

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



ДІДЕНКО ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 537.226.1, 537.226.3

**МІКРОХВИЛЬОВЕ ПОГЛИНАННЯ І ТЕРМОСТАБІЛЬНІСТЬ
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.27.01 – твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор
Поплавко Юрій Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри мікроелектроніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Осінський Володимир Іванович,
Інститут мікроприладів НАН України,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Наритник Теодор Миколайович,
Інститут електроніки та зв'язку Української
академії наук національного прогресу, директор

Захист відбудеться «**30**» червня 2016 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, навчальний корпус № 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «__» травня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.08,
к.т.н, доцент



В. Г. Артюхов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Діелектричні матеріали застосовують у багатьох електронних приладах і пристроях, які працюють у різних частотних діапазонах. У даний час в електроніці та інформаційних технологіях найбільш інтенсивно використовується гігагерцовий діапазон частот. Мобільна телефонія працює на частотах близьких до 2 ГГц, радары – на частотах 3...40 ГГц. У перспективі місцевий телефонний зв'язок освоїть частотний діапазон близько 60 ГГц, автомобільні радары працюють на частотах порядку 80 ГГц, деякі військові радары використовуються у частотній області близько 100 ГГц. У відповідних пристроях, таких як резонаторы, фільтры, лінії передачі, використовують діелектрики з діелектричною проникністю більше 10 і якомога меншим коефіцієнтом втрат. Також у гігагерцовому діапазоні частот діелектрики з підвищеною проникністю і низькими втратами ($\text{tg } \delta < 0,001$) широко використовують як підкладки в інтегральних схемах, що забезпечує мініатюризацію надвисокочастотних схем. Крім того, у мікрохвильовій технології діелектрики використовують як структурні, захисні та монтажні матеріали, як засіб для передачі НВЧ сигналів і їх перетворення (фільтрація, модуляція, детектування тощо), а також для виготовлення пасивних НВЧ-компонентів, таких як мікросмужкові лінії, електричні конденсаторы, діелектричні резонаторы, антени, а також активних елементів (фазообертачів, модуляторів, детекторів). Для НВЧ мікроелектроніки особливе значення мають матеріали з високою діелектричною сталістю, і, як правило, вони мають бути термостабільними й мати мале поглинання на надвисоких частотах.

Зазвичай, намагаються використовувати матеріали із якнайменшими втратами. Тим не менш, є і протилежна мета – використання у мікрохвильовому діапазоні діелектриків із якомога більшими втратами – діелектричних поглиначів. Такі матеріали необхідні для екранування електронних пристроїв та їх складових. Екранування є одним з найбільш ефективних методів збільшення ступеня інтеграції, підвищення надійності та завадостійкості електронних систем, зменшення їх взаємного впливу, підвищення рівня інформаційної безпеки, забезпечення екологічності електронного обладнання, у тому числі шляхом захисту навколишнього середовища від електромагнітного випромінювання. Однією з необхідних умов якісного екранування є використання нових матеріалів з поліпшеними екрануючими властивостями. Якісно новим і перспективним підходом до вирішення цього завдання є створення матеріалів на основі композитних структур діелектрик-метал, властивостями яких можна керувати шляхом зміни компонентного складу цих структур і технології їх виготовлення, що обумовлено особливостями як металевої фази, так і матеріалу матриці. Однак, під час створення таких матеріалів виникає ряд проблем, пов'язаних з незавершеністю комплексних досліджень їх властивостей, відсутністю адекватної моделі таких структур, яка давала б можливість аналізу та прогнозування їх властивостей у НВЧ діапазоні.

Однією з важливих характеристик пристроїв НВЧ діапазону є термостабільність їх параметрів. Зовнішня термостабілізація хоч і можлива, але часто небажана. Компенсація відхилення від початкових значень термозалежних параметрів може значно ускладнити технологію виготовлення НВЧ приладів. Тому використання термостабільних матеріалів є достатньо актуальним способом створення систем із незалежними від температури параметрами.

Однак, розробка нових матеріалів неможлива без фундаментального дослідження їх фізичних властивостей. У даний час існує багато моделей, які описують різні властивості високочастотних діелектричних матеріалів. Тим не менш, цю область досліджень не можна розглядати як завершену.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «КПІ». Результати, отримані при виконанні дисертаційної роботи, були використані у держбюджетних науково-дослідних роботах «Наноматеріали для електронних схем високої інтеграції», № держреєстрації 0109U005499, договір М/232-2009 та «Розробка і дослідження частотно-селективних структур міліметрового діапазону на основі тонких багатомодових діелектричних резонаторів», № держреєстрації 0115U000358, договір 2857-п.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у визначенні домінуючих механізмів мікрохвильових діелектричних втрат для встановлення принципів синтезу надвисокочастотних матеріалів із високим значенням діелектричної проникності, малим рівнем втрат і високою термостабільністю.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати ряд задач, а саме:

- удосконалити та пристосувати методи дослідження мікрохвильових діелектричних та композитних матеріалів для розв'язання поставлених задач;
- дослідити мікрохвильові діелектричні втрати з метою виявлення домінуючих механізмів;
- дослідити вплив полярної фази на рівень мікрохвильових діелектричних втрат;
- дослідити вплив складу діелектричних та композитних матеріалів на їх діелектричні властивості та термостабільність;
- встановити принципи синтезу мікрохвильових матеріалів із високим значенням діелектричної проникності, малим рівнем втрат і високою термостабільністю.

Об'єктом дослідження є мікрохвильові діелектричні та композитні матеріали.

Предметом дослідження є мікрохвильове поглинання у кристалах, кераміці та композитних матеріалах.

Методика наукових досліджень включає: діелектричну спектроскопію, аналіз властивостей мікрохвильових матеріалів, методи вирішення математичних задач на ЕОМ, аналітичне і натурне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- деталізовано теорію поглинання електромагнітних хвиль у діелектриках стосовно мікрохвильового діапазону;
- теоретично і експериментально показано, що саме «жорсткі» параелектрики можуть бути використані для створення мікрохвильових діелектриків із високою діелектричною проникністю;
- вперше показано, що у барій-лантаноїдних тетратитанатах (БЛТ), які поєднують у собі високу діелектричну проникність, низькі втрати із термостабільністю, парамагнетизм пригнічує параелектричну нестабільність;
- доведено, що діелектричні втрати у мікрохвильових діелектриках із високою діелектричною проникністю обумовлені, головним чином, полярною фазою.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

- розроблено моделі мікрохвильових втрат у керамічних та композитних діелектричних матеріалах, які використовуються для реалізації мікрохвильових діелектриків;

- розроблено рекомендації по вибору та практичному застосуванню мікрохвильових діелектричних матеріалів для різних частотних діапазонів;
- розроблено комплекс алгоритмів і машинних програм розрахунку мікрохвильових характеристик діелектричних матеріалів, які необхідні для практичного впровадження діелектриків;
- розроблено новий спосіб вимірювання рівня мікрохвильових втрат у діелектричних і композитних матеріалах на основі мікросмужкового резонатора, який використовується для оперативної оцінки якості діелектричних, композитних та напівпровідникових структур. Також даний спосіб вимірювання рекомендується для досліджень матеріалів у разі необхідності прикладання до зразків електричної напруги.

Моделі, а також чисельні й експериментальні результати дослідження, отримані при виконанні дисертаційної роботи, можуть бути використані для подальших досліджень властивостей мікрохвильових діелектричних матеріалів.

Результати проведених досліджень використовуються у навчальному процесі НТУУ «КПІ» під час викладання курсів «Фізика діелектриків» та «Мікроелектроніка надвисоких частот» для підготовки бакалаврів електроніки за спеціалізацією «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі автором узагальнені й продовжені багаторічні дослідження мікрохвильових діелектриків, що виконувались на кафедрі мікроелектроніки НТУУ «КПІ» за участю здобувача особисто. Автором дисертації планувалися та проводилися експериментальні дослідження властивостей зразків композитних матеріалів та оброблялися результати досліджень. Також здобувач проводив аналіз механізмів мікрохвильових діелектричних втрат та термостабільності у параелектричних матеріалах. Автором дисертації опубліковано матеріали дослідження в профільних періодичних виданнях, основні наукові результати були повідомлені та обговорені на конференціях. Алгоритми та машинні програми були розроблені спільно із доц. Д. Д. Татарчуком. Інтерпретацію отриманих експериментальних результатів, формулювання основних положень і висновків проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри мікроелектроніки НТУУ «КПІ» та конференціях:

- Науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки» (Київ, Україна, 2010);
- VI, VII, VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (COMINFO) (Ялта – Лівадія, Україна, 2010, 2011, 2012);
- 20-а та 22-а Міжнародна Кримська конференція «НВЧ–техніка та телекомунікаційні технології» (Севастополь, Україна, 2010, 2012);
- International Conference «System Analysis and Information Technologies» (SAIT 2011) (Kyiv, Ukraine, 2011);
- IV Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2011» (Київ, Україна, 2011);
- 32nd, 33rd, 34th, 35th International Science Conference «Electronics and Nanotechnology» (ELNANO) (Kyiv, Ukraine, 2012, 2013, 2014, 2015);

- 36-th International Spring Seminar on Electronics Technology «Automotive Electronics» (Alba Iulia, Romania, 2013);
- XIII Международная конференция «Физика диэлектриков» (Диэлектрики–2014) (Санкт-Петербург, Россия, 2014);
- XIV International Young Scientists' Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 2014);
- 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON–2014) (Gdansk, Poland, 2014).

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 23 наукових публікаціях, з них: 10 статей у наукових фахових виданнях України (8 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 12 – у матеріалах конференцій, 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки. Робота включає 65 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел зі 153 найменувань на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та задачі, які необхідно було вирішити у даній роботі, представлено методику наукових досліджень, приведено наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, визначено особистий внесок здобувача, наведено інформацію щодо апробації результатів.

У **першому розділі** проводиться короткий опис механізмів електричних втрат у діелектричних матеріалах. Показано, що мале поглинання електроенергії на частотах 1...100 ГГц може бути реалізовано тільки з використанням малоінерційних механізмів поляризації, які забезпечують низький внесок у діелектричні втрати. Такими механізмами поляризації є тільки оптична та інфрачервона поляризація.

Для високочастотних іонних діелектриків вирішальну роль відіграє саме малоінерційна іонна поляризація зміщення. Діелектрична дисперсія для іонної поляризації повинна відбуватися в далекому інфрачервоному діапазоні частот; таким чином, у гігагерцовій області іонна поляризація повністю встановлюється. Проте, низькочастотний «хвіст» від максимуму втрат з далекої інфрачервоної області можна спостерігати на НВЧ, особливо у разі діелектриків з високим ϵ , у яких частота дисперсії ω_{TO} значно менша, ніж у інших іонних кристалів. З рівняння Лорентца знайдено внесок у тангенс кута діелектричних втрат від резонансної іонної поляризації (тобто, її НВЧ «хвіст» нижче за резонансну частоту):

$$\operatorname{tg} \delta = \Gamma \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\epsilon(0) - \epsilon(\infty)}{\epsilon(0)} = \Gamma \frac{\omega}{\omega_{TO}} \frac{\epsilon_{mic} - \epsilon_{opt}}{\epsilon_{mic}}.$$

З цієї формули слідує, що втрати лінійно збільшуються з ростом частоти, і стають максимальними при наближенні ω до ω_{TO} . Саме цей випадок є типовим для діелектриків з високим ϵ . На рис. 1 показаний вплив ґраткової поляризації на діелектричні втрати у гігагерцовому діапазоні частот.

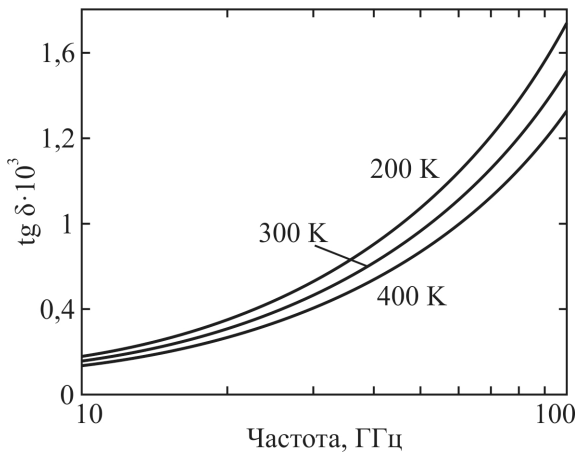


Рис. 1. Частотна залежність тангенса кута втрат: низькочастотний «хвіст» від максимуму ґраткових втрат для кристала рутилу

Дисперсія діелектричної проникності, яка обумовлена пружним зміщенням іонної ґратки, зазвичай спостерігається у кристалах на частотах близько 10^{13} Гц, але у деяких сегнетоелектриках в околі фазового переходу частота «м'якої моди» ґраткових коливань може знижуватися і до 10^{11} Гц. Для тангенсу кута діелектричних втрат у сегнетоелектриках з фазовим переходом типу зміщення отримано наступний вираз:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{CA^2\gamma\omega}{\left[A^2(T - \theta) - \omega^2 \right] \left\{ \varepsilon(\infty) \left[A^2(T - \theta) - \omega^2 \right] + CA^2 \right\} + \varepsilon(\infty)\gamma^2\omega^2},$$

де C – стала Кюрі–Вейсса, A – температурний коефіцієнт частоти, γ – коефіцієнт загасання ґраткової моди, θ – температура Кюрі–Вейсса, $\varepsilon(\infty)$ – діелектрична проникність на дуже високих частотах.

На рис. 2 показані частотна (а) і температурна (б) залежності $\operatorname{tg} \delta$ титанату барію у параелектричній фазі. Можна побачити, що втрати збільшуються з частотою і зменшуються зі зростанням температури.

Термоактивована релаксаційна поляризація обумовлюється наявністю слабкозв'язаних електронів (а також іонів і диполів). Якщо електрони (диполі або іони) слабо зв'язані в структурі діелектрика, то тепловий рух цих частинок впливає на процес поляризації. Електронний механізм теплової поляризації є характерним тільки для твердих діелектриків. Якщо у безпосередній близькості від конкретного типу структурних дефектів знаходиться слабкозв'язаний електрон (чи дірка), і він має дві або більше еквівалентні позиції – пастки, відокремлені потенціальним бар'єром – (зазвичай це електрони, захоплені кристалічними дефектами або домішковими іонами), то ці центри обумовлюють нерівномірний розподіл електричного заряду в кристалічній ґратці. Час релаксації цього механізму поляризації достатньо великий: $10^{-2} \dots 10^{-7}$ с, таким чином цей вид поляризації запізнюється вже на радіочастотах. Проте, максимум високочастотного «хвоста» $\varepsilon''(\nu)$ помітно впливає на НВЧ втрати. Для тангенсу кута втрат вище частоти релаксації, де $\omega\tau > 1$, отримано вираз:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{1}{\omega\tau} \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{\left(\varepsilon(0) / \omega^2 \tau^2 \right) + \varepsilon(\infty)}.$$

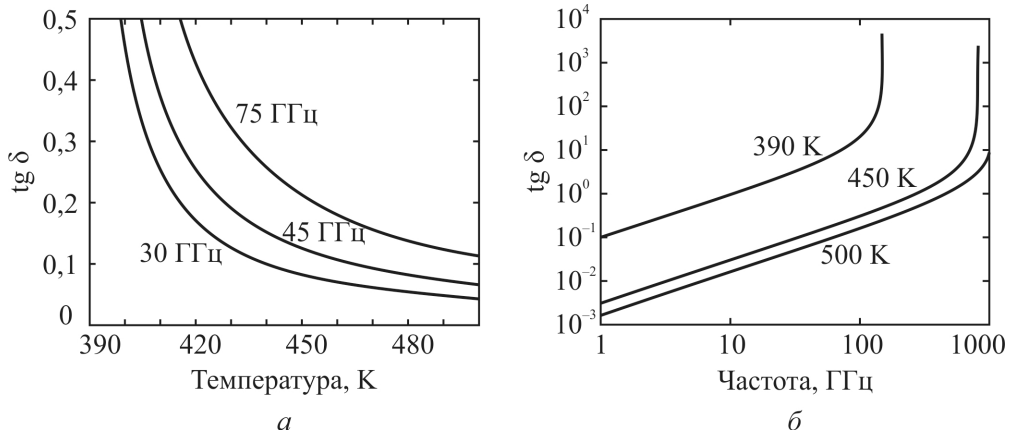


Рис. 2. Температурна (а) і частотна (б) залежності $\text{tg } \delta$ для механізму ґраткової поляризації в параелектриках

Очевидно, що височастотний $\text{tg } \delta$ (рис. 3), обумовлений процесом релаксації, зменшується пропорційно частоті $\omega = 2\pi\nu$ і збільшується зі зростанням температури.

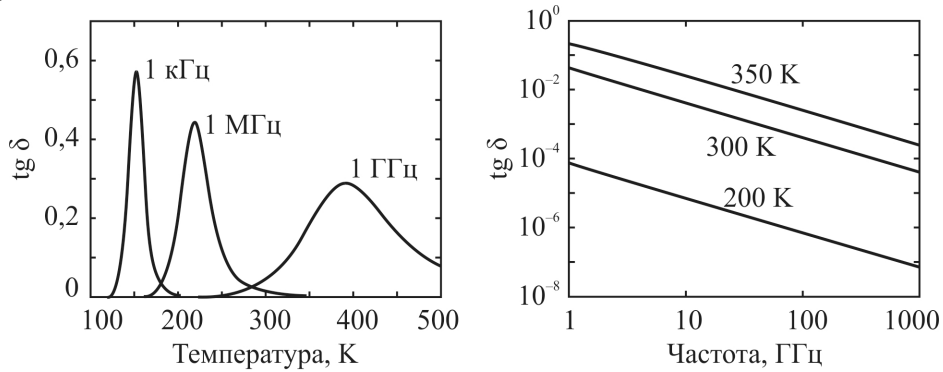


Рис. 3. Температурна (а) і частотна (б) залежності релаксаційних втрат для рутилу з кисневими вакансіями

Якщо в НВЧ діелектрику наявні частинки з різними часом релаксації або відбувається взаємодія релаксуючих частинок, то спектр дисперсії розмивається. У зв'язку з цим ймовірність внеску теплової релаксації в НВЧ провідність збільшується. Це враховують рівнянням Коул–Коула, з якого дисертантом отримано вираз для температурно-частотної залежності тангенса кута діелектричних втрат (з урахуванням розподілу часів релаксації):

$$\text{tg } \delta(T) = \frac{[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)] \left[\omega A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \right]^\beta \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{[\varepsilon(0) + \varepsilon(\infty)] \left[\omega A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \right]^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) + \varepsilon(0) + \varepsilon(\infty) \left[\omega A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \right]^{2\beta}}$$

Ця залежність показана на прикладі кристалу рутилу на рис. 4. Як і у разі Дебаївського механізму, тангенс кута втрат зменшується зі зростанням частоти і збільшується з підвищенням температури. У той же час відбувається зниження максимальних значень втрат, розмиття температурних кривих, і зміщення максимумів у сторону більш високих температур.

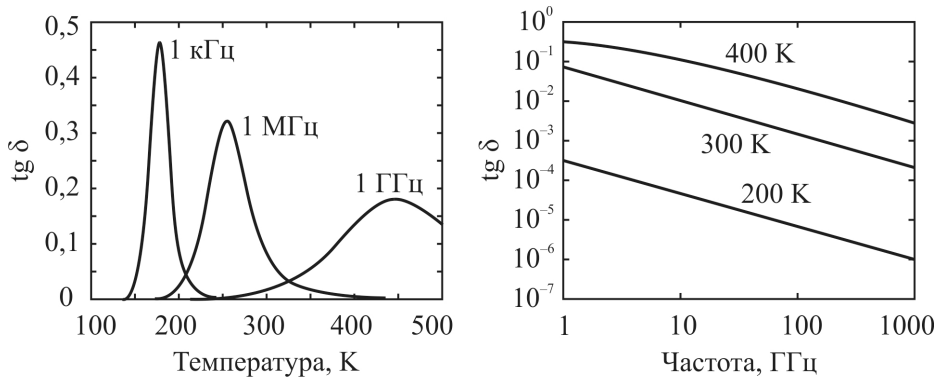


Рис. 4. Температурні (а) і частотні (б) залежності НВЧ $\text{tg } \delta$ з урахуванням розподілу Коул–Коула ($\alpha = 0,15$)

У нецентросиметричних (полярних) матеріалах фактор НВЧ втрат визначається високочастотним полярним механізмом втрат, пов'язаним із взаємодією акустичної і оптичної мод коливань ґратки, який теоретично описується квазі-дебаївськими втратами. В умовах, коли $\omega\tau < 1$:

$$\text{tg } \delta \approx \frac{\omega}{2\nu_{\text{Д}}} \exp \frac{U}{kT} \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{\varepsilon(0)},$$

де $\nu_{\text{Д}}$ – частота Дебая, k – стала Больцмана, U – потенціальний бар'єр.

У цьому випадку втрати в матеріалі збільшуються з підвищенням частоти (рис. 5), що на фізичному рівні є проявом внутрішнього полярного механізму поглинання у міліметровому й субміліметровому діапазоні довжин хвиль. Через п'єзоелектричний ефект виникає процес релаксації, обумовлений взаємодією акустичних і оптичних фононних мод. Цей електромеханічний зв'язок є результатом «витоку» електричної енергії зі збуджених електричним полем оптичних фононів у «тепловий резервуар» акустичних фононів.

З підвищенням температури, і, отже, зі збільшенням амплітуди коливань атомів, прояв ангармонізму стає більш помітним, а діелектричні втрати збільшуються. Отже, при розробці або застосуванні мікрохвильових діелектриків необхідно уникати наявності будь-яких полярних (нецентросиметричних) компонентів у складі діелектричної композиції.

Діелектричні втрати доцільно визначати ефективною електропровідністю матеріалу. У діапазоні НВЧ провідність зазвичай чинить мінімальний вплив на втрати в діелектриках, але може бути значимою у напівпровідниках (рис. 6).

У разі резонансних втрат саме ефективна провідність визначає резонансну частоту еквівалентного Лоренцового осцилятора. Рівняння для ефективної провідності, обумовленої осциляторними втратами, має вигляд:

$$\sigma(\omega) = \frac{[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)] \omega_0 \varepsilon_0}{\Gamma} \frac{\Gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \Gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}.$$

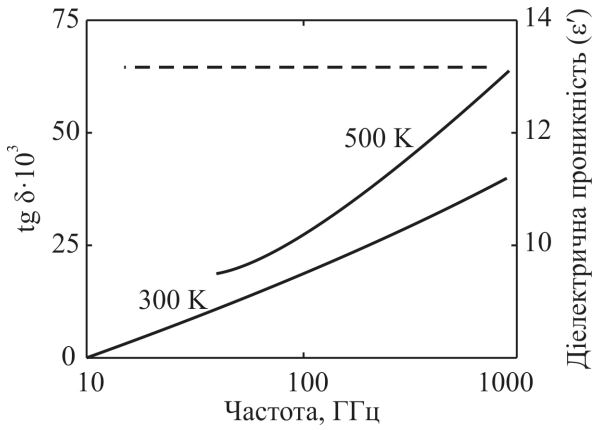


Рис. 5. Частотна залежність тангенса кута втрат: внесок квазі-дебайвського механізму у втрати в полярному кристалі GaAs (пунктирна лінія – діелектрична проникність)

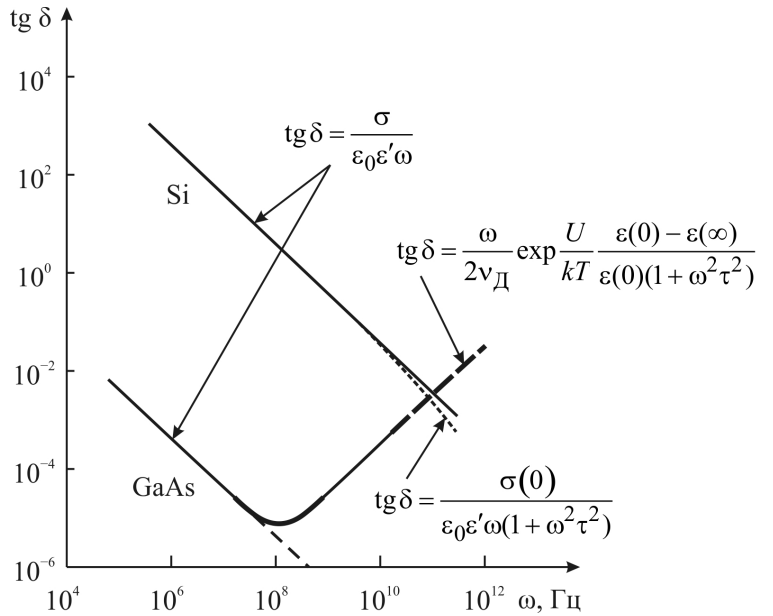


Рис. 6. Порівняна частотна залежність тангенса кута втрат у неполярному кремнії та полярному арсеніді галію

На рис. 7 показана обчислена автором дисертації частотна залежність нормованої провідності для різних коефіцієнтів Γ .

У разі релаксаційних втрат значення $\sigma_{\text{еф}}$ у тисячі разів підвищується з частотою. Вираз для провідності, обумовленої релаксаційними втратами:

$$\sigma(\omega) = \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} \frac{[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]\varepsilon_0}{\tau}$$

На рис. 8 показані отримані у роботі частотні залежності нормованої ефективної провідності для різних часів релаксації.

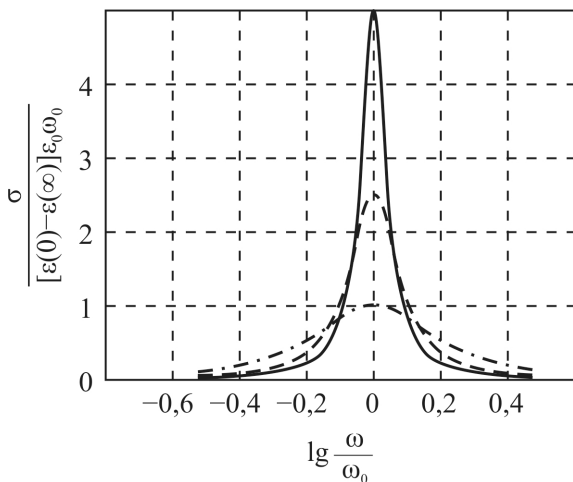


Рис. 7. Типова частотна залежність провідності, обумовленої осцилятором Лорентца: $\Gamma = 0,2$ (суцільна лінія); $\Gamma = 0,4$ (пунктирна лінія); $\Gamma = 1$ (штрих-пунктирна лінія)

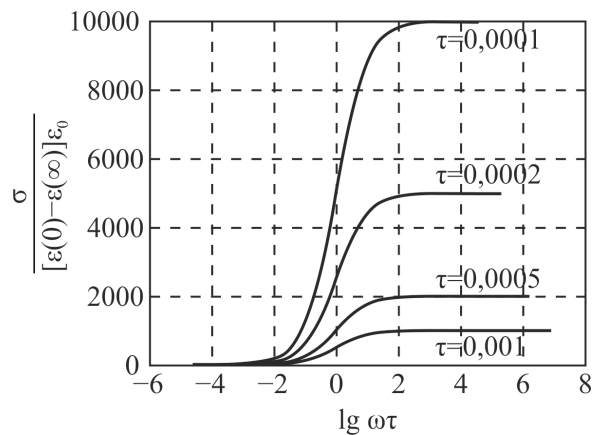


Рис. 8. Типова частотна залежність нормованої ефективної провідності обумовленої релаксаційними втратами

У деяких НВЧ діелектриках (наприклад, у композитах полімер–метал) ефективна провідність стає дуже високою, оскільки реактивний струм через полімер збільшується з частотою в мільйони разів, так що провідність металевих зерен стає вагомою і може навіть переважати. Цей механізм можна використовувати для отримання підвищених втрат у НВЧ діелектриках (у поглинаючих покриттях). Комплексну діелектричну проникність композиту запропоновано розрахувати, використовуючи рівняння Ліхтенекера. Формули для розрахунку тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta_c$) і ефективної провідності композитного матеріалу (σ_c) мають вигляд:

$$\text{tg } \delta_c = \frac{\varepsilon_c''}{\varepsilon_c'} = \text{tg} \left(q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} + (1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'} \right),$$

$$\sigma_c = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_c'' = \omega \varepsilon_0 \left(\sqrt{(\varepsilon_m')^2 + (\varepsilon_m'')^2} \right)^{1-q} \left(\sqrt{(\varepsilon_d')^2 + (\varepsilon_d'')^2} \right)^q \sin \left(q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} + (1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'} \right),$$

де q – об'ємна частка дисперсної фази в композиті, $\varepsilon_m', \varepsilon_m''$ – дійсна та уявна частини діелектричної проникності матриці, $\varepsilon_d', \varepsilon_d''$ – дійсна та уявна частини діелектричної проникності дисперсної фази.

На основі цієї моделі була розрахована частотна залежність діелектричних параметрів для композитних матеріалів типу полімер–метал за різних значень об'ємної частки дисперсної фази у широкому діапазоні частот (рис. 9).

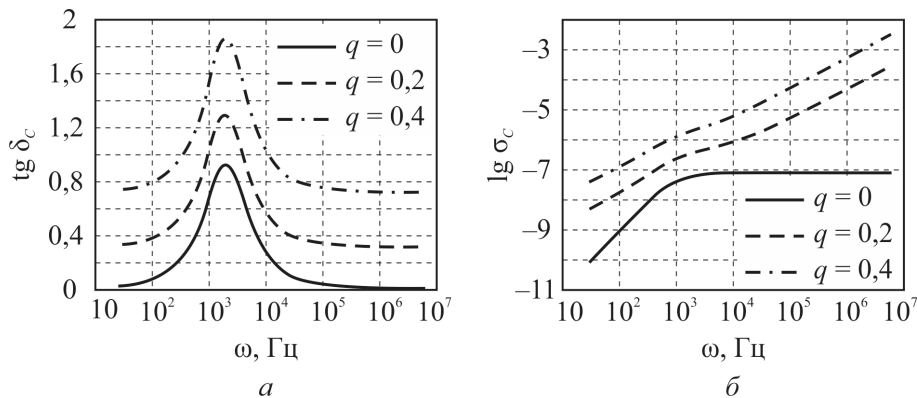


Рис. 9. Тангенс кута діелектричних втрат (а) та ефективна електропровідність (б) композиту епоксид–алюміній

Другий розділ присвячений методам вимірювання втрат у діелектриках у мікрохвильовому діапазоні. Кожен з багатьох методів вимірювання діелектричних параметрів матеріалів на НВЧ має свої переваги та обмеження, тому правильний вибір методу вимірювання є важливою задачею. Нерезонансні методи можна використовувати в широкій смузі частот, вони застосовні для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат у матеріалах із значним поглинанням ($10^{-3} \dots 10^{-2}$). Під час використання резонансних методів немає можливості змінювати частоту, хоч ці методи точніші при вимірюванні діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат у матеріалах з малим поглинанням. Методи об'ємного резонатора застосовні для вимірювання дійсної частини діелектричної проникності

й потребують дуже малих розмірів досліджуваного зразка, але не підходять для вимірювання значень тангенса кута втрат менше, ніж 10^{-3} . Методом Хаккі–Колемана можна вимірювати як дійсну частину діелектричної проникності, так і тангенс кута втрат, якщо його значення не менше 10^{-4} . Методи циліндричного об'ємного резонатора, складеного діелектричного резонатора та хвилеводного резонансного відбивання мають найкращу точність при вимірюванні тангенса кута втрат ($\sim 10^{-5}$).

З метою вимірювання діелектричної проникності й тангенсу кута діелектричних втрат матеріалів із високою проникністю в дисертаційній роботі було розроблено метод неоднорідного мікросмушкового резонатора, який не потребує складної підготовки дослідних зразків. Даний метод відноситься до групи резонансних методів вимірювання мікрохвильових параметрів діелектричних матеріалів. Принцип вимірювання базується на порівнянні резонансної частоти і добротності системи, яка містить досліджуваний зразок, із резонансною частотою і добротністю даної системи (базового резонатора) за відсутності досліджуваного зразка. За значенням зміщення резонансної частоти системи розраховують діелектричну проникність досліджуваного матеріалу, а за зміною добротності системи визначають його тангенс кута діелектричних втрат. Застосування цього методу потребує наявності вимірювальної комірки на основі базового резонатора із відомими характеристиками.

Для реалізації методу неоднорідного мікросмушкового резонатора було виготовлено комірку (рис. 10), яка представляє собою полозо-загороджуючий фільтр на основі мікросмушкового резонатора. Конструкція фільтра така: на металевому електроді 1 розміщено діелектричну підкладку з полікору 2, на яку нанесено мікросмушкову лінію 3 та мікросмушковий опорний резонатор 4. Мікросмушкова лінія та резонатор розділені ємнісною щілиною. Досліджуваний зразок 6 розміщується на кінці опорного резонатора та фіксується за допомогою затискача 5. Гвинтом 7 затискач закріплюється на електроді 1 із утворенням електричного зв'язку між ними. Металевий електрод 1 заземлений. Описана вимірювальна комірка за допомогою коаксіального кабелю підключається до панорамного вимірювача.

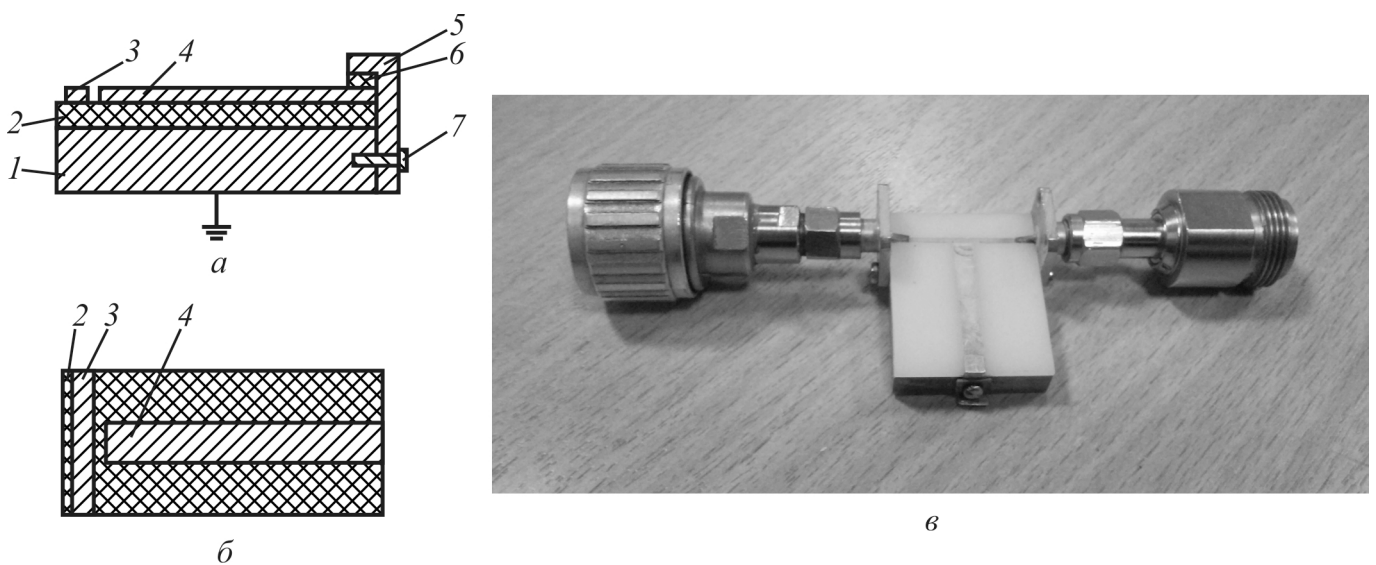


Рис. 10. Структура вимірювальної комірки (а – вид збоку, б – вид зверху без затискача) та її фото (в)

У випадку малих втрат резонансні частоти мікросмушкового резонатора можуть бути визначені з виразу:

$$\frac{1}{2\pi f_0 C} = 2Z_0 \frac{(-1)^{n-1} - \cos(\theta)}{\sin(\theta)}, \quad \theta = \frac{2\pi f_0 l}{v},$$

де f_0 – резонансна частота резонатора, Z_0 – хвильовий опір резонатора, C – ємність резонатора, n – номер резонансної моди, θ – електрична довжина резонатора, l – довжина резонатора, v – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в резонаторі.

Таким чином, знаючи характеристики та розміри мікросмушкового резонатора, а також його резонансні частоти без досліджуваного зразка та із зразком можна вирахувати ємність цього зразка, а за розмірами зразка і його ємністю – обчислити діелектричну проникність досліджуваного матеріалу.

Рівень діелектричних втрат у досліджуваному матеріалі можна обчислити за таким виразом:

$$\frac{1}{Q_\Sigma} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_s},$$

де $1/Q_\Sigma$ – втрати у резонаторі із досліджуваним зразком, $1/Q_0$ – втрати у базовому резонаторі, $1/Q_s$ – втрати у досліджуваному зразку, $1/Q_m$ – втрати у металі затискача.

У лабораторії мікроелектроніки НВЧ нами були проведені вимірювання НВЧ діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат керамічних діелектричних матеріалів методом неоднорідного мікросмушкового резонатора. Отримані результати наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат у деяких керамічних матеріалах

Матеріал	Експериментальні дані		Довідкові дані	
	ϵ	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$	ϵ	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$
TiO ₂	103	5,6	100	1,5...6
CaTiO ₃	143	9,4	150	6...18
SrTiO ₃	285	15	270...290	12...20

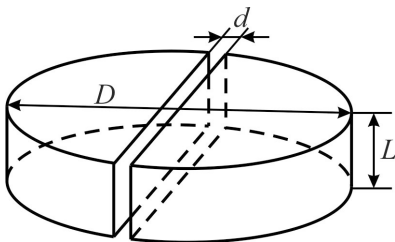


Рис. 11. Складений діелектричний резонатор з поперечною неоднорідністю

Для вимірювання параметрів тонких плівок з полімерних матеріалів, у тому числі полімерів з наповнювачем, тобто композитів полімер–метал, був запроваджений метод складеного діелектричного резонатора. Досліджуваний полімерний матеріал розміщується у щілині між частинами складеного діелектричного резонатора (СДР) і, таким чином, являв собою неоднорідність (рис. 11). СДР мав такі характеристики: $f_{TE_{01}} = 6,387$ ГГц, $D = 8,48$ мм, $L = 4$ мм, $\epsilon = 34$ і $Q_0 = 7200$. Властивості тонкої плівки значно впливають на характеристики СДР (Q , ϵ_{eff} тощо).

Результати вимірювань параметрів полімерних матеріалів, отримані з СДР, наведені в таблиці 2.

Вимірювання СДР з поперечною неоднорідністю

Матеріал неоднорідності	f , ГГц	D , мм	ε_{eff}^*	Q
Початковий СДР	6,39	8,48	34	7200
Шелак	6,41	8,49	33,9	1700
Тефлонова плівка	6,49	8,51	33	7200
Клей БФ-2, не полімеризований	6,42	8,505	33,8	200
Клей БФ-2, полімеризований (повітря, 1 год)	6,36	8,49	34,4	550
Клей БФ-2, полімеризований (повітря, 20 год)	6,45	8,49	33,5	1600
Клей БФ-2, полімеризований ($T = 90^\circ\text{C}$, 1 год, вимірювання через 10 год)	6,43	8,49		4800

* проникність для СДР розраховується

У **третьому розділі** розглянуто методи забезпечення термостабільності параметрів пристроїв НВЧ діапазону.

Термостатування потребує додаткових матеріалів, що збільшує масу, розмір і вартість приладу, а також значно збільшує енергоспоживання. Але було показано, що навіть конструктивними змінами можна досягти компенсації відхилення від початкових значень термозалежних параметрів. За допомогою використання СДР, виготовленого з матеріалу із додатним коефіцієнтом теплового розширення α_T , можна досягти термостабільності резонансної частоти ДР. При цьому зберігається висока добротність і малий розмір СДР. Один з варіантів «самостабілізованого» СДР показано на рис. 12.

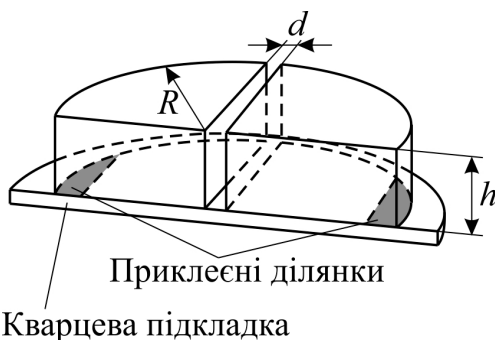


Рис. 12. Поперечний переріз термостабілізованого ДР

Обидві половинки СДР приклеювались на тонку кварцову підкладку таким чином, щоб температурна деформація матеріалу ДР могла зменшити або збільшити ширину повітряного зазору. Резонансна частота СДР надзвичайно чутлива до розміру цього зазору, що й використовується для температурної «самокомпенсації».

Однак, подібні методи термостабілізації можуть значно ускладнити технологію виготовлення НВЧ приладів. Тому найбільш актуальним способом створення систем із незалежними від температури параметрами є використання термостабільних матеріалів. Для

техніки НВЧ необхідні такі мікрохвильові діелектричні матеріали, у яких поєднуються малі діелектричні втрати ($\text{tg } \delta < 10^{-3}$), висока діелектрична стала ($\varepsilon_{mw} \sim 50 \dots 150$) із достатньою температурною стабільністю ($\text{TK}\varepsilon = \varepsilon^{-1} d\varepsilon/dT < 10^{-5}$). На перший погляд, ці вимоги фізично несумісні, тому що високе значення ε без істотного поглинання електричної енергії на частотах 1...100 ГГц у кристалах і електрокераміці може бути реалізовано тільки за рахунок малоінерційних механізмів поляризації. Проте, ці механізми зазвичай (за рідкісними винятками) не можуть забезпечити великого і незалежного від температури значення ε одночасно.

Діелектричні внески від різних швидких механізмів поляризації порівнюються на рис. 13. Оптична та інфрачервона поляризації забезпечують як малі втрати на НВЧ, так і високу температурну стабільність (рис. 13, крива 1, 2). Однак діелектричні внески від цих механізмів поляризації є відносно малими (зазвичай $\varepsilon_{opt} < 6$, $\varepsilon_{ir} = 6 \dots 12$).

Параелектрики типу зміщення, а також антисегнетоелектрики й сегнетоелектрики є матеріалами із дуже великою та неінерційною іонною поляризацією. Стосовно сегнетоелектриків треба зауважити, що тільки монодоменні кристали з дуже високою температурою Кюрі здатні забезпечити $\varepsilon_{mw} = 30 \dots 100$ на НВЧ, наприклад, LiNbO_3 або LiTaO_3 . Монодоменні кристали «жорстких» сегнетоелектриків типу зміщення мають не дуже значні втрати ($\text{tg } \delta < 10^{-3}$) і додатний ТК ε (рис. 13, крива 3). Кристали «м'яких» сегнетоелектриків, таких як BaTiO_3 , мають підвищені втрати й нетермостабільні.

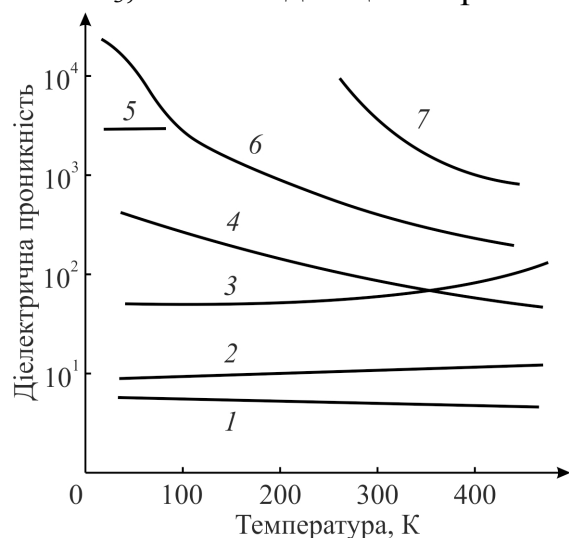


Рис. 13. Типова температурна залежність діелектричної проникності для різних діелектриків:

- 1 – випадок оптичної поляризації;
- 2 – випадок оптичної та інфрачервоної поляризації;
- 3 – монодоменний сегнетоелектрик;
- 4 – «жорсткий» параелектрик (CaTiO_3);
- 5 – кристал ТТФ–ТСNQ;
- 6 – «м'який» параелектрик (SrTiO_3);
- 7 – типовий сегнетоелектрик у параелектричній фазі: $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$

Стосовно антисегнетоелектриків типу зміщення (таких як NaNbO_3 та PbZrO_3) треба відмітити, що вони теж мають високу діелектричну проникність і відносно низькі діелектричні втрати. Крім того, вони мають достатньо великий додатний ТК ε : за припущенням автора, їх можна використовувати для термостабілізації НВЧ параелектриків, у яких ТК ε також великий, але від'ємний (рис. 13, криві 4, 6, 7).

Також існує теоретична можливість створення термостабільних діелектриків, використовуючи електронну поляризацію невпорядкованої ґратки, де очікувався, але не здійснився фазовий перехід у надпровідну фазу (рис. 13, крива 5).

Однак, кристали є занадто дорогими матеріалами, щоб масово використовувати їх у НВЧ техніці. Тому на практиці у пристроях широко вживають тільки мікрохвильову кераміку.

В однофазних діелектриках з $\varepsilon > 20$ теоретично пояснити можливість отримання малих втрат і термостабільності не є простою задачею. Згідно традиційної теорії поляризації такий діелектрик не може існувати. Тим не менш, термостабільні мікрохвильові діелектрики з малими втратами й високою ε_{mw} існують, і широко застосовуються у техніці. Ці діелектрики реалізуються у вигляді систем складних однофазних або змішаних оксидів, в яких можна змінювати значення ТК ε шляхом зміни їх складу.

Найбільш відомий НВЧ діелектрик з високою ε базується на основі такої структури з VO_6 -октаєдрів, коли вони прилягають один до одного своїми

вершинами: на думку автора роботи, саме це зумовлює підвищену ϵ_{mw} . Порівняння трьох форм TiO_2 підтверджує цей висновок: анатаз, у якому TiO_6 -октаедри сполучені двома гранями, має $\epsilon = 50$; брукіт, у якому TiO_6 -октаедри сполучені двома гранями (двома вершинами), має $\epsilon = 66\dots68$; але рутил, з октаедрами сполученими тільки однією вершиною, має $\epsilon = 80\dots170$. У структурі рутила легко бачити, що є можливість впливати на властивості кристалів за допомогою розміщення різних іонів між октаедрами. У дисертації зроблено висновок, що саме таким чином можна керувати свободою взаємодії електронних оболонок і їх взаємним зміщенням шляхом впровадження різних іонів у структуру. Наприклад, можна значно послабити критичну залежність $\epsilon(T)$ (що відповідає закону Кюрі–Вейсса), і при тому підтримувати високу поляризованість.

Головною особливістю параелектриків або сегнетоелектриків з великою діелектричною проникністю є сильна кореляція між сильно поляризованими октаедрами. Ця кореляція породжує навіть сегнетоелектрику, але неминуче приводить до нетермостабільності. Для того, щоб уникнути сильної кореляції VO_6 -октаедрів, між ними мають бути розміщені деякі види інших іонів, і це є головним завданням розробки нових діелектричних НВЧ композицій.

Проведений у дисертації аналіз значень параметрів керамічних діелектриків (ϵ , $\text{TK}\epsilon$, $\text{tg } \delta$) вказує на те, що велике значення ϵ_{mw} можливе тільки в сегнетоелектриках і параелектриках типу зміщення. Проте, сегнетоелектрики через їх доменну структуру і відповідну дисперсію $\epsilon(\omega)$ мають великі втрати на НВЧ. Таким чином, для діелектриків з дуже високим значенням ϵ на НВЧ мають бути використані матеріали тільки на основі «жорстких» параелектриків.

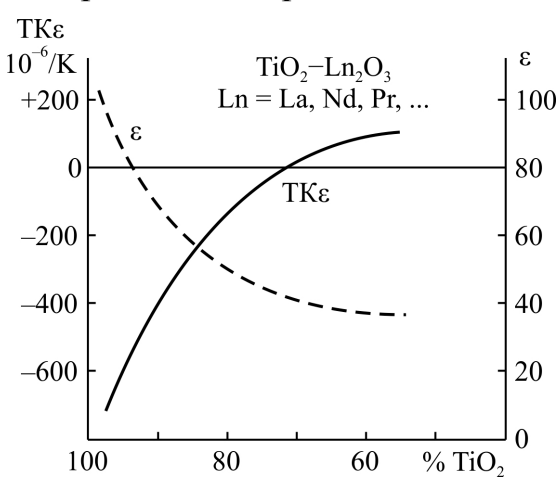


Рис. 14. Залежність $\text{TK}\epsilon$ і ϵ термостабільних НВЧ діелектриків бінарної системи лантан-титанових оксидів $\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ від концентрації TiO_2

Існує спосіб розробки НВЧ діелектриків із високою діелектричною проникністю ($\epsilon_{mw} \approx 80$), використовуючи легування TiO_2 іонами рідкісноземельних елементів: кераміка 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 елементи церієвої підгрупи: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd (рис. 14). Іон лантану має електронну конфігурацію: $5s^25p^6$ і має порожню $4f$ оболонку, а отже, є діаманетиком. Лантаніди (елементи церієвої підгрупи) є парамагнетиками із поступово зростаючим магнітним моментом від 1 до 7 магнетонів Бору (їх електронна конфігурація — $4f^{(1\dots7)}5s^25p^6$). Тому, вони мають помітний вплив на НВЧ властивості, особливо на термостабільність, системи $\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$. Зберігаючи значну діелектричну проникність ($\epsilon_{mw} \approx 80$), композиції $\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ можуть змінювати $\text{TK}\epsilon$ від від'ємного значення до додатного (табл. 3). Такі композиції схожі на

параелектрики й парамагнетики одночасно; до того ж, у характеристиці $\epsilon(T)$ парамагнетизм пригнічує параелектричний закон Кюрі–Вейсса. У композиції $\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ параелектричний закон Кюрі–Вейсса поступово послаблюється: від Ce до Gd (зі збільшенням числа некомпенсованих спінів) $\text{TK}\epsilon$ сильно змінюється. На рис. 14 показано зміну $\text{TK}\epsilon$ залежно від відсоткового вмісту TiO_2 . Очевидно, що у

межах твердого розчину, наприклад, $(\text{Nd-Sm})\text{La}_2\text{TiO}_5$, можна досягти й нульового ТК ϵ . Відносно прості композиції типу $n\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ (кераміки Ln_2TiO_5 або $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$), в яких можна отримати ТК $\epsilon \approx 0$ не можна вважати стабільними у технології, тоді як стабільніша композиція $\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{11}$ характеризується ТК $\epsilon < 0$ (як у рутилу).

Ефективним рішенням проблеми комбінації високої проникності і низького ТК ϵ є використання для кераміки $\text{TiO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ «структурного стабілізатора» Ba^{+2} разом із Ln^{+3} . У результаті були розроблені найбільш перспективні композиції за умови, коли елемент церієвої підгрупи Ln і Ba були використані разом для отримання термостабільної кераміки (тобто $\epsilon \geq 100$ і ТК $\epsilon \approx 0$).

Таблиця 3

Діелектрична проникність і ТК ϵ БЛТ (виміри на частоті 9,4 ГГц)

Параметр	Ln (верхній індекс перед РЗЕ показує заповнення 4f-оболонки)								
	⁰ La	¹ Ce	² Pr	³ Nd	⁵ Sm	⁶ Eu	⁷ Gd	TiO ₂	CaTiO ₃
ϵ_{mw}	110	90	85	83	80	75	65	100	150
ТК ϵ , 10^{-6} K^{-1}	-700	-400	-250	-80	+60	+100	+160	-900	-1600

Примітка. Для порівняння наведено параметри для рутилу й перовскіту

Описана композиція є перовскітоподібною структурою барій-лантаноїдних тетратитанатів – $\text{BaLn}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, які відповідають твердому розчину $\text{Ba}_{6-x}\text{Ln}_{8+2x/3}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ за $x = 1,5$. Монофазні перовскітоподібні структури БЛТ існують тільки для церієвої групи ряду лантаноїдів: Ln = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu. Головною особливістю цієї структури є те, що октаедри TiO_6 пов'язані вершинами. Механізм аномально високої ϵ_{mw} і низького ТК ϵ у БЛТ полягає у тому, що «м'яка» ґраткова мода (яка, як правило, приводить як до високої ϵ , так і її теплової нестабільності) «пригнічується» некомпенсованими спінами в оболонках рідкісноземельних елементів, які порушують далекодіяну кореляцію сполучених вершинами кисневих октаедрів TiO_6 . Головною причиною ефекту термостабільності є парамагнетизм, який є властивим церієвому ряду лантаноїдів.

Механізми діелектричних втрат у БЛТ пов'язані із структурним розупорядкуванням, особливо з наявністю небажаної полярної фази. Будь-які межі між зернами мають невпорядковану структуру, і їх частота релаксації може досягати мікрохвильового діапазону. Це полярні іонні нанорозмірні області, які є головною причиною поглинання на НВЧ. Саме тому технологія БЛТ кераміки повинна уникати появи полярної фази.

Легування параелектриків іонами рідкісноземельних елементів приводить до пригнічування парамагнетизмом параелектричної нестабільності діелектричної проникності. Тобто, парамагнетизм перешкоджає появі полярної фази і, таким чином, знижує НВЧ втрати, обумовлені полярною фазою.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Синтез надвисокочастотних матеріалів із високим значенням діелектричної проникності, малим рівнем втрат і високою термостабільністю є актуальною науково-технічною задачею. Одним з перспективних шляхів розв'язку цієї задачі є використання залежності діелектричних властивостей та термостабільності діелектричних та композитних матеріалів від їх складу. Внаслідок теоретичних та експериментальних досліджень, проведених в роботі, показано, що:

1. Мале поглинання електроенергії на частотах 1...100 ГГц може бути реалізовано тільки з використанням малоінерційних механізмів поляризації (оптичної та інфрачервоної), які забезпечують низький внесок у діелектричні втрати.
2. У гігагерцовому діапазоні частот одночасно спостерігаються як високочастотний «хвіст» від релаксаційних втрат так і низькочастотний «хвіст» від резонансних втрат, але домінуючий механізм втрат для діелектриків з високою проникністю проявляється лише тоді, коли діелектрик знаходиться у полярній фазі. Отже, при розробці або застосуванні мікрохвильових діелектриків необхідно уникати наявності будь-яких полярних (нецентросиметричних) компонентів у складі діелектричної композиції.
3. Рівень енергетичних втрат у композитних матеріалах на основі полімерів, які містять в якості дисперсної фази металеві частки з високою провідністю, визначається в основному властивостями матриці. У роботі вперше отримано частотні та температурні залежності діелектричних втрат для деяких композитних матеріалів полімер–метал.
4. Підвищеного значення діелектричної проникності у TiO_2 можна досягти у випадку, коли високополярні октаедри TiO_6 прилягають один до одного своїми вершинами. Ступенем взаємодії електронних оболонок і їх взаємним зміщенням можна керувати шляхом впровадження різних іонів між кисневими октаедрами TiO_6 , що дає змогу значно послабити критичну залежність діелектричної проникності від температури $\epsilon(T)$ зі збереженням великої проникності.
5. Причиною ефекту термостабільності у БЛТ може бути парамагнетизм, властивий церієвому ряду лантановидів. Отримані результати підтверджують, що у відомих НВЧ діелектриках типу БЛТ електронні зв'язки $4f/5d$ -гібридних орбіталей, зумовлені іонами РЗЕ, в'язко пригнічують взаємодію октаедрів TiO_6 , що є вкрай сприятливим для підвищення термостабільності діелектричної проникності.
6. Легування параелектриків іонами рідкоземельних елементів приводить до пригнічування парамагнетизмом параелектричної нестабільності діелектричної проникності. Тобто, парамагнетизм перешкоджає появі полярної фази і, таким чином, знижує НВЧ втрати, обумовлені полярною фазою.
7. При виборі мікрохвильових діелектричних матеріалів для практичного застосування в різних частотних діапазонах необхідно керуватися наступними рекомендаціями:
 - для діелектриків із дуже високим значенням ϵ на НВЧ мають бути використані матеріали тільки на основі «жорстких» параелектриків;
 - у разі використання на міліметрових хвилях як підкладок для інтегральних НВЧ схем напівпровідників типу $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$, які проявляють полярність, необхідно враховувати суттєве зростання поглинання з частотою. Тому у цьому частотному діапазоні значну перевагу мають підкладки з неполярного кремнію;
 - у метровому та дециметровому діапазонах довжин хвиль доцільно використовувати Sm- і Nd-БЛТ, оскільки у вказаних діапазонах вони мають мінімальні втрати;
 - на основі встановленої причини термостабільності мікрохвильових діелектриків з високою проникністю, рекомендується застосовувати парамагнітні матеріали як компоненти для створення керамічних матеріалів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Диденко Ю. В. Экранирующие свойства композитных структур металл-диэлектрик в СВЧ диапазоне / Ю. В. Диденко, В. И. Молчанов, А. О. Олексенко, И. В. Пацёра, Д. Д. Татарчук, Д. И. Царенко // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – Т. 11. – № 1. – С. 104–107.
2. Диденко Ю. В. Температурная зависимость диэлектрических параметров композитных материалов металл-полимер в СВЧ-диапазоне / Ю. В. Диденко, И. В. Пацёра, Д. Д. Татарчук, Е. И. Харабет // Электроника и связь. – 2012. – №5(70). – С. 132–134.
3. Didenko Y. V. Effective conductivity of microwave dielectric materials / Y. V. Didenko, D. D. Tatarchuk, V. I. Molchanov, Y. M. Poplavko // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №2(79). – PP. 23–28. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
4. Didenko Y. V. The specific conductivity of metal-polymer composites in the microwave range / Y. V. Didenko, D. D. Tatarchuk, I. V. Patsora, I. I. Kharabet, A. S. Franchuk // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №3(80). – PP. 9–12. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
5. Didenko Y. V. Temperature Dependences of Losses in High Frequency Dielectrics / Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko, D. D. Tatarchuk // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №4(81). – PP. 28–35. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
6. Диденко Ю. В. СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора / Ю. В. Диденко, В. И. Молчанов, В. М. Пашков, Д. Д. Татарчук, Д. А. Шмыгин // Electronics and Communications. – 2014. – Т. 19. – №6(83). – С. 14–20. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
7. Didenko Y. V. Polarization Mechanisms in Thermal Stable Microwave BLT Ceramics. Part 1: “Hard” Paraelectrics Peculiarities / Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko // Electronics and Communications. – 2015. – Vol. 20. – №1(84). – PP. 18–22. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
8. Didenko Y. V. Polarization Mechanisms in Thermal Stable Microwave BLT Ceramics. Part 2: Paramagnetism suppress soft mode / Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko // Electronics and Communications. – 2015. – Vol. 20. – №2(85). – PP. 9–14. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
9. Диденко Ю. В. Частотные и температурные зависимости диэлектрических потерь в полупроводниках на СВЧ / Ю. В. Диденко // Electronics and Communications. – 2015. – Т. 20. – №3(86). – С. 9–11. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
10. Татарчук Д. Д. Композиты на основе диэлектриков в технике СВЧ / Д. Д. Татарчук, Ю. М. Поплавко, В. А. Казмиренко, А. В. Борисов, Ю. В. Диденко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – Т. 59. – №2. – С. 33–43. (Індексується у Scopus, Inspec, Google Scholar, Academic OneFile, EI-Compendex, Gale, OCLC, SCImago, Summon by Serial Solutions, ВИНІТИ, РИНЦ).

11. Пат. 25174 Україна, МПК (2006) G01N 17/00. Спосіб оцінки корозійного впливу полімерних матеріалів на стійкість металізації / О. В. Бакунцев, Ю. В. Діденко. – № u 2007 03656 ; заявл. 03.04.2007 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. – 4 с.
12. Діденко Ю. В. СВЧ-характеристики металлодіелектричних нанокompatитних матеріалів / Ю. В. Діденко, А. В. Мачулянський, Д. Д. Татарчук, О. В. Теличкіна, Ю. І. Якіменко // СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології: матеріали 20-й міжнарод. Кримської конф. (13 – 17 сент. 2010 г., г. Севастополь). – Севастополь, 2010. – С. 811–812. (Індексується в Inspec, Thomson ISI, Scopus, Google Scholar, ВІНІТИ).
13. Діденко Ю. В. Захисні матеріали СВЧ-діапазона на основі нанодисперсних структур метал-діелектрик / Ю. В. Діденко, А. В. Мачулянський, В. А. Мачулянський, Д. Д. Татарчук, Ю. І. Якіменко // Сучасні комунікаційні технології (COMINFO'2010–Livadia): матеріали VI міжнарод. науч.-техн. конф. (4 – 8 окт. 2010 г., г. Ялта – пгт Ливадія). – К., 2010. – С. 119–120.
14. Didenko Yu. V. Microwave properties of composite structures of metal-insulator / Yu. V. Didenko, V. I. Molchanov, O. O. Oleksenko, I. V. Patsora, D. D. Tatarchuk, D. I. Tsarenko // Електроніка і нанотехнології (ЭЛНАНО-2012): матеріали XXXII міжнарод. науч.-техн. конф. (10 – 11 апр. 2012 г., г. Київ). – К., 2012. – С. 44–45.
15. Шмыгин Д. А. Одно- і многослойні поглинаючі СВЧ структури на основі полімеруглеродних нанокompatитів / Д. А. Шмыгин, Д. Д. Татарчук, Ю. В. Діденко // СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології: матеріали 22-й Міжнарод. Кримської конф. (10 – 14 вересня 2012 г., г. Севастополь). – Севастополь, 2012. – С. 597–598. (Індексується в Inspec, Thomson ISI, Scopus, Google Scholar, ВІНІТИ).
16. Didenko Y. Thermal dependence of “metal-polymer” type composite materials’ dielectric properties in ultra-high frequency band / Y. V. Didenko, I. V. Patsora, D. D. Tatarchuk, I. I. Kharabet, A. S. Franchuk // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2013): Proc. of XXXIII Int. Sci. Conf. (April 16 – 19, 2013, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2013. – PP. 90–93. (Індексується у Scopus, Web of Science, Google Scholar).
17. Didenko Y. Temperature Dependences of the Dielectric Permittivity and Dissipation Factor for Nanocomposites Metal–Polymer / Y. Didenko, D. Tatarchuk, I. Kharabet, A. Franchuk, Y. Yakimenko // Electronics Technology «Automotive Electronics»: Proc. of 36-th Int. Spring Seminar (May 8 – 12, 2013, Alba Iulia, Romania). – Alba Iulia, 2013. – PP. 158–159.
18. Didenko Y. V. High Frequency Dielectrics: Nature of Loss / Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2014): Proc. of 34th Int. Sci. Conf. (April 15 – 18, 2014, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2014. – PP. 73–77. (Індексується у Scopus, Web of Science, Google Scholar).
19. Poplavko Y. M. Nature of Losses in High Frequency Dielectrics / Y. M. Poplavko, Y. V. Didenko, D. D. Tatarchuk // Фізика діелектриків (Діелектрики-2014): матеріали XIII міжнарод. конф. (2 – 6 червня 2014 г., Санкт-Петербург, Росія). – Санкт-Петербург, 2014. – С. 27–30.
20. Tatarchuk D. D. Frequency dependences of the dielectric parameters of the metal-insulator composites / D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. V. Borisov // Фізика

- диэлектриков (Диэлектрики-2014): материалы XIII междунар. конф. (2 – 6 июня 2014 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург, 2014. – С. 266–269.
21. Kharabet I. I. Modeling of parameters of composite metal-polymer systems / I. I. Kharabet, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, I. V. Patsora // *Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014): Proc. of 20th Int. Conf. (June 16 – 18, 2014, Gdansk, Poland)*. – Gdansk, 2014. – PP. 321–324. (Індексується у Scopus).
 22. Poplavko Y. M. Physical Mechanisms Determining Microwave Dielectrics Properties (Part 1. Thermal Stability Nature) / Y. M. Poplavko, Y. V. Didenko, Y. I. Yakimenko // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015): Proc. of 35th Int. Sci. Conf. (April 21 – 24, 2015, Kyiv, Ukraine)*. – Kyiv, 2015. – PP. 23–28. (Індексується у Scopus, Web of Science, Google Scholar).
 23. Poplavko Y. M. Physical Mechanisms Determining Microwave Dielectrics Properties (Part 2. Dielectric Losses Nature) / Y. M. Poplavko, Y. V. Didenko, Y. I. Yakimenko // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015): Proc. of 35th Int. Sci. Conf. (April 21 – 24, 2015, Kyiv, Ukraine)*. – Kyiv, 2015. – PP. 29–34. (Індексується у Scopus, Web of Science, Google Scholar).

АНОТАЦІЇ

Діденко Ю. В. Мікрохвильове поглинання і термостабільність діелектричних матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «КПІ», Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню механізмів поглинання електричної енергії у діелектричних матеріалах з метою виявлення домінуючих з них у мікрохвильовому діапазоні та термостабільності діелектриків з високим значенням діелектричної проникності.

Показано, що домінуючий механізм втрат для діелектриків з високою проникністю проявляється, коли вони знаходяться у полярній фазі. Доведено, що у композитних матеріалах полімер–метал рівень втрат визначається в основному властивостями полімерної матриці.

Для вимірювання діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат матеріалів запропоновано метод неоднорідного мікросмужкового резонатора.

Проведено огляд існуючих термостабільних діелектричних матеріалів з високою проникністю та методів їх отримання. Показано, що легування параелектриків іонами рідкоземельних елементів приводить до пригнічування температурної нестабільності діелектричної проникності.

Ключові слова: діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, кераміка, композитний матеріал, неоднорідний мікросмужковий резонатор, термостабільність, параелектрик, полярна фаза

Диденко Ю. В. Микроволновое поглощение и термостабильность диэлектрических материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию механизмов поглощения электрической энергии в диэлектрических материалах с целью выявления доминирующих из них в микроволновом диапазоне и термостабильности диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости.

Показано, что доминирующий механизм потерь для диэлектриков с высокой проницаемостью проявляется, когда они находятся в полярной фазе. Доказано, что в композитных материалах полимер–металл уровень потерь определяется в основном свойствами полимерной матрицы.

Для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов предложен метод неоднородного микрополоскового резонатора.

Проведен обзор существующих термостабильных диэлектрических материалов с высокой проницаемостью и методов их получения. Показано, что легирование параэлектриков ионами редкоземельных элементов приводит к подавлению температурной нестабильности диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, керамика, композитный материал, неоднородный микрополосковый резонатор, термостабильность, параэлектрик, полярная фаза

Didenko Y. V. Microwave absorption and thermal stability of dielectric materials. – Manuscript.

The Ph.D. thesis on specialty 05.27.01 – solid-state electronics. – National Technical University of Ukraine "KPI", Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the study of electric energy absorption mechanisms in the dielectric material to identify the dominant mechanism in the microwaves, and thermal stability dielectrics with a high dielectric constant.

It is shown that dielectric loss is expedient to determine the effective electrical conductivity of the material. It is proved as experimentally so theoretically that the high-frequency "tail" from low frequency relaxation losses as well as low-frequency "tail" from resonance losses maximum are observed at the gigahertz frequency range. In microwave dielectrics with high permeability, the dominant mechanism of losses appears the polar phase presence. At that, the anharmonicity becomes more prominent, and dielectric loss increases with increasing temperature due to increase of atomic oscillation amplitude. Thus, when microwave dielectrics development or application, it is necessary to avoid the presence of any polar (non-centrosymmetric) components in the dielectric composition.

It is concluded that the level of losses in the composite materials, which contain as a dispersed phase the metallic particles with high conductivity, is determined mainly by the properties of the matrix.

A review and analysis of dielectric parameters measuring methods in the microwaves is given. The correct selection of a suitable measurement method is dependent on the real and imaginary parts of permittivity value, as well as on shape and size of studied sample and accuracy requirements. The method of nonuniform microstrip resonator is developed that makes possible dielectric constant and dielectric loss tangent of material measurement with a reasonable accuracy; this method does not require the complicated preparation of samples.

A review properties of existing thermostable dielectric materials with high permittivity and methods of obtaining them is given. The thesis proves that at microwave

range, as the dielectrics with high dielectric permittivity, the only materials on the basis "hard" paraelectrics should be used. It is shown that the main deposit to the permittivity in the rutile and perovskite is conditioned by high-polarizable oxygen octahedra TiO_6 that are joint by the vertexes. Author makes the conclusion that the degree of interaction between the electronic shells and their mutual displacement can be controlled through the introduction of various ions between the octahedron. By this way the critical dependence of the dielectric constant from temperature with storage of large permittivity can be significantly reduced.

It is confirmed experimentally, that the eligible monophasic perovskite-like structures for BLT are possible only for cerium row of lanthanides. The conclusion made that the mechanism of anomalously high permittivity and low temperature coefficient of permittivity in the BLT is due to "soft" vibration mode of lattice (that usually give rise to high permittivity but thermally is non-stable). This mode is partially "suppressed" by the rare-earth ions, violating a long-range correlation of oxygen octahedra TiO_6 . It is shown, that the "hard paraelectric" doping by the paramagnetic rare earth elements ions, leads to the suppress of paraelectric non-stability of dielectric constant by paramagnetism. Therefore, it can be assumed that the paramagnetism prevents the appearance the polar phase, and thus lowers the microwave loss conditioned by the polar phase.

Keywords: dielectric permittivity, dielectric loss tangent, ceramics, composite materials, non-uniform microstrip resonator, thermal stability, paraelectrics, polar phase

Підписано до друку 18.05.2016 р. Заказ № 156/05. Формат 60 × 84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк ризогр. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 пр.

Поліграфічний Центр «АВЕРС»
03056, м. Київ, вул. Польова, 21, тел. 277-49-35