

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

**Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

В. о. завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Діелектрики НВЧ з високою діелектричною проникністю»

Виконав:

студент IV курсу, групи ДП-91

Прохоренко Павло Михайлович _____

Керівник:

проф.каф.МЕ, д.ф.-м.н., проф.,

Поплавко Юрій Михайлович _____

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

Королевич Любомир Миколайович _____

Рецензент:

доцент, канд. техн. наук

Казміренко Віктор Анатолійович _____

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

Студент _____

Київ – 2023 року

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

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Прохоренко Павло Михайлович

1. Тема роботи «Діелектрики НВЧ з високою діелектричною проникністю», керівник роботи Поплавко Юрій Михайлович, проф.каф.МЕ, д.ф.-м.н., проф., затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 09.06.2023

3. Вихідні дані до роботи:

Досліджено НВЧ діелектрики з високою діелектричною проникністю їх термостабільність і особливості.

4. Зміст роботи

1. Дослідження літератури за темою роботи. 2. Вивчення механізмів поляризації діелектриків. 3. Вивчення особливості матеріалів з високою ϵ . 4. Дослідження термостабільності НВЧ діелектриків з високою ϵ . 5. Композитні структури з НВЧ-діелектриками. 6. Обговорення результатів роботи, оформлення звіту.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Презентація, таблиця областей використання НВЧ діелектриків з високою ϵ , таблиця основних механізмів електричної поляризації, криві частотної

залежності ϵ неполярних діелектриків, перерізи хвильоводу з різними методами заповнення діелектриком, криві впливу заповнення діелектрику, криві вимірювань для плівок, хвильовдний фазообертач, керування для хвильоводного фазообертача на частоті 10,5 ГГц для різних діелектриків, різні структури TiO_2 , змішані оксиди $\text{TiO}_2\text{--BaO}$ з різною концентрацією TiO_2 , криві залежності $\text{KT}\epsilon$ і ϵ від концентрації TiO_2 , таблиця ϵ , $\text{TK}\epsilon$ та $\text{tg}\delta$ в керамічних параелектриків на частоті ~ 10 ГГц і температурі 300 К, таблиця, криві ϵ і $\text{TK}\epsilon$ BLT, розташування електронних спінів на 4f-орбіталях РЗЕ, криві температурної залежності BLT, непряма обмінна взаємодія,

6. Консультанти розділів роботи*

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Дослідження літератури. Проходження інструктажу з техніки безпеки і протипожежної безпеки	17.04.2023 - 21.04.2023	
2	Вивчення механізмів поляризації діелектриків	24.04.2023 - 28.04.2023	
3	Вивчення особливості матеріалів з високою ϵ	01.05.2023 - 05.05.2023	
4	Дослідження термостабільності НВЧ діелектриків з високою ϵ	08.05.2023 - 12.05.2023	
5	Композитні структури з НВЧ-діелектриками	15.05.2023 - 19.05.2023	
6	Обговорення результатів роботи оформлення звіту	22.05.2023 - 26.05.2023	

Студент

Павло ПРОХОРЕНКО

Керівник

Юрій ПОПЛАВКО

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 55 сторінках, вона містить 4 розділи, 15 ілюстрацій, 2 таблиці, 24 використаних джерел.

Об'єктом дослідження є НВЧ діелектрики з високою діелектричною проникністю.

Предмет роботи – Висока діелектрична проникність, композитні структури і термостабільність.

Мета роботи Дослідити діелектрики НВЧ з високою діелектричною проникністю. Дослідити термостабільність мікрохвильових діелектриків, композитні структури НВЧ діелектриків.

У першому розділі було описано діапазони мікрохвильової техніки, сфери використання. Крім того, наведена класифікації НВЧ діелектриків за їх особливостями.

У другому розділі було описано деякі механізми поляризації НВЧ діелектриків та охарактеризовано причини появи поляризації. Описані квазіпружна електронна, іонна і дипольна поляризації.

У третьому розділі були розглянуті композитні структури з НВЧ діелектриками як «пасивні», так і регульовані структури.

У четвертому розділі описані термостабільні діелектрики, від чого залежить їх термостабільність та як її отримати. Це дозволить створювати нові матеріали які будуть відповідати вимогам, з низькими втратами та високою термостабільністю.

Ключові слова:

НВЧ, термостабільність, композити, композитні структури, висока діелектрична проникність.

ABSTRACT

The work is laid out on 55 pages, it contains 4 chapters, 15 illustrations, 2 tables, 24 used sources.

The object of research is high permittivity microwave dielectrics.

The subject of the work is high permittivity, composite structures and thermal stability.

The purpose of the work To investigate the dielectrics of microwaves with high permittivity. Investigate thermal stability of microwave dielectrics, composite structures of microwave dielectrics.

In the first chapter, the ranges of microwave technology, areas of use were described. In addition, the classification of microwave dielectrics according to their features is given.

In the second chapter, some mechanisms of microwave dielectric polarization were described and the reasons for the appearance of polarization were characterized. Quasi-elastic electronic, ion and dipole polarizations are described.

In the third chapter, composite structures with microwave dielectrics, both "passive" and adjustable structures, were considered.

The fourth chapter describes thermally stable dielectrics, what their thermal stability depends on, and how to obtain it. This will make it possible to create new materials that will meet the requirements, with low losses and high thermal stability.

Keywords

Microwave, thermal stability, composites, composite structures, high dielectric permeability.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ОСОБЛИВОСТІ НВЧ ТЕХНІКИ З ВИСОКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ.....	10
1.1 Класифікація нвч діелектриків з високою ϵ	11
1.1.1 Лінійні термостабільні діелектрики з малими втратами	12
1.1.2 Нелінійні мікрохвильові діелектрики.....	13
1.1.3 НВЧ композити.....	14
1.2 Висновки до розділу	17
2. Механізми поляризації НВЧ діелектриків	19
3. КОМПОЗИТНІ СТРУКТУРИ З НВЧ-ДІЕЛЕКТРИКАМИ.....	24
3.1 «Пасивний» діелектричний макрокомпозит	27
3.1.1 Два паралельно з'єднаних діелектрика	28
3.1.2 Хаотично розподілені, але з'єднані паралельно діелектрики.....	28
3.1.3 Два послідовно з'єднаних шари діелектрика.....	28
3.1.4 Розподілені послідовно з'єднані шари двох діелектриків	29
3.2 Мікрохвильові композити повітряно-діелектричного типу.....	29
3.3 Регульовані діелектричні композити з контрольованою повітряною щільністю	33
3.4 Діелектрично-повітряний композитний фазообертач у хвилеводі.....	36
3.5 Висновки до розділу.....	37
4. ДЕЯКІ ПРИКЛАДИ ТЕРМОСТАБІЛЬНИХ НВЧ-ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	39
4.1 Термостабільні мікрохвильові керамічні діелектрики з $\epsilon \sim 40$	39

4.2. Термостабільні мікрохвильові керамічні діелектрики з $\varepsilon \sim 100$	43
4.3 Висновки до розділу	50
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НВЧ – надвисокі частоти

ТК – температурний коефіцієнт

ЕП – електромагнітні перешкоди

ТЕМ – поперечно електромагнітні

РЗЕ – рідкоземельні елементи

MEMS – мікроелектромеханічні системи

BLT – $\text{BaLn}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ε – діелектрична проникність

λ – довжина хвилі

$\text{tg}\delta$ - тангенс кута діелектричних втрат.

ВСТУП

Діелектрики НВЧ з високою діелектричною проникністю відіграють вирішальну роль у сучасній мікрохвильовій техніці, дозволяючи розробляти ефективні та високопродуктивні пристрої. Ці матеріали, що характеризуються підвищеною діелектричною проникністю на мікрохвильових частотах, пропонують унікальні переваги щодо зберігання енергії, мініатюризації та підвищення продуктивності. У цій роботі подано огляд мікрохвильових діелектриків з високою діелектричною проникністю, показано приклади використання таких діелектриків, описано їх .

1. ОСОБЛИВОСТІ НВЧ ТЕХНІКИ З ВИСОКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ

НВЧ техніка, вивчає і використовує властивості електромагнітних коливань та хвиль у діапазоні частот від 300 МГц до 300 ГГц (λ від 1 мм до 1 м), такий діапазон ще називають мікрохвильовим, а техніку мікрохвильовою, цей діапазон вище, ніж діапазон радіочастот, але нижчий, ніж інфрачервоні та оптичні частотні діапазони. Техніка НВЧ включає різноманітні пристрої і системи (наприклад, випромінюючі, передавальні, приймальні, вимірювальні тощо), які застосовуються у різних галузях. Діапазон НВЧ або мікрохвильовий діапазон умовно розбивають на три менших діапазони: від 0,3 до 3 ГГц – дециметровий діапазон (λ від 10 см до 1 м), від 3 до 30 ГГц – сантиметровий діапазон (λ від 1 см до 10 см), від 30 до 300 ГГц – міліметровий діапазон (λ від 1 мм до 1 см).

Залежно від завдань, які вони вирішують і областей застосування, системи НВЧ можуть бути використані в інформаційних сферах, пов'язаних з радіозв'язком, телебаченням, радіолокацією, радіонавігацією, радіоуправлінням, технічною діагностикою, обчислювальною технікою та ін., а також в енергетичних сферах, що стосуються промислової технології, побутових приладів, медицини, біології, хімії та передачі енергії.

Мікрохвильові електронні компоненти та пристрої часто розроблені як компактні та легкі. Мініатюризація компонентів має вирішальне значення для таких девайсів, як мобільні пристрої зв'язку, де невеликий розмір і мала вага важливі. Мікрохвильова електроніка забезпечує високу швидкість передачі даних, тому може застосовуватися в системах високошвидкісної передачі даних, це означає здатність швидко й ефективно передавати великі обсяги даних через канал зв'язку або мережу. Також передбачає передачу цифрових сигналів або інформації на швидкості, вищій, ніж традиційні методи зв'язку.

Пристрої і системи НВЧ також широко використовуються як потужний інструмент в наукових дослідженнях, проведених у таких областях, як радіоспектроскопія, фізика твердого тіла, ядерна фізика, радіоастрономія та ін.

1.1 Класифікація НВЧ діелектриків з високою ϵ

Підвищену діелектричну проникність можна отримати в іонних кристалах з достатньо відкритою структурою, що дає можливість використовувати більшу поляризованість напіввільних електронних орбіт. При цьому в якості основного матеріалу можуть бути використані параелектрики витісного типу, структура яких характеризується низькочастотною поперечною оптичною модою ґратки. У деяких випадках термічну стабільність діелектричної проникності можна отримати в таких структурах, де параелектрика пригнічена парамагнетизмом. Малі діелектричні втрати можуть бути досягнуті тільки в монофазному складі, заснованому на «твердому» параелектричному матеріалі (який протистоїть утворенню полярної структури). Також стверджується, що основною причиною мікрохвильового поглинання в діелектриках з високою діелектричною проникністю є наявність у їхньому складі полярно-чутливої фази, тому рекомендується уникати будь-яких полярних матеріалів, які призводять до збільшення діелектричних втрат. Однак нелінійні діелектрики, які дають важливу можливість швидкого контролю їх діелектричної проникності, що використовується в мікрохвильових фазообертачах, очевидно, містять полярну фазу. Тим не менш, можна знайти компроміс, як поєднати високу діелектричну нелінійність з мінімальними діелектричними втратами. Запропоновано також інше рішення для пристроїв з адаптивною частотою: налаштовані резонаторні фільтри та фазообертачі [1, 2]. Розроблені для цього макрокомпозиції складаються з мікрохвильового діелектрика, з'єданого з

керованим повітряним проміжком, що дає можливість створювати мікрохвильові фазообертачі та фільтри без внесених втрат (керуючий п'єзоелектричний пристрій, розташований поза хвилеводним шляхом).

Основні галузі використання НВЧ діелектриків з високою ϵ (діелектрична проникність) наведено на рис. 1.1.

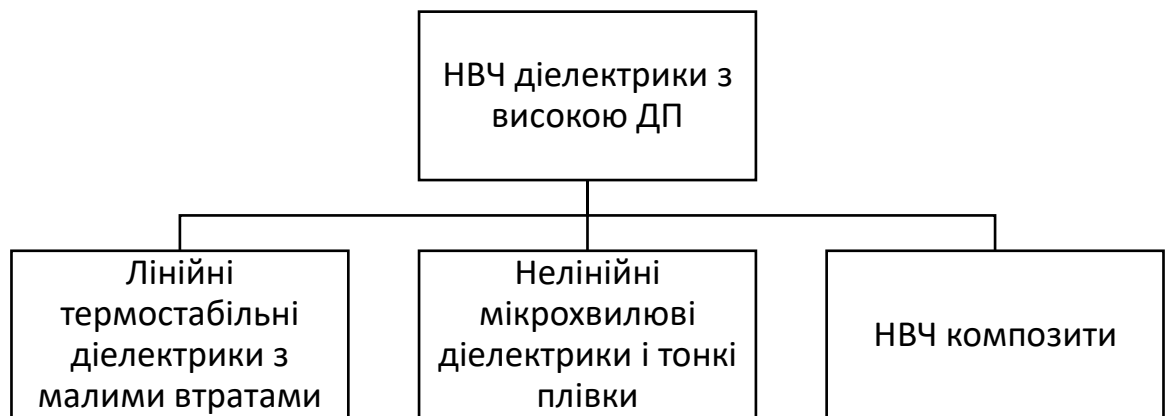


Рисунок 1.1 – Основні області використання НВЧ діелектриків з високою ϵ [3]

1.1.1 Лінійні термостабільні діелектрики з малими втратами

Лінійні термостабільні діелектрики з малими втратами є основним класом застосовуваних нині НВЧ-діелектриків із підвищеним значенням діелектричної проникності. Свого часу вони зробили революцію в бездротовому мікрохвильовому зв'язку, в рази зменшивши розмір і вартість фільтрів, генераторів і антен. Вони застосовуються в основному як мініатюрні конденсатори, діелектричні резонатори та підкладки мікрохвильових схем, зменшуючи їх площинні розміри в рази, що дуже важливо для мікроелектронних пристроїв. Вибір таких НВЧ-діелектриків визначається частотним діапазоном їх використання. Так, для метрових і дециметрових хвиль потрібні мікрохвильові діелектрики зі значенням ϵ від 150 до 80, для

сантиметрових хвиль переважні діелектрики з ϵ від 40 до 20, тоді як для міліметрових хвиль більш актуальною є діелектрики ϵ від 10 до 1,5. Такі діелектрики в основному використовуються в мікрохвильових підкладках і хвилеводах, в діелектричних резонаторах і антенах. Матеріалами для таких діелектриків є кераміка, полімери і композити, в тому числі гнучкі полімеркерамічні композити. Як правило, будь-яка термостабілізація ззовні небажана для мікрохвильових пристроїв; тому параметри мікрохвильових діелектриків повинні бути дуже стабільними в заданому інтервалі температур; зазвичай ці діелектрики повинні мати малий температурний коефіцієнт діелектричної проникності: $TK\epsilon = \epsilon^{-1} \frac{d\epsilon}{dT} < 10^{-5} K^{-1}$. Ця термічна стабільність, в основному забезпечується за рахунок компенсації негативного внеску в $TK\epsilon$, що виникає через механізм електронної поляризації, позитивним внеском у $TK\epsilon$ від механізму іонної поляризації. Низькі діелектричні втрати перерахованих діелектриків обумовлені їх малою електропровідністю і відсутністю в їх складі будь-яких полярно чутливих матеріалів.

1.1.2 Нелінійні мікрохвильові діелектрики

Нелінійні мікрохвильові діелектрики, здатні електрично керувати своєю ϵ , досліджуються в багатьох лабораторіях світу, і зараз вони знаходяться на початку застосування в НВЧ техніці. У них використовуються полярночутливі параелектрики, які здатні під зовнішнім впливом переходити в полярний стан. Тому їх нелінійність, безумовно, супроводжується збільшенням діелектричних втрат і значною зміною діелектричної проникності і зміною температури (навіть якщо вони використовуються як компонент композиту); тому неможливо гарантувати високу термічну стабільність і малі мікрохвильові втрати. Однак їх застосування спокусливо через можливість

швидкої перебудови електронних пристроїв аж до параметричної взаємодії. Ведуться пошуки компромісних рішень, для їх використання.

1.1.3 НВЧ композити

НВЧ композити представлені великою різноманітністю матеріалів різного призначення, як наприклад, гнучкі мікрохвильові підкладки, гнучкі поглинаючі екрануючі композити, діелектрики міліметрового діапазону та екрануючі композити. Композит - це багатокомпонентна система, в якій поєднуються кілька матеріалів різної структури з метою отримання певних властивостей кінцевого матеріалу. При цьому компоненти отриманого композиту не вступають у хімічні реакції, а зберігають індивідуальні властивості, утворюючи міжфазні кордони; тому властивості матеріалу багато в чому зумовлені геометричним розташуванням компонентів. Композити корисні тим, що в них можна отримати нові властивості, недоступні для кожного компонента окремо. Композитні матеріали дозволяють розробнику електронних матеріалів вирішувати необхідні технічні завдання шляхом поєднання властивостей різних матеріалів. Найпростішим прикладом мікрохвильового композиційного матеріалу є матрична суміш на основі полімеру з ϵ від 2 до 3 (тефлон або силіконовий каучук) і керамічного порошкового наповнювача з ϵ від 100 до 140 (рутил або перовскіт). У результаті вийде нерозсипчастий композитний матеріал з низькими втратами з ϵ від 2 до 40 (залежно від відсотку вмісту компонентів).

Гнучкі мікрохвильові підкладки потребують гнучкої (гумової) електроніки, коли пристрої повинні розтягуватись, скручуватись і деформуватись, що виглядає неможливим із використанням жорстких мікрохвильових підкладок. Зазвичай ці підкладки являють собою діелектричні пластини зі стабільною проникністю, ϵ від 3 до 10 і малими втратами на

мікрохвильових частотах ($\text{tg}\delta \sim 2,10^{-3}$). Крім того, мікрохвильова технологія упаковки вимагає низького коефіцієнта теплового розширення та високої теплопровідності матеріалів підкладки. Усі ці властивості повинні бути відтворені в гнучких підкладках для мікрохвильової електроніки, враховуючи, що з можливих механізмів поляризації слід використовувати лише неполярні діелектрики. Розроблено та використовується багато гумокерамічних композитів, властивості та технологія яких описані в [5].

Покриття з низьким відбиттям мікрохвиль особливо важливі у військовій електроніці, тому їх склад і технологія зазвичай не описуються детально. Ці абсорбуючі матеріали також є предметом сучасних досліджень. Для них необхідні великі діелектричні втрати навіть у тонких шарах, щоб забезпечити майже повне ослаблення НВЧ-випромінювання. Анізотропні кристали з мікрохвильовою дисперсією можуть бути застосовані в міліметрових і субміліметрових хвилях як поляризатор, в якому спостерігається сильна анізотропія мікрохвильового поглинання одноосьових сегнетоелектриків. Дуже близькими до поглиначів за механізмами фізичної взаємодії компонентів є метаматеріали, які є штучними періодичними структурами з постійними ґратки, значно меншими за довжину хвилі падаючого випромінювання. Це середовища, що складаються з резонансних елементів, в яких відбувається негативне поширення електромагнітних хвиль. Розміри «метаатомів» менше довжини хвилі випромінювання, що з ними взаємодіє. Вони мають здатність імітувати однорідний матеріал, властивості якого відсутні у природних матеріалів. У деяких метаматеріалах можна використовувати об'ємну решітку діелектричних резонаторів НВЧ. Можна також відзначити, що електромеханічний резонанс у дуже малих п'єзоелектричних резонаторах також можна використовувати для отримання негативного значення ϵ . Зазвичай цей резонанс виникає на частотах від 10^5 до 10^7 Гц (залежно від розміру п'єзоелемента); для реалізації цього резонансу в мікрохвилях п'єзорезонатори повинні мати розмір всього кілька мікрон.

Очевидно, що за реалізацію цього випадку відповідає технологія мікроелектроніки.

Гнучкі поглинаючі екрануючі композити є ще одним важливим застосуванням мікрохвильових електронних матеріалів. В даний час величезна кількість електронного обладнання використовується на високих і надвисоких частотах, що призводить до утворення навколо нас щільної атмосфери радіохвиль, що призводить до небажаних ЕП. Таким чином, існує висока потреба в екрануючих матеріалах, що поглинають електромагнітні хвилі; такі матеріали використовуються в комерційному та військовому обладнанні, наукових електронних пристроях, пристроях зв'язку та захисту від джерел радіації. Екрануючі поглиначі випромінювання - це гнучкі та легкі матеріали, необхідні для захисту електронного обладнання від перешкод, щоб зменшити ризик для здоров'я людини [6]. Тонкі шари металів, різні форми вуглецю (графіт, графен, карбін, нанотрубки), а також провідні полімери, магнітні матеріали є хорошими захисними матеріалами від електромагнітних перешкод. Добре електромагнітне поглинання демонструють полімери з високою провідністю (поліанілін, поліпірол, політіюфен та ін.), які, крім того, виявляють сильну стійкість до навколишнього середовища. Ось чому гнучкі композити, що екранують мікрохвилі, складаються з цих провідних полімерів у поєднанні з перерахованими вище поглинаючими твердими матеріалами, які відіграють роль наповнювачів. В даний час композити, що екранують ЕП, використовують магнітні наночастинки, які забезпечують найкраще поглинання мікрохвиль [4].

Діелектрики міліметрового діапазону та екрануючі композити, що застосовуються в діапазоні частот від 30 до 300 ГГц, повинні мати особливі характеристики. Зараз саме в цьому частотному діапазоні розробляється нова мікрохвильова електроніка: бездротовий гігабітний зв'язок використовує частотний діапазон від 57 до 66 ГГц, автомобільні радары працюють у діапазоні від 76 до 81 ГГц, радіоастрономічні та військові прилади займають частоти вище 90 ГГц тощо. У цих випадках в підкладках і резонансних

компонентах необхідно використовувати діелектрики з малими втратами (ϵ від 6 до 2, $\tan\delta$ від 10^{-3} до 10^{-4}). Очевидно, що ці керамічні та полімерні діелектрики повинні бути неполярними.

Що стосується розробки екрануючих композитів в діапазоні від 60 до 100 ГГц, то слід зазначити, що внесок провідності в мікрохвильове поглинання зменшується пропорційно зростанню частоти (в десятки разів); так само зменшує мікрохвильове поглинання, що виникає за допомогою магнітного резонансу. Тому у абсорбуючих композитах, призначених для міліметрових хвиль, зростає роль полярних діелектриків: у них поглинання НВЧ зростає пропорційно збільшенню частоти. Крім того, в полярних кристалах (сегнетоелектриках типу порядок-безлад) поглинання в міліметрових хвилях може бути надзвичайно анізотропним – в одному напрямку ці кристали демонструють хвильову прозорість, тоді як в іншому напрямку їх поглинання становить ~ 30 дБ/мм [6].

Таким чином, у мікрохвильових технологіях використовується безліч різних діелектриків – з низькою і високою діелектричною проникністю, з малими і високими діелектричними втратами. Багато в чому ці властивості залежать від полярності діелектриків — полярночутливі зв'язки збільшують ангармонічність коливань ґратки, що призводить до діелектричних втрат на мікрохвилях [7]. Ці та інші особливості визначаються різними механізмами електричної поляризації.

1.2 Висновки до розділу

Діелектрики НВЧ часто застосовуються як пасивні мікрохвильові компоненти. Також їх використовують як активні елементи мікрохвильової техніки. Особливо важливі мікрохвильові діелектрики з високою ϵ : неполярні

діелектрики служать основою для матеріалів з низькими втратами, тоді як полярні діелектрики є основою для матеріалів, що поглинають мікрохвилі.

Лінійні термостабільні діелектрики застосовуються як мініатюрні конденсатори, діелектричні резонатори та підкладки для мікрохвильових схем, зменшуючи площинні розміри пристроїв у рази. У їх складі слід уникати будь-яких полярно чутливих діелектриків. Гнучкі мікрохвильові підкладки потребують гнучкої (гумової) електроніки, коли пристрої повинні розтягуватись, скручуватись і деформуватись, що виглядає неможливим із використанням жорстких мікрохвильових підкладок.

Нелінійні мікрохвильові діелектрики з електрично керованою ϵ : можна використовувати в мікрохвильових фазообертачах і регульованих фільтрах. У них використовуються полярночутливі параелектрики, здатні під зовнішнім впливом переходити в полярний стан.

2. МЕХАНІЗМИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ НВЧ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Поляризація є основною властивістю, яка визначає особливості діелектрика як виду матеріалу і може виникати як під дією прикладеного електричного поля, так і під іншими зовнішніми впливами (зміна тиску, температури або опромінення).

У діелектрику електричне поле індукує зсув пов'язаних зарядів (створюючи поділ зарядів - поляризацію) і рух вільних зарядів (спричиняючи перенесення заряду - провідність); обидва ці явища виникають одночасно. У той же час поділ заряду (поляризація) призводить до струму зміщення, який випереджає по фазі на $\pi/2$ прикладену синусоїдну електричну напругу, і цей струм існує весь час, доки діє електричне поле (це справедливо як для змінної, так і для постійної напруги). У випадку, коли напруга перемикається, струм зміщення існує тільки в той час, коли змінюється електричне поле, а при постійній напрузі цей струм відсутній. Продовжуючи обговорювати відмінності цих двох явищ, слід зазначити, що провідність відноситься до транспортних явищ, тоді як поляризація (за рідкісним винятком) є оборотною властивістю. Крім того, внутрішня структура діелектриків несприятлива для руху вільних носіїв заряду, тому їх кількість незначна; навпаки, всі частинки діелектрика так або інакше беруть участь у поляризації.

Для мікрохвильових діелектриків найважливішим аспектом цих механізмів є їх інерція. Традиційно різні механізми поляризації вважаються «незалежними», і це міркування в основному виправдане. Класифікація діелектричних внесків різних механізмів у діелектричну проникність наведена на рис. 2.1.

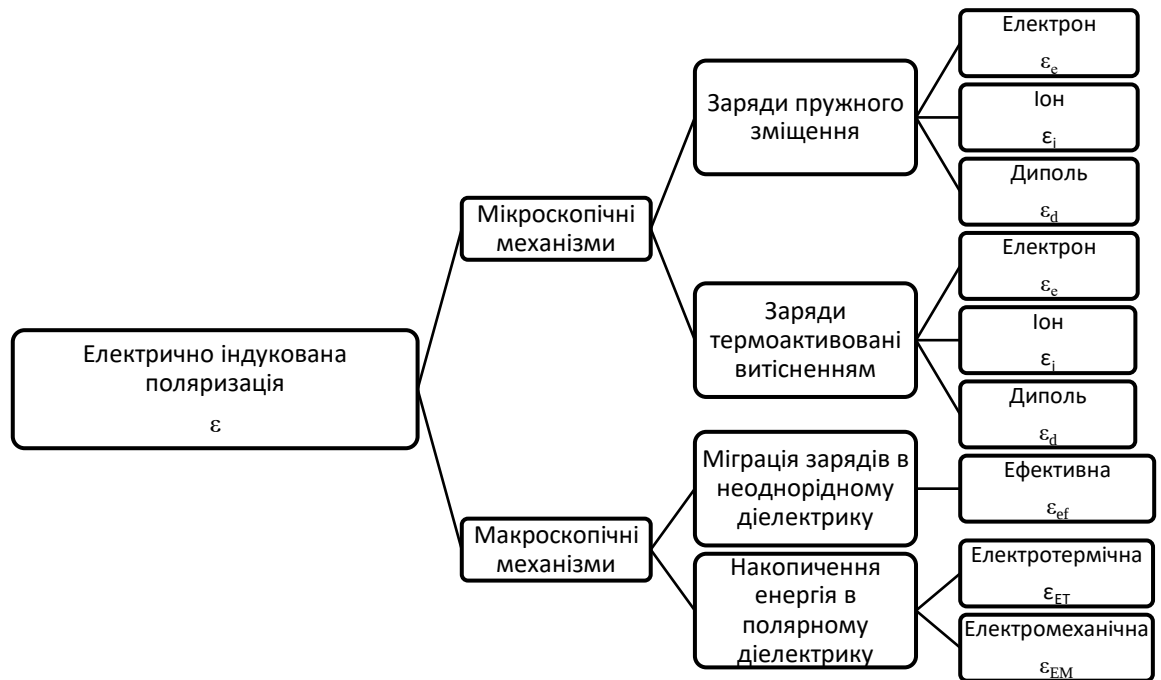


Рисунок 2.1 – Діелектрична проникність, зумовлена основними механізмами електричної поляризації [8]

Квазіпружна (тип деформації) індукована поляризація є найменшою інерційною поляризацією; на нього лише незначно впливає зміна температури, тому діелектрики з такою поляризацією є хорошими матеріалами для використання в мікрохвильовій техніці. Електронна квазіпружна поляризація (деформація електронних оболонок атомів, молекул або іонів в електричному полі), яка визначає діелектричну проникність ϵ_e , є загальним механізмом для всіх діелектриків. Іонна квазіпружна поляризація є характерною властивістю таких діелектриків і напівпровідників, у яких чітко виражений іонний тип зв'язку в кристалічній решітці; іонний механізм поляризації характеризується діелектричною проникністю ϵ_i . Квазіпружна дипольна поляризація з ϵ_d спостерігається в дуже рідкісних випадках: коли зовнішнє електричне поле індукує орієнтацію близько обмежених диполів.

Тільки ці механізми поляризації можуть бути повністю встановлені в мікрохвилях, і тільки вони викликають мікрохвильову діелектричну проникність $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_i$, рис. 3. Однак низькочастотні механізми поляризації

також опосередковано впливають на властивості мікрохвильових діелектриків, збільшуючи їхні діелектричні втрати. Справа в тому, що ті мікроскопічні рухи пов'язаних електричних зарядів діелектрика, які не встигають встановитися протягом чверті періоду коливань прикладеного поля, не можуть за цей час накопичити енергію для оборотного процесу поляризації. Однак вони продовжують рухатися в фазі з електричним полем, як «вільні» частинки, що призводить до незворотного явища провідності, тобто вони перетворюють частину отриманої електричної енергії в тепло, тобто у втрати.

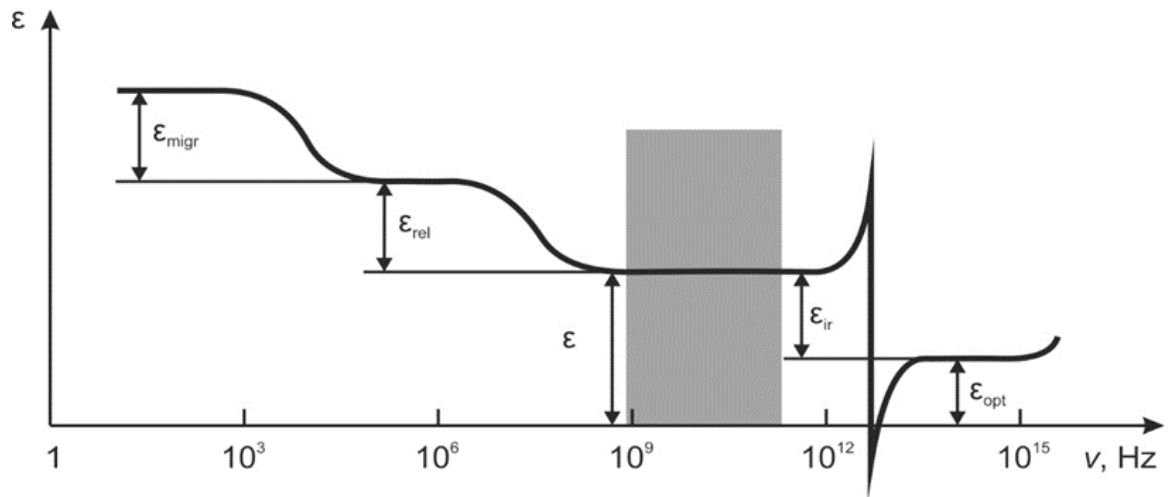


Рисунок 2.2 – Узагальнена частотна залежність діелектричної проникності неполярних діелектриків із показаними діелектричними вкладеними внесками від різних механізмів поляризації; діапазон мікрохвильових частот затемнений. [3]

Електрично індукована поляризація (релаксація) у твердих діелектриках, що підтримується теплом, передбачає діелектричний внесок, показаний на рис.2.1 як ϵ_{rel} і позначений на рис.2.2 як ϵ_{tl} , ϵ_{it} і ϵ_{dt} . Ця поляризація, в основному викликана структурними дефектами, є істотною, якщо електрони, диполі або іони слабо зв'язані в структурі діелектрика. Залишаючись локалізованими в нанорозмірних областях, ці заряджені частинки або диполі під впливом теплового руху здійснюють термічно активовані стрибки, переміщаючись на відстані порядку атомних розмірів. Електричне поле

впливає на напрямок цих теплових стрибків, які стають асиметричними та мають достатньо часу для створення електричного моменту, якщо частота невисока. Інерція термічно активованої поляризації набагато більша в порівнянні з квазіпружною поляризацією, так що на досить високих частотах цей рух заряджених частинок більше не сприяє поляризації, а тим самим збільшує електропровідність і втрати.

Електрично індукована поляризація просторового заряду (іншими словами поляризація міграції), діелектричний внесок якої показаний на рис.2.2 як ϵ_{migr} і позначений на рис.2.1 як ϵ_{ef} , є іншим додатковим механізмом поляризації, який спостерігається в деяких твердих тілах і композиційні матеріали з вираженою неоднорідною структурою. Причиною цієї поляризації є наявність шарів або областей з різною провідністю (наприклад, електропровідні вclusions в діелектрику). Поляризація просторового заряду є механізмом найнижчої частоти (найбільшої інерції), який може мати певний вплив на властивості композитів, що поглинають мікрохвилі.

Таким чином, лише деякі з перерахованих механізмів поляризації відповідають за ϵ на мікрохвилях, рис.2.2. По-перше, це електронна пружна поляризація, яка існує в будь-якому матеріалі, будучи єдиним механізмом, здатним реагувати навіть на оптичні частоти; тому відповідна діелектрична проникність позначається як $\epsilon_e = \epsilon_{\text{opt}}$. По-друге, це поляризація іонного пружного зміщення, яка надто повільна у видимому оптичному діапазоні, але має власний резонанс у дальньому інфрачервоному діапазоні (це досить швидко для мікрохвиль); тому іонний внесок у діелектричну проникність становить $\epsilon_i = \epsilon_{\text{IR}}$. Сума цих механізмів поляризації визначає мікрохвильову діелектричну проникність ϵ . Як показано на рис.2.2, інші механізми поляризації зазвичай надто повільні: міграційна поляризація з діелектричною проникністю ϵ_{migr} запізнюється вже вище частоти 1 кГц, тоді як релаксацийна поляризація (ϵ_{rel}) не може дати жодного внеску в діелектричну проникність вище частоти 100 МГц (але крім того, існують деякі полярно-чутливі діелектрики – сегнетоелектрики типу порядок-безлад – у яких фундаментальна

поляризація відбувається саме в мікрохвильовому діапазоні, але ця особливість не показана на рис.2.2).

2.1 Висновки до розділу

Тільки квазіпружна електронна і квазіпружна іонна поляризації можуть бути повністю встановлені в мікрохвилях. Тому вони основні компоненти мікрохвильової ϵ . Існує також квазіпружна дипольна поляризація. Але її можна спостерігати тільки коли зовнішнє електричне поле індукує орієнтацію близько обмежених диполів, але це відбувається не часто. Також існують інші види поляризації, сума внесків всіх механізмів поляризації дорівнює діелектричній проникності діелектрика.

3. КОМПОЗИТНІ СТРУКТУРИ З НВЧ-ДІЕЛЕКТРИКАМИ

У композиційних діелектриках матеріали з різними властивостями комбінуються для отримання необхідних технічних характеристик. Макрокомпозити являють собою суміші подрібнених матеріалів, композити складаються з великих частин різноманітних матеріалів, при цьому їх розташування може бути організовано особливим чином [4, 9-10]. Мікрохвильові композити можна розділити на «пасивні» (які не змінюють своїх параметрів під час роботи) і «функціональні» композити з електрично керованими властивостями, які використовуються для частотно-перебудовних пристроїв – у цьому розділі розглядаються переважно вони.

Що стосується мікрохвильових застосувань, найбільш поширеними мікрокомпозитами є наповнені полімери. Наприклад, суміш полімерного тефлону ($\epsilon = 2$, $\text{tg}\delta \sim 10^{-5}$) з дрібнодисперсним рутилом ($\epsilon = 100$, $\text{tg}\delta \sim 10^{-3}$) дозволяє отримати композиційні НВЧ-діелектрики з $\epsilon = 2-40$ і $\text{tg}\delta \sim 10^{-3}$. Такий композит застосовується в апаратах дециметрових і сантиметрових хвиль, створюючи мікрохвильовий діелектрик з малими втратами із заданою ефективною діелектричною проникністю. Так само суміш тефлону з мініатюрними порожнистими повітряними кулями дозволяє отримати гнучкі мікрохвильові діелектрики зі зниженою діелектричною проникністю в межах $\epsilon = 2-1,3$, що важливо в техніці міліметрового діапазону. Ці мікрохвильові композитні діелектрики характеризуються малими діелектричними втратами, оскільки в них використовуються тільки неполярні діелектрики, такі як тефлон або полістирол (які мають тільки електронну поляризацію), а також неполярний рутит або оксид алюмінію з чисто іонною поляризацією.

Іншим прикладом є матричні суміші пружного діелектрика (полімеру або каучуку) з феритовими, вуглецевими або металевими порошками. Для використання цих композитів ставиться протилежна задача – забезпечення високих втрат на придушення НВЧ-випромінювання. У цьому випадку бажано

використовувати полярність діелектрика, що входить до складу композиту. Ці типи композитів зазвичай мають низьке мікрохвильове відбивання з великим поглинанням, що важливо в мікрохвильовій техніці як матеріали, що поглинають мікрохвилі. Крім того слід зазначити, що поглиначі мікрохвильового випромінювання потрібні не тільки для військових застосувань (зменшення радіолокаційної помітності літаків, кораблів, танків та інших цілей), але мають також важливі цивільні застосування (зменшення електромагнітних перешкод між компонентами та схемами, зменшення зворотного зв'язку). При цьому основні вимоги до поглиначів такі:

- (1) композит повинен мінімізувати фронтальне відбиття за рахунок узгодження імпедансу між повітрям і поверхнею поглинача;
- (2) композит повинен активно поглинати електромагнітні хвилі через провідність, магнітні або діелектричні втрати;
- (3) композит може бути застосований у найширшому діапазоні частот, коли це можливо.

Композитний поглинач, який використовує металеві, феритові або вуглецеві частинки в поєднанні з полімерною або гумовою матрицею, пропонує велику гнучкість для створення та керування властивостями, оскільки його можна оптимізувати за допомогою змін як у включеннях, так і в матриці вбудовування. Абсорбуючі властивості таких композитів можна пристосувати до конкретного застосування шляхом зміни їх складу та об'ємної частки частинок наповнювача. Полімерні та каучукові композити, наповнені феритом, металом або вуглецевими частинками, забезпечують універсальну систему, яка має як фундаментальні якості, так і широкий спектр потенційних застосувань. Серед них – проміжні радіолокаційні поглиначі, матеріали електромагнітного захисту від природних явищ (блискавки), електромагнітного імпульсного захисту, матеріали електромагнітної сумісності для електронних пристроїв і захисту від інтенсивного випромінюваного поля.

Ще одна важлива особливість цих композитів полягає в тому, що варіації вмісту металевих або феритових частинок дозволяють незалежно регулювати дійсну та уявну частини ефективної діелектричної проникності композиту, щоб відповідати деяким вимогам поглинання на заданій частоті. Однією з суттєвих переваг полімерних або гумових композитів є те, що залежно від процесу введення-змішування частинок наповнювача та шляхом регулювання природи та геометрії частинок наповнювача вони пропонують кілька ступенів свободи для налаштування стану агрегації частинок і загальної ефективної діелектричної проникності. Існує багато електромагнітних властивостей, які необхідно вивчити в частинках наповнювача, вбудованих у полімерну матрицю, таких як тип взаємодії між частинками, диполь-дипольна взаємодія на великій відстані, кластеризація та взаємодія матриця-частинка, мульти-адсорбція контактного ланцюга на поверхні наповнювача.

Необхідно також зазначити, що електричні властивості (діелектрична проникність і втрати) у мікрохвильових композитах, що містять провідні та магнітні компоненти, не можуть бути електрично контрольовані. Однак, якщо мікрохвильові композити включають деякі полярні діелектрики (сегнетоелектричні компоненти, що мають електрично регульовану діелектричну проникність), вони можуть бути застосовані як мікрохвильові фазообертачі, реконфігуровані фільтри та інші «функціональні» мікрохвильові пристрої. Далі буде розглянуто також різновид діелектричних макрокомпозитів, що містять регульовані компоненти з контрольованою ефективною діелектричною проникністю шляхом швидкої електромеханічної реконфігурації. У цьому випадку використання для контролю полярних діелектриків розташоване поза хвилеводним шляхом і тому не призводить до мікрохвильових втрат.

Далі будуть розглянуті виключно багат шарові (не дисперсні) мікрохвильові композити, які складаються з різних діелектриків, тоді як мікрохвильові мікрокомпозити (суміші), що містять різні електропровідні та феритові компоненти, також широко досліджувалися [5].

3.1 «Пасивний» діелектричний макрокомползит

«Пасивний» діелектричний макрокомползит, що складається з декількох діелектриків, являє собою неоднорідну діелектричну структуру, виготовлену з компонентів з різними електричними властивостями. Використовувані в електроніці (і в електротехніці) макрокомползитні матеріали часто складаються з двох і більше матеріалів: наприклад, це шарувата ізоляція з різних полімерних плівок. Багатошарові керамічні елементи також часто використовуються в мікрохвильовій техніці.

Далі буде проведено порівняння для розрахунку паралельних і послідовних шаруватих діелектриків: як у відносно низькочастотному випадку, так і у високочастотному випадку (коли діелектрики розташовані в хвилеводах, в яких можна використовувати або досліджувати діелектрики НВЧ).

Спочатку нагадуються основні формули, які використовуються для розрахунку композитних параметрів на основі заданого параметра компонентів. У спрощеному варіанті розрахунку розмір компонентів неоднорідного діелектрика вважається значно меншим за довжину електромагнітної хвилі. У цьому випадку дослідження неоднорідних діелектриків зводиться до розрахунку ефективної діелектричної проникності (ϵ_{ef}) і ефективного тангенса діелектричних втрат ($\text{tg}\delta_{\text{ef}}$) композиту. Після цього також обговорюються деякі приклади параметрів композиту у випадку співмірності розміру компонентів з довжиною хвилі.

3.1.1 Два паралельно з'єднаних діелектрика

Одним з найпростіших випадків; при цьому передбачається, що ε_1 , ε_2 , $\operatorname{tg}\delta_1$, $\operatorname{tg}\delta_2$, а також поверхні S_1 і S_2 відомі. Відповідно, ефективна діелектрична проникність і ефективний тангенс діелектричних втрат дорівнюють:

$$\varepsilon_{\text{ef}} = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}{S_1 + S_2} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{ef}} = \frac{C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + C_2 \operatorname{tg}\delta_2}{C_1 + C_2} \quad (3.2)$$

3.1.2 Хаотично розподілені, але з'єднані паралельно діелектрики

Являють собою складений діелектрик з двох компонентів з довільним їх розподілом, але розташування компонентів передбачається паралельним. Крім ε_1 і ε_2 , слід знати відносну концентрацію компонентів x_1 і x_2 . Цей випадок узагальнює попередній розгляд, при цьому ефективна діелектрична проникність і ефективний тангенс діелектричних втрат:

$$\varepsilon_{\text{ef}} = x_1 \varepsilon_1 + x_2 \varepsilon_2 \quad (3.3)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{ef}} = x_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{ef}}} \operatorname{tg}\delta_1 + x_2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{\text{ef}}} \operatorname{tg}\delta_2 \quad (3.4)$$

3.1.3 Два послідовно з'єднаних шари діелектрика

З відомими параметрами ε_1 , ε_2 , $\operatorname{tg}\delta_1$ і $\operatorname{tg}\delta_2$, а також товщинами шарів d_1 і d_2 (при цьому квадрати шарів однакові: $S_1 = S_2 = S$, а їх ємності C_1 і C_2). Якщо втрати не дуже великі, ефективна діелектрична проникність і втрати:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{d_1 + d_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \quad (3.5)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{ef} = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} \quad (3.6)$$

3.1.4 Розподілені послідовно з'єднані шари двох діелектриків

Узагальнюють попередній випадок. Об'ємні концентрації першого та другого компонентів мають вигляд x_1 та x_2 ; ефективна діелектрична проникність і тангенс втрат у разі малих втрат:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 x_1 + \varepsilon_1 x_2}; \quad (3.7)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{ef} = \frac{\varepsilon_1 x_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1) \operatorname{tg} \delta_2 + \varepsilon_2 x_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2) \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_1 x_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1) + \varepsilon_2 x_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2)} \quad (3.8)$$

3.2 Мікрохвильові композити повітряно-діелектричного типу

Є аналогами, потребують набагато складніших розрахунків, щоб врахувати особливе розміщення зразка діелектрика та наявність металевих екранування (наприклад, стінок хвильоводу). Найпростіший, але важливий випадок - це дослідження двох пов'язаних діелектриків, один з яких - повітря з $\varepsilon_1 = 1$ і $\operatorname{tg} \delta_1 = 0$, а інший діелектрик - кристал або кераміка з довільним $\varepsilon_2 = 1-1000$.

Спочатку розглянемо хвильовід, який стоїть вертикально, частково заповнений діелектриком таким чином, що між зразком і вузькими стінками хвильоводу виникають симетричні повітряні проміжки (рис. 3.1). До речі, ця ситуація важлива для вимірювання матеріалів з високою ε у хвильоводах,

оскільки ідеально щільний контакт між діелектриком і стінками хвилеводу забезпечити важко.

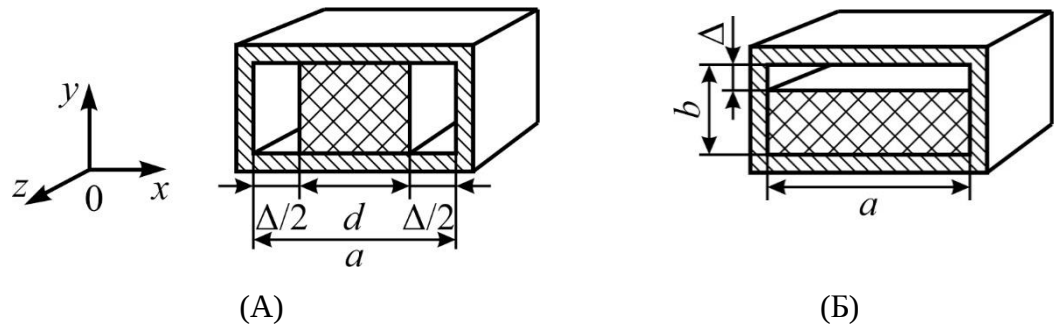


Рисунок 3.1 – Вертикальне (А) і горизонтальне (Б) часткове заповнення поперечного перерізу хвилеводу діелектриком [11]

Граничні умови у вигляді рівності тангенціальних складових електромагнітного поля повинні застосовуватися на металевих стінках і на межі повітря-діелектрик. Припускаючи симетричне розташування зразка всередині хвилеводу, умова магнітної стінки може бути застосована в центрі хвилеводу, щоб зменшити кількість невідомих змінних. Нарешті, це дає складне нелінійне рівняння щодо комплексної постійної поширення:

$$\beta_{xa} \cot\left(\beta_{xa} \frac{\Delta}{2}\right) - \beta_{x\epsilon} \tan\left(\beta_{x\epsilon} \frac{a-\Delta}{2}\right) = 0 \quad (3.9)$$

Де: Δ – загальний розрив; a – ширина широкої стінки хвилеводу;

$\beta_{xa} = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$ являє собою поперечне хвильове число в заповненій повітрям області; $\beta_{x\epsilon} = \sqrt{\epsilon k^2 - \gamma^2}$ відповідає поперечному хвильовому числу в діелектричному зразку; γ постійна поширення. Результат розрахунків наведено на рис. 3.2 [12-14].

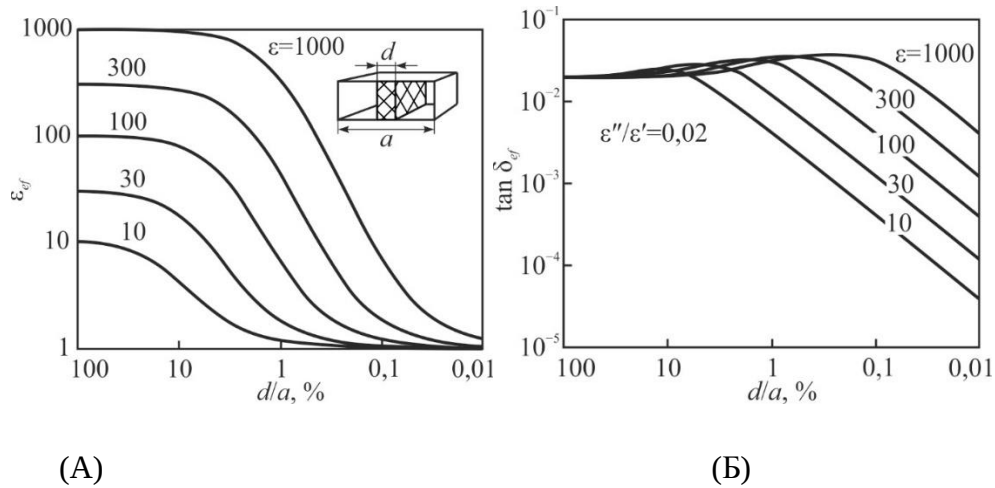


Рисунок 3.2 – Вплив вертикальних зазорів між зразком і широкими стінками хвилеводу: А – ефективна діелектрична проникність; Б – вибірковий тангенс втрати [14]

Можна відзначити, що чим вище діелектрична проникність, тим менше ефект розриву. Очевидно, що кілька десятків мікрометрів, які зазвичай відповідають загальній точності підготовки зразка, не впливають на кінцевий результат вимірювань, рис. 3.2А (те саме можна сказати і щодо ефективних втрат, рис. 3.2Б). Це дає змогу досліджувати зразок, який покриває лише центральну частину поперечного перерізу хвилеводу: таким чином, якщо зразок, що покриває весь поперечний переріз, недоступний, менший зразок може бути використаний під час вимірювання з відповідною обробкою даних.

Наведений вище розрахунок можна виконати для більш складного зразка: вертикально розташована сегнетоелектрична плівка ($\epsilon_{\text{film}} \approx 500-1000$), нанесена на мікрохвильову діелектричну підкладку ($\epsilon_{\text{subs}} \approx 10$) і поміщена в заповнений повітрям хвилевід ($\epsilon = 1$), див. рис. 3.3. У цьому методі зразок плівки на підкладці розташовується в центрі хвилеводу. При цьому напруженість електричного поля найбільша в центрі хвилеводу, тому забезпечується максимально можлива взаємодія плівки з електричним полем НВЧ.

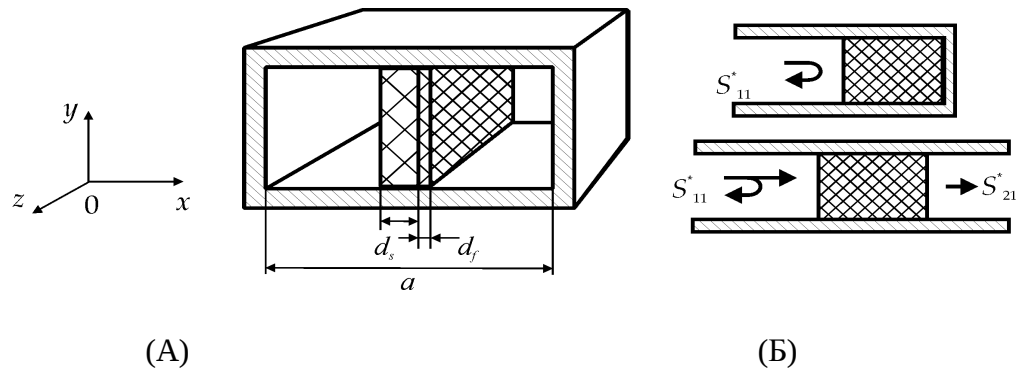


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення експерименту для вимірювання парелектричної плівки з $\epsilon \approx 500$, нанесеної на підкладку з $\epsilon = 10$ [13]

Для розрахунків S-параметрів проблему електромагнітного поля можна розв'язати, використовуючи представлення поздовжньої хвилі [12-15]. Застосування граничних умов на границях середовищ дає складне нелінійне рівняння щодо комплексної постійної поширення. Численні експерименти з однаковими зразками показують надійну повторюваність експериментів, приклад вимірюваних даних показано на рис. 3.4, який ілюструє підгонку даних для підкладки MgO товщиною 0,5 мм і плівки BST товщиною 0,84 мкм. Середнє значення діелектричної проникності підкладки становить 9,9, а її $\text{tg}\delta_{\text{sub}} = 3 \cdot 10^{-4}$. Що стосується підгонки плівки, розрахунок демонструє хорошу згоду та дає $\epsilon_{\text{film}} = 450$ і $\text{tg}\delta_{\text{film}} = 0,05$. Можна використовувати як відбиття закороченого хвильоводу зразком, так і передачу в двопортовій системі (рис. 6Б), однак перший спосіб є кращим через більш високу чутливість.

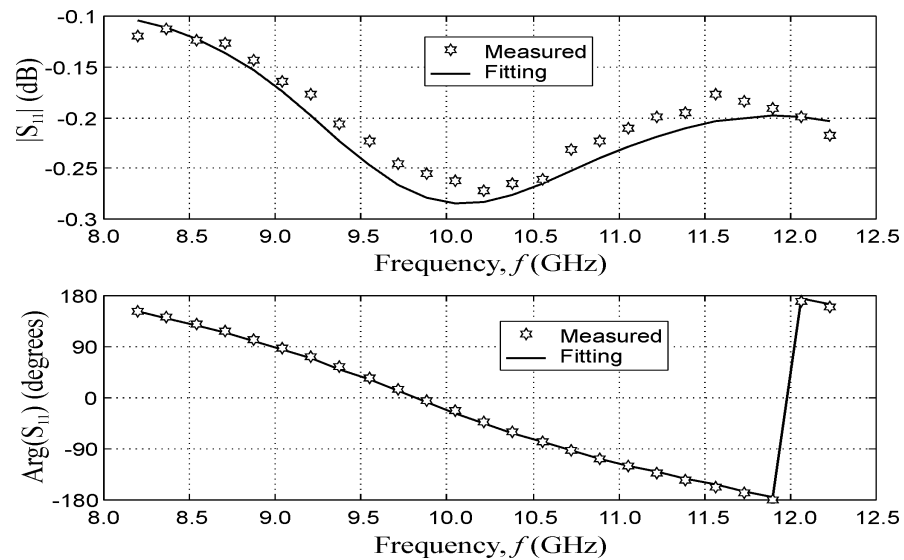


Рисунок 3.4 – Дані вимірювань і розрахунок для плівки BST 0,84 мкм на підкладці MgO товщиною 0,5 мм, довжина зразка 2,2 см [11]

3.3 Регульовані діелектричні композити з контрольованою повітряною щілиною

Одним із способів досягнення керованості діелектричних характеристик є механічна переналаштування НВЧ-пристроїв. У цьому випадку зміна параметрів мікрохвильових приладів може бути досягнута шляхом переміщення діелектричних або металевих частин приладів. Механічне налаштування є дуже перспективним для отримання низьких внесених втрат у поєднанні з хорошою керованістю мікрохвильових підсистем. При електричному контролі сегнетоелектричної діелектричної проникності мікрохвилі взаємодіють з полярним матеріалом, який є частиною мікрохвильової лінії; тому передана енергія частково поглинається матеріалом. Навпаки, механічна система керування розташована поза шляхом розповсюдження мікрохвиль, тому не сприяє втратам мікрохвиль. Механічний контроль дійсний в будь-якому діапазоні частот, включаючи діапазон міліметрових хвиль. У частині мікрохвильової системи регульована неоднорідність може бути вставлена у вигляді діелектричних тіл. Взаємне

зміщення діелектричних тіл у такій системі можна використовувати для ефективного керування електромагнітними характеристиками пристроїв. При правильній конструкції зміщення в кілька десятків мікрметрів достатньо для практичних застосувань [14].

Однією з тенденцій розвитку сучасних телекомунікаційних систем є використання високорегульованих компонентів, таких як регульовані резонатори, фазообертачі тощо. Ці «активні» компоненти можуть бути ключовими елементами розумних антен, фазованих антенних решіток, регульованих генераторів, фільтрів та так далі. Відомо багато способів проектування керованої мікрохвильової системи, при цьому загальні фізичні принципи отримання мікрохвильового компонента, що змінює частоту, можна класифікувати як:

- магнітний спосіб налаштування за проникністю феритового матеріалу, $\mu(H)$;
- електричний спосіб налаштування за діелектричною проникністю матеріалу сегнетоелектричного типу, $\varepsilon(E)$;
- електричний спосіб налаштування провідністю напівпровідникового матеріалу, $\sigma(E)$;
- оптичний спосіб налаштування за допомогою зміни провідності напівпровідникового матеріалу, $\sigma(\Phi)$;
- електромеханічне переналаштування НВЧ підсистеми переміщенням Δ .

Мікрохвильові компоненти, які використовують магнітне або електричне налаштування, такі як $\mu(H)$, $\sigma(E)$ і $\varepsilon(E)$ мають частотне обмеження приблизно 30–40 ГГц, оскільки вони показують підвищені втрати на високих частотах. Оптичне налаштування, яке використовує зміну провідності σ через інтенсивність світлового променя Φ , також вносить значні втрати в міліметровому діапазоні хвиль. Тому звичайні регульовані мікрохвильові компоненти, які використовують внутрішні властивості матеріалу шляхом

контролю $\mu(H)$, $\sigma(E)$ або $\varepsilon(E)$, мають фундаментальні обмеження на міліметрових хвилях. Основна причина полягає в тому, що мікрохвилі взаємодіють з функціональним матеріалом (феритом, напівпровідником або сегнетоелектриком), який є частиною мікрохвильової лінії, тому передана (або відбита) енергія неминуче частково поглинається цим матеріалом.

Навпаки, електромеханічна система керування не є частиною маршруту розповсюдження мікрохвиль, тому вона не сприяє втратам мікрохвиль. Однак одним, але важливим недоліком механічного управління є відносно низька швидкість управління. Останні досягнення в п'єзоелектричних приводах і технологіях MEMS відкривають додаткові можливості для поєднання переваг механічних і електричних методів налаштування. Однак для таких застосувань система налаштування повинна бути високочутливою до відносно невеликих зсувів компонентів пристрою. Ключове питання полягає в тому, як досягти такої високої чутливості характеристик системи до малих переміщень частин пристрою. Це можна реалізувати, якщо часткове зміщення створює сильне збурення в розподілі електромагнітного поля. Для цього має бути створений змінний діелектричний розрив (повітряний зазор), який перетинає лінії електричного поля. При цьому між двома частинами діелектрика або між діелектриком і електродом необхідно розміщувати регульований повітряний проміжок. У цьому випадку зміна розмірів повітряного проміжку призводить до суттєвої трансформації розподілу електромагнітного поля та змінює такі характеристики, як резонансна частота, фаза хвилі, що поширюється, тощо [16-17].

Це перетворення можна описати в термінах ефективної діелектричної проникності середовища (ε_{ef}). Цей параметр дуже зручний для опису пристроїв з поширенням хвилі ТЕМ, де константа поширення γ пропорційна $(\varepsilon_{\text{ef}})^{1/2}$; тому саме діелектричну проникність можна використовувати для опису налаштовуваних пристроїв. Наприклад, ефективна діелектрична проникність частково навантаженого хвильоводу може бути визначена як діелектрична

проникність повністю навантаженого хвилеводу, що дає чисельно ту саму постійну поширення, що й у частково навантаженому хвилеводі.

3.4 Діелектрично-повітряний композитний фазообертач у хвилеводі

Використовує основний режим прямокутного хвилеводу. Щоб досягти значного збурення електромагнітного поля, межа між діелектриком і повітрям розташована паралельно широкій стінці хвилеводу, як це було показано раніше в поперечному перерізі на рис. 4Б. У досліджуваному прикладі, наведеному на рис. 3.5, п'єзoeлектричний привод змінює повітряну щілину. При $\Delta = 10 \text{ мкм}$ ефективна діелектрична проникність $\epsilon_{ef} = 32$ і електрична довжина частково заповненої частини хвилеводу містить чотири хвилі. Якщо п'єзoeлектричний привод змінює щілину на $\Delta = 50 \text{ мкм}$, діелектрично-повітряний композит матиме $\epsilon_{ef} = 22$, тому електрична довжина заповненого хвилеводу містить три хвилі, тому механічно керований зсув фази дорівнює $\Delta\varphi = 2\pi$.

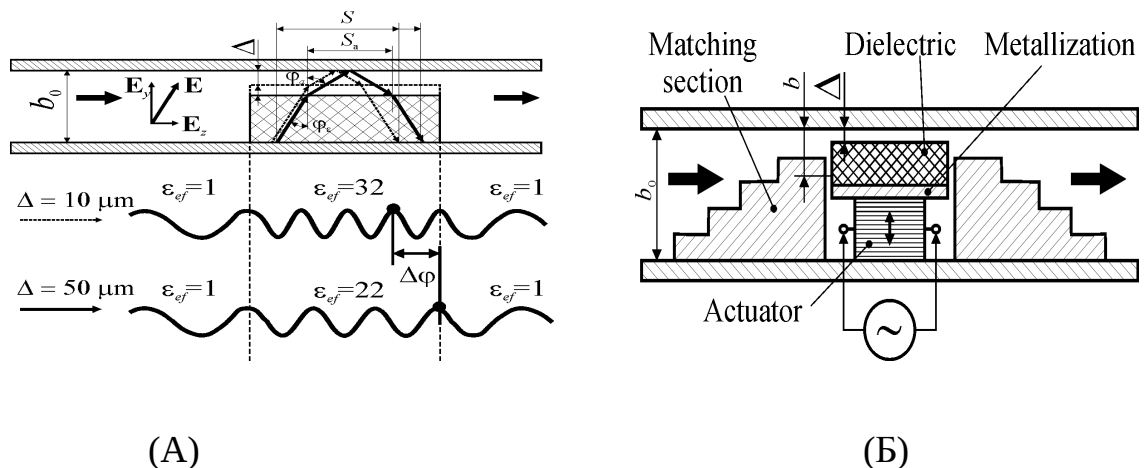


Рисунок 3.5 – Хвилеводний фазообертач: А – пояснення зростання фазового зсуву на двох повітряних щілинах (10 мкм і 50 мкм); Б – конструкція фазообертача з узгодженими секціями та п'єзoeлектричним приводом [18]

Діелектрична проникність рухомого діелектрика є критичним параметром для визначення константи поширення сигналу: на рис. 9 показано застосування в цьому модельному експерименті різних мікрохвильових діелектриків, які мають $\varepsilon = 12\text{--}85$. Існує заломлення, викликане різницею в діелектричних властивостях, а саме біжуча хвиля проходить свій шлях двома шляхами: один усередині діелектрика, а інший у повітрі. При цьому співвідношення шляхів в діелектрику і в повітрі відповідно змінюється зі зміною повітряного зазору. Таким чином, керування фазовим зсувом біжучої хвилі досягається зміною тієї частини шляху, на якій хвиля поширюється в повітряній щілині (поза діелектрика).

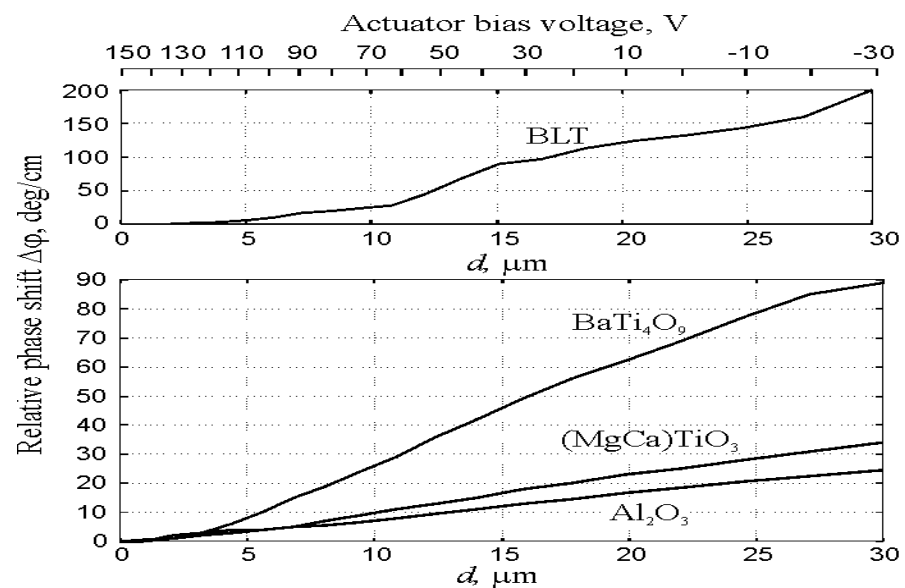


Рисунок 3.6 – Вимірні криві керування для хвильоводного фазообертача на частоті 10,5 ГГц для різних діелектриків Al_2O_3 ($\varepsilon = 11,6$, $\text{tg}\delta = 0,7 \cdot 10^{-4}$), $(\text{Mg,Ca})\text{TiO}_3$ ($\varepsilon = 21$, $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$), BaTi_4O_9 ($\varepsilon = 37$, $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-4}$), BLT ($\varepsilon = 85$, $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-3}$) [18]

3.5 Висновки до розділу

Композитні діелектрики розширюють вибір різноманітних мікрохвильових матеріалів, поєднуючи особливі властивості різних

компонентів для отримання необхідних технічних характеристик. Мікрохвильові композити можна розділити на «пасивні» (які не змінюють своїх параметрів під час роботи) і «функціональні» композити з електрично керованими властивостями, які можна використовувати для пристроїв з переналаштовуванням частоти.

«Пасивний» діелектричний макрокомпозит, що складається з декількох діелектриків, являє собою неоднорідну діелектричну структуру, виготовлену з компонентів з різними електричними властивостями. Їх поведінка в мікрохвилях істотно відрізняється від властивостей композиту на низьких частотах.

Функціональні макрокомпозити можуть включати нанесену на підкладку параелектричну плівку з електрично регульованою діелектричною проникністю. Цей різновид шаруватих композитів можна використовувати в різних мікрохвильових пристроях, але переважно у фазообертачах, здатних швидко працювати за допомогою електричного поля зсуву.

Регульовані діелектричні композити з контрольованою повітряною щільністю дозволяють досягти керованості діелектричних характеристик шляхом електромеханічної переналаштування НВЧ-пристроїв. У цьому випадку зміна параметрів НВЧ приладів може бути досягнута шляхом переміщення діелектричних частин приладу.

4. ДЕЯКІ ПРИКЛАДИ ТЕРМОСТАБІЛЬНИХ НВЧ-ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розробка нових матеріалів складна без фундаментального вивчення їх фізичних властивостей. Дослідження в цьому напрямку проводяться в багатьох лабораторіях, оскільки мікрохвильова мікроелектроніка є однією з найбільш актуальних галузей дослідження [2, 4, 19]. На даний момент існують різні моделі, що описують властивості високочастотних діелектричних матеріалів. Проте цей напрямок пошуків не можна вважати завершеним. Проте можна виділити три твердження, що стосуються поліпшення властивостей мікрохвильових діелектриків. По-перше, висока діелектрична проникність у мікрохвилях може бути отримана в кристалах з низькочастотною модою поперечної оптичної решітки в параелектричних матеріалах; по-друге, малі діелектричні втрати можуть бути досягнуті лише в монофазному композиті на основі параелектричного матеріалу «жорсткого типу», який заперечує структурну внутрішню полярність; по-третє, для досягнення термічної стабільності в діелектриках з $\epsilon_{mw} \approx 80\text{--}140$ «параелектрики» основного матеріалу можна пригнічується парамагнетиком.

4.1 Термостабільні мікрохвильові керамічні діелектрики з $\epsilon \sim 40$

Ці важливі діелектрики розроблені для сантиметрового діапазону хвиль і складаються зі складних композицій для досягнення дуже малих ТК ϵ [5, 20]. При цьому мікрохвильовий діелектрик з малими втратами не повинен бути сумішшю двох і більше компонентів, а має бути однофазною структурою (справа в тому, що межі між різними фазами є джерелом втрат, що негативно впливає на загальні діелектричні втрати діелектрику). Крім того, в багатокомпонентних, але однофазних діелектриках величина ТК ϵ повинна

регулюватися зміною складу. І, крім того, дуже важливо контролювати технологічні фактори, щоб покращити досягнуті параметри.

Багато НВЧ діелектриків з високою ε базуються на структурах з октаедрами типу TiO_6 , і в центрі кожного октаедра знаходиться іон Ti^{+4} (або інші високовалентні іони). Ці октаедри можуть з'єднуватися один з одним своїми вершинами: за допомогою цієї властивості вдається досягти підвищеної ε . Це можна підтвердити простим порівнянням трьох форм TiO_2 :

- Рутил, в якому октаедри з'єднані однією вершиною, має анізотропну діелектричну проникність: $\varepsilon_c = 170$, $TK\varepsilon_c \approx -1000$ ppm/K, $\varepsilon_a = 80$, $TK\varepsilon_a \approx -400$ ppm/K (керамічний рутил має $\varepsilon \approx 100$, $TK\varepsilon \approx -900$ ppm/K)
- Брукіт, де TiO_6 -октаедри з'єднані двома вершинами, має $\varepsilon_c = 66$, $TK\varepsilon_c \approx -50$ ppm/K, $\varepsilon_a = 78$, $TK\varepsilon_a \approx -200$ ppm/K.
- Анатаз, в якому TiO_6 -октаедри з'єднані трьома вершинами, має $\varepsilon \approx 50$ and $TK\varepsilon \approx -70$ ppm/K;

Підвищене значення ε_c в рутилі зумовлене строго орієнтованими октаедрами кисню, які з'єднані однією вершиною, рис. 4.1. При цьому між електронними орбіталами, витягнутими в напрямку $[001]$, виникає сильний взаємозв'язок. Центральний чотиривалентний катіон Ti^{4+} сильно притягує електронні орбіталі шести навколишніх аніонів кисню, тому така протяжна електронна хмара робить октаедр високополяризуємою структурною одиницею. Порівняння діелектричної проникності в анатазі, брукіті та рутилі демонструє, що для інтерференції електронних орбіт важливе значення має спосіб поєднання та розташування октаедрів. Взаємодія орбіталей у напрямку $[001]$ посилює поляризованість рутилу, що призводить до збільшення ε_c , тоді як у перпендикулярному напрямку $\varepsilon_a < \varepsilon_c$ і $TK\varepsilon_a < TK\varepsilon_c$. Ці результати вказують на можливі шляхи контролю $TK\varepsilon$.

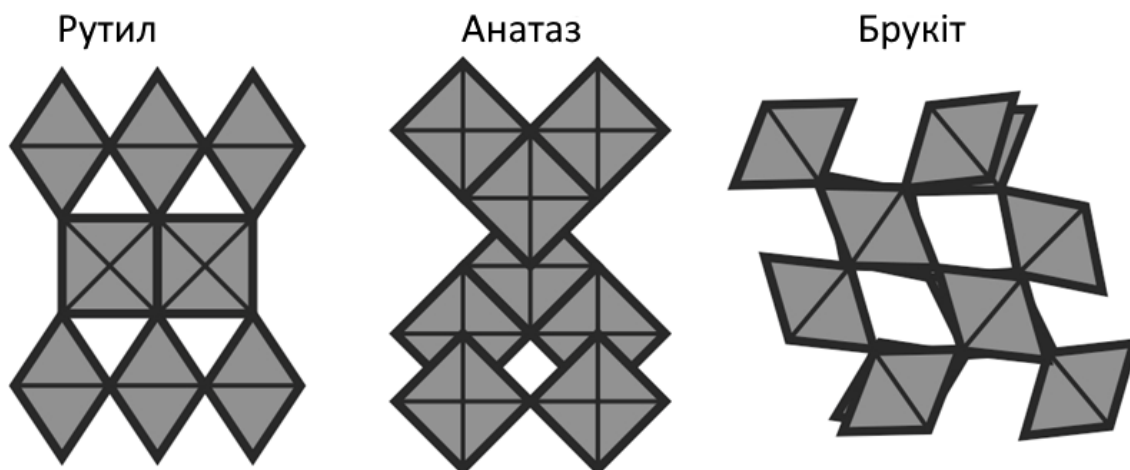


Рисунок 4.1 – Порівняння спрощених структур рутилу, анатазу та брукіту [3]

Розглядаючи різні структури TiO_2 , рис. 10, можна виявити можливість впливу на властивості такого кристала шляхом розміщення сторонніх іонів між октаедрами. Щоб придушити сильну кореляцію між октаедрами, між ними слід розмістити вбудовані іони, і це може бути однією з ідей, як розробити різні композиції мікрохвильових діелектриків з діелектричною проникністю 30–50. Наприклад, для термостабільності діелектричної проникності рутилу часто використовують оксид барію. Зовнішня електронна оболонка іона барію ($5s^2p^6$ гібрид) дуже віддалена від Ba^{+2} -ядра через порожню глибоку електронну орбіталь $4f$; тому оболонка $5s^2p^6$ легко піддається взаємодії з оточенням. Вкорінюючись між TiO_6 -октаедрами, великі іони Ba^{+2} виявляють сильний вплив на зовнішні електронні оболонки навколишніх іонів O^{-2} . Таким чином можна керуватися особливостями взаємодії електронних оболонок, або, іншими словами, керувати взаємним зміщенням слабкозв'язаних електронів впровадженням у структуру різних сторонніх іонів. Використовуючи цей метод, можна суттєво послабити велику $\epsilon(T)$ залежність рутилу, яка ніби слідує закону Кюрі-Вейса.

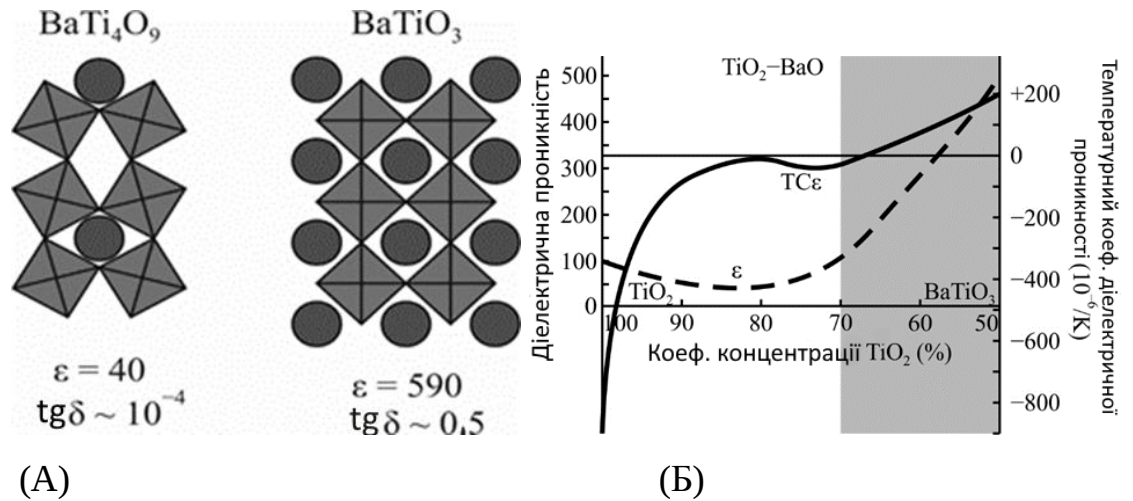


Рисунок 4.2 – Змішані оксиди $\text{TiO}_2\text{--BaO}$ з різним співвідношенням концентрації TiO_2 : А – відновні структури; Б– діелектрична проникність та її температурний коефіцієнт (при 50% виникає сегнетоелектрик BaTiO_3); заштрихована область відповідає сумішам з великими мікрохвильовими втратами [21, 22]

Основною особливістю параелектриків типу зміщення є сильна кореляція між сильно поляризовними октаедрами. Їх взаємодія може призвести навіть до появи сегнетоелектрика (як у випадку з BaTiO_3). З метою отримання термостабільного мікрохвильового діелектрика використовується висока чутливість октаедрів до вбудованих іонів, рис. 4.2Б. Видно, як швидко великий від'ємний $\text{TK}\epsilon$ рутилу доходить до нуля зі збільшенням концентрації BaO : $\text{TK}\epsilon$ навіть близько наближається до нуля у складі $\text{BaTi}_4\text{O}_9 = \text{BaO} \cdot 4\text{TiO}_2$. Саме при такому співвідношенні, як впливає з рис. 4.2А, розташування кисневих октаедрів стає зовсім іншим, але все ще регулярним. Це підтверджує виникнення однофазної структури, яка забезпечує низькі втрати з достатньою діелектричною проникністю навколо $\epsilon \sim 40$. Основною причиною контролю $\text{TK}\epsilon$ є порушення орієнтації октаедрів у структурі BaTi_4O_9 , рис. 4.2Б.

Модифікована барієм структура оксиду титану виявляє ослаблення взаємодії електронних орбіталей і, таким чином, забезпечує меншу залежність їх діелектричної проникності від температури. При цьому в складі BaTi_4O_9

параметр $TK\varepsilon$ ще дещо менше нуля, однак значення $\varepsilon \approx 37$ цілком достатньо для використання цього НВЧ-діелектрика в діелектричних резонаторах на сантиметрових хвилях. Щоб отримати $TK\varepsilon \approx 0$, тетратитанат барію можна додатково легувати $\sim 1,5\%$ оксиду вольфраму. Щоб мати можливість контролювати $TK\varepsilon$ в межах ± 10 ppm/K, використовували допування $BaTi_4O_9$ оксидом цинку (7–12%). При цьому в кераміці $BaTi_4O_9:ZnO_2$ зберігається однофазна структура та низькі мікрохвильові втрати, оскільки цинк займає лише незначну частину в центральній-октаедричних позиціях.

Як видно з рис. 11Б, у складі $BaO-TiO_2$ можна було б збільшити діелектричну проникність до 160 при $TK\varepsilon_{mw} \approx 0$, але подальше збільшення концентрації BaO призводить до утворення сумішей, що містять полярну (сегнетоелектричну) фазу, і, як наслідок, мати більші шкоди. Нарешті, коли концентрація BaO досягає 50%, композиція $BaO-TiO_2$ відповідає $BaTiO_3$ – сегнетоелектрику, в якому тангенс мікрохвильових втрат трохи перевищує 0,5 при $\varepsilon \approx 600$. Цей полярний діелектрик із високим ступенем поглинання мікрохвиль може бути компонентом композиційних матеріалів, що поглинають мікрохвилі, особливо в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

4.2. Термостабільні мікрохвильові керамічні діелектрики з $\varepsilon \sim 100$

Ці діелектрики з високим значенням діелектричної проникності використовуються в телекомунікаційних пристроях метрового і дециметрового діапазонів довжин хвиль і відповідають звичайним вимогам мінімальних діелектричних втрат і максимальної термічної стабільності. Відносно невеликі втрати при $\varepsilon =$ від 100 до 300 при кімнатній температурі отримують парадіелектрики зміщувального типу. Однак, як видно з табл. 4.1,

температурний коефіцієнт діелектричної проникності в цих параелектриках занадто великий.

Таблиця 4.1 – Діелектрична проникність, коефіцієнт термостабільності та діелектричні втрати в керамічних параелектриках на частоті ~ 10 ГГц і температурі 300 К [3]

Кераміка	ε	$TK\varepsilon_{mw} \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$	$\text{tg}\delta 10^3$
TiO ₂	100	– 900	4
KTaO ₃	110	– 600	20
CaTiO ₃	130	– 1600	10
SrTiO ₃	300	– 3000	25

Важливо відзначити, що «м'які параелектрики» SrTiO₃ і KTaO₃ мають позитивну температуру Кюрі-Вейса ($\theta > 0$ К), тому будь-які добавки легко активують в них полярні фази, які також можуть бути індуковані електричним полем, механічною напругою. В результаті мікрохвильові втрати цих матеріалів при 300 К не малі: $\text{tg}\delta \sim$ від 10 до 2 через можливі флуктуації полярної фази в їх полікристалічній структурі. Навпаки, у «жорстких параелектриках», таких як TiO₂ або CaTiO₃, залежність $\varepsilon(T)$ може бути описана параметром $\theta < 0$. Легування або електричне поле не можуть перетворити ці параелектрики в полярну фазу, перетворюють ці параелектрики в полярну фазу (можливо, вони мають тенденцію до антисегнетоелектричного впорядкування), тому вони мають менші мікрохвильові втрати, але основною складністю застосування «жорстких параелектриків» у мікрохвилях є їх ε температурна залежність. Оскільки фізична природа цієї залежності полягає в електронній підсистемі цих кристалів, шляхи подолання цієї нестабільності слід шукати в таких методах, які можуть впливати на цю підсистему. При цьому основний внесок у ε вносить та частина поляризації ґратки, яка пов'язана зі сприйнятливістю слабо зв'язаних електронних орбіт. Далі

можливе пояснення буде наведено, як придушити температурну залежність Кюрі-Вейса в таких параелектриках, зберігаючи їх низькі втрати та високу діелектричну проникність.

Висока термостабільність діелектричної проникності досягається у $\text{BaLn}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (BLT) – параелектрикоподібних сполук із вбудованими рідкоземельними іонами [4, 5]. Ці полікристалічні діелектрики виділяються серед багатьох інших мікрохвильових діелектриків: їх ϵ значно вища, ніж в інших типах мікрохвильової кераміки. Нижче пропонується припущення щодо природи поляризації BLT, а саме, що парамагнітні рідкоземельні іони можуть знижувати теплову нестабільність діелектричної проникності в параелектриках. Як повідомлялося раніше в цій роботі, підвищена, але не термостабільна ϵ у параелектриках пов'язана із слабо зв'язаними електронними орбіталями з іонними «ядрами». У BLT некомпенсовані електронні спіни парамагнітних іонів зв'язують свободу цих орбіталей, збільшуючи їх стійкість до термічної нестабільності. Експериментальні дані щодо термічної стабільності та діелектричної проникності BLT зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Діелектрична проникність і тепловий коефіцієнт діелектричної проникності в лантаноїдах [23]

Параметр	Лантаноїд								
	0La	1Ce	2Pr	3Nd	5Sm	6Eu	7Gd	TiO ₂	CaTiO ₃
ϵ	110	90	85	83	80	75	65	100	150
$\text{TK}\epsilon, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	- 700	- 400	- 250	- 80	+ 60	+ 100	+ 160	- 900	- 1600

Наведені в таб. 4.2 композиції виглядають як параелектрики, але деякі з них є водночас і парамагнетиками; при цьому в характеристиці $\epsilon(T)$ вплив парамагнетизму переважає над термічною нестійкістю параелектричного типу. У композиціях $\text{TiO}_2\text{--Ln}_2\text{O}_3$ закон Кюрі-Вейса поступово пригнічується: із посиленням парамагнетизму (від Ce до Gd) параметр $\text{TK}\epsilon$ сильно

змінюється. Очевидно, що використовуючи спеціально підібраний твердий розчин, наприклад, складу $(\text{Nd-Sm})\text{La}_2\text{TiO}_5$, можна досягти нульового термічного коефіцієнта діелектричної проникності.

Існує можливість (на прикладі рутилу) впливати на парелектричну термостійкість шляхом розподілу зовнішніх іонів між октаедрами (подібний метод використовувався в кераміці $\text{BaO}_4 \cdot \text{TiO}_2$). На рис.4.1 показано один перспективний спосіб одержання термостабільних діелектриків НВЧ з високою діелектричною проникністю, а саме використання твердих розчинів рутилу з оксидами рідкоземельних елементів: Ln_2TiO_5 , $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ або $\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{11}$, де Ln означає церієвий ряд лантаноїдів: Ce, Pr, Nd, Pm., Sm, Eu, Gd.

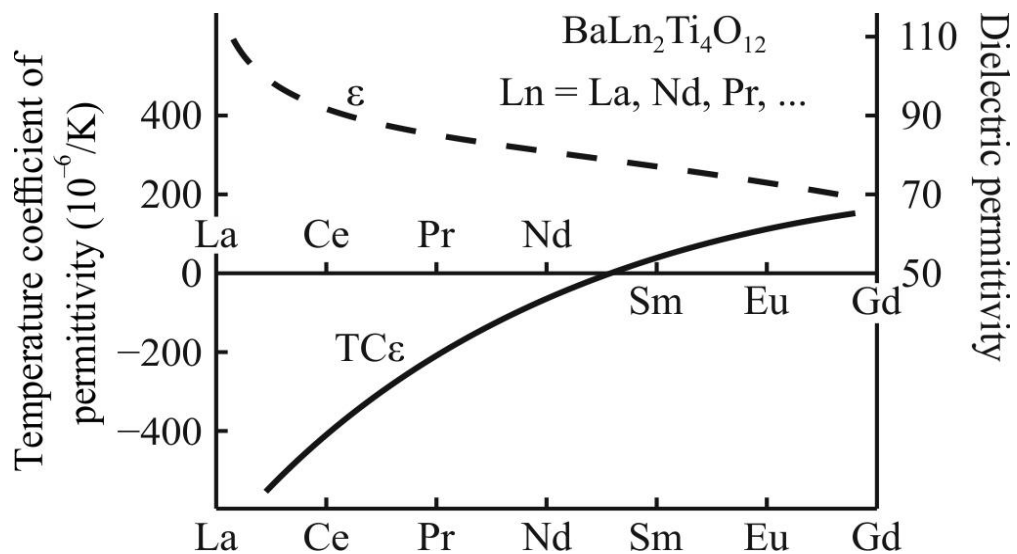


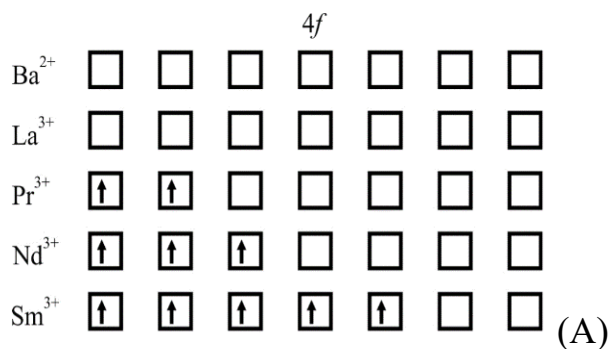
Рисунок 4.1 – Діелектрична проникність BLT і ТК ϵ для рідкоземельних лантаноїдів церієвого ряду [23]

Іон лантану має подібну до іона Ba^{2+} електронну конфігурацію: $5s^2 5f^6$; це означає, що іон La^{3+} також має порожні енергетичні рівні 5f і, отже, як іон Ba^{2+} , La^{3+} є діамагнітним. Можливо, з цієї причини Ln_2O_3 майже не змінює параметрів рутилу, зокрема його ТК ϵ : він, як і раніше, залишається великим. При цьому радіус іона La^{3+} ($r_{\text{La}^{3+}} \sim 0,1$ нм) значно менший за радіус іона барію ($r_{\text{Ba}^{2+}} \sim 0,16$ нм). Тому добавка барію більш ніж у 2 рази знижує діелектричну проникність рутилу в BaTi_4O_9 , тоді як кераміка $\text{TiO}_2 \cdot \text{La}_2\text{O}_3$ має

$\epsilon \approx 110$ і $TK\epsilon \approx -700$ (подібно до рутилу, рис. 12). Крім того, дещо підвищене значення ϵ в La-BLT пов'язане з процесом релаксації з низькою енергією.

У композиціях $TiO_2 \cdot Ln_2O_3$ температурна залежність типу Кюрі-Вейса поступово пригнічується: від Ce до Gd (з посиленням парамагнетизму) $TK\epsilon$ сильно змінюється рис. 4.1. Дійсно, дуже перспективні композиції розроблені за умови спільного використання лантаноїдів і барію для отримання термостабільної кераміки (яка має $\epsilon \geq 100$ і $TK\epsilon \approx 0$). Це перовскіто подібна структура тетратитанатів барію та лантану ($BaLn_2Ti_4O_{12}$, яка зазвичай називається BLT). Ці монофазні структури існують лише для групи церію ряду лантаноїдів: $Ln = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu$.

Інші парамагнітні лантаноїди типу $TiO_2 \cdot Ln_2O_3$ при зміні радіуса та магнітного моменту лантаноїду демонструють сильний вплив на мікрохвильові параметри цих композитів, особливо на термостабільність. Конфігурація електронних орбіталей іонів рідкоземельних елементів $4f^{(1...7)}5s^25p^6$, тому вони є парамагнетиками з поступовим збільшенням їх магнітного моменту: від одного до семи магнетонів Бора. Маючи досить велику $\epsilon \approx 80$, що вдвічі перевищує ϵ систем $nTiO_2 \cdot BaO$, композитів $TiO_2 \cdot Ln_2O_3$ можуть змінювати свій знак $TK\epsilon$ з негативного на позитивний. Ці композити, параметри яких наведені на рис. 4.1, виглядають як параелектрики, але водночас є і парамагнетиками; очевидно, що залежність $\epsilon(T)$ відчуває на собі вплив парамагнетизму.



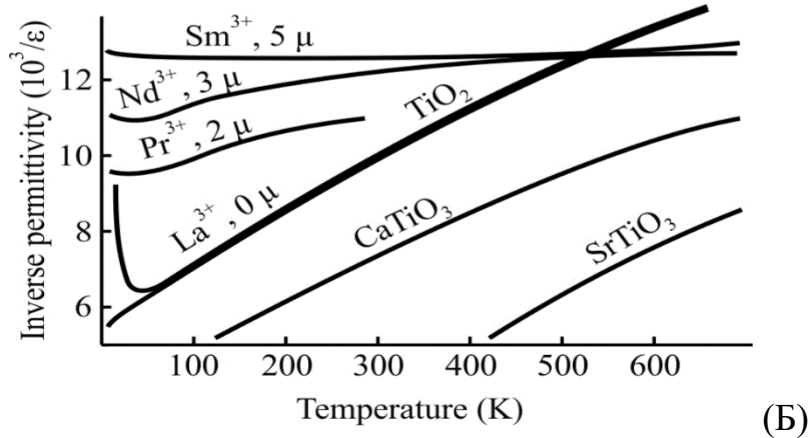


Рисунок 4.2 – Придушення параелектричної ϵ температурної залежності в BLT: А – розташування електронних спінів на $4f$ -орбіталах РЗЕ; В – $1/\epsilon$ температурна залежність для BLT і в деяких параелектриках; кількість магнетонів Бора в парамагнітному іоні (0μ , 2μ , 3μ , 5μ) вказано біля кривих [23]

Основною причиною термостабільності BLT можна вважати парамагнетизм: на рис. 4.2 показано, як поступове збільшення парамагнетизму (кількості некомпенсованих спінів на f -орбіталі) зменшує температурний коефіцієнт діелектричної проникності в твердих розчинах типу BLT. При цьому на межі між неодимом і самарієм ТК ϵ змінюється від негативного до позитивного [23].

Найбільш імовірним механізмом впливу парамагнітних некомпенсованих електронних спінів на параелектричну поляризацію може бути непряма обмінна взаємодія іона лантанію з іоном титану через іон кисню, рис. 4.3. Магнітні моменти іонів f -елементів не зовсім вільні навіть у випадках, коли іони розділені діамагнітними іонами, а перекривання f -хвильових функцій (орбіталей) у різних вузлах кристалічної решітки незначне. Це призводить до непрямой обмінної взаємодії між локалізованими електронами через збурення інших електронних підсистем діамагнітних іонів, що оточують магнітний іон.

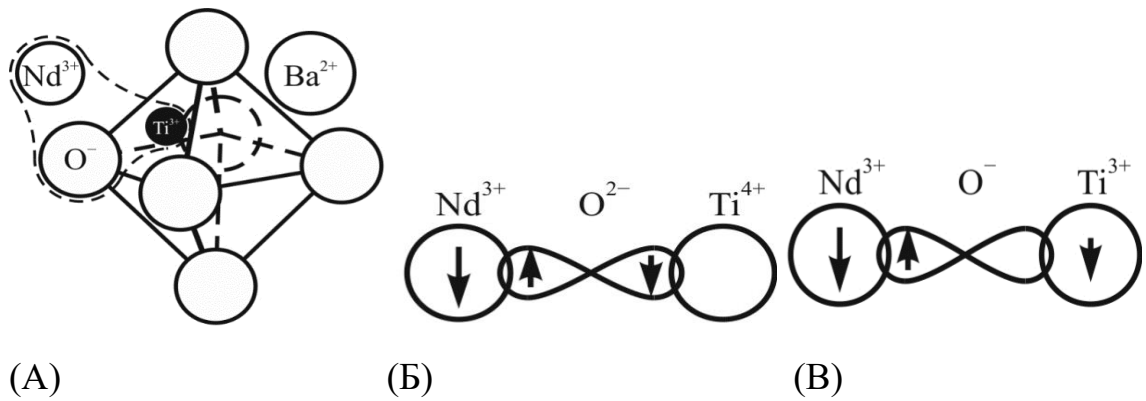


Рисунок 4.3 – Непряма обмінна взаємодія в системі $\text{Nd}^{3+} - \text{O}^{2-} - \text{Ti}^{4+}$: А – система в структурі BLT, Б – основний стан; В – збуджений стан [3]

Частотні залежності діелектричної проникності та коефіцієнта втрат для трьох типових барій-лантаноїдних керамік показані на рис. 4.4 [24]. Як видно, в La-BLT мінімум втрат знаходиться поблизу частоти 0,1 ГГц. Більш важливими для застосування Sm-BLT і Nd-BLT (тобто компоненти твердого розчину з $\text{TK}\epsilon \approx 0$) мають мінімум втрат саме між метровими і дециметровими хвилями, де ці діелектрики показують $\epsilon \geq 100$ і є найбільш перспективними для застосування.

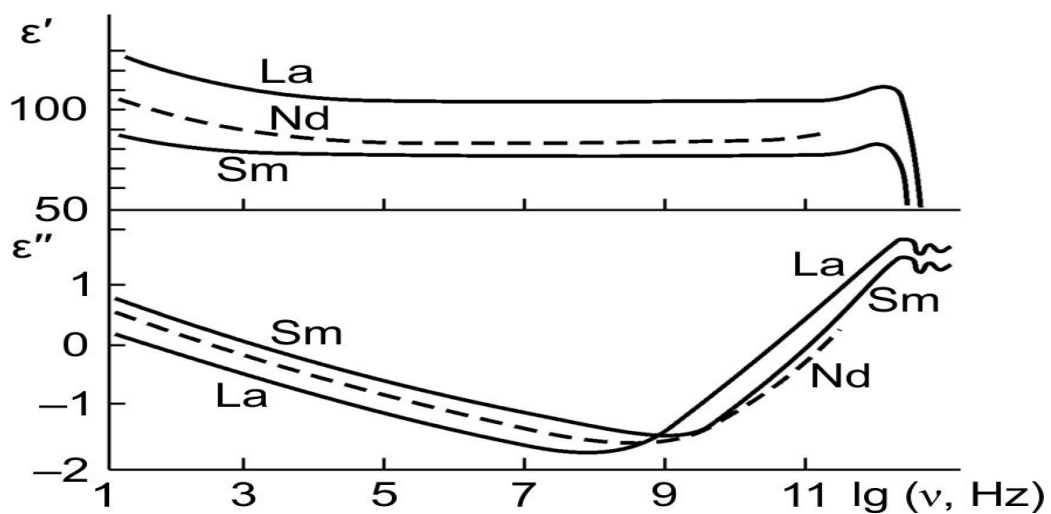


Рисунок 4.4 – Частотні залежності діелектричної проникності ϵ' і коефіцієнта втрат ϵ'' при 300 К [24]

4.3 Висновки до розділу

Підвищену діелектричну проникність у мікрохвилях можна отримати, використовуючи як основу матеріал параелектрик витісняючого типу, структура якого характеризується низькочастотною оптичною модою поперечної ґратки. При цьому в якості компонентів діелектриків з малими втратами слід застосовувати тільки «жорсткі» типи параелектриків, в яких не виникає будь-яка полярна фаза, яка є основною причиною діелектричних втрат.

Високу термічну стабільність діелектриків НВЧ з малими втратами, призначених для використання в сантиметровому діапазоні хвиль (ϵ становить від 30 до 10), можна отримати в таких структурах, де розташування високополяризованих структурних одиниць (наприклад, кисневих октаедрів) технологічно порушена введення оксидів з великим розміром катіона.

Мікрохвильові діелектрики з підвищеною діелектричною проникністю (ϵ становить від 100 до 40) можуть бути термостабілізовані, коли параелектрики основного матеріалу пригнічуються парамагнетизмом введеного компонента. При цьому склад термостійких НВЧ діелектриків з малими втратами неодмінно повинен бути вільним від полярно чутливих фаз, які призводять до збільшення діелектричних втрат.

ВИСНОВКИ

На закінчення, мікрохвильові діелектрики відіграють вирішальну роль як в пасивних, так і в активних мікрохвильових компонентах. Підкреслено важливість високої діелектричної проникності (ϵ), причому неполярні діелектрики слугують матеріалами з низькими втратами, а полярні діелектрики - матеріалами, що поглинають мікрохвилі. Лінійні термостабільні діелектрики знаходять застосування в мініатюрних конденсаторах, діелектричних резонаторах і підкладках мікрохвильових схем, що дозволяє мініатюризувати пристрої. Гнучкі мікрохвильові підкладки необхідні для розтягування, скручування і деформації електроніки. Нелінійні мікрохвильові діелектрики з електрично керованою ϵ використовуються в мікрохвильових фазообертачах і фільтрах, що перестроюються, з використанням полярочутливих параелектриків.

Різні механізми поляризації роблять внесок у загальну діелектричну проникність мікрохвильових діелектриків, включаючи квазіпружну електронну, квазіпружну іонну та квазіпружну дипольну поляризації. Композитні діелектрики пропонують розширені можливості завдяки поєднанню властивостей різних компонентів, причому для конкретних застосувань доступні пасивні і функціональні композити. Пасивні макрокомпозити демонструють іншу поведінку в мікрохвильовому діапазоні порівняно з низькочастотною поведінкою, тоді як функціональні макрокомпозити включають електрично регульовані параелектричні плівки для таких пристроїв, як фазообертачі.

Контрольованість діелектричних характеристик може бути досягнута в регульованих діелектричних композитах за допомогою електромеханічного налаштування, коли параметри мікрохвильового пристрою змінюються шляхом переміщення діелектричних частин. Використання параелектриків типу зміщення з низькочастотними оптичними модами решітки в якості

базових матеріалів може збільшити діелектричну проникність в мікрохвильових печах. Діелектрики з низькими втратами вимагають "жорстких" параелектриків без полярних фаз, які спричиняють діелектричні втрати.

Термічна стабільність має вирішальне значення для діелектриків з низькими втратами в сантиметровому діапазоні хвиль. Цього можна досягти шляхом введення оксидів з великими розмірами катіонів, щоб порушити розташування високополяризованих структурних одиниць, таких як кисневі октаедри. Для мікрохвильових діелектриків з вищими діелектричними проникностями термостабілізація досягається шляхом придушення параелектриків за рахунок парамагнетизму введених компонентів. Важливо уникати полярно-чутливих фаз у термостійких діелектричних композиціях з низькими втратами, щоб запобігти збільшенню діелектричних втрат.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Belous, A. Microwave dielectrics based on complex oxide systems / A. Belous // Dielectric Materials, – Vol. 6. – 2012. – P. 113-143.
2. Poplavko, Y. Ferroelectrics study at microwaves / Y. Poplavko, Y. Prokopenko // Ferroelectrics; characterisation and modeling, Vol. 11. – 2011. – P. 203-226.
3. Poplavko, Y. High permittivity microwave dielectrics / Y. Poplavko, Y. Yakymenko // Functional Dielectrics for Electronics, – 2020. – P. 217-283.
4. Sebastian, M. Dielectric materials for wireless communication / M.T. Sebastian // Elsevier, – 2008. – P. 671.
5. Sebastian, M. Microwave materials and applications / M. Sebastian, R. Ubic, H. Jantunen // Wiley, – 2017. – P. 1008.
6. Meriakri, V. Anisotropic ferroelectrics applications at near-millimetre waverange / V.V. Meriakri, V.N. Ushatkin, Y.M. Poplavko, // Radiotekhnika e Elektronika, – Vol. 17, № 1. – 1972. – P. 209.
7. Poplavko, Y. Dielectric spectroscopy of solids; basic theory and method application / Y.M. Poplavko // LAMBERT Academic Publishing, – 2013. – P. 376.
8. Poplavko, Y. Dielectric Spectroscopy of Electronic Materials: Applied Physics of Dielectrics / Y. Poplavko // Sawston: Woodhead Publishing, – 2021. – P. 19.
9. Poplavko, Y. Microwave dielectric dispersion mechanisms in ferroelectrics of BaTiO₃ type/ Y. Poplavko // – Izvestia AN SSSR, Serial Phys., – Vol. 29, № 11. – 1965. – P. 2020.
10. Pereverzeva, L. Ferroelectrics as microwave absorbent Packaging. / L.P. Pereverzeva, Y.M. Poplavko // East Brunswick, Proc. Intern. Symp. Appl. Ferroelectrics, – 1996. – P. 841-845.

11. Poplavko, Y. Microwave dielectric spectroscopy of ferroelectric thin films / Y.M. Poplavko, V.A. Kazmirenko, M. Kim, S. Baik // Tunable RF and Microwave Devices III, – Vol. 720. – 2002. – P. 57-62.
12. Kazmirenko, V., Measurement of bulk and film ferroelectric materials properties at microwaves Microwaves / V. Kazmirenko, Y. Prokopenko, L. Pereverzeva, and Y. Poplavko, B. Kim, M. Jeong, S. Baik // 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON - 2002, – Vol. 2. – 2002. – P. 397-400.
13. Poplavko, Y., Electrode-less technique of ferroelectric film study at microwaves / Y.M. Poplavko, V.A. Kazmirenko, M. Kim, S. Baik // 10th Europ. Meet. on Ferroelectricity, – 2003, – P. 178.
14. Poplavko, Y. Contemporary waveguide technique of ferroelectric materials study by vector network analyzer Intern / Y.M. Poplavko, V.A. Kazmirenko, M. Kim, S. Baik // Microwave Symposium, – 2003. – P. 437-440.
15. Poplavko, Y. Non-resonant electrode less method for measurement the microwave complex permittivity of ferroelectric films / Y.M. Poplavko, B. Kim, V. Kazmirenko, Y. Prokopenko // Measurement Science and Technology, – Vol. 16. – 2005. – P. 1792-1797.
16. Furman, E. Piezo-controlled microwave frequency agile dielectric devices / E. Furman, M. Lanagan, I. Golubeva, Y. Poplavko // IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, – 2004. – P. 266-271.
17. Prokopenko, Y. Dielectric-Air structure as component of electromechanically controlled microwave devices / Y.V. Prokopenko, Y.M. Poplavko, N. Ruda // Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, – 2010. – P. 71-75.
18. Prokopenko, T. Electrostrictive tunable microwave devices / Y.V. Prokopenko, Y.I. Yakimenko, Y.M. Poplavko // Microwave & Telecommunication Technology.(CriMiCo'2012), – 2012. – P. 509-512.

19. Scott, R. Development of low cost, high performance $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)$ based materials for microwave resonator applications / R. Scott, M. Thomas, C. Hampson // J. Eur. Ceram. Soc., – Vol. 23. – 2003. – P. 2467-2471.
20. Poplavko, Y. Microwave dielectric dispersion in displace type ferroelectrics at the millimetre wavelength. / Y.M. Poplavko // Ukrainsky Fizichesky Jurnal, – Vol. 14, № 12. – 1969. – P. 15-24.
21. Poplavko, Y. Future trends in microwave dielectrics / Y.M. Poplavko, Y.S. You // J. Korean Phys. Soc., Vol. 32. – 1998. – P. 1737-1740.
22. Poplavko, Y. Thermostable Low Loss Microwave Dielectrics With High Permittivity: Physical Nature of Thermal Stability and Losses / Y.M. Poplavko // ISRAMT, – 1995. – P. 59-62.
23. Didenko, Y. Polarization Mechanisms in Thermal Stable Microwave BLT Ceramics Part 2: Paramagnetism suppress soft mode / Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko // Electronics and communications, – Vol. 20, № 2. – 2015. – P. 9-14.
24. Butko, V, Microwave dielectric properties of bariun-lanthanide tetratitanates / V.I. Butko, Y.M. Poplavko // Physika Tverdogo Tela, – Vol. 26. – 1984. – P. 2951.