Вступ

Запровадження стандарту 5G безпровідного зв’язку залишається складним процесом, який вимагає вирішення нових задач як інженерами, так і технологами-синтетиками. Розробка ускладнюється через той факт, що характеристик відомих та напрацьованих для попередніх стандартів матеріалів виявляється недостатньо для використання у частотних діапазонах 410–7125 МГц (5G FR1) і 24.25–71.00 ГГц (5G FR2). Незважаючи на труднощі, на даний момент піддіапазон FR1 можна вважати освоєним та введеним у побут і промисловість. Частоти ж FR2 досягаються помножувачами частоти й мало використовуються у промислових зразках приладів. На тлі затяжного застою у сфері розробок гомогенних матеріалів для НВЧ додатків в період з 2010 року велика частина команд відійшла від розробок на гомогенних об’ємних матеріалах на користь композитів, які пропонували компромісні характеристики, та планарних періодичних структур, які жертвували малими втратами енергії на користь функціональності й використання нових фізичних ефектів, які не можуть виникати у компонентах, виготовлених зі стандартних об’ємних матеріалів.

Хоча для широкого використання діапазон FR2 лишається малопридатним, однак останніми роками почали з’являтись повідомлення про отримання матеріалів, які при стандартних габаритах компонентів можуть зайняти свою нішу у частотному проміжку FR1 та FR2. Їх розробка потенційно дасть поштовх для отримання більш високочастотних композитів та метаструктур на мікросмужках, де вони можуть бути використані в якості підкладок. Додатково, з використанням помножувачів частоти, такі матеріали можуть дозволити досягти ще вищих, ніж раніше, робочих частот у лабораторних умовах. Тому наприкінці 2023 року було запропоновано ввести у стандарт діапазон 5G FR3 7.125–24.25 ГГц [[[1]](#endnote-1)]. Темпи розвитку проблеми вражають, але зазначені в роботах матеріали хоча й наближаються до задоволення вимог для НВЧ матеріалів 5G FR3 діапазону, проте все ще не задовольняють їх у повній мірі.

Вимоги до матеріалів у гігагерцовому-субтерагерцовому діапазонах наступні: висока електрична добротність (низький тангенс кута втрат), невеликі значення діелектричної сталої (<20) і рівний нулю температурний коефіцієнт частоти/діелектричної сталої (ТКε). Малі значення діелектричної сталої дозволяють виготовляти компоненти адекватних габаритів. Висока добротність означає збільшення енергоефективності й зменшення нагріву компонентів. Зменшення ТКε на НВЧ також виявляється критичним через відносну природу даної величини, оскільки при збільшенні робочих частот величина «плавання» частоти у абсолютних величинах також збільшується при тому ж значенні ТКε й фіксованій ширині каналів зв’язку. У роботі [\*] було отримано

[вказати Q у відповідних роботах][двохфазні матеріали]

Визначення добротності та діелектричної сталої керамічних зразків

Добротність та діелектрична стала керамічних зразків визначалась методом діелектричного TE01δ резонатора (*TE*01δ *resonant cavity*) в режимі проходження (*traveling wave mode*). Для цього використовувався вимірювальний стенд, що складався з вимірювальної комірки у вигляді ТЕ01δ-резонатора з внутрішнім діаметром 18 мм та векторного аналізатора НВЧ кіл *PNA-L Agilent N*5230*A* (Рис. 1).

Рис 1. Вимірювальний стенд для визначення резонансних параметрів та діелектричної сталої керамічних зразків.

При проведенні вимірювань задовольнялись наступні вимоги:

1. оптимальність положення зразка (центр комірки) визначалась досягненням максимального зв’язку з вимірювальною коміркою, критерієм зв’язку служила величина діаметру *Q*-кола на діаграмі Сміта для коефіцієнту проходження (*transmission loss*) *S*21;
2. рівень потужності сигналу встановлювався на рівні +5 дБ;
3. |*S*21| не перевищував -40 дБ, а відповідні піки на |*S*11| and |*S*22| мали близькі амплітуди на рівні 0.1–0.2 дБ відносно фону;
4. використовувалось усереднення сигналу для зменшення впливу шумів на результати вимірювання, коефіцієнт усереднення знаходився в межах 16–64;
5. робочий частотний діапазон при вимірюваннях обирався таким, щоб резонансна крива від піку до рівня сигналу в -3 дБ займала не менше 40% діапазону.

Із значень резонансної частоти та ширини резонансної кривої визначалась добротність керамічних резонаторів. З використанням розмірів зразків визначалась дійсна частина діелектричної сталої матеріалу резонаторів [[[2]](#endnote-2)]. [теорія для діелектричної сталої]

1. https://www.itu.int/dms\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.15-2023-PDF-E.pdf [↑](#endnote-ref-1)
2. 10.1088/0957-0233/9/10/015 [↑](#endnote-ref-2)