	Вартість виготовлення
Вартість виготовлення		Умовний	Позитивний	Умовний	Нейтральний	Нейтральний
Додати в грудках Елементи	Резистори	Позитивний	Нейтральний	Нейтральний	Позитивний	Негативний
	Інші елементи	Нейтральний	Умовний	Умовний	Нейтральний	Негативний
Додати повітряний зазор		Нейтральний	Позитивний	Нейтральний	Умовний	Нейтральний
Мультирезонатор		Умовний	Нейтральний	Позитивний	Нейтральний	Нейтральний
Багатошаровий		Умовний	Нейтральний	Позитивний	Нейтральний	Негативний
Змінити наземний шар		Умовний	Нейтральний	Позитивний	Позитивний	Негативний
Форма резонатора		Позитивний	Позитивний	Позитивний	Умовний	Нейтральний
Конфігурована структура		Умовний	Умовний	Позитивний	Нейтральний	Негативний
Нетрадиційний матеріал		Позитивний	Умовний	Позитивний	Позитивний	Негативний
3D-поглинач		Нейтральний	Нейтральний	Нейтральний	Нейтральний	Позитивний

Висновки

У даному розділі було представлено потенційні переваги та можливі застосування МРА для галузі IoT (Інтернету речей). Для цього було оглянуто принципи дизайну, фон, застосовано різні методи покращення характеристик.

Після перегляду структур та вимог було наведено різні методи оптимізацій, кожен із яких було порівняно із рештою методів.

Поточна реалізація МРА у різних програмах показала значне покращення у порівнянні із традиційними приймачами електромагнітних сигналів.

РОЗДІЛ 3. ПОГЛИНАЧІ ТА ЇХНІ ВИДИ. БАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ

3.1 Поглинання небажаних частот.

В останні роки використання бездротової технології виросло в рази, дані темпи будуть рости і далі оскільки кількість пристроїв IoT зростають і далі. Запрогнозовані вже найближчим часом буде практично неможливим знайти середовищев якому не буде сигналів. МРА розроблені для заміни традиційного сигналу, такі як діелектричні листи, з високими втратами та ферит [3].

Наразі феритові листи ще досі використовуються, для забезпечення відсутності відображення у середовищі, такому як ЕМ-клітка. Якщо обговорювати діелектричний лист із втратами, то може постати проблема низької ефективності.

Досить велика кількість легких, ультратонких, недорогих із ефективністю близькою до 1, можуть подолати нинішній дефіцит із звичайних поглиначів.

Характеристики поглинання декількох МРА.

У таблиці 3.1 відображено методи для конкретних застосувань. Дана таблиця ілюструє ефективність МРА для поглинання небажаних навколишніх сигналів у навколишньому середовищі. Результати даної таблиці можна використати для забезпечення вільної зони для сигналів.

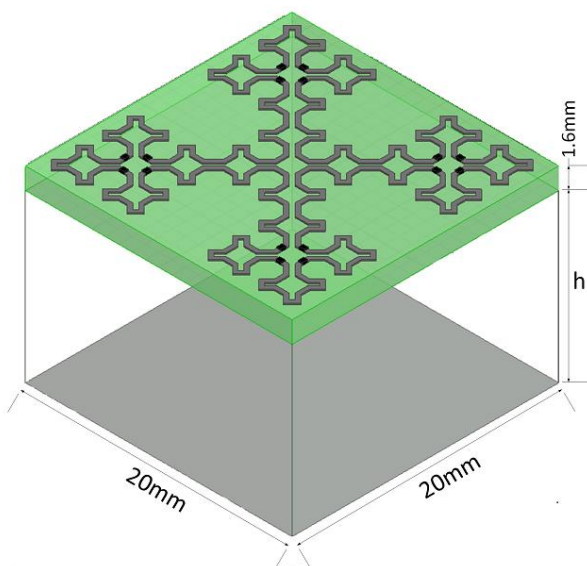


Рис. 3.1 (а) структура для поглинання небажаних сигналів (склад. Із фрактального резонатора та зосереджених резисторів МРА) [26] .

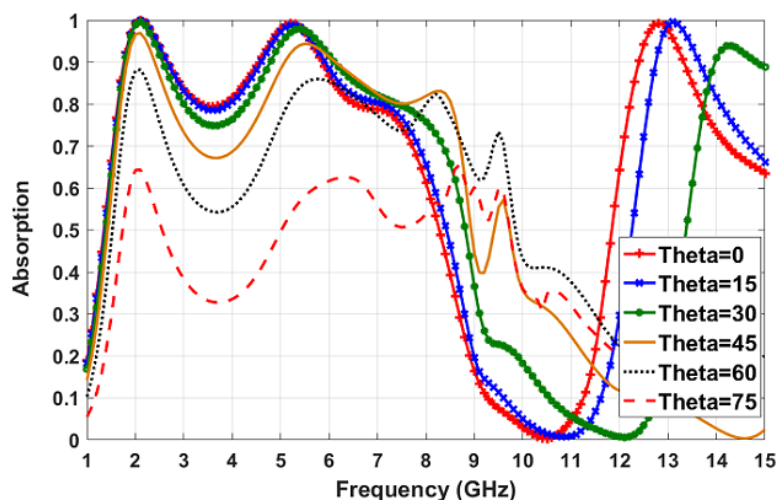


Рис. 3.1 (б) зіткнення різних кутів падіння (характеристики поглинання) [26] .

3.2 Терагерцові програми.

Наразі більшість пристроїв IoT працюють на комерційних частотах, зокрема Wi-Fi та GSM. До комерційного проекту буде внесено і діапазон від 23 ГГц до 64 ГГц, після впровадження технології 5G. Дані діапазони частот будуть використані для дальнього типу зв'язку та щоденного використання у цілях Інтернет-сервісів. Проте унікальні властивості ТГц-випромінювань являються придатними і для інших типів програм, для безпеки, у сфері телекомунікацій (бездротовий зв'язок), у якому надвисока швидкість передачі даних.

Таблиця 3.1

Метод	Частота	Розмір	Ефективність поглинання
Збільшення електричної довжини	2-20 ГГц (широкосмуговий)	$0.1330 \lambda_0 (6 \times 6)$	Більше 90%
Збільшення електричної довжини	1,93 ГГц	$0.083 \lambda_0 (5 \times 5)$	c
Мультирезонатор	6,45, 7,4, 9,1 і 11 ГГц	$0.344 \lambda_0 (9 \times 18)$	97%, 98%, 98% і 98%
Багатошаровість	3,15-3,25 ГГц (широкосмуговий)	$0.157 \lambda_0$	Більше 90%

	ий)		
Нечутливий до поляризації	9,26 ГГц	$0:309 \lambda_0 (20 \times 20)$	98%
Випадковий візерунок	5,7-14,9 ГГц (широкосмуговий)	$0:0925 \lambda_0 (77 \times 77)$	99%
Багат шарові, нечутливі до поляризації	10,28 ГГц	$4:61 \lambda_0$ (Повна структура)	Більше 90%
3D мініатюризація	5,2 ГГц	$0:347 \lambda_0 (9 \times 9)$	99.9%

Саме розмір структури у ТГц-спектрі підвищує складність реалізації. МРА – перспективне рішення для ТГц-додатків, завдяки невеликому розміру комірки у порівнянні з довжиною хвилі. Окрім цього, матеріал, який використовується, а також його характеристики, такі як проникність та електропроникність повинні залишатись сталими та узгодженими у межах виділеної ТГц-частоти [3].

Одним із наступних кроків у процесі проектування – це застосування інших типів та фор в залежності від вимог застосування. Наприклад, використання кремнієвих стрижнів, які в свою чергу формують резонатори із буферним шаром оксиду алюмінію, а також із плівкою на основі підкладки із золота, для МРА із 4-ма смугами поглинання. Дана структура легка у маніпуляції, налаштована для штучного маніпулювання, для різних довжин хвиль. Для кращого розуміння проілюстровано рис 3.2 (а) та (б), рис. 3.3 (а) та (б), на яких відображено 2 різних структури МРА, в яких кремній використовують як субстрат.

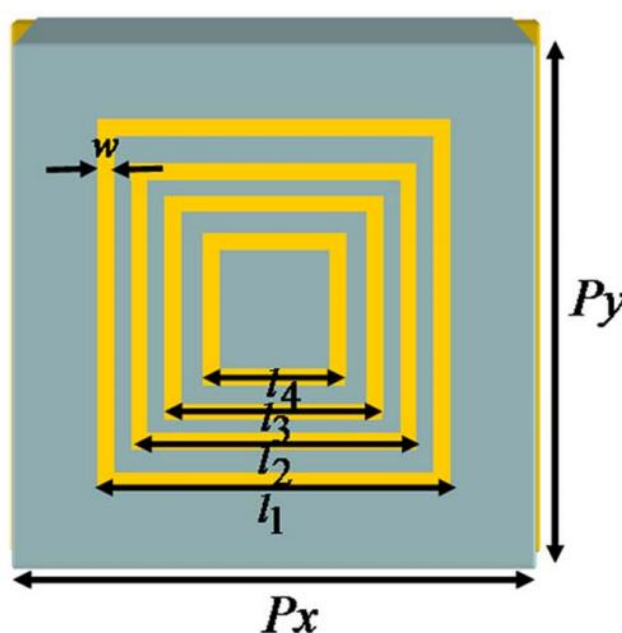


Рис. 3.2 (а) поглинач із квадратними кільцевими резонаторами [27] .

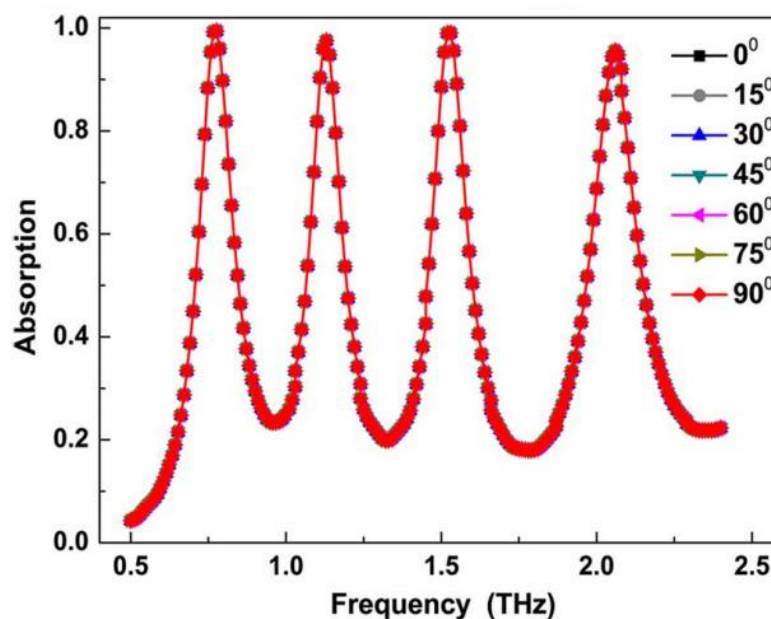


Рис. 3.2 (б) характеристика поглинання зіткнення хвиль із різними кутами поляризації [27] .

3.3 Поглинач теплових випромінень.

Усі об'єкти, які знаходяться у кімнаті мають власне теплове випромінювання, яке розташоване у середньому діапазоні (інфрачервоному) довжин хвиль. Проте ідеальні теплові випромінювачі, за відповідністю до закону Планка, повинні випромінювати імпульсивно та безперестанно електромагнітне випромінювання.

Проте реальні випромінювачі надають нижче випромінювання, це пов'язано із низьким рівнем поглинання електромагнітних хвиль. Така властивість, як доставка світла із спеціальним спектром та поширення їх в подальшому використовуючи різну поляризацію та різні спектри, які потрібні в інфрачервоному спектрі.

ІЧ довжина хвилі використовується в технології IoT, для моніторингу стану здоров'я та навколишнього середовища.

Перший крок для створення теплового випромінювача високої продуктивності – підвищення здатності поглинання.

Поглинання тепловим випромінювачем, в першу чергу залежить від матеріалу, який використовується та його форми, яка може бути різною у різних ситуаціях.

Отже, структура, яка сконструйована для високого поглинання з легкістю б подолати недоліки, які виникають у стандартних (класичних) випромінювачах [3].

Ще у 2000-х роках було доведено, що фотонні, кристалічні матеріали, структура яких являється періодичною можуть з легкістю виконувати роль випромінювача. Саме з 2000-ого року метаматеріали були названі, як перспектива для подальшого вирішення питання та проектування високоточних випромінювачів, завдяки періодичним структурам. Саме ця особливість досягається завдяки метаматеріалам.

Випромінювачі чутливі до різних поляризацій та різних кутів падіння. Проте досі існує завдання спроектувати надчутливий тепловий випромінювач. Тепловипромінювач із близьким до 1-ці поглинання досягнуто завдяки металевій наноструктурі.

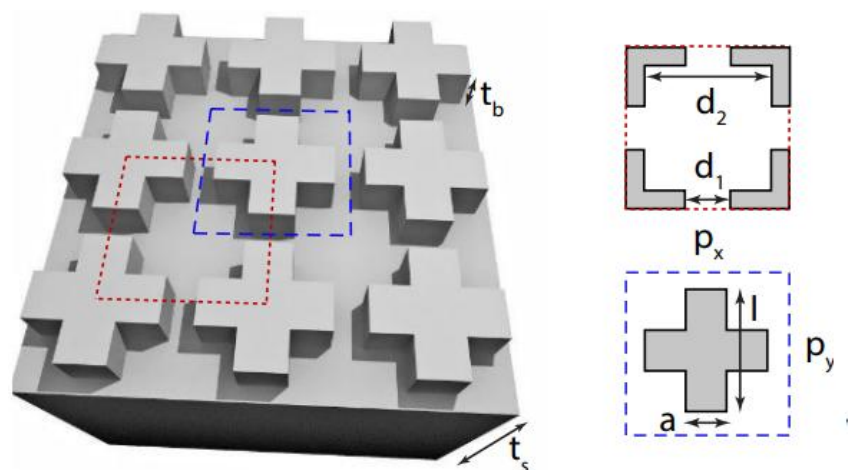


Рис. 3.3 (а) Широкопasmовa структура МРА, створена із кремнія [28] .

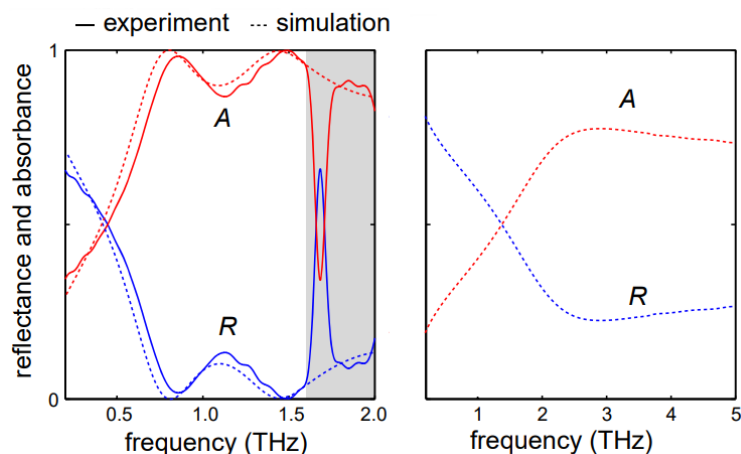


Рис. 3.3 (б) та (с) вимірювання і результати, при модуляції, 2D-перехресного масиву, розширення поглинання кремнієвої підкладки [28] .

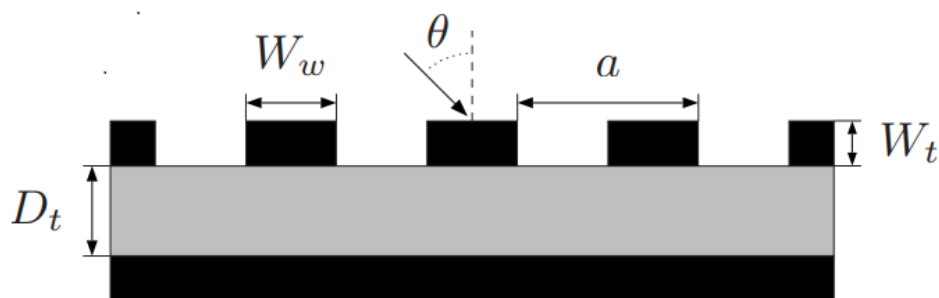


Рис. 3.4 (а) Наноструктура для теплового випромінювача [29] .

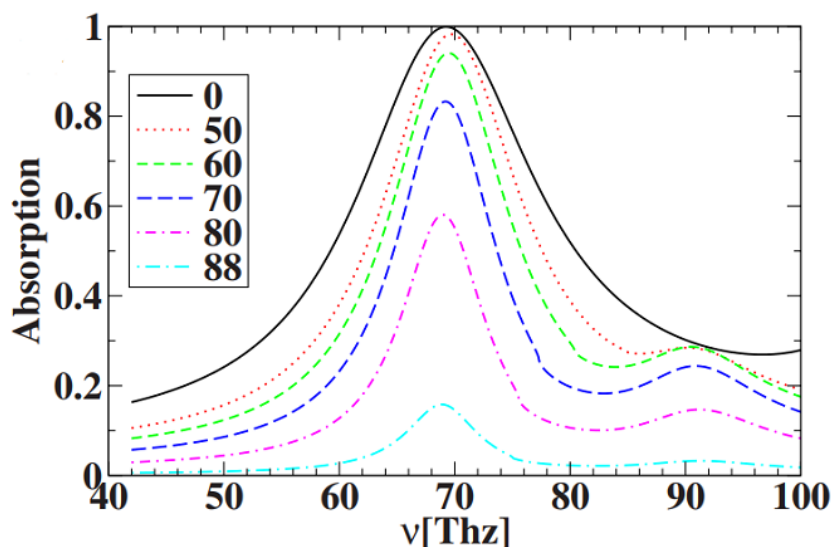


Рис. 3.4 (б) Характеристика поглинань при різних інцидентах кутів [29] .

3.4 Оптичні перемикачі

Використання оптичних перемикачів у майбутній Смарт-індустрії та технології IoT гарантовано підвищить точність, ефективність та надійність приладів. За оптичними перемикачами стоїть одна із головних ролей у системі обробки оптичних сигналів. Звичайні перемикачі працюють на основі оптичних характеристик, які налаштовані шляхом «іскріння» сильною хвилею, яку ще називають хвилею каталізатора, одна хвиля має можливість змінити матеріал та його конструкцію на атомарному рівні. Звичним станом являється, що цільові поглинаючі сигнали нижчі за енергетичним рівнем від хвиль каталізатора [3].

Оптичний перемикач форми «Квітка» створений на основі структури поглинача із метаматеріалу, в якому поляризація – не чутлива. Дана конструкція складається із FR – 4 підкладки та міді, яка виконує роль провідного матеріалу.

Для зменшення залежності каталізатора від потужності промення використовують матеріали Керра-нелінійності. Як зображено на рис. 3.6 (а) металевий нанокompat, який виступає в ролі шару діелектрика використовують задля збільшення не лінійності.

Окрім цього, золото використовується у обох резонаторах, а металева пластинка, яка замінила мідь використовується для збільшення провідності. У той же час на рис. 3.6 (б) проілюстровано вплив від металу-нанокompatу, у якому концентрація наночастинок металу є різною. Завдяки даним поєднанням покращено обидві характеристики, які являлись китичними для налаштувань, а Керр-нелінійність та плазмонний резонанс.

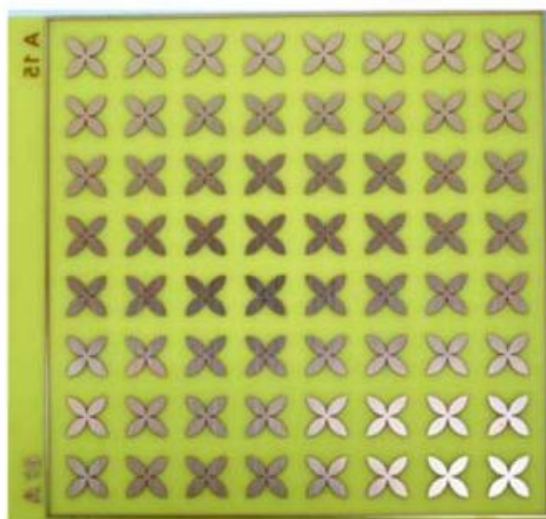


Рис. 3.5 (а) Оптичний перемикач у формі квідки, FR-4 – підкладка [31] .

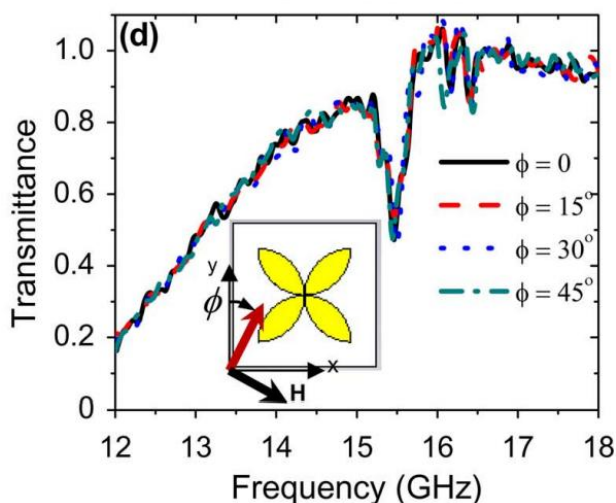


Рис 3.5 (б) Графік та характеристика поглинань при різних кутах поляризації [31] .

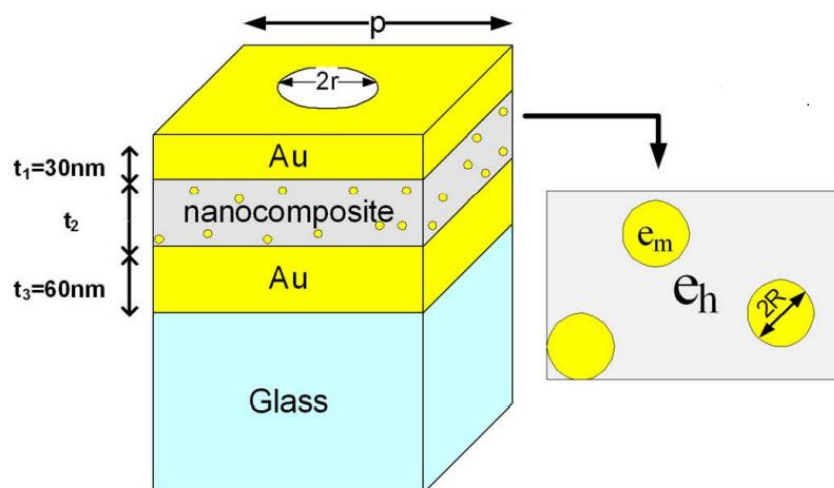


Рис. 3.6 (а) Оптичний перемикач, у якому використано нанокомпозитний метал [30] .

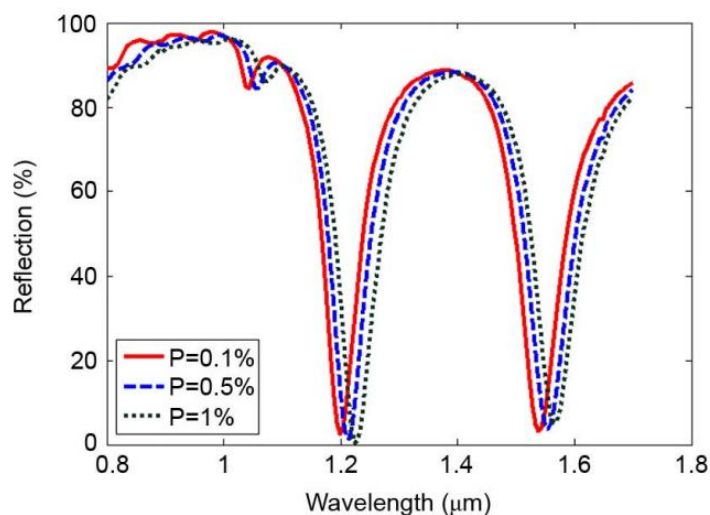


Рис. 3.6 (б) Коефіцієнти відбиття в залежності від зміни концентрацій наночастинок із металу [30] .

3.5 Збір енергії

Останнім часом збір енергії все більше використовує навколишню енергію, можна сказати, що це вже стало джерело енергії. Енергія електромагнітних хвиль завдяки бездротовим програмам стає дедалі доступнішою і все більше використовується, головною причиною даної тенденції являється дешевизна та екологічна чистота даного джерела енергії. Проте Ем-хвилі не можуть використовуватись безпосереднь, як джерело, тому прийнято рішення перетворити

електромагнітні хвилі спочатку змінний, а далі в постійний сигнал за допомогою ректени (яку ми розглядали у розділі 1).

Найскладнішою частиною являється низька потужність ЕМ-хвиль, які можна отримати із навколишнього середовища.

Поглиначі мета матеріалів мають можливість сприйняти електромагнітну хвилю цілком. Відповідний дизайн МРА, може гарантувати ефективність, яка буде близькою до одиниці, в залежності від різних типів поляризацій та кутів падіння у межах необхідної нам смуги частот. Крім того, в МРА можна збільшити кількість елементарних комірок, не турбуючись про взаємозв'язок між ними. Дані властивості поглинача роблять його майже ідеальним пристроєм для поглинання сигналу. Проте сигнали втрачаються у підкладці, що є недоліком поглинача.

Щоб вирішити проблему неконтрольованої втрати електромагнітних хвиль, які вже отримані. Можна використовувати додаткові резистори, введення їх у конструкцію компенсує внутрішній опір підкладки.

Даний метод покращить пропускну здатність поглинача та коефіцієнт поглинання. Зосереджені елементи будуть виступати у якості секції випрамляча (вхідної), а сигнали, які було поглинуто будуть відправлені через випрамляч, для утворення постійної напруги.

У деяких конструкціях, заміна резистора на структуру випрамляча може впливати на характеристики поглинання у зв'язку із зміною діаграми резонатора [3].

Неефективна конструкція може призвести до втрати потужностей, що гарантована зменшить рівень акумульованої енергії. Крім цього мережа узгодження імпедансу потрібна для вхідного опору на випрамлячі та резисторів, які зосереджені у МРА.

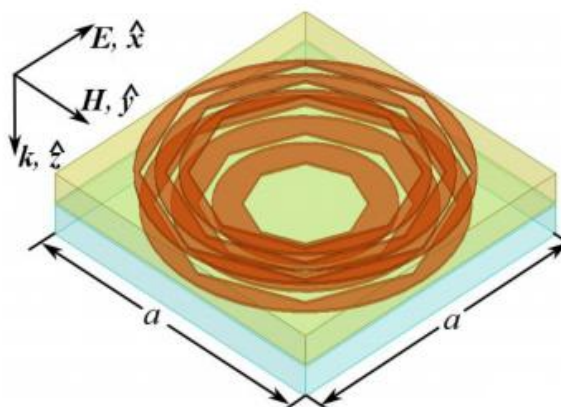


Рис. 3.7 (а) Неефективна конструкція збирача ЕМ хвиль [32] .

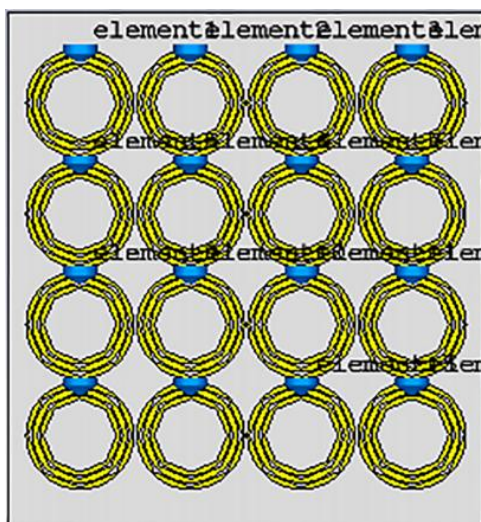


Рис. 3.7 (б) Остаточна структура після додавання зосереджених резисторів [32] .

На рис 3.7 (а) блок осередок складається з 3-х вкладених резонаторів на кожному із шарів [32] .

3.6 МРА, як датчик

Датчики на основі мета матеріалів працюють на мікрохвильових частотах, у цей же момент інші використовують видимі спектри хвиль для подальшого визначення цільових параметрів [3].

МРА мають здатність розрізняти навіть надзвичайно малі маніпуляції у падаючій хвилі. Поглиначі мета матеріалів дуже широко використовуються у різних сферах діяльності, наприклад у:

- Ґрунті (вимір вологості).
- Щільність.
- Показник заломлення.

Різні методи адаптації для традиційних МРА використовуються для різних цілей зондування. Проте основним принципом до сих пір вважають стеження за поглинанням змінних характеристик, під внесення додаткових цілей датчика до первинної структури МРА [3].

Більшість пристроїв, які використовуються у технології IoT збирають дані із навколишнього середовища, саме тому датчики малих розмірів ставлять вирішальну точку у перевагах їхнього використання.

Таблиця 3.2

Збірна інформація про МРА для додатків зондування.

Метод	Частота	Розмір	Ефективність поглинання	Цільова програма	Цільова програма
Двошаровий	2,4 ГГц і 5 ГГц	$0.144 \lambda_0$ (8×8)	99.9% і 99.9%	Відчуття натовпу	Використання струму резистора
Багаторезонатори	11,9 ГГц	$0.403 \lambda_0$ (2×1)	99.9%	Показник заломлення	≈ 10 МГц Hz за збільшення E_f на 1
Широкосмуговий всі діелектричні МРА	від 5,76 до 17,12 ГГц	$0.384 \lambda_0$ (10×10)	вище 90%	Вологість ґрунту	Більше 2% на 1% вся діелектрична вологість ґрунту МРА
Багаторезонатори (Терагерцове зондування)	0,908 ТГц і 1,192 ТГц	$0.403 \lambda_{\text{cut-off}}$ (Ідеальний номер)	98% і 99,6%	Зондування температури	10,3 ГГц/К і 8,1 ГГц/К
Метод	Частота	Розмір	Ефективність поглинання	Цільова програма	Цільова програма
Зондування мікрохвильової печі з тримачем зразка	7,11 ГГц	$0.118 \lambda_0$ (60×60)	99.9%	Щільність рису	≈ 41 МГц Hz на 10% із збільшенням щільності тримача зразка
Терагерцове зондування	0,55 ТГц (Середній)	$0.33 \lambda_{\text{cut-off}}$ (Ідеальний)	99.9%	газ CO ₂	Підвищення поглинання на

	інфрачервоний)	номер)			0,0282%. і 0,5319 нм на ppm
Багаторезонатори (Терагерцове зондування)	2,249 ТГц	$0.27 \lambda_0$ (Ідеальний номер)	99.9%	Показник заломлення	300 ТГц на RIU
Широка смуга поглинання	187 ТГц до 750 ТГц	$0.187 \lambda_0$ (Ідеальне число)	вище 96%	Показник заломлення	2-3% у всій пропускній здатності

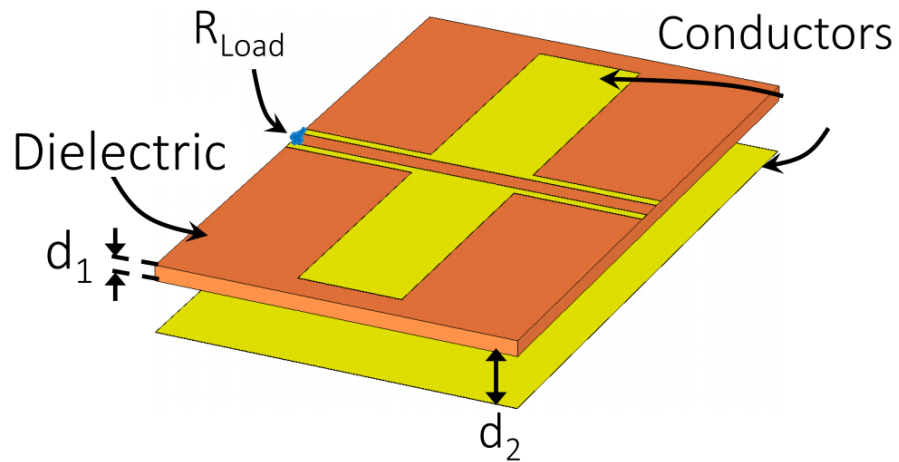


Рис. 3.8 (а) Структура МРА з випрамлячем на кожен із каналів.

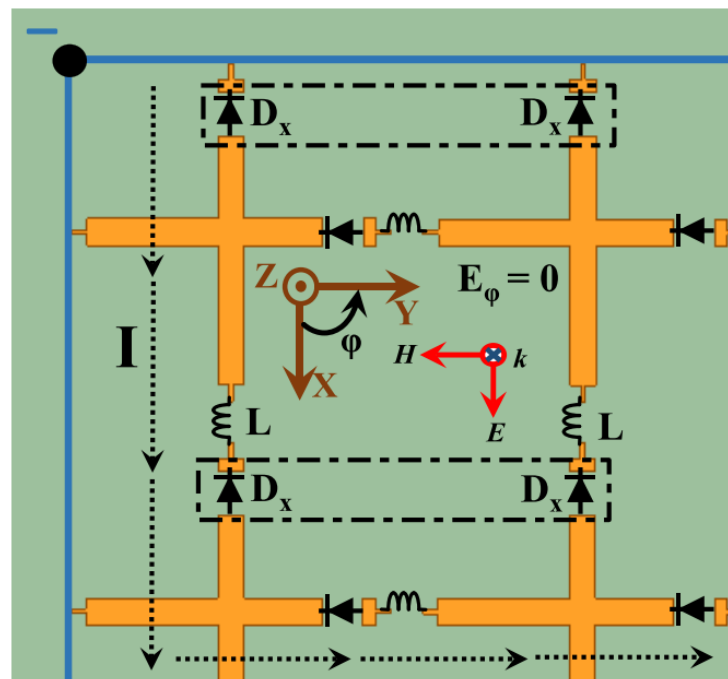


Рис. 3.8 (б) З'єднанні елементарні комірки за допомогою зосереджених індукторів, а також вбудований випрамляч у кожній із комірок.

3.7 Застосування метаматеріалів та поглиначів

Зазвичай активні датчики являються на порядок точнішими, у порівнянні із пасивними, незважаючи на енергоспоживання. МРА являється перспективним рішенням для точних можливостей зондування у пасивних структурах. Типовими характеристиками матеріалів підкладки можна маніпулювати метаматеріальною структурою. Якщо змінити поглинання МРА можна досягти високої чутливості навіть у пасивному датчику. Метаматеріальні датчики мають складну структуру у більшості випадків. Дана складність пов'язана із архітектурою, яка використовується [3].

Зміна форми структури за рахунок фізичних змін, прикладом яких являється тиск або закачування рідин у створений канал.

Складні конструкції призводять до трудомістких та дорогих процесів для обслуговування та виготовлення. Іншим способом являється використання специфічних матеріалів у дизайні. Характеристики можуть змінюватися одночасно із введенням передбачуваного параметру.

Під час використання даного методу, потрібно постаратись уникати фізичних коригувань та спростувати процес виготовлення, проте необхідно проводити і подальші дослідження, для визначення відповідного матеріалу у процесі зондування різних параметрів. Також потрібно вирішити питання довговічності матеріалів та сумісності із трубопровідними резонаторами.

Висновки

Автономні пристрої та датчики IoT – це абсолютно нові напрямки для досліджень, які можуть використовуватись у подальшому та призвести до автоматизації датчиків для IoT. Низький рівень енергії у навколишньому середовищі, диктує зменшення витрат енергії.

Поглиначі наноматеріалів - найкращі кандидати для подальшого використання, зокрема збирачі енергії та датчики.

У даному розділі було розглянуто та показано проблеми, які виникають при використанні метматеріалів, як датчиків та накопичувачів енергії. Під час проектування структури, у якій буде застосовано обидві особливості, ускладнення дизайну виросте в рази. Саме тому потрібно, проводити більше досліджень у даній сфері для подальшого розвитку та використання у технології, яка розвивається небаченими до сих пір темпами. Мова йде про IoT.

Подальше дослідження призведе до виробництва автономних датчиків, які матимуть можливість надати безперервні дані, про так зване зондування протягом тривалого часу у далеко віддалених регіонах або регіонах, які недоступні і

передавати ці дані без потреби втручання людини, у даний пристрій, ані для забору даних отриманих даним пристроєм, ані для заміни живлення (батарей і т.д).

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ФІЛЬТРА НА БАЗІ КОМІРКИ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

4.1 Моделювання мікрохвильового фільтра на базі комірки мета матеріалів.

Після проведених аналізів та досліджень було прийняте рішення про моделювання та проектування мікрохвильового фільтра на базі комірок мета матеріалів за власними розрахунками,

В даному розділі буде розглянуто створення мікрохвильового фільтра у мікрохвильовому діапазоні, для виконання поставленої задачі було використано 2 програми : AWR microwave office та MULTISIM, завдяки даним програмам і буде змодельовано заданий фільтр.

Для проведення розрахунків було використано наступні формули:

$$T = C_1^+; \quad (4.1)$$

$$R = 1 + C_1^-; \quad (4.2)$$

$$T = \frac{K_2}{(1+K_2)} - \frac{K_1}{(1+K_1)}; \quad (4.3)$$

$$R = 1 - \frac{K_1}{(1+K_1)} - \frac{K_2}{(1+K_2)}; \quad (4.4)$$

де, K_1 та K_2 – коефіцієнти зв'язку «Електричного» та «Магнітного» типів коливань трансмісії лінії, у даному випадку мікрохвильовий фільтр [33].

Взявши за основу подвійні мікрохвильові резонансні фільтри, у яких різні типи коливань теоретично та практично можна обрахувати за рахунок формул (4.3) та (4.4).

З формул (4.3) та (4.4) можна визначити коефіцієнти зв'язку, як електричні, так і магнітні K_e та K_m . Використовуючи резонансні частоти коливання отримуємо наступне рівняння:

$$(K_1 = K_2 = K); \quad (4.5)$$

$$K = \frac{K_2}{(1+K_2)} - \frac{K_1}{(1+K_1)}; \quad (4.6)$$

$$T = 1 - \frac{K_1}{(1+K_1)} - \frac{K_2}{(1+K_2)}; \quad (4.7)$$

K_1 та K_2 представляємо у вигляді формул з порядковим номером (4.8) та (4.9)

$$K_1 = \frac{K_1}{[1+K_1+j(\xi+a)]}; \quad (4.8)$$

$$K_2 = \frac{K_2}{[1+K_2+j(\xi-a)]}; \quad (4.9)$$

На основі формул (4.1) – (4.9) було проведено розрахунки та побудовано мікрохвильовий фільтр представлений у пункті 4.2

4.2 Переваги моделювання мікрохвильового фільтра на базі комірки метаматеріалів в програмному забезпеченні AWR microwave office.

Microvave Office – універсальне програмне забезпечення, яке є прекрасним рішенням для розробки будь-яких видів НВЧ та радіочастотних пристроїв, починаючи простими фільтрами і закінчуючи інтегральними схемами монолітного типу. Досить зручним являється інтерфейс та зручна архітектура, яка допомагає інтерфейс та унікальна архітектура. Після моделювання у даній програмі в подальшому можна інтергувати власні розробки.

4.3 Виготовлення мікрохвильового фільтра, вимірювання, порівняння з моделями в AWR microwave office.

На основі проведених досліджень у програмі AWR microwave office було виготовлено мікрохвильовий фільтр, який відображено на рис. 4.1



Рис. 4.1 Виготовлений фільтр мікрохвильового діапазону.

Провівши дослідження даного фільтру було отримано наступні результати. На рис 4.2(а) та 4.2 (б) відображено заміри коефіцієнтів передачі і відбиття фільтру.

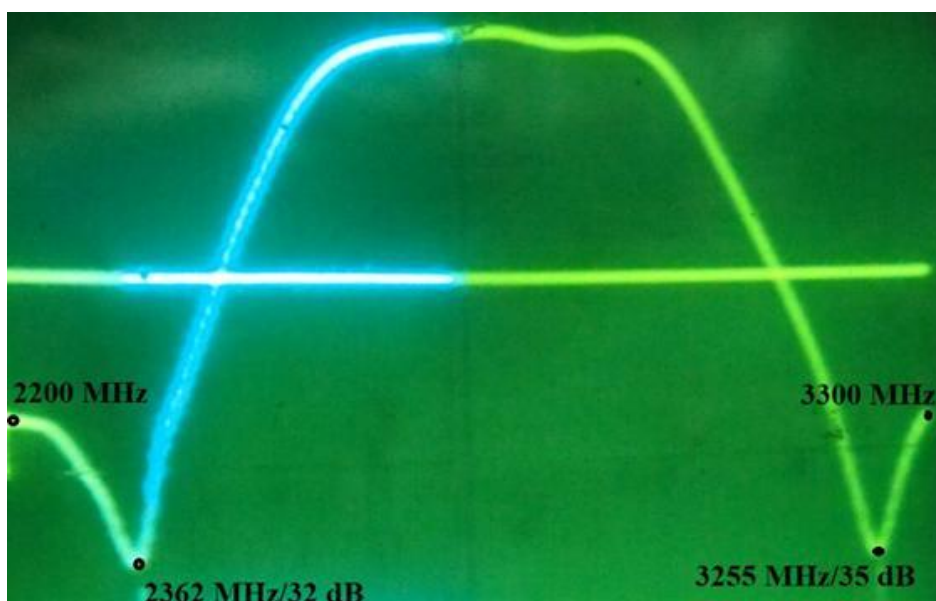


Рис. 4.2 (а) Отриманий (практично) результат коефіцієнту передачі.

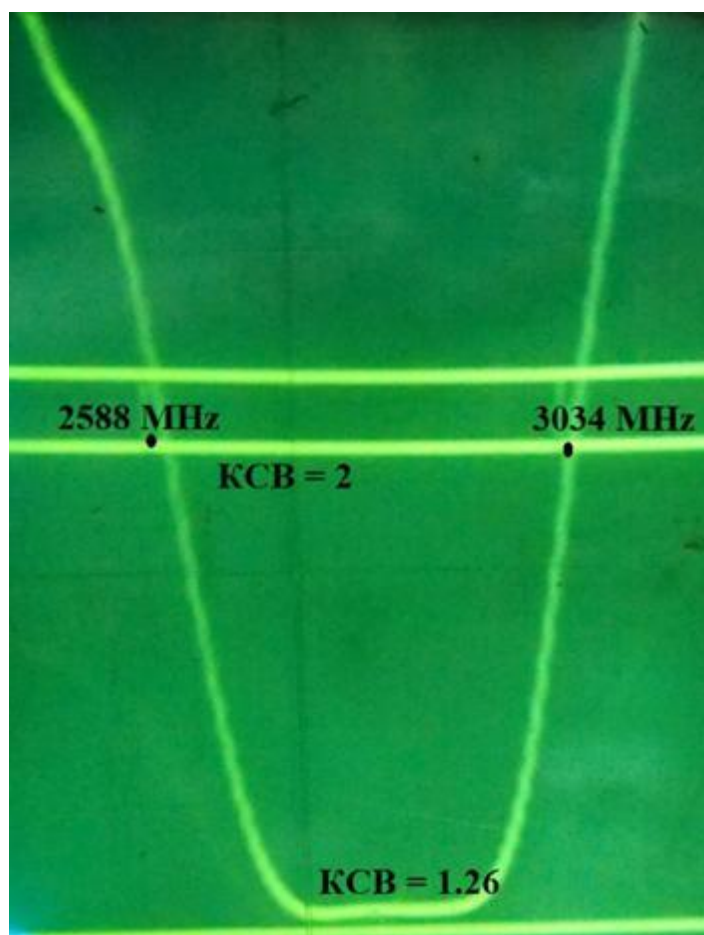


Рис. 4.2 (б) Отриманий (практично) результат коефіцієнту відбиття.

Також було проведено теоретичні розрахунку коефіцієнтів відбиття та передачі, які проілюстровано на рис. 4.3 (а) та 4.3 (б). Замітна різниця в коефіцієнтах виникла у зв'язку з тим, що один із них в дБ інший в разях.

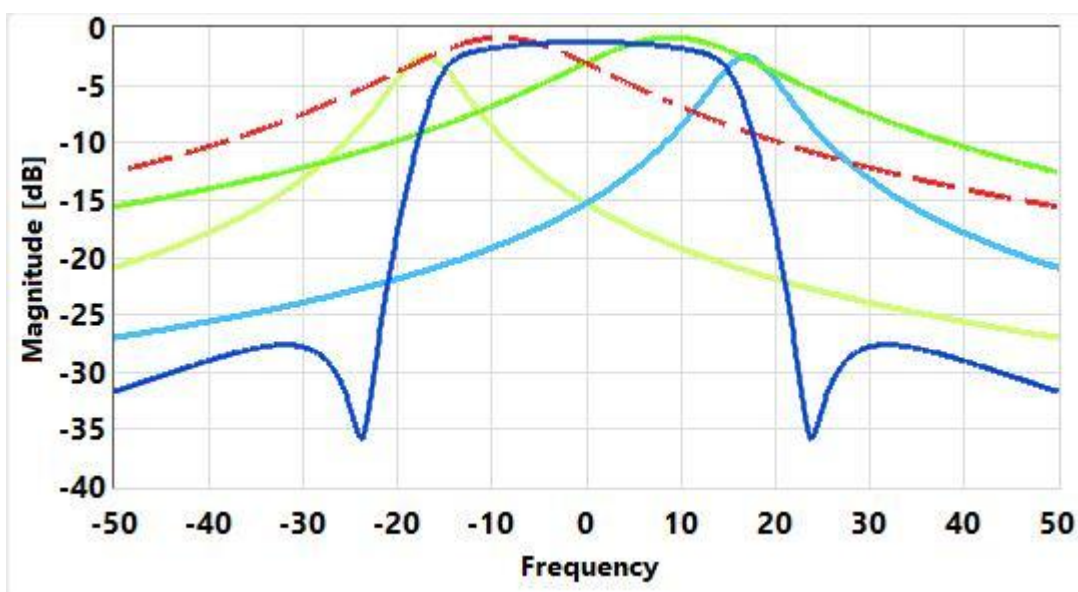


Рис. 4.2 (а) Отриманий (теоретично) результат коефіцієнту передачі.

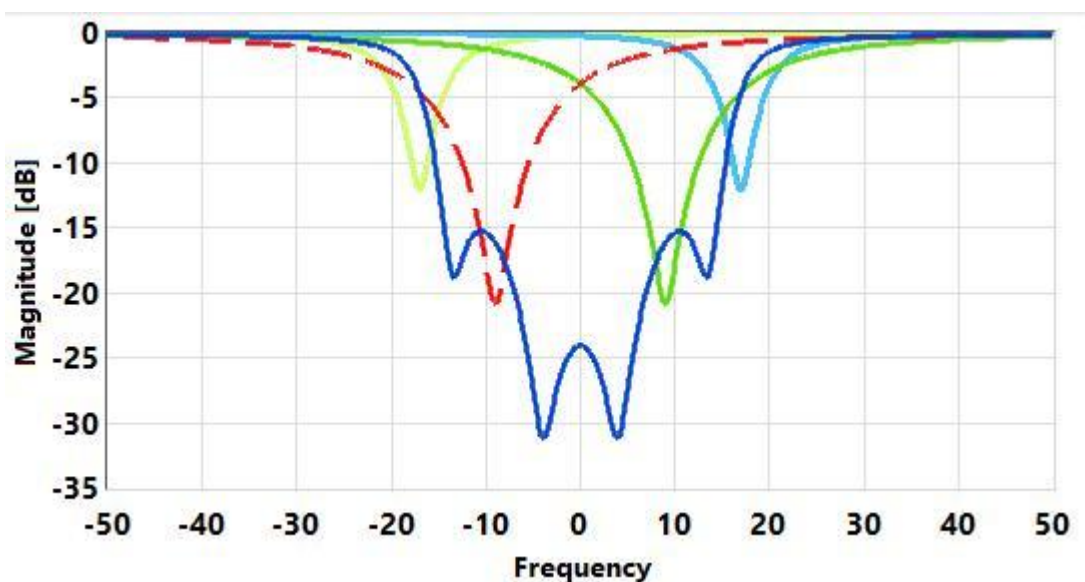


Рис. 4.2 (б) Отриманий (теоретично) результат коефіцієнту відбиття.

Отримані теоретичні та практичні результати коефіцієнтів відбиття та передачі, подібні.

Висновки

1. Розроблена модель фільтра на рис. 4.1. Наведена модель на даному рисунку дала можливість провести подальші розрахунки розмірів, які дозволили виготовити в подальшому фільтр у мікрохвильовому діапазоні, який існує на базі комірки метаматеріалів, а також параметри, які потрібно для подальших аналізів.

2. При використанні моделі, яка була змодельована в Microwave office, було виготовлено фільтр для використання у мікрохвильовому діапазоні, отримані параметри були схожі до попередньо розрахованих, що підтвердило правильність розробленої моделі.

РОЗДІЛ 5.

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

В даному розділі викладено створення мікрохвильового пристрою на базі комірок метаматеріалів для технології IoT (Internet of things).

5.1 Опис ідеї проекту

Даний проект направлений на введення метаматеріалів у сферу, яка стрімко розвивається, під назвою IoT (Internet of things), з метою поліпшення якості передачі сигналу. Основною ідеєю являється виявлення та контроль терагерцових випромінювань (даний тип випромінювання складається з електромагнітних хвиль, які можуть безпечно проходити крізь матеріали). Бажання створити новий пристрій зв'язку на базі комірок метаматеріалів. Метаматеріали незвичні тим, що при взаємодії зі світлом, вони надають властивості, яких немає в природних матеріалах. Ідентичні різновиди метаматеріалів будуть використанні для взаємодії та зміни інтенсивності пучка ТГц випромінювання.

Таблиця 5.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення мікрохвильового пристрою на базі комірок метаматеріалів для технології IoT з метою покращення якості та швидкості передачі сигналів.	1. Середовище IoT. 2. Медична галузь (більш безпечні сканери). 3. Нові пристрої зв'язку. 4. Більш чутливі хімічні детектори.	Основною вигодою є покращення нинішніх систем, в залежності від галузі. Оновлення застарілого обладнання (на покращене) із кращими характеристиками. Введення в експлуатацію, більш безпечного методу обстеження. Покращення технології передачі інформації в IoT.

Наразі яскравих конкурентів в даній сфері немає, оскільки дані пристрої не являються ключовими в розробці у великих компаніях. В першу чергу увага надається архітектурному підходу, що забезпечує набагато швидшу та якісну передачу даних за допомогою використання метаквільових пристроїв на базі комірок метаматеріалів в технології IoT. Даний архітектурний підхід підвищить ефективність використання електроенергії та зменшить її витрату при аналогічному обладнанні конкурентів. Порівняння з конкурентами, а також визначення переваг і недоліків наведено у наступній таблиці.

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	HQSoftware	Softeq		
1	Використання метаматеріалів.	Так	Ні	Ні	Так	
2	Використання акумуляторного/генераторного живлення.	Так	Так	Ні		Так
3	Єдина підтримка апаратного та програмного забезпечення.	Так	Ні	Так	Так	
4	Можливість використання розробки у інших галузях.	Так	Ні	Ні		Так

Зазначені вище конкуренти володіють обмеженим функціоналом, зокрема, сильними сторонами зазначено використання акумуляторного/генераторного живлення, яке представлено в моєму проекті та у конкурента HQSoftware, а також можливість використання розробки у інших галузях, представлено лише у моєму проекті, наявність метаматеріалів у розробці є додатковою перевагою над конкурентами, але не несе принципового характеру і не відноситься до ключової переваги.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Метахвильовий пристрій на базі комірок метаматеріалів для IoT. Метахвильовий пристрій на базі комірок метаматеріалів для IoT.	Використання Місго-Сар для моделювання макету електронної системи для IoT.	Є доступною в мережі інтернет	Є доступними та безкоштовними для використання (демо-версія)
2	Метахвильовий пристрій на базі комірок метаматеріалів для IoT.	Використання MULTISIM для моделювання макету електронної системи для IoT.	Є доступною в мережі інтернет	Є доступними та безкоштовними для використання
Обрана технологія реалізації проекту: MULTISIM				

Для реалізації проекту основним із етапів являється розробка цифрового макету метаквильового пристрою на базі комірок метаматеріалів, із забезпеченого переліку

було обрано 2 найкращих, для даної справи програмних забезпечення для моделювання проектів: Micro-Cap та MULTISIM.

Micro-Cap – програма для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем з інтегрованим візуальним редактором.

MULTISIM – програма для моделювання і тестування схем електронних пристроїв, призначена для комп'ютерної розробки принципів схем електронних пристроїв, їх налаштування, тестування і доводки до необхідних параметрів.

У зв'язку з цим обрана технологія – MULTISIM, у зв'язку з більш розширеним функціоналом, покращеною візуальною складовою, зручністю у використанні та інтуїтивного розуміння процес моделювання.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

При дослідженні ринкових можливостей, в першу чергу проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку. Дані наведені у таблиці нижче.

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж	?
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	?

Зважаючи, на нинішню тенденції розвитку IoT даний ринок є одним із найпривабливіших на даний момент, окрім цього унікальність розробленого пристрою гарантує попит на продукцію та подальший розвиток технології.

Таблиця 5.5

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Відсутність глобального попиту в країнах СНД.	На даний момент, у країнах СНД технологія IoT, знаходиться у процесі розробки, мало використовується пересічними громадянами (у порівнянні з провідними країнами), що призводить до несформованості ринку.	Збільшення експорту в країни, де дана технологія використовується більш глобально.
2	Несформованість ринку.	Через вузьку спрямованість товару може з'явиться проблема з подальшим продажем технології та пристрою	Сформувати рекламну компанію для збільшення зацікавленості продукцією та розвитку технології.

Таблиця 5.6

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Необхідність розвитку технологій мета хвильових пристроїв на базі комірок мета матеріалів.	Важливим етапом розвитку будь-якої технології та поліпшення якості надавання послуг, являється розвиток нових технологій, із покращенням попередніх результатів. У зв'язку з цим виникає потреба впровадження даної технології у системи IoT, через низку переваг.	Популяризація впровадження даної технології не тільки в даній країні, але й в країнах, де IoT використовується набагато частіше (експорт технології).

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
2	Поліпшення якості та швидкості передачі сигналів.	Завдяки використанню даної технології буде покращено якість та швидкість передачі сигналів, що в свою чергу призведе, до економії електроенергії та зменшення часу очікування для поставлених задач.	Презентація технології на міжнародних виставках, з метою висвітлити перспективи подальшої розробки. Втягнення інвестицій.
3	Контроль Терагерцових випромінювань.	У зв'язку з тим, що даний тип випромінювання складається з електромагнітних хвиль, які можуть безпечно проходити крізь матеріали, в інших сферах покращаться результати, без шкідливого впливу.	Популяризація, серед спеціалістів даної галузі.

Головною можливістю являється, необхідність даної технології та її використання у сфері, як стрімко розвивається. Завдяки, цьому можливості використання даної технології будуть рости.

Таблиця 5.7

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Динаміка галузі	Дана галузь є однією із найперспективніших на даний момент, прагнення довести до максимального комфорту технологію IoT призводить до збільшення попиту та зацікавленості у розробках нових технологій.
2	Концепція товару і послуги	Метахвильові пристрої на базі комірок метаматеріалів дозволить збільшити кількість клієнтів, як для даної технології у будь-якій сфері, так і для технології IoT.
3	Післяпродажне обслуговування	Введення в деталі використання, можливості продовжити розробку.

Таблиця 5.8

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін метаквільових пристроїв на базі
комірок для технології IoT

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Динаміка галузі	3							✓
2	Концепція товару і послуги	2							✓
3	Після продажне обслуговування	1					✓		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9

SWOT-аналіз стартап проекту

Сильні сторони: ● Інноваційні технології ● Перспектива подальшого розвитку ● Висока якість	Слабкі сторони: ● Невідома торгівельна марка ● Мало оборотних коштів ● Недовіра потенційних клієнтів
Можливості: ● Нові технології ● Тенденції попиту ● Нові потреби клієнтів	Загрози: ● Відсутність великого попиту в країнах СНД. ● Подібні технології за принципом дії, але використанням інших матеріалів

Таблиця 5.10

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Динамічний розвиток за допомогою використання бізнес-контактів та стратегії маркетингу	Значне підняття рейтингу, завдяки правильно сформованій стратегії маркетингу із висвітленням ключових переваг над конкурентами, лояльність та конкурентноспроможність цін	Праця без посередника, який збільшує ціну, у зв'язку із виконаною роботою, зі своєї сторони	Стратегія лідерства по витратах
2	Динамічний розвиток за допомогою висвітленню унікальності характеристик при наданні послуг	Висвітлення унікальності послуг, які будуть надані, задля подальшого збільшення лояльності клієнтів	Новизна технологій, використання матеріалів найвищої якості, пряма взаємодія із постачальником	Стратегія диференціації

Залежно від міри сформованості галузевого ринку , характеру конкурентної боротьби, необхідно обрати одну з трьох стратегій конкурентної поведінки : розширення первинного попиту, оборонну або наступальну стратегію або ж застосувати демаркетинг або диверсифікацію (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11

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	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є першопрохідцем в даній галузі, але є першопрохідцем у використанні даної реалізації, для цієї галузі	Компанія буде шукати нових користувачів	Метою компанії буде, копіювання та введення в експлуатацію найкращих характеристик та рішень наших конкурентів.	Стратегія наслідування лідеру за для економії фінансових ресурсів. Мета – уникнути лишніх помилок, за прикладом лідера.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартапкомпанії) та до продукту (таблиця 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки була розроблена стратегія позиціонування (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12

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 доступність	Стратегія спеціалізації	Постійний розвиток, інвестиції у подальшу розробку, зменшення ваги, коефіцієнт сприйняття хвиль із максимальним приближенням до 1.	Доступність, якість, швидкість, ефективність.

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова програма - це намічений для планомірного здійснення, об'єднаний єдиною метою та залежний від певних строків комплекс взаємопов'язаних завдань і адресних заходів соціального, економічного, науковотехнічного, виробничого, організаційного характеру з визначенням ресурсів, що використовуються, а також джерел одержання цих ресурсів. Основну увагу слід приділяти вибору, значенню та формі інструментів маркетингу, їх об'єднанню в найбільш оптимальний з погляду визначеної мети комплекс, а також розподілу фінансових ресурсів у межах бюджетування маркетингу.

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (таблиця 5.13).

Таблиця 5.13

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентом
1	Можливість використовувати покращену систему передачі сигналу із більшою швидкістю та якістю передачі.	Зникає потреба використання застарілого обладнання, зменшення витрат електроенергії та часу, при меншій вартості.	Зручність використання пристрою, дешевизна порівнянні з аналогами.
2	Можливість єдиної підтримки апаратного та програмного забезпечення.	Можливість зручного користування та оновлення програмного забезпечення.	Зручність користуванні.

Таблиця 5.14

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
1	Консервативна поведінка, але відкриті до нового.	Соцмережі професійного спрямування, корпоративна пошта	Можливості отримання переліку параметрів та абонентів	Висвітлити унікальні характеристики продукту

У якості концепції маркетингових комунікацій були обрані інтегровані маркетингові комунікації, де компанія ретельно обмірковує і координує роботу своїх численних каналів комунікації, рекламу в засобах масової інформації, особистий продаж, стимулювання збуту, пропаганду, прямий маркетинг.

Висновки

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз перспектив реалізації мета хвильового присрою на базі комірок мета матеріалів для технології IoT, та проведений можливостей ринкового впровадження цієї системи.

В результаті дослідження визначено, що існує можливість ринкової комерціалізації проекту в першу чергу завдяки використанню технології Терагерцової передачі даних на базі комірок метаматеріалів, що дозволяє наділити продукт унікальними якостями, такими як зручність, доступність та цілісність, що надає можливість розвивати проект і надалі.

Конкурентна ситуація надає перспективи впровадження продукту, так як продукція товарів-аналогів має лише частковий функціонал реалізованої системи та володіє низкою критичних недоліків. В результаті існуючі товари-аналоги не створюють прямої конкуренції на ринку України. Але є загроза що товар може не мати великого попиту на ринках України та країнах СНД, через новизну технології.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У даній роботі було досліджено мікрохвильові пристрої на базі комірок мета матеріалів для подальшого використання у технології IoT. Об'єктом, який було досліджено став фільтр мікрохвильового діапазону (розділ 4).

Було перегнуто та проаналізовано основні вимоги та принципи пробазові системи у технології IoT, описана методологія та основні види маніпуляцій, які проводяться над поглиначами.

Детально розглянуто усі наявні види мета матеріалів та їх використання у сфері телекомунікацій, проведено та сформовано звіт та характеристики для кожної маніпуляції та типу структури.

Розробка мікросмугового фільтра підтвердила правильність розрахунків у даній дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Види метаматеріалів / [Електронний ресурс]. URL: <https://moyaosvita.com.ua/fizuka/vidi-metamaterialiv/> (дата звернення: 10.12.2021)
2. What is the Internet of Things (IoT)? / [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/> (дата звернення: 10.12.2021)
3. M. Amiri, F. Tofigh, N. Shariati, J. Lipman and M. Abolhasan, "Review on Metamaterial Perfect Absorbers and Their Applications to IoT," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 4105-4131, 15 March 15, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3025585. / [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9201490&isnumber=9371274> (дата звернення: 10.12.2021)
4. Rectenna / [Електронний ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rectenna> (дата звернення: 11.12.2021)
5. Закон Снеліуса / [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%A1%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D1%96%D1%83%D1%81%D0%B0 (дата звернення: 11.12.2021)
6. N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber," *Physical review letters*, vol. 100, no. 20, p. 207402, 2008.
7. J. Huang, Z. Wei, G. Xu, J.-S. Li, and J. Li, "Detection of water content in emulsified oil with the metamaterial sensor," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 85, pp. 135–144, 2019.
8. N. T. Q. Hoa, T. S. Tuan, L. T. Hieu, and B. L. Giang, "Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for c-band applications," *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, p. 468, 2019.
9. L.-F. Yao, M.-H. Li, X.-M. Zhai, H.-B. Wang, and J.-F. Dong, "On the miniaturization of polarization insensitive wide angle metamaterial absorber," *Applied Physics A*, vol. 122, no. 2, p. 61, 2016.

10. F. Yue-Nong, C. Yong-Zhi, N. Yan, W. Xian, and G. Rong-Zhou, "An ultrathin wide-band planar metamaterial absorber based on a fractal frequency selective surface and resistive film," *Chinese Physics B*, vol. 22, no. 6, p. 067801, 2013.
11. N. Wang, X. Dong, W. Zhou, C. He, W. Jiang, and S. Hu, "Low-frequency metamaterial absorber with small-size unit cell based on corrugated surface," *AIP Advances*, vol. 6, no. 2, p. 025205, 2016.
12. B. X. Khuyen, B. S. Tung, Y. J. Yoo, Y. J. Kim, K. W. Kim, L.-Y. Chen, V. D. Lam, and Y. Lee, "Miniaturization for ultrathin metamaterial perfect absorber in the vhf band," *Scientific reports*, vol. 7, p. 45151, 2017.
13. Y. Zhi Cheng, Y. Wang, Y. Nie, R. Zhou Gong, X. Xiong, and X. Wang, "Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements," *Journal of applied physics*, vol. 111, no. 4, p. 044902, 2012.
14. S. Gu, J. Barrett, T. Hand, B.-I. Popa, and S. Cummer, "A broadband low-reflection metamaterial absorber," *Journal of Applied Physics*, vol.108, no. 6, p. 064913, 2010.
15. W. Zuo, Y. Yang, X. He, D. Zhan, and Q. Zhang, "A miniaturized meta-material absorber for ultrahigh-frequency rfid system," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 329–332, 2017.
16. M. Bakir, M. Karaaslan, F. Dincer, K. Delihacioglu, and C. Sabah, "Perfect metamaterial absorber-based energy harvesting and sensor applications in the industrial, scientific, and medical band," *Optical Engineering*, vol. 54, no. 9, p. 097102, 2015.
17. O. Gunduz and C. Sabah, "Polarization angle independent perfect multiband metamaterial absorber and energy harvesting application," *Journal of Computational Electronics*, vol. 15, no. 1, pp. 228–238, 2016.
18. J. W. Park, P. Van Tuong, J. Y. Rhee, K. W. Kim, W. H. Jang, E. H. Choi, L. Y. Chen, and Y. Lee, "Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators," *Optics express*, vol. 21, no. 8, pp. 9691–9702, 2013.

19. T. T. Nguyen and S. Lim, "Wide incidence angle-insensitive metamaterial absorber for both te and tm polarization using eight-circular-sector," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 3204, 2017.
20. M. Yoo, H. K. Kim, and S. Lim, "Angular-and polarization-insensitive metamaterial absorber using subwavelength unit cell in multilayer technology," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 414–417, 2016.
21. X. Yuan, C. Zhang, M. Chen, Q. Cheng, X. Cheng, Y. Huang, and D. Fang, "Wideband high-absorption electromagnetic absorber with chaos patterned surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 197–201, 2019.
22. H.-F. Zhang, X.-L. Tian, G.-B. Liu, and X.-R. Kong, "A gravity tailored broadband metamaterial absorber containing liquid dielectrics," *IEEE Access*, 2019.
23. Q. Song, W. Zhang, P. C. Wu, W. Zhu, Z. X. Shen, P. H. J. Chong, Q. X. Liang, Z. C. Yang, Y. L. Hao, H. Cai et al., "Water-resonator-based metasurface: An ultrabroadband and near-unity absorption," *Advanced Optical Materials*, vol. 5, no. 8, p. 1601103, 2017.
24. J. Ren and J. Yin, "3d-printed low-cost dielectric-resonator-based ultra-broadband microwave absorber using carbon-loaded acrylonitrile butadiene styrene polymer," *Materials*, vol. 11, no. 7, p. 1249, 2018.
25. W. Jiang, L. Yan, H. Ma, Y. Fan, J. Wang, M. Feng, and S. Qu, "Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3d printed honeycomb," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, p. 4817, 2018.
26. M. Amiri, F. Tofigh, N. Shariati, J. Lipman, and M. Abolhasan, "Miniature tri-wide band sierpinski-minkowski fractals metamaterial perfect absorber," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019.
27. B.-X. Wang, X. Zhai, G. Wang, W. Huang, and L. Wang, "Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2015.
28. Y. Z. Cheng, W. Withayachumnankul, A. Upadhyay, D. Headland, Y. Nie, R. Z. Gong, M. Bhaskaran, S. Sriram, and D. Abbott, "Ultra-broadband plasmonic

- absorber for terahertz waves,” *Advanced Optical Materials*, vol. 3, no. 3, pp. 376–380, 2015.
29. M. Diem, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, “Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime,” *Physical Review B*, vol. 79, no. 3, p. 033101, 2009.
 30. M. Hajizadegan, V. Ahmadi, and M. Sakhdari, “Design and analysis of ultrafast and tunable all optical metamaterial switch enhanced by metal nanocomposite,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 1877–1883, 2013.
 31. P. Van Tuong, J. Park, V. Lam, W. Jang, E. Choi, S. Nikitov, and Y. Lee, “Negative refractive index at the third-order resonance of flower-shaped metamaterial,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 22, pp. 3451–3455, 2012.
 32. K. P. Kaur, T. Upadhyaya, M. Palandoken, and C. Gocen, “Ultra-thin dual-layer triple-band flexible microwave metamaterial absorber for energy harvesting applications,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 1, p. e21646, 2019.
 33. Microwave Filters Based on the Structures with Resonators in Parallel Channels as Metamaterial Cells / [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/334243201_Microwave_Filters_Based_on_the_Structures_with_Resonators_in_Parallel_Channels_as_Metamaterial_Cells (дата звернення: 14.12.2021).