

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«12» 06 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Дводіапазонний поглинач на основі метаматеріалу»

Виконала:

студентка IV курсу, групи PI-11

Шкіндер Анастасія Іванівна



Керівник:

к.т.н., доцент

Василенко Дмитро Олексійович



Рецензент:

старший викладач

Турєєва Ольга Василівна



Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.



Студентка _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВИНЦЕВ

« 20 » 04 _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Шкіндер Анастасії Іванівні

1. Тема проєкту «Дводіапазонний поглинач на основі метаматеріалу»,
керівник проєкту Василенко Дмитро Олексійович, к.т.н., доцент
затверджені наказом по університету від «29» травня 2025р. №1840-с

2. Термін подання студентом проєкту 12 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту Поглинач на основі метаматеріалу, що забезпечує коефіцієнт відбиття -10 дБ в смузі 3,1 – 3,3 ГГц в S-діапазоні і 9,2 – 10,4 ГГц в X- діапазоні при кутах падіння електромагнітної хвилі до 40°.

4. Зміст пояснювальної записки

- Виконати огляд існуючих поглиначів на основі метаматеріалів і обрати конструкцію комірку для побудови дводіапазонного поглинача;
- створити електродинамічну модель окремої комірки поглинача і провести її оптимізацію для виконання умов ТЗ використовуючи повітряні прошарки між елементами конструкції;
- провести аналіз чутливості характеристик поглинача до зміни геометричних розмірів.

- дослідити різні конструкції сот, що забезпечують підтримку елементів конструкції поглинача;
- розробити друковані з резонуючими структурами поглинача
- розробити кріплення друкованих плат

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Виконати складальне креслення структури, креслення плат, конструкції сот, топологію плат з резонуючими структурами.

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20 квітня 2025 р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Огляд існуючих структур поглиначів на основі метаматеріалів	14.04-2.05	
	Електродинамічна модель і оптимізація комірки поглинача з повітряними прошарками	2.05-16.05	
	Електродинамічна модель і симуляція комірки поглинача з прошарками honeycombs	16.05 – 23.05	
	Розробка кріплення прошарків поглинача в друкованої плати	23.05 – 06.06	
	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	23.05 – 11.06	

Студент



Анастасія ШКІНДЕР

Керівник



Дмитро ВАСИЛЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт на тему «Дводіапазонний поглинач на основі метаматеріалу» виконано на 104 сторінках, що включають 77 ілюстрацій, 12 таблиць, 3 додатки та 29 посилань.

У дипломному проєкті розроблено дводіапазонний електромагнітний поглинач на основі метаматеріалу, призначений для ефективного поглинання енергії електромагнітних хвиль у двох частотних діапазонах: 3,1–3,3 ГГц та 9,2–10,4 ГГц. Основною метою проєкту є забезпечення коефіцієнта відбиття менше -10 дБ у зазначених смугах частот при кутах падіння хвиль до 40° включно.

У процесі роботи було проведено аналіз сучасних рішень у сфері метаматеріалів та поглинаючих структур, розроблено геометричну конфігурацію елемента метаповерхні, підібрано матеріали з необхідними електромагнітними характеристиками. Моделювання структури здійснювалося з використанням програмного забезпечення для електромагнітного аналізу CST Microwave Studio.

Отримані результати показали, що структура з прошарками у вигляді повітря повністю виконує технічні вимоги, забезпечуючи коефіцієнт відбиття менше -10 дБ у заданих діапазонах частот при кутах падіння до 40° . Натомість при використанні прошарків у вигляді шестикутних сот не всі поставлені технічні вимоги вдалося повністю задовольнити — зокрема, спостерігалось перевищення порогового рівня коефіцієнта відбиття в окремих частотних піддіапазонах при більших кутах падіння. Потребують доопрацювання як матеріал, так і геометричні параметри структури *honeycombs*. Проте конструкція загалом демонструє перспективні характеристики та може бути використана як основа для подальших досліджень і вдосконалення.

Потенційне застосування розробленого поглинача розглядається в супутникових системах радарної зйомки (SAR), де важливе значення має кероване зниження рівня електромагнітних відбиттів у заданих діапазонах.

Ключові слова: одинична комірка, метаматеріал, електромагнітна (ЕМ) хвиля, TE поляризація, ТМ поляризація, air spacer, honeycombs.

ABSTRACT

The final project titled «Dual – Band Metamaterial Absorber» consist of 104 pages, Including 77 illustrations, 12 tables, 3 appendices and 29 references.

This thesis presents the development of a dual-band electromagnetic absorber based on a metamaterial, designed for effective absorption of electromagnetic wave energy in two frequency ranges: 3.1–3.3 GHz and 9.2–10.4 GHz. The main objective of the project is to achieve a reflection coefficient of less than -10 dB within the specified frequency bands for incidence angles up to 40° inclusive.

The work includes an analysis of modern solutions in the field of metamaterials and absorbing structures, the design of the geometric configuration of a metamaterial unit cell, and the selection of materials with the required electromagnetic properties. The structure was modeled using electromagnetic simulation software such as CST Microwave Studio.

The obtained results showed that the structure with air gap layers fully meets the technical requirements, ensuring a reflection coefficient of less than -10 dB within the specified frequency bands at incidence angles up to 40° . In contrast, when using layers in the form of hexagonal honeycombs, not all technical requirements were fully satisfied — in particular, the reflection coefficient threshold was exceeded in certain sub-bands at higher incidence angles. Both the material and the geometric parameters of the honeycomb structure require further refinement. Nevertheless, the design demonstrates promising characteristics overall and can serve as a basis for further research and improvement. Potential applications of the developed absorber are considered in satellite synthetic aperture radar (SAR) systems, where controlled reduction of electromagnetic reflections in specified frequency bands is of critical importance.

Keywords: unit cell, metamaterial, electromagnetic (EM) wave, TE polarization, TM polarization, air spacer, honeycombs.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проєкту

на тему:

Дводіапазонний поглинач на основі метаматеріалу

Київ — 2025 року*

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
Вступ.....	12
1 Огляд аналогів	13
1.1 Метаматеріали.....	13
1.2. Одношарові структури	15
1.3. Багатошарові структури.	18
1.4 Поглиначі з використанням air spacer в якості додаткового прошарку. 19	
1.5 Використання резистивних плівок у структурах.....	20
1.6 Структури з використанням зосереджених елементів.....	24
1.7 Структури з використанням активних елементів.....	26
1.8 Структури виготовлені за допомогою 3D друку	29
1.9 Висновки за результатами огляду	32
2 Створення дводіпазонного поглинача з використанням air spacer	35
2.1 Методи аналізу	35
2.2 Структура комірки з використанням шарів air spacer.....	37
2.3 Визначення задачі для оптимізації.....	39
2.4 Оптимізація комірки з air spacer при куті падіння ЕМ хвилі 0°.....	40
2.5 Одночасна оптимізація комірки з air spacer при кутах падіння ЕМ хвилі 0° і 50°.	48
2.6 Вплив параметрів, в яких можливі відхилення при виробництві, на характеристики структури з air spacer.	56
3 Створення структури одиничної комірки поглинача на основі заповнення з полікарбонатних honeycombs.....	64
3.1 Проєктування і симуляція комірки з шестикутними honeycombs.	64
4 Варіанти кріплення шарів комірки.....	77
4.1 Кріплення за допомогою металевого стержня.....	77
4.2 Кріплення за допомогою стержня, виконаного за допомогою 3Д друку	79

					PI11.123456.001 ПЗ				
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дводіпазонний поглинач на основі метаматеріалу	Літ.	Лист	Листів	
Розробив	Шкіндер А.						7		
Перевірів	Василенко								
	Д.О.								
Н. Контр.	Попсуй В. І.								
Затверди						PI-11 РТФ			

Висновки 81

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ..... 83

ДОДАТОК А..... 88

ДОДАТОК Б 92

ДОДАТОК В..... 104

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕМ – електромагнітна

ITO – indium–tin–oxide

LH – Left-Handed

PET – Polyethylene Terephthalate

PLA – Polylactic Acid

PMMA – Polymethyl Methacrylate

SAR – Synthetic Aperture Radar

SNR – Signal-to-Noise Ratio

TE – Transverse Electric

TM – Transverse Magnetic

					<i>PI1.423456.001 ПЗ</i>	Лист
						11
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Вступ

Системи радіолокації з синтезованою апертурою (SAR) є важливим інструментом дистанційного зондування Землі, що широко застосовуються у супутниковій розвідці, моніторингу інфраструктури, військовому спостереженні та цивільних дослідженнях. Завдяки здатності формувати детальні зображення поверхні незалежно від погодних умов чи освітлення, SAR-системи дозволяють точно виявляти та ідентифікувати різні об'єкти, включаючи техніку, споруди та переміщення військових засобів.

У зв'язку з цим виникає актуальна задача зниження радіолокаційної помітності об'єктів в діапазонах частот, які використовуються супутниковими SAR. Одним із найбільш перспективних рішень є застосування поглиначів на основі метаматеріалів — штучно створених структур, здатних демонструвати керовану взаємодію з електромагнітним випромінюванням. Такі метаструктури дозволяють досягати майже повного поглинання електромагнітних хвиль у вузьких або широких діапазонах частот, зберігаючи при цьому мінімальні габарити й вагу.

Ця робота присвячена розробці метапоглинача, орієнтованого на ефективне екранування об'єктів від супутникових SAR-спостережень. Основна мета полягає в моделюванні та оптимізації електромагнітної структури, здатної мінімізувати радіолокаційне відбиття в S- і X-діапазонах, що типово використовується в супутникових SAR-системах.

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

P/1.423456.001 ПЗ

Лист
12

1 Огляд аналогів

1.1 Метаматеріали

Метаматеріали — це штучні електромагнітні структури з унікальними властивостями, які не зустрічаються в природі. Вони характеризуються ефективною однорідністю, коли середній розмір елементарної комірки значно менший за довжину хвилі. Це забезпечує переважання заломлення над розсіюванням і дифракцією при поширенні хвилі. За цих умов структура поводить себе як макроскопічно однорідне середовище з певними фізичними параметрами: відносною діелектричною проникністю (ϵ) і магнітною проникністю (μ), які визначають показник заломлення:

$$\eta = \pm \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$$

де ϵ_r і μ_r — діелектрична та магнітна проникності вакууму. Особливістю деяких метаматеріалів є негативний показник заломлення, що притаманно лівостороннім (LH) матеріалам, у яких ϵ та μ одночасно від'ємні. Це веде до унікальної фізики поширення хвиль, де фазова та групова швидкості спрямовані у протилежних напрямках.

Лівосторонні (LH) матеріали є класичним прикладом метаматеріалів, оскільки вони штучно створені, ефективно однорідні і демонструють незвичайні електромагнітні характеристики. Попри те, що термін «метаматеріали» іноді ототожнюється лише з LH-структурами, насправді він охоплює значно ширший клас матеріалів (Рисунок 1.1). Проте саме LH-структури здобули найбільшу популярність завдяки унікальній здатності створювати негативний показник заломлення.

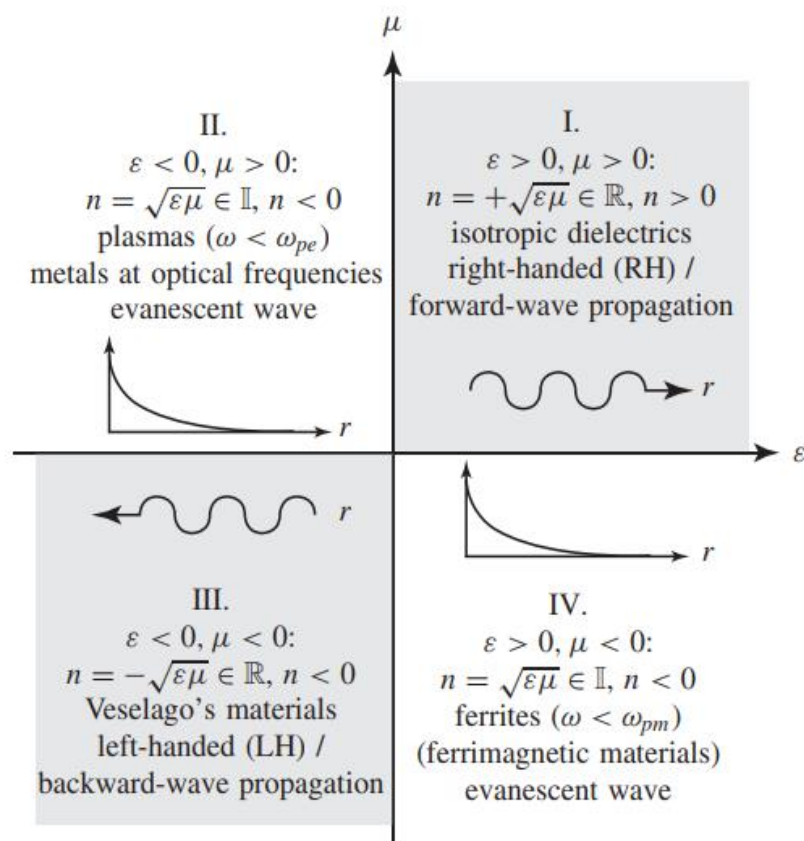


Рисунок 1.1.1 – Поширення хвиль в матеріалах в залежності від набору комбінацій ε і μ [1]

Метаматеріали володіють унікальними електромагнітними властивостями, які визначаються їхньою субхвильовою структурою. Їхні характеристики описуються через основні випромінювальні параметри: відбиття (R), провідність (T) та поглинання (A). При взаємодії з ЕМ випромінюванням енергія може бути відбита, передана або поглинута, що підпорядковується закону збереження енергії:

$$R + T + A = 1$$

Крім того, всі матеріали випромінюють енергію, а чорне тіло визначає максимальну межу випромінювання. Емісія (E) характеризує, наскільки матеріал ефективно випромінює енергію, і змінюється від 0 до 1. Властивості метаматеріалів, зокрема їхні коефіцієнти: R, T, A, можуть залежати від частоти, температури, кута падіння та поляризації хвиль. Завдяки цим особливостям вони дозволяють точно контролювати процеси випромінювання

та поглинання енергії, відкриваючи можливості для застосування в різних технологічних сферах.

Окрім можливості змінювати показник заломлення, метаматеріали дозволяють створювати ефективні поглиначі ЕМ хвиль. Такі поглиначі можуть мінімізувати відбиття завдяки узгодженню імпедансу, а також ефективно поглинати енергію хвиль у резонансному частотному діапазоні. Вони мають переваги перед традиційними матеріалами завдяки малій товщині, легкості, високій ефективності поглинання та простоті виготовлення. Конструкція таких поглиначів зазвичай передбачає чергування шарів провідних і діелектричних матеріалів у періодичному порядку, що забезпечує ефективне поглинання енергії у вигляді тепла.

Їх використання допомагає уникнути небажаного відбиття і провідності, проте дозволяє досягти меж поглинання у більше ніж 90% або ж виражаючи коефіцієнтом відбиття, у менш ніж -10 дБ, адже саме ця умова є основою для ефективності виходячи із (1), в необхідних діапазонах частот, саме тому вони мають більше переваг над звичайними поглиначами [2].

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2 \quad (1)$$

Проте, так як нижній шар вкритий металізацією, то $|S_{12}|^2 = 0$, і формула набуває вигляду (2):

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (2)$$

1.2 Одношарові структури

Впродовж років було досліджено достатньо велику кількість поглиначів на основі метаматеріалів виконаних за допомогою різних методик. Один з базових варіантів конструкцій поглиначів на основі метаматеріалів – це резонуюча структура (резонатор) що розташована на підкладинці з діелектрику, що в свою чергу розміщується на металевій поверхні (землі). Приклади таких конструкцій наведені у [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Однозначною перевагою такого поглинача є простота і відносна бюджетність його виготовлення.

Поглинач згаданий у [3] має товщину обох металізованих поверхонь, тобто і резонатора, і землі у 0,035 мм, вони виконані з міді з провідністю $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ См/м}$. Між резонуючим і земляним шаром розташовується підкладка. В даному випадку виконана з матеріалу FR – 4 ($\epsilon = 4,2$ і $\tan \delta = 0.02$) товщиною 2 мм (Рисунок 1.2.1, а).. Діапазон частот, який задовільняє виконання умови для ефективного поглинання складає 7,85 – 12,25 ГГц (Рисунок 1.2.1, б). Товщина даного поглинача складає 2,07 мм або виражаючи в довжинах хвиль приблизно еквівалентна $5\lambda/6$ відносно верхньої частоти робочого діапазону. При зміні кута падіння ЕМ хвилі більшому ніж 15° поглинач втрачає свою широкосмуговість (Рисунок 1.2.2, а), а при зміні кута поляризації спостерігається значне погіршення поглинання (Рисунок 1.2.2, б), відповідно, можна стверджувати що даний поглинач чутливий до зміни поляризації і зможе працювати лише при визначеній ТМ або ТЕ поляризаціях.

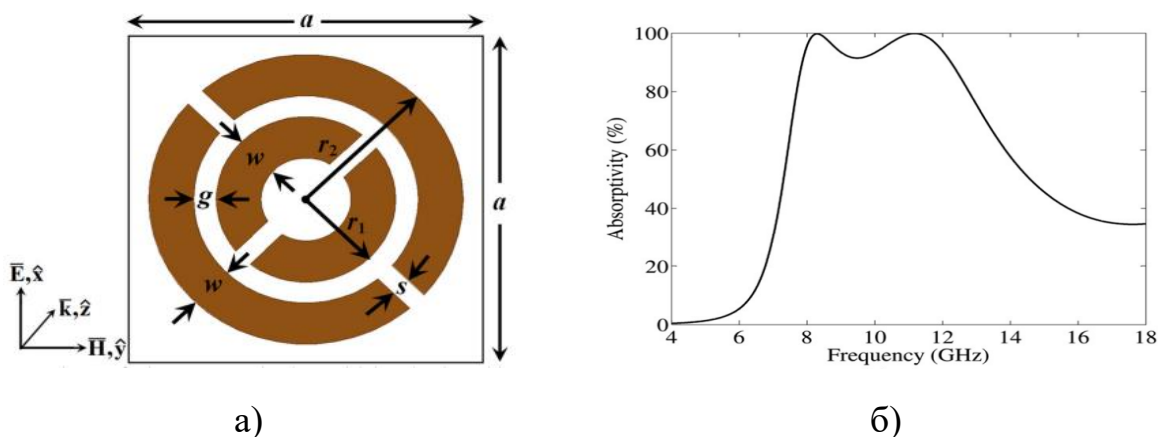
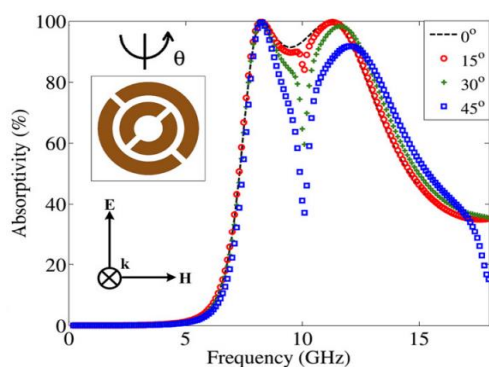
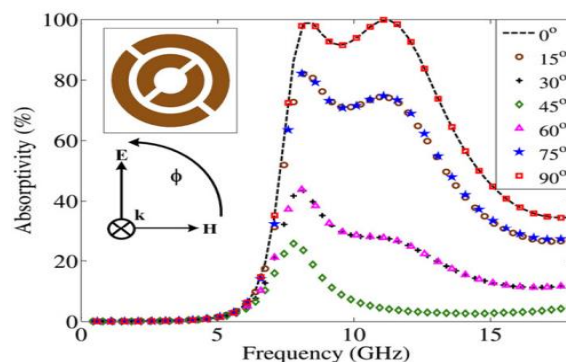


Рисунок 1.2.1 – а) Структура одиничної комірки, б) Рівень поглинання при нормальному падінні ЕМ хвилі [3]



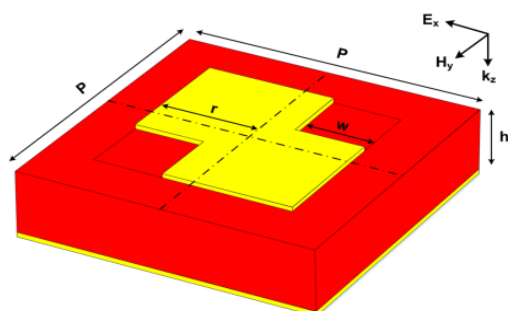
а)



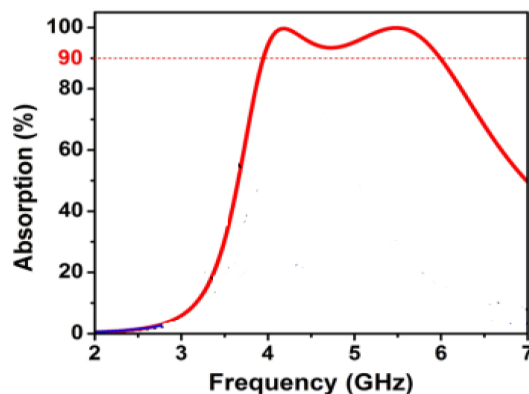
б)

Рисунок 1.2.2 – а) Залежність відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації для, б) Залежність відсотка поглинання від зміни поляризаційного кута [3]

Структура [5] така ж як і у попереднього поглинача, відмінність лише у вигляді резонатора і матеріалах. Мідь має провідність $\sigma = 5,96 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ і товщину 0,035 мм, матеріал FR – 4 ($\epsilon = 4,3$ і $\tan \delta = 0,025$) має товщину 3,8 мм (Рисунок 1.2.3, а). Загальна товщина даного типу комірки складає 3,87 мм або ж $10\lambda/13$. Діапазон в якому працює даний поглинач 4 – 6 ГГц (Рисунок 1.2.3, б). Також можна відмітити що, як і у попереднього поглинача, ефективність поглинання даного теж значною мірою погіршується на кутах падіння більше 20° (Рисунок 1.2.4, а, б). Залежність даного виду комірки від кута поляризації дуже подібна до залежності попередньої (Рисунок 1.2.2,б). Відповідно один зі значних недоліків поглиначів наведених вище – значна чутливість до зміни поляризаційного кута і кута падіння ЕМ хвилі. Проте, як згадувалось вище, ці поглиначі є простими і досить дешевими у виконанні.

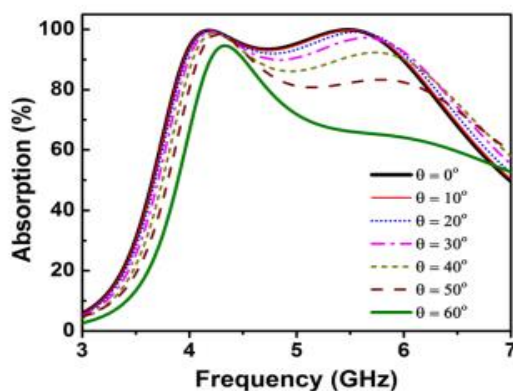


а)

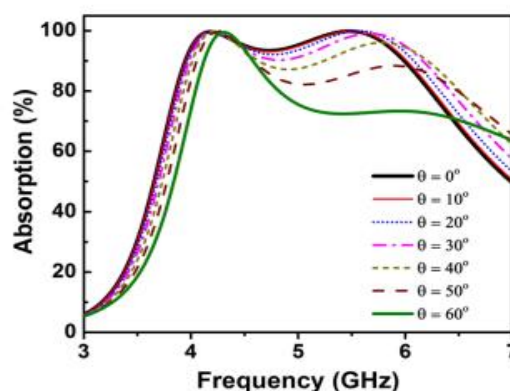


б)

Рисунок 1.2.3 – а) Структура одиної комірки, б) Рівень поглинання при звичному падінні ЕМ хвилі [5]



а)



б)

Рисунок 1.2.4 – Залежність від кута падіння ЕМ хвилі для а) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації, б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації [5]

1.3 Багат шарові структури.

Також для розширення діапазону ефективної роботи поглиначів на основі метаматеріалів згадану вище структуру роблять багат шаровою, тобто між нижнім земляним шаром і верхнім резонатором розташовуються ще кілька прошарків підкладинок з нанесеними певної форми резонаторами, що,

відповідно, дозволяє розширити смугу, або зробити поглинач багатодіапазонним, адже кожна резонуюча структура резонує на своїй частоті. Такі структури наведені у [10], [11], [12].

У [10] запропоновано багат шарову структуру з резонаторами у вигляді квадратів з порожниною всередині (Рисунок 1.3.1). Підкладинки поглинача виконані з матеріалу FR – 4, а резонатори і земляна поверхня з шару міді ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ См/м}$) Кожен резонатор має свою частоту резонансу, що дозволяє розширити смугу ефективної роботи такого поглинача, порівнюючи з одношаровою. Проте, отримуючи ширшу смугу таким чином відбувається програв в товщині поглинача і тому фінальна його товщина складає близько 0,9 мм ($\lambda/7$). Смуга поглинання одношарового поглинача покриває 4,90 – 4,96 ГГц, в той час як тришарова 4,79 – 5,04 ГГц. Також згаданий поглинач має досить гарні показники поглинання як при ТМ поляризації, так і при ТЕ поляризації для кутів до 25° .

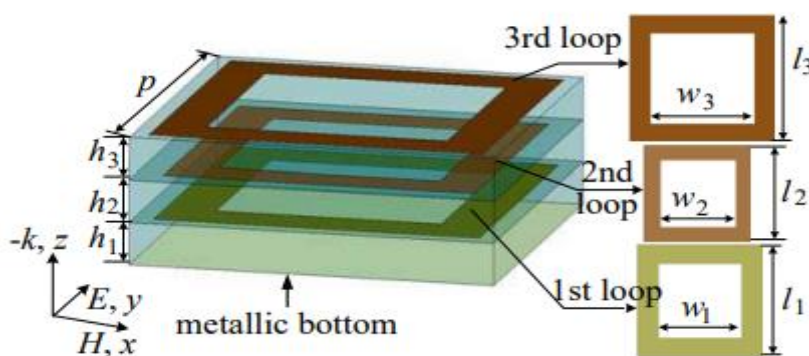


Рисунок 1.3.1 – Структура одиничної комірки [10]

1.4 Поглиначі з використанням air spacer в якості додаткового прошарку.

В структурі поглинача зазвичай додають додаткові прошарки щоб забезпечити ширшу смугу і водночас мінітюаризацію одиничної комірки метаматеріалу. Одним з прикладів такого прошарку може бути повітря. Цей

Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата

P/1.423456.001 ПЗ

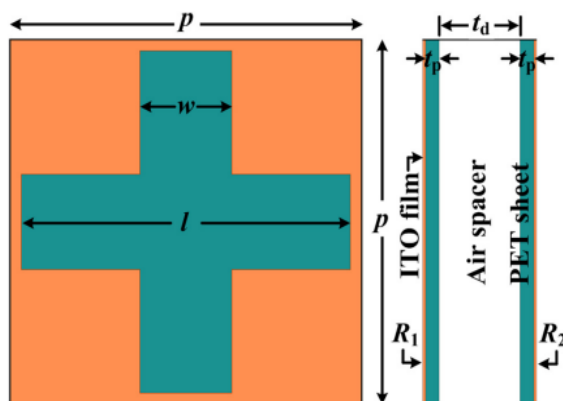
Лист
19

прошарок між підкладинкою і металевою поверхнею зазвичай вноситься в структуру задля збільшення ефективної ємності матеріалу, що відповідно, призводить до зменшення розмірів одиничної комірки. Ця частина структури працює як «порожнина» в яку потрапляють сигнали. Такі структури згадані в [13], [11], [14], [11], [15]. У [16] замість повітря даний прошарок утворений пінополістиролом Rohacel, що відіграє ту ж роль що і у вищенаведених структур із повітрям.

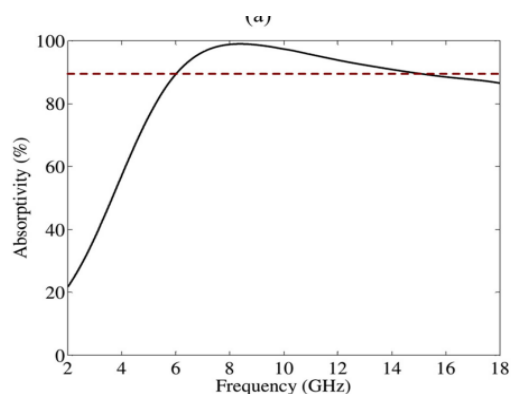
1.5 Використання резистивних плівок у структурах

Для створення структури поглиначів на основі метаматеріалів широко використовуються резистивні плівки (листи), які також дозволяють забезпечити широку смугу поглинання. Зазвичай ця плівка виконується на основі ІТО (indium – tin – oxide), який є доступним, досить дешевим і гнучким. Такий варіант конструювання метаматеріалу є вигіднішим і менш вимогливим заміном використання звичайних резистивних чорнил, саме тому має перевагу у використанні. Такі плівки можуть бути застосовані, до прикладу, в структурі типу «сендвіч», про яку згадується в [14], [17], [18] або ж в одно – /багатошаровій структурі [19], [16].

Нижній і верхній шар [14] вкривають самі резистивні плівки, які в обох випадках мають різний імпеданс (Рисунок 1.5.1, а). Дані плівки нанесені на шари поліетилентерефталату (PET) ($\epsilon = 3,2$ і $\tan \delta = 0,003$) товщиною 0,175 мм кожен, що розділені повітряним прошарком товщиною 5 мм. Загальна товщина комірки складає 5,35 мм або ж $5\lambda/2$. Поглинач такої конструкції показує результат у понад 90% поглинання електромагнітних хвиль на частотах 6,06 – 14,66 ГГц (Рисунок 1.5.1, б). Щодо залежностей відносно кута падіння то спостерігаємо значне погіршення для ТЕ поляризації при куті падіння більше 30° , а для ТМ поляризації при збільшенні кута падіння відбувається зсув робочих частот в область їх збільшення (Рисунок 1.5.2, а, б).

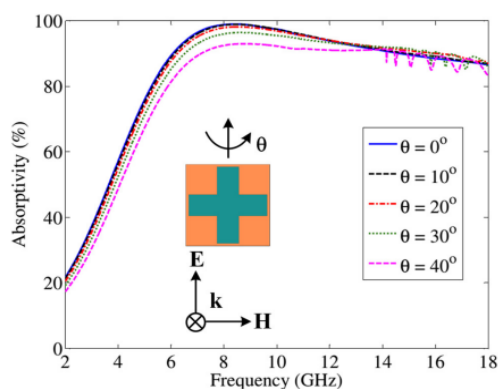


а)

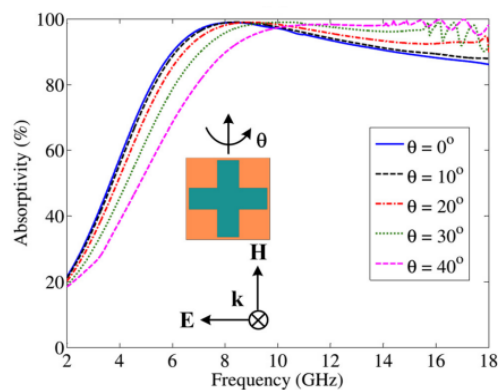


б)

Рисунок 1.5.1 – а) Структура одиничної комірки [14], б) Рівень поглинання при звичному падінні ЕМ хвилі.



а)



б)

Рисунок 1.5.2 – Залежність від кута падіння ЕМ хвилі для [14], а) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації, б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації.

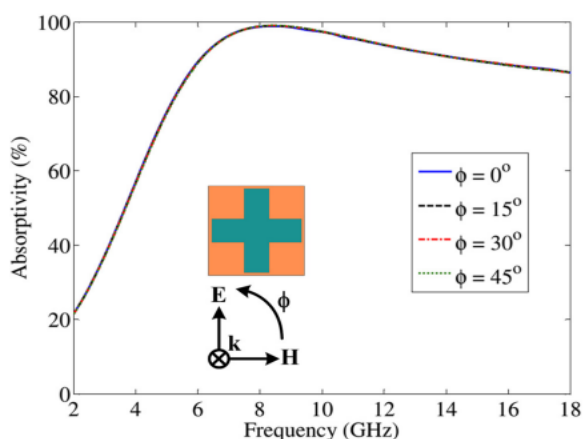
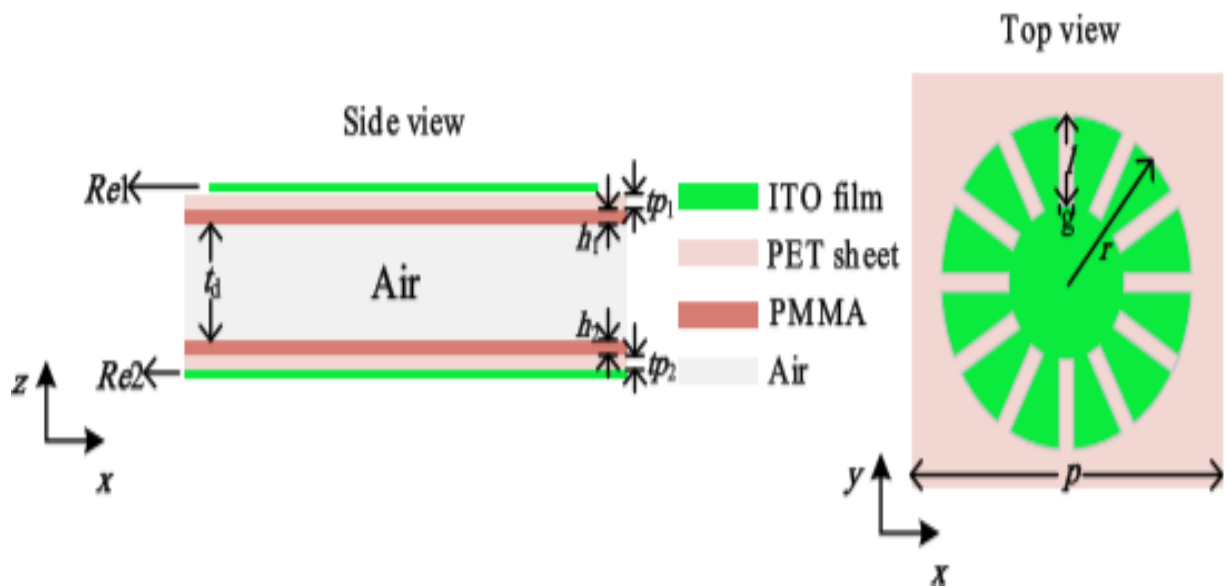
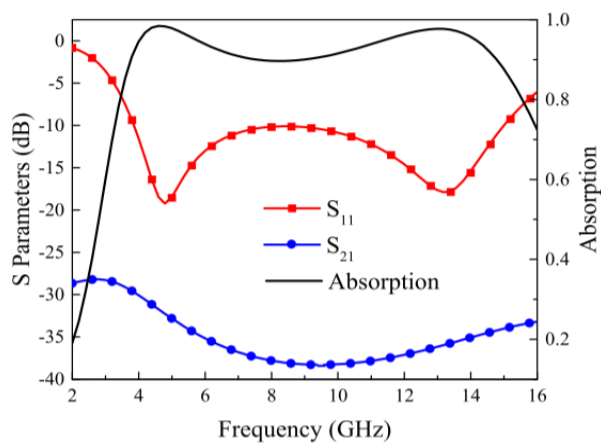


Рисунок 1.5.3 – Залежність [14], що базується на резистивних плівках від поляризаційного кута.

Подібна структура є складовою і [17] (Рисунок 1.9, а). Завдяки матеріалам які використані в даній конструкції він є цілком прозорим і досить гнучким. Верхній і нижній шари, як і в вищенаведеному поглиначі вкривають ІТО плівки що нанесені на PET поверхню товщиною 0,175 мм – верхня і 0,125 мм – нижня. Проте в даному випадку шар повітря товщиною 4,5 мм з обох сторін додатково обмежений підкладинкою з поліметилметалкрилату (PMMA), товщинами по 0,8 мм. Товщина такої конструкції складає 4,5 мм ($5\lambda/2$), а діапазон в якому даний поглинач ефективно виконуватиме свої функції – 8 – 18 ГГц. Поведінка даного поглинача при зміні кута поляризації і кута падіння ЕМ хвилі також нагадує залежності попередньо наведеної комірки (Рисунок 1.5.4, а, б, 1.5.3).



а)



б)

Рисунок 1.5.4 – а) Структура одиничної комірки поглинача [17], б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації.

Ці 2 структури, що виконані за допомогою ІТО плівок показують досить гарну стабільність при зміні кута поляризації і при зміні кута падіння ЕМ хвилі.

Поглинач наведений в [16] відрізняється за структурою від двох попередніх. В даному випадку конструкція є стандартною, що включає земляну поверхню і підкладинку з резонуючою поверхнею, які розділені за допомогою пінистого діелектрику Rohasel (Рисунок 1.5.5). Резонуючою поверхнею вданому випадку

Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

Лист
23

виступають резистивні круглі патчі, що наносяться на підкладинку з FR4. . Нижній шар виконано з лудженої мідної фольги. Товщина даної конструкції складає 6,2 мм ($10\lambda/3$). Робочий діапазон 6 – 14 ГГц



Рисунок 1.5.5 – Структура одиничної комірки [16]

Діапазони частот [16] і [14] майже збігаються, проте структура згадана в [14] є тоншою, що є значною перевагою.

1.6 Структури з використанням зосереджених елементів

Ще одним варіантом для оптимізації розмірів і робочого діапазону поглинача може бути використання зосереджених елементів у структурі резонатора, що наведені в [13], [20], [21], [15], [22], [23], [24], [12]. Вони сприяють зменшенню фізичних розмірів одиничної комірки метаматеріалу, якщо йдеться про роботу в смузі низьких частот. Тому додаючи до структури ємність або ж індуктивність ми можемо керувати резонансними частотами. В свою чергу зосереджені резистори використовуються задля збільшення смуги в якій працюватиме поглинач. Зазвичай вони розміщуються базуючись на поверхневих струмах і внесених в лінію електричних зарядях.

Одинична комірка наведена в [21] має 3 резонуючі контури у формі кілець, між частинами яких вмонтовано зосереджені резистори (Рисунок 1.6.1, а, б). Сама структура складається з підкладинки виконаної з FR – 4 ($\epsilon = 4,3$ і $\tan \delta = 0,025$) на якій і розташовано резонатори, з землі і прошарку повітря, що їх розділяє. Провідникові частини комірки виконано з міді ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м). Товщина такої конструкції складає 18 мм ($5\lambda/2$) і працює вона в діапазоні 1,61 – 4,45 ГГц. Без резисторів така структура дозволяє отримати лише два вузьких

діапазони в яких досягнуто рівень поглинання максимум у 80%, що не є задовільною ефективністю, на відміну від структури з резисторами (Рисунок 1.6.2).

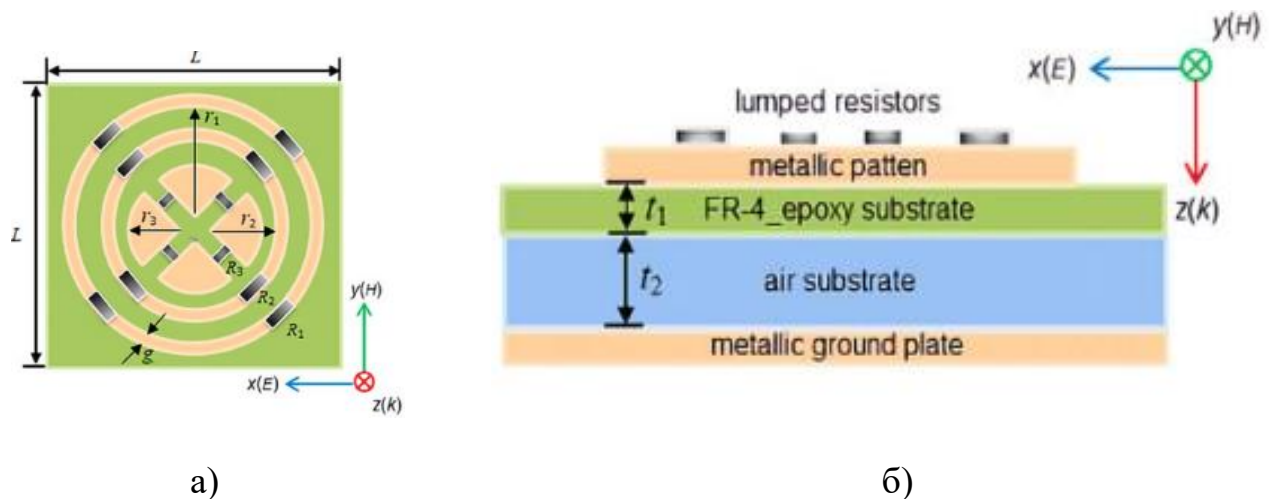


Рисунок 1.6.1 – Структура одиничної комірки [21], а) Вигляд зверху, б) Вигляд збоку.

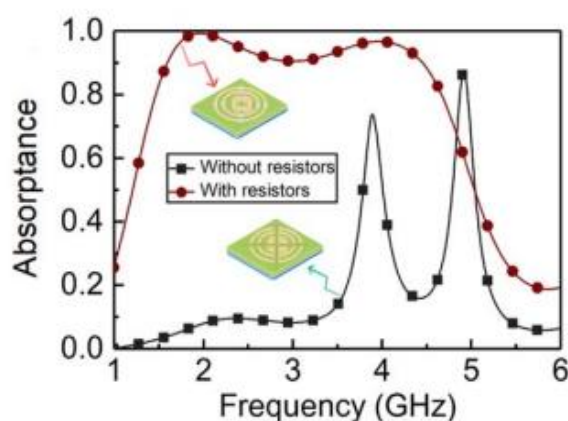


Рисунок 1.6.2 –Порівняння ефективності роботи поглинача при звичному падінні ЕМ хвилі для структури з/без резисторів.

В [13] окрім резисторів до структури резонатора внесено і конденсатор (Рисунок 1.6.3). Сама конструкція поглинача є майже ідентичною до попередньої, окрім форми резонатора. Діапазон ефективної роботи такого поглинача складає 0,68 – 2,13 ГГц, а товщина 6 мм ($\lambda/2$). Зі зміною ємності конденсатора, відбувається переміщення резонансу по смузі частот, чим

менша ємність, тим вище по частотах переміщення, а підбираючи опір резистора корегується потужність резонансу. Порівнюючи з [21] поглинач з такою резонуючою поверхнею є набагато тоншим, проте значно програє у широкосмуговості, яка є перевагою попереднього.

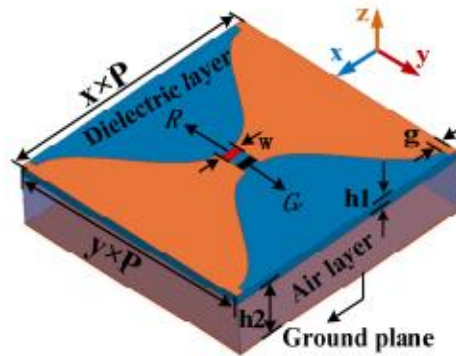


Рисунок 1.6.3 – Структура одиничної комірки [13]

1.7 Структури з використанням активних елементів

Окрім пасивних елементів у поглиначах можуть бути використані і активні елементи, до прикладу такі як діоди. Про таку структуру йдеться в [11].

Конструкція поглинача, згаданого у [11] (Рисунок 1.7.1, в) включає в себе верхній шар з квадратним резонатором, в якому симетрично розміщено зосереджені резистори (Рисунок 1.7.1, а). Вони змонтовані таким чином, щоб при падінні ЕМ хвилі максимум поверхневого струму протікав через них. Середній шар має резонатор у формі хреста, де і розміщено р-і-п діоди (Рисунок 1.7.1, б). Резонатори нанесені на діелектричну підкладку виконану з FR – 4. Конструкція заземлена металевою поверхнею і між кожним її шаром розміщується прошарок повітря. Основною ідеєю даного типу поглинача є ефективне поглинання хвиль у двох різних частотних діапазонах, в залежності від стану р-і-п діодів, у вимкненому стані поглинач ефективно працює в діапазоні 1,91 – 4,89 ГГц, у ввімкненому стані діодів перекривається діапазон 3,18 – 12,78 ГГц. Також, змінюючи розмір прошарків повітря, робочі смуги

можна коректувати. Товщина такої конструкції складає 13,3 мм (5λ). Даний поглинач не змінює свої показники поглинання при зміні поляризації при нормальному падінні ЕМ хвилі, що є значною перевагою (Рисунок 1.7.2, а) і також не втрачає ефективності поглинання при зміні кута опромінення до 45° як при ТЕ поляризації, так і при ТМ поляризації (Рисунок 1.7.2, б, в). Використання р-і-п діодів у структурі є не надто актуальним, адже вони потребують постійної подачі енергії з зовнішніх джерел, що є незручно для використання в більшості умов, проте загалом тут використана структура багатошаровості, що вже наводилась раніше, яка дозволяє покрити два різних діапазони при вимкненому і ввімкненому стані діодів. При виключенні шару з активними елементами зі структури смуга поглинання розширюється, відповідно маємо лише одну досить широку смугу поглинання, а при включенні другого шару в структуру перший діапазон звужується і, відповідно, маємо змогу створити другий резонуючий контур в необхідних нам далі частотах (Рисунок 1.7.3). Отже, дана двоповерховість поглинача дає змогу розділити одну широку смугу на дві менших, в яких є необхідність.

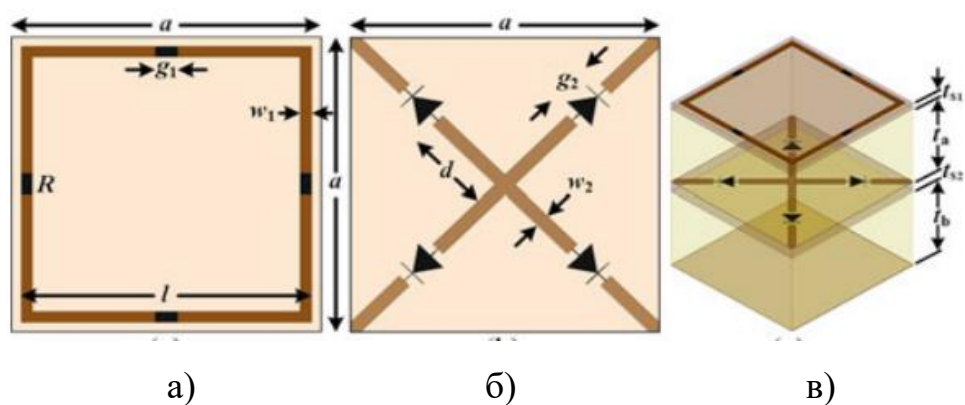
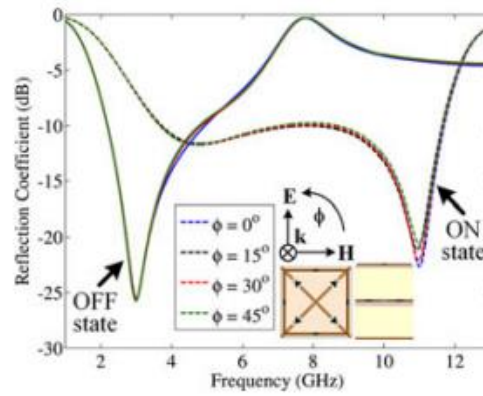
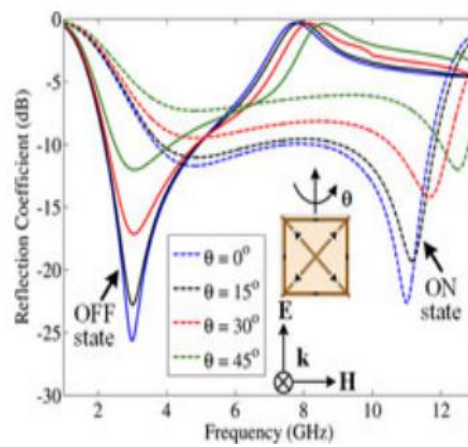


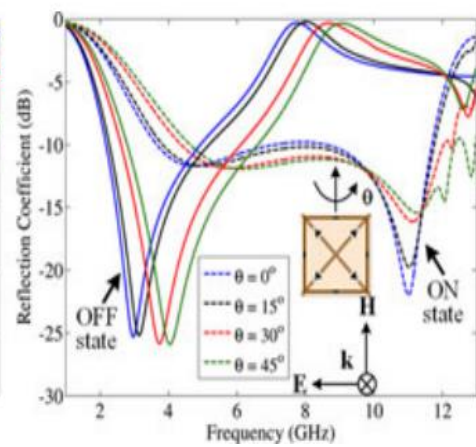
Рисунок 1.7.1 – Структура [11], а) Верхній шар, б) Середній шар, в) Загальна структура.



а)



б)



в)

Рисунок 1.7.2 – Залежність від кута падіння і поляризаційного кута ЕМ хвилі для [11] а) Залежність від поляризаційного кута, б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації, в) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації.

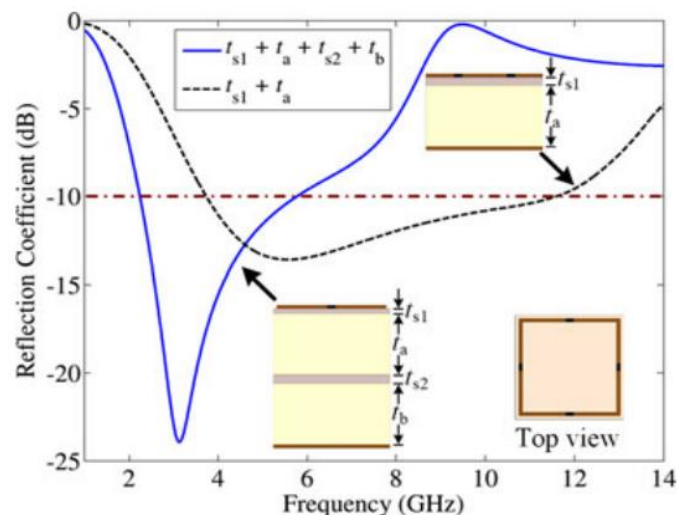


Рисунок 1.7.3 – Характеристика поглинання [11], якщо зі структури виключити резонатор з активними елементами.

1.8 Структури виготовлені за допомогою 3D друку

Для здешевлення і простоти створення структури вона може бути виконана за допомогою 3D друку. Прототипи таких поглиначів наведені в [25], [26], [27].

Поглинач згаданий у [26] ефективно працює в смузі частот 5,52 – 16,96 ГГц, виконаний на основі шестигранних сот, які розміщені на металевій поверхні і, відповідно, в даному випадку виконують роль діелектричної підкладки, на яку нанесено резонуючу структуру за допомогою резонуючих чорнил (Рисунок 1.8.1). Структура шестикутних сот не дивлячись на те що потребує відносно небагато затратного матеріалу є стійкою і надійною. Соти виконані за допомогою 3D друку з PLA ($\epsilon = 2,1$ і $\tan \delta = 0,07$), а в ролі резистивних чорнил виступає Y-shield ($\sigma = 2800$ См/м). Товщина даної структури складає 5,5 мм (3λ). При нормальному падінні ЕМ хвилі поглинач є майже поляризаційно незалежним, а при збільшенні кута падіння при ТЕ поляризації резонанс слабшає зі збільшенням кута падіння, відповідно смуга звужується, при ТМ поляризації до 45° смуга майже залишається стабільною, а при вищих кутах падіння ЕМ хвиль в області вище 12 ГГц відбувається

значне спотворення смуги поглинання (Рисунок 1.8.2, а, б). Основним недоліком такої структури є використання резистивних чорнил, адже це потребує високої точності виконання і є досить дорогим методом виготовлення.

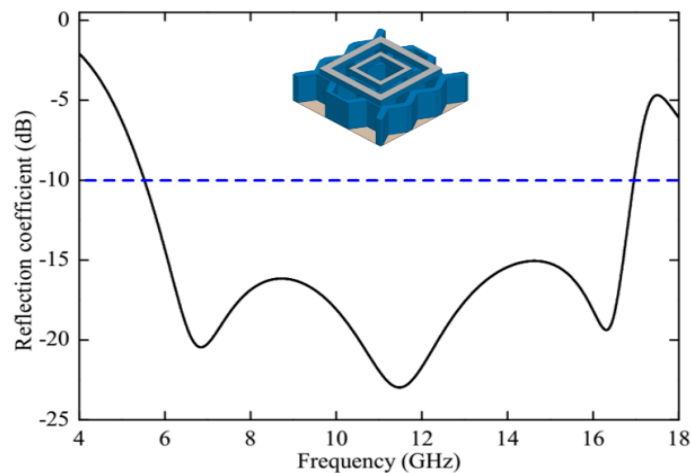


Рисунок 1.8.1 – Структура одиничної комірки і коефіцієнт відбиття [26]

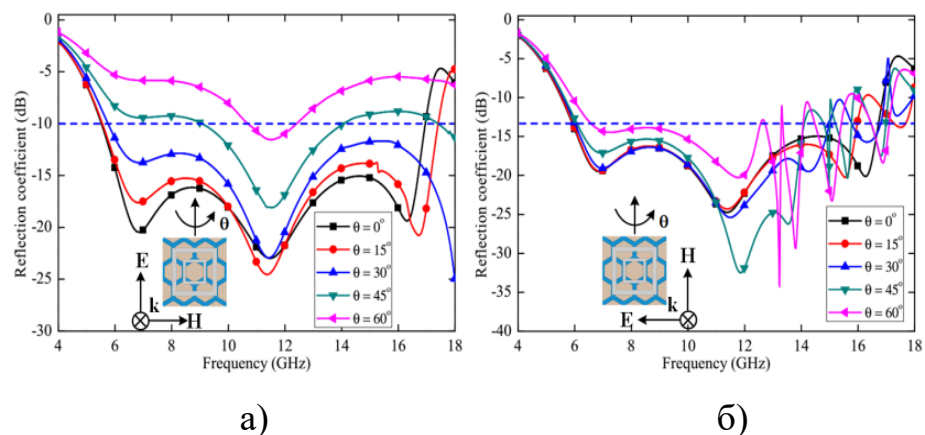


Рисунок 1.8.2 – Залежність від кута падіння ЕМ хвилі для: а) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації, б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації [26]

Структура [27] теж базується на шестигранних сотах, виконаних з того ж матеріалу що і попередньо наведена структура. Проте, якщо в [26] резонуюча поверхня розташована над сотами, то в даному поглиначі резонуючими листами вкриті певні стінки сот, що допомагає досягти гарного

поглинання при широкому діапазоні кутів падіння ЕМ хвиль (Рисунок 1.8.3). Сму́га поглинання такої конструкції складає 3,82 – 24 ГГц. Основною перевагою такого типу поглинача є те що ефективність поглинання ним ЕМ хвиль є достатньою для значних кутів падіння хвиль, на частоті близько 11 ГГц коефіцієнт відбиття цієї структури складає менше -10 дБ при куті у 75° (Рисунок 1.8.4 а, б). Його товщина близько 15,51 мм (13λ). Порівнюючи з попередньо наведеним поглиначем цей варіант є відносно дешевшим і простішим, як вже згадувалось про перевагу використання резистивних листів над використанням резистивних чорнил.

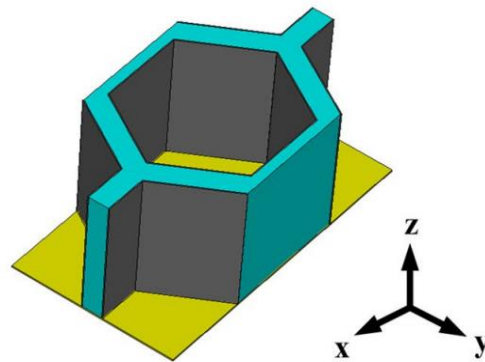


Рисунок 1.8.3 – Структура одиничної комірки [27]

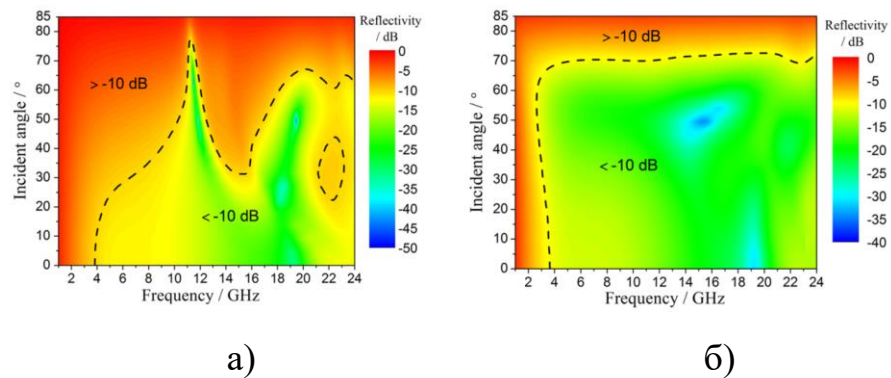


Рисунок 1.8.4 – Залежність від кута падіння ЕМ хвилі для: а) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТЕ поляризації, б) Зміна відсоткового рівня поглинання відносно зміни кута падіння ЕМ хвилі при ТМ поляризації [27]

1.9 Висновки за результатами огляду

Отже, за результатами огляду (таблиця 1) за основу поглинача на основі метаматеріалів було обрано структуру [11], з якої буде прибрано резонатор з активними елементами, використання яких є непрактичним для застосування в необхідних для проєктованого поглинача умовах, і замінено на резонатор з пасивними елементами, схожий до того, що розміщений на верхній підкладинці, проте з розмірами що забезпечать виконання умов поглинання в іншому діапазоні. За допомогою двошаровості можна перекрити пропоновані діапазони у яких працює супутниковий SAR – 3,1 – 3,3 ГГц, 9,2 – 10,4 ГГц. Ця структура була обрана через свою досить просту конструкцію, яка легко піддається модифікації і, як згадувалось вище, через свою дводіапазонність, яку забезпечують дві резонуючі структури на різних підкладинках. Проте, дана конструкція є складною у виготовленні через використання в ній прошарків повітря, тому було обрано структури *honeycombs*, що використовуються в [26], [27], якими пропонується замінити прошарки *air spacer* задля спрощення виготовлення і реалізації поглинача, адже вони забезпечують кращі механічні властивості за рахунок структур *сот*, які є витривалішими до навантажень і доступнішими для виготовлення і використання, в порівнянні з *air spacer*.

					<i>PI1.423456.001 ПЗ</i>	Лист
						32
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Таблиця 1. Характеристики поглиначів, розглянутих в огляді

Назва одиничної комірки поглинача	Діапазон ефективного поглинання (>90%) (ГГц)	Матеріали що використовуються для виготовлення комірки	Товщина структури в мм	Товщина структури в λ (відносно верхньої частоти)
[3]	7,85 – 12,25	Мідь ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ СМ/М}$); FR – 4 ($\epsilon = 4,2$ і $\tan \delta = 0,02$)	2,07	$5\lambda/6$
[5]	4 – 6	Мідь ($\sigma = 5,96 \cdot 10^7 \text{ СМ/М}$); FR – 4 ($\epsilon = 4,3$ і $\tan \delta = 0,025$)	3,87	$10\lambda/13$
[14]	6,06 – 14,66	PET ($\epsilon = 3,2$ і $\tan \delta = 0,003$); ITO плівка; Air gap	5,35	$5\lambda/2$
[17]	8 – 18	PET; ITO плівка; PMMA; Air gap	4,5	$5\lambda/2$
[11]	1,91 – 4,89 3,18 – 12,78	Мідь ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ СМ/М}$); FR – 4 ($\epsilon = 4,4$ і $\tan \delta = 0,02$)	13,3	5λ

Назва одиничної комірки поглинача	Діапазон ефективного поглинання (>90%) (ГГц)	Матеріали що використовуються для виготовлення комірки	Товщина структури в мм	Товщина структури в λ (відносно верхньої частоти)
[26]	5,52 – 16,96	PLA ($\epsilon = 2,1$ і $\tan \delta = 0,07$); Y-shield ($\sigma = 2800$ См/м)	5,5	3λ
[27]	3,82 – 24	PLA ($\epsilon = 3$ і $\tan \delta = 0,01$); Мідь	15,51	13λ
[10]	4,79 – 5,04	Мідь ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м); FR – 4	0,9	$\lambda/6$
[21]	1,61 – 4,45	Мідь ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м); FR – 4 ($\epsilon = 4,3$ і $\tan \delta = 0,025$)	18	$5\lambda/2$
[13]	0,68 – 2,13	Мідь; F4BM ($\epsilon = 2,65$ і $\tan \delta = 0,001$)	6	$\lambda/2$
[16]	6 – 14	Луджена мідна фольга; FR4; Пінистий діелектрик Rohasel ($\epsilon = 1,07$ і $\tan \delta = 0,0003$)	6,2	$10\lambda/3$

2 Створення дводіапазонного поглинача з використанням air spacer

2.1 Методи аналізу

Метаповерхні складаються з елементів (наприклад, резонаторів або диполів), які розміщені в періодичній формі. Коли електромагнітні хвилі потрапляють на таку поверхню, вони взаємодіють з цими елементами, що може призвести до різних ефектів, таких як зміна напрямку хвилі, поляризація, або навіть утворення нових хвильових режимів. Вони можуть ефективно змінювати напрямок хвиль або перерозподіляти енергію серед різних режимів. Метод Флоке дозволяє вивчати ці зміни за допомогою аналізу мод, що дає змогу створювати пристрої, які фокусують або спрямовують хвилі.

Аналіз нескінченних періодичних структур зазвичай базується на використанні методу Floquet. Цей підхід ґрунтується на періодичності структури та дозволяє ефективно моделювати її електромагнітні властивості без необхідності аналізу кожного окремого елемента.

Згідно з теорією Флоке, електромагнітне поле в періодичних середовищах можна представити у вигляді нескінченної суми гармонік, кожна з яких модулюється основною періодичною структурою. Поле розкладається на так звані моди Флоке (Floquet modes). Ці моди відповідають розв'язкам хвильового рівняння, які враховують періодичність структури. Для періодичних структур у просторі можна розглядати хвилі, які поширюються з певними хвильовими векторами, і ці хвилі можуть бути описані за допомогою числових коефіцієнтів, що є модами Флоке.

У випадку періодичних структур, таких як метаповерхні або антенні масиви, поле розкладається на суперпозицію хвильових компонентів з різними хвильовими векторами, що відповідають різним частотним режимам, або модам. Ці моди визначаються через періодичні умови на межах структур.

Це значно спрощує аналіз, дозволяючи звести задачу до розгляду лише однієї елементарної комірки необхідної періодичної структури.

					РІ1.423456.001 ПЗ	Лист
						35
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Для проектування і симуляції одиничної комірки використовуватимемо програмне забезпечення CST Design Studio.

Працюємо в шаблоні одиничної комірки метаматеріалу. Аналіз структури проводиться за допомогою Frequency Domain Solver в смузі 2 – 12 ГГц (Рисунок 2.1.1), адже нас цікавлять два діапазони в межах цієї смуги 3,1 - 3,4 ГГц і 9,2 – 10,4 ГГц, в яких здійснюється випромінювання SAR. Frequency Domain Solver в даному випадку використовується через те, що, на відміну від Time Domain Solver він дає можливість проводити аналіз змінюючи кут падіння ЕМ хвилі яку поглинатиме структура, що є одним з найважливіших показників в даному випадку, адже випромінювання SAR здійснюється під кутом і під різними поляризаціями, і саме цей solver дає можливість просимулювати поведінку структури метаматеріалу в таких межах кутів які є необхідними (Рисунок 2.1.2).

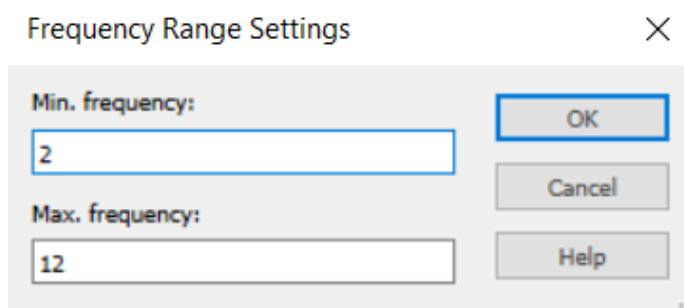


Рисунок 2.1.1 – Частотний діапазон симуляції

The recommended solvers for the selected workflow are:

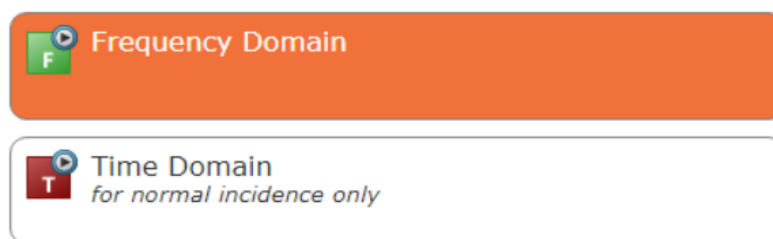


Рисунок 2.1.2 – Вибір Solver-у

По осях x і y налаштовуємо unit cell граничні умови, як умова що по цих осях структура є періодичною, а по осі z – open (add space) (Рисунок 2.1.3). При встановленні граничних умов одиничної комірки автоматично

встановлюються порти Floquet, якими і проводитиметься аналіз. За замовчуванням через цей тип портів протікають дві моди, одна пласка хвиля з TE поляризацією, інша ж з ТМ поляризацією.

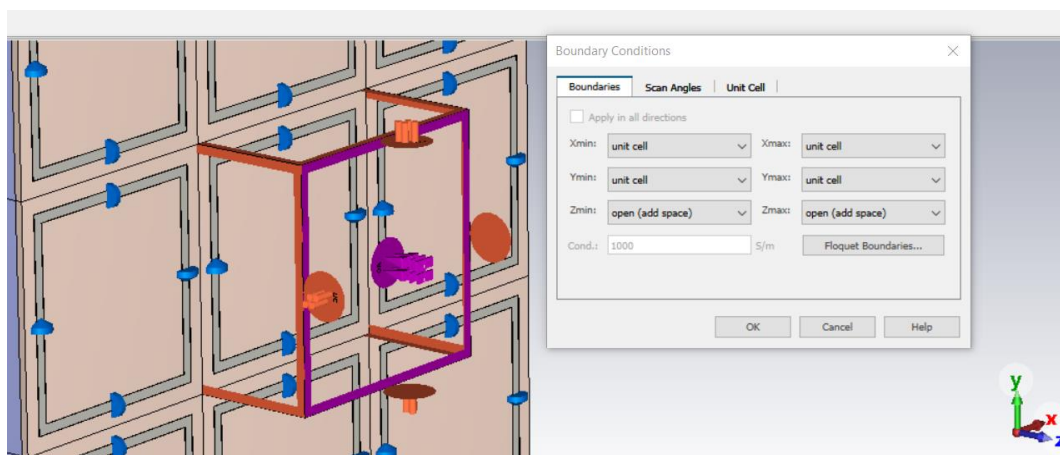


Рисунок 2.1.3 – Граничні умови встановлені для структури

2.2 Структура комірки з використанням шарів air spacer

За повздовжніми розмірами структура одиничної комірки поглинача є квадратною, що забезпечує однакову поведінку структури при обох поляризаціях при куті падіння 0° і складається з п'яти шарів. Два з цих шарів складає air spacer, що розмежовує між собою підкладки і металеву поверхню. Верхній шар - підкладка, виконана з матеріалу FR-4, на якій розташовується більший резонатор, що забезпечує достатній коефіцієнт відбиття і поглинання структури в S-діапазоні. Середнім шаром є ще одна підкладка виконана з матеріалу FR-4, на якій розміщується менший резонаторів, який, відповідно, в свою чергу впливає на характеристики поглинання і відбиття в X-діапазоні. Обидва резонатори мають форму квадрата з порожниною всередині і з чотирма проміжками куди монтуються резистори. Нижній шар комірки - металева поверхня.

Розміри комірки виражаються такими параметрами (Рисунок 2.2.1):

- a – ширина одиничної комірки поглинача.
- $L1$ – ширина до зовнішнього краю верхнього резонатора.
- $l1$ – ширина до внутрішнього краю верхнього резонатора.

Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата

P11.423456.001 ПЗ

Лист
37

- $L1 - l1$ – ширина верхнього резонатора.
- $L2$ – ширина до зовнішнього краю нижнього резонатора.
- $l2$ – ширина до внутрішнього краю нижнього резонатора.
- $L2 - l2$ – ширина нижнього резонатора.
- g – розмір проміжків в які монтуються резистори. По 4 в кожному резонаторі.
- $Ws1$ – товщина верхньої підкладки
- $Wa1$ – товщина шару повітря що розташовується між верхньою і нижньою підкладками.
- $Ws2$ – товщина нижньої підкладки
- $Wa1$ – товщина шару повітря що розташовується між нижньою підкладкою і металевою поверхнею.
- Wm – товщина металізації задньої стінки поглинач.

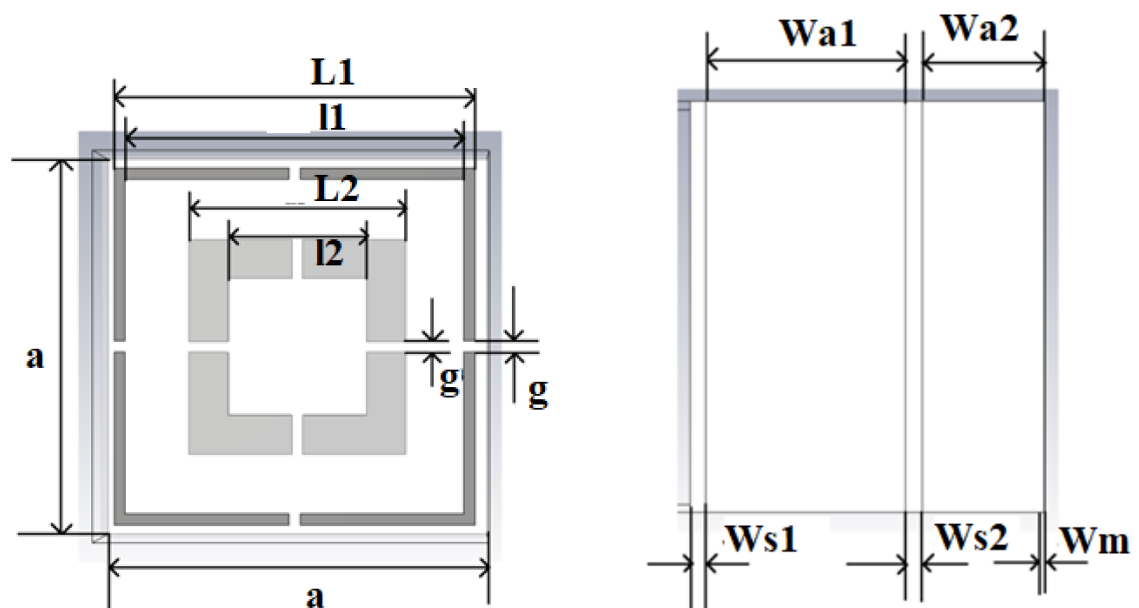


Рисунок 2.2.1 – Параметри структури.

Також в структурі присутні такі пасивні елементи як резистори, що розміщені в проміжках резонаторів (Рисунок 2.2.2). Всі 4 резистори, що є частиною одного з резонаторів мають однаковий номінал. Резистори що

Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

Лист
38

розміщені на верхньому резонаторі, який впливає на поглинання в S-діапазоні, мають більший номінал в порівнянні з тими що розташовуються на нижньому резонаторі. В залежності від розміру резистора, який буде обрано для включення до структури, варіюється і ширина проміжку, де він буде вмонтований. Розміри резисторів що рекомендуються для використання в структурі – 0201, 0402, адже зі збільшенням розмірів резистору погіршуються його характеристики в X-діапазоні. Тому використання елементів, що перевищують рекомендовані розміри є недоцільним через роботу структури в високочастотному діапазоні.

Номінал резисторів що розміщені на верхньому резонаторі надалі позначатиметься як R1, тих ж що розміщуються на нижній резонуючій структурі - R2.

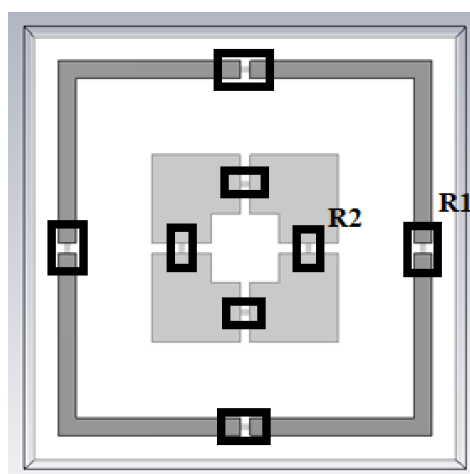


Рисунок 2.2.2 – Розташування резисторів у структурі

2.3 Визначення задачі для оптимізації.

У статті [29] докладно розглянуто залежність якості когерентного виявлення змін від рівня відношення сигнал/шум (SNR). Автори підкреслюють, що для отримання чіткого зображення, що є критично важливим для точного виявлення змін на місцевості, необхідно забезпечити мінімальний рівень SNR не нижче 10 дБ. Таким чином, навіть зниження SNR на 10 дБ від номінального рівня (наприклад, з 20 дБ до 10 дБ) призводить до

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

P/1.423456.001 ПЗ

Лист
39

суттєвого зниження когерентності, що негативно впливає на здатність SAR-системи розрізняти об'єкти. При недостатньому SNR фазова інформація сигналу стає зашумленою, що спричиняє втрату когерентності між зображеннями, появу хибних змін і, зрештою, неможливість достовірно виявити реальні зміни або ідентифікувати цілі. Це підкреслює важливість підтримання достатнього рівня SNR для ефективного функціонування системи когерентного виявлення змін у SAR-зображеннях.

Крім того, у наукових публікаціях наведених вище, таких як, до прикладу [11], [26], [27], присвячених метаматеріалам і електромагнітним поглиначам, коефіцієнт відбиття -10 дБ традиційно вважається порогом ефективного поглинання. Це пояснюється тим, що коефіцієнт відбиття в -10 дБ відповідає ситуації, коли лише близько 10% потужності падаючого сигналу відбивається назад, а 90% поглинається структурою. Такий рівень відбиття є можливим для досягнення за реальних умов і забезпечує практично непомітність об'єкта для радіолокаційних систем, і саме тому в більшості статей значення -10 дБ і нижче використовується як критерій того, що матеріал виконує функцію радіолокаційного поглинача належним чином. У контексті SAR це означає, що об'єкти з таким коефіцієнтом відбиття можуть практично повністю "зникати" з зображення, особливо за умов зниженого SNR, унеможливлючи їх виявлення або класифікацію.

2.4 Оптимізація комірки з air spacer при куті падіння ЕМ хвилі 0°

Для початку оптимізуємо структуру щоб досягти необхідних умов суто для кута падіння ЕМ хвилі 0° і після, просимулюємо змінюючи даний кут, щоб побачити чи такий метод зможе забезпечити достатні результати.

Для оптимізації використовується алгоритм Nelder Mead Simplex Algorithm, адже він має перевагу над іншими можливими алгоритмами в даному випадку, так як створює набір початкових точок і не потребує

інформації про градієнт для визначення напрямку пошуку. Відповідно, завдяки цьому він мінімально залежний від початкової точки оптимізації.

Цільова функція умовно складається з чотирьох частин: тип даних, ціль, частотний діапазон і ваговий коефіцієнт оптимізації (Рисунок 2.4.1). Типом даних для оптимізації в даному випадку було обрано коефіцієнти відбиття при TE ($SZ_{\max(1)}.Z_{\max(1)}$) і TM ($SZ_{\max(2)}.Z_{\max(2)}$) поляризаціях. Ціллю оптимізації є досягнення значення коефіцієнта відбиття <-10 дБ, як було зазначено вище. Так як проєкт розробляється для роботи в діапазонах які покриває супутниковий SAR, таких як 3,1 – 3,3 ГГц, 9,2 – 10,4 ГГц, то оптимізацію обмежимо ширшими діапазонами, адже при збільшенні кута падіння смуги звужуються і зміщуються. В результаті отримуємо такі частотні діапазони оптимізації: 2,7 – 3,7 ГГц, 8,8 – 10,8 ГГц. Ваговий коефіцієнт еквівалентний одиниці на кожній з цілей, адже їх досягнення є однаково необхідним. Також в було обрано тип узагальнення цілей “Sum of all goals”, адже він працює з усіма цілями водночас, паралельно покращуючи кожен з них, на відміну від “Maximum of all goals”, що працює лише з однією ціллю, значення якої є найвищим.

Також для оптимізації було обрано норму цільової функції типу Maximum Difference, оскільки вона дозволяє оцінити найгірший випадок у частотному діапазоні, що є важливим для оптимізації поглинача, адже незначне перевищення коефіцієнта відбиття від -10 дБ може дозволити розпізнати необхідний об’єкт. Такий підхід забезпечує більш жорсткий контроль за характеристиками поглинача, адже він орієнтований не на середній рівень відхилення, а саме на максимальне порушення заданих вимог. Це дозволяє зосередити процес оптимізації на тих ділянках частотного спектру, де конструкція поводить себе найгірше, і в такий спосіб гарантувати дотримання технічних умов у всьому зазначеному діапазоні.

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

P/1.423456.001 ПЗ

Лист
41

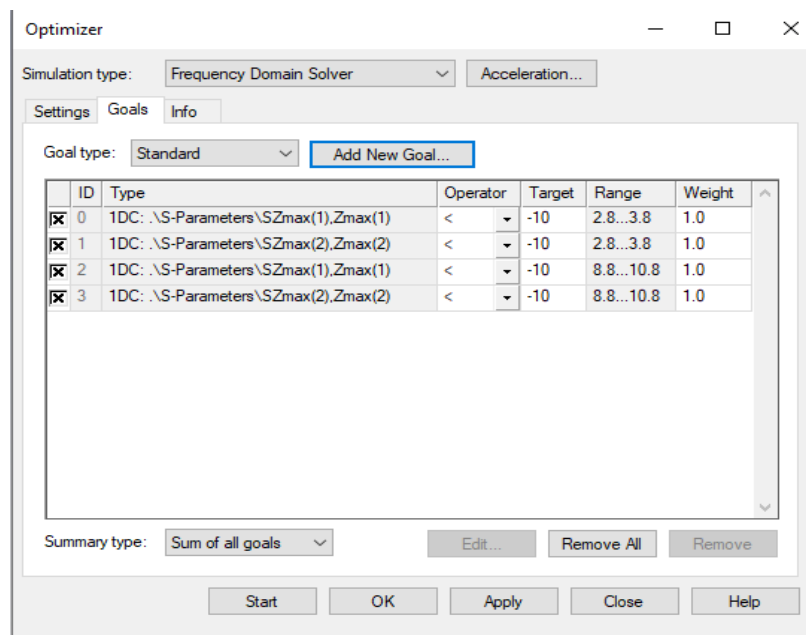


Рисунок 2.4.1 – Цілі оптимізації

Параметри були оптимізовані в межах вказаних в таблиці 2.

Таблиця 2. Межі оптимізації параметрів

Параметр	Мінімальна межа оптимізації	Максимальна межа оптимізації
L1, мм	16	19
L1 - l1, мм	0,5	1
L2, мм	7	10
L2 - l2, мм	1	3,2
a, мм	19	23
Wa1, мм	7	9
Ws1, мм	0,5	0,8
Wa2, мм	5	9
Ws2, мм	0,6	0,9
R1, Ом	450	550
R2, Ом	28	60

Отримуємо оптимізовану структуру (Рисунок 2.4.2) з параметрами наведеними в таблиці 3.

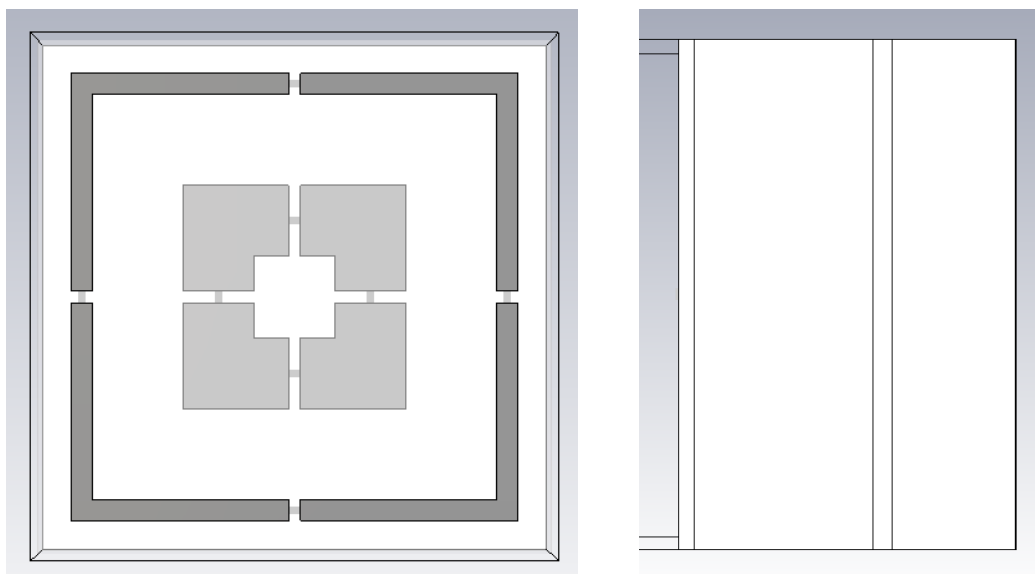


Рисунок 2.4.2 – Вигляд структури після оптимізації при куті падіння ЕМ хвилі 0°

Таблиця 3. Кінцеві значення параметрів

L1, мм	l1, мм	L2, мм	l2, мм	g, мм	a, мм
18,54	16,79	9,47	3,47	0,5	21,32
Wa1, мм	Ws1, мм	Wa2, мм	Ws2, мм	R1, Ом	R2, Ом
7,42	0,62	5,11	0,79	515	30

Після такого виду оптимізації структури, при куті падіння ЕМ хвилі рівному 0° і при визначеній ТЕ або ТМ поляризаціях (Рисунок 2.3.3), отримуємо результати які задовольняють умови ефективного поглинання ЕМ хвиль (зворотні втрати менше або ж рівні -10 дБ) в діапазонах частот 2,44 – 3,9 ГГц, 8,61 – 11,07 ГГц при куті падіння ЕМ хвилі рівному 0° (Рисунок 2.2.3). Обидві смуги покривають заявлені, відповідно, умови оптимізації виконані. Результати для ТЕ і ТМ поляризацій накладаються завдяки симетрії

структури. Відсоток поглинання в цих смугах частот складає більше 90% (Рисунок 2.4.3).

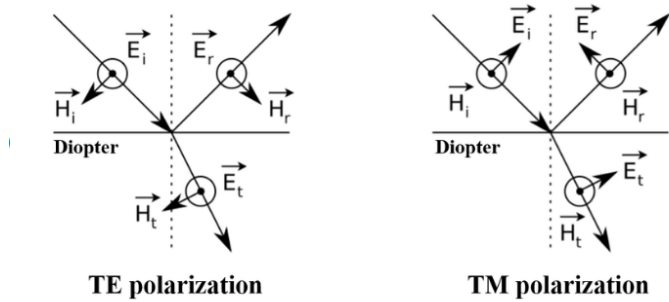


Рисунок 2.4.3 – TE і ТМ поляризації [28]

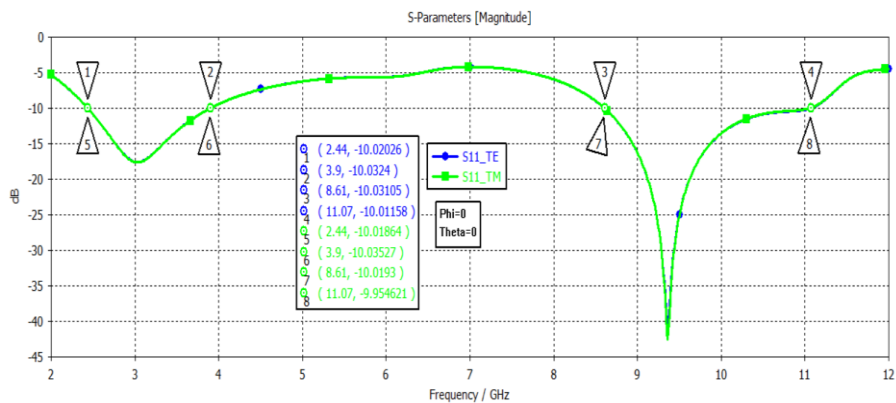


Рисунок 2.4.5 – Коефіцієнт відбиття при TE і ТМ поляризаціях для кута падіння 0°.

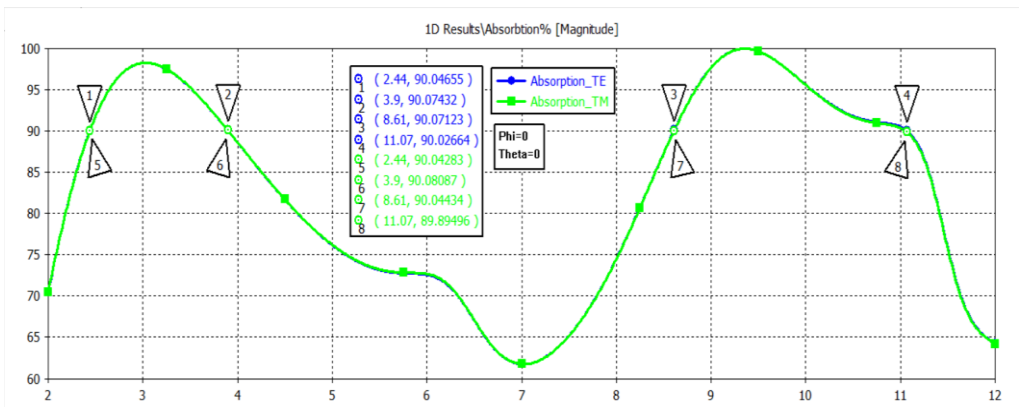


Рисунок 2.4.6 – Відсотковий коефіцієнт поглинання ЕМ хвилі при TE і ТМ поляризаціях для кута падіння 0°.

При зміні кута падіння ЕМ хвилі на 25° спостерігаються значні спотворення в верхній робочій області при ТМ поляризації (Рисунок 2.4.7). При ТЕ поляризації отримуємо такі 2 робочі смуги де виконується умова у більш ніж 90% поглинання ЕМ хвилі: 2,45 – 4,05 ГГц і 8,71 – 10,44 ГГц, при ТМ поляризації: 2,72 – 4,33 ГГц, 8,89 – 9,9 ГГц і 10,019 – 10,45 ГГц (Рисунок 2.4.8).

При обох поляризаціях нижня смуга частот покриває необхідний діапазон, проте, в верхній області частот при ТМ поляризації резонанс спотворюється і розбивається на 2 смуги з проміжком один між одним у 100 МГц.

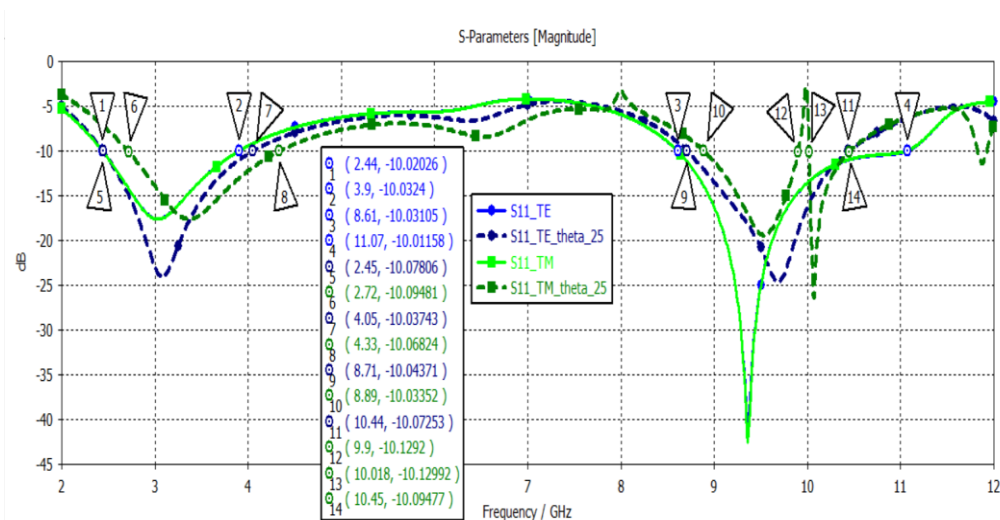


Рисунок 2.4.7 – Порівняння коефіцієнту відбиття при ТЕ і ТМ поляризаціях при кутах падіння ЕМ хвилі 0° і 25° .

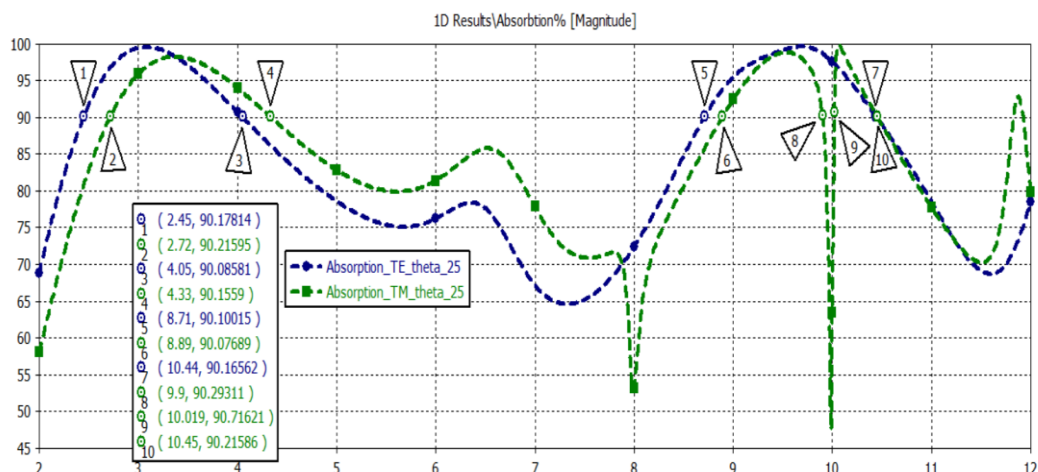


Рисунок 2.4.8 – Відсотковий коефіцієнт поглинання ЕМ хвилі при ТЕ і ТМ поляризаціях при куті падіння ЕМ хвилі 25°.

Відповідно при збільшенні кута падіння ЕМ хвилі до 50° ситуація погіршується. При ТМ поляризації верхній резонанс зникає, а нижній переміщається у вищі частоти (Рисунок 2.2.9). Смуги де виконується умова у більш ніж 90% поглинання ЕМ хвилі для ТЕ поляризації: 2,61 – 3,9 ГГц і 8,27 – 9,17 ГГц, для ТМ поляризації: 3,73 – 7,31 ГГц (Рисунок 2.2.10).

При ТЕ поляризації все ще покриває необхідний діапазон нижня смуга робочих частот, верхня ж смуга значно звужується і не забезпечує покриття навіть частини верхнього діапазону. При ТМ поляризації резонанси не перекривають жодного необхідного діапазону.

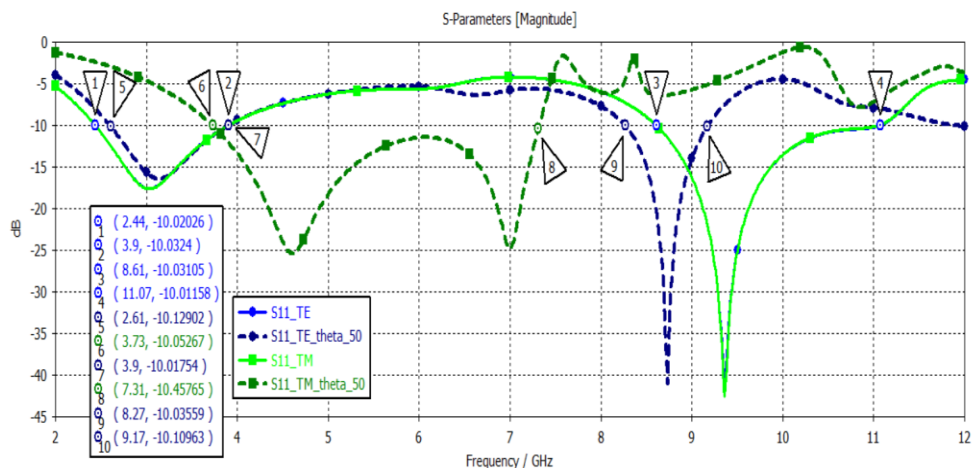


Рисунок 2.4.9 – Порівняння коефіцієнту відбиття при ТЕ і ТМ поляризаціях при кутах падіння ЕМ хвилі 0° і 50°.

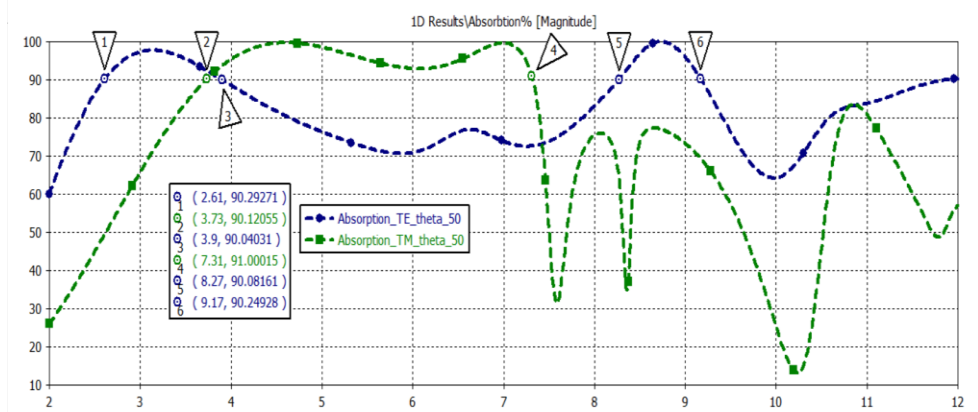


Рисунок 2.4.10 – Відсотковий коефіцієнт поглинання ЕМ хвилі при ТЕ і ТМ поляризаціях при куті падіння ЕМ хвилі 50°.

Наведена вище структура задовольняє умови поглинання у 90% в смугах, що перекривають діапазони випромінювання супутникового SAR 3,1 – 3,4 ГГц і 9,2 – 10,4 ГГц. Проте, при збільшенні кута падіння ЕМ хвилі, зростають і спотворення, що особливо явно спостерігається в Х-діапазоні при ТМ поляризації.

Загальні кінцеві результати отримані під час проведення оптимізації при різних кутах падіння ЕМ хвилі наведені в Табл. 4.

Таблиця 4. Робочі частотні смуги при різних кутах падіння ЕМ хвиль.

Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
Theta = 0°	2,44 – 3,9	2,44 – 3,9	8,61 – 11,07	8,61 – 11,07
Theta = 25°	2,45 – 4,05	2,72 – 4,33	8,71 – 10,44	8,89 – 9,9 10,02 – 10,45
Theta = 50°	2,61 – 3,9	8,27 – 9,17	3,73 – 7,31	-

2.5 Одночасна оптимізація комірки з air spacer при кутах падіння ЕМ хвилі 0° і 50°.

Результати попередньої оптимізації не дають достатнього поглинання під час зміни кутів падіння ЕМ хвилі. Тому, додатково проводилась оптимізація, яка водночас охоплювала два кути падіння ЕМ хвилі – 0° і 50°. Вона проводилась у вкладці Schematic, адже саме тут є змога для проведення такого виду оптимізації, до структури було додано 2 зовнішніх порта, один з яких відповідає роботі структури при TE поляризації хвилі, інший ж при TM (Рисунок 2.5.1). Як і в попередньому випадку для оптимізації було використано алгоритм Nelder Mead Simplex Algorithm.

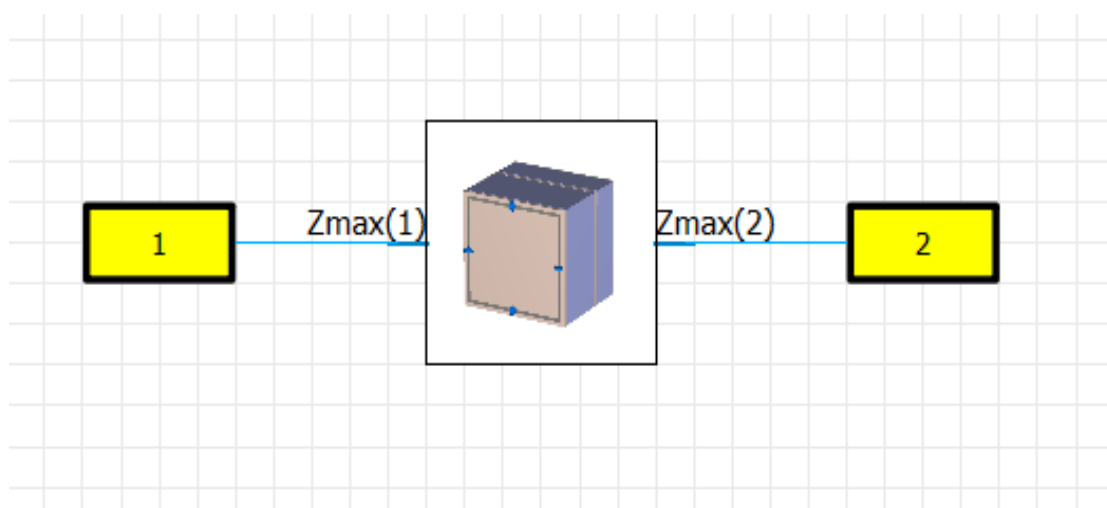


Рисунок 2.5.1 – Вигляд структури у вкладці Schematic

Параметри були оптимізовані в таких межах (Таблиця 5):

Таблиця 5. Межі параметрів оптимізації

Параметр	Мінімальна межа оптимізації	Максимальна межа оптимізації
L1, мм	16	35
L1 - l1, мм	0,5	3
L2, мм	10	13
L2 - l2, мм	1,4	4
a - L1, мм	0,5	5
Wa1, мм	3	13
Ws1, мм	0,45	1
Wa2, мм	2	12
Ws2, мм	0,45	1
R1, Ом	450	550
R2, Ом	28	60

В даній оптимізації як тип даних було встановлено відсоток поглинання, заданий через Post Processing, задля коректної роботи оптимізатора. За розрахунками з (2) значення поглинання має перевищувати 90%, що

встановлено як ціль оптимізації. Решта параметрів залишились незмінними (Рисунок 2.5.2).

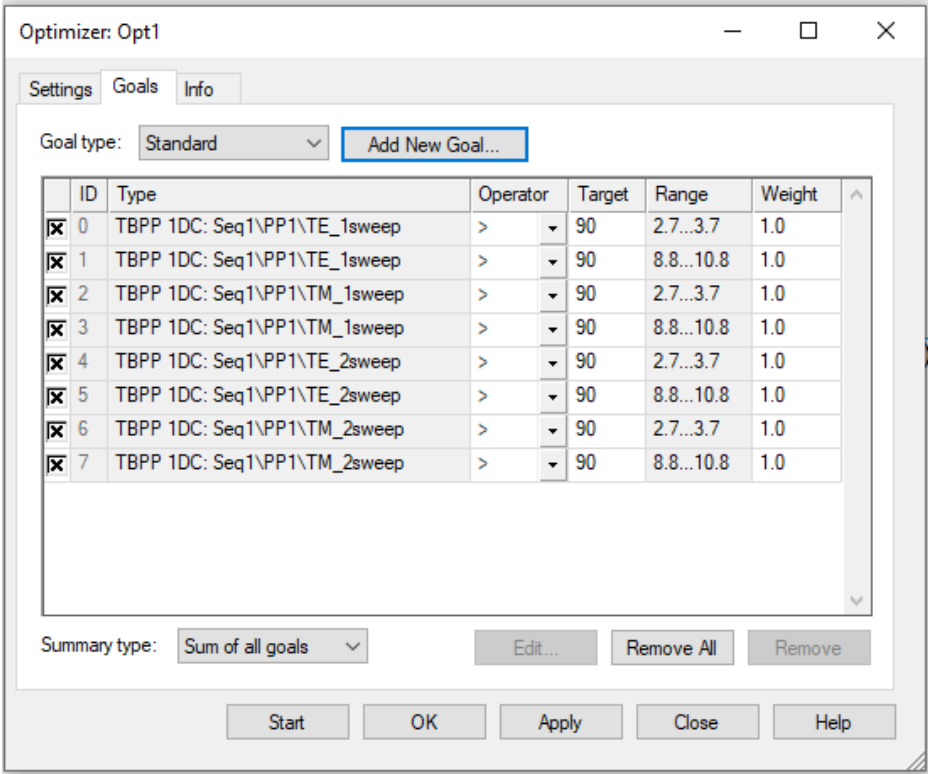


Рисунок 2.5.2 – Цілі оптимізації

Отримуємо оптимізовану структуру (Рисунок 2.5.3) з параметрами наведеними в таблиці 6.

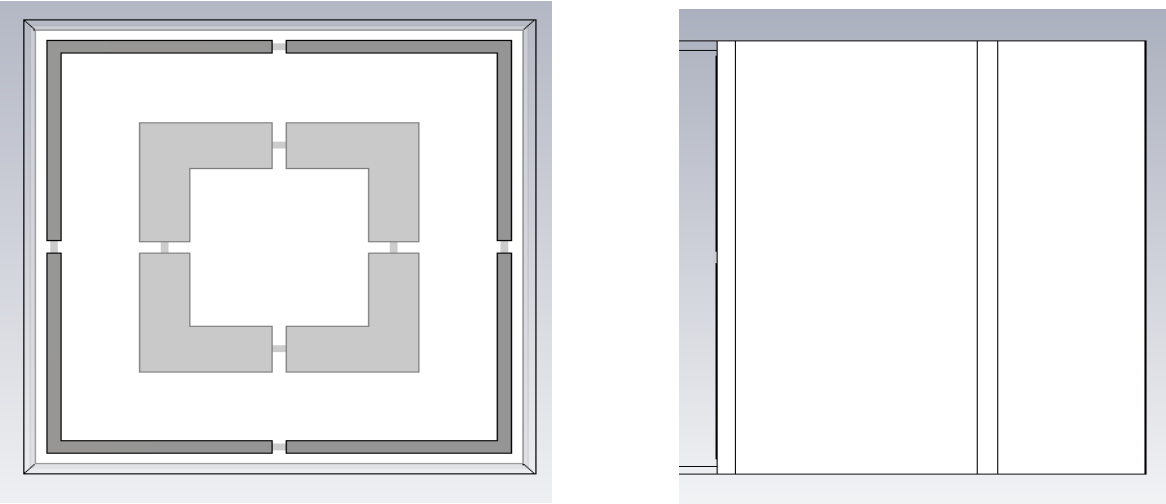


Рисунок 2.5.3 – Вигляд структури після оптимізації при кутах падіння ЕМ хвилі 0° і 50°

Таблиця 6. Кінцеві значення параметрів

L1, мм	l1, мм	L2, мм	l2, мм	g, мм	a, мм
16,3	15,8	10	8,17	0,5	17,48
Wa1, мм	Ws1, мм	Wa2, мм	Ws2, мм	R1, Ом	R2, Ом
8,62	0,67	5,25	0,75	448,6	88

При куті падіння ЕМ хвилі рівному 0° , діапазони, в яких виконуються умови ефективного поглинання, цілком перекривають смуги роботи супутникового SAR. В S-діапазоні частот першого резонансу смуга виходить за межі симуляції, тому нижню частоту визначимо орієнтовно, адже вона набагато нижче необхідної за умовою нижньої межі і тому немає потреби в її точному значенні. Для обох поляризацій отримуємо ідентичні дві смуги: 1,9 – 4 ГГц і 9 – 11,1 ГГц. В межах цих діапазонів зворотні втрати перевищують 10 дБ (Рисунок 2.5.4), а відсоток поглинання перевищує 90% (Рисунок 2.5.5).

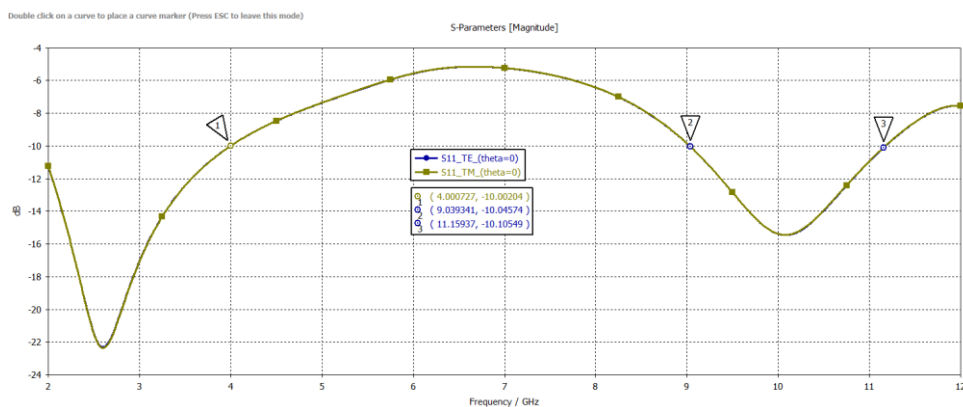


Рисунок 2.5.4 – Коефіцієнт відбиття при падінні ЕМ хвилі під кутом 0° для ТЕ і ТМ поляризацій

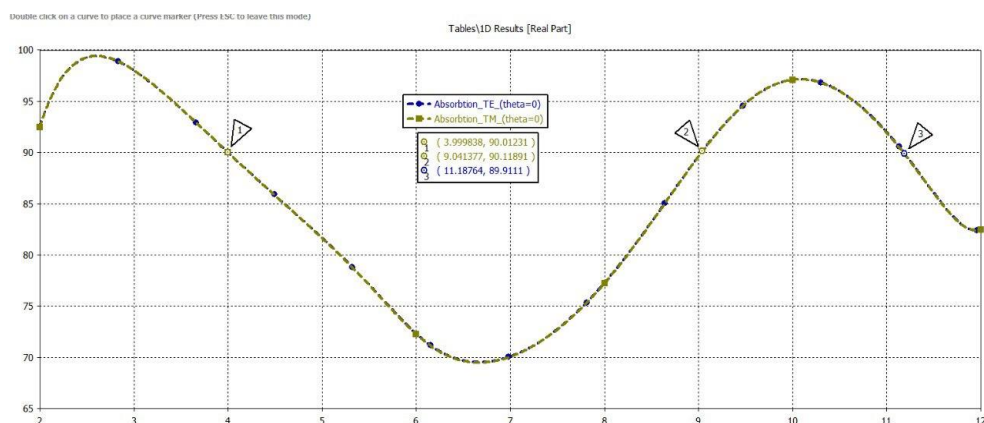


Рисунок 2.5.5 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутом 0° для ТЕ і ТМ поляризацій

При куті падіння ЕМ хвилі в 25° діапазони, отримані в результаті симуляції, в яких умови відповідають необхідним, як і раніше, цілком перекривають смуги роботи супутникового SAR. Для ТЕ поляризації отримуємо такі дві смуги: 2 – 3,8 ГГц і 9 – 11,5 ГГц, для ТМ: 2,2 – 4,5 ГГц і 9,2 – 11,6 ГГц. Проте, бачимо, що при ТМ поляризації в Х-діапазоні основний резонанс спотворюється. (Рисунок 2.5.6, 2.5.7)

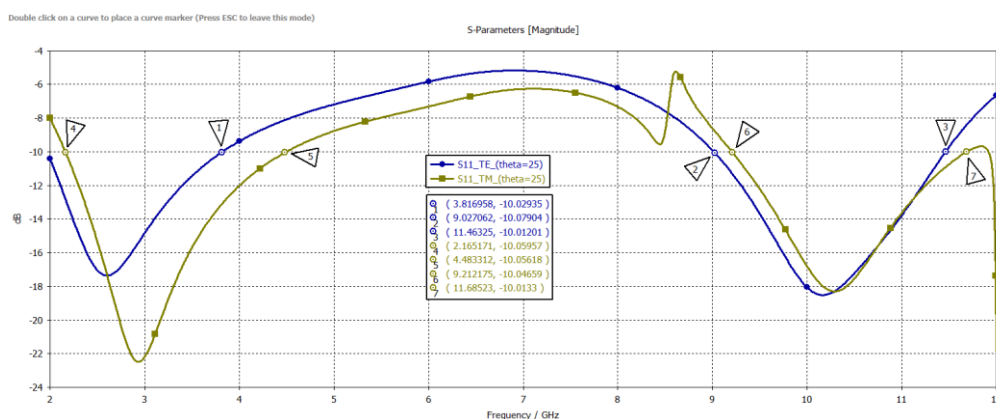


Рисунок 2.5.6 – Коефіцієнт відбиття при падінні ЕМ хвилі під кутом 25° для ТЕ і ТМ поляризацій

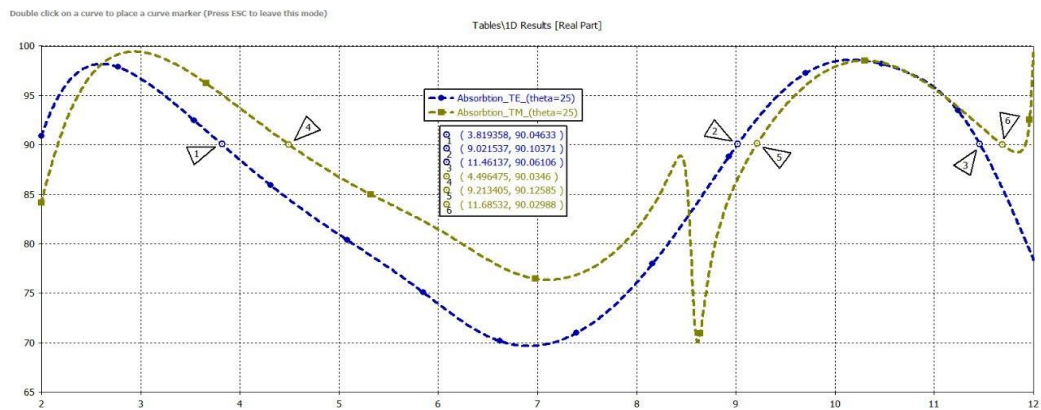


Рисунок 2.5.7 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутом 25° для ТЕ і ТМ поляризацій

При куті падіння ЕМ хвилі в 40° , теж отримуємо смуги які перекривають визначені за умовою, але при ТЕ поляризації в межах S-діапазону помітно що резонанс слабшає, а в ТМ поляризації в межах Х-діапазону спотворення резонансу більш явно виражене, порівнюючи з графіком падіння для 25° (Рисунок 2.5.8), адже там спостерігаємо один провал на частоті приблизно 8,4 ГГц, а при 45° цей провал мігрує до резонансу в S-діапазоні і утворюється ще один значний на частоті близько 9,5 ГГц. Для ТЕ поляризації отримуємо такі дві смуги: 2,1 – 3,4 ГГц і 8,7 – 10,4 ГГц для ТМ: 2,7 – 8,1 ГГц і 8,7 – 10,4 ГГц (Рисунок 2.5.8, 2.5.9).

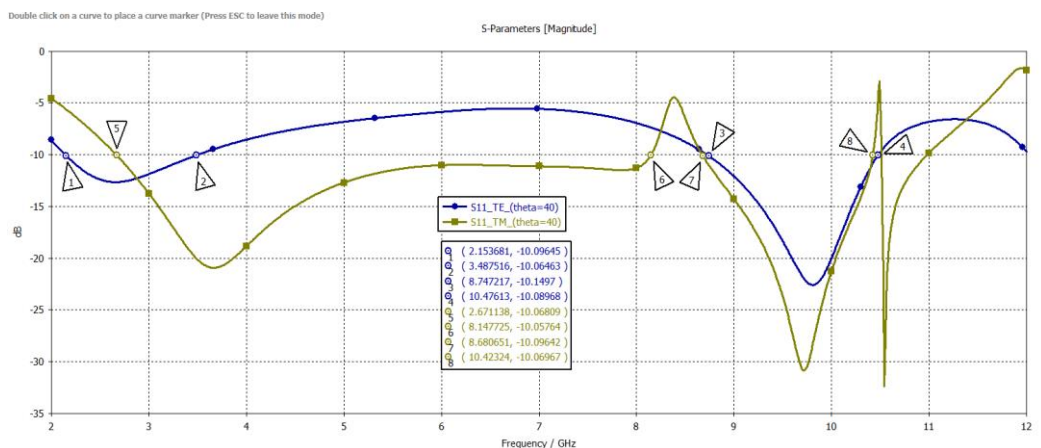


Рисунок 2.5.8 – Коефіцієнт відбиття при падінні ЕМ хвилі під кутом 40° для ТЕ і ТМ поляризацій

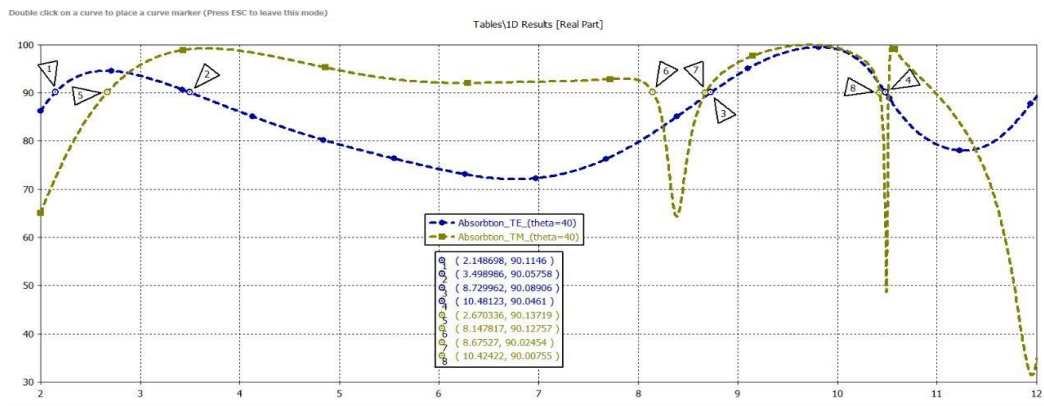


Рисунок 2.5.9 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутом 40° для ТЕ і ТМ поляризацій

При куті падіння ЕМ хвилі в 50° діапазони, отримані в результаті симуляції вже не покривають смуги роботи супутникового SAR, адже при ТЕ поляризації в межах S-діапазону резонанс вже не досягає необхідного значення, а в ТМ поляризації в межах Х-діапазону – резонанс спотворюється остаточно необхідній частотній смузі, а в S-діапазоні резонанс зміщується за необхідні межі і охоплює всього половину необхідної смуги. Для ТЕ поляризації отримуємо таку смугу: 8,7 – 10 ГГц для ТМ: 3,2 – 8 ГГц і 8,8 – 9,8 ГГц (Рисунок 2.5.10, 2.5.11).

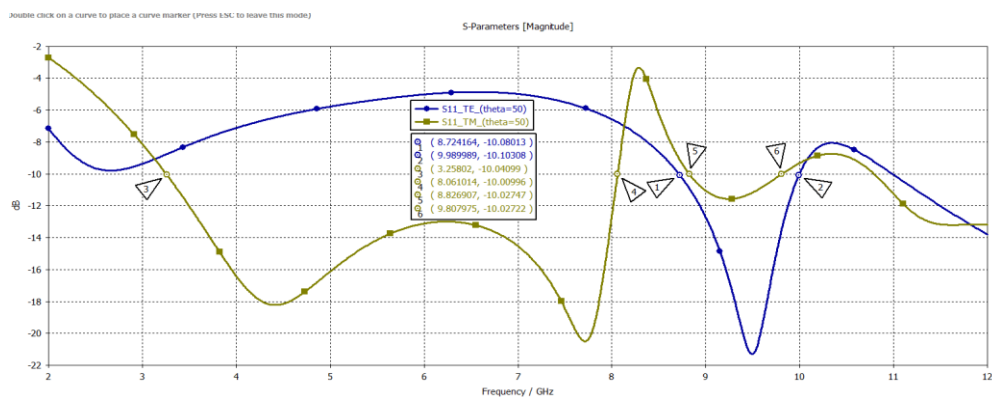


Рисунок 2.5.10 – Коефіцієнт відбиття при падінні ЕМ хвилі під кутом 50° для ТЕ і ТМ поляризацій

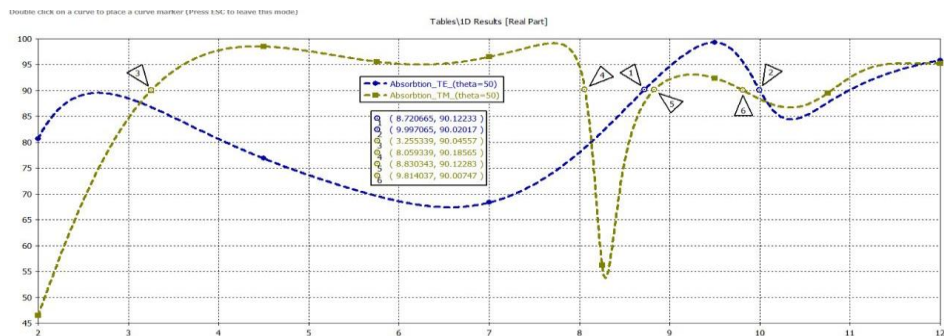


Рисунок 2.5.11 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутом 50° для ТЕ і ТМ поляризацій

Кінцеві результати отримані під час проведення одночасної оптимізації при кутах падіння ЕМ хвилі у 0° і 50° наведені в Табл. 7.

Таблиця 7. Робочі частотні смуги при різних кутах падіння ЕМ хвиль.

Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (ТЕ), ГГц	Нижній частотний діапазон (ТМ), ГГц	Верхній частотний діапазон (ТЕ), ГГц	Верхній частотний діапазон (ТМ), ГГц
Theta = 0°	1,9 – 4	1,9 – 4	9 – 11,1	9 – 11,1
Theta = 25°	2 – 3,8	2,2 – 4,5	9 – 11,5	9,2 – 11,6
Theta = 40°	2,1 – 3,4	2,7 – 8,1	8,7 – 10,4	8,7 – 10,4
Theta = 50°	-	3,2 – 8	8,7 – 10	8,8 – 9,8

Порівнюючи результати обох оптимізацій, можна стверджувати що метод одночасної оптимізації для двох кутів має значну перевагу в даному випадку. В результаті симуляції структури, з отриманими другим методом параметрами, працездатність поглинача зберігається до кута падіння ЕМ хвилі в 40° , в той час коли попередній метод вже на 25° видавав незадовільний умовам результат.

2.6 Вплив параметрів, в яких можливі відхилення при виробництві, на характеристики структури з air spacer.

Після оптимізації отримано значення опорів, які не представляються в стандартних рядах таких як: E6, E12, E24, E48, E96, E192. Отже, замінимо, отриманий під час оптимізації опір, на найближчий, що є частиною одного зі стандартних рядів. Так як $R1 = 438 \text{ Ом}$, то найоптимальніше підібране значення може бути еквівалентним 442 Ом , що було обрано з стандартного ряду E48, і його точність складає 2%. Відповідно, проведемо симуляцію за умов що опір верхнього резистора складатиме 442 Ом і ще за значень при його максимальних відхиленнях від зазначеного у 2%, тобто при $R1$ еквівалентному $433,16 \text{ Ом}$ і $450,84 \text{ Ом}$. Для отримання необхідних даних використаємо функцію parameter sweep, що дозволяє виконати кілька ітерацій, для дослідження впливу зміни цього параметру на отримані характеристики комірки.

Зміна опору резисторів, що розташовуються на верхньому резонаторі незначною мірою змінила глибину резонансів в обох діапазонах (Рисунок 2.6.1). Так можемо бачити, що в S-діапазоні при значенні $R1 = 442 \text{ Ом}$ глибина резонансу складає $-21,9 \text{ дБ}$ і при збільшенні значення цього параметру до $450,84 \text{ Ом}$ коефіцієнт відбиття слабшає, відповідно резонанс глибшає на $0,6 \text{ дБ}$ відносно вищенаведеного, і складає $-22,5 \text{ дБ}$. При зменшенні ж значення $R1$ до $433,16 \text{ Ом}$ коефіцієнт відбиття зростає відносно отриманого при опорі в 442 Ом на $0,8 \text{ дБ}$ і в свою чергу має значення -21 дБ . Якщо ж розглянути поведінку зміни коефіцієнта відбиття в X-діапазоні то при значенні $R1 = 442 \text{ Ом}$ коефіцієнт відбиття складає близько $-14,3 \text{ дБ}$, а при зміні значень цього параметру як до $433,16 \text{ Ом}$ так і до $450,84 \text{ Ом}$, коефіцієнт відбиття в обох випадках зменшується на $1,2 \text{ дБ}$ і складає $-15,5 \text{ дБ}$. Вищенаведені описи покривають поведінку коефіцієнта відбиття як при ТЕ, так і при ТМ поляризації, адже симуляція проводилась при куті падіння ЕМ хвилі в 0° і в такому випадку його поведінка в обох поляризаціях однакова.

					<i>P/1.423456.001 ПЗ</i>	Лист
						56
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

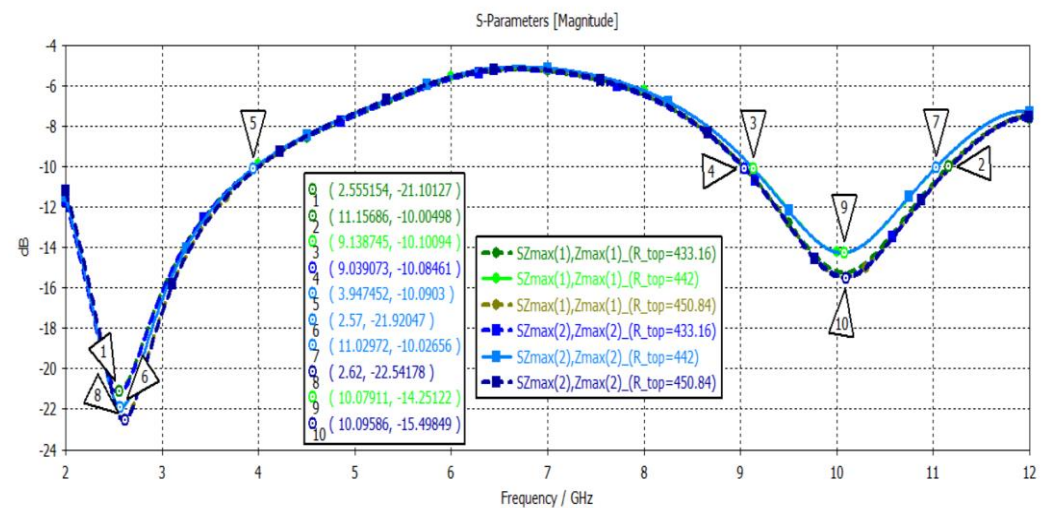


Рисунок 2.6.1 – Вплив зміни опору резисторів верхнього резонатора на коефіцієнт відбиття структури в ТЕ і ТМ поляризації.

Для резисторів з опором R2 виконаємо подібне. Так як значення опору у 88 Ом не знайти в стандартних рядах, то оберемо найближче до нього. Таким є резистор опором 91 Ом з ряду E24 з точністю 5%. Значення для яких виконувались симуляції: 86,45 Ом, 91 Ом і 95,55 Ом. При зміні даного параметру не спостерігається впливу на коефіцієнт відбиття в S-діапазоні (Рисунок 2.6.2). Проте, відбуваються зміни в резонансах в Х-діапазоні. При R2=91 Ом коефіцієнт відбиття структури складає -14 дБ. Збільшивши опір до 95,55 Ом спостерігається послаблення резонансу і, відповідно, збільшення коефіцієнта відбиття до -12,5 дБ. При зменшенні опору поведінка протилежна - резонанс глибшає і коефіцієнт відбиття в свою чергу еквівалентний -15,6 дБ, що є меншим за значення отримане при R2=91 Ом на 1,6 дБ.

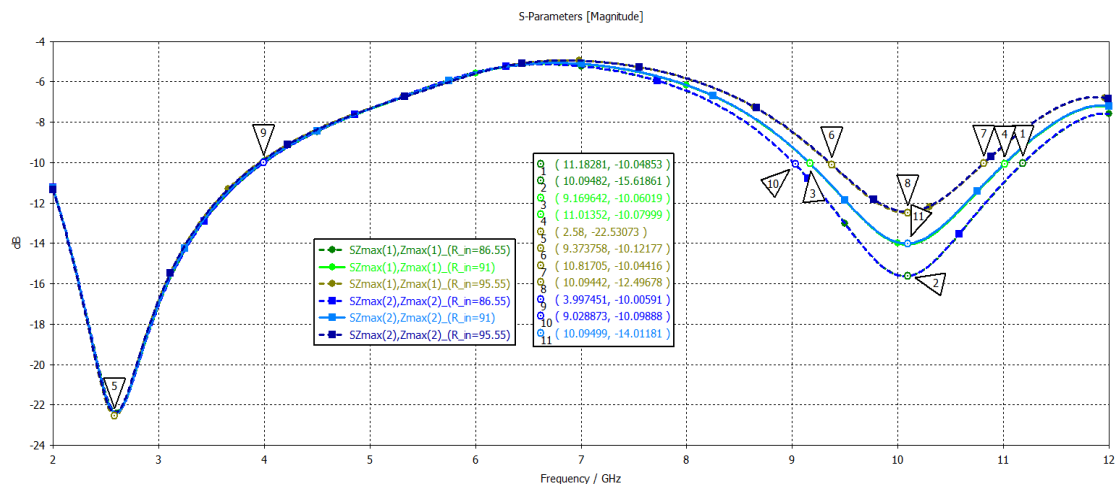


Рисунок 2.6.2 – Вплив зміни опору резисторів нижнього резонатора на коефіцієнт відбиття структури в ТЕ і ТМ поляризації.

Зміна висоти прошарків air spacer можлива при виробництві структури і вона впливає вже на резонанси в обох діапазонах, незалежно від того в якій з площин відбувається зміна параметру (Рисунок 2.5.3, 2.5.4). Вплив зміни висоти повітряного прошарку, як нижнього, так і верхнього, зміщує резонанси і впливає на їх глибину. При параметрах отриманих після оптимізації, таких як $Wa1 = 8,62$ мм і $Wa2 = 5,24$ мм, коефіцієнт відбиття в Х-діапазоні складає приблизно -15 дБ на частоті близько 10 ГГц, в S-діапазоні – -22 дБ на частоті 2,6 ГГц. Зменшивши $Wa1$ до 7,62 мм, резонанс в S-діапазоні змістився на частоту 2,67 ГГц, при цьому рівень відбиття знизився до -20 дБ, в Х-діапазоні натомість за цього значення отримуємо коефіцієнт відбиття -11,9 дБ на частоті 10,3 ГГц. Якщо ж зменшується $Wa2$ до 4,24 мм то резонанс в Х-діапазоні тепер розташовується на частоті 2,73 ГГц і складає -19,7 дБ, в S-діапазоні на частоті 9,9 ГГц складає -14 дБ. Відповідно, можна стверджувати що в обох випадках резонанс слабшає зі зменшенням висоти прошарку повітря, з чого слідує що коефіцієнт відбиття зростає. Якщо ж збільшити $Wa1$ до 9,62 мм, то в S-діапазоні резонанс розташовується на частоті 2,5 ГГц і складає -25,2 дБ, в Х-діапазоні – -16,2 дБ на частоті 9,8 ГГц. Зі збільшенням $Wa2$ до 6,24 мм в S-діапазоні резонанс зміщується на 2,5 ГГц з коефіцієнтом

відбиття у -26 дБ, в Х-діапазоні відбувається зсув на 10,1 ГГц зі значенням -12 дБ. Збільшуючи Wa1 в обох частотних діапазонах відбувається зменшення коефіцієнта відбиття, порівнюючи з графіками за початкового значення, проте зі збільшенням Wa2, резонанс в S-діапазоні глибшає, відповідно зменшується коефіцієнт відбиття, а в Х-діапазоні слабшає, що відрізняється за характером зміни графіків при зміні Wa1.

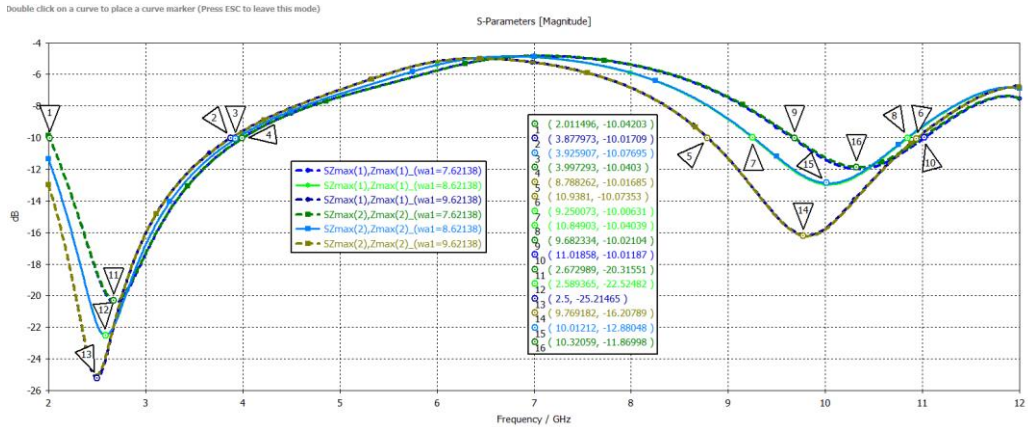


Рисунок 2.6.3 – Вплив зміни висоти верхнього шару air spacer на коефіцієнт відбиття структури в ТЕ і ТМ поляризації.

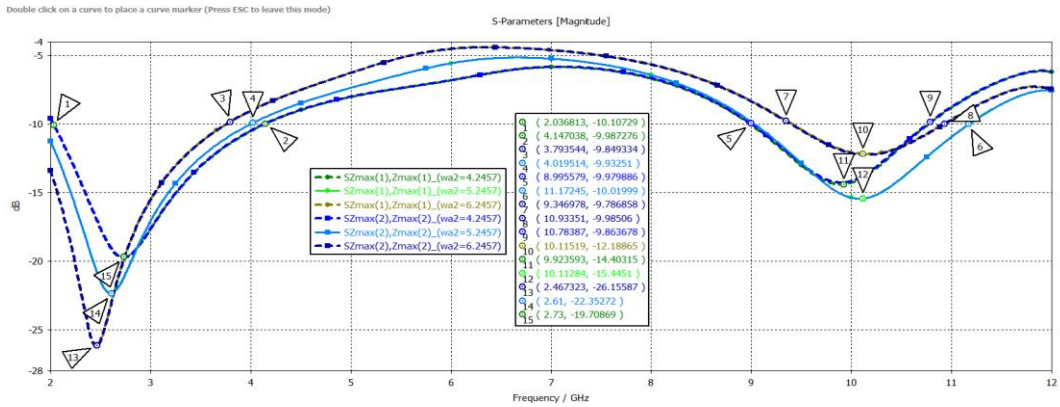


Рисунок 2.6.4 – Вплив зміни висоти нижнього шару air spacer на коефіцієнт відбиття структури в ТЕ і ТМ поляризації.

Отримані після оптимізації товщини підкладинок також є нестандартними. Найближчі можливі значення товщин підкладинок

Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

виконаних з матеріалу FR4 до отриманих - 0,6 мм і 0,8 мм. Отже, замінимо значення товщин обох підкладінок на стандартні.

Товщина верхньої підкладинки $Ws1$ після оптимізації складала 0,67 мм. Виконавши симуляції при вищенаведених стандартних значеннях бачимо, що зміна $Ws1$ здійснює певний вплив на резонанси в обох діапазонах (Рисунок 2.6.5). В S-діапазоні при значенні даного параметру 0,6 мм коефіцієнт відбиття складає -22,5 дБ на частоті 2,63 ГГц, при значенні 0,8 мм пік змістився на частоту 2,49 ГГц і значення коефіцієнта відбиття складає -24 дБ. В Х-діапазоні ж вплив є більш значним. Так при $Ws1=0,8$ мм смуга, яка задовольняє умови достатнього поглинання складає 9,3 ГГц - 10,1 ГГц, в той час як при $Ws1=0,8$ мм - 9,2 - 11,4 ГГц. Значення 0,6 мм все ж є ближчим до отриманого під час оптимізації для $Ws1$ і покриває необхідним поглинанням обидві заявлені смуги.

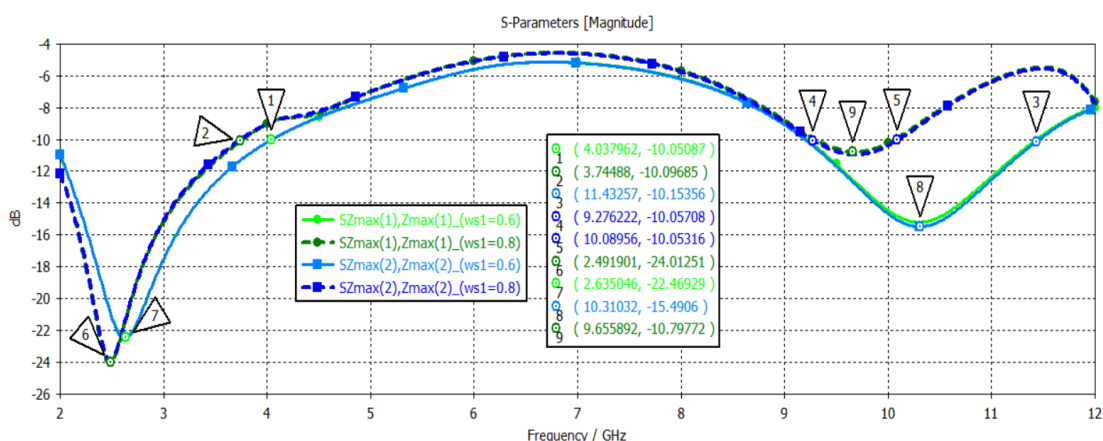


Рисунок 2.6.5 – Вплив зміни товщини верхньої підкладинки на коефіцієнт відбиття структури в ТЕ і ТМ поляризації.

Якщо ж розглядати товщину нижньої підкладинки $Ws2$, то ближчим до отриманого значення під час оптимізації у 0,75 мм є 0,8 мм. Проте, вплив товщини в даному випадку є не таким значним в обох діапазонах. В S-діапазоні резонанси отримані як при значенні $Ws2$ у 0,6 мм, так і у 0,8 мм накладаються. Щодо Х-діапазону то тут все ж маємо певну різницю. При

$Ws2=0,6$ мм смуга що задовольняє умови складає 9,4 - 10,7 ГГц, при значенні у 0,8 мм ця смуга еквівалентна 9 - 11,1 ГГц. Отже, все ж кращі характеристики отримані при значенні $Ws2$ у 0,8 мм.

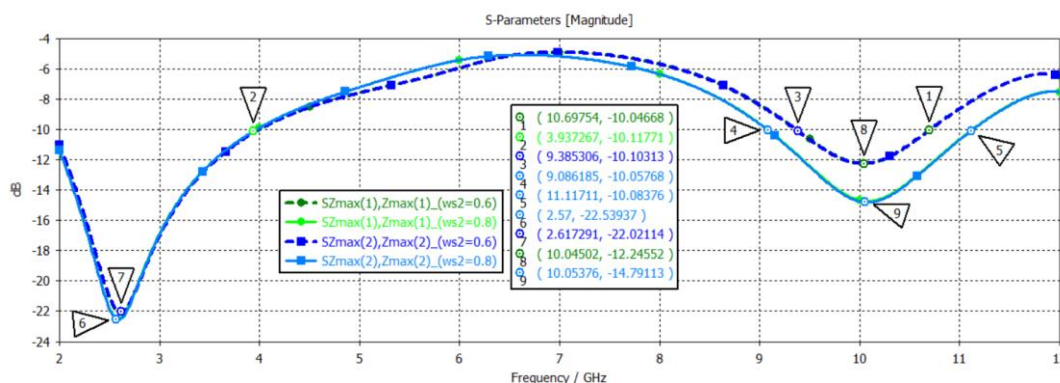


Рисунок 2.6.6 – Вплив зміни товщини нижньої підкладки на коефіцієнт відбиття структури в TE і TM поляризації.

Замінімо водночас параметри $Ws1$, $Ws2$, $R1$, $R2$ на реальні і поглянемо на зміну характеристик поглинання структури при їх одночасній зміні. Матимемо такі значення: $Ws1=0,6$ мм, $Ws2 = 0,8$ мм, $R1 = 442$ Ом, $R2 = 91$ Ом. При TE і TM поляризаціях і куту падіння ЕМ хвилі 0° отримуємо дві смуги, в яких виконуються поставлені умови - 1,9 - 3,9 ГГц і 9,52 - 11 ГГц (Рисунок 2.6.7, 2.6.8). В Х-діапазоні необхідна смуга частот не перекривається достатніми характеристиками поглинання структури, адже частотний діапазон випромінювання SAR починається з частоти рівної 9,2 ГГц, а в даному випадку отримуємо необхідне покриття з 9,52 ГГц. При кутах падіння ЕМ хвилі 25° і 40° і при TE поляризації коефіцієнт відбиття зростає в S-діапазоні і спадає в Х-діапазоні. Так в першому діапазоні при кутах 0° , 25° і 40° коефіцієнт відбиття складає -22,4 дБ, -17,1 дБ і -12,5 дБ відповідно, в другому ж діапазоні -12,3 дБ, -18,1 дБ і -20,2 дБ. При TM поляризації в S-діапазоні ще спостерігається певна залежність змін резонансу від зміни кута падіння ЕМ хвилі, а в Х-діапазоні починають з'являтися спотворення. При кутах всіх кутах

падіннях при яких відбувалась симуляція в S-діапазоні отримуємо смуги що покривають необхідні, в X-діапазоні ж цілком смугу перекриває лише результат отриманий при куті падіння ЕМ хвилі у 40° - 8,8 ГГц - 10,4 ГГц. При куті падіння 25° смуга в якій виконуються умови починається, як і при 0° , з 9,5 ГГц, що на 0,3 ГГц перевищує початок необхідного.

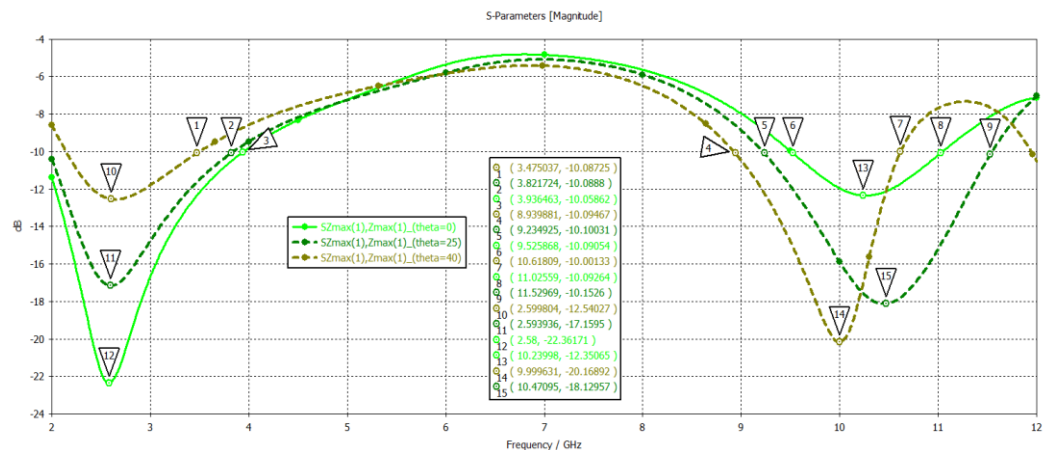


Рисунок 2.6.7 – Вплив одночасної зміни W_{s1} , W_{s2} , R_1 , R_2 на коефіцієнт відбиття структури при ТЕ поляризації

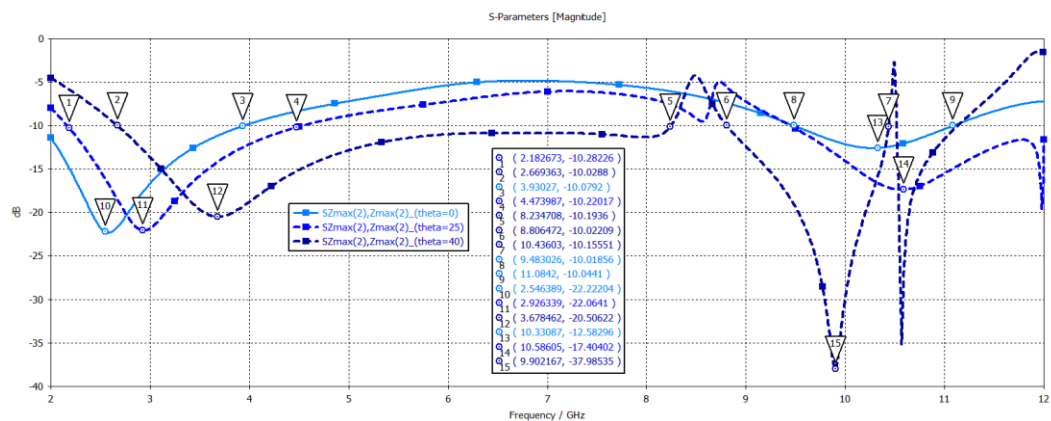


Рисунок 2.6.8 – Вплив одночасної зміни W_{s1} , W_{s2} , R_1 , R_2 на коефіцієнт відбиття структури при ТМ поляризації

Перевіримо чутливість структури до зміни параметру g , що відповідає за посадкове місце під резистор. Змінюючи ширину g , більший вплив спостерігається все ж у X-діапазоні. Так зі зменшенням g резонанс глибшає в

Х-діапазоні. При обраному геометричному розмірі у 0,5 мм – коефіцієнт відбиття рівний -22,3 дБ, а при 0,3 мм – -24,5 дБ. Відповідно, зі збільшенням розміру цього проміжку резонанс слабшає і при значенні 0,7 мм коефіцієнт відбиття структури рівний -21 дБ. В S-діапазоні маємо протилежну картину. Зі зменшенням g спадає і глибина резонансу. При $g=0,5$ мм коефіцієнт відбиття складає -15,4 дБ, при $g=0,3$ мм – -10 дБ і при $g=0,7$ мм – -25 дБ.

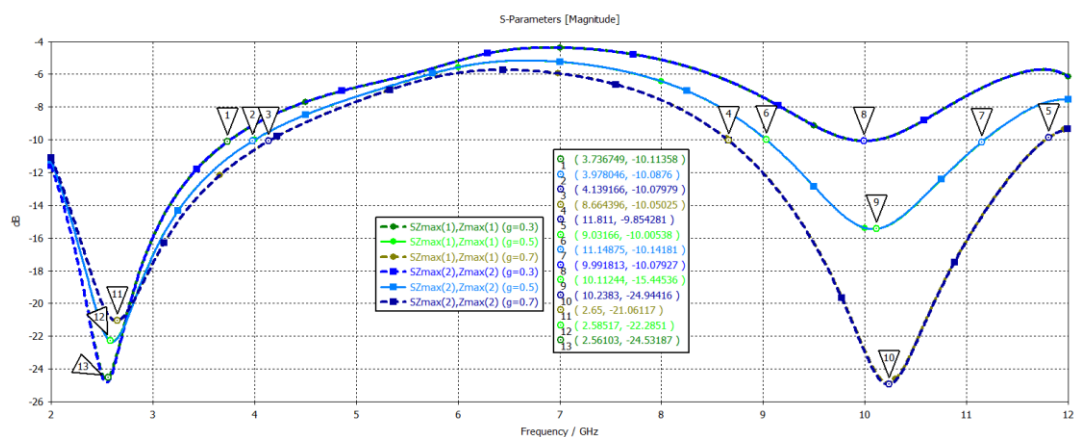


Рисунок 2.6.9 – Вплив зміни g на коефіцієнт відбиття структури при ТЕ і ТМ поляризації.

3 Створення структури одиничної комірки поглинача на основі заповнення з полікарбонатних honeycombs.

3.1 Проєктування і симуляція комірки з шестикутними honeycombs.

Для створення структури з прошарками у вигляді полікарбонатних honeycombs модифікуємо комірку, яку було отримано в результаті одночасної оптимізації для кутів падіння ЕМ хвилі 0° і 50° вищенаведеного поглинача з прошарками у вигляді air spacer. Шари повітря, які розташовуються між підкладками і металевою поверхнею замінимо на структуру honeycombs (Рисунок 3.1.1). Розміри комірки наведені в таблиці 8.

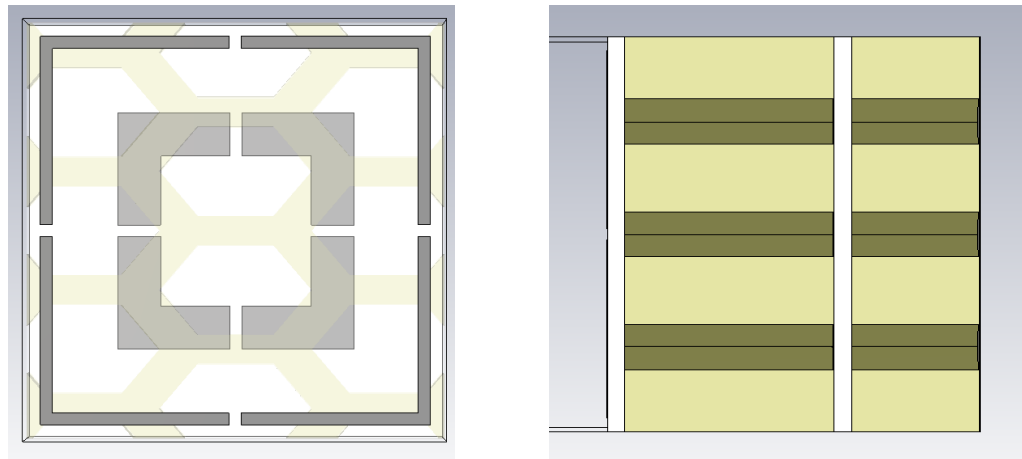


Рисунок 3.1.1 – Структура комірки на основі honeycombs

Таблиця 8

L1, мм	l1, мм	L2, мм	l2, мм	g, мм	a, мм
16,3	15,8	10	8,17	0,5	17,48
Wh1, мм	Ws1, мм	Wh2, мм	Ws2, мм	R1, Ом	R2, Ом
8,62	0,67	5,25	0,75	448,6	88

Соти, розташовані в якості прошарків між підкладками (рис. 3.1.2), виконуються за допомогою 3Д друку або ж лиття з полікарбонату, адже ці

варіанти виконання є одними з найпростіших і найбюджетніших для виконання.

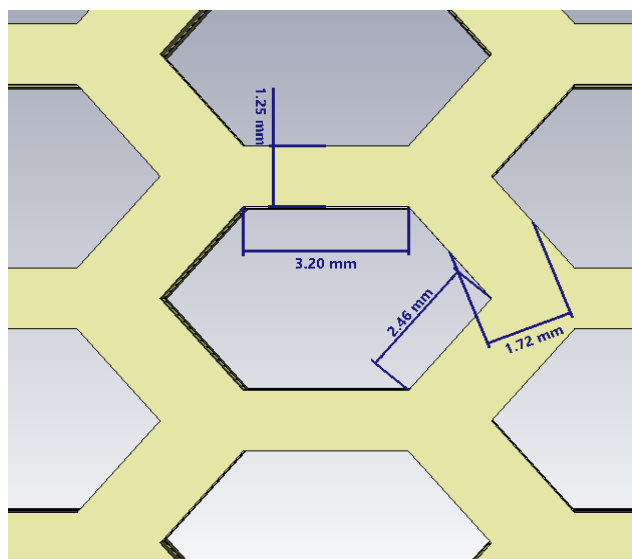


Рисунок 3.1.2 – Геометрія структури honeycombs

При ТЕ поляризації як в S-діапазоні, так і в X-діапазоні, коефіцієнт відбиття досягає умови у -10 дБ в смугах до 3,37 ГГц і 8,2 – 10,76 ГГц відповідно, при кутах падіння до 25° включно, відповідно, в цій ж смузі спостерігається коефіцієнт поглинання ЕМ енергії що перевищує 90% (Рисунок 3.1.3, 3.1.4). При куті 40° в першому діапазоні спостерігається переміщення резонансу в бік нижчих частот, через що коефіцієнт відбиття не досягає достатнього рівня в необхідній смузі, а другий резонанс слабшає і водночас звужується до смуги 8,2 - 10 ГГц, що знову ж не перекриває необхідну смугу в X-діапазоні, де буде досягнуто рівня поглинання у 90%. Також зі збільшенням кута падіння ЕМ хвилі спостерігається послаблення резонансів. Так при куті падіння ЕМ хвилі в 0° резонанси в S- і X-діапазонах складали -24,9 дБ і -19,5 дБ відповідно, а при куті падіння 40° – -13,5 дБ і -17,3 дБ.

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

Лист
65

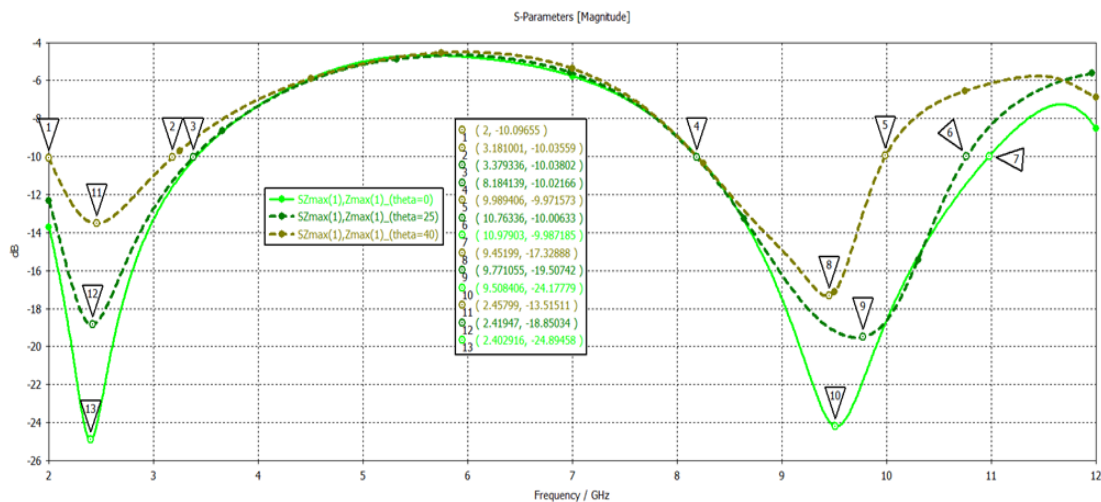


Рисунок 3.1.3 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням honeycombs при падінні ЕМ хвилі під кутами 0°, 25°, 40° при ТЕ поляризації

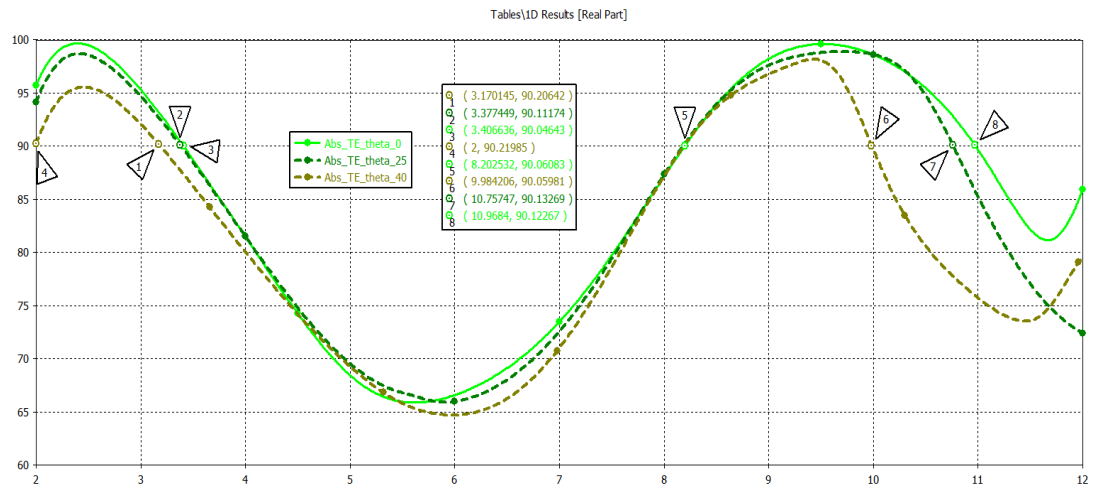


Рисунок 3.1.4 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутами 0°, 25°, 40° для ТЕ поляризації

При ТМ поляризації в S-діапазоні спостерігається зміщення і поглиблення резонансів за рахунок їх частотного розширення зі збільшенням кутів падіння ЕМ хвилі, відповідно і розширення смуги, де спостерігатиметься поглинання що перевищує 90% (Рисунок 3.1.5, 3.1.6). Так при куті падіння 0° маємо значення коефіцієнта відбиття у -25,6 дБ на піку резонансу на частоті 2,38 ГГц, в той час як при куті падіння 25° пік змістився на частоту 2,57 ГГц і складає -32 дБ. В Х-діапазоні в свою чергу зі збільшенням кута падіння ЕМ

хвилі зростають спотворення. При куті падіння 25° не дивлячись на спотворення графіку, відбиття цілком задовольняє умови у -10 дБ в смузі 8,47 – 11,43 ГГц, а для кута 45° вони вже надто значні і основний резонанс, фактично, зникає під їх впливом.

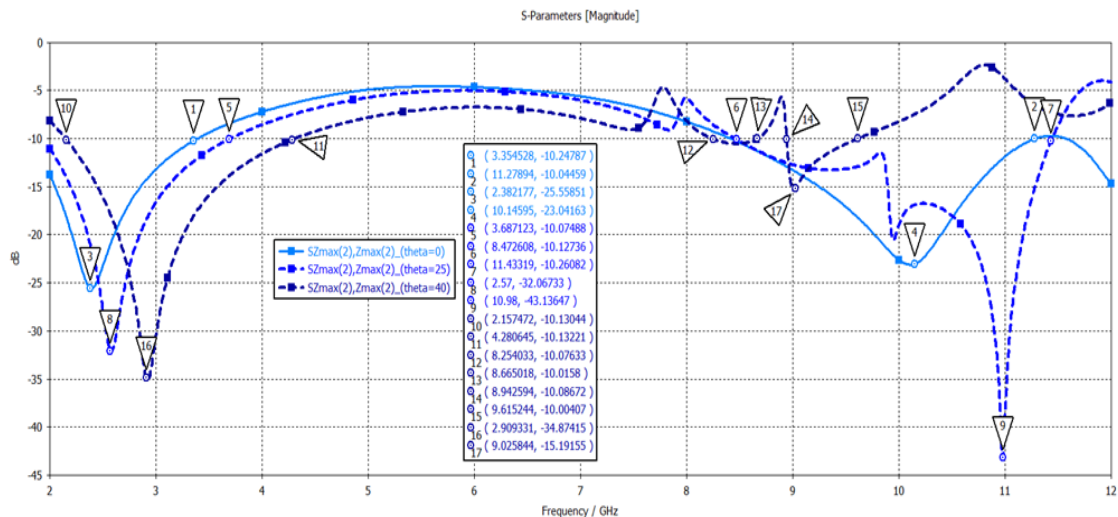


Рисунок 3.1.5 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням honeyscombs при падінні ЕМ хвилі під кутами 0° , 25° , 40° при ТМ поляризації

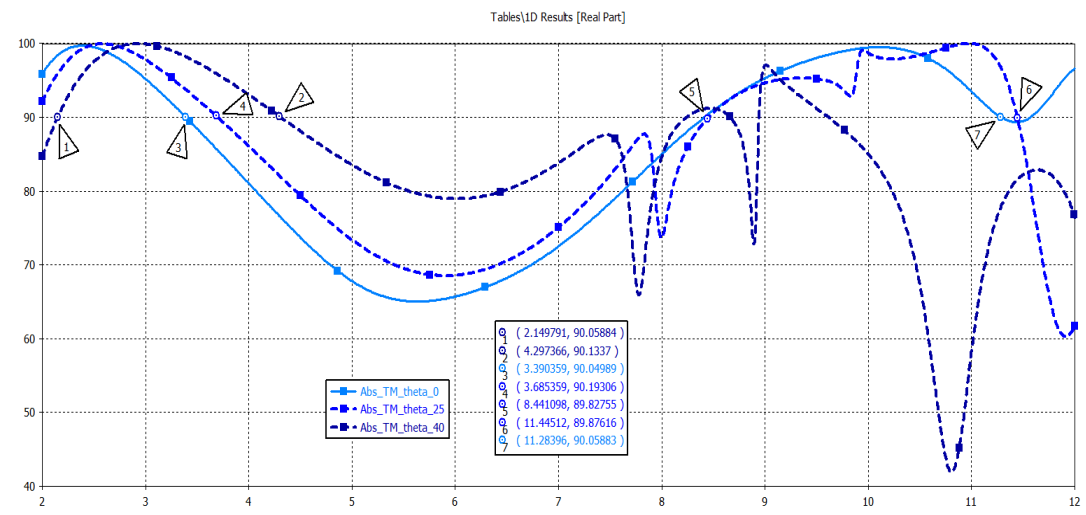


Рисунок 3.1.6 – Відсоток поглинання при падінні ЕМ хвилі під кутами 0° , 25° , 40° для ТМ поляризації

Загальні кінцеві результати після заміни прошарків air spacer на honeyscombs наведені в таблиці 9

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

Лист
67

Таблиця 9. Робочі частотні смуги при різних кутах падіння ЕМ хвиль для структури з шестикутними honeyscombs розміром 3,2 x 2,5 мм.

Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
Theta = 0°	1,8 – 3,4	1,8 – 3,35	8,2 – 10,9	8,5 – 11,3
Theta = 25°	1,8 – 3,4	2 – 3,7	8,2 – 10,7	8,5 – 11,4
Theta = 40°	2 – 3,2	2,15 – 4,3	8,2 – 10	8,9 – 9,6

Дослідимо вплив на результат поглинання при куті падіння ЕМ хвилі в 0°, змінивши розміри одиниці сот (рис. 3.1.7)

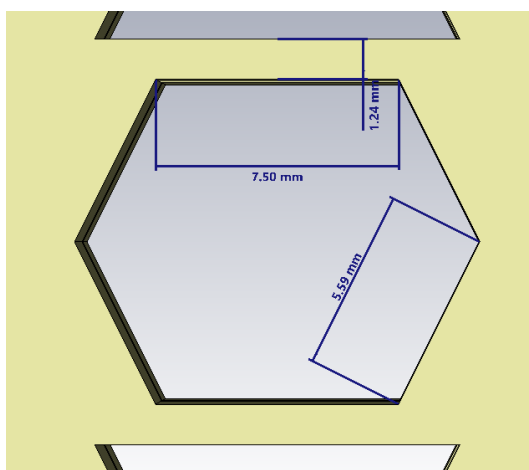


Рисунок 3.1.7 – Геометрія структури honeyscombs після збільшення розмірів одиниці сот

Збільшивши розміри сот, в S-діапазоні при ТЕ поляризації резонанс змістився за межі необхідного за умов. Так в даному випадку його права межа перетинає -10 дБ на частоті 3,06 ГГц, що не покриває навіть частину необхідного діапазону у 3,1 – 3,3 ГГц (Рисунок 3.1.5). Проте, при ТМ поляризації в цьому ж діапазоні зі збільшенням кута розширюється і резонанс

(Рисунок 3.1.6). Так при куті падіння ЕМ хвилі 0° коефіцієнт відбиття задовольняв необхідні умови для достатнього поглинання в смузі частот орієнтовно 1,8 – 3,14 ГГц, а вже при куті 45° від 2 ГГц до 3,9 ГГц. В Х-діапазоні при ТЕ поляризації зі збільшенням кута падіння резонанс починає зникати. В той час як кут падіння еквівалентний 0° , коефіцієнт відбиття мінімальний структури складає -25,3 дБ, а при куті 45° це число збільшується до -12 дБ, відповідно відбиття зросло майже вдвічі. При ТМ поляризації в даному діапазоні резонанс для 0° вужчий в порівнянні з результатами симуляції меншої структури сот, і складає 8 – 10,26 ГГц, що не перекриває необхідного частотного діапазону цілком. І зі збільшенням кута падіння ЕМ хвилі резонанс втрачає глибину і ширину, за рахунок спотворень, які починають виникати.

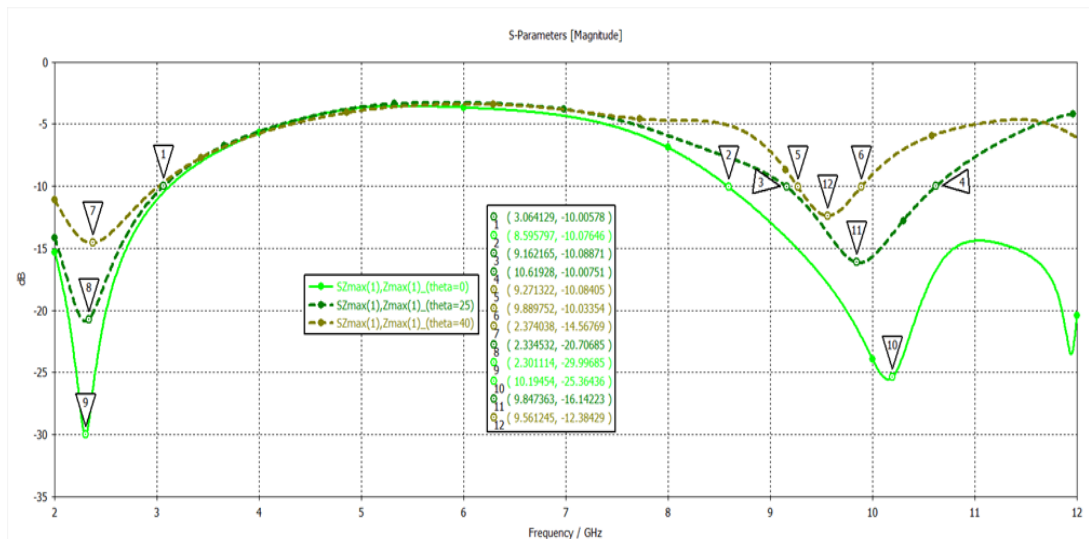


Рисунок 3.1.5 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням збільшених honeycombs при ТЕ поляризації

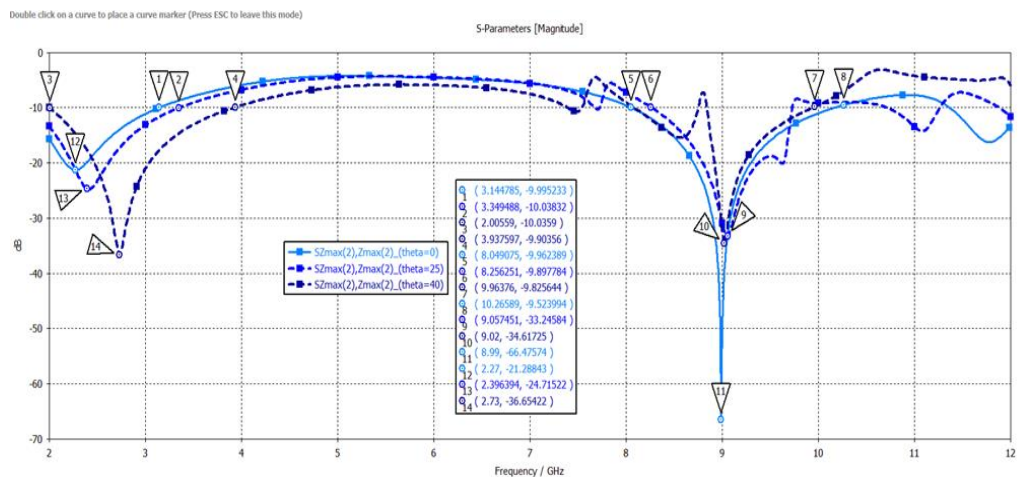


Рисунок 3.1.6 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням збільшених honeycombs при ТМ поляризації

Загальні кінцеві результати після зміни розмірів honeycombs наведені в таблиці 10

Таблиця 10. Робочі частотні смуги при різних кутах падіння ЕМ хвиль для структури з шестикутними honeycombs розміром 7,5 x 5,6 мм.

Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
Theta = 0°	1,8 – 3,1	1,8 – 3,1	8,2 – 10,9	8 – 10,25
Theta = 25°	1,8 – 3,1	1,8 – 3,3	8,2 – 10,7	8,2 – 10
Theta = 40°	1,8 – 3,1	2 – 3,9	8,2 – 10	8 – 10

Так як зміна геометричних розмірів комірки не покращила ситуацію для досягнення структурою необхідного поглинання, дослідимо вплив на характеристики поглинання після зміни форми honeycombs. З шестикутної соти, спробуємо виконати квадратну (рис. 3.1.7), адже, якщо результати отримані під час симуляції виявляться достатніми для забезпечення умов, ця

форма може забезпечити ще більшу простоту і економічність при виготовленні структури (рис. 3.1.8).

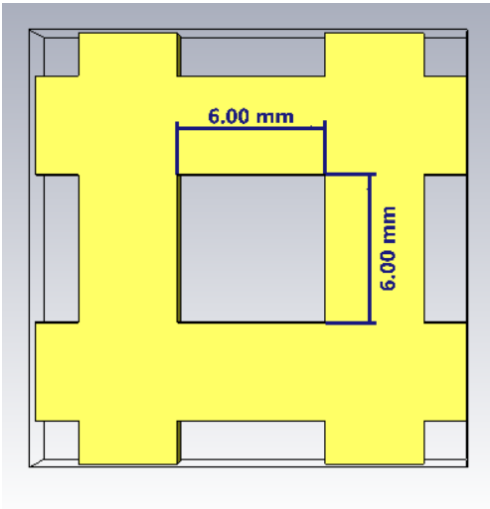


Рисунок 3.1.7 – Геометрія структури квадратних honeycombs

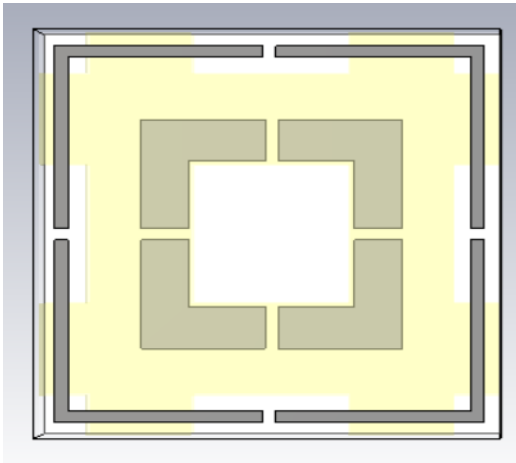


Рисунок 3.1.8 – Вигляд структури з квадратними honeycombs в якості розділювальних прошарків

При ТЕ поляризації при всіх просимульованих кутах падіння ЕМ хвилі, таких як 0°, 25° і 40°, діапазон частот першого резонансу, в якому виконуються умови ефективного поглинання, згадані раніше, закінчується на частоті 3 ГГц, що не покриває і частини необхідного в S-діапазоні (Рисунок 3.1.9). В Х-діапазоні ж при 0° смуга, де коефіцієнт відбиття є достатнім, складає 7,9 – 10,5 ГГц, що задовольняє згаданий в умовах діапазон, при 25° – 8,2 ГГц – 9,8 ГГц,

що вже не охоплює 0,6 ГГц діапазону випромінювання супутникового SAR, і при 40° смуга є 8,4 – 9,3 ГГц, що охоплює всього 0,1 ГГц з необхідних 1,2 ГГц.

При ТМ поляризації в S-діапазоні спостерігається зсув резонансу в частотній області. Так при куті падіння ЕМ хвилі у 0° частота де закінчується область в якій виконуються необхідні умови складає 2,9 ГГц, для 25° – 3,16 ГГц і для 40° – 3,5 (Рисунок 3.1.10). Відповідно, забезпечення необхідних умов у смузі 3,1 – 3,3 ГГц виконується лише при куті 40° в першому частотному діапазоні. Щодо Х-діапазону результат зворотній, при кутах падіння 0° і 25° отримуємо смуги 7,9 – 10,6 ГГц і 9 – 10,6 ГГц відповідно, де виконуються умови ефективного поглинання і перекривається необхідна друга смуга. При куті падіння ЕМ хвилі в 40° така смуга складає 8,2 – 9,2 ГГц, що не задовольняє необхідний частотний діапазон.

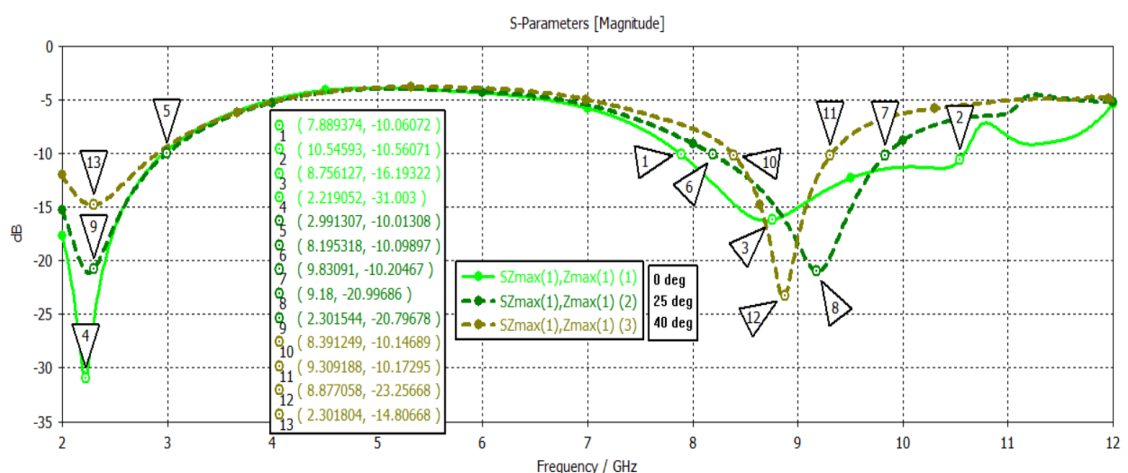


Рисунок 3.1.9 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням квадратних honeycombs при ТЕ поляризації

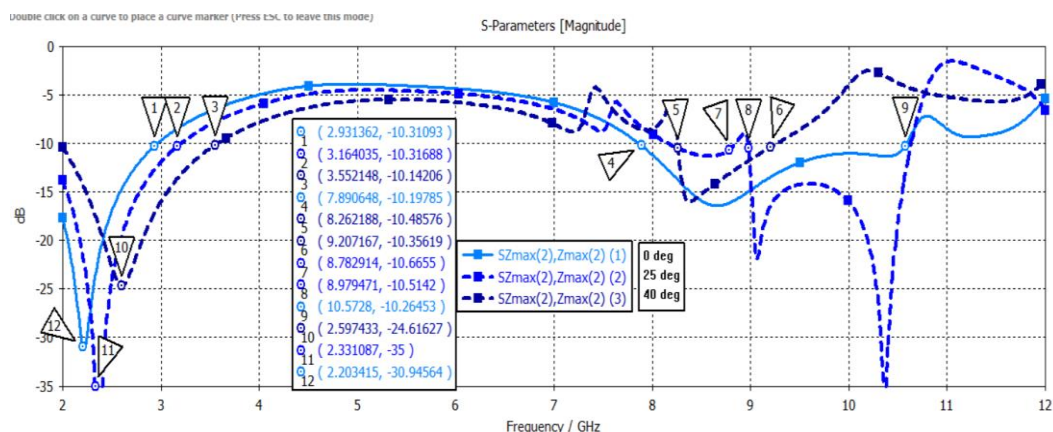


Рисунок 3.1.10 – Коефіцієнт відбиття структури з використанням квадратних honeycombs при ТМ поляризації

Загальні кінцеві результати після зміни геометричної форми honeycombs наведені в таблиці 11

Таблиця 11. Робочі частотні смуги при різних кутах падіння ЕМ хвиль для структури з квадратними honeycombs розміром 6 x 6 мм.

Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
Theta = 0°	1,8 – 3	1,7 – 2,9	7,9 – 10,5	7,9 – 10,5
Theta = 25°	1,8 – 3	1,8 – 3,2	8,2 – 9,8	9 – 10,5
Theta = 40°	1,8 – 3	2 – 3,55	8,4 – 9,3	8,3 – 9,2

Змінимо розміри квадратних сот, щоб дослідити який вплив на характеристики поглинання структури здійснює їх збільшення і зменшення. Як при ТЕ, так і при ТМ поляризаціях в S-діапазоні спостерігається послаблення резонансу зі зміною розміру сот (Рисунок 3.1.11). Так при поперечних розмірах комірки сот в 6 мм коефіцієнт відбиття складає -31 дБ, при розмірі в 3 мм – -24,1 дБ і при 12 мм – -28,7 дБ. Проте смуга, що

розташовується в цьому діапазоні закінчується на 3 ГГц в усіх трьох випадках, що не перекриває необхідну смугу в якій здійснюється випромінювання SAR. Щодо Х-діапазону отримуємо спотворення, при зміні розміру, у вигляді умовно другого резонансу. В такому випадку смуги при розмірах сот 6 мм, 3 мм і 12 мм складають 7,9 – 10,5 ГГц, 8,6 – 11,7 ГГц і 8,3 – 10,5 ГГц відповідно.

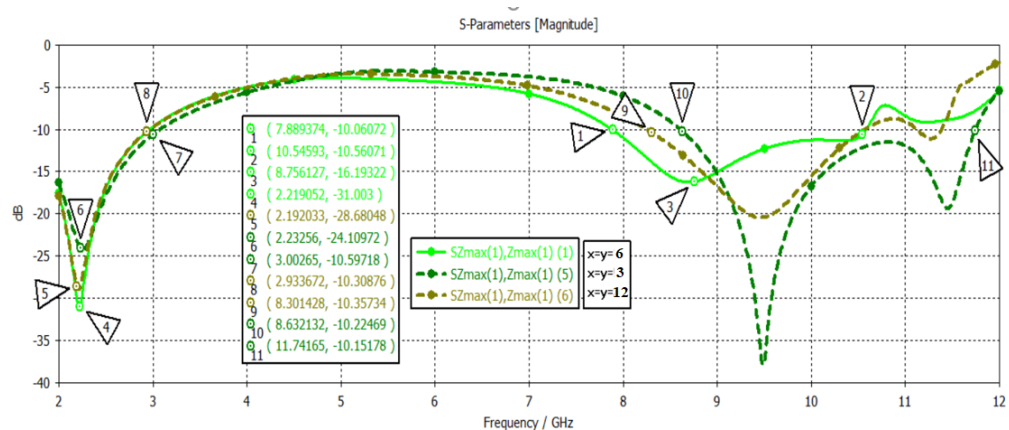


Рисунок 3.1.11 – Коефіцієнт відбиття структури при зміні розмірів квадратних honeycombs при TE s TM поляризаціях

Загальні кінцеві результати після зміни розмірів honeycombs при куті падіння ЕМ хвилі в 0° наведені в таблиці 12

Таблиця 12. Робочі частотні смуги при різних розмірах квадратних honeycombs при куті падіння ЕМ хвилі в 0°

Розмір honeycombs	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
6 x 6	1,8 – 3	1,8 – 3	7,9 – 10,5	7,9 – 10,5
3 x 3	1,8 – 3	1,8 – 3	8,6 – 11,7	8,6 – 11,7
12 x 12	1,8 – 2,9	1,8 – 2,9	8,3 – 10,5	8,3 – 10,5

Також врахуємо те, як впливатиме зміна діелектричної проникності матеріалу, з якого виконано honeyscombs (Рисунок 3.1.7, 3.1.8). При ТЕ поляризації в S-діапазоні відбуваються невеликі зміни в ширині резонансу. Так при стандартній діелектричній проникності полікарбонату в 2,9 коефіцієнт відбиття перетинає межу в -10 дБ на частоті 3,4 ГГц, при $\epsilon = 2,4$ на частоті 3,5 ГГц і при значенні в 3,4 – 3,26 ГГц. В Х-діапазоні спостерігається значний вплив на зміну коефіцієнта відбиття структури. Так при $\epsilon = 2,9$ коефіцієнт відбиття складає -24,1 дБ, при значенні в 2,4 отримуємо -36,7 дБ і при $\epsilon = 3,4$ отримуємо відбиття у -20,7 дБ. Щодо ТМ поляризації, то в першому діапазоні маємо ідентичну картину до характеристик отриманих при ТЕ поляризації. В другому діапазоні лише при значенні $\epsilon = 2,4$ відбулось зміщення резонансу на частоту 9,8 ГГц, в той час як інші два розташовані на частоті 10,1 ГГц.

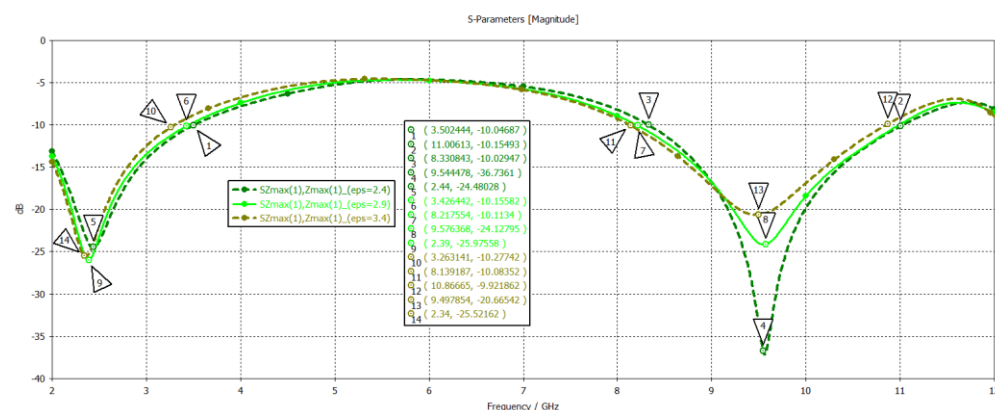


Рис. 3.1.7 – Вплив зміни діелектричної проникності матеріалу для виготовлення honeyscombs при ТЕ поляризації

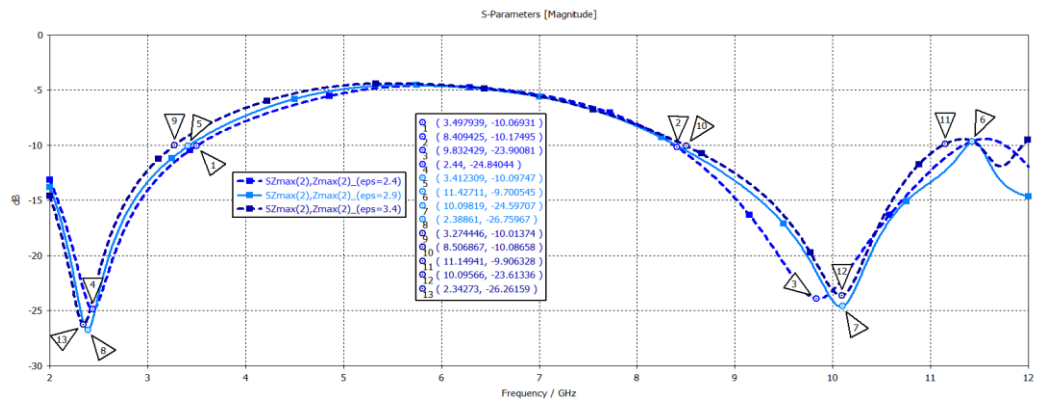


Рисунок 3.1.8 – Вплив зміни діелектричної проникності матеріалу для виготовлення honeycombs при ТМ поляризації

Отже, замінивши структуру air spacer на структуру honeycombs, без зміни розмірів параметрів, отримуємо результат, який не задовільняє необхідні умови при всіх вищеперелічених формах і розмірах сот. Проте, структура шестикутних сот забезпечує все ж кращі характеристики поглинання структури в порівнянні з квадратними в ідентичних умовах (Додаток).

Можна стверджувати, що доцільніше використовувати структури з досить невеликими сотами задля можливості перекриття необхідних діапазонів. Граничне значення кута падіння ЕМ хвилі, за якого структура, наведена вище (Рисунок 3.1.1), поглинає достатню кількість ЕМ енергії – 25°, що є гіршим майже в 1,6 рази в порівнянні зі структурою, в якій використовувались прошарки повітря. Проте, цей варіант є бюджетнішим і стійкішим, за рахунок геометрії самих сот.

4 Варіанти кріплення шарів комірки

4.1 Кріплення за допомогою металевого гвинта

Скріплення частин комірки разом можливе гвинтом, що проходитьиме крізь всю одиничну комірку по центру, щоб розташовуватись якнайдалі і з рівномірною відстанню від резонаторів. Гвинт фіксуватиметься на кінці зі сторони металу за допомогою гайки (рис. 4.1.1). Нижче наведені результати симуляції впливу металевої структури, діаметром 2 мм, з закріпкою зі сторони металізації комірки, діаметром 4 мм, що проходить всередині структури на одиничну комірку з прошарками сот.

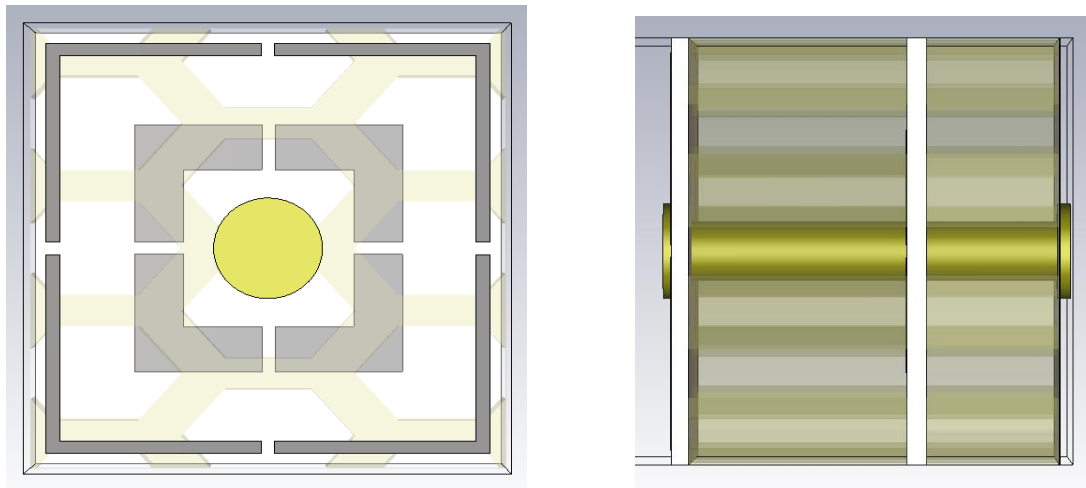


Рисунок 4.1.1 – Вигляд комірки з кріпленням

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PI1.423456.001 ПЗ

Лист
77

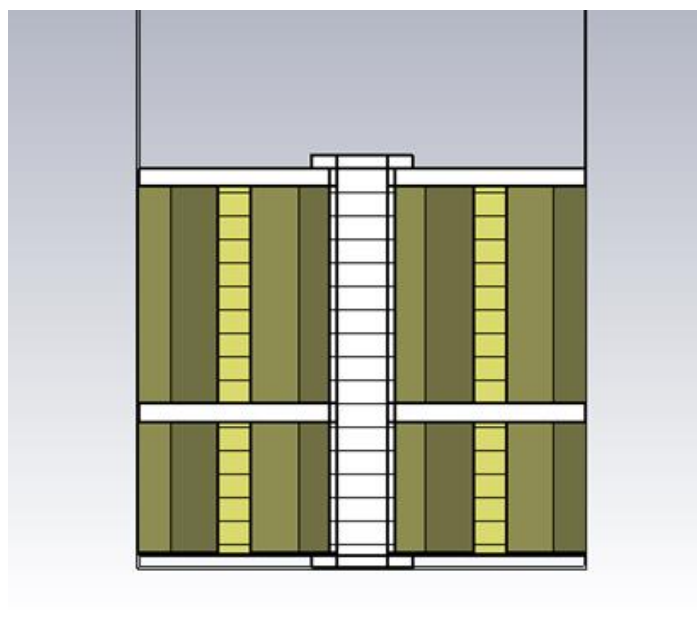


Рисунок 4.1.2 - Кріплення комірки у розрізі

При ТЕ поляризації структура з металевим гвинтом перекриває необхідні діапазони і графіки за поведінкою ідентичні до графіків структури без кріплень. Відповідно, невелика металева структура не змінює характеристики комірки при ТЕ поляризації (Рисунок 4.1.3).

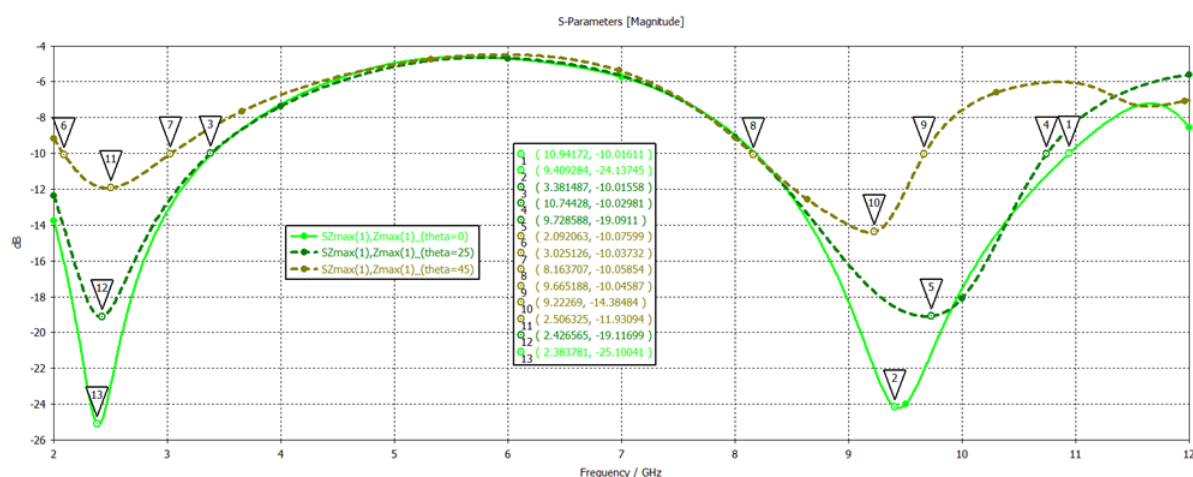


Рисунок 4.1.3 - Коефіцієнт відбиття структури скріпленої металевим гвинтом при ТЕ поляризації

При ТМ поляризації для всіх симульованих кутів падіння ЕМ хвилі таких як 0° , 25° і 45° необхідні умови відбиття, в S-діапазоні, виконуються в смугах

що покривають необхідну в 3,1 - 3,3 ГГц (Рисунок 4.1.4). Проте, розглядаючи Х-діапазон, необхідне відбиття вдалось отримати лише при куті падіння 0°.

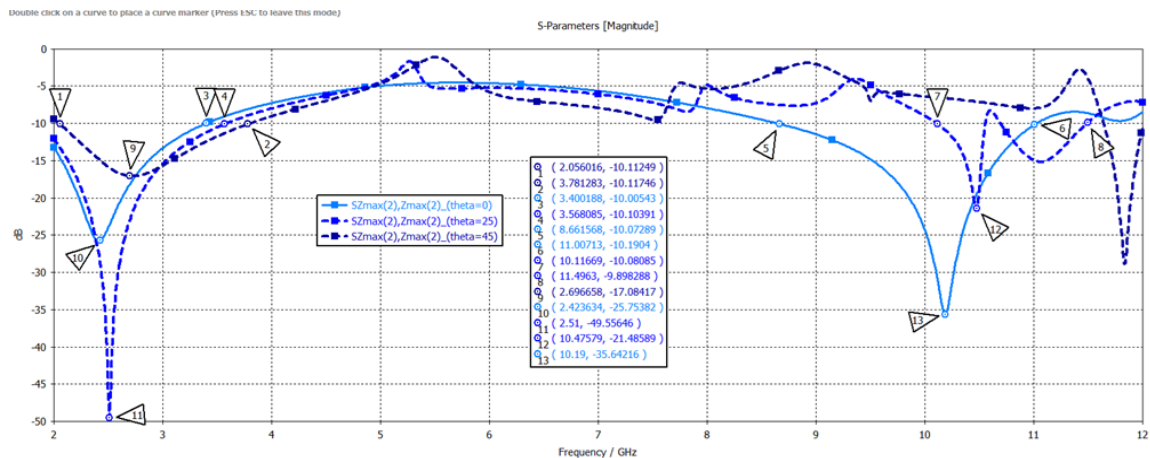


Рисунок 4.1.4 - Коефіцієнт відбиття структури скріпленої металевим гвинтом при ТМ поляризації

4.2 Кріплення за допомогою полікарбонатного гвинта

Схема кріплення в даному випадку ідентична до попередньої (Рисунок 4.1.1). Проте, гвинт виконано з полікарбонату як і соти, що розмежовують шари комірки.

Вигляд графіків при обох поляризаціях (Рисунок 4.2.1, 4.2.2) ідентичний до вигляду графіків для комірки без кріплення (рис. 4.1.3). Тому можна зробити висновок, що такий вид кріплення є оптимальнішим, завдяки тому, що матеріал не є провідником і не впливає на характеристики комірки, тому є можливість збільшення діаметру стержня за необхідності без здійснення впливу на характеристики поглинання структури.

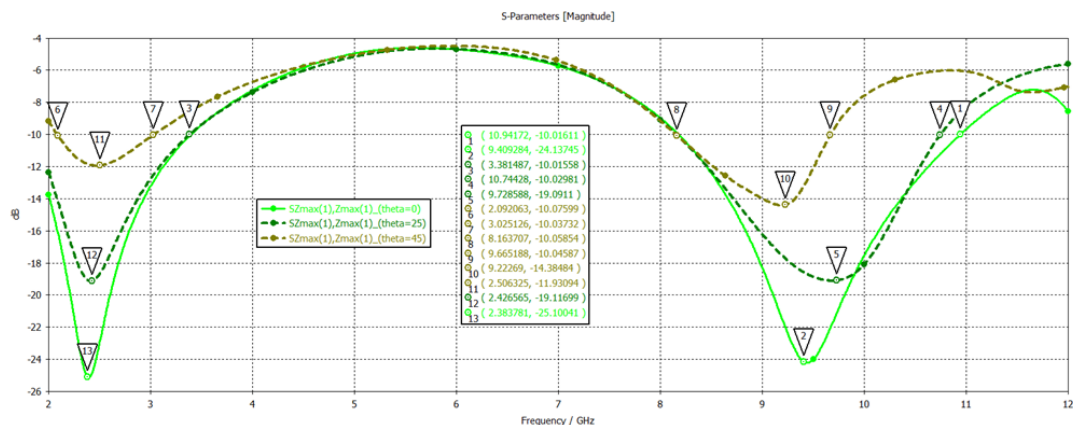


Рисунок 4.2.1 - Коефіцієнт відбиття структури скріпленої полікарбонатним гвинтом при ТЕ поляризації

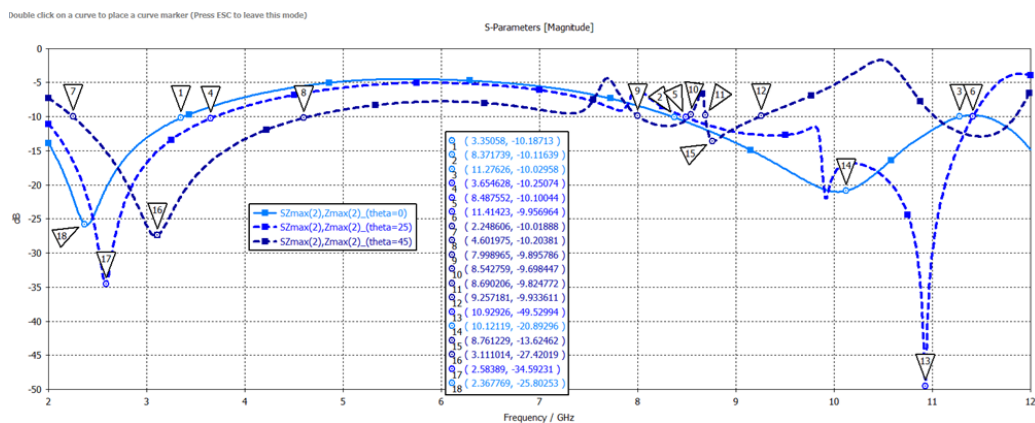


Рисунок 4.2.2 - Коефіцієнт відбиття структури скріпленої полікарбонатним гвинтом при ТМ поляризації

Висновки

1. Отримана структура двошарового поглинача для діапазонів частот 3,1 – 3,3 і 9,2 – 10,4 ГГц, забезпечує коефіцієнт відбиття менше -10 дБ (поглинання 90% потужності) в межах кутів падіння 0 – 40° для обох поляризацій, за умови що прошарки є повітряними, при заміні прошарків полікарбонатними сотами в межах 3,1 – 3,3 і 9,2 – 10,4 ГГц можна отримати коефіцієнт відбиття у -10 дБ лише за умов кута падіння ЕМ хвилі до 25°
2. Проведено дослідження чутливості параметрів поглинача до зміни геометричних розмірів і встановлено, що чутливість до зміни товщини повітряного шару. в межах 1 мм є незначною, параметр Ws_2 може змінюватись в межах 0,6 – 0,8 мм і при цьому умови ТЗ все ще задовольняються, на відміну від Ws_1 , де зміна параметру в ідентичних межах впливає на виконання умов ТЗ в Х-діапазоні. Параметр R_1 і R_2 , що відповідають опорам резисторів на верхній і нижній підкладинках відповідно, також не вносять значних змін у характеристики поглинання структури і забезпечують коефіцієнт відбиття у -10 дБ в межах 3,1 – 3,3 і 9,2 – 10,4 ГГц.
3. Досліджено шестикутні і квадратні соти, що мають в реальному пристрої замінити повітряні прошарки. Рекомендовано використовувати шестикотні соти з розмірами 3,2 x 2,46 мм, які без зміни параметрів структури забезпечують роботу в дещо меншому діапазоні частот: 2 – 3,2 ГГц і 8,2 – 10 ГГц при ТЕ поляризації і 2,15 – 4,3 ГГц, 8,9 – 9,6 ГГц при ТМ поляризації при куті падіння ЕМ хвилі у 40°. Умови ТЗ щодо коефіцієнта відбиття у менше ніж -10 дБ в межах діапазонів 3,1 – 3,3 і 9,2 – 10,4 ГГц вдається забезпечити лише при кутах падіння ЕМ хвилі до 25°.

4. Для з'єднання сот і друкованих плат з рисунком поглинача рекомендовано використовувати пластиковий гвинт, що вносить менше спотворення в порівнянні з металевим.

					<i>PI1.423456.001 ПЗ</i>	Лист
						82
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- [1] Christophe. Caloz and Tatsuo. Itoh, *Electromagnetic metamaterials : transmission line theory and microwave applications : the engineering approach*. John Wiley & Sons, 2006.
- [2] W. J. Padilla and K. Fan, “Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers,” *Synthesis Lectures on Electromagnetics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–199, Jan. 2022, doi: 10.2200/s01133ed1v01y202109ema004.
- [3] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, D. Chaurasiya, and K. V. Srivastava, “An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 14, pp. 1172–1175, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2015.2396302.
- [4] 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,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 122, no. 2, pp. 1–6, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00339-016-9597-6.
- [5] T. Sy Tuan and N. T. Q. Hoa, “Defect induced co-polarization broadband metamaterial absorber,” *AIP Adv*, vol. 9, no. 5, May 2019, doi: 10.1063/1.5097198.
- [6] F. Ahmed, M. Khan, and F. Tahir, “A Multifunctional Polarization Transforming Metasurface for C-, X-, and K-Band Applications,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 11, pp. 2186–2190, Nov. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3065717.
- [7] X. Zhang, H. Liu, and L. Li, “Electromagnetic power harvester using wide-angle and polarization-insensitive metasurfaces,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8040497.

- [8] S. Ghosh and K. V. Srivastava, “An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 14, pp. 511–514, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2369732.
- [9] T. T. Nguyen and S. Lim, “Wide Incidence Angle-Insensitive Metamaterial Absorber for Both TE and TM Polarization using Eight-Circular-Sector,” *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-03591-2.
- [10] H. Yang, X. Cao, J. Gao, W. Li, Z. Yuan, and K. Shang, “LOW RCS METAMATERIAL ABSORBER AND EXTEND-ING BANDWIDTH BASED ON ELECTROMAGNETIC RESONANCES,” 2013.
- [11] S. Ghosh and K. V. Srivastava, “A Polarization-Independent Broadband Multilayer Switchable Absorber Using Active Frequency Selective Surface,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 3147–3150, Oct. 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2766100.
- [12] S. J. Li *et al.*, “Ultra-wideband and Polarization-Insensitive Perfect Absorber Using Multilayer Metamaterials, Lumped Resistors, and Strong Coupling Effects,” *Nanoscale Res Lett*, vol. 13, 2018, doi: 10.1186/s11671-018-2810-0.
- [13] G. Zhang, J. Gao, X. Cao, H. Yang, and L. Jidi, “An ultra-thin low-frequency tunable metamaterial absorber based on lumped element,” *Radioengineering*, vol. 28, no. 3, pp. 579–584, 2019, doi: 10.13164/re.2019.0579.
- [14] H. Sheokand *et al.*, “Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films,” *J Appl Phys*, vol. 122, no. 10, Sep. 2017, doi: 10.1063/1.5001511.
- [15] W. Zuo, Y. Yang, X. He, D. Zhan, and Q. Zhang, “A miniaturized metamaterial absorber for ultrahigh-frequency RFID system,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 329–332, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2574885.

- [16] C. Sudhendra, A. Pillai, and M. Karkrao, “A Novel 6 to 14 GHz. Thin Radar Absorber Based on Circular Resistive Patch FSS.”
- [17] L. Zhang, Y. Shi, J. X. Yang, X. Zhang, and L. Li, “Broadband transparent absorber based on indium tin oxide-polyethylene terephthalate film,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 137848–137855, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942141.
- [18] Q. Zhou *et al.*, “Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 125, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00339-019-2430-2.
- [19] Y. Li *et al.*, “Ultra-wideband, polarization-insensitive flexible metamaterial absorber base on laser printed graphene using equivalent circuit design method,” *Carbon N Y*, vol. 212, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.carbon.2023.118166.
- [20] T. K. T. Nguyen *et al.*, “Simple Design of a Wideband and Wide-Angle Insensitive Metamaterial Absorber Using Lumped Resistors for X-and Ku-Bands,” *IEEE Photonics J*, vol. 13, no. 3, Jun. 2021, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3085320.
- [21] X. Ma, F. Tian, X. Li, L. Guo, and X. Huang, “Broadband with enhanced oblique incidence metamaterial absorber,” *Mater Res Express*, vol. 7, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/abba9e.
- [22] 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, Sep. 2015, doi: 10.1117/1.oe.54.9.097102.

- [23] B. K. Kim and B. Lee, “Wideband absorber at X-band adopting trumpet-shaped structures,” *Electron Lett*, vol. 50, no. 25, pp. 1957–1959, Dec. 2014, doi: 10.1049/el.2014.2780.
- [24] M. Karaaslan, M. Bağmancı, E. Ünal, O. Akgöl, O. Altıntaş, and C. Sabah, “Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting,” *Opt Quantum Electron*, vol. 50, no. 5, May 2018, doi: 10.1007/s11082-018-1484-2.
- [25] X. Zhang *et al.*, “3-D Printed Swastika-Shaped Ultrabroadband Water-Based Microwave Absorber,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 19, no. 5, pp. 821–825, May 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.2981405.
- [26] S. Ghosh and S. Lim, “Perforated Lightweight Broadband Metamaterial Absorber Based on 3-D Printed Honeycomb,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 17, no. 12, pp. 2379–2383, Dec. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2876023.
- [27] W. Jiang *et al.*, “Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-23286-6.
- [28] Mohamad H. Development of the differential method associated with the Fast Fourier Factorization for the modelization of photonic device: from complex optical diffraction grating to guided integrated optic structure: dissertation. Doct. Sci. (Physics) / Habib Mohamad. – 2020. – 178 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/>... – Дата звернення: 03.06.2025.

[29] A. W. Doerry, “SAR data collection and processing requirements for high quality coherent change detection.” [Online]. Available:

<http://www.sandia.gov/radar>;

					<i>PI1.423456.001 ПЗ</i>	Лист
						87
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

форма т	Зона	Поз,	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітки
				<u>Документація загальна</u>		
		1	PI11.423456.001 ПЗ	Пояснювальна записка		
				<u>Документація графічна</u>		
A4		2	PI11.731234.001	Підкладинка верхня	1	
A4		3	PI11.731234.002	Підкладинка нижня	1	
A4		4	PI11.735467.001	Прошарок верхній	1	
				honeyscombs		
A4		5	PI11.735467.002	Прошарок нижній	1	
				honeyscombs		
A4		6	PI11.731234.001	Підкладинка верхня	1	
A4		7	PI11.731234.002	Підкладинка нижня	1	
A4		8	PI11.735467.001	Прошарок верхній	1	
				honeyscombs		

ДОДАТОК А

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проекту
к.т.н., доцент, Василенко Д.О.

(дата)

(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри
радіосистемної інженерії
Літвінцев С. М.

(дата)

(підпис)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА

ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ

«Дводіапазонний поглинач на основі
метаматеріалу»

1 НАЗВА І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Назва дипломного проекту «Дводіапазонний поглинач на основі метаматеріалу».

Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою радіоконструювання та виробництва радіоапаратури від «___»_____2025 р.

2 ВИКОНАВЕЦЬ

Виконавець — студентка групи РІ-11 Шкіндер Анастасія Іванівна.

3 МЕТА ВИКОНАННЯ ДП І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

Метою дипломного проекту є розробка дводіапазонного поглинача на основі метаматеріалу, який забезпечує коефіцієнт відбиття менше -10 дБ в частотних смугах $3,1-3,3$ ГГц (S-діапазон) та $9,2-10,4$ ГГц (X-діапазон) при кутах падіння електромагнітної хвилі до 40° включно.

У межах проекту передбачається створення геометрії одиначної комірки метаповерхні, макетування модуля поглинача, виготовлення друкованих плат та кріплення, а також оформлення необхідної конструкторської та технічної документації.

Пристрій призначений для поглинання більше 90% ЕМ енергії в діапазонах $3,1 - 3,3$ ГГц, $9,2 - 10,4$ ГГц.

4 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1 Призначення

Коефіцієнт відбиття: Менше -10 дБ;

Забезпечення функціонування в умовах зовнішніх впливів (температура, волога, механічне навантаження).

4.2 Надійності

Середній час безвідмовної роботи: не менше 1200 годин.

Імовірність безвідмовної роботи: 0,95.

Середній строк служби: не менше 1 року.

4.3 Конструкції

Конструкція поглинача базується на трирівневій метаструктурі з діелектричними прокладками типу «honeycombs».

Габаритні параметри, Ш×Д×В, не більше, мм: 35×35×22.

Маса: не більше 100 г.

4.4 Уніфікації і стандартизації

Використовувати уніфіковану та стандартизовану елементну та матеріальну базу.

4.5 Дизайну, ергономіки та технічної естетики

Прилад повинен мати вигляд пластини.

Колір корпусу може бути підібрано в залежності від місця експлуатації.

4.6 Експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту

Технічний обслуговування проводити 1 раз на пів року (перевірка кріплень).

4.7 Безпеки для життя, здоров'я і майна громадян та охорони довкілля

Керуватися положеннями стандартів про вимоги технічної безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки.

Утилізація згідно вимог для промислових відходів за ГОСТ 30773-2001.

4.8 Транспортування і зберігання

Умови транспортування згідно ГОСТ 16019-2001.

Зберігання: за ГОСТ 15150-69 за умови 1-Л.

4.9 Якості і технічного рівня

Відповідає світовому рівню.

5 ВИМОГИ ДО СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ І ПКВ

Вибір бюджетного матеріалу для прошарків.

6 ВИМОГИ ДО КОНСЕРВАЦІЇ, ПАКУВАННЯ І МАРКУВАННЯ

Маркування: не передбачено.

Пакування: апаратуру необхідно загорнути в бульбашко-повітряну плівку і помістити в картонну коробку.

Консервація: не передбачено.

7 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Оформлення документації згідно ДСТУ 3008:2015.

Склад конструкторської документації:

1. Текстова документація (пояснювальна записка, відомість проєкту).
2. Графічна документація загальним обсягом не менше 3 аркушів А3 (топология плат, креслення деталей конструкції).

7.1 Орієнтовний зміст дипломного проєкту:

Завдання на дипломний проєкт;

Зміст;

Вступ;

1. Огляд аналогів. Розробка та аналіз технічного завдання;
2. Вибір прототипів;
3. Проєктування та симуляція одиничної комірки поглинача;
4. Оптимізація розмірів одиничної комірки поглинача;
5. Розробка кріплення поглинача;

Висновки;

Перелік джерел посилань;

Додаток А Технічне завдання

Додаток Б Відомість дипломного проєкту

Додаток В Порівняння структур

8 СТАДІЇ І ЕТАПИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Робота виконується в 5 етапів.

№	Назва етапу	Термін виконання	Форма звітності
1	Огляд існуючих структур поглиначів на основі метаматеріалів	14.04-2.05	Розділ 1
2	Електродинамічна модель і оптимізація комірки поглинача з повітряними прошарками	2.05-16.05	Розділ 2
3	Електродинамічна модель і симуляція комірки поглинача з прошарками honeycombs	16.05 – 23.05	Розділ 2
4	Розробка кріплення прошарків поглинача в друкованої плати	23.05 – 06.06	Розділ 4
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	23.05 – 11.06	Розділ 5

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

1. Представлення проміжних результатів дипломного проекту керівнику в зазначені терміни;
2. Представлення завершеного дипломного проекту керівнику;
3. Перевірка дипломного проекту на наявність плагіату;

4. Представлення кафедрі завершеного дипломного проекту за
5 днів до дати захисту;
5. Захист дипломного проекту перед екзаменаційною комісією.

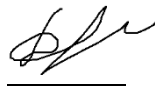
Виконавець
Шкіндер А. І.



—

Керівник

к.т.н., доцент Василенко Д. О.



—

ДОДАТОК Б

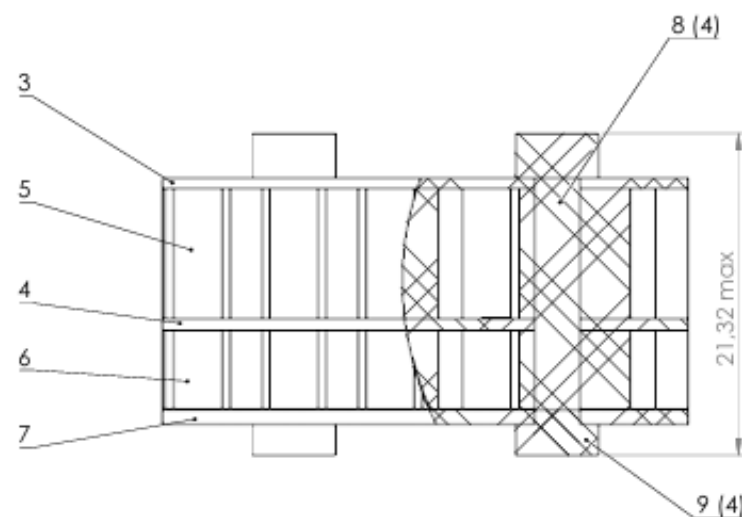
формат	Зона	Поз,	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітки
				Документація		
			PI11.423456.001 ПЗ	Пояснювальна записка		
			PI11.423456.001 ВП	Відомість дипломного		
				проєкту		
A3			PI11.423456.001 СК	Складальний кресленик		
				Складальні одиниці		
A3		1	PI11.423456.002	Плата	1	
A3		2	PI11.423456.003	Плата	1	
				Деталі		
A4		3	PI11.731234.001	Підкладка верхня	1	
A4		4	PI11.731234.002	Підкладка нижня	1	
A4		5	PI11.735467.001	Прошарок верхній	1	
				honeyscombs		
A4		6	PI11.735467.002	Прошарок нижній	1	
				honeyscombs		
A4		7	PI11.757658.003	Плата	1	
				PI11.423456.001		
Зм	Арк.	№ докум.	Підп	Дат		
Розроб.	Шкіндер А. І.				Літера	Аркуш
Перевір.						Аркушів
						1
						2
Н.контр.					НТУУ"КПІ" РТФ	
Затв.						
				Дводіапазонний поглинач	гр. PI11	

[illegible]

[illegible]

[illegible]

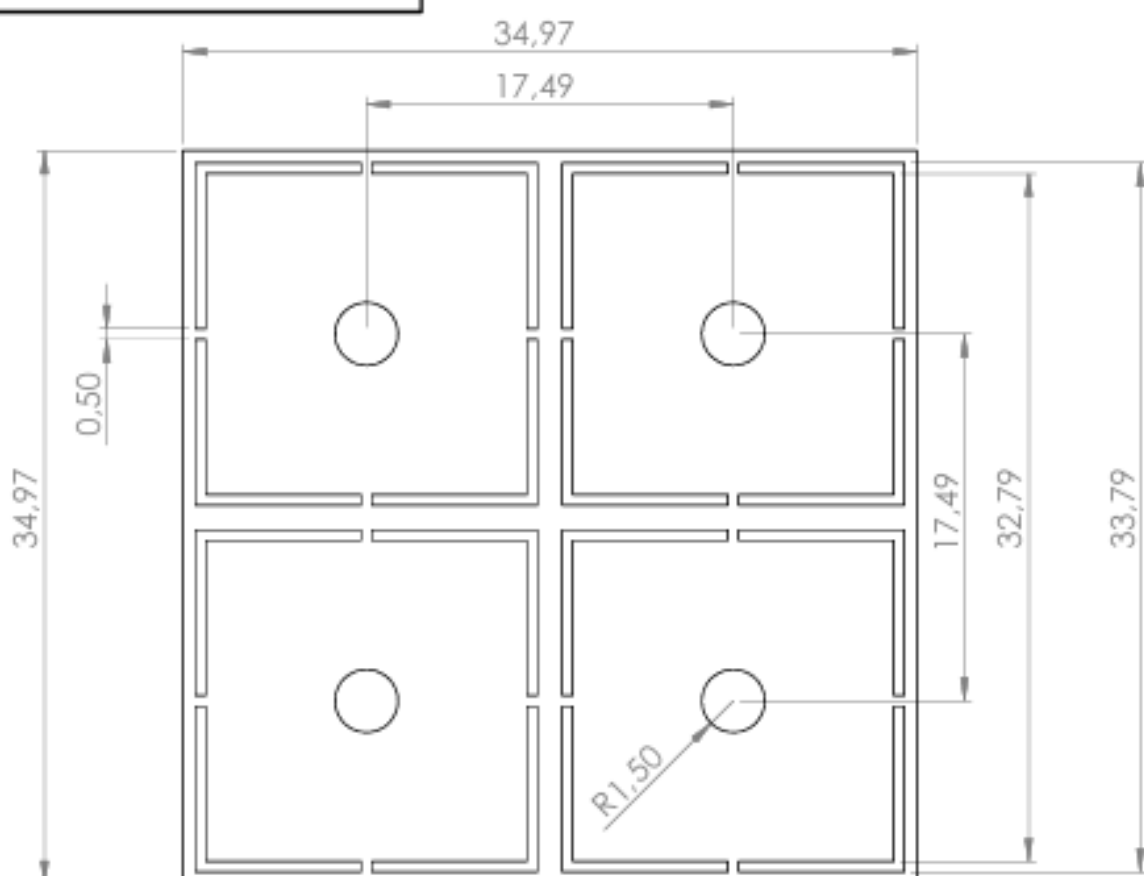
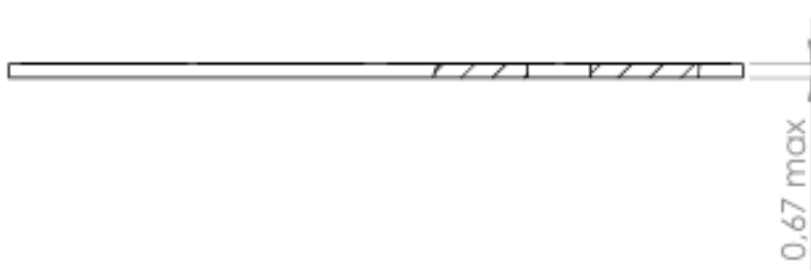
3



1. Розмір 21,32 тах, всі інші для довідок.
2. Матеріал 7 - склотекстоліт.
3. Кріплення до 7 металевою поверхнею.

						PI11.423456.001					
						Двобіапазонний поглинач Складальний кресленик	Літ.	Маса	Масштаб		
									3:1		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата							
Розроб.	Шкіндер А.										
Перев.											
Т. контр.							Лист	Листів			
Н. контр.							КПІ ім. Ігоря Сіковського, РТФ				
Затв.											

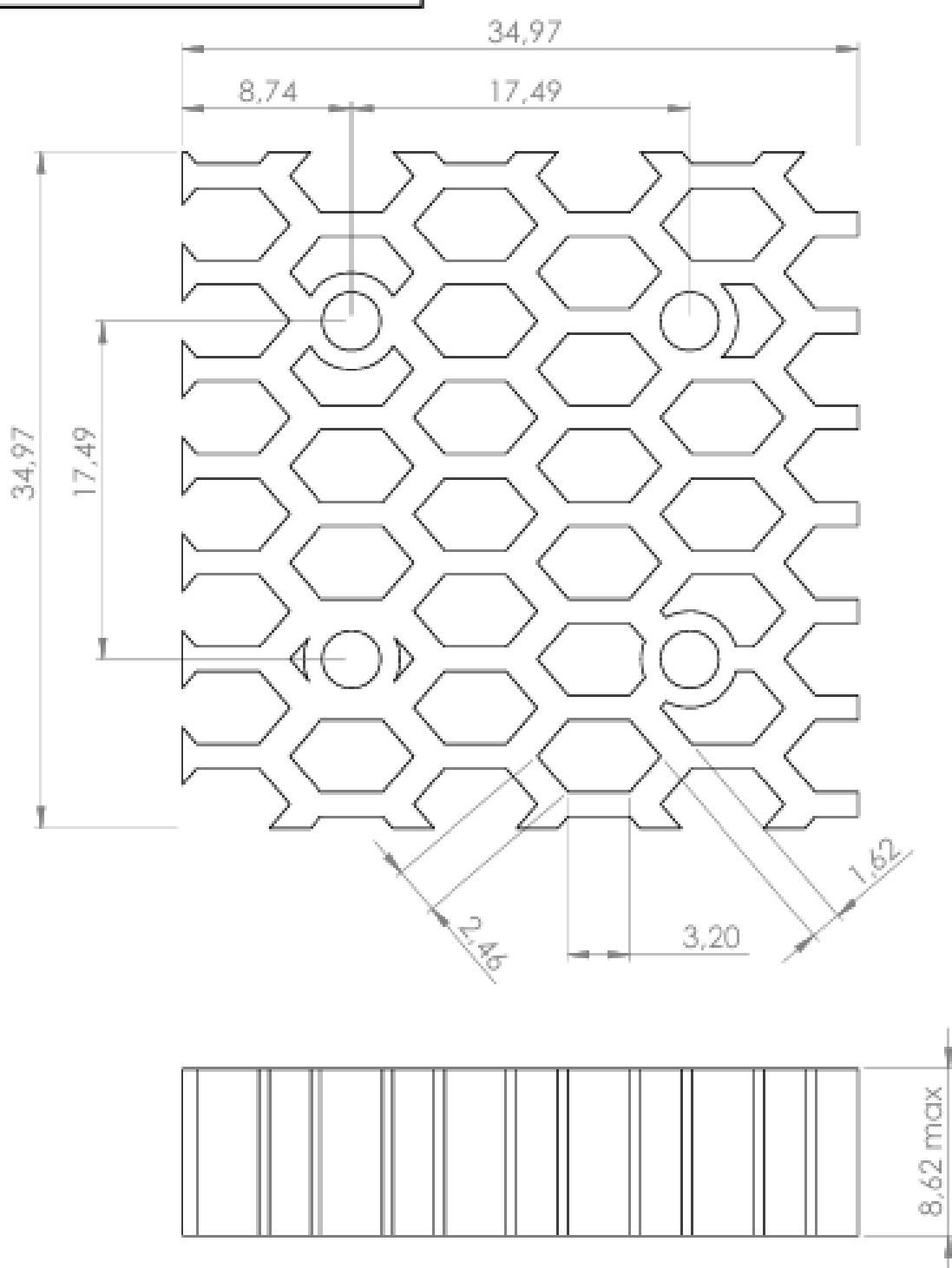
Dañ: hanev with fix 2

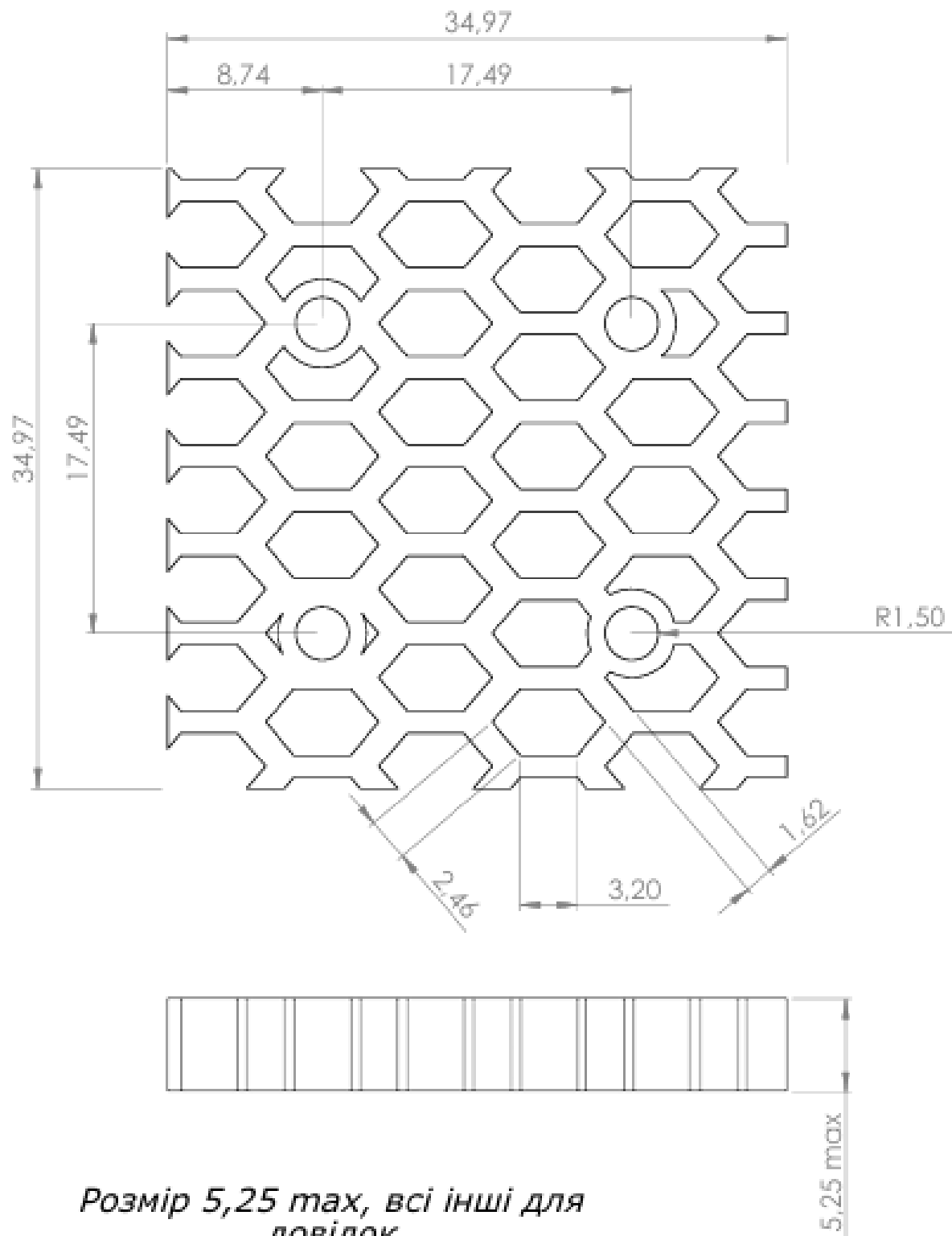
Справ. №		Перш. використ.	
РІ11.731234.001		1	
		А	
		0,67 max	
Розмір 0,67 max, всі інші для довідок			
РІ11.731234.001			
Підкладинка верхня		Літ. Маса Масштаб	
Лист Листів		3:1	
КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ			

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Шкіндер А.		
Перев.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.				

Справ. №		Перш. використ.	
РІ11.731234.002			
34,97		34,97	
17,49		17,49	
R1,50		0,50	
6,38		10,04	
0,75 max			
Розмір 0,75 max, всі інші для довідок			
РІ11.731234.002			
Підкладинка НИЖНЯ		Літ. Маса Масштаб	
Лист Листів		3:1	
КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ			

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.				
Перев.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Загв.				

Справ. №	Перш. використ.	PI11.735467.001									
Інв. № подл.	Інв. № дубл.	Взам. інв. №	Підп. та дата	А							
					Розмір 8,62 max, всі інші для довідок						
					PI11.735467.001						
					Прошарок верхній honeycomb						
					Літ.			Маса		Масштаб	
										3:1	
					Лист			Листів			
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ						



Розмір 5,25 тах, всі інші для довідок

					PI11.735467.001				
					Прошарок верхній <i>honeycombs</i>	Літ.		Маса	Масштаб
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата					3:1
Розроб.		Шкідер А.							
Перев.									
Т. контр.									
						Лист		Листів	
Н. контр.						КПІ ім.Ігоря Сікорського, РТФ			
Затв.									

Перв. застосування	Р111.423456.002		
Довідк. №			
Зам. інв. №	Інв. № орг.	Підп. і дата	Інв. № орг.
Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата
Інв. № орг.	Інв. № орг.	Інв. № орг.	Інв. № орг.

Technical drawing of a foldable frame (Плата Складальний кресленик). The drawing shows a rectangular frame with internal dividers. Dimensions are provided: 34.96mm (width), 0.84mm (thickness), 17.48mm (divider width), 7.90mm (divider thickness), and 0.81mm (edge thickness). Callouts 1 and 2 point to specific components.

Р111.423456.002			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис
Розроб.	Шкідер А.		
Перевір.			
Т. контр.			
Н. контр.			
Затв.			
Плата Складальний кресленик			
Літ.	Маса	Масштаб	3:1
Аркуш 1	Аркушів 1		
КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ			
Формат А3			

Копіював

ДОДАТОК В

ПОРІВНЯННЯ СТРУКТУР

Прошарок	Кут падіння ЕМ хвилі	Нижній частотний діапазон (TE), ГГц	Нижній частотний діапазон (TM), ГГц	Верхній частотний діапазон (TE), ГГц	Верхній частотний діапазон (TM), ГГц
Air spacer	0°	1,9 – 4	1,9 – 4	9 – 11,1	9 – 11,1
Шестикутні honeycombs		1,8 – 3,4	1,8 – 3,35	8,2 – 10,9	8,5 – 11,3
Квадратні honeycombs		1,8 – 3	1,7 – 2,9	7,9 – 10,5	7,9 – 10,5
Air spacer	25°	2 – 3,8	2,2 – 4,5	9 – 11,5	9,2 – 11,6
Шестикутні honeycombs		1,8 – 3,4	2 – 3,7	8,2 – 10,7	8,5 – 11,4
Квадратні honeycombs		1,8 – 3	1,8 – 3,2	8,2 – 9,8	9 – 10,5
Air spacer	40°	2,1 – 3,4	2,7 – 8,1	8,7 – 10,4	8,7 – 10,4
Шестикутні honeycombs		2 – 3,2	2,15 – 4,3	8,2 – 10	8,9 – 9,6
Квадратні honeycombs		1,8 – 3	2 – 3,55	8,4 – 9,3	8,3 – 9,2