

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ”
Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії

До захисту допущено
Завідувач кафедри
В. І. Тимофєєв
“ ” 20__р.

Дипломна робота

освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

на тему “Моделювання характеристик мікросмужкових ліній на
багатошарових основах”

Виконав студент 4 курсу, групи ДМ-92

Светогор Артем Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Доц., к.т.н. Голубєва Ірина Петрівна

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ - 2023 року

Форма № Н-9.01

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії
Освітній рівень «бакалавр»
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. І. Тимофєєв

“ ____ ” _____ 20 ____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Светогору Артему Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: “Моделювання характеристик мікросмужкових ліній на багатошарових основах”

керівник роботи Доц., к.т.н. Голубєва Ірина Петрівна,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “30” травня 2023 року №2063-с

2. Строк подання студентом роботи: «9» червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Довжина і ширина мікросмужкової лінії, двошарова підкладка з відомими значеннями висоти шарів діелектрика, а також їх діелектричною проникністю.

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Дослідження мікросмужкових ліній; освоєння програмного забезпечення Microwave Office і огляд моделей для проектування мікросмужкових ліній; обрати модель лінії на багатошарових основах та виконати моделювання її характеристик

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): слайди презентації для захисту

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «17» квітня 2023 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження мікросмужкових ліній і актуальності приладів, що їх використовують	17 квітня 2023	
2	Освоєння програми Microwave Office	8 травня 2023	
3	Огляд моделей для проектування мікросмужкових ліній	15 травня 2023	
4	Моделювання схеми дослідження обраної моделі і моделювання її характеристик	29 травня 2023	
5	Оформлення дипломної роботи	8 червня 2023	
6	Проходження перевірки на плагіат та нормоконтроль	10 червня 2023	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Мікросмужкові лінії на багат шарових основах мають значний потенціал при проектуванні НВЧ пристроїв у різних галузях електроніки. Тому задача адекватного моделювання таких структур є досить актуальною.

В роботі було проведено дослідження моделей мікросмужкових ліній, наявних в середовищі MicrowaveOffice та обрано найактуальнішу для задачі дослідження мікросмужкової лінії на двошаровій підкладці. В ході чисельних експериментів було побудовано комірку, яка складалась із відрізка мікросмужкової лінії, яка була розташована на двошаровій основі. Було проведено дослідження впливу на S параметри комірки варіації діелектричної проникності верхнього шару підкладки.

Встановлено, що використання підкладок із керованими властивостями, наприклад, залежною від напруженості статичного електричного поля діелектричною проникністю, дозволяє створювати перелаштовані пристрої.

ABSTRACT

Microstrip lines on multilayer substrates have significant potential in designing RF devices in various fields of electronics. Therefore, the task of adequately modeling such structures is quite relevant.

In this study, the models of microstrip lines available in the MicrowaveOffice environment were investigated, and the most relevant one for studying a microstrip line on a two-layer substrate was selected. Through numerical experiments, a unit cell consisting of a segment of a microstrip line placed on a two-layer substrate was constructed. The influence of variations in the dielectric permittivity of the upper layer of the substrate on the S parameters of the unit cell was investigated.

It was found that the use of substrates with controllable properties, such as dielectric permittivity dependent on the intensity of the static electric field, allows for the creation of tunable devices.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 Лінії передач НВЧ та їх особливості	10
1.1 Хвилі у лініях передачі	11
1.1.1 ТЕМ хвиля	11
1.1.2 Квазі-ТЕМ хвилі	12
1.1.3 Поперечні хвилі	13
1.2 Підкладки	13
1.3 Типи ліній передач	15
1.3.1 Несиметрична смужкова лінія	15
1.3.2 Мікросмужкова лінія	16
1.3.3 Симетрична стрічкова лінія (ССЛ)	17
1.3.4 Екранована або високочастотна стрічкова лінія (ВСЛ)	17
1.3.5 Лінія з підвішеною підкладкою (ЛПП)	18
1.3.6 Щілинна лінія (ЩЛ)	19
1.3.7 Копланарний хвилевід (копланарна лінія)	19
1.4 Мікросмужкова лінія	20
1.5 Властивості пристроїв, побудованих на основі мікросмужкових ліній на багатошарових основах	23
1.6 Основні характеристики НВЧ лінії передач	25
1.7 Загальні підходи до моделювання багатошарових структур	27
1.8 Можливості ПЗ MicrowaveOffice	28
2 Моделі мікросмужкових ліній в MicrowaveOffice	30

2.1	Моделі ліній	31
2.1.1	Мікросмужкова лінія (Microstrip Line/MLIN)	31
2.1.2	Двошарова лінія (2-Layer Microstrip Line): MM1LIN	32
2.1.3	Embedded Microstrip Line (EM Quasi-Static): MEMLIN	34
2.2	Моделі поворотів	36
2.2.1	Мікросмужковий поворот зі зрізом кута довільної величини (Microstrip Bend Optimally Mitered Arbitrary Angle): MBENDA	36
2.2.2	Закруглений мікросмужковий поворот: MCURVE2	38
2.2.3	Мікросмужковий поворот на 180 градусів (U-turn 180-degrees Microstrip Bend): MUBEND	40
2.3	Моделі компонентів	42
2.3.1	Тонкоплівковий конденсатор для Монолітно-інтегрованих мікросхем (Thin Film Capacitor for MMIC): TFCM	42
2.4	Розмежування	43
2.4.1	Мікросмужкове перехрестя (Microstrip Cross): MCROSS2	43
2.5	Моделі підкладок	44
2.5.1	Microstrip Substrate Definition: MSUB	44
2.5.2	Two-Layer Microstrip Substrate Definition: MSUB2	45
2.5.3	Four Layer Microstrip Substrate Definition: MSUB4	47
3	Вибір моделі для проведення аналізу багатошарової структури в ПЗ Microwave Office	49
4	Результати моделювання	50
	ВИСНОВКИ	62
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63

ВСТУП

Застосування мікросмужкових ліній на багатошарових основах є суттєвим та актуальним аспектом сучасних технологій: електроніки, комунікацій та сенсорних систем. Ця технологія відіграє важливу роль у досягненні високої пропускну здатності, мініатюризації пристроїв, високочастотної ефективності, поліпшення електромагнітної сумісності та керування тепловим режимом.

Використання мікросмужкових ліній на багатошарових основах дозволяє забезпечити велику пропускну здатність та швидкодію передачі сигналів. Це досягається завдяки розміщенню багатьох ліній на одному пристрої, що дозволяє передавати дані без затримок та спотворень.

Одночасно, мікросмужкові лінії на багатошарових основах сприяють мініатюризації пристроїв і інтеграції компонентів. Це особливо важливо для портативних електронних пристроїв, де обмежений простір вимагає компактних рішень. Багатошарові основи дозволяють ефективно розмістити компоненти, забезпечуючи високу функціональність на обмеженій площі.

Мікросмужкові лінії на багатошарових основах також відіграють важливу роль у передачі сигналів на високих частотах. Це має особливе значення для бездротових комунікацій, радіочастотних систем та мікрохвильових пристроїв. Багатошарові основи забезпечують кращу ізоляцію між лініями та зменшують взаємовплив сусідніх елементів, що забезпечує високу якість сигналу на високих частотах.

Крім того, використання багатошарових основ сприяє покращенню електромагнітної сумісності пристроїв. Багатошарові основи допомагають знизити електромагнітні перешкоди та шум, що виникають від сусідніх ліній і компонентів, що покращує надійність та якість роботи пристроїв.

Використання багатошарових основ допомагає ефективно керувати тепловим режимом в електронних пристроях. Це особливо важливо для пристроїв, які працюють на високих частотах та виробляють багато тепла. Багатошарові основи забезпечують ефективне розведення тепла, що допомагає запобігти перегріву та забезпечити стабільну роботу пристроїв.

1 ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧ НВЧ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

Лінія передачі - це пристрій, що обмежує поширення електромагнітних хвиль у просторі і керує потоком електромагнітної енергії. Лінія передачі використовується для передачі сигналів від передавача до антени та від антени до приймача, а також як з'єднання між пристроями. Вони є важливою складовою високочастотної електроніки. Лінії передачі можуть бути регулярними або нерегулярними в залежності від того, чи змінюються їх властивості вздовж напрямку поширення хвиль. Регулярні ЛП мають постійні властивості уздовж напрямку поширення, наприклад, Лінії Передач з періодичними змінами властивостей. Нерегулярні Лінії Передачі, навпаки, можуть мати довільні зміни властивостей вздовж напрямку поширення хвиль [1].

У системах НВЧ-діапазону, лінії передачі є найважливішою складовою. У низькочастотному діапазоні використовуються дводротові і коаксіальні лінії передачі, але при підвищенні робочої частоти вони мають деякі недоліки. По-перше, збільшення втрат, що призводить до значного загасання хвиль у лінії. По-друге, збільшення випромінювання через порівняння довжини хвилі з відстанню між провідниками, що також призводить до зростання втрат і зниження захищеності лінії. По-третє, зниження електричної міцності через зменшення відстані між провідниками. І, нарешті, складності механічного виготовлення.

У зв'язку з цим, у НВЧ-техніці широко використовуються хвилеводи як структури, що спрямовують хвилі. Хвилеводи можуть бути прямокутного, круглого або коаксіального типу. Вони дозволяють подолати недоліки, пов'язані зі збільшенням втрат, випромінюванням і зниженням електричної міцності, що спостерігаються в дводротових і коаксіальних

лініях передачі. Хвилеводи забезпечують кращу ефективність передачі сигналів у високочастотному діапазоні і мають менші втрати, випромінювання і електричну міцність.

1.1 Хвилі у лініях передачі

1.1.1 TEM хвиля

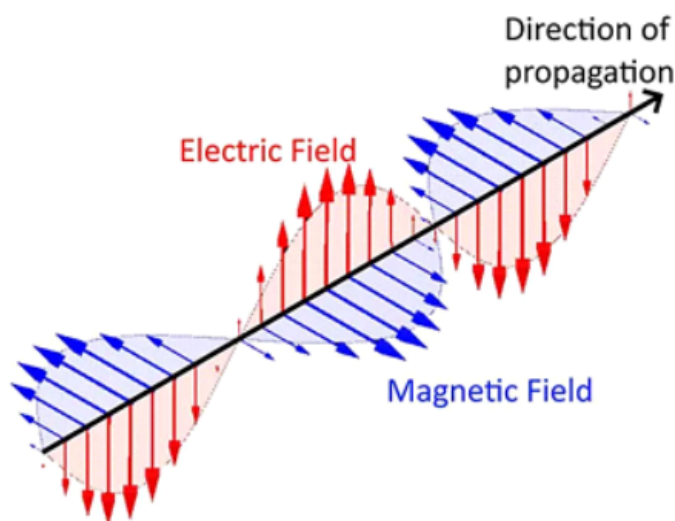


Рисунок 1.1 - Зображення електричного та магнітного полів в TEM хвилі.

Електромагнітна хвиля (TEM хвиля) - це хвиля, яка розповсюджується на звичайних провідниках. На деяких лініях передачі ця хвиля є основною. У TEM хвилі вектори сил полів електричного та магнітного поля є перпендикулярними до напрямку поширення хвилі та ортогональними один одному. Важливою властивістю TEM-хвилі є її використання при низьких частотах, включно з нулем (тобто постійним струмом)[2][3].

Ще одна особливість TEM-хвиль полягає в тому, що на ідеальній лінії передачі (яка відповідає умові Хевісайда) немає зміни характеристик передачі лінії, що залежать від частоти передачі. Через це ідеальні TEM-лінії передачі не страждають від дисперсії - форми спотворення, при якій різні компоненти частоти рухаються з різними швидкостями. Дисперсія "розтягує" форму хвилі (яка може представляти передану інформацію) вздовж довжини лінії. Усі інші режими страждають від дисперсії, що обмежує пропускну здатність.

1.1.2 Квазі-ТЕМ хвилі

Деякі типи плоских ліній, зокрема мікросмушкові, не мають однорідного діелектрика, але він відрізняється вище і нижче лінії. Такі форми не можуть витримати справжні TEM-хвилі; існує певний компонент електромагнітного поля, паралельний напрямку лінії, хоча передача може бути близько до TEM. Такий режим називають квазі-ТЕМ. У TEM-лінії, розриви, такі як щілини та стовпці (використовуються для побудови фільтрів та інших пристроїв), мають опір, який чисто реактивний: вони можуть накопичувати енергію, але не можуть розсіювати її. У більшості квазі-ТЕМ-ліній, такі структури додатково мають опірну складову в імпедансі. Цей опір є наслідком випромінювання зі структури і призводить до втрат у колі. Та ж сама проблема виникає на згинах і кутах лінії. Ці проблеми можна пом'якшити, використовуючи матеріал з високою діелектричною проникністю як підкладку, що створює більш однорідне середовище передачі і режим, ближчий до TEM.

1.1.3 Поперечні хвилі

У порожнистих металевих хвильоводах і оптичних хвильоводах можуть існувати необмежена кількість поперечних хвиль. Однак ТЕМ-режим не може підтримуватись, оскільки для його поширення необхідно два або більше окремих провідників. Поперечні хвилі класифікуються як поперечно-електричні (ТЕ або Н-хвилі) або поперечно-магнітні (ТМ або Е-хвилі), залежно від того, чи все електричне або магнітне поля є поперечними. Все одно із полів завжди має повздовжній компонент. Точна хвиля ідентифікується парою індексів, які вказують кількість довжин хвиль або півдовжин хвиль вздовж заданих поперечних розмірів. Ці індекси зазвичай записуються без роздільника: наприклад, TE_{10} . Точне визначення залежить від того, чи є хвильовод прямокутним, круглим або еліпсоїдним. Для резонаторів хвильоводів вводиться третій індекс для півдовжин хвиль у напрямку повздовжньої осі.

1.2 Підкладки

Існує велика кількість різних підкладок, які використовуються у планарних технологіях. Для друкованих плат часто використовується скловолоконний епоксид (клас FR-4). Високодielekтричні керамічні плати з політетрафторетиленом (наприклад, плата Rogers Corporation 6010) спеціально призначені для мікрохвильових приладів. На вищих мікрохвильових частотах для гібридних інтегральних мікрохвильових схем можуть використовувати, наприклад, алюмінієвий оксид. На надвисоких

мікрохвильових частотах можуть застосовуватись кристалічні підкладки, такі як сапфір або кварц. Монолітні інтегральні мікрохвильові схеми мають підкладки, що складаються з напівпровідникового матеріалу, чіп якого, виготовлено з кремнію або арсенід-галію.

Найбільш важливі параметри підкладки, - це відносна діелектрична проникливість (ϵ_r) та діелектричні втрати (δ). Відносна діелектрична проникливість визначає опір відповідної ширини лінії та групової швидкості сигналів, що проходять по ній. Велика діелектрична проникливість сприяє зменшенню розміру друкованих компонентів, полегшуючи їх мініатюризацію. У квазі-ТЕМ хвилях діелектрична проникливість визначає, яка частина поля буде міститися в підкладці, а яка - в повітрі над нею. В підкладках, бажано, щоб діелектричні втрати були якомога меншими, особливо в схемах, які потребують високої добротності (Q).

До механічних властивостей, відносяться товщина та необхідна міцність підкладки. У деяких типах, наприклад, у лініях з підвішеною підкладкою та тонких лініях, вигідно робити підкладку якомога тоншою. Вразливі напівпровідникові компоненти, розміщені на гнучкій підкладці, можуть пошкодитися. Для уникнення цієї проблеми треба обрати більш жорсткий матеріал, такий як кварц, ніж те, що легше обробляти. У однорідних смужкових лініях, підкладка може бути значно товщою. Для антен, які повністю відповідають формі пристрою, потрібні гнучкі і дуже тонкі, підкладки. Товщина, необхідна для електричної продуктивності, залежить від діелектричної проникливості матеріалу. Важливими є також властивості поверхні; деяка жорсткість може бути необхідною для забезпечення прилипання металізації, але занадто велика жорсткість призведе до втрат провідності. Температурні властивості є дуже

важливими. Зміна температури змінює електричні властивості ліній і може призвести до розриву металізованих отворів.

Таблиця 1.1 - Матеріали які найчастіше використовуються в якості підкладок

**Properties of common
substrate materials^[27]**

Substrate	ϵ_r	δ
Silicon	11.9	0.015
Gallium arsenide	12.9	0.002
FR-4	4.3	0.022
6010	10.2	0.002
Alumina	9.8	0.0001
Sapphire	9.4	0.0001
Quartz	3.8	0.0001

1.3 Типи ліній передач

1.3.1 Несиметрична смужкова лінія

Несиметрична смужкова лінія – лінія, яка знаходиться на підкладці з малою діелектричною проникністю: від повітря ($\epsilon = 1$) до $\epsilon = 3...4$. Така лінія має більші втрати на випромінювання, тому що деякі

11 електричні лінії, які починаються на поверхні, не замикаються на основу, а йдуть у нескінченність [4].

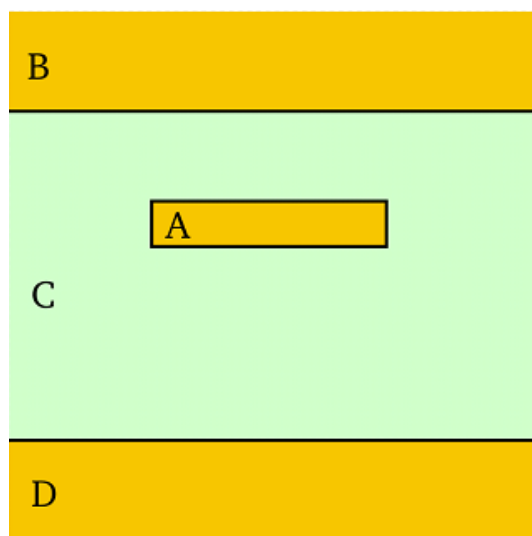


Рисунок 1.2 - Зображення смужкової лінії в розрізі

1.3.2 Мікросмужкова лінія

Мікросмужкова лінія - це смужкова лінія, що розташована на тонкій підкладці з діелектричною проникністю ϵ більше 10. У цієї лінії електромагнітне поле концентрується в області між провідником і заземленою основою, що призводить до зменшення втрат на випромінювання та паразитних зв'язків. Зазвичай МСЛ реалізується у вигляді вбудованого модуля. Аналіз МСЛ є складним, оскільки по ній поширюється не типова трансверсально-електромагнітна (ТЕМ) хвиля, а квазі-ТЕМ хвиля, що має складові поля E_z і H_z , значно менші за амплітудою, ніж складові поля E_x , E_y і H_x , H_y [5].

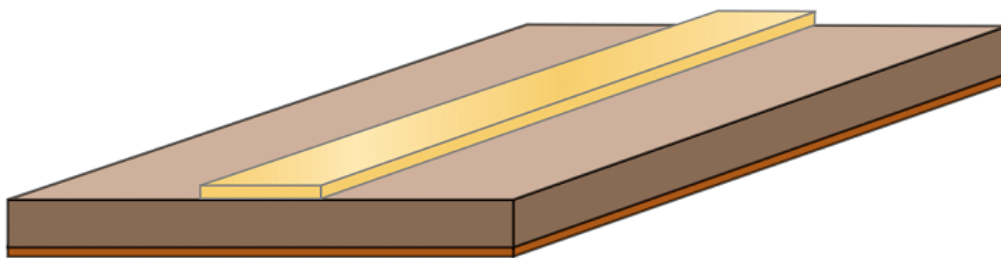


Рисунок 1.3 - Мікросмужкова лінія.

1.3.3 Симетрична стрічкова лінія (ССЛ)

Симетрична стрічкова лінія (ССЛ) є добре екранованою і має малі втрати. Однак виготовлення та налаштування ССЛ є складними, оскільки центральний провідник недоступний для регулювання. Незважаючи на це, ССЛ все ж знаходять широке застосування, оскільки вони можуть бути більш компактними, ніж мікросмужкові лінії (МСЛ). На перший погляд, ССЛ здається більш об'ємною, але для МСЛ необхідно мати повітряний простір над підкладкою і екранування, що призводить до збільшення об'єму пристрою на МСЛ. У випадку, коли схема складна і займає більшу площу, виграш у габаритах може бути досягнутий за допомогою МСЛ. Однак, в інших ситуаціях, ССЛ може бути більш кращим варіантом.

1.3.4 Екранована або високочастотна стрічкова лінія (ВСЛ)

Екранована або високочастотна стрічкова лінія (ВСЛ) має кілька переваг. Вона характеризується низькими втратами, високою добротністю і малою чутливістю до зміни діелектричної проникності підкладки. Однак,

ВСЛ також має свої недоліки. Вона вимагає двостороннього друку з необхідністю точного суміщення провідників. Крім того, для виготовлення ВСЛ необхідно забезпечити надійне кріплення діелектрика.

1.3.5 Лінія з підвішеною підкладкою (ЛПП)

Лінія з підвішеною підкладкою (ЛПП) є варіацією високодобротної стрічкової лінії (ВСЛ), але з одним провідником, що усуває деякі недоліки ВСЛ. ЛПП має кілька переваг порівняно з мікросмужковою лінією (МСЛ). Вона характеризується меншими втратами, меншою чутливістю до зміни діелектричної проникності ($\pm\Delta\epsilon$) і геометричних розмірів. Також вимоги до шорсткості підкладки менш жорсткі. Однак, використання ЛПП має свої обмеження, особливо щодо ступеня інтеграції, який може бути обмеженим.

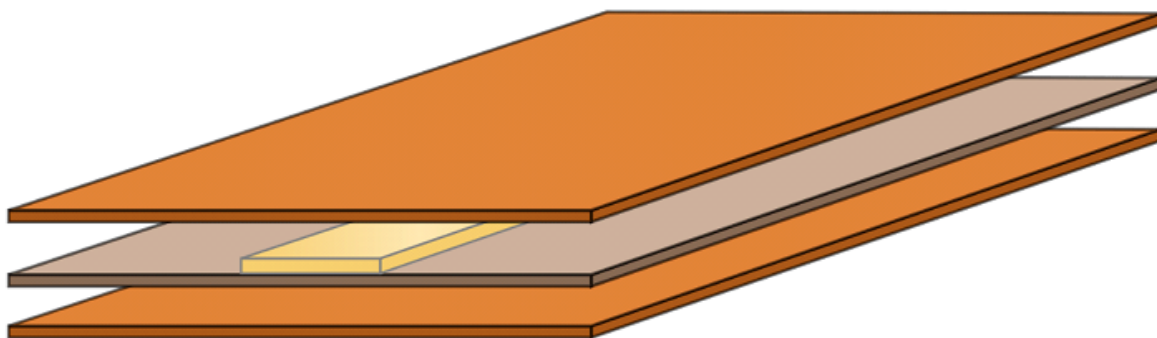


Рисунок 1.4 - Лінія з підвішеною підкладкою.

1.3.6 Щілинна лінія (ЩЛ)

Щілинна лінія (ЩЛ) відрізняється від традиційних ліній тим, що основний тип хвилі, що поширюється по ній, не є ТЕМ хвилею. Замість цього, основний тип хвилі в ЩЛ може бути TE_{10} . Це означає, що в щілинних лініях може відбуватися більше випромінювання. Для зменшення випромінювання в ЩЛ зазвичай використовують підкладки з високим значенням діелектричної проникності (ϵ). ЩЛ має деякі переваги, такі як наявність еліптичної поляризації, що дозволяє використовувати її для будівництва невзаємних пристроїв. Крім того, щілинна лінія зручна для шунтування елементів, оскільки провідники розташовані з одного боку. Також вимоги до якості зворотного боку підкладки в ЩЛ є менш жорсткими.

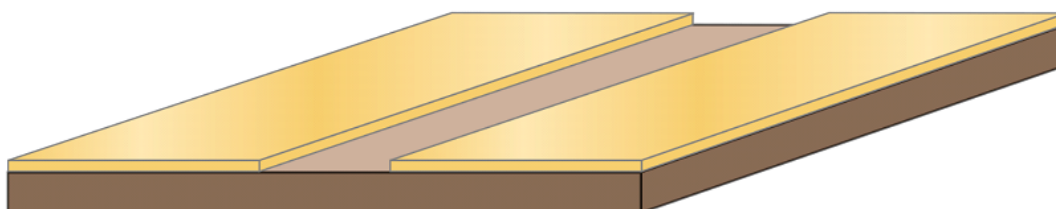


Рисунок 1.5 - Щілинна лінія.

1.3.7 Копланарний хвильовід (копланарна лінія)

Копланарний хвильовід (копланарна лінія) має подібні переваги, як ЩЛ. Однак, він має ще одну важливу перевагу - дуже слабка залежність хвильового опору від товщини підкладки. Це означає, що копланарна лінія

дозволяє використовувати підкладки з високим значенням діелектричної проникності (ϵ) і, внаслідок цього, зменшувати розміри інтегральних схем. Таким чином, копланарний хвилевід є перспективним рішенням для досягнення компактних розмірів електронних пристроїв.

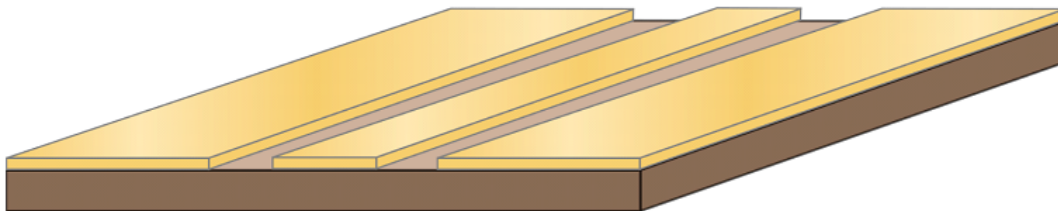


Рисунок 1.6 - Компланарна лінія.

1.4 Мікросмужкова лінія

Мікросмужкова лінія є одна із ліній передачі, яку можна виготовити за будь-якої технології, де провідник відокремлений від заземлюючої площини діелектричним шаром, який називається "підкладкою". Мікросмужкові лінії використовуються для передачі сигналів мікрохвильового діапазону[6].

Типовими технологіями реалізації мікросмужкових ліній є друкована плата (РСВ), алюміній, покритий діелектричним шаром, іноді кремній або інші подібні технології. Мікрохвильові компоненти, такі як антени, з'єднувачі, фільтри, розподільники потужності тощо, можуть бути створені з мікросмужкової лінії, причому весь пристрій існує як металізаційний малюнок на підкладці. Мікросмужкова лінія виявилась набагато дешевшою, ніж традиційна хвелеводна технологія, а також вона легша та компактніша. Мікросмужкова лінія була розроблена лабораторіями ІТТ як конкурент стрічковій лінії.

Недоліками мікросмужкової лінії порівняно з хвилеводом є зазвичай нижча потужність передачі сигналу та більші втрати. Крім того, на відміну від хвилеводу, мікросмужкова лінія зазвичай не є закритою, тому вона піддається перехресному зв'язку і ненавмисному випромінюванню.

Для отримання найнижчої вартості, пристрої на мікросмужкових лініях можуть бути зібрані на звичайній підкладці FR-4 (стандартна плата для друкованих плат). Однак часто виявляється, що втрати в діелектрику FR4 на мікрохвильових частотах є занадто великими, а значення діелектричної сталої не контролюється достатньо точно. З цих причин часто використовується підкладка з алюмінію. З точки зору монолітної інтеграції, мікросмужкові лінії разом з інтегральними схемами/монолітними мікрохвильовими інтегральними схемами можуть бути придатними, однак їхній розмір може бути обмежений шаром діелектрику та товщиною провідника, що використовується.

Мікросмужкові лінії також використовуються в проектуванні плат для цифрових пристроїв, де сигнали повинні бути маршрутизовані з однієї частини збірки в іншу з мінімальним спотворенням і мінімізацією перехресних шумів та випромінювання.

Мікросмужкова лінія є одним з багатьох типів планарних ліній передачі сигналу, інші включають стрічкову лінію та копланарний хвилевід. Ці різні типи ліній можуть бути інтегровані на одній і тій же підкладці.

Диференційний мікросмужковий зв'язок - це пара збалансованих сигнальних мікросмужкових ліній, який часто використовується для високошвидкісних сигналів, таких як годинники DDR2 SDRAM, лінії передачі даних USB Hi-Speed, лінії передачі даних PCI Express, лінії передачі даних LVDS та інші, часто розташовані на одній і тій же платі.

Більшість інструментів проектування плат підтримують такі диференційні пари.

Основні характеристики мікросмужкової лінії:

1. Хвильовий опір (Characteristic Impedance): Це опір, який представляється між двома провідниками мікросмужкової лінії. Хвильовий опір залежить від ширини, товщини та діелектричної проникності підкладки та діелектрика. Він визначає співвідношення між напругою та струмом в мікросмужковій лінії і впливає на характеристики передачі сигналу.
2. Діелектрична втрата (Dielectric Loss): Діелектричний матеріал, що використовується в мікросмужковій лінії, може мати втрати енергії, які призводять до поглинання сигналу та витрати потужності. Діелектрична втрата характеризується коефіцієнтом втрат, який вказує наскільки ефективно матеріал підкладки поглинає енергію.
3. Дисперсія (Dispersion): Мікросмужкова лінія має дисперсію, що впливає на частотні характеристики передавальної лінії. Дисперсія може призводити до зміни швидкості поширення сигналу і зміни фазової характеристики залежно від частоти.

1.5 Властивості пристроїв, побудованих на основі мікросмужкових ліній на багат шарових основах

Пристрої, що ґрунтуються на мікросмужкових лініях на багат шарових основах, мають декілька переваг, які роблять їх привабливими для різних використань. Одна з цих переваг полягає в їх високій швидкодії передачі сигналів, що дозволяє ефективно використовувати ці пристрої в швидкодіючих електронних системах, наприклад, у мікропроцесорах, мережевих комутаторах та оптичних комунікаційних системах. Більш того, мікросмужкові лінії можуть мати значну ємність, що робить їх корисними для зберігання електричної енергії в енергоефективних джерелах живлення та резервних джерелах енергії. Низька опірність мікросмужкових ліній забезпечує передачу електричного струму з мінімальними втратами енергії, що сприяє високій ефективності електронних пристроїв та зменшує втрати енергії у вигляді тепла. Компактні розміри мікросмужкових ліній на багат шарових основах дозволяють створювати пристрої, що є тонкими та компактними, це є особливо важливим для портативної електроніки, такої як смартфони, планшети та ноутбуки. Мікросмужкові лінії на багат шарових основах відрізняються високою стабільністю в різних робочих умовах, таких як висока температура, вологість або радіаційні впливи. Це робить їх придатними для використання в екстремальних умовах, де звичайні електронні компоненти можуть не забезпечувати надійну роботу. Крім того, мікросмужкові лінії на багат шарових основах легко поєднуються з іншими передовими технологіями, такими як нанотехнології, оптика та фотоніка. Це відкриває можливості для розробки складних систем, які використовують переваги кожної з цих технологій. Загалом, пристрої, що

базуються на мікросмужкових лініях на багат шарових основах, мають високі показники продуктивності, надійності та ефективності, що робить їх привабливими для широкого спектру застосувань у сучасній електроніці та інших галузях.

Зважаючи на переваги мікросмужкових ліній на багат шарових основах, варто зазначити, що вони також відкривають нові можливості для розробки технологій і пристроїв.

Одна з цих можливостей полягає в їх потенціалі для використання в області мікроелектромеханічних систем (MEMS). Мікросмужкові лінії можуть бути використані для створення мікрорухомих деталей і актуаторів, які забезпечують точне управління механічними процесами на мікрометровому рівні..

Крім того, мікросмужкові лінії на багат шарових основах можуть бути використані для реалізації інтегрованих оптичних систем. Їх висока швидкодія та ефективність передачі сигналів роблять їх привабливими для використання в оптичних комунікаційних системах, включаючи волоконно-оптичні мережі та оптичні пристрої. Також мікросмужкові лінії можуть служити як оптичні хвилеводи, що відкриває можливості для створення компактних інтегрованих оптичних пристроїв і систем.

Крім того, мікросмужкові лінії можуть бути використані в електрохімічних пристроях, таких як сенсори, акумулятори та паливні елементи. Їх велика ємність та низька опірність сприяють покращенню продуктивності та тривалості роботи таких пристроїв.

Мікросмужкові лінії на багат шарових основах володіють значним потенціалом у різних сферах, включаючи електроніку, оптику і біомедицину. Їх характеристики щодо продуктивності, надійності і ефективності зробили їх привабливими для подальших досліджень і розробок нових технологій.

1.6 Основні характеристики НВЧ лінії передач

Z-параметри (імпедансні параметри): *Z*-параметри описують вхідну та вихідну імпеданси лінії передачі. Вони вимірюються в омах і дозволяють визначити, як лінія передачі взаємодіє з джерелами сигналу та навантаженнями.

Y-параметри (адмітансні параметри): *Y*-параметри визначають адмітанси лінії передачі, тобто її спроможність проходити струм. Вони вимірюються в сіменсах і дозволяють описати властивості струму, що протікає через лінію.

H-параметри (гібридні параметри): *H*-параметри описують залежність між напругою та струмом на вхідному та вихідному портах лінії передачі. Вони використовуються для аналізу взаємодії між вхідним та вихідними сигналами.

ABCD-параметри (трансмисійні параметри): *ABCD*-параметри описують передавальні характеристики лінії передачі, включаючи взаємозв'язок між напругою та струмом на вхідному та вихідному портах. Вони дозволяють моделювати вплив лінії на передачу сигналу[7][8].

S-параметри: Матриця розсіювання (*S*-матриця) є математичною конструкцією, яка описує, як РЧ-енергія поширюється через багатопортову мережу. *S*-матриця дозволяє точно описати властивості надзвичайно складних мереж у вигляді простих "чорних скриньок". Коли РЧ-сигнал надходить до одного з портів, певна частка цього сигналу відбивається назад через вхідний порт, частина сигналу входить в вхідний порт і потім виходить через один або кілька інших портів (можливо, зі зміною амплітуди), а решта сигналу зникає у вигляді тепла або навіть електромагнітного випромінювання. *S*-матриця *N*-портової мережі містить

N^2 коефіцієнтів (S-параметрів), кожен з яких представляє можливий шлях введення-виведення.

S-параметри є комплексними числами, які мають дійсну та уявну частини або амплітуду та фазу, оскільки як амплітуда, так і фаза вхідного сигналу змінюються внаслідок дії мережі. Часто ми звертаємося лише до амплітуди сигналу, оскільки це часто є найбільш цікавим параметром. Нас не цікавить, як змінюється фаза сигналу після підсилювача або затухаючого елемента. Нас в основному цікавить, який приріст (або втрата) отримується. S-параметри визначаються для певної частоти і імпедансу системи і змінюються залежно від частоти для будь-якої неідеальної мережі.

S-параметри зазвичай відображаються у форматі матриці, кількість рядків і стовпців якої дорівнює кількості портів. Для S-параметра S_{ij} , підпис j відповідає порту, який стимулюється (вхідний порт), а підпис " i " відповідає вихідному порту. Таким чином, S_{11} відноситься до співвідношення амплітуди сигналу, що відбивається від порту 1, до амплітуди сигналу, що надходить до порту 1. Параметри на діагоналі S-матриці називаються коефіцієнтами відбиття, оскільки вони відносяться лише до того, що відбувається в одному порту, тоді як S-параметри поза діагоналлю називаються коефіцієнтами передачі, оскільки вони відносяться до того, що відбувається в одному порту при стимуляції сигналом, що надходить з іншого порту. Ось S-матриці для одно-, дво- і трьохпортових мереж[9].

1.7 Загальні підходи до моделювання багатошарових структур

Адекватне моделювання характеристик багатошарових структур на основі мікросмужкових ліній є невід'ємною частиною досліджень та розвитку у різних галузях, таких як електроніка, оптика та біомедицина. Це важливо з декількох причин.

По-перше, моделювання дозволяє проектувати та оптимізовувати багатошарові структури до їх фізичної реалізації. Це допомагає досягти бажаних властивостей, таких як висока швидкодія, низьке споживання енергії, стійкість до шумів та зовнішніх впливів і так далі.

По-друге, моделювання економить час та ресурси, оскільки дозволяє зменшити кількість необхідних фізичних прототипів і експериментів. Це особливо важливо для складних багатошарових структур, які можуть вимагати складного процесу виготовлення.

По-третє, моделювання допомагає глибше розуміти фізичні процеси, що відбуваються в багатошарових структурах, і їх вплив на електричні та електронні властивості. Це сприяє покращенню функціональності та продуктивності пристроїв.

По-четверте, моделювання дозволяє виявляти потенційні проблеми та ризики на ранніх стадіях проектування, зменшуючи кількість помилок і збільшуючи надійність пристроїв. Це також допомагає зекономити час і кошти, пов'язані з виробництвом.

Нарешті, моделювання сприяє інноваціям та розвитку шляхом дослідження та внесення нових концепцій та підходів у галузь багатошарових структур. Воно сприяє розробці нових матеріалів та методів виготовлення, що сприяє подальшому розвитку електроніки та інших галузей.

Усе це підкреслює важливість адекватного моделювання багат шарових структур на основі мікросмужкових ліній для досягнення високої якості та продуктивності електронних пристроїв, а також для сприяння інноваціям та розвитку нових технологій.

1.8 Можливості ПЗ Microwave Office

"Microwave Office" є популярним програмним засобом для моделювання та проектування мікрохвильових і RF (радіочастотних) систем, і його вибір у цій області мотивується декількома факторами.

Перш за все, це програмне забезпечення має широкий функціонал, який охоплює різні інструменти і функції для моделювання, симуляції та аналізу мікрохвильових схем і систем. Завдяки цьому, воно може бути використано для розв'язання різноманітних задач, включаючи проектування імпедансних пристроїв, оптимізацію параметрів, аналіз електромагнітного поля та інше.

По-друге, "Microwave Office" відрізняється своєю легкістю в використанні завдяки інтуїтивно зрозумілому і дружньому інтерфейсу користувача. Графічний інтерфейс полегшує процес створення, редагування та аналізу схем, а також налаштування параметрів компонентів і виконання симуляцій.

Крім того, "Microwave Office" використовує потужні симулятори, що дозволяють точно моделювати поведінку мікрохвильових схем і систем. Завдяки цьому програмне забезпечення може забезпечити реалістичні моделювання, аналіз впливу різних параметрів та оптимізацію дизайнів.

Додатково, "Microwave Office" має можливість інтеграції з іншими програмними засобами, такими як CAD-системи, симулятори електромагнітного поля і пакети проектування плат. Це сприяє зручному обміну даними, імпорту та експорту проектів, а також співпраці з іншими інженерами.

Тому у цілому, "Microwave Office" це потужне і зручне програмне забезпечення для моделювання та проектування мікрохвильових схем і систем. Його широкий функціонал, легкий у використанні інтерфейс, потужні симулятори, можливість інтеграції з іншими інструментами та наявність підтримки роблять його привабливим вибором для фахівців інженерів у цій галузі.

2 МОДЕЛІ МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЙ У MICROWAVE OFFICE

В Microwave Office є інформаційний каталог в якому міститься інформація про всі електричні моделі, що містяться в базі даних Microwave Office. База даних включає лінійні моделі приладів для ліній передач, такі як мікросмужкова лінія, смужкова лінія, компланарний хвилевід. Також в програмі присутні і нелінійні моделі приладів, такі як BSIM3 MOSFET, Parket-Skellern FET, Fujii, і Triquint TOM3 моделі [10].

Моделі елементів розсортовані в алфавітному порядку, для більш зручного пошуку потрібної категорії. Розглянемо ж основні моделі, що пов'язані з мікросмужковими лініями.

Моделі елементів Microwave Office розбиті на категорії:

- ✓ Лінії;
- ✓ Повороти;
- ✓ З'єднані лінії;
- ✓ Розгалуження;
- ✓ Компоненти;
- ✓ Інші елементи.

2.1 Моделі ліній

2.1.1 Мікросмужкова лінія (Microstrip Line/MLIN)

MLIN це звичайна модель для проектування мікросмужкової лінії. Ця модель розташовується на одношаровій структурі MSUB і в ній передбачається квазі-ТЕМ режим поширення хвиль та враховуються ефекти діелектричних і втрат провідності. Параметри W та L задаються користувачем для подальшого моделювання

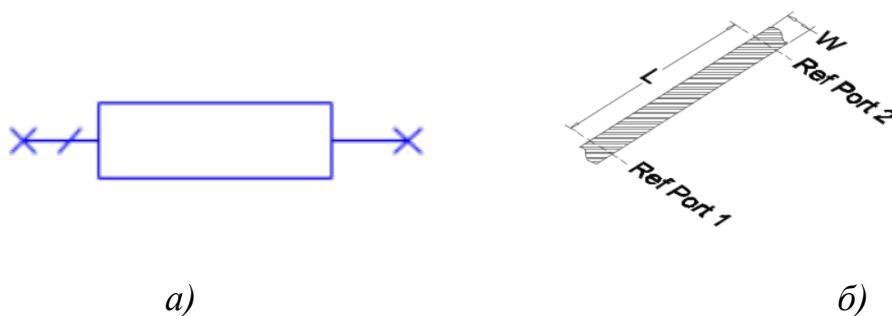


Рисунок 2.1 - Зображення моделі мікросмужкова лінія MLIN (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.1 - Параметри моделі мікросмужкова лінія MLIN.

Параметр	Опис
W	Ширина провідника
L	Довжина провідника
MSUB	Тип підкладки

2.1.2 Двошарова лінія (2-Layer Microstrip Line): MM1LIN

MM1LIN створює одиночну мікросмужкову лінію, в якій смуга провідності розташована на двошаровій підкладці. В нижнього шару підкладки можуть бути втрати провідності.

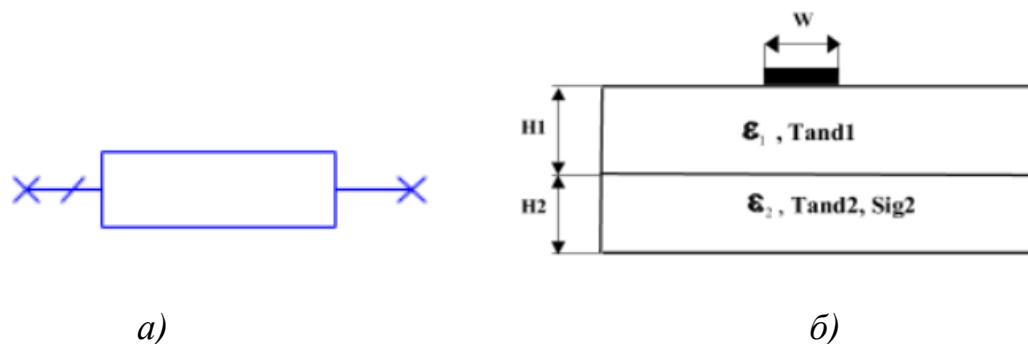


Рисунок 2.2 - Зображення моделі мікросмужкова лінія MM1LIN (а)

та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.2 - Параметри моделі мікросмужкова лінія MM1LIN.

Параметр	Опис
W	Ширина провідника
L	Довжина провідника
Acc	Параметр точності
MSUB2	Тип підкладки

Обмеження і рекомендації щодо параметрів:

1. Параметр точності Асс обмежений значеннями в межах $1 \leq \text{Асс} \leq 10$. Більше значення Асс збільшує щільність сітки, використаної в обчисленнях. Точність параметрів моделі може трохи покращитись при збільшенні значення Асс, але це призводить до помітного збільшення часу обчислень. Як правило, хорошим компромісом між точністю і часом обчислень є встановлення значення Асс на 1.
2. Цей компонент не накладає обмежень на товщину провідника (товщина може бути нульовою, позитивною або негативною). Від'ємна товщина означає, що провідник занурений у підкладку.
3. Параметри підкладки Tand1, Tand2 не повинні перевищувати значення 3.0; параметр підкладки Sig2 (витоків провідності нижнього шару) не повинен перевищувати значення 3 С/м.

Деталі реалізації моделі:

Реалізація моделі базується на квазістатичній електромагнітній техніці (EM Quasi-Static). Вона враховує втрати у метали та діелектриках підкладки. Втрати поляризації (Tand1, Tand2) допускаються у обох шарах підкладки. Втрати провідності допускаються лише у нижньому шарі. Деяка дисперсія частково враховується.

2.1.3 Embedded Microstrip Line (EM Quasi-Static): MEMLIN

Ця модель створює ділянку мікросмужкової лінії, що вбудована в чотирьохшарову підкладку.

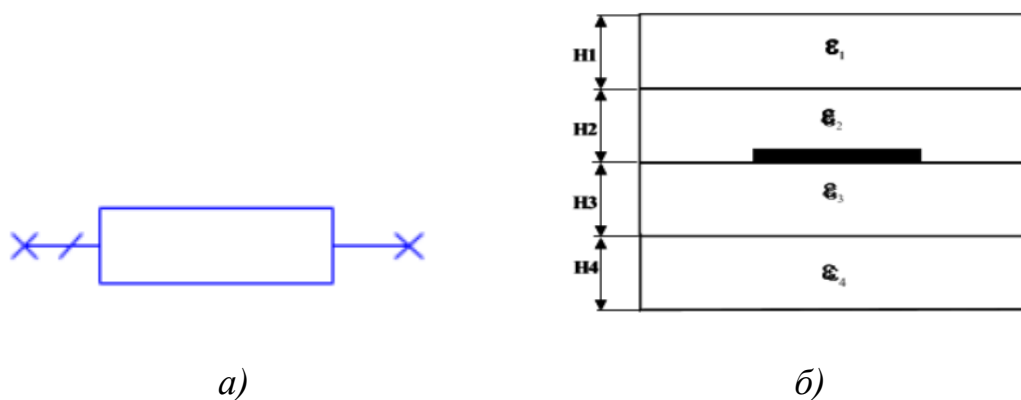


Рисунок 2.3 - Зображення моделі мікросмужкова лінія MEMLIN (a) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.3 - Параметри моделі мікросмужкова лінія MEMLIN.

Параметр	Опис
W	Ширина провідника
L	Довжина провідника
Acc	Параметр точності
MSUB4	Тип підкладки

Обмеження і рекомендації щодо параметрів:

Параметр Ass є параметром точності ($1 \leq Ass \leq 10$). Значення за замовчуванням для Ass дорівнює 1. Якщо Ass менше 1 або більше 10, він автоматично встановлюється на 2. Більше значення Ass збільшує щільність сітки, використаної в обчисленнях. Точність параметрів моделі може трохи збільшитися при збільшенні Ass , але це призводить до помітного зростання часу обчислення. Як правило, гарний компроміс між точністю і часом обчислення полягає в установці значення Ass на 1.

Параметр $MSUB4$ вказує чотирьохшаровий мікрополосковий підкладковий елемент, який визначає додаткові поперечні параметри передавальної лінії. Якщо поле порожнє, використовується значення за замовчуванням. Провідник передбачається розташованим на межі між другим та третім шаром.

У цьому компоненті не накладаються обмеження на товщину провідника (товщина може бути нульовою, додатною або від'ємною). Від'ємна товщина означає, що провідник врізаний в третій шар.

За допомогою компонента $MEMLIN$ можна реалізувати різні типи мікросмужкових ліній для цього необхідно вибрати відповідні діелектричні константи та товщини.

З компонентом враховуються втрати у металі та діелектрику підкладки. Дисперсія не враховується.

2.2 Моделі поворотів

2.2.1 Мікросмушковий поворот зі зрізом кута довільної величини (Microstrip Bend Optimally Mitered Arbitrary Angle): MBENDA

Цей компонент схеми моделює оптимальний зріз довільного кутового повороту мікросмушкового провідника сигналу. Модель передбачає квазі-ТЕМ режим поширення, відповідний мікросмушковій лінії з шириною (W), і враховує ефекти діелектричних і втрат провідності. Основою моделі є крива, яка відповідає експериментально визначеним оптимальним зрізам для певних кутів у вказаному діапазоні.

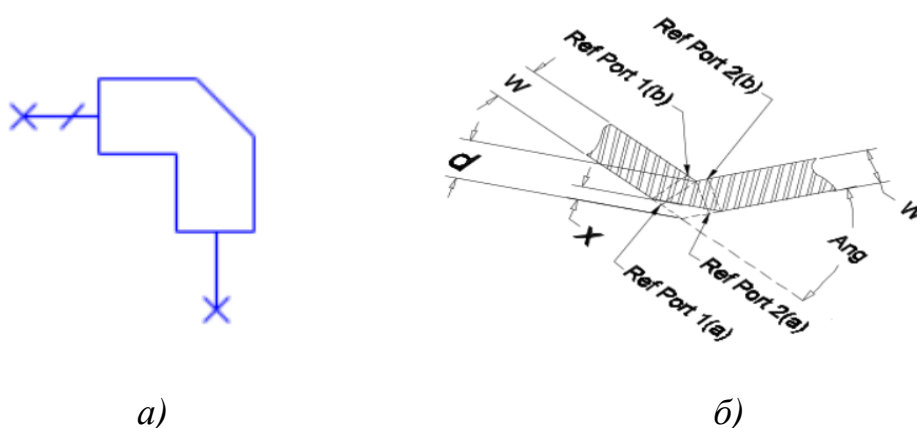


Рисунок 2.4 - Зображення моделі повороту MBENDA (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.4 - Параметри моделі повороту MBENDA.

Параметр	Опис	Значення за замовчанням
W	Ширина провідника	
ANG	Кут повороту	90°
MSUB	Тип підкладки	

В даний момент оптимальний відсоток зрізу повинен бути інтерпольований з наступної таблиці. Параметр W (ширина смужки) - це вимір, введений в одиницях довжини за замовчуванням, Н - висота підкладки .

Таблиця 2.5 - Оптимальний відсоток зрізу.

W/H	0°	30°	60°	90°	120°
0.5	0%	12%	45%	75%	98%
1	0%	19%	41%	63%	92%
2	0%	7%	31%	56%	79%

2.2.2 Закруглений мікросмужковий поворот(Curved Microstrip Bend): MCURVE2

Модель MCURVE2 є схемним компонентом, який використовується для моделювання ділянки мікросмужкової лінії, зігнутої вздовж кругової дуги, у мікрохвильовій техніці. Вона базується на методі відповідності моді, яка забезпечує високу точність результатів моделювання.

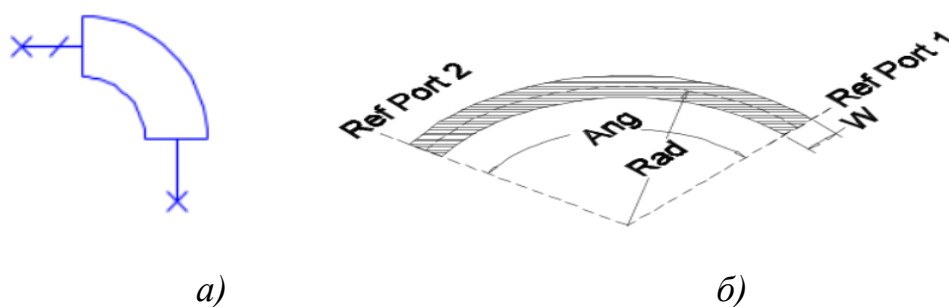


Рисунок 2.5 - Зображення моделі закругленого мікросмужкового повороту MCURVE2 (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.6 - Параметри моделі закругленого мікросмужкового повороту MCURVE2.

Параметр	Опис	Значення за замовчанням
----------	------	-------------------------

W	Ширина провідника	
ANG	Кут повороту	90°

Продовження таблиці 2.6

NMH	Кількість мод вищого порядку	1
R	Радіус повороту	
MSUB	Тип підкладки	

Основні особливості та параметри моделі MCURVE2:

Радіус згину (R): MCURVE2 вимагає, щоб радіус згину не був меншим за ширину провідника (W). Якщо $R \leq W$, модель видаватиме попередження про зниження точності.

Параметр NHM: Цей параметр контролює точність моделювання. Він може приймати значення в діапазоні $0 \leq NHM \leq 10$. Значення $NHM = 1$ використовується за замовчуванням і забезпечує прийнятну точність при оптимальному часі обчислення. Збільшення значення NHM до 3 може покращити точність, але це призводить до збільшення часу обчислення. Не рекомендується використовувати значення $NHM > 3$, оскільки це може

призвести до зайвого збільшення часу обчислення без значного поліпшення точності.

Верхня межа діапазону оцінки частоти: Для певних комбінацій ширини провідника W і частоти оцінки, модель може видавати попередження про те, що вона працює вище частоти відсікання вищого режиму. У цьому випадку результати моделювання можуть бути некоректними у високочастотній області. Для усунення цього повідомлення слід зменшити верхню межу діапазону оцінки частоти.

Відношення радіуса згину до ширини провідника (R/W): MCURVE2 досягає найкращої точності, коли співвідношення $R/W \geq 2$. Якщо кривизна згину занадто велика і співвідношення R/W стає меншим за 2, модель може втратити точність.

Обмеження співвідношення R/W : Модель обмежує співвідношення R/W до значення 500. Для дуже великих значень R , модель MCURVE2 надає результати, що відповідають ділянці прямої мікросмужкової лінії рівної довжини. Проте не рекомендується використовувати надто великі значення R , оскільки це може вплинути на точність результатів.

2.2.3 Мікросмужковий поворот на 180 градусів (U-turn 180-degrees Microstrip Bend): MUBEND

MUBEND моделює з'єднання між кінцями двох сусідніх з'єднаних мікросмужкових ліній передачі. Воно складається з двох згинів мікросмужкових ліній під прямим кутом, з'єднаних з лінією передачі.

Основне використання полягає в якості компонента для мікросмужкових фільтрів.

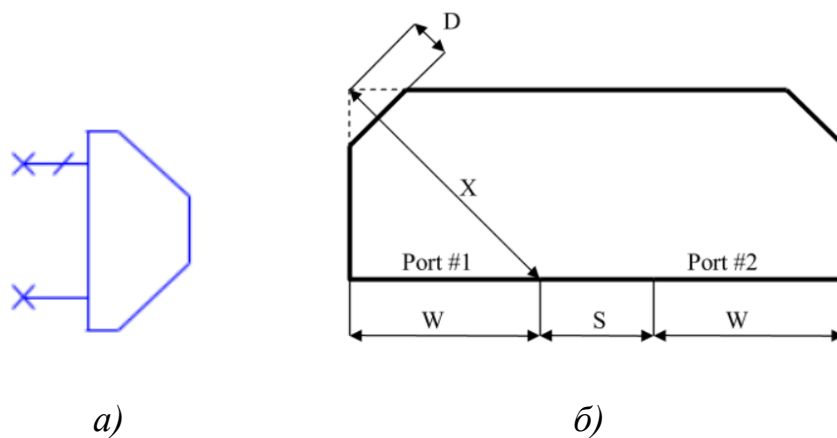


Рисунок 2.6 - Зображення моделі мікросмужкового повороту на 180 градусів MUBEND (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Таблиця 2.7 - Параметри моделі мікросмужкового повороту на 180 градусів MUBEND.

Параметр	Опис	Значення за замовчанням
W	Ширина провідника	
S	Розрив між поворотами	
M	Згин кута	0
MSUB	Тип підкладки	

Значення згину M визначається як D/X (див. "Топологія") і не може перевищувати 0.5.

Обмеження та рекомендації щодо параметрів:

- Зверніть увагу, що максимальне значення згину M дорівнює 0.5. Якщо $M > 0.5$, ця модель видаватиме помилку. Ця

обмеження встановлено для уникнення перекриття згинів, якщо значення параметра S занадто мале.

2. Параметр W відноситься до обох портів MUBEND; MUBEND призначений для з'єднання мікросмужкових ліній рівної ширини.

2.3 Моделі компонентів

2.3.1 Тонкоплівковий конденсатор для Монолітно-інтегрованих мікросхем (Thin Film Capacitor for MMIC): TFCM

Цей компонент схеми моделює тонкоплівковий конденсатор MMIC (мікрохвильової інтегральної схеми).

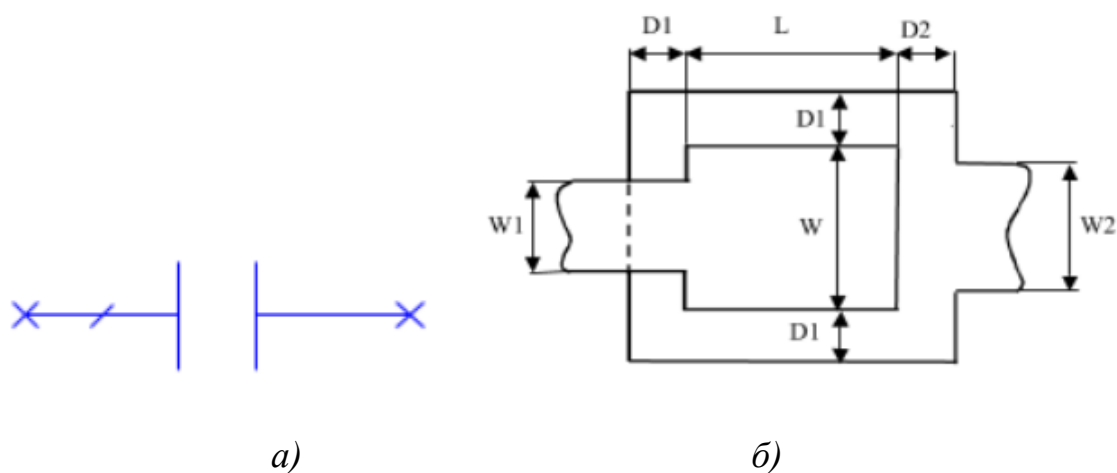


Рисунок 2.7 - Зображення моделі тонкоплівного конденсатора TFCM (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Параметри W , L , $W1$, $W2$, $D1$, $D2$ є розмірами, введеними в одиницях довжини за замовчуванням. CA - це ємність на площину і повинна бути введена лише у фарадах/квадратний метр. RS - це послідовний опір і повинен бути введений в одиницях опору. Параметр $MSUB$ вказує на елемент підкладки, який визначає додаткові параметри поперечного перерізу та характеристики підкладки. Якщо поле порожнє, використовується значення за замовчуванням. Ця модель враховує ступені ширини на нижній і верхній з'єднаннях та фазовий зсув, пов'язаний з кінцевою електричною довжиною компонента. Цей компонент має особливу здатність синтезу. Це означає, що обчислена ємність постійно відображається на схемі і автоматично оновлюється після зміни впливаючих параметрів.

2.4 Розмежування

2.4.1 Мікросмужкове перехрестя (Microstrip Cross - Junction):

MCROSS2

З'єднання чотирьох мікрополоскових ліній. Опорні площини для з'єднання є кінцями відповідних ліній; іншими словами, опорна площа в будь-якому вузлі є бічною поверхнею найширшої з ліній, підключених до цього вузла. Параметр MSUB вказує назву елемента MSUB для характеристик підложки. Якщо поле порожнє, використовується значення за замовчуванням.

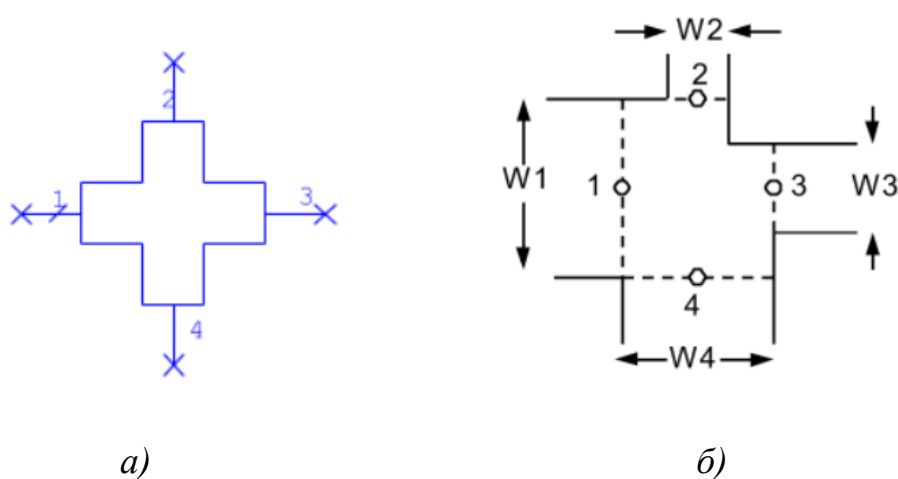


Рисунок 2.8 - Зображення моделі мікросмужкового перехрестя MCROSS2 (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

2.5 Моделі підкладок

2.5.1 Microstrip Substrate Definition: MSUB

MSUB вказує назву елементу MSUB, що використовується для характеристик підкладки. Якщо поле залишити порожнім, використовується значення за замовчуванням.

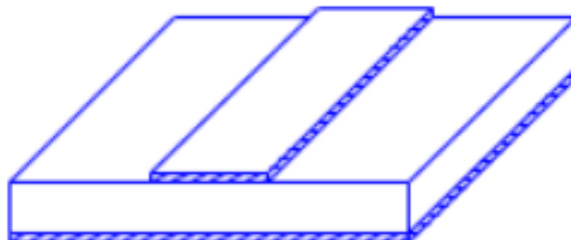


Рисунок 2.9 - Зображення моделі підкладки MSUB.

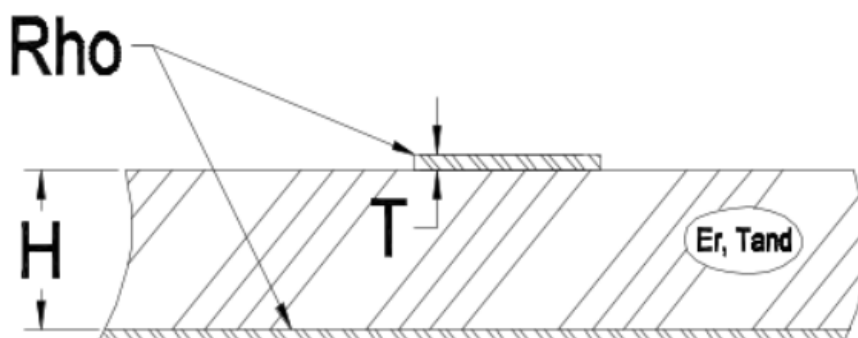


Рисунок 2.10 - Зображення топології підкладки MSUB.

Основні параметри моделі MSUB:

ϵ_r - діелектрична проникність матеріалу підкладки відносно діелектричної проникності вільного простору $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/M

ϵ_{rNom} - номінальна діелектрична стала підкладки відносно діелектричної проникності вільного простору. Використовується тільки в Х-моделях, де всі ЕМ-дані зібрані при ϵ_{rNom} , і застосовується варіаційний підхід для оцінки властивостей при невеликих відхиленнях ϵ_r

від Er_Nom. Детальніше дивіться "Як належним чином налаштувати параметри підкладки для X-моделей".

Tand - діелектричний тангенс втрат матеріалу підкладки: $Tand = \epsilon_r''/\epsilon_r'$, де $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$.

Rho - об'ємна опірність металу провідника нормована до золота (до значення $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$).

Фактична об'ємна опірність металу = $Rho \cdot 2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

H та T - змінні залежні від поперечного перерізу, задані в одиницях довжини за замовчуванням.

У схемі, що містить елементи мікросмужкових ліній, повинен бути принаймні один екземпляр цього елемента. Параметр Name надає унікальний ідентифікатор для кожного екземпляра MSUB. Елементи мікросмужкових ліній мають параметр MSUB, який вказує, який елемент MSUB використовувати.

2.5.2 Two-Layer Microstrip Substrate Definition: MSUB2

Моделі ліній на основі MSUB2 використовують однакову товщину T для всіх провідників ліній. ЕМ-моделі квазістатички приймають від'ємне значення T: в цьому випадку модель підраховує, що провідники вдавлюються в підлягаючий шар.

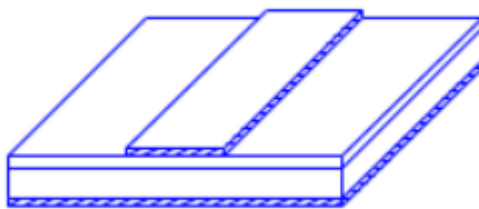


Рисунок 2.11 - Зображення моделі підкладки MSUB2.

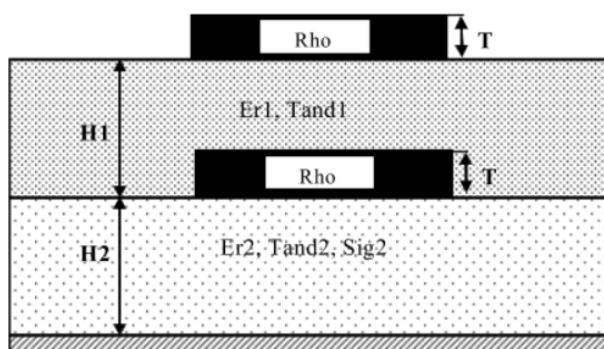


Рисунок 2.12 - Зображення топології підкладки MSUB2.

Основні параметри моделі MSUB2:

Rho. Моделі ліній на основі MSUB2 використовують однакову об'ємну опірність металу відносно (нормовану) до опірності золота для всіх провідників ліній.

Обмеження та рекомендації для параметрів:

Sig2. ЕМ-моделі квазістатички на основі MSUB2 мають на увазі, що об'ємна провідність нижнього шару Sig2 повинна бути меншою або рівною 3 С/м через апроксимацію, що використовується для оцінки втрат провідності підкладки. Необмежена провідність підкладки надається моделями, що базуються на методі скінченних елементів (Finite Element Method, FEM), такими як FM1LIN, FM2CLIN, FMRIND, FMOCIND (використовуйте підкладку FMSUB).

Рекомендації щодо використання:

Елемент MSUB2 повинен бути присутнім на схемах, що містять елементи, які використовують MSUB2, або розташованим у вікні Global Definitions. У останньому випадку моделі, що використовують глобальне визначення MSUB2, повинні на нього прямо посилатися.

2.5.3 Four Layer Microstrip Substrate Definition: MSUB4

Модель MSUB4 дозволяє моделювати підкладку, яка складається із 4 шарів різних діелектриків.

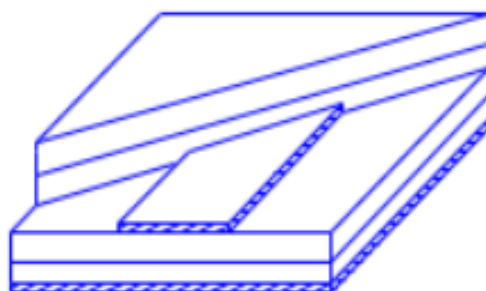


Рисунок 2.13 - Зображення моделі підкладки MSUB4.

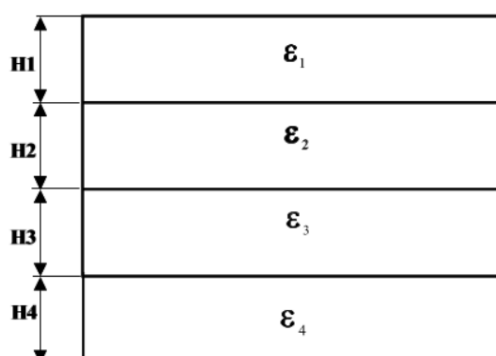


Рисунок 2.14 Зображення топології підкладки MSUB4.

Основні параметри моделі MSUB4:

ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} , ϵ_{r4} - діелектричні проникності матеріалів підкладки відносно вакууму $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/M}$

Tand1 , Tand2 , Tand3 , Tand4 - коефіцієнти втрат діелектричного матеріалу: $\text{Tand} = \epsilon_r''/\epsilon_r'$, де $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$.

Rho - об'ємна опірність металевого провідника, нормована до золота (до $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$).

Фактична об'ємна опірність металу = $\text{Rho} * 2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

H1 , H2 , H3 , H4 і T - змінні перерізу вводяться в одиницях довжини за замовчуванням.

У схемі, яка містить елементи мікросмужкових ліній, повинен бути присутній принаймні один екземпляр цього елемента. Параметр Name надає унікальний ідентифікатор для кожного екземпляра MSUB4. Елементи мікросмужкових ліній мають параметр MSUB4, який вказує, який елемент MSUB4 використовувати.

Ця підкладка використовується в моделях MEMLIN (вбудована мікросмужкова лінія) та MEM2LIN (2 вбудовані зв'язані мікросмужкові лінії).

3 ВИБІР МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ В ПЗ “MICROWAVE OFFICE”

FMLINX - це модель, яка використовується для створення ділянки мікросмужкової лінії в мікрохвильових пристроях. Вона може бути розташована на верхній поверхні або всередині ізолюваних шарів над провідною підкладкою з ґрунтовою площиною.

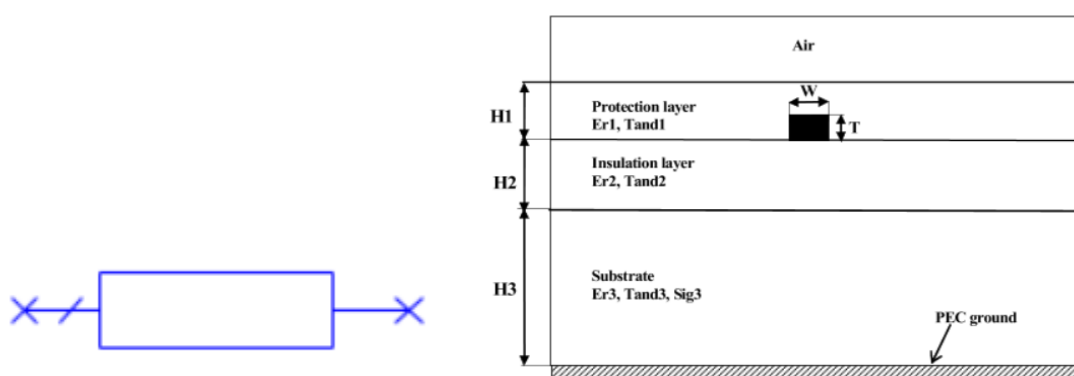


Рисунок 3.1 - Зображення моделі ділянки мікросмужкової лінії FMLINX (а) та топологія моделі (б) в середовищі Microwave Office.

Модель FMLINX дозволяє працювати з різними типами провідників, незалежно від їх ширини. Вона забезпечує точні результати навіть для провідників з товщиною, яка перевищує їх ширину. Також, FMLINX працює з провідними підкладками, що робить його більш універсальним у використанні.

Також за допомогою цієї моделі можна виконувати моделювання характеристик на багатошарових основах. Ця модель мікросмужкової лінії використовує Метод скінченних елементів (Finite Element Method (FEM)), що дозволяє виконувати моделювання характеристик ефективно і точно, саме тому було обрано дану модель, щоб отримати більш точні характеристики мікросмужкової лінії.

4 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Метою дослідження було моделювання мікросмужкової лінії, яка будується на двошаровій підкладці, де один із шарів може змінювати свою діелектричну проникність під впливом певного керуючого сигналу. Наприклад, це може бути шар параелектричного матеріалу, властивості якого змінюються під впливом зовнішнього електромагнітного поля. Така структура мікросмужкової лінії може бути корисною, наприклад, при побудові фазообертачів чи фільтрів, характеристики яких змінюються під впливом керуючого сигналу.

На рис. 4.1. наведено загальний вигляд структури мікросмужкової лінії на двошаровій підкладці.

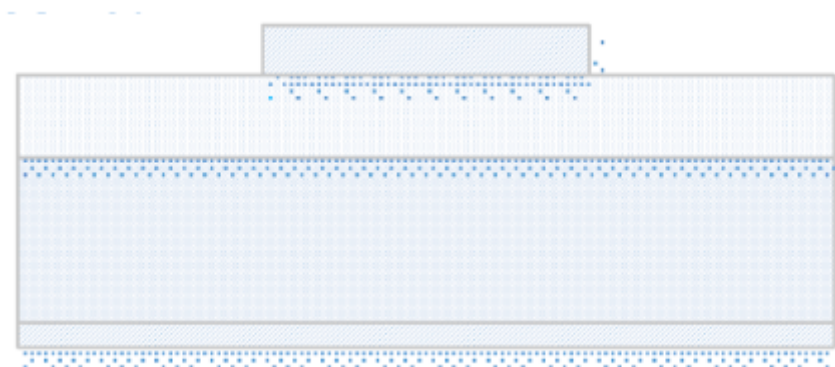


Рисунок 4.1 - Загальна схема мікросмужкової лінії на двошаровій підкладці.

Згідно з міркуваннями, наведеними в попередніх розділах, оптимальна структура комірки в середовищі MicrowaveOffice, яка дозволить виконати моделювання структури, наведеної на рис. 4.1, наведене на рис. 4.2.

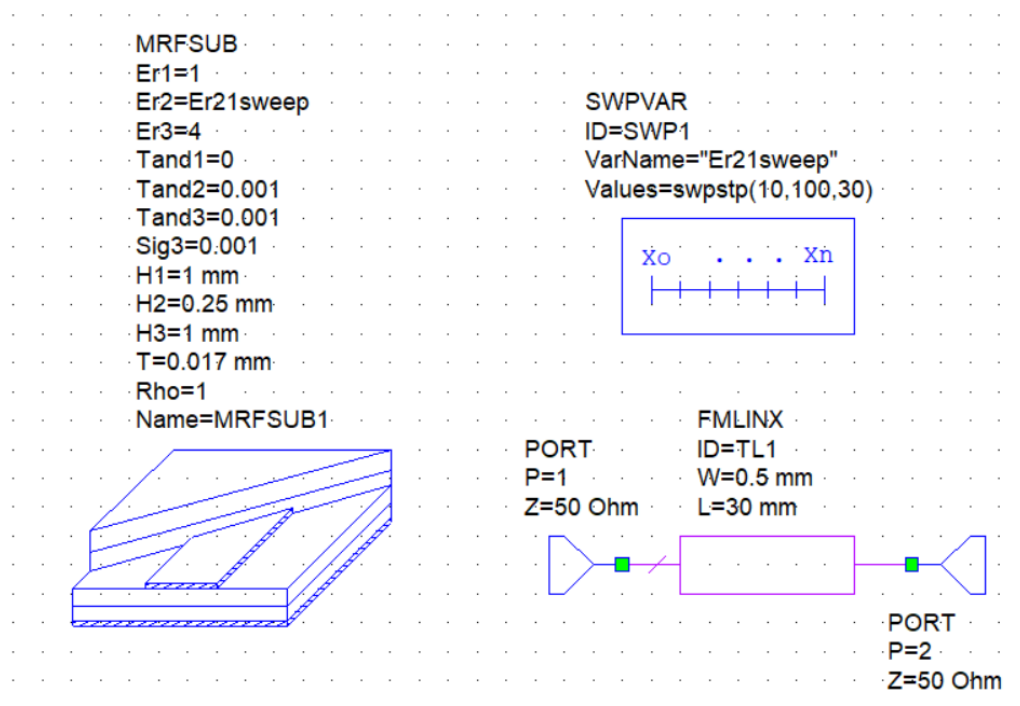


Рисунок 4.2 - Схема комірки в MicrowaveOffice, яка дозволяє виконати дослідження схеми, зображеної на рис. 4.1.

Схема дослідження складається з двох портів, моделі FMLINX мікросмужкової лінії, моделі підкладки MRFSUB, згідно якої здійснюється моделювання мікросмужкової лінії, і інструменту для варіювання параметрів.

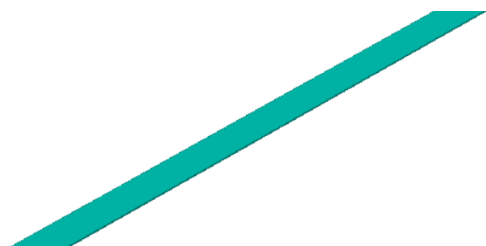


Рисунок 4.3 - 3D зображення мікросмужкової лінії, яка досліджувалась по схемі, наведеній на рис. 4.2.

Порти призначені для прикладення сигналів до схеми. Аналіз портів дозволяє з'ясувати, як сигнали передаються через схему, які втрати відбуваються, які перетворення сигналу відбуваються при входному та

вихідному з'єднанні. Важливим аспектом портів є їхнє використання для визначення S-параметрів схеми. Кожен порт у схемі може бути вимірний та описаний відповідними S-параметрами, що вказують на його реакцію на сигнал, що надходить з інших портів.

Використання портів у дослідженні та моделюванні електронних схем дозволяє зрозуміти, як сигнали поширюються та взаємодіють у системі. Вони допомагають визначити оптимальні умови підключення та забезпечити ефективну передачу сигналів у реальних електронних пристроях.

Підкладка MRFSUB складається з трьох шарів діелектриків, як це зображено на рис. 4.4.

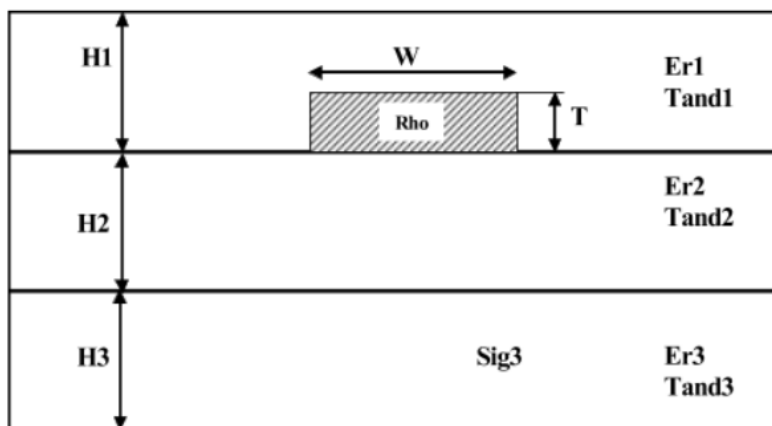


Рисунок 4.4 - Топологія моделі трьохшарової підкладки MRFSUB

В цій моделі підкладки шар із діелектричною проникністю $Er3$ ми будемо використовувати як шар із незмінною діелектричною проникністю. Шар із діелектричною проникністю $Er2$ буде використано для моделювання шару із керованою діелектричною проникністю, а використання шару із діелектричною проникністю $Er1$ не передбачено

задачею що розглядається, тому ми будемо вважати цей шар повітрям, тобто $\epsilon_{r1} = 1$. Мікросмужкова лінія розташована на шарі ϵ_{r2} .

В межах проведених досліджень було проведено два чисельних експеримента зі сталими значеннями ϵ_{r3} : перший чисельний експеримент для $\epsilon_{r3}=4$, та другий чисельний експеримент для $\epsilon_{r3}=10$.

При виконанні кожного чисельного експерименту ϵ_{r2} варіювалося. Зокрема, було використано 4 значення діелектричної проникності - 10, 40, 70 і 100.

Технічно, варіювання значення діелектричної проникності ϵ_{r2} були виконані за допомогою інструменту SWPVAR, який дозволяє гнучко налаштувати перебір будь-якого параметру. Тобто, можна обрати діапазон в якому буде варіюватись параметр, а також кількість точок або яким кроком рухатись. Використання такого інструменту дозволило зобразити декілька характеристик в одних координатних осях. Зокрема, параметр ϵ_{r2} задавався в діапазоні від 10 до 100 з кроком 30, таким чином було отримано по 4 відповідних характеристики.

Окрім діелектричної проникності в кожному шарі було налаштовано тангенс втрат $\tan\delta$, висота кожного шару H та товщина провідника T .

Чисельний експеримент 1: $\epsilon_{r3} = 4$

При збільшенні діелектричної проникності другого шару, можна спостерігати зменшення амплітуди сигналу, а це означає що зі збільшенням діелектричної проникності сигнал передається краще.

Але оскільки характеристики знаходяться у від'ємному діапазоні, то присутні деякі втрати сигналу.

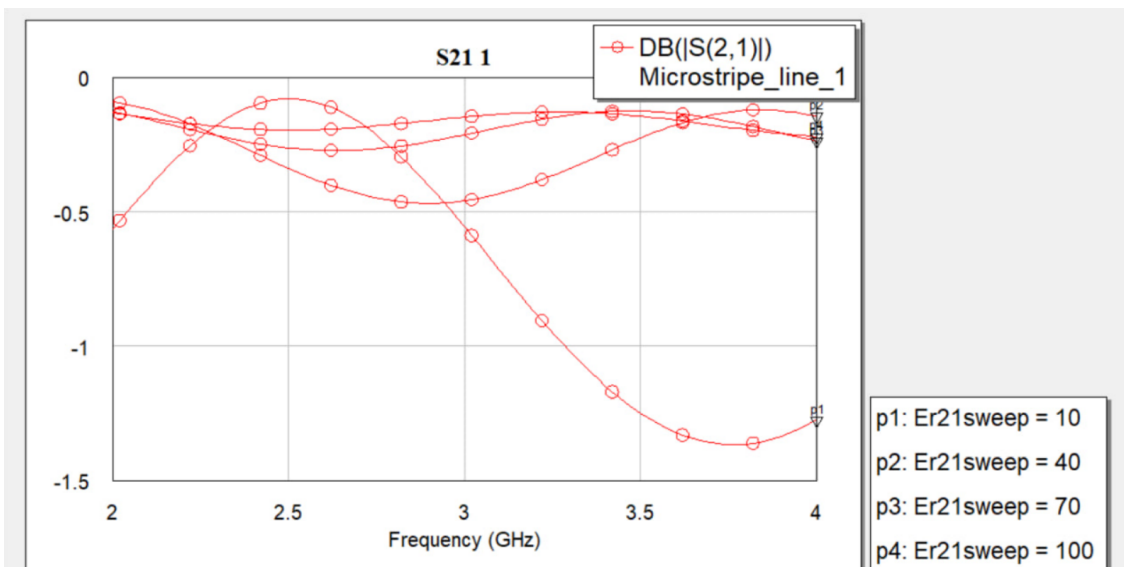


Рисунок 4.5 - Залежність модуля S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності ϵ_{r2} для підкладки із сталюю $\epsilon_{r3}=4$

S_{11} вимірює відношення амплітуди відбитого сигналу від вхідного порту до амплітуди вхідного сигналу. Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки добре лінія передачі узгоджена з джерелом. Збільшення значення S_{11} вказує на гірше узгодження між портами, через що і збільшується втрата сигналу. Тобто зі збільшенням проникності збільшуються втрати сигналу.

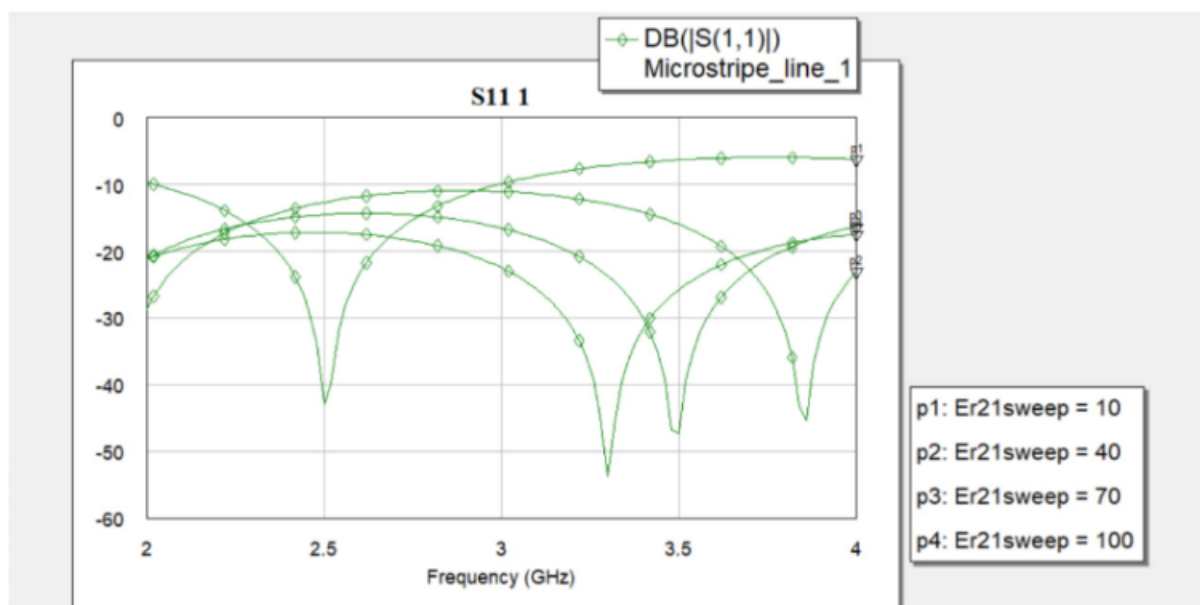


Рисунок 4.6 - Залежність модуля S_{11} від частоти для різних значень діелектричної проникності Er_2 для підкладки із сталою $Er_3=4$

Фаза вимірює, наскільки зміщений в часі сигнал порівняно з початком відліку. Вона виражається в градусах або радіанах. Фаза є важливою характеристикою сигналу, оскільки вона впливає на спосіб взаємодії сигналів у системах зв'язку, обробці сигналів та інших застосуваннях.

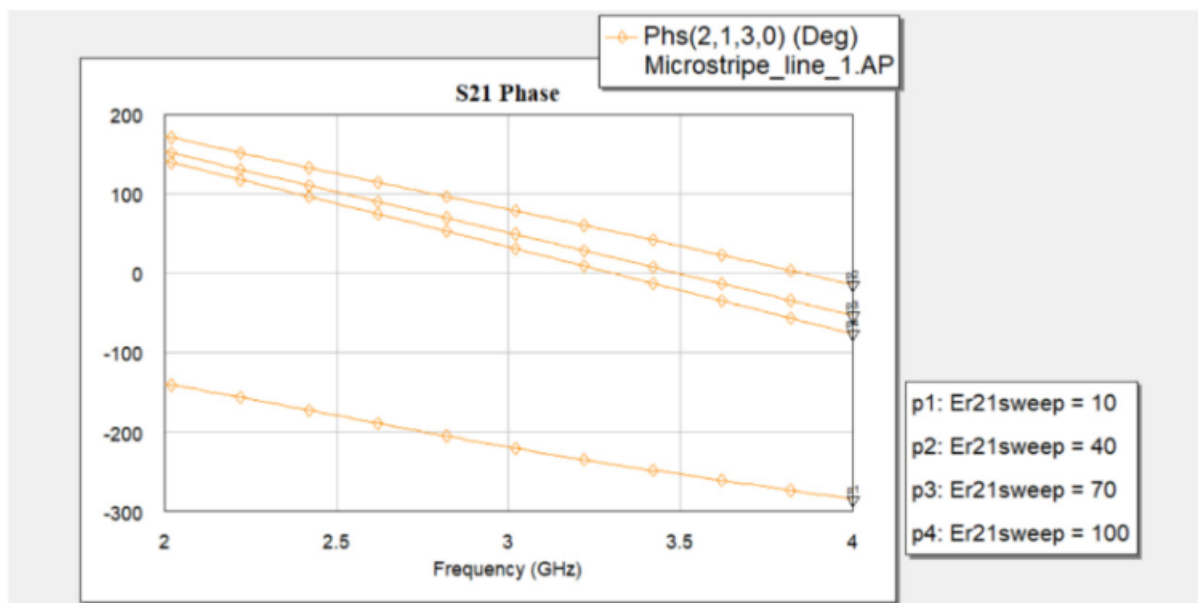


Рисунок 4.7 - Залежність фази S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності $Er2$ для підкладки із сталою $Er3=4$

Фазовий зсув вимірює, наскільки змінюється фаза сигналу при проходженні через систему або пристрій. Це може бути викликано різними факторами, такими як затримки сигналу в елементах системи або фільтраційні характеристики пристрою. Фазовий зсув також виражається в градусах або радіанах і може бути позитивним або негативним.

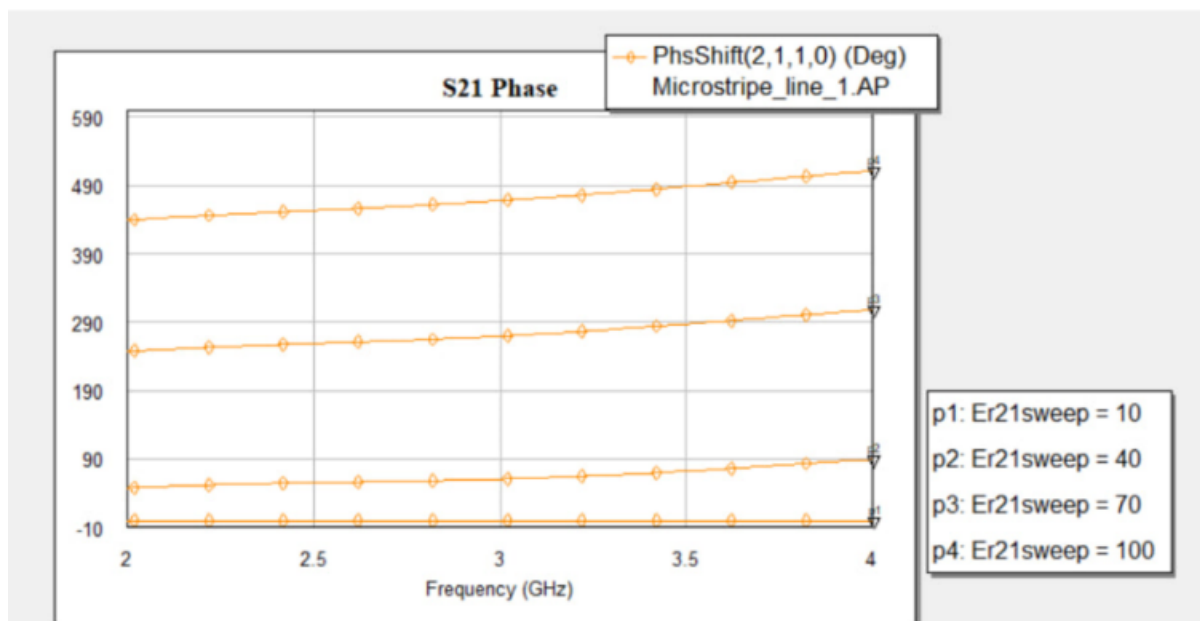


Рисунок 4.8 - Залежність фазового зсуву S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності ϵ_r2 для підкладки із сталою $\epsilon_r3=4$

Зменшення діелектричної сталої матеріалу в лінії передачі призводить до збільшення швидкості розповсюдження сигналу. Це означає, що сигнал буде просуватись швидше через лінію передачі, а отже, фаза сигналу буде зменшуватись, що і можна спостерігати на графіку фази.

З іншого боку, збільшення діелектричної сталої матеріалу в лінії передачі призводить до зменшення швидкості розповсюдження сигналу. Це означає, що сигнал буде просуватись повільніше через лінію передачі, а отже, фаза сигналу буде зростати. Зміна шляху сигналу через лінію передачі при відносно повільному розповсюдженні може призводити до збільшення фазового зсуву.

Чисельний експеримент 2: $\epsilon_r3 = 10$

Для другого чисельного експерименту діелектричну проникність ϵ_r3 було збільшено до 10.

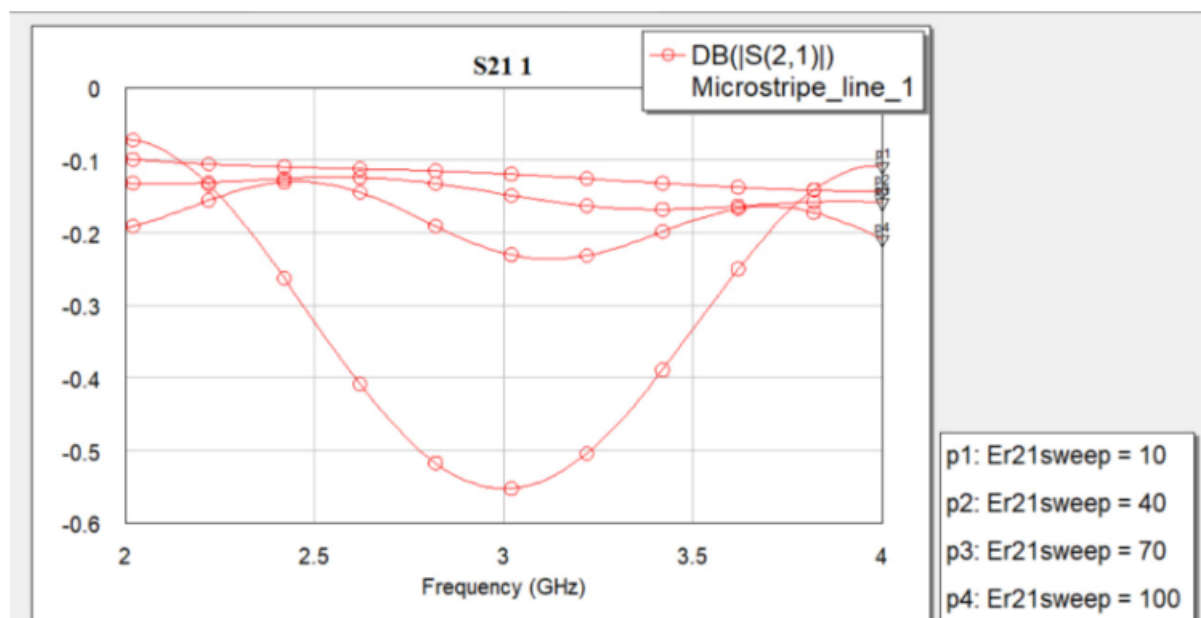


Рисунок 4.9 - Залежність модуля S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності ϵ_r2 для підкладки із сталою $\epsilon_r3=10$

При збільшенні діелектричної проникності сталого шару в параметрі S_{21} можна спостерігати зменшення амплітуди сигналу, і відповідно покращення протікання сигналу.

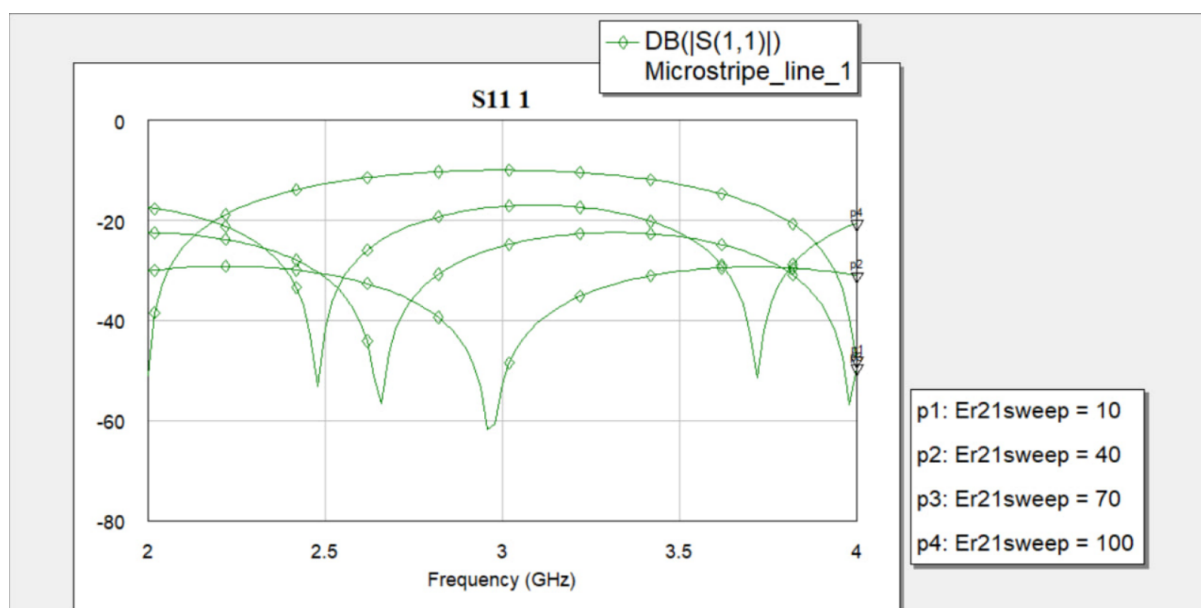


Рисунок 4.10 - Залежність модуля S_{11} від частоти для різних значень діелектричної проникності $Er2$ для підкладки із сталою $Er3=10$.

Збільшення значення діелектричної сталої матеріалу може призвести до збільшення імпедансу лінії передачі. Це може спричинити збільшення відбитого сигналу назад до вхідного порту, що проявиться у збільшенні значення S_{11} . Таким чином, можна спостерігати більше сигналу, який відбивається від вхідного порту і не передається від вхідного до вихідного порту.

Зменшення значення діелектричної сталої матеріалу може призвести до зменшення імпедансу лінії передачі. Це може знизити відбитий сигнал назад до вхідного порту, що проявиться у зменшенні значення S_{11} . Таким чином, менше сигналу відбивається назад, і більше сигналу передається від вхідного до вихідного порту.

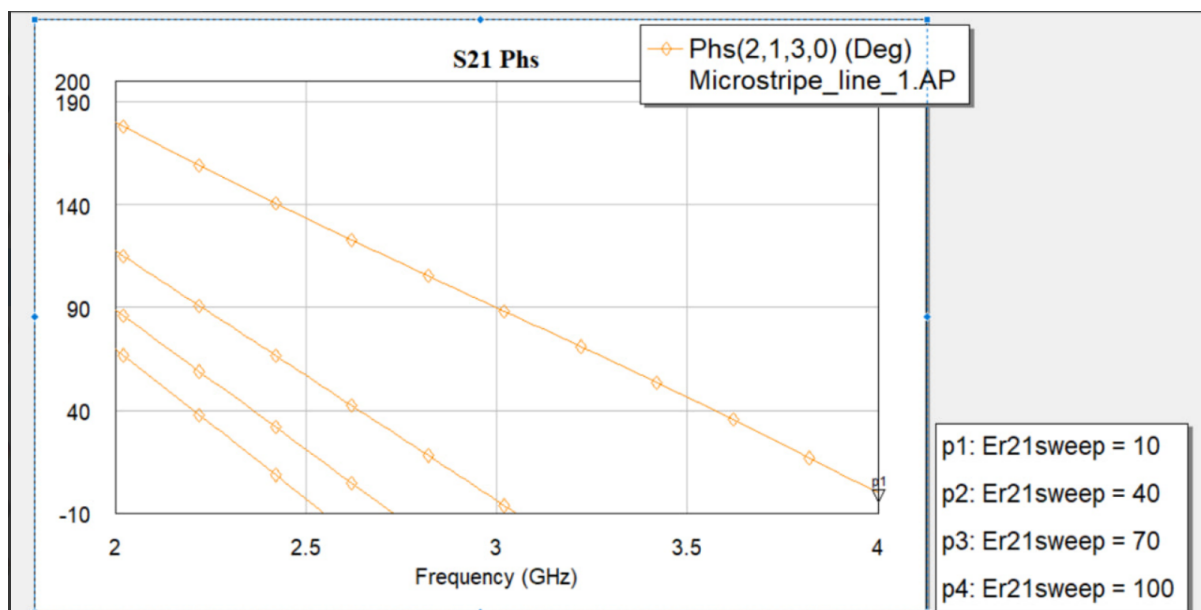


Рисунок 4.11 - Залежність фази S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності Er_2 для підкладки із сталою $Er_3=10$.

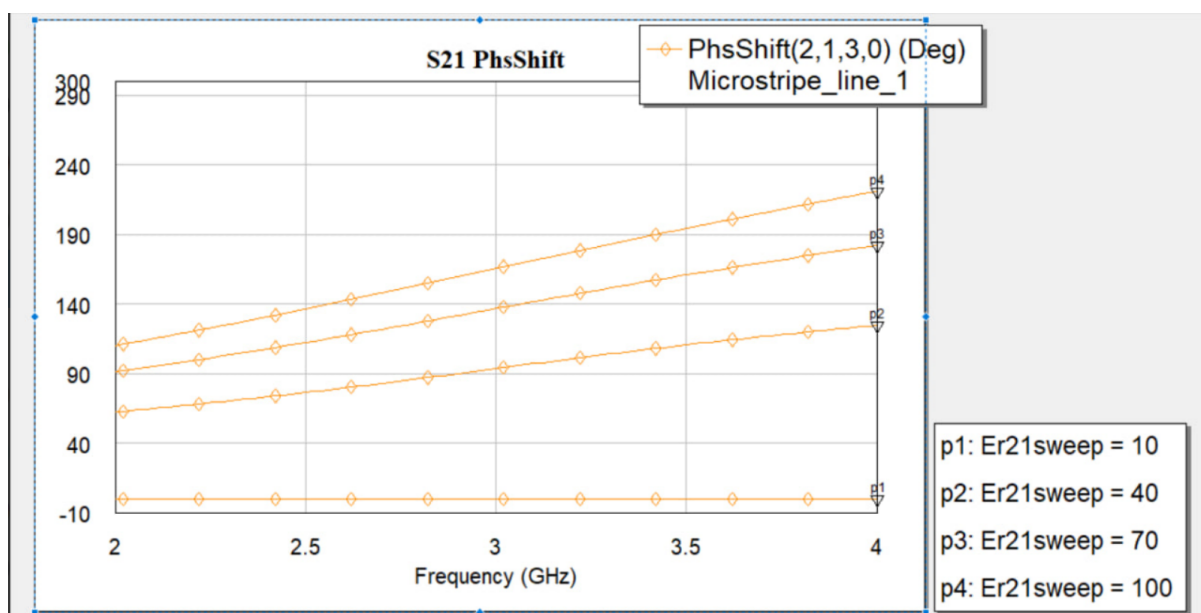


Рисунок 4.12 - Залежність фазового зсуву S_{21} від частоти для різних значень діелектричної проникності Er_2 для підкладки із сталою $Er_3=10$.

Зміна діелектричної сталої матеріалу в лінії передачі впливає на швидкість розповсюдження сигналу і, відповідно, на фазу сигналу. Зменшення діелектричної сталої призводить до збільшення швидкості розповсюдження сигналу, що в результаті зменшує фазу сигналу. Збільшення діелектричної сталої, навпаки, призводить до зменшення швидкості розповсюдження сигналу, що в результаті збільшує фазу сигналу.

ВИСНОВКИ

В процесі моделювання було досліджено двошарову мікросмужкову лінію передачі. При варіації діелектричної проникності верхнього шару підкладки, було отримано залежності модуля та фази S-параметрів, які є важливими при проектуванні електронних пристроїв.

Зміна діелектричної сталої матеріалу в лінії передачі впливає на її електричні характеристики. Зменшення діелектричної сталої призводить до збільшення швидкості розповсюдження сигналу, що впливає на фазу та фазовий зсув. Таким способом можна створити перелаштовувані компоненти.

Разом з тим, завдяки порівняно невеликій зміні властивостей, не спостерігається суттєва деградація амплітудних характеристик.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Transverse_mode
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Planar_transmission_line
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Stripline#/media/File:Stripline_geometry.svg
5. <https://en.wikipedia.org/wiki/Microstrip>
6. <https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%97%20%D0%9D%D0%92%D0%A7%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8/%D0%91%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%86.%D0%9C.%20%D0%9C%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0%20%D0%9D%D0%92%D0%A7.%20%D0%A7.%201.%20%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%97.%20%202017.pdf>
7. <https://illustrationprize.com/uk/490-abcd-parameters-of-transmission-line.html>
8. <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/abcd-parameters>
9. <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>
10. https://kb.awr.com/display/awrfaq/Documentation?preview=/11894861/93356088/MWO_AO_Elements_v22_1.pdf