

УДК 621.372.41

*Д. Д. ТАТАРЧУК, Ю. В. ДІДЕНКО, А. П. ПОПРАВКА, К. С. БРАГЕ***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ФІЛЬТРІВ НВЧ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ**

Розглянуто основні принципи створення фільтрів надвисоких частот на основі тонких діелектричних резонаторів. Наведено варіанти конструкцій фільтрів НВЧ. Приведено математичну модель розрахунку резонансної частоти фільтру, граничні умови та метод їх розрахунку. Описано методику вимірювання параметрів фільтрів і наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень обраних конструкцій. Проведено аналіз отриманих результатів: порівняно розраховані та виміряні результати, розглянуто методи вимірювання параметрів діелектричних матеріалів на основі тонких резонаторів, проведено дослідження матеріалів одним із методів.

Ключові слова: тонкий діелектричний резонатор, методи вимірювання, фільтр, діелектрик, надвисокі частоти, параметри матеріалів.

*Д. Д. ТАТАРЧУК, Ю. В. ДІДЕНКО, А. П. ПОПРАВКА, К. С. БРАГЕ***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ФИЛЬТРОВ СВЧ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

Рассмотрены основные принципы создания фильтров СВЧ на основе тонких диэлектрических резонаторов. Показаны примеры их конструкций. Приведены математическая модель расчета резонансных частот фильтров, граничные условия и методы их расчета. Описана методика измерения параметров и приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований выбранных конструкций фильтров. Проведен анализ полученных результатов: рассмотрены методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе тонких диэлектрических резонаторов, проведено сравнение рассчитанных и измеренных результатов, описано исследование материалов одним из методов измерения параметров тонких диэлектрических резонаторов.

Ключевые слова: тонкий диэлектрический резонатор, методы измерения, фильтр СВЧ, диэлектрик, сверхвысокие частоты, параметры материалов.

*D. D. TATARCHUK, Y. V. DIDENKO, A. P. POPRAVKA, K. S. BRAGE***MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE FILTERS BASED ON THIN DIELECTRIC RESONATORS AND METHODS FOR MEASURING THEIR PARAMETERS**

In the article the basic principles of creating microwave filters based on thin dielectric resonators are considered. Examples of designs of microwave filters are given. The mathematical model of the filter, the boundary conditions and the method for calculating the filter are given. A technique for measuring parameters is described and the results of theoretical and experimental studies of selected filter designs are presented. The results obtained are analyzed by comparing the computed results with the measured ones. Also in the article methods of measuring the parameters of dielectric materials on the basis of thin dielectric resonators are considered, and materials are investigated by one of the methods.

Key words: thin dielectric resonator, measurement methods, microwave filter, dielectric, ultrahigh frequencies, material parameters.

Вступ: У сучасному світі надвисокочастотні (НВЧ) хвилі використовуються досить активно. Мобільні телефони працюють на НВЧ випромінюванні. Широко використовуються технології, такі як Wi-Fi, безпроводний Wi-Max, LTE (Long Term Evolution), радіоінтерфейс малого радіусу дії Bluetooth, системи радіолокації та радіонавігації, навіть робота мікрохвильової печі, усі вони використовують у своїй роботі НВЧ хвилі. Тому не дивно, що з кожним роком вимоги до НВЧ конструкцій стають більш жорсткими. Покращення добротності конструкцій, знаходження значень власних хвиль та резонансних частот для більш раціонального використання – всі ці задачі є важливими для подальшого розвитку НВЧ технологій. Тому темою статті було обрано математичне моделювання конструкцій фільтру НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів та методи вимірювання їх параметрів.

Аналіз попередніх досліджень: Попередні дослідження [1 – 3] показали, що одним із перспективних напрямків розвитку конструкцій НВЧ є конструкції на основі тонких діелектричних резонаторів. Одним із перспективних напрямків розвитку НВЧ є конструкції та методи дослідження параметрів матеріалів на основі тонких резонаторів. Особливої уваги заслуговують фільтри НВЧ на їх основі та розроблення методів дослідження параметрів матеріалів на основі тонких резонаторів.

Постановка задачі: Вимоги до сучасних конструкцій НВЧ та матеріалів для їх створення значно зросли. Тому метою роботи є розробка нових моделей на прикладі фільтрів НВЧ та дослідження параметрів матеріалів, на основі яких побудовані конструкції. Щоб досягти поставленої мети, необхідно розв'язати такі задачі:

1. розробка адекватної математичної моделі тонких діелектричних резонаторів;
2. розробка конструкцій фільтрів;
3. експериментальне дослідження конструкції фільтрів;
4. перевірка параметрів фільтру методом тонкого діелектричного резонатора.

Математична модель тонкого діелектричного резонатора. Як було показано у роботах [1, 2], при додержанні певних вимог, у тонких діелектричних резонаторах (рис 1) виникають високодобротні резонансні коливання.

© Д. Д. Татарчук, Ю. В. Діденко, А. П. Поправка, К. С. Браге, 2018

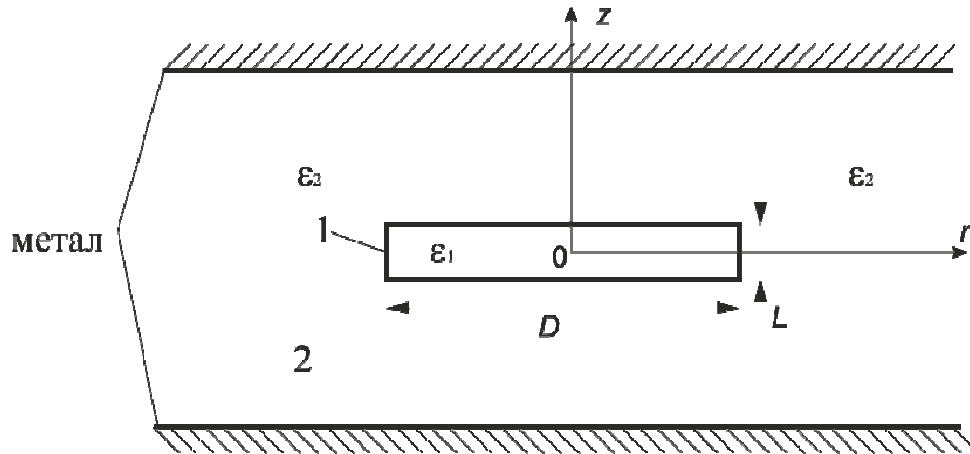


Рис. 1 – Тонкий діелектричний резонатор.

Резонансні системи на основі тонких діелектричних резонаторів можна математично описати за допомогою системи рівнянь Гельмгольца

$$\nabla^2 \Gamma_i^e + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^e = 0; \quad \nabla^2 \Gamma_i^m + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^m = 0, \quad (1)$$

та граничних умов

$$n \times (E_i - E_j) = 0; \quad n \cdot (E_i \varepsilon_i - E_j \varepsilon_j) = \rho_{cs}; \quad n \times (H_i - H_j) = j_s; \quad n \cdot (H_i \mu_i - H_j \mu_j) = 0. \quad (2)$$

де Γ^e , Γ^m – електричний і магнітний вектори Герца, відповідно; ε_i – діелектрична проникність i -ої області резонансної системи; μ_i – магнітна проникність i -ої області резонатора; j_s – нормальна до межі поділу областей компонента густини струму; ρ_{cs} – поверхнева густина заряду на межі поділу областей;

$$k = \frac{\omega}{c},$$

c – швидкість світла у вакуумі; ω – частота стаціонарних коливань резонатора.

Для розв'язання системи (1) необхідно введення додаткових граничних умов на межі поділу двох середовищ та між стінками хвилеводу і резонатора. Загальний розв'язок рівняння Гельмгольца визначається хвилями, одна з яких іде на нескінченність, а інша – приходить з нескінченності. Однак, на нескінченності джерел електромагнітного поля немає, тому маємо наступне рівняння для хвилі, що йде на нескінченність:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^\tau \left(\frac{dv}{dr} + jkv \right) = 0, \quad (3)$$

де r – відстань між початком координат та точкою спостереження; $\tau = 1$ для тривимірного простору, та $\tau = 0,5$ – для двовимірного простору; j – число, що дорівнює $\sqrt{-1}$; v – розв'язок однорідного рівняння Гельмгольца.

Беручи за основу розрахунки, проведені у роботах [6] та [7], рішення системи (1) зводиться до розв'язання наступної системи:

$$\begin{aligned} \det(S) &= 0; \\ \frac{\beta_{z1p} \operatorname{tg} \left(\beta_{z1p}^e \frac{L}{2} \right)}{\varepsilon_1} + \frac{\beta_{z2p} \operatorname{tg} \left(\beta_{z2p}^e \frac{L}{2} \right)}{\varepsilon_2} &= 0; \\ (\beta_{1p}^e)^2 + (\beta_{z1p}^e)^2 &= \varepsilon_1 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_1; \\ (\beta_{2p}^e)^2 + (\beta_{z2p}^e)^2 &= \varepsilon_2 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_1, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\det(S)$ – визначник системи лінійних рівнянь, до яких зводиться розв'язок рівнянь Гельмгольца [7]; β_{z1p} – повздовжнє хвильове число i -тої області; β_{inpp} – поперечне хвильове число i -тої області в циліндричній системі координат; L – товщина базової області резонатора.

Наведена вище система може бути розв'язана методом скінченних елементів за допомогою ЕОМ. Як правило, похибка розрахунків не перевищує 1...2% при розрахунку частот та 5...7% при розрахунку добротності резонансної системи.

За допомогою даної математичної моделі були проведені розрахунки резонансних частот і добротностей багатьох конструкцій фільтрів на основі тонких діелектричних резонаторів та проведений їх аналіз [3]. Для подальшої роботи було обрано дві конструкції фільтрів, за основу яких взяті відрізки прямокутного хвилеводу (рис. 2, 3). Основними критеріями вибору даних конструкцій були їх прийнятні характеристики для практичного використання та можливість експериментального дослідження за допомогою засобів, наявних у лабораторії.

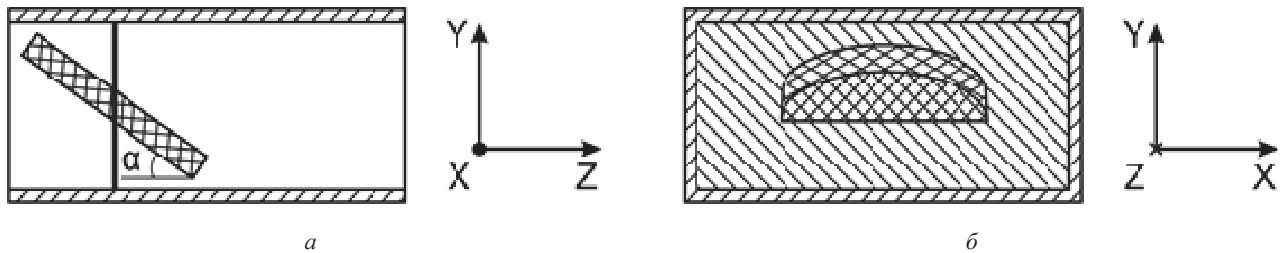


Рис. 2 – Конструкція смугопропускового фільтру на основі тонкого діелектричного резонатора:
а – вид збоку; б – вид спереду.

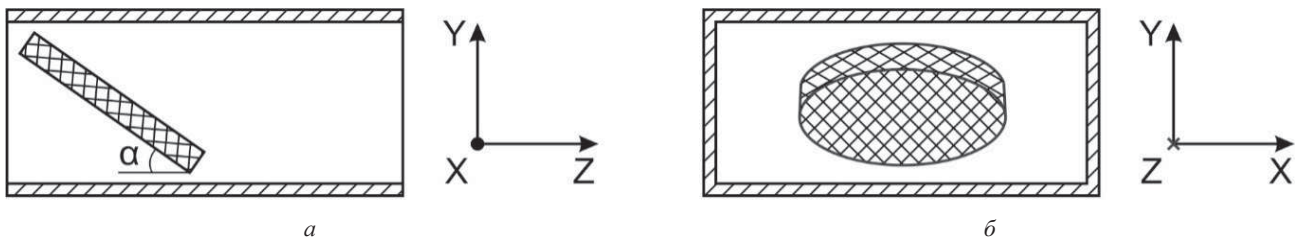


Рис. 3 – Конструкція смугозагороджувального фільтру на основі тонкого діелектричного резонатора:
а – вид збоку; б – вид спереду.

Діелектричну пластину (тонкий діелектричний резонатор) було розміщено у прямокутному хвилеводі під кутом $\alpha = 10^\circ$ до широкої стінки хвилеводу та у напрямку розповсюдження електромагнітних хвиль. Параметри тонкого діелектричного резонатора: діаметр $D = 12,83 \text{ мм}$; товщина $h = 0,63 \text{ мм}$; матеріал, з якого виготовлений зразок, – кераміка ТЦ35 ($\text{BaTi}_4\text{O}_9 + \text{ZnO}$); діелектрична проникність зразка $\epsilon = 35 \dots 37$. Для тримача можна використовувати матеріали, у яких проникність в НВЧ діапазоні близька до одиниці. У нашому випадку використовувався тримач, виготовлений із кварцу. Для реалізації конструкції смугопропускового фільтру (рис. 1), необхідно було перекрити поперечний переріз хвилеводу металевою пластинною із щілиною, через яку вставляється тонкий діелектричний резонатор.

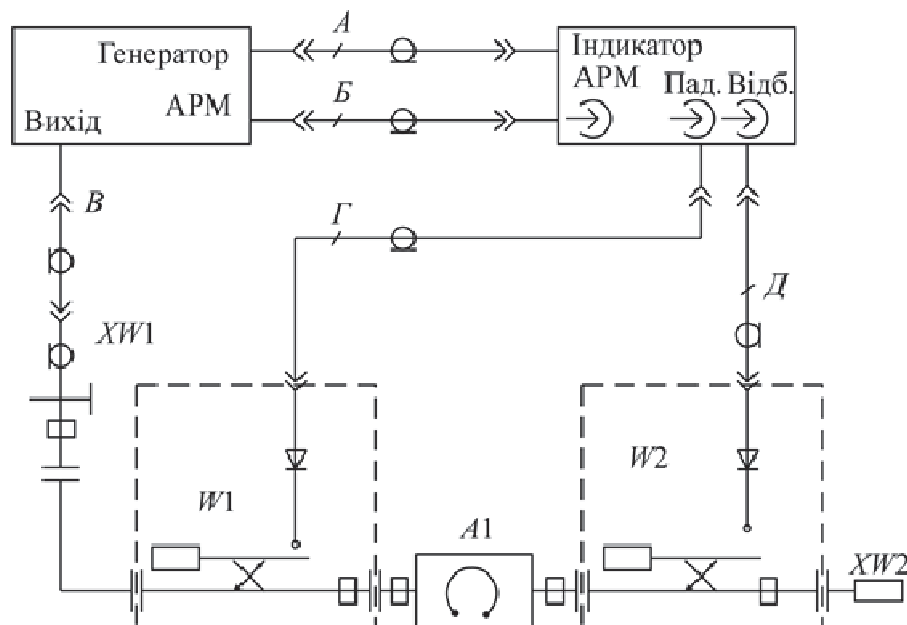


Рис. 4 – Схема підключення макету фільтру до панорамного вимірювача: А1 – досліджуваний макет; W1, W2 – рефлектометри падаючої та відбитої хвиль; XW1 – коаксіальний перехід; XW2 – узгоджене навантаження; А, Б, В, Г, Д – високочастотні коаксіальні кабелі.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень обраних конструкцій. Для дослідження адекватності математичної моделі було проведено експериментальне дослідження обраних конструкцій за допомогою панорамного вимірювача. Підключення макету відбувалося за схемою, наведеної на рис. 4.

В результаті експериментального дослідження та моделювання були отримані наступні характеристики для смугозагороджувального та смугопропускного фільтру, де суцільною лінією показані результати теоретичного дослідження, а точковою – експериментального.

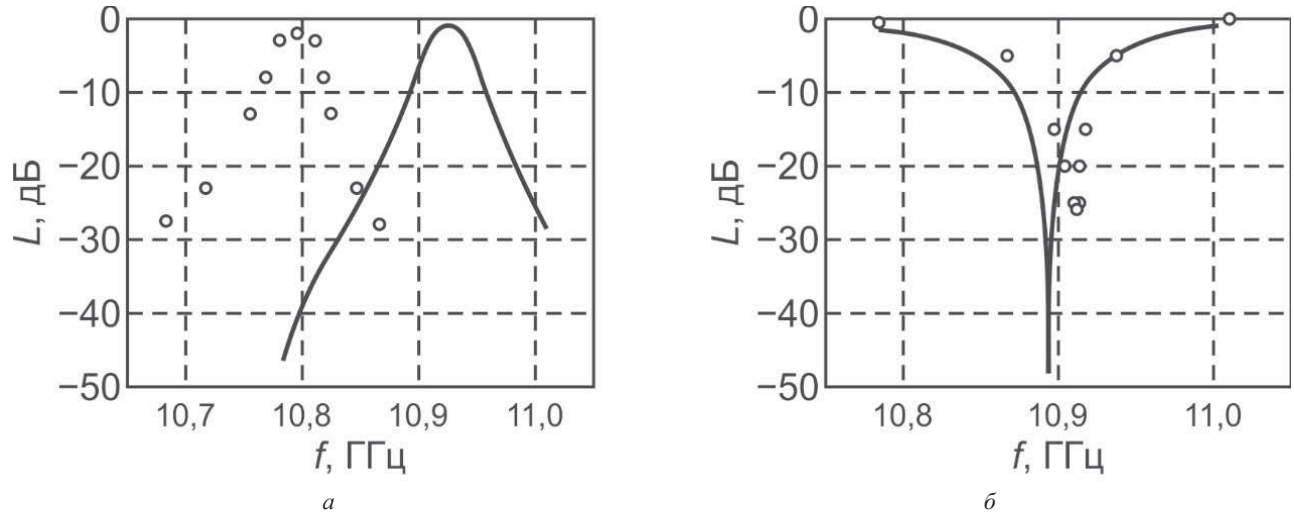


Рис. 5 – Результати експериментального дослідження фільтрів на основі тонких діелектричних резонаторів: а – смугопропускного; б – смугозагороджувального.

Похибка розрахованого значення центральної частоти смугопропускного фільтру від значення, отриманого експериментально, не перевищує 1 %, з чого можна зробити висновок, що розроблена нами математична модель є придатною для використання.

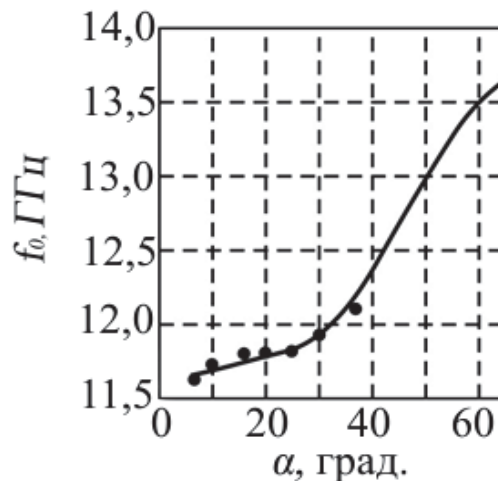


Рис. 6 – Графік залежності резонансної частоти нижчої НЕ-моди від кута повороту резонатора.

Також на основі тонких діелектричних резонаторів можна реалізувати конструкції керованих фільтрів НВЧ.

Існують наступні методи керування:

- механічне;
- електромеханічне;
- електричне;
- магнітне;
- оптичне;
- п'єзоелектричне;

- комбіноване.

Для реалізації керованого фільтра НВЧ на основі тонкого діелектричного резонатора, можна використати модель, представлену на рис. 3, оскільки резонансна частота фільтру суттєво змінюється в залежності від кута нахилу резонатора відносно широкої стінки хвилеводу. Реалізувати зміну кута нахилу резонатора у площині хвилеводу можливо за допомогою крокового двигуна, керованого мікроконтролером. Було обрано саме такий спосіб через точність керування кутом нахилу.

На основі конструкції фільтру, показаного на рис. 3, електричного методу керування, описаного вище, був отриманий графік залежності перебудови резонансної частоти від кута нахилу резонатора відносно широкої стінки хвилеводу, показаний на рис. 6, де суцільною лінією показані результати теоретичного дослідження, а точковою – експериментального.

Як бачимо із отриманого графіка, при збереженні високого значення добротності (порядку 1700) було досягнуто значення діапазону зміни частоти до 18 %. Максимальне значення перебудови частоти (13,6 ГГц) було одержано при значенні кута повороту $\approx 60^\circ$.

Методи вимірювання параметрів діелектричних матеріалів. Оскільки існує задача побудови конструкцій фільтрів, розглянутих раніше, то необхідно розробляти нові методи для дослідження їх параметрів.

До нових НВЧ матеріалів висувається ряд вимог, основними з яких є:

- низький рівень діелектричних втрат, висока діелектрична проникність;
- висока температурна стабільність;
- механічна міцність;
- довговічність;
- стійкість до різноманітних зовнішніх впливів;
- низька собівартість;
- технологічність виготовлення;
- можливість автоматизації виробництва;
- відтворюваність параметрів за умов масового виробництва;
- екологічна безпечність у процесі виготовлення та експлуатації тощо.

Ці вимоги є суперечливими, тому вибір того або іншого матеріалу має компромісний характер.

Проте, створення таких матеріалів неможливо без фундаментального дослідження їх фізичних властивостей. Однією з найважливіших умов для проведення таких досліджень є наявність досконалих методів вимірювання діелектричних характеристик матеріалів. НВЧ методи мають ряд переваг над контактними методами, а саме: можливість дослідження матеріалів без руйнування зразка, відсутність похибок, пов'язаних з контактними явищами тощо.

В даний час, існує велика кількість НВЧ методів дослідження матеріалів. Проте, дослідження в цій області не можуть вважатися завершеними, оскільки кожен з методів має свої недоліки, які обмежують його використання [1]. Так методи, що засновані на використанні коаксialного пробника мають низьку точність вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат при дослідженні матеріалів з низьким рівнем втрат, методи вимірювання у вільному просторі мають обмеження на мінімальну товщину зразка, стандартні хвилеводні методи чутливі до повітряних зазорів між зразком та широкою стінкою хвилеводу. Особливо великі труднощі виникають при дослідженні тонких діелектричних плівок та пристроїв на їх основі, тому що існуючі методи не забезпечують достатньої точності. Саме тому в даній статті розглядається метод тонкого діелектричного резонатора, який дає можливість дослідження НВЧ характеристик тонких діелектричних плівок, нанесених на підкладку.

Метод тонкого діелектричного резонатора відносять до групи методів складеного діелектричного резонатора. Дана група методів базується на вимірюванні ефективної діелектричної проникності та ефективного тангенса кута діелектричних втрат резонатора, який складається з опорного матеріалу з відомими характеристиками та досліджуваного матеріалу [2]. На основі отриманих результатів розраховують значення шуканих характеристик досліджуваного матеріалу. Базовий і досліджуваний матеріали можуть розміщуватись у вигляді паралельних або послідовних шарів матеріалу. При такому розміщенні шарів матеріалу досягається максимальне збурення ліній електричного поля резонансної системи, що дозволяє отримати максимальну чутливість системи до зміни характеристик діелектричних шарів. Зазвичай використовують резонатори у вигляді циліндру або паралелепіпеду, оскільки для таких структур легше провести точний розрахунок шуканих величин. Крім того такі резонатори більш технологічні у виготовленні і мають кращу відтворюваність параметрів за умов масового вироб-

ництва.

Для випадку паралельного з'єднання шарів матеріалу (рис. 7) маємо діелектричний резонатор з фіксованою власною резонансною частотою, на якому розміщено шар досліджуваного матеріалу.

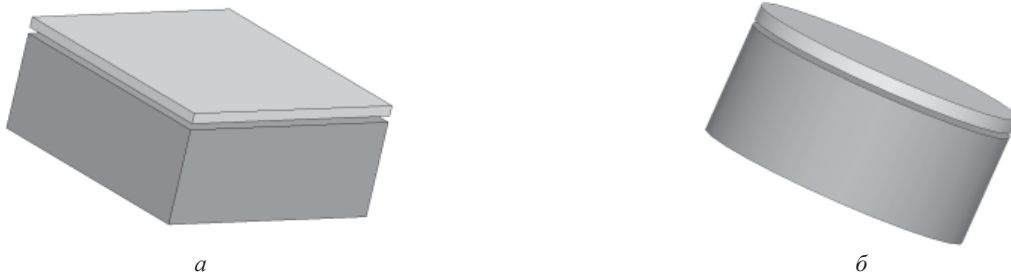


Рис. 7 – Структури з паралельним розташуванням шарів матеріалу: *a* – прямокутна; *б* – циліндрична.

Для проведення вимірювання використовують вимірювальну комірку рис. 8.

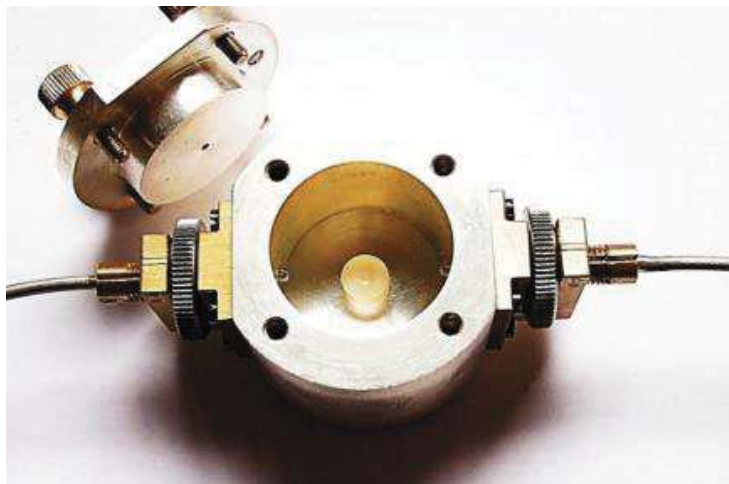


Рис. 8 – Вимірювальна комірка зі зразком.

Вираз для чутливості методу складеного резонатора записується наступним чином:

$$S_n = A \frac{\Delta F}{F} \frac{L_f}{L_s}, \quad (5)$$

де A – константа, яка залежить від співвідношення діелектричних проникностей базового резонатора та досліджуваної плівки; L_f – товщина плівки; L_s – товщина підкладки; F – резонансна частота; ΔF – зміщення резонансної частоти.

З виразу (5) видно, що чутливість методу буде суттєво залежати від співвідношення товщин плівки та базового резонатора. Нижче наведено типову залежність чутливості методу у сантиметровому діапазоні довжин хвиль рис. 9.

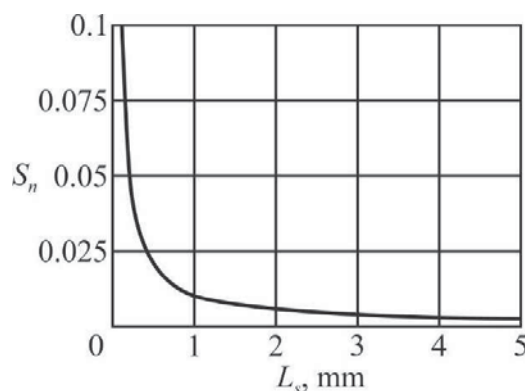


Рис. 9 – Залежність чутливості методу від товщини базового резонатора; діелектрична проникність базового резонатора становить 10, товщина плівки – 20 нм.

Отже, при збільшенні товщини досліджуваної плівки та зі зменшенням товщини підкладки збільшується й чутливість методу.

Для визначення втрат у досліджуваному матеріалі можна скористатися таким виразом [6, 7]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_f}, \quad (6)$$

де Q – добротність складеного резонатора; Q_s – добротність базового резонатора без плівки; Q_f – добротність досліджуваної плівки.

Для перевірки методу вимірювання було виміряно діелектричну проникність зразків, виготовлених з кераміки ТБНС, АЛТК та ТЛЮ. Результати приведені у табл. 1.

Таблиця. 1. Діелектрична проникність зразків виготовлених з кераміки ТБНС, АЛТК та ТЛЮ

Діаметр, мм.	Матеріал	ε – визначена даним методом	ε – довідникові дані
7.2	АЛТК	39.9	40
2.6	ТБНС	79.5	81
2.6	ТЛЮ	39.3	40

З результатів, наведених у табл. 1 видно, що даний метод забезпечує достатньо високу точність вимірювання діелектричної проникності матеріалів у НВЧ діапазоні частот.

Висновки. На основі тонких діелектричних резонаторів можна створити прийнятні для практичного використання фільтри НВЧ. Дослідити характеристики обраного діелектричного резонатора можна методом тонкого діелектричного резонатора, оскільки даний метод має наступні переваги.

1. Розглянутий метод дозволяє визначати як діелектричну проникність, так і діелектричні втрати досліджуваного матеріалу.

2. Точність вимірювання збільшується зі зростанням діелектричної проникності досліджуваного матеріалу та зі зменшенням діелектричної проникності базового резонатора.

3. Чутливість методу збільшується зі збільшенням товщини досліджуваної плівки та зі зменшенням товщини підкладки.

Характеристики фільтрів такі, як добротність та резонансні частоти, можуть бути точно розраховані за допомогою числового розв'язку системи рівнянь Гельмгольца при заданих граничних умовах. Похибка розв'язання такої системи не перевищує 1...2 % при розрахунку частот, і 5...7 % при розрахунку добротності резонансної системи.

Експериментальні дослідження добре узгоджуються з теоретичними розрахунками, що дає змогу автоматизувати проектування фільтрів на основі тонких діелектричних резонаторів.

Список літератури

1. Татарчук Д. Д., Молчанов В. И., Діденко Ю. В., Франчук А. С. Тонкие диэлектрические резонаторы миллиметрового диапазона длин волн // Electronics and Communications. – 2015. – Т. 20. – № 6 (89). – С. 6 – 10.
2. Молчанов В. И., Пашков В. М., Татарчук Д. Д., Франчук А. С. Вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів методом тонкого діелектричного резонатора // Electronics and Communications. – 2015. – Vol. 20. – № 1 (84). – PP. 23 – 26.
3. Татарчук Д. Д., Молчанов В. И., Діденко Ю. В., Франчук А. С. Фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів / Electronics and Communications. – 2016. – Т. 21. – № 6 (95). – С. 6 – 9.
4. Ильинский А. С., Крайцов В. В., Свешиников А. Г. Математические модели электродинамики: учеб. пособие для вузов. – М. : Высшая школа, 1991. – 224 с.
5. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: численные методы расчёта и проектирования. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.
6. Безбородов Ю. М., Нарытник Т. Н., Фёдоров В. Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. – К. : Техника, 1989. – 184 с.
7. Татарчук Д. Д. Комбіновані структури НВЧ з діелектричним резонансом E – типу : дис. канд. техн. наук : 05.27.01 : захищена 29.01.2001 / Татарчук Дмитро Дмитрович. – К., 2000. – 170 с.

References (transliterated)

1. Tatarchuk D. D., Molchanov V. I., Didenko Yu. V., Franchuk A. S. Tonkie dielektricheskie rezonatory millimetrovogo diapazona dlin voln [Thin dielectric resonators of millimeter wavelength range]. *Electronics and Communications*. 2015, vol. 20, no. 6 (89), pp. 6–10.
2. Molchanov V. I., Pashkov V. M., Tatarchuk D. D., Franchuk A. S. Vymiryuvannya NVCh parametriv dielektrychnykh materialiv metodom tonkoho dielektrychnoho rezonatora [Using thin dielectric resonator method for measuring SHF parameters of dielectric materials]. *Electronics and Communications*. 2015, vol. 20, no. 1 (84), pp. 23–26.
3. Tatarchuk D. D., Molchanov V. I., Didenko Yu. V., Franchuk A. S. Fil'try NVCh na osnovi tonkykh dielektrychnykh rezonatoriv [SHF filters based on thin dielectric resonators]. *Electronics and Communications*. 2016, vol. 21, no. 6 (95), pp. 6–9.
4. Il'yinskiy A. S., Kravtsov V. V., Sveshnikov A. G. *Matematicheskie modeli elektrodinamiki : ucheb. posobie dlya vuzov* [Mathematical models of electrodynamics : textbook. for universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 224 p.
5. Grigor'ev A. D., Yankevich V. B. *Rezonatory i rezonatornye zamedlyayushchie sistemy SVCh : chislennyye metody rascheta i proektirovaniya* [Resonators and resonator microwave deceleration systems : numerical methods of calculation and design]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 248 p.
6. Bezborodov Yu. M., Narytnik T. N., Fedorov V. B. *Fil'try SVCh na dielektricheskikh rezonatorakh* [Microwave filters on dielectric resonators]. Kiev, Tekhnika Publ., 1989. 184 p.
7. Tatarchuk D. D. *Kombinovani struktury NVCh z dielektrychnym rezonansom E – typu : dys. kand. tekhn. nauk 05.27.01* [Combined microwave structures with E – type dielectric resonance: diss. Cand. Tech. Sciences]. Kyiv, 2000. 170 p.

Надійшла (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Татарчук Дмитро Дмитрович (Татарчук Дмитрий Дмитриевич, Tatarchuk Dmytro Dmytrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (097) 152-18-61; e-mail: d.tatarchuk@kpi.ua.

Діденко Юрій Вікторович (Диденко Юрий Викторович, Didenko Yuriy Viktorovich) – кандидат технічних наук, старший викладач, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (050) 628-73-23; e-mail: yu.didenko@kpi.ua.

Поправка Анастасія Павлівна (Поправка Анастасия Павловна, Popravka Anastasiya Pavlivna) – магістрант, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (095) 311-03-94; e-mail: anastasiia.popravka@gmail.com.

Браге Ксенія Сергіївна (Браге Ксения Сергеевна, Brage Kseniya Sergijivna) – магістрант, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (050) 863-64-88; e-mail: kseniabrage@gmail.com.

УДК 517 (07)

В. В. ТКАЧЕНКО**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЯМИ**

Предложен численно-аналитический метод исследования многослойных пластин с отверстиями сложной формы. Создано программное обеспечение в рамках системы ПОЛЕ-RL, которое было использовано для исследования прямоугольной трехслойной пластины с крестообразным отверстием. Рассмотрены различные виды граничных условий для исследуемой пластины: свободно опертая пластина со свободным отверстием, свободно опертая пластина со свободно опертым отверстием, жестко заземленная пластина со свободно опертым отверстием и жестко заземленная пластина с жестко заземленным отверстием. Изучено влияние размеров отверстия, граничных условий и степени ортотропии на значение критической нагрузки и построены соответствующие зоны динамической устойчивости (неустойчивости) пластин.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, многослойные пластины, пластины с отверстиями, критическая нагрузка, зоны динамической неустойчивости, R – функции.

В. В. ТКАЧЕНКО**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПЛАСТИН З ОТВОРАМИ**

Запропоновано чисельно-аналітичний метод дослідження багатошарових пластин зі складною формою плану. Створено програмне забезпечення в рамках системи ПОЛЕ-RL, що було використано для дослідження прямокутної тришарової пластины з хрестоподібним отвором. Розглянуто різні види граничних умов, такі як вільно оперта пластина з вільним отвором, вільно оперта пластина з вільно опертим отвором, жорстко закріплена пластина з вільно опертим отвором і жорстко закріплена пластина з жорстко закріпленим отвором. Вивчено вплив розмірів отвору, граничних умов і ступеня ортотропії на значення критичного навантаження та побудовані відповідні зони динамічної стійкості (нестійкості) пластини.

Ключові слова: динамічна стійкість, багатошарові пластины, пластины з отворами, критичне навантаження, зони динамічної нестійкості, R – функції.

© В. В. Ткаченко, 2018