

УДК 542.91:762 621.315

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-347-354

А. В. Довгаль¹, Д. В. Часник²; І. П. Фесенко³, Ю. М. Туз¹, О. М. Кайдаш³, доктори технічних наук; **В. Б. Свєрдун³, Т. Б. Сєрбенюк³, В. І. Часник⁴**, кандидати технічних наук

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 37, просп. Перемоги, 03056, м. Київ, Україна

² Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, 3, вул. Миколи Василенка, 03113, м. Київ, Україна

³ Інститут надтвердих матеріалів імені В. Бакуля НАН України, 2, вул. Автозаводська, 04074, м. Київ, Україна, E-mail: igorfesenko@ukr.net

⁴ Державне підприємство НДІ «ОРІОН», 8А, вул. Антона Цедіка, 03057, м. Київ, Україна

ОДЕРЖАННЯ ВІЛЬНИМ СПІКАННЯМ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ З ФУНКЦІОНАЛЬНОГО КОМПОЗИТУ З КЕРАМІЧНОЮ МАТРИЦЕЮ НА ОСНОВІ НІТРИДУ АЛЮМІНІЮ ДЛЯ РОЗРОБКИ ШИРОКОСМУГОВОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Вивчено вплив добавки оксиду ітрію на теплопровідність функціонального композиту з керамічною матрицею на основі нітриду алюмінію, одержаного вільним спіканням. Представлено результати дослідження мікроструктури, виміряні значення теплопровідності одержаних зразків, визначено оптимальну кількість оксиду ітрію у вихідній порошковій композиції для спікання великогабаритних деталей для широкосмугового високовольтного підсилювача.

Для покращення передачі інформації за рахунок збереження в процесі підсилення форми сигналу розроблено широкосмуговий високовольтний підсилювач з мінімальним викривленням фронтів імпульсів з використанням керамічного композиту на основі AlN, одержаного вільним спіканням великогабаритних деталей з теплопровідністю 160 Вт/(м·К).

Розроблений новий широкосмуговий високовольтний підсилювач з віртуальним живленням перевищує параметри використовуваного зараз в електротехніці підсилювача. За рахунок використання деталей з нітриду алюмінію великого розміру розроблений новий підсилювач має наступні характеристики: напруга до 1 кВ, частота до 100 кГц.

Новий широкосмуговий високовольтний підсилювач має мінімізовані струми витікання через паразитну ємність і характеризується мінімальним викривлення фронтів імпульсів, що дозволяє покращити передачу інформації за рахунок збереження в процесі підсилення форми сигналу.

Ключові слова: нітрид алюмінію, оксид ітрію, мікроструктура, теплопровідність, підсилювач.

Вступ

Кераміка на основі нітриду алюмінію (AlN) все ширше застосовується для відводу тепла у нових приладах електротехніки та електроніки [1, 2]; її отримують вільним спіканням з додаванням активаторів [3, 4]. Звичайно використовують деталі розміром до 20 мм та товщиною 1 мм [5]. Задача отримання великогабаритних деталей з керамічного матеріалу на основі AlN з високими теплопровідними та ізоляційними властивостями повстала у зв'язку з необхідністю збереження інформації при її передачі та обробці за рахунок використання широкосмугових

високовольтних підсилювачів електричного сигналу з мінімальним викривленням фронтів імпульсів сигналу в процесі підсилення; тобто, необхідно покращити передачу інформації за рахунок збереження в процесі підсилення форми електричного сигналу.

Мета роботи – одержати великогабаритні деталі (до 70 мм) з керамічного матеріалу на основі AlN з високою теплопровідністю, придатні для використання при розробці нових підсилювачів з мінімальними втратами сигналу.

Матеріали і методи дослідження

Для зменшення втрат сигналу через паразитну ємність було прийнято рішення про зменшення ємнісного зв'язку за рахунок конструктивного дистанціювання корпусу операційних підсилювачів широкосмугового високовольтного підсилювача від загальної шини шляхом розміщення додаткового проміжного шару теплопровідного ізолятора. Нами використано одержаний вільним спіканням композиційний матеріал на основі AlN з теплопровідністю 160 Вт/(м·К) і розмірами 60×70×5 мм.

Вихідні композиційні порошкові суміші готували на основі порошку AlN з додаванням від 1 до 20 % (за масою) Y_2O_3 . Композиційні порошкові компакти розмірами 90×90×10 мм готували одновісним пресуванням під тиском 300 МПа. Порошкові компакти спікали в шахтній печі опору з вольфрамовими нагрівниками за температури 1700 і 1800°C, в атмосфері азоту під тиском 0,12 МПа. Час витримки на максимальній температурі підбирався для одержання густини 99 %. Для порівняння, технологія мікрохвильового спікання дає можливість одержувати деталі діаметром лише 2,74 см і товщиною 1,4 см з високою теплопровідністю 160–220 Вт/(м·К) [6].

Теплопровідність керамічних зразків у формі пластин розміром 15×20 мм і товщиною 1,0 мм визначали при кімнатній температурі нестационарним методом за допомогою пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності високотеплопровідних матеріалів ИТ-3 МХТИ [7].

Результати та їх обговорення

Мікроструктура одержаних зразків з вмістом 4; 8 та 20 % (за масою) Y_2O_3 представлена на рис. 1. З мікрофотографій видно, що вміст ітріюалюмінієвого гранату (світла фаза в міжзернових границях та потрійних стиках зерен), який утворився при застиганні рідкої фази, є приблизно однаковим.

Це можна пояснити сублімацією/випаровуванням частини ітріюалюмінієвого гранату в процесі спікання нітриду алюмінію [6].

Виміряна теплопровідність одержаної вільним спіканням при 1800 °C кераміки на основі AlN є найвищою для вмісту Y_2O_3 4–5 % (за масою) і становить 160 Вт/(м·К) (рис. 2). При підвищенні вмісту оксиду ітрію у вихідній шихті теплопровідність спеченої кераміки має тенденцію до незначного зменшення.

Це дозволило вибрати оптимальну кількість оксиду ітрію для рівномірного спікання по об'єму порошкових заготовок на основі AlN і одержання вільним спіканням крупних деталей розмірами 60×70×5 мм.

Використання високотеплопровідного діелектричного функціонального композиту на основі нітриду алюмінію дозволило змінити ємнісний зв'язок з шиною заземлення. Віддалення підсилювача на 5 мм від радіаторного елемента зменшило паразитну ємність до 4 пФ. Крім того, висока електроізоляційна характеристика нітриду забезпечила безпечну робочу напругу до 4000 вольт, а низька ємнісна властивість AlN забезпечує необхідний набір

характеристик для його використання в якості ізоляційних пластин для високовольтних підсилювачів (рис. 3).

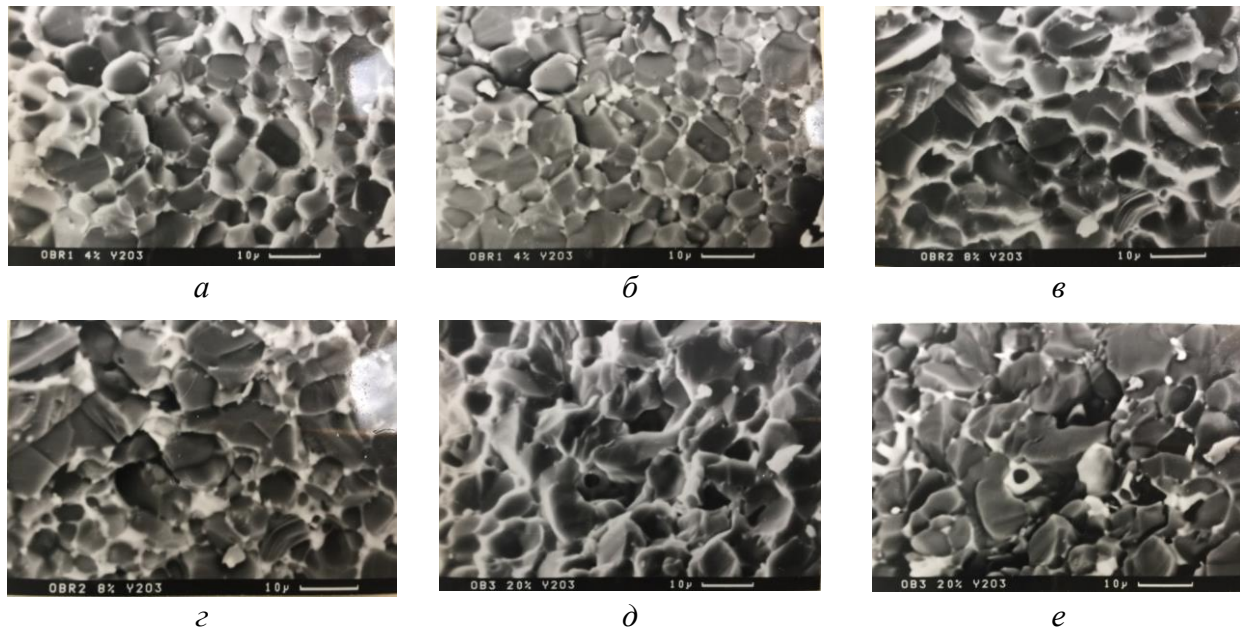


Рис. 1. Топологія поверхні зламу (а, с, е) і її зображення у режимі фазового контрасту (b, d, f) одержаних вільним спіканням при 1800 °С композитів на основі AlN з різним вмістом Y_2O_3 , у % (за масою): 4 – а, b; 8 – с, d; 20 – е, f

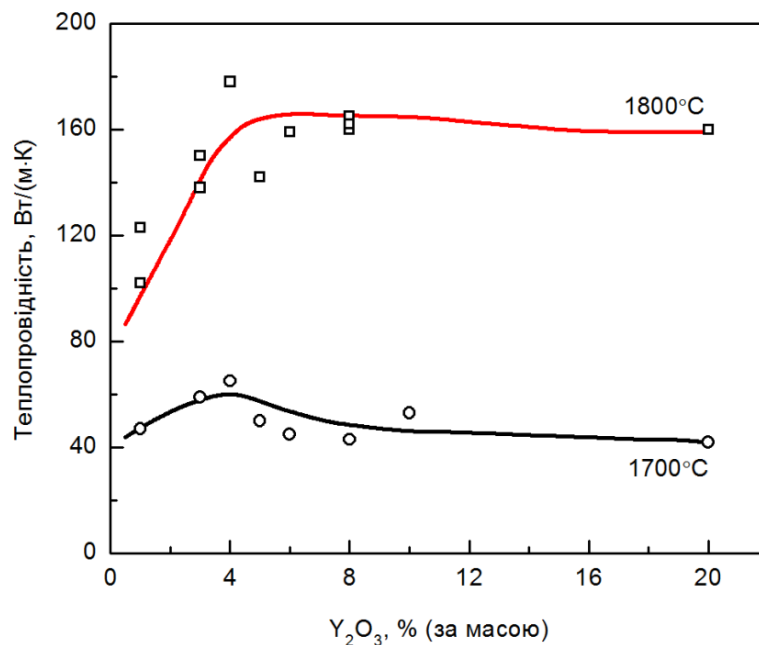


Рис. 2. Залежність від вмісту Y_2O_3 теплопровідності композитів на основі AlN, спечених за різної температури

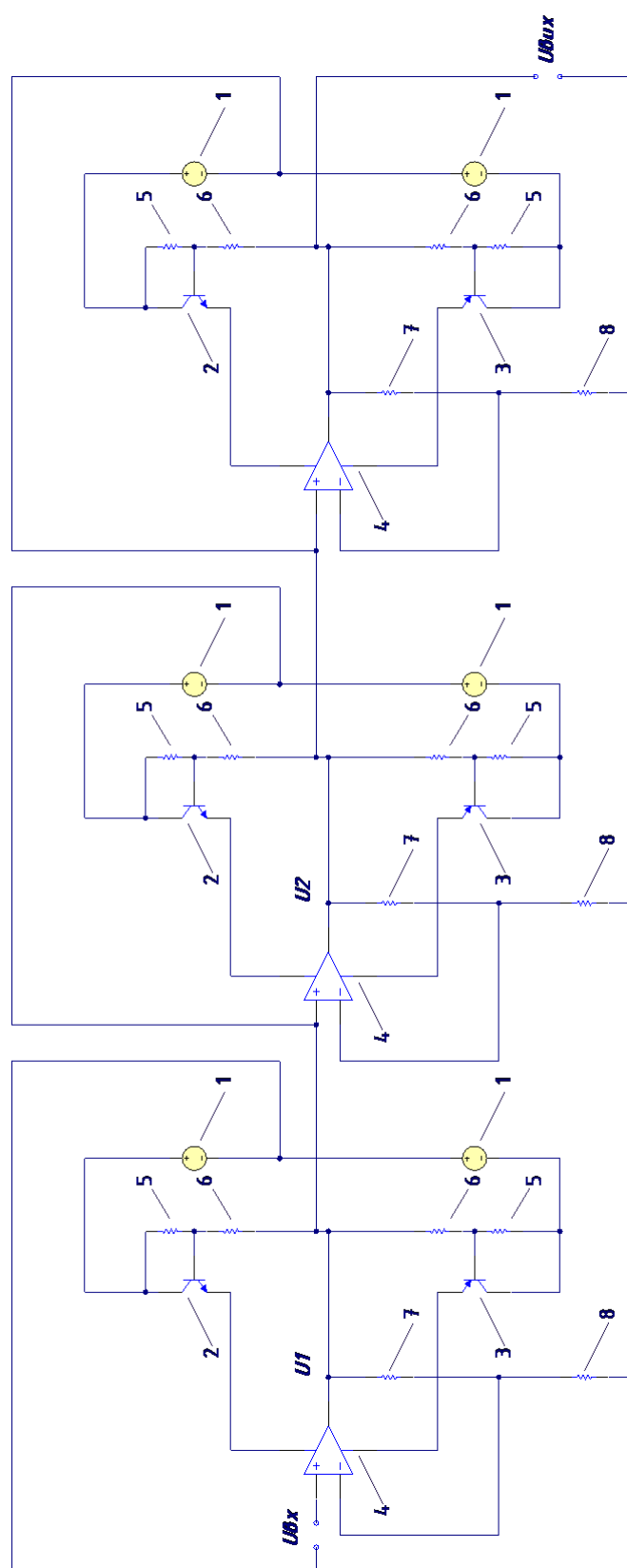


Рис. 3. Розроблений високовольтний неінвертуючий широкосмуговий каскадний підсилювач високої напруги

Рішення тепловідведення з високочастотних підсилювачів з окремим віртуальним живленням не обмежується лише процесом розміщення компонентів на радіаторах. Високочастотні високовольтні схеми дуже чутливі до будь-якого ємнісного зв'язку між сигналами та живленням. Додаткова паразитна ємність, що з'являється з-за неідеальності побудови, є негативним явищем, яке створює додаткові струми витікання. Такі струми є особливо значущими на високих частотах та можуть кардинально впливати на роботу системи в цілому.

Експериментальний підхід побудови підсилювальної схеми з віртуальним нулем та окремими незалежними джерелами напруг дає можливість об'єднувати каскади окремих операційних підсилювачів для розширення робочого діапазону напруг.

Неінвертуючий широкосмуговий каскадний підсилювач складається з трьох каскадів, кожен з яких містить два джерела напруги живлення 1, транзисторний повторювач, який складається з біполярного NPN транзистора 2 та біполярного PNP транзистора 3, операційний підсилювач 4, подільник напруги робочої точки живлення, який складається з резисторів встановлення робочої напруги 5 та 6, і подільник підсилення, який складається з резисторів встановлення коефіцієнта підсилення сигналу 7 та 8.

Так як окремі підсилювачі потребують значних за розмірами радіаторів для розсіювання тепла, однією з критичних проблем реалізації такого підсилювача є забезпечення тепловідведення з мінімальним ємнісним зв'язком між окремими силовими та сигнальними каскадами системи. Загальна потужність, яку здатен розсіювати підсилювач, оцінюється в 120 Вт. Через таку значну кількість розсіювання енергії конструкція такого пристрою передбачає кріплення окремих підсилювачів до основи корпусу для покращення тепловідведення та активний вентиляторний обдув. Кріплення підсилювачів до корпусної пластини створює додатковий ємнісний зв'язок між корпусом операційного підсилювача та спільною шиною.

Як уже було зазначено вище, саме через паразитний ємнісний зв'язок схема стає надчутливою до високочастотних сигналів, що створює проблеми збудження системи та спотворення вихідної форми. Для прикладу, частота 100 кГц та робоча напруга 2000 В створює 2 мА струму витікання та 50 Вт втрат потужності при ємнісному зв'язку 20 пФ між останнім та першим каскадами.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi * 100 * 10^3 * 20 * 10^{-12}} = 79,58 \text{ кОм}$$
$$I_{lk} = \frac{U}{X_c} = \frac{2000\text{В}}{79,58 \text{ кОм}} = 0,025 \text{ А}$$
$$P_{lk} = U * I = 2000 \text{ В} * 0,025 \text{ А} = 50\text{Вт}$$

де X_c – імпеданс конденсатора, C – ємність конденсатора, I_{lk} – струм втрат, P_{lk} – потужність втрат.

При розміщенні підсилювача на радіаторну пластину експериментально було визначено паразитний ємнісний зв'язок між корпусом підсилювача та загальною шиною заземлення, що складає 18 пФ. Розроблений нами високовольтний підсилювач з керамічними ізоляційними деталями розміром 60×70×5 мм складається з чотирьох мікросхем операційних підсилювачів Арех PA94 в корпусі DQ12 (рис. 4).



Рис. 4. Широкосмуговий високовольтний підсилювач з віртуальним живленням складається з чотирьох операційних підсилювачів, три з яких (ліворуч) розміщені на керамічних пластинах з AlN, які відмічені білими стрілками

Живлення трьох операційних підсилювачів від'єднане від загального заземлення даного широкосмугового високовольтного підсилювача, за виключенням першого операційного підсилювача (праворуч на рис. 4). У свою чергу, блоки живлення трьох операційних підсилювачів характеризуються мінімальною ємністю стосовно загального заземлення підсилювача, мають ємність на рівні одиниць пікофарад (пФ) відносно загального живлення підсилювача. Крім того, в цьому підсилювачі для зменшення ємності застосовують трансформатор з віддаленими обмотками.

Перший операційний підсилювач (праворуч на рис. 4) закріплений на радіаторі, виготовленому з алюмінію, а три наступні – на керамічних деталях великого розміру з AlN. Ці три операційні підсилювачі відірвані від загального заземлення. Конструктивно кожен з трьох корпусів мікросхем операційних підсилювачів розміщується на керамічній деталі з кераміки нітриду алюмінію розмірами $60 \times 70 \times 5$ мм і теплопровідністю $160 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Кожна керамічна деталь з нітриду алюмінію, яка несе на собі операційний підсилювач, закріплена на загальному радіаторі з алюмінію. Загальний радіатор має розвинену задню поверхню (рис. 5) і, крім того, відповідні отвори для примусового охолодження кожного операційного підсилювача окремим вентилятором. Отвір у загальному радіаторі і місце під деталь з нітриду алюмінію представлено на рис. 5.

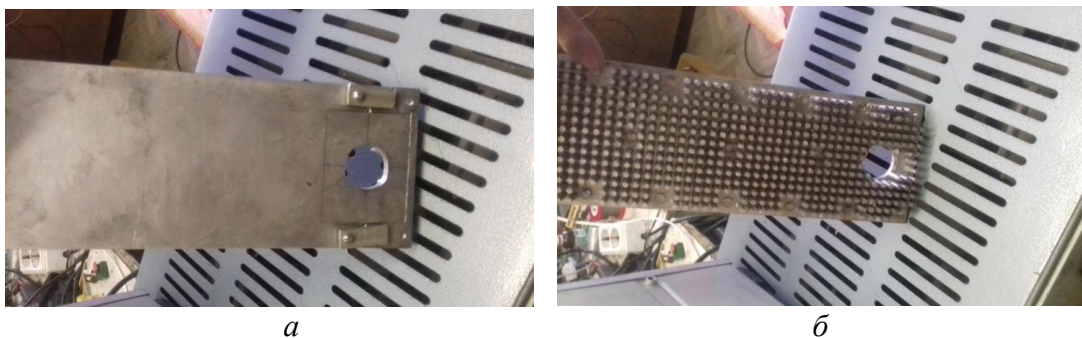


Рис. 5. Вид радіатора з місцем під операційний підсилювач (а) та вигляд з боку охолодження (б)

Висновки

Для покращення передачі інформації за рахунок збереження в процесі підсилення форми сигналу розроблено широкосмуговий високовольтний підсилювач з мінімальним викривленням фронтів імпульсів з використанням керамічного композиту на основі AlN, одержаного вільним спіканням великогабаритних деталей ($60 \times 70 \times 5$ мм) з теплопровідністю $160 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Розроблений новий широкосмуговий високовольтний підсилювач з віртуальним живленням перевищує параметри використовуваного зараз в електротехніці підсилювача для діапазону частот від 1 до 50 МГц, який працює при напругах понад 30 В і виготовлений з використанням нітриду алюмінію у діелектричних деталях охолодження середнього розміру. За рахунок використання деталей з нітриду алюмінію великого розміру, розроблений новий підсилювач має наступні характеристики: напруга до 1 кВ, частота до 100 кГц.

Новий широкосмуговий високовольтний підсилювач має мінімізовані струми витікання через паразитну ємність і характеризується мінімальним викривленням фронтів імпульсів, що дозволяє покращити передачу інформації за рахунок збереження в процесі підсилення форми сигналу.

A. Dovhal¹, D. Chasnyk², I. Fesenko³, Yu. Tuz¹, O. Kaidash³,
T. Serbeniuk³, V. Chasnyk⁴, V. Sverdun³

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

²Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine (ISEE SSU)

³Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

⁴State Enterprise Research Institute ORION, Ukraine

PREPARING BY PRESSURELESS SINTERING OF LARGE-SIZE PARTS FROM FUNCTIONAL AlN CERAMIC MATRIX COMPOSITE FOR DESIGN OF WIDE-RANGE HIGH-VOLTAGE AMPLIFIER

Influence of yttria addition on thermal conductivity of functional AlN-based ceramic matrix composite prepared by pressureless sintering was studied. Microstructural characteristics and measured values of thermal conductivity are presented. An optimal content of yttria in starting powder composition was estimated to prepare large-size parts for wide-range high-voltage amplifier.

To improve the information transmission by preserving the signal shape during the amplification process, a broadband high-voltage amplifier with minimal distortion of the pulse fronts was developed using a AlN-based ceramic composite, prepared by pressureless sintering of large-sized parts with a thermal conductivity of $160 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

The developed new broadband high-voltage amplifier with virtual power exceeds the parameters of the amplifier currently used in electrical engineering. Due to the use of large aluminum nitride parts, the developed new amplifier has the following characteristics: voltage up to 1 kV, frequency up to 100 kHz.

The new broadband high-voltage amplifier has minimized leakage currents due to parasitic capacitance and is characterized by minimal distortion of pulse fronts, which allows for improved information transmission by preserving the signal shape during the amplification process.

Key words: aluminum nitride, yttria, microstructure, thermal conductivity, amplifier.

Література

1. Herrmann R. Ceramics for Hybrid Vehicles, Solar and Wind Power Systems. *Ceramic Forum International. Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft (Cfi/Ber. DKG)*. 2010. Vol. 87, N 11–12. P. E15–E16
2. Rauchenecker J., Konegger T. Additive manufacturing of aluminum nitride ceramics with high thermal conductivity via digital light processing. *Open Ceramics*. 2022. Vol. 9. P. 100215.
3. Wu H., Wang X., Li H. Effects of Dy_2O_3 on the Dielectric Property, Phase Composition, and Microstructure of the Low Temperature Sintered AlN Ceramics. *J. Mater. Science Research*. 2012. Vol. 1, N 4. P. 41–47.
4. Neher M., Hermann M., Fabrichnaya O., Pavlyuchkov D., Seifert H. J. Liquid phase formation in the system $\text{AlN-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$. Part I. Experimental investigations. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 33, N 13–14. P. 2447–2455
5. Okada G., Fukuda K., Kasap S., Yanagida T. Aluminum Nitride Ceramic as an Optically Stimulable Luminescence Dosimeter Plate. *Photonics*. 2016. Vol. 3, N 2. P. 23.
6. Xu G., Orolunyolemi T., Wilson C.O., Lloyd I.K., Carmel Yu. Microwave sintering of high-density, high thermal conductivity AlN. *J. Mater. Res.* 2002. Vol. 17, N 11. P. 2837–2845
7. Теплопровідність надтвердих матеріалів / І.П. Фесенко, В.З. Туркевич, В.І. Часник та ін. 2-е вид. *Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В.*, 2018. 68 с.

Надійшла 31.07.23

References

1. Herrmann, R. (2010). Ceramics for Hybrid Vehicles, Solar and Wind Power Systems. *Cfi/Ber. DKG*. 87(11–12), E15–E16.
2. Rauchenecker, J., & Konegger, T. (2022). Additive manufacturing of aluminum nitride ceramics with high thermal conductivity via digital light processing. *Open Ceramics*, 9, 100215.
3. Wu, H., Wang, X., & Li, H. (2012). Effects of Dy_2O_3 on the Dielectric Property, Phase Composition, and Microstructure of the Low Temperature Sintered AlN Ceramics. *Journal of Material Science Research*, 1(4), 41–47.
4. Neher, M., Hermann, M., Fabrichnaya, O., et al. (2013). Liquid phase formation in the system $\text{AlN-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$. Part I. Experimental investigations. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 33(13–14), 2447–2455.
5. Okada, G., Fukuda, K., Kasap, S., & Yanagida, T. (2016). Aluminum Nitride Ceramic as an Optically Stimulable Luminescence Dosimeter Plate. *Photonics*, 3(2), 23.
6. Xu, G., Orolunyolemi, T., Wilson, C. O., et al. (2002). Microwave sintering of high-density, high thermal conductivity AlN. *J. Mater. Res.* 17(11), 2837–2845.
7. Fesenko, I. P., Turkevich, V. Z., Chasnyk, V. I. et al. (2018). Thermal Conductivity of Superhard Materials. *Korsun-Shevchenkivsky: FOP Maydachenko* [in Ukrainian]