

КЕРАМІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ТЕХНІКИ: ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

О.О. Рогов¹, О.Ю. Федоренко², С.В. Лежавська³

¹ аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

² завідувачка кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

³ студентка кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

Сучасні стандарти зв'язку вимагають роботи на значно вищих частотах (в діапазоні міліметрових хвиль), де критично важливою є мінімізація втрат сигналу. Крім того, електронні прилади тяжіють до мініатюризації при збереженні функціональності та надійності, тому вимоги до матеріалів стають надзвичайно жорсткими. Найкращим рішенням для застосувань, що вимагають високої надійності (військова та аерокосмічна техніка, промислове обладнання) є використання керамічних діелектричних матеріалів, що відрізняються високою стабільністю діелектричних характеристик в широкому температурному діапазоні, низькими діелектричними втратами, стійкістю до електричного старіння, а також високою термостійкістю, механічною міцністю та стійкістю до агресивних середовищ [1]. Крім того, методи виробництва керамічних матеріалів дозволяють досягати точних розмірів, що важливо для узгодження реальних характеристик приладів із розрахунковими параметрами. Керамічні діелектрики застосовуються в різноманітних мікрохвильових пристроях: резонаторах, фільтрах, дуплесерах, а також служать основою інтегральних мікросхем і високочастотних конденсаторів. Керамічні підкладки є ключовим компонентом для створення високоефективних, надійних та компактних антенних систем, які особливо актуальні для сучасних бездротових технологій (супутникового зв'язку, 5G, IoT тощо). Вже сьогодні висока або контрольована діелектрична проникність певних видів кераміки дозволить створювати менші за розміром компоненти електронних приладів (антени, фільтри, резонатори тощо). В свою чергу, використання кераміки низькотемпературного спікання (LTCC) дозволяє в єдиному циклі виготовляти багат шарові керамічні підкладки за температури 850-950 °С, що відкриває можливість використання недорогих металів-провідників (міді та срібла). Отже, розвиток асортименту і технологій одержання керамічних діелектриків має критичне значення для індустрії зв'язку та прогресу електроніки. Перспективні напрямки розвитку виробництва керамічних діелектриків для мікрохвильової техніки та антен зосереджені на розробці матеріалів для надвисоких частот (мм-діапазон і вище), мініатюризації пристроїв при збереженні функціональності, інтеграції функцій, надійності роботи пристроїв в екстремальних умовах (знакозмінні температурні коливання, впливи вібрації, радіації та агресивних середовищ) та підвищенні продуктивності виробництва за рахунок використання інноваційних технологій. Зокрема впровадження технології холодного спікання (Cold Sintering Technology), яка дозволяє ущільнювати кераміку при значно нижчих температурах (150-300 °С), забезпечить суттєве скорочення енергетичних витрат на етапі випалу [2]. В свою чергу, застосування адитивних технологій відкриває можливості для виготовлення складних гетерогенних структур довільної геометрії та метаматеріалів, створення яких традиційними методами неможливо. Зокрема, використання різних варіантів 3D друку дозволить здійснювати

проектування антен з оптимізованими характеристиками (наприклад, діаграмою спрямованості, шириною смуги) шляхом контрольованого формування просторової структури діелектрика, а також створювати менш матеріалоємні полегшені конструкції.

Подальший розвиток технологій кераміки низько- та високотемпературного спікання (LTCC та HTCC) є необхідною умовою створення складних, багатофункціональних модулів, де антена, фільтри та активні компоненти інтегровані в одну компактну багатшарову структуру [3]. Це дозволить зменшити розміри пристроїв та підвищити ефективність експлуатації, довговічність та стабільність роботи критично важливих систем, таких як військова техніка, аерокосмічні технічні об'єкти та медичне обладнання. В свою чергу, створення керамічних підкладок з високою теплопровідністю забезпечить надійну роботу потужних передавальних модулів, де відведення тепла є критично важливим. Розробка керамічних композиційних матеріалів із регульованою теплопровідністю і можливістю «налаштувати» діелектричну проникність, дозволить задовільнити примхливі вимоги дизайну антен та мікросхем.

Серед важливих задач, пов'язаних із необхідністю підлаштовувати матеріал під конкретні умови служби, є розробка поліфункціональних композиційних матеріалів, які поєднують керамічні наповнювачі з полімерними матрицями, які дозволяють підбирати властивості матеріалу під задані індивідуальні параметри готового продукту. Не менш важливим і перспективним є дослідження можливості створення гнучких керамічних або гібридних (керамополімерних) підкладок, здатних згинатись або скручуватись без втрати функціональності та стабільності ключових властивостей. Можливість одержання таких матеріалів відкриє нові перспективи для інноваційних напрямків у сфері індивідуальних аксесуарів, біосенсорів, гнучких імплантатів та елементів одягу (Wearable Electronics), в т.ч. смарт-годинників, фітнес-трекерів, одягу із вбудованими сенсорами, окулярів з доповненою реальністю тощо. Так само гнучкі гібридні підкладки відкривають можливості для виготовлення пристроїв з нетрадиційними форм-факторами (так звана конформна електроніка), що виходять за рамки звичних прямокутних гаджетів (смартфони, екран яких які можна згинати, сенсорні панелі на вигнутих поверхнях панелей автомобіля, крил літака тощо), а також модульних пристроїв, окремі блоки яких можна комбінувати в різний спосіб. Тож створення таких матеріалів створює можливості для абсолютно нових застосувань та інноваційних рішень, які можуть змінити ринок електроніки в майбутньому.

Усі вищезазначені напрямки спрямовані на подолання існуючих обмежень у виробництві, розширення можливостей застосування керамічних діелектриків для потреб високошвидкісного бездротового зв'язку та зниження витрат на виробництво мікрохвильової техніки. Отже, розвиток технологій керамічних діелектриків слід розглядати не як просте поліпшення існуючих матеріалів, а як стратегічну інвестицію у розвиток технологій зв'язку, яка забезпечить швидкість, надійність, компактність та ефективність майбутніх електронних систем. І хоча традиційна технологія одержання технічної кераміки не є дешевою, інновації у її виробництві, зокрема такі як технології швидкого прототипування і холодного спікання, дозволять знизити виробничі витрати та зроблять доступнішими матеріали, що здатні прискорити загальний технологічний прогрес.

Список літератури:

1. *Varghese, J., Joseph, N., Jantunen, H., Behera, S. K., Kim, H. T., Sebastian, M. T.* (2020). Microwave Materials for Defense and Aerospace Applications. In: Handbook of Advanced Ceramics and Composites (pp. 165–213).
2. *Wang, D., Li, L., Jiang, J., Lu, Z., Wang, G., Song, K., Zhou, D., Reaney, I. M.* (2021). Cold sintering of microwave dielectric ceramics and devices. Journal of Materials Research, 36(2), 333–349.
3. *Xiang, H., Yao, L., Chen, J., Yang, A., Yang, H., Fang, L.* (2021). Microwave dielectric high-entropy ceramic $\text{Li}(\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2}\text{Er}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Lu}_{0.2})\text{GeO}_4$ with stable temperature coefficient for low-temperature cofired ceramic technologies. Journal of Materials Science & Technology, 93, 28–32.