

# НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ДІЕЛЕКТРИКИ ДЛЯ ПЛАНАРНИХ СТРУКТУР 5G FR3- ДІАПАЗОНУ

О. П. Федорчук, О. І. В'юнов, Т. О. Плутенко, Ю. Д. Ступін, А. Г. Білоус

Інститут загальної та неорганічної хімії імені В. І. Вернадського НАН України,  
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ 03142, Україна  
e-mail: alex1377c9@gmail.com

У результаті цієї роботи було синтезовано, досліджено  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  та  $\text{SrYSmO}_4$  зі структурою шпінелі, визначено перспективи їхнього використання у міліметровому діапазоні хвиль. Було досягнуто добротності  $Q \times f = 89400$  на частоті 11 ГГц за діелектричної проникності  $\epsilon_r = 15.4$  та нульовим коефіцієнтом діелектричної проникності/частоти ТКє. Заміщення ітрію самарієм дозволило додатково знизити діелектричну проникність до 9.4, однак дуже знизило добротність матеріалу  $Q \times f = 17800$ . Отриманий  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  відповідає вимогам до діелектричних матеріалів сантиметрового діапазону хвиль й перевершує за сукупністю характеристик більшість матеріалів міліметрового діапазону, наведених у літературі. Моделювання комірки антени на базі подвійного розрізаного кільцевого резонатора (*split-ring resonator, SRR*) показало можливість використання мікросмужкових матеріалів та метаматеріалів із підкладками з отриманих матеріалів у діапазоні частот 8.6–11 ГГц і суміжних діапазонах, які використовують у системах супутникового зв'язку і телебачення, авіаційних, погодних і поліцейських радарх, системах зв'язку прямої видимості (*line-of-sight, LOS*) та системах електронної звітності (*electronic news gathering, ENG*).

**Ключові слова:** структура шпінелі, міліметровий діапазон хвиль, температурна стабільність, діелектричні підкладки, системи зв'язку.

**ВСТУП.** Запровадження стандарту 5G безпроводного зв'язку залишається складним процесом, який вимагає вирішення нових завдань як інженерами, так і технологіями-синтетиками. Незважаючи на труднощі, на сьогодні діапазон FR1 можна вважати освоєним та введеним у побут і промисловість. Частоти FR2 у більшості випадків досягаються помножувачами

частоти і наразі їх мало використовують у промислових зразках приладів. Наприкінці 2023 року [1] було запропоновано для введення до стандарту діапазон зв'язку 5GFR3 (7.125–24.25 ГГц), який займає частотний проміжок між 5G FR1 (410–7125 МГц) і 5G FR2 (24.25–71.00 ГГц) [2].

Введення діапазону до стандарту означає його поступове освоєння і розроблення

нового прийнятно-передавального та іншого обладнання. Однак подальше розроблення стає неможливим внаслідок непридатності існуючих на сьогодні матеріалів для застосувань у міліметровому діапазоні хвиль. Зокрема це стосується діелектричних матеріалів, які є основою об'ємних резонаторів, фільтрів, антен, підкладок для планарних структур [3]. Якщо попередні діапазони частот освоювали із використанням діелектричних матеріалів зі значенням діелектричної проникності  $\epsilon_r = 20-100$ , то для додатків у міліметровому діапазоні є необхідними діелектрики зі значенням проникності  $\epsilon_r < 20$  [4]. Стають більш жорсткими вимоги до електрофізичної добротності матеріалів як наслідок підвищення робочих частот. Так, у літературі зустрічаються керамічні матеріали зі значенням добутку добротності на частоту понад  $Q \times f > 80000$  ГГц [5, 6, 7]. Ще однією важливою вимогою до властивостей діелектриків є висока термостабільність. На практиці ця вимога означає мінімальне (близько нуля) значення температурного коефіцієнту діелектричної проникності, а її виконання дозволить усунути температурний дрейф діелектричної проникності, який призводить до дрейфу частот мод коливань і спектрів характеристик у цілому [5]. Подібний дрейф є неприпустимим в умовах фіксованої ширини каналів зв'язку.

Враховуючи перспективи появи і введення у промисловість приладів, які функціонуватимуть у нових частотних діапазонах, науковці почали звертати уваги на матеріали, які наближаються до відповідності вимогам для використання у міліметровому діапазоні. Наприклад, у праці [6] було заявлено про отримання  $Mg_2SiO_4$  з до-

мішкою оксиду титану  $TiO_2$  для міліметрового діапазону. Кераміка мала добротність  $Q \times f = 85000$ , діелектричну проникність  $\epsilon_r = 11.0$  й близький до нуля температурний коефіцієнт діелектричної проникності  $TK\epsilon$ . Кераміка  $Mg_{1.92}Cu_{0.08}SiO_4$  продемонструвала добротність  $Q \times f = 188500$  при  $\epsilon_r = 9.1$ , однак при цьому дещо вищим виявився температурний коефіцієнт діелектричної проникності  $TK\epsilon = -2$  [8]. У праці [9] для кераміки складу  $CaSn_{0.1}SiO_{3.2}$  було повідомлено про досягнення  $f = 32000$  при  $\epsilon_r = 7.6$ , але з високою температурною стабільністю,  $TK\epsilon = -0.2$ .

Перспективними виглядають матеріали зі структурою шпінелі [10, 11, 12, 13]. Зокрема, ітрат стронцію  $SrY_2O_4$ , відомий у оптиці як матеріал люмінофорів та світлодіодів [10], демонструє високу добротність із низьким значенням діелектричної проникності та дуже малим температурним коефіцієнтом діелектричної проникності. Завдяки широким можливостям модифікації властивостей за рахунок введення домішок [5], що є характерним для шпінелей [14], можна очікувати досягнення необхідних характеристик. Наприклад, при введенні Sm із меншим йонним радіусом, ніж у Y, очікується зменшення значення діелектричної проникності.

Більшість джерел концентруються на синтезі й дослідженні матеріалів без безпосередньої демонстрації можливостей та границь їхнього використання, наприклад, робочого діапазону частот, що було б цікаво для розроблення прийнятно-передавальної апаратури. З іншого боку, варто відмітити тренд у комунікаціях та системах зв'язку на перехід від об'ємних компонент до композитів та приладів на основі

мікросмужкових ліній та метаматеріалів [15], основою яких є металеві планарні структури на поверхні діелектричних підкладок. Мікросмужкові лінії є основою антен, фільтрів, MEMS. Метаматеріали на основі планарних структур цікаві тим, що дають можливість отримувати властивості, які не спостерігають в інших матеріалах та структурах, наприклад, від'ємний показник заломлення й формування лівосторонніх середовищ [16]. В обох випадках використання нових діелектричних матеріалів як підкладок для вказаних структур у перспективі дозволило б зменшити втрати енергії й змістити робочі частоти приладів у бажані області міліметрового діапазону.

Тому метою зазначеної роботи був синтез керамічних матеріалів складу  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SrYSmO}_4$  зі структурою шпінелі і дослідження їхніх властивостей, визначення перспектив використання цих матеріалів у приладах та пристроях міліметрового діапазону шляхом моделювання спектрів характеристик антен із використанням отриманих матеріалів як підкладок, порівняння їх із відомими матеріалами.

**ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Синтез та дослідження.** Для синтезу керамічних зразків було використано  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  та  $\text{Y}_2\text{O}_3$  кваліфікації ос. ч. ( $\geq 99\%$ ). Перед зважуванням порошоків  $\text{Y}_2\text{O}_3$  та  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  проводили попереднє термооброблення за температури  $900^\circ\text{C}$  упродовж 2 годин.

Синтез кераміки проводили традиційним методом твердофазних реакцій. Стехіометричні кількості реагентів змішували з дистильованою водою та подрібнювали в планетарному млині Retsch PM100 із халце-

доновими кульками протягом 8 годин зі швидкістю 300 об/хв. Отриману суспензію сушили за температури  $100^\circ\text{C}$ . Висушений порошок просіювали через сито з розміром осередку 200 меш та кальцинували за  $1350^\circ\text{C}$  протягом 4 годин. Синтезований порошок додатково подрібнювали впродовж 12 годин за тих самих умов.

Дрібний порошок змішували з 5% розчинном полівінілового спирту як зв'язувачем та пресували в таблетки діаметром 10 мм та товщиною 5 мм під тиском  $500\text{ кг/см}^2$ . Отримані таблетки спікали за температур від  $1480$  до  $1560^\circ\text{C}$  протягом 2, 4 та 6 годин зі швидкістю нагрівання та охолодження  $200^\circ\text{C/год}$ .

Фазовий склад та кристалічна структура синтезованих зразків досліджували методом рентгенівської порошкової дифрактометрії (РПД) на дифрактометрі DRON-4-07 із використанням  $\text{Cu K}\alpha$ -випромінювання. Параметри елементарної комірки уточнювали за методом Ле Байля в програмному забезпеченні FullProf [24].

Мікроструктуру зразків досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) на мікроскопах JEM 10CX II (JEOL) та SEC miniSEM SNE 4500 MB, оснащених енергодисперсійним спектрометром EDAX ElementPV6500/00 F. Розподіл розмірів зерен визначали за методом еквівалентного діаметра кола в програмному забезпеченні Fiji [17,18].

Густина спечених зразків вимірювали за методом Архімеда з використанням дистильованої води. Температурний коефіцієнт резонансної частоти ( $\tau_f$ ) визначали резонаторним методом у температурному діапазоні від  $125$  до  $180^\circ\text{C}$ . Значення  $\tau_f$  розраховували за наступною формулою:

$$\tau_f (ppm/^{\circ}C) = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \cdot \frac{10^6}{T_2 - T_1},$$

де  $f_1$  та  $f_2$  – резонансні частоти за температур  $T_1$  та  $T_2$  відповідно.

Добротність та діелектричну проникність керамічних зразків визначали методом діелектричного  $TE_{01\delta}$  резонатора ( $TE_{01\delta}$  resonant cavity) в режимі проходження хвилі (traveling wave mode). Для цього використовували вимірювальний стенд, що складався з вимірювальної комірки у вигляді  $TE_{01\delta}$ -резонатора з внутрішнім діаметром 18 мм та векторного аналізатора НВЧ кіл PNA-L Agilent N5230A (рис. 1). Добротність керамічних резонаторів визначали на основі резонансної частоти й ширини резонансної кривої на рівні -3 дБ відносно пікового значення і величини ді-

електричної проникності матеріалу резонаторів [19].

**Моделювання.** Використовували програмне забезпечення Ansys HFSS, що застосовує чисельні розрахунки рівняння Максвелла та рівняння середовища методом найменших елементів, що знімало необхідність аналітичного визначення ефективної діелектричної проникності структури чи введення спрощень або припущень про розподіл електромагнітного поля. У процесі моделювання отримували коефіцієнти матриці розсіювання  $S_{21}$  й  $S_{11}$ , які характеризують проходження та відбивання сигналу в системі. На основі отриманих спектрів вираховували спектр поглинання ( $A$ ) подібно до того, як це робили у праці [20] із використанням співвідношення

$$A = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2$$

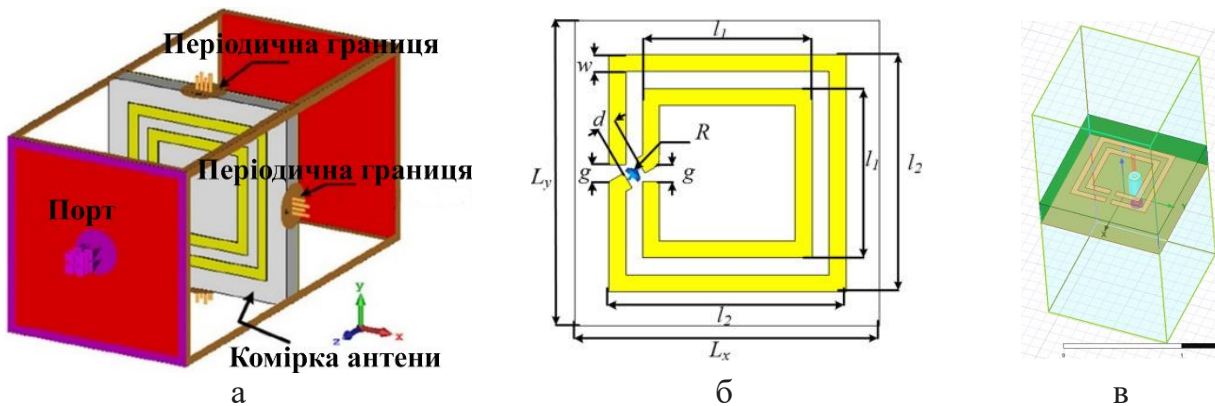


Рис. 1. Модель комірки антени, яку досліджували і моделювали у праці [20] (а), та скетч-зображення антени з позначеннями розмірів (б); модель, яку використовували в цій роботі (в)

Fig. 1. Model of the antenna cell studied and modeled in [20] (a) and a sketch image of the antenna with size markings (b); model used in this work (c).

Як орієнтир при моделюванні використовували поглинаючу комірку антени з подвійним розрізаним кільцевим резонатором, подібну до тієї, яку досліджували у

праці [20]. Геометричні параметри антени, яку моделювали у цій роботі, були аналогічними (табл. 1).

Таблиця 1. Геометричні параметри моделі комірки SRR антени [20]

Table 1: Geometric parameters of the SRR antenna cell model [20].

Параметр	Значення, мм
$L_x$	11.0
$L_y$	11.0
$l_1$	5.0
$l_2$	7.0
$g$	0.5
$w$	0.5

Моделювання проводили у режимі гібридної модальної мережі (modal hybrid network) для врахування внеску різних мод коливань, що виникали б у структурі. Область випромінювання обмежували пло-

щею перерізу підкладки антени для усунення втрат, не пов'язаних із самою антеною, та імітації падіння пласкої хвилі на антену. Для металізації використовували мідь із типовими параметрами, а параметри матеріалу підкладки вибирали такі, які дорівнюють величинам, визначеним для синтезованих матеріалів.

Рентгенівський структурний аналіз (XRD) засвідчив формування однорідної фази  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  з орторомбічною просторовою групою  $Pnma$  у кераміці, спеченій за температури 1520 °C протягом 4 годин (рис. 2). Визначені параметри кристалічної ґратки становили:  $a = 10,085(3) \text{ \AA}$ ,  $b = 11,914(4) \text{ \AA}$ ,  $c = 3,412(1) \text{ \AA}$ . Насипна густина матеріалу, спеченого за 1520 °C, досягла 97,5% теоретичної густини, розрахованої на основі рентгенівських даних, що свідчить про незначну пористість. Крім того, хімічний склад матеріалу узгоджується зі стехіометричною формулою  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ .

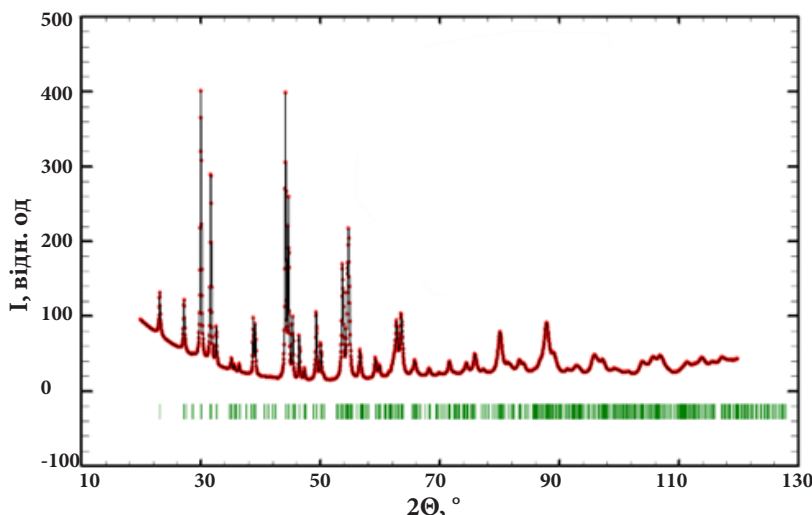
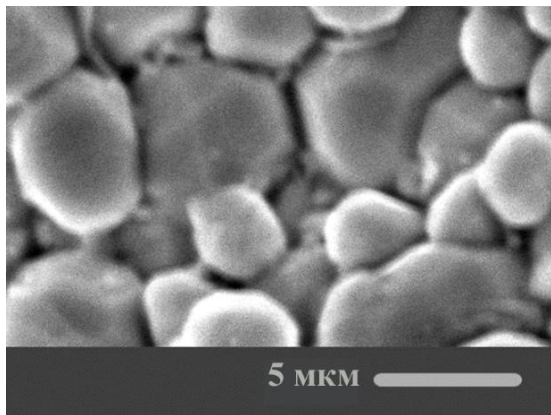


Рис. 2. Рентгенограма керамічного зразка  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  після спікання за температури 1520 °C протягом 4 годин. Вертикальні ліній позначають Брегівські позиції дифраційних піків.

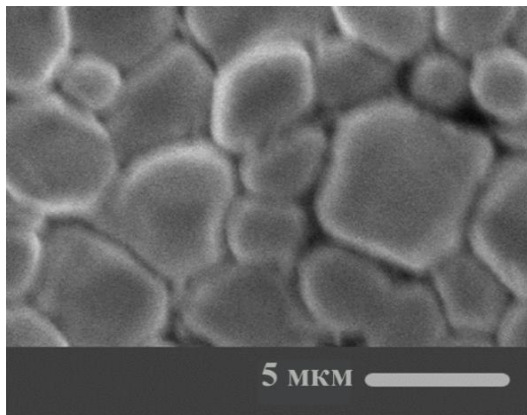
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  ceramic sample after sintering at 1520 °C for 4 hours. The vertical bars indicate the Bragg positions of the diffraction peaks.

Зображення кераміки  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  та  $\text{SrYSmO}_4$ , отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM, рис. 3), підтвердили, що оптимальним є спікання за температури  $1520\text{ }^\circ\text{C}$  тривалістю 4 години. За таких

умов спікання мікроструктура стає майже непористою й досягається рівномірний розподіл розмірів зерен. Середній розмір зерен становив  $11\text{ }\mu\text{m}$ .



а



б

Рис. 3. SEM-зображення поверхні кераміки  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ (а) та  $\text{SrYSmO}_4$  (б) після спікання за температури  $1520\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 4 годин

Fig. 3. SEM images of the surface of  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  (a) and  $\text{SrYSmO}_4$  (b) ceramics after sintering at  $1520\text{ }^\circ\text{C}$  for 4 hours.

На рис. 4 представлено експериментальний спектр коефіцієнту проходження керамічного зразка, виготовленого із синтезованого ітрату стронцію  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ . Із ви-

користанням експериментальних спектрів було визначено резонансні характеристики (добротність, частота резонансу) керамічних зразків  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  та  $\text{SrYSmO}_4$ .

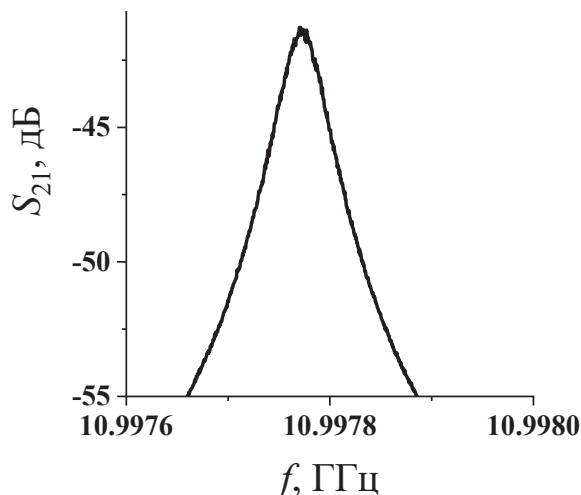


Рис. 4. Експериментальний спектр коефіцієнту проходження керамічного зразка  $\text{SrY}_2\text{O}_4$

Fig. 4. Experimental spectrum of the transmission coefficient of the  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  ceramic sample.

Таблиця 2

Характеристики діелектричних матеріалів для застосування у 5G FR3-діапазоні та характеристики спектру моделі комірки антени при використанні підкладки з цих матеріалів

Table 2.

Characteristics of dielectric materials for use in the 5G FR3 band and spectrum characteristics of the antenna cell model when using a substrate made of these materials.

Хімічний склад	$\epsilon_r$	$Q \times f$ ГГц	$f_0$ ГГц	$\tau_f$ ppm/K	Параметри спектру (розрахунок)		Джерело характеристик підкладки
					частота ГГц	ширина ГГц	
$0.945\text{SiO}_2 - 0.055\text{Li}_2\text{TiO}_3$	3.20	10180		0.17	18.29	3.35	[22]
$\text{LiAlSiO}_4 + 12 \text{ wt\% B}_2\text{O}_3$	5.30	212000	–	-7.7	15.80	3.15	[23]
$\text{Mg}_{1.92}\text{Cu}_{0.08}\text{SiO}_4$	6.35	188500	10–16	-2.00	14.78	3.06	[8]
$\text{CaSn}_{0.1}\text{SiO}_{3.2}$	7.60	32000	9–12	-0.20	13.73	2.96	[9]
$\text{Zn}_2\text{SiO}_4 + 11 \text{ var.\% TiO}_2$	9.10	150800	14–16	-1.00	12.66	2.84	[7]
$\text{SrYSmO}_4$	9.40	17800	13.7	0.00	12.47	2.82	Ця робота
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 24 \text{ var.\% TiO}_2$	11.0	85000	–	0.00	11.57	2.71	[6]
$\text{SrY}_2\text{O}_4$	15.4	89400	11	0.00	9.83	2.46	Ця робота

Результати дослідження синтезованих зразків та матеріалів міліметрового діапазону з інших джерел наведено в Таблиці 2. Обидва синтезовані зразки демонструють прекрасну температурну стабільність і перевершують більшість матеріалів із літературних джерел. При цьому  $\text{SrY}_2\text{O}_3$  демонструє добротність, вищу ніж  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  [6], який також має близький до нуля температурний коефіцієнт діелектричної проникності. Введення Sm у структуру  $\text{SrY}_2\text{O}_3$  дозволило суттєво знизити діелектричну проникність матеріалу, проте призвело до сильного падіння добротності, що робить його недоцільним для використання.

Щоб пересвідчитися у коректності нашого розрахунку, спочатку проводили моделювання антени з підкладкою, що має ефективну діелектричну проникність  $\epsilon = 5$ . Отримані результати порівнювали з даними праці [20]. Слід зазначити, що у роботі [20] для моделювання використовували програмне забезпечення *Cadence AWR Design Environment*. Аналіз даних таблиці 3 свідчить про те, що програмне забезпечення *Ansys HFSS* забезпечує більш точне прогнозування як частоти резонансного поглинання, так і ширини смуги пропускання порівняно з експериментальними даними. Зокрема, центральна частота отриманого

спектру відповідає експериментально визначеній частоті 15.85 ГГц, тоді як у моделі [20], де використовували програмне забезпечення *Cadence AWR Design Environment*, вона зміщена в область більш високих частот приблизно на 250 МГц. З огляду на цю обставину, для точних досліджень впливу діелектричної проникності на характеристики мікрохвильових пристроїв бажано

використовувати *Ansys HFSS* як інструмент для проведення чисельних експериментів. Хоча можливо, що різниця в параметрах спектра зумовлена похибкою у визначенні ефективної діелектричної проникності підкладки. Занижене значення цього параметра в моделі могло призвести до зміщення резонансних частот в область більш високих значень.

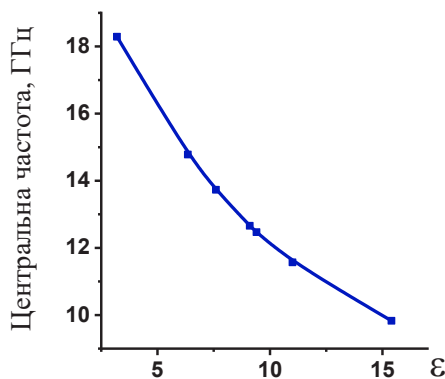
Таблиця 3

**Порівняння характеристик робочої смуги частот спектрів поглинання планарної антени за різними моделями та експериментальними даними**

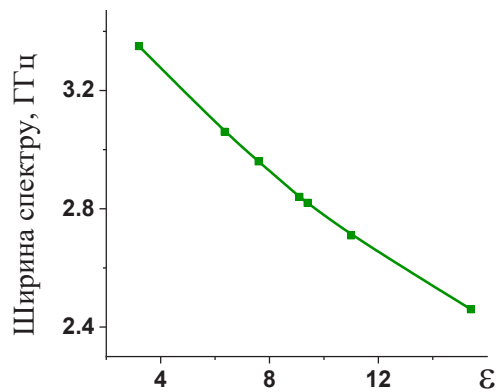
Table 3

**Comparison of the characteristics of the operating frequency band of the absorption spectra of a planar antenna according to different models and experimental data.**

Центральна частота, ГГц	Ширина, ГГц	Метод визначення	Джерело
15.85	3.16	Експеримент	[20]
16.01	3.13	Розрахунок	[20]
15.85	3.15	Розрахунок	Ця робота



а



б

Рис. 5. Залежність центральної частоти (а) та ширини робочої смуги частот (б) спектру планарної антени від діелектричної проникності матеріалу підкладки

Fig. 5. Dependence of the center frequency (a) and the operating band width (b) of the planar antenna spectrum on the dielectric constant of the substrate material.

Ширину спектру поглинання  $W$  та його положення  $f$  визначали з профілю спектру зі співвідношень  $W = f_2 - f_1$  та  $f = (f_1 + f_2)/2$  відповідно. Отримані залежності центральної частоти та ширини робочої області спектру від значення діелектричної проникності підкладки представлено на рис. 5s. Підви-

щення діелектричної проникності підкладки зумовлює як зміщення спектру у сторону низьких частот, так і звуження смуги поглинання. Отримані результати свідчать про можливість оптимізації характеристик антени шляхом вибору відповідного матеріалу підкладки.

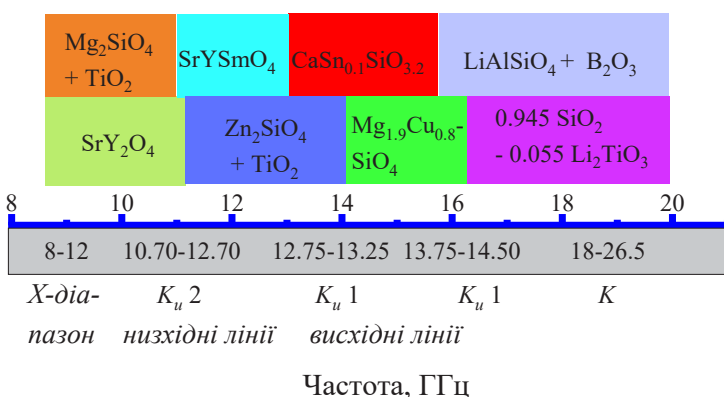


Рис. 6. Робочі частоти моделі комірки антени з підкладками з різних термостабільних матеріалів, представлених у роботі

Fig. 6. Operating frequencies of the antenna cell model with substrates made of different thermostable materials presented in this paper.

Вплив діелектричних властивостей підкладки з синтезованих нами або відомих матеріалів, що мають термостабільні властивості, на характеристики спектру антени в діапазоні 5G FR3, наведено на рис. 6. Як видно з рис. 6, за заданих розмірів антени з підкладкою із синтезованого  $SrY_2O_4$  працюватиме на частотах 8.6–11 ГГц. У цій області працюють супутникове телебачення [3], радары (авіаційні високоточні радары наближення, погодні, поліцейські радары), в системах зв'язку прямої видимості (*line-of-sight, LOS*) та системах електронної звітності/журналістики (*electronic news gathering, ENG*) [3]. Вирішальним фактором для застосування у кожному випадку буде досягнення високої добротності та термостабільності і тому можна виділити синтезований у зазначеній роботі  $SrY_2O_4$  та  $Mg_2SiO_4$ , отриманий в праці [6]. Синтезо-

ваний  $SrYSmO_4$  також є термостабільним, антена з його використанням перекриває область спектру одразу після антени з підкладкою з  $SrY_2O_4$  що відповідає частотній області комерційного супутникового зв'язку [23]. Однак відносно низька добротність  $Q \times f \approx 17800$  обмежує його застосування, тому доцільно проводити додаткові дослідження для оцінки можливостей підвищення добротності  $SrYSmO_4$ .

**ВИСНОВКИ.** Синтезовано матеріали зі структурою шпінелі складу  $SrY_2O_4$  та  $SrYSmO_4$ , показано їхню високу температурну стабільність ( $TК\epsilon \sim 0$ ). Отриманий  $SrY_2O_4$  відповідає вимогам до діелектричних матеріалів у міліметровому діапазоні хвиль, перевершуючи аналоги з літературних джерел за електрофізичною добротністю, тоді як для використання  $SrYSmO_4$  необхідним є підвищення добротності.

Шляхом моделювання отримано спектр поглинання комірки антени на основі подвійного розрізаного кільцевого резонатора з діелектричною підкладкою із синтезованих матеріалів. Отримані спектри вказують на придатність комірки для використання у міліметровому діапазоні хвиль. Частотний діапазон відповідає частотам, на яких працюють або передбачено роботу супутникового телебачення, авіаційних, погодних і поліцейських радарів), систем

зв'язку прямої видимості та систем електронної звітності, супутникового зв'язку.



**Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту «Мікрохвильові пристрої на основі резонансних структур із метаматеріальними властивостями для захисту життєдіяльності та інформаційної безпеки України», ID 2021.01/0030.**

## MICROWAVE DIELECTRICS FOR APPLICATIONS IN THE 5G FR3 RANGE.

**O. P. Fedorchuk, O. I. V'yunov, T. O. Plutenko, Yu. D. Stupin, A. G. Bilous**

*V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

*32/34 Academic Palladin ave., 03142 Kyiv, Ukraine*

*e-mail: alex1377c9@gmail.com*

The 5G FR3 band requires low-permittivity materials. Spinel-structured materials, like  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ , are promising due to their high Q-factor and tunability. However, their practical performance limits in terms of frequency range need further investigation. Planar technologies like microstrip lines and metamaterials, using these materials as substrates, can enable efficient and high-frequency devices for 5G and beyond.

This study aimed to synthesize ceramic materials with the compositions  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  and  $\text{SrYSmO}_4$ , possessing a spinel structure, and

investigate their properties. The potential application of these materials in millimeter-wave devices and instruments was explored by modeling the spectral characteristics of antennas utilizing these materials as substrates and comparing the results with those obtained from literature-reported materials.

High-purity ( $\geq 99\%$ )  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  powders were employed as starting materials. Stoichiometric quantities of the raw materials were mixed, ball-milled, dried, sieved, calcined, and re-milled. A binder was added, and the mixture was pressed into pellets. The green compacts were sintered at temperatures ranging from 1480 to 1560 °C for durations of 2–6 hours, with a heating and cooling rate of 200 °C/h.

A quality factor  $Q \times f = 89400$  at a frequency of 11 GHz was achieved with a dielectric permittivity  $\epsilon_r = 15.4$  and a near zero temperature coefficient of dielectric permittivity/frequency TKe. The substitution of yttrium with samarium further decreased the dielectric permittivity to 9.4 but significantly reduced the quality factor of the material  $Q \times f = 17800$ . The obtained  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  meets the requirements for dielectric materials in the centimeter wave range. It surpasses most

materials in the millimeter wave range presented in the literature in terms of characteristics set.

Modeling of an antenna cell based on a double split-ring resonator showed the possibility of using microstrip materials and metamaterials with substrates made of the prepared materials in the frequency range of 8.6–11 GHz and adjacent ranges, which are used in satellite communication and television systems, aviation, weather, and police radars, line-of-sight (LOS) communication systems and electronic news gathering (ENG) systems.

**Keywords:** spinel structure, millimeter wave range, temperature stability, dielectric substrates, communication systems.

#### ЛІТЕРАТУРА

- World Radio communication Conference 2023 (WRC-23). *Provisional Final Acts*. 2023. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.15-2023-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.15-2023-PDF-E.pdf).
- European Telecommunications Standards Institute. *5G NR User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 2020.
- Kamutzki F., Schneider S., Barowski J., Gurlo A., Hanaor D. A. H. Silicate dielectric ceramics for millimetre wave applications. *J Eur Ceram Soc*. 2021. **41**(7). P. 3879–3894. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.048.
- Peng R., Li Y., Su H., Lu Y., Shi L., Yu G., Wang G., Gan G., Yu C. Three-phase borate solid solution with low sintering temperature, high-quality factor, and low dielectric constant. *J Am Ceram Soc*. 2021. **104**(7). P. 3303–3315. DOI: 10.1111/jace.17707.
- He G.Q., Jiang Y., Song K. X., Liu Y. J., Nie Y., Zhang W. J., Zhao Z. Q., He Y. H., Ma X. Y., Chen X. L., Li X., Zhou H. Ultra high Q  $\text{Sr}_{1+x}\text{Y}_2\text{O}_{4+x}$  ( $x=0-0.04$ ) microwave dielectric ceramics for temperature-stable millimeter-wave dielectric resonator antennas. *J Adv Ceram*. 2024. **13**(2). P. 155–165. DOI: 10.26599/Jac.2024.9220828.
- Ullah A., Liu H., Pengcheng Z., Hao H., Iqbal J., Cao M., Yao Z., Ahmad A. S., Manan A. Influence of Cosubstitution on the phase, microstructure, and microwave dielectric properties of  $\text{MgSiO}_3$  ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. **30**(7). P. 6469–6474. DOI: 10.1007/s10854-019-00951-8.
- Dong M. Z., Yue Z. X., Zhuang H., Meng S. Q., Li L. T. Microstructure and Microwave Dielectric Properties of  $\text{TiO}_2$ -Doped  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  Ceramics Synthesized Through the Sol-Gel Process. *J Am Ceram Soc*. 2008. **91**(12). P. 3981–3985. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02814.x.
- Lai Y.M., Tang X.L., Huang X., Zhang H.W., Liang X.F., Li J., Su H. Phase composition, crystal structure and microwave dielectric properties of  $\text{Mg}_{2-x}\text{Cu}_x\text{SiO}_4$  ceramics. *J Eur Ceram Soc*. 2018. **38**(4). P. 1508–1516. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.035.
- Du K., Song X. Q., Li J., Wu J. M., Lu W. Z., Wang X. C., Lei W. Optimised phase compositions and improved microwave dielectric properties based on calcium in silicates. *J Eur Ceram Soc*. 2019. **39**(2–3). P. 340–345. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.10.005.
- Wei R.F., Yang L.P., Zhang X., Tian X.L., Peng X.S., Hu F.F., Guo H. Energy transfer and highly thermal stability in single-phase  $\text{SrY}_2\text{O}_4:\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  phosphors for UV-LEDs. *J Lumin*. 2020. **228**. P. 117606. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117606.
- Ma L. Z., Tian G., Xiao H. Z., Jiang L. X., Du Q. B., Li H., Yang B. A novel spinel-type  $\text{Mg}_3\text{Ga}_2\text{SnO}_8$  microwave dielectric ceramic with low  $\epsilon_r$  and low loss. *J Eur Ceram Soc*. 2024. **44**(10). P. 5731–5737. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.03.027.
- Ma L. Z., Tian G., Xiao H. Z., Jiang L. X., Du Q. B., Li H. Microwave dielectric properties and chemical bond of novel spinel-structure  $\text{Zn}_3\text{Ga}_2\text{SnO}_8$  ceramics. *Ceram Int*. 2024. **50**(13). P. 24508–24514. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.04.184.

13. He G. Q., Ma X. Y., Liu Y. J., He Y. H., Xiao Y. Q., Qu X., Deng S., Liu K. Y., Wang X., Zhou S. C., Li Q., Dai Z., Wu Y., Chen X., Zhou H. Sintering characteristics and microwave dielectric properties of ultra low-loss  $\text{SrY}_2\text{O}_4$  ceramics. *CeramInt*. 2022. **48**(15). P. 21299–21304. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.081.
14. Narang S. B., Pubby K. Nickel Spinel Ferrites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. **519**. P. 167163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167163>.
15. Elalaouy O., ElGhzaoui M., Foshi J. Enhancing antenna performance: A comprehensive review of metamaterial utilization. *Materials Science and Engineering: B*. 2024. **304**. P. 117382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117382>.
16. Wu X., Yan H., Zhou Y., Zhang P., Lu Q., Shi H. Review of additive manufactured metallic metamaterials: Design, fabrication, property and application. *Optics & Laser Technology*. 2025. **182**. P. 112066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112066>.
17. LeBail A. Whole powder pattern decomposition methods and applications: A retrospection. *Powder Diffraction*. 2005. **20**(4). P. 316–326. DOI: 10.1154/1.2135315.
18. Collins T. J. Image J for microscopy. *Biotechniques*. 2007. **43**(1). P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.2144/000112517>.
19. Krupka J., Derzakowski K., Riddle B., Baker-Jarvis J. A dielectric resonator for measurements of complex permittivity of low loss dielectric materials as a function of temperature. *Meas Sci Technol*. 1998. **9**(10). P. 1751–1756. DOI: 10.1088/0957-0233/9/10/015.
20. Al-badri K. S. L. Electromagnetic broad band absorber based on metamaterial and lumped resistance. *J King Saud Univ Sci*. 2020. **32**(1). P. 501–506. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.07.013.
21. Hu C. X., Liu P. Microwave dielectric properties of  $\text{SiO}_2$  ceramics with addition of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ . *Mater Res Bull*. 2015. **65**. P. 132–136. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.01.034.
22. Kweon S. H., Joung M. R., Kim J. S., Kim B. Y., Nahm S., Paik J. H., Kim Y. S., Sung T. H. Low Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of  $\text{B}_2\text{O}_3$ -added  $\text{LiAlSiO}_4$  Ceramics. *J Am Ceram Soc*. 2011. **94**(7). P. 1995–1998. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2011.04619.x.
23. Whitaker J. C. *The Electronics Handbook*. CRC Press. 2005.

## REFERENCES

1. World Radio communication Conference 2023 (WRC-23). *Provisional Final Acts*. 2023. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.15-2023-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.15-2023-PDF-E.pdf).
2. European Telecommunications Standards Institute. *5G NR User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 2020.
3. Kamutzki F., Schneider S., Barowski J., Gurlo A., Hanaor D. A. H. Silicate dielectric ceramics for millimetre wave applications. *J Eur Ceram Soc*. 2021. **41**(7): 3879–3894. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.048.
4. Peng R., Li Y., Su H., Lu Y., Shi L., Yu G., Wang G., Gan G., Yu C. Three-phase borate solid solution with low sintering temperature, high-quality factor, and low dielectric constant. *J Am Ceram Soc*. 2021. **104**(7): 3303–3315. DOI: 10.1111/jace.17707.
5. He G. Q., Jiang Y., Song K. X., Liu Y. J., Nie Y., Zhang W. J., Zhao Z. Q., He Y. H., Ma X. Y., Chen X. L., Li X., Zhou H. Ultra high Q  $\text{Sr}_{1-x}\text{Y}_2\text{O}_{4+x}$  ( $x=0-0.04$ ) microwave dielectric ceramics for temperature-stable millimeter-wave dielectric resonator antennas. *J Adv Ceram*. 2024. **13**(2): 155–165. DOI: 10.26599/Jac.2024.9220828.
6. Ullah A., Liu H., Pengcheng Z., Hao H., Iqbal J., Cao M., Yao Z., Ahmad A. S., Manan A. Influence of Cosubstitution on the phase, microstructure, and microwave dielectric properties of  $\text{MgSiO}_3$  ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. **30**(7): 6469–6474. DOI: 10.1007/s10854-019-00951-8.
7. Dong M. Z., Yue Z. X., Zhuang H., Meng S. Q.,

- Li L. T. Microstructure and Microwave Dielectric Properties of TiO<sub>2</sub>-Doped Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Ceramics Synthesized Through the Sol-Gel Process. *J Am Ceram Soc.* 2008. **91**(12): 3981–3985. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02814.x.
8. Lai Y.M., Tang X.L., Huang X., Zhang H.W., Liang X.F., Li J., Su H. Phase composition, crystal structure and microwave dielectric properties of Mg<sub>2-x</sub>Cu<sub>x</sub>SiO<sub>4</sub> ceramics. *J Eur Ceram Soc.* 2018. **38**(4): 1508–1516. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.035.
9. Du K., Song X. Q., Li J., Wu J. M., Lu W. Z., Wang X. C., Lei W. Optimised phase compositions and improved microwave dielectric properties based on calcium in silicates. *J Eur Ceram Soc.* 2019. **39**(2-3): 340–345. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.10.005.
10. Wei R.F., Yang L.P., Zhang X., Tian X.L., Peng X.S., Hu F.F., Guo H. Energy transfer and highly thermal stability in single-phase SrY<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Bi<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup> phosphors for UV-LEDs. *J Lumin.* 2020. **228**: 117606. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117606.
11. Ma L. Z., Tian G., Xiao H. Z., Jiang L. X., Du Q. B., Li H., Yang B. A novel spinel-type Mg<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>SnO<sub>8</sub> microwave dielectric ceramic with low ε<sub>r</sub> and low loss. *J Eur Ceram Soc.* 2024. **44**(10): 5731–5737. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.03.027.
12. Ma L. Z., Tian G., Xiao H. Z., Jiang L. X., Du Q. B., Li H. Microwave dielectric properties and chemical bond of novel spinel-structure Zn<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>SnO<sub>8</sub> ceramics. *Ceram Int.* 2024. **50**(13): 24508–24514. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.04.184.
13. He G. Q., Ma X. Y., Liu Y. J., He Y. H., Xiao Y. Q., Qu X., Deng S., Liu K. Y., Wang X., Zhou S. C., Li Q., Dai Z., Wu Y., Chen X., Zhou H. Sintering characteristics and microwave dielectric properties of ultra low-loss SrY<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ceramics. *Ceram Int.* 2022. **48**(15): 21299–21304. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.081.
14. Narang S. B., Pubby K. Nickel Spinel Ferrites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2021. **519**: 167163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167163>.
15. Elalaouy O., ElGhzaoui M., Foshi J. Enhancing antenna performance: A comprehensive review of metamaterial utilization. *Materials Science and Engineering: B.* 2024. **304**: 117382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117382>.
16. Wu X., Yan H., Zhou Y., Zhang P., Lu Q., Shi H. Review of additive manufactured metallic metamaterials: Design, fabrication, property and application. *Optics & Laser Technology.* 2025. **182**: 112066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112066>.
17. LeBail A. Whole powder pattern decomposition methods and applications: A retrospection. *Powder Diffr.* 2005. **20**(4): 316–326. DOI: 10.1154/1.2135315.
18. Collins T. J. Image J for microscopy. *Biotechniques.* 2007. **43**(1): 25–30. DOI: <https://doi.org/10.2144/000112517>.
19. Krupka J., Derzakowski K., Riddle B., Baker-Jarvis J. A dielectric resonator for measurements of complex permittivity of low loss dielectric materials as a function of temperature. *Meas Sci Technol.* 1998. **9**(10): 1751–1756. DOI: 10.1088/0957-0233/9/10/015.
20. Al-badri K. S. L. Electromagnetic broad band absorber based on metamaterial and lumped resistance. *J King Saud Univ Sci.* 2020. **32**(1): 501–506. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.07.013.
21. Hu C. X., Liu P. Microwave dielectric properties of SiO<sub>2</sub> ceramics with addition of Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>. *Mater Res Bull.* 2015. **65**: 132–136. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.01.034.
22. Kweon S. H., Joung M. R., Kim J. S., Kim B. Y., Nahm S., Paik J. H., Kim Y. S., Sung T. H. Low Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-added LiAlSiO<sub>4</sub> Ceramics. *J Am Ceram Soc.* 2011. **94**(7): 1995–1998. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2011.04619.x.
23. Whitaker J. C. *The Electronics Handbook.* CRC Press. 2005.

Стаття надійшла 21.03.2024.