

УДК 620.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КВАРЦУ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ТЕМПЕРАТУР

Чекубашева В.А.

e-mail: valerija.chekubasheva@nure.ua

Науковий керівник – к. ф.-м. н., доц. Глухов О.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This work investigates the temperature dependence of the electrical properties of quartz in the microwave range based on resonance measurements and numerical modeling. The dielectric parameters were extracted by fitting measured data to experimental resonance characteristics, effectively solving an inverse electrodynamics problem.

Дослідження електричних властивостей кварцу в широкому діапазоні температур досі є актуальною задачею у сфері електроніки. Кварц широко використовується в мікрохвильових резонансних структурах, сенсорах та стабілізаторах частоти завдяки високій добротності та стабільності параметрів [1]. Водночас навіть незначні температурні зміни призводять до варіацій діелектричної проникності та втрат, що безпосередньо впливає на точність вимірювань і роботу приладів. Тому визначення температурної залежності електричних параметрів кварцу і побудова актуальної моделі, здатної їх відтворити, є необхідною умовою для розвитку високочутливих резонансних методів вимірювання.

У даній роботі проведено експериментальне дослідження спектра власних коливань кварцового діелектричного резонатора у формі циліндра з діаметром 12.49 мм та висотою 4.29 мм в діапазоні температур від -16°C до $+25^{\circ}\text{C}$. Для досягнення необхідної температури було застосовано прямий контакт між Пельтьє елементом та мідним пальцем, на якому фіксувався кварцовий кристал. Також всю систему було розташовано всередині вакуумної камери, що забезпечувала можливість створення тиску величиною в 8.45×10^{-3} мбар задля уникнення утворення конденсату на поверхні кварцу.

Для кожної моди визначалися резонансна частота та добротність, які використовувалися як інтегральні характеристики електромагнітної відповіді матеріалу. Отримані результати демонструють монотонне зменшення резонансної частоти зі зростанням температури, що пов'язані зі зміною ефективної діелектричної проникності, а також зниження добротності, яке відображає збільшення діелектричних втрат (рис. 1).

Високі значення коефіцієнтів детермінації R^2 при апроксимації експериментальних залежностей свідчать про відсутність фазових переходів у досліджуваному температурному інтервалі та дозволяють застосувати моделі з лінійною або слабколінійною залежністю параметрів.

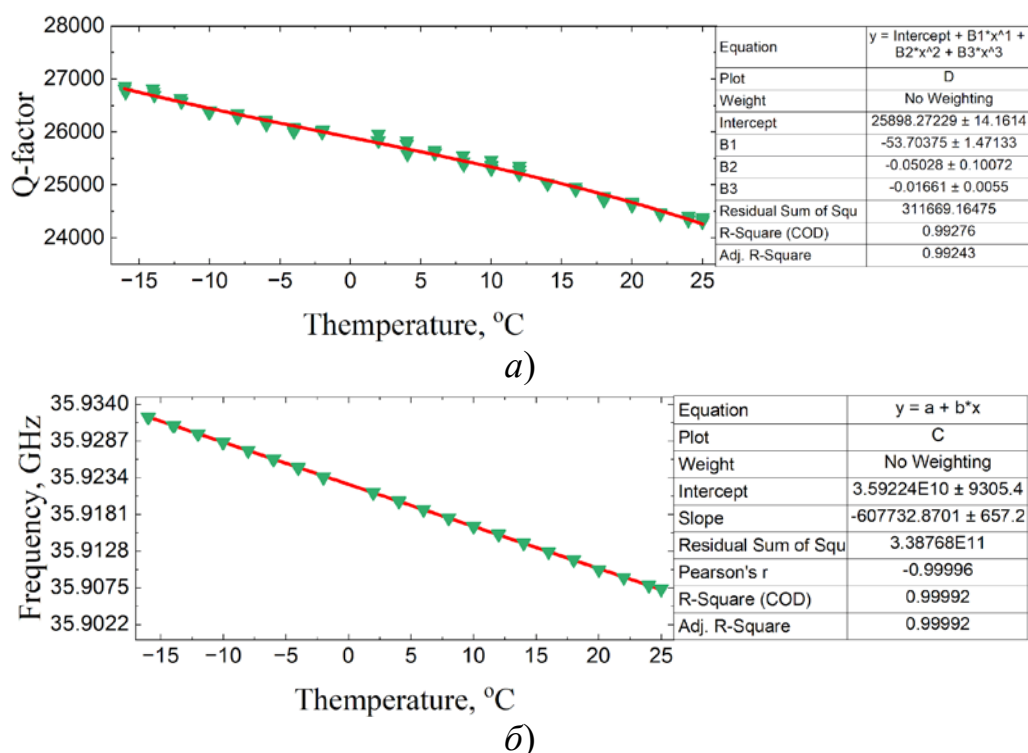


Рисунок 1 – Апроксимація (червона лінія) результатів експериментальних залежностей (зелені трикутники) зміни добротності (а) та резонансної частоти (б) кварцового резонатора для моди HE_{1511} .

Для інтерпретації експериментальних даних було побудовано чисельну модель резонатора в середовищі COMSOL Multiphysics із використанням геометричних параметрів, ідентичних експериментальній структурі. Діелектричні властивості кварцу задавалися у вигляді анізотропного тензора діелектричної проникності з комплексними компонентами, що враховують втрати через тангенс кута діелектричних втрат:

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{\perp}(1 - i \tan \delta_{\perp}) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp}(1 - i \tan \delta_{\perp}) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel}(1 - i \tan \delta_{\parallel}) \end{vmatrix}$$

Підбір параметрів здійснювався шляхом узгодження розрахованих значень резонансних частот і добротності з експериментально отриманими даними, що фактично відповідає розв'язанню оберненої задачі електродинаміки. Для розрахунку було використано Frequency domain (рис. 2). В результаті моделювання встановлено температурні залежності компонент діелектричної проникності та тангенса втрат для моди HE_{1511} (рис. 3).

Показано, що обидві компоненти проникності демонструють зростання зі збільшенням температури, що узгоджується з уявленнями про зміну поляризованості кристалічної ґратки. Водночас тангенс кута діелектричних втрат зростає майже лінійно, що пояснюється підсиленням фононного розсіяння та відповідним збільшенням дисипативних процесів у матеріалі.

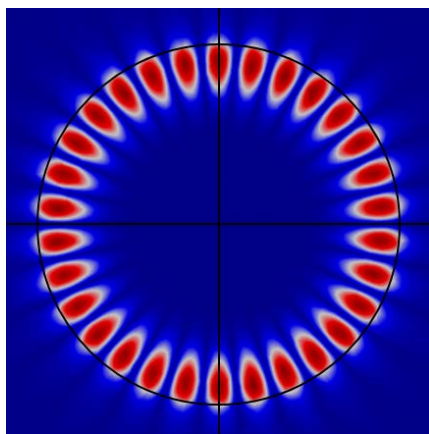


Рисунок 2 – Розподіл електричної компоненти моди $HE_{15\ 1\ 1}$

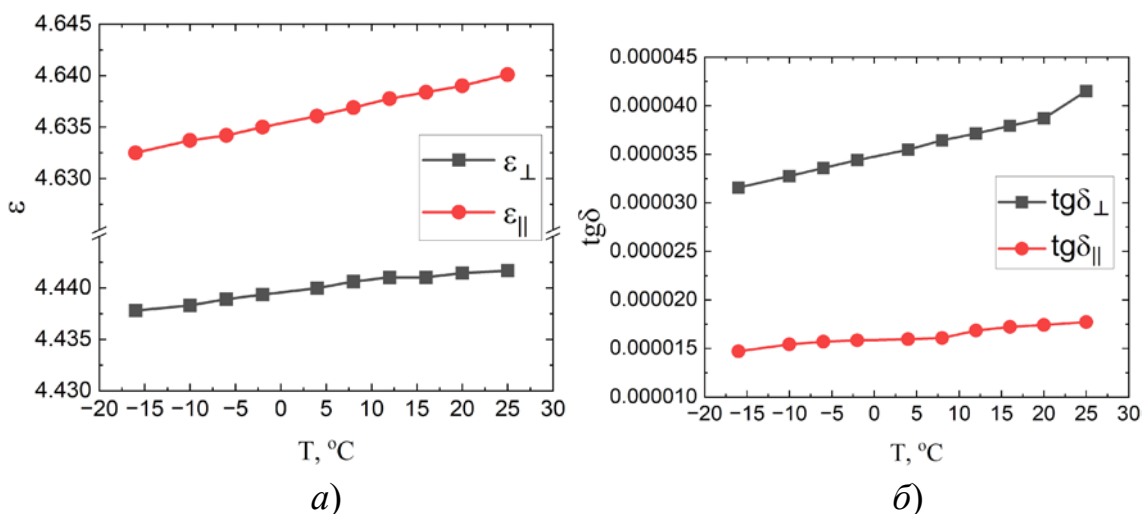


Рисунок 3 – Залежність електричної проникності (а) та тангенсу діелектричної втрат (б) від температури.

Таким чином, у роботі продемонстровано можливість визначення температурних залежностей електричних параметрів матеріалів на прикладі кварцу на основі аналізу резонансних характеристик та їхнього чисельного моделювання. Запропонований підхід дозволяє отримувати узгоджені значення діелектричної проникності та втрат і може бути використаний для калібрування резонансних сенсорів, а також для подальшого дослідження діелектричних матеріалів у широкому діапазоні температур.

Список використаних джерел:

1. Chekubasheva V., Gubin A., Barannik A., Zhulai D., Glukhov O., Cherpak N., Vitusevich S. Multifrequency WGM Resonator Approach for Study of DNA Solutions with Reduced Microwave Screening // 16th German Microwave Conference. Dresden, 2025. P. 573-576.