

**ВИКОРИСТАННЯ НІТРИД-АЛЮМІНІЄВИХ КЕРАМІЧНИХ ПЛАТ  
ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ  
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ**

*Анотація. Актуальність теми дослідження. У статті розкрито принципи використання нітрид-алюмінієвих керамічних плат для забезпечення температурної стабільності вимірювальних підсилювачів. Зі збільшенням потужності електронних компонентів, що вимагають ефективного розсіювання тепла, виникає необхідність розробки матеріалів із високою теплопровідністю. Одним із таких матеріалів є нітрид алюмінію. Постановка проблеми. Попри широке застосування керамічних плат їх використання при розробці ширококутових високовольтних підсилювачів ще не достатньо вивчено, залишаються прогалини в методах одержання стабільного керамічного композиту на основі AlN. Мета статті полягає у одержанні температурно стабільних нітрид-алюмінієвих керамічних плат, які забезпечили б температурну стабільність вимірювальних підсилювачів. Методи дослідження. Аналіз, експеримент.*

*Результати. У статті представлені результати синтезу та технологія виготовлення кераміки із нітриду алюмінію. Встановлено, що введення у вихідну суміш різних добавок підвищує токсичність газоподібних викидів, ускладнює роботу і призводить до збільшення вартості нітриду алюмінію. Отримано вільним спіканням великогабаритні деталі (60×70×5 мм) теплопровідністю 160 Вт/(м·К) з температурно стабільного керамічного композиту на основі AlN для використання при розробці ширококутового високовольтного підсилювача. Доведено, що найбільш ефективно видалення кисню з кристалічної решітки нітриду алюмінію досягається при еквівалентному співвідношенні оксиду ітрію в кількості 5%. Вивчено вплив добавки оксиду ітрію на теплопровідність функціонального композиту з керамічною матрицею на основі нітриду алюмінію, одержаного вільним спіканням. Висновки. На підставі проведених досліджень зразків та аналізу отриманих даних можна стверджувати, що при використанні ітераційної корекції вплив статичної похибки може бути скомпенсований. Для використання ітераційної корекції система має бути стабільною і її параметри не повинні змінюватись у часі. Запропоновано раціональний метод стабілізації параметрів для забезпечення спільного та однорідного температурного поля що буде впливати однаково на всі компоненти шляхом використання високо теплопровідних матеріалів.*

*Ключові слова: нітридні алюмінати; керамічні плати; температурна стабільність; підсилювачі; оксид ітрію; оксид алюмінію; теплопровідність; високовольтний підсилювач.*

**Постановка проблеми.** Порівняно з органічними ламінатами, кераміка AlN забезпечує чудову теплопровідність як ізолятор, зберігаючи при цьому коефіцієнт теплового розширення, близький до кремнію. Це дозволяє платам AlN без збоїв витримувати високі температури та рівні потужності. Силкові електронні модулі вітчизняного виробництва містять у конструкції елементи з'єднань метал – кераміка. Ці зв'язки потрібні для адгезійної міцності, стійкості до зміни температури. Типові сфери застосування: системи навігації літальних апаратів, елементи комутації силових схем та ін. На рис. 1 зображена типова комутаційна плата з провідними доріжками з нітриду алюмінію.

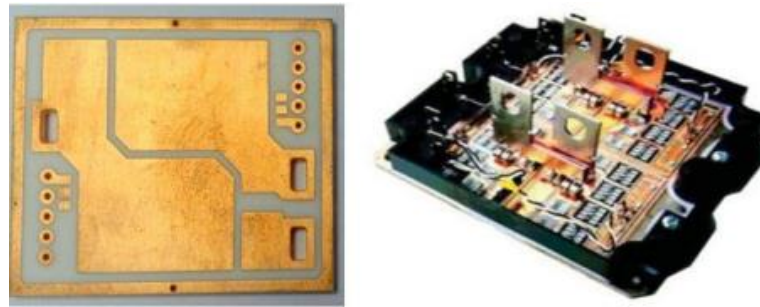


Рисунок 1 - Типова комутаційна плата з провідними доріжками та зовнішній вигляд силового модуля

При побудові високовольтних підсилювачів необхідно акцентувати увагу на їх температурному режимі та відводі тепла. Серед доступних нешкідливих керамічних плат найкращою є виготовлена на основі нітриду алюмінію кераміка «AlN», яка має теплопровідність 100-155 Вт/(м·К). Це на два порядки більше теплопровідності кераміки широкого застосування «СІТАЛЛ» [12].

Підкладки з нітриду алюмінію – найбільш перспективний кандидат для покращення розсіювання тепла в електронній техніці. Підкладки з AlN мають декілька відмінних характеристик, таких як висока теплопровідність (у 10 разів вища, ніж в оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ ), коефіцієнт теплового розширення близький до коефіцієнта теплового розширення кремнію, високі електроізоляційні властивості, низька діелектрична постійна, хороші механічні властивості, не токсичність, екологічна чистота та відносно низька вартість (питома вартість у 5-7 разів нижча питомої вартості кераміки з оксиду берилію) [10]. Нітрид-алюмінієві керамічні плати мають високу теплопровідність та за своїми параметрами придатні для використання.

Попри широке застосування керамічних план їх використання при розробці широкосмугових високовольтних підсилювачів ще не достатньо вивчено. Залишаються прогалини в методах одержання стабільного керамічного композиту на основі AlN.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Окреслена наукова проблематика з різних сторін представлена у роботах багатьох сучасних науковців. Так, наприклад, особливості виробництва керамічних плат з нітриду алюмінію та можливості їх застосування у різних пристроях представлені у статтях таких дослідників як Дж. Раухенекер, Т. Конеггер [12], Г. Окада, К. Фукуда, С. Касап, Т. Янагіда [10], М. Сігнор, Г. Решіо, К. ДеПаскалі, В. Яковаччі, П. Даріо, А. Леоне, Ф. Куаранта, Л. Франсіозо [14].

Основні динамічні фізико-хімічні властивості, зокрема параметри теплопровідності кристалічних ліній, тонких (товстих) плівок та керамічних плат типу AlN, а також можливості їх застосування у різних сферах виробництва електроніки висвітлено у роботах наступних науковців: Ю. Туз, О. Козир, А. Порхун [2], Ю. Чень, Х. Сон, Д. Лі, Х. Сунь, Х. Цзян, Г. Мяо, Ю. Чжоу [4], З. Ченг, Ю. Ко, А. Мамун, Т. Бай К. Хейн Л. Єйтс С. Грем [5], Н. Кім, М. Яралі, М. Морадня, М. Акіб, С. Ляо, Ф. Аль-Катар М. Нонг, Дж. Рьо [7], Ю. Ко, З. Ченг А. Мамун, З. Лю Т. Бай, К. Хусейн, П. Хопкінс [8], М. Негер, М. Герман, О. Фабрішна, Д. Павлючков, Х. Зайферт [9], С. Пандіт, М. Шнайдер, С. Бергер, С. Шварц, У. Шмід [11], Х. Ши, В. Лі, В. Као, Ю. Чуанг, Р. Лінь, Х. Лінь, М. Шіодзірі, М. Чен [13], М. Сігнор, Л. Веларді, К. Депаскалі, І. Кузнецова, Л. Бласі, Ф. Біскалія, Ф. Кваранта, Л. Франсіосо [15], Р. Сюй, М. Рохо, С. Іслам, А. Суд, Б. Варешкіч, А. Катре, Н. Мінго, Е. Поп [17].

Кераміка на основі нітриду алюмінію (AlN) все більше застосовується для відведення тепла у нових приладах електротехніки та електроніки [1; 2; 6]. Її отримують вільним спіканням з додаванням активаторів [5; 8; 16; 17]. Зазвичай використовують деталі розміром до 20 мм та товщиною 1 мм [11]. Сприяти підвищенню теплопровідності нітриду алюмінію можна за рахунок введення як активаторів спікання і розкислювання фтористих сполук рідкоземельних металів [7], вуглецю [14] або активних металів [4]. Однак ці методи вирішення задачі підвищення температури провідності призводять до погіршення діелектричних властивостей, зниження питомого електроопору та важливих експлуатаційних характеристик виробів із нітриду алюмінію. Вони недостатньо технологічні, неекономічні та не дозволяють отримувати високу теплопровідність кераміки. Крім того, введення у вихідну суміш різних добавок підвищує токсичність газоподібних викидів, ускладнює роботу і призводить до збільшення вартості нітриду алюмінію.

**Мета статті** полягає у одержанні температурно стабільних нітрид-алюмінієвих керамічних плат, які забезпечили б температурну стабільність вимірювальних підсилювачів

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведено серію експериментів із дослідження нанесення покриттів у температурному режимі. При цьому відстань від підкладки до підкладки становила 75 мм. Температуру підкладки вимірювали за допомогою термопари через кожні 20 секунд при досягненні температури 220°C і вище, причому на початковій стадії швидкість нагрівання сягала температури 40° С / хв. У процесі відпрацювання режимів спостерігалися випадки руйнування зразків. Оскільки нанесення відбувалося з гарячої підкладки, нагрітої до температури 1000° С, то висловлено припущення, що руйнація відбувається через тепловий вплив. Виявлено, що завдяки дифузному розсіюванню матеріалу через високий тиск у зоні нанесення відбувається запилення зворотного боку підкладки. Висока швидкість нагрівання на початковій стадії призводить до руйнування плівок (рис. 2).



Рисунок 2 - Зовнішній вигляд зразків, що піддавалися перегріву та зруйнованих у процесі нанесення покриття

Пошук нових підходів і принципів побудови пристроїв, які мають зазначені параметри, є важливим і актуальним завданням. У табл. 1 порівнюються типові властивості трьох керамічних матеріалів, які в даний час використовуються в електронних приладах, підкладках.

Таблиця 1

Електрофізичні характеристики керамічних матеріалів з оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ), карбіду кремнію (SiC), нітриду алюмінію (AlN) та оксиду берилію (BeO)

Фізичні властивості	$Al_2O_3$ [9]	SiC [18]	AlN [15]	BeO [3]
Теплопровідність при температурі 25°C, Вт / мК	20...30	150	160...240	220...240
Міцність на вигин, МПа	300...350	320...350	250...300	170...230
Електрична міцність при температурі 25°C, кВ/мм	14...18	0,07	14...17	10
Питомий електроопір при температурі 25°C, Ом см	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$
Діелектрична постійна при температурі 25°C на частоті 1 МГц	8,5...10	40...42	8,8...8,9	6,5...6,7
Тангенс кута діелектричних втрат ( $\times 10^{-4}$ ) на частоті 1 МГц	2...3	500	1...5	1...5
Коефіцієнт температурного лінійного розширення ( $\times 10^{-6}/^{\circ}C$ ) у діапазоні температур 25...400°C (для кремнію $3,5...4,0 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ )	6,7...7,3	3,7	4,3...4,6	7,5...8,0
Щільність, г/см <sup>3</sup>	3,97	3,21	3,26	3,01
Модуль Юнга, ДПа	378	460	343	378

У зв'язку з поєднанням унікальних фізичних властивостей, наприклад, високої теплопровідності, високого електричного опору та коефіцієнта теплового розширення (КТР), близького до кремнію, нітрид алюмінію (AlN) є ключовим матеріалом, що використовується як підкладка для електронних приладів високої потужності. Хоча теоретична теплопровідність кристалічного AlN при кімнатній температурі, досягає 319 Вт/мК, виміряні значення для полікристалічної кераміки AlN знаходяться в діапазоні

від найнижчого показника 17 Вт/мК до найвищого 285 Вт/мК. Цей діапазон є типовим для багатьох видів кераміки з полікристалічною структурою.

Відносно висока вартість керамічного матеріалу з нітриду алюмінію означає, що AlN, як правило, використовують вибірково, а не як повну заміну звичайних плат FR-4. Зазвичай його використовують у силовій електроніці, світлодіодах високої яскравості та аерокосмічній електроніці [13].

У таких нітридах алюмінію розподіл тепловиділення забезпечується на основі методу послідовних наближень. Спочатку задається поле температур і розподіляється парозміст. Після визначення основних фізичних констант щільності матеріалів, перерізів взаємодії для цих умов, потоку нейтронів за величиною  $j_0$ , знаходять щільність теплового потоку  $q$ . Після першої ітерації розрахунок повторюється. До ітераційних методів відносять: стаціонарний метод простих ітерацій, метод Зейделя або Гауса-Зейделя, метод спряжених градієнтів та ін.

Створення технологічного і економічного методу отримання кераміки на основі нітриду алюмінію з високою теплопровідністю та температурною стабільністю можливе при використанні порошку з мінімальним рівнем домішок і мінімальною кількістю добавок, які активують спікання. Це забезпечить високу щільність, температурну стабільність та теплопровідність кераміки на основі нітриду алюмінію.

Аналіз літературних джерел показав, що проблеми спікання щільних матеріалів з нітриду алюмінію пов'язані, з одного боку, із ковалентним характером зв'язку Al-N, що визначає необхідність високих температур спікання, а з іншого – з наявністю у вихідних порошках домішки кисню, що при спіканні проникає в решітку нітриду алюмінію, на яких і відбувається розсіювання фотонів, тобто знижується температурна стійкість матеріалу (рис. 3). Для вирішення цієї проблеми використано добавку  $Y_2O_3$  від 1 до 5% (за масою).

При взаємодії  $Y_2O_3$  з розташованими на поверхні частинками нітриду  $Al_2O_3$  утворюється рідка фаза (рис. 4), що інтенсифікує спікання при температурі  $1760^\circ C$ , а очищення решітки нітриду алюмінію від кисню (чим і досягається висока теплопровідність матеріалу) відбувається при температурі  $1800^\circ C$ . При цьому утворюється алюмоітрієвий гранат, який осаджується на поверхні.



Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта теплопровідності від кількості  $Y_2O_3$  спікаючої добавки

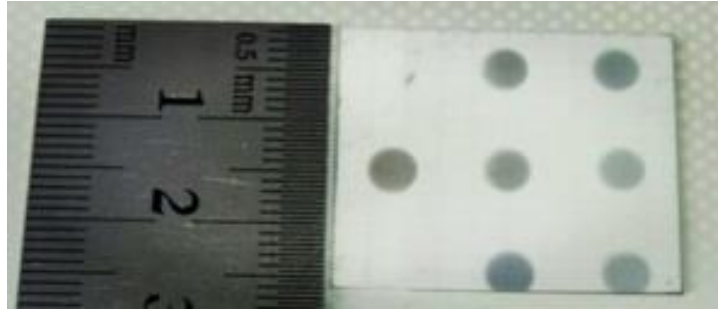


Рисунок 4 - Розпорошення задньої сторони підкладки під час покриття

На теплофізичні властивості алюмонітридної кераміки суттєво впливає метод формоутворення зразків. Метод пресування показав нерівномірну щільність, низькі електро- та теплофізичні характеристики взірців, а також низьке КПД і великі витрати при виготовленні підкладок розміром до  $200 \times 200$  мм, тому надалі для проведення експериментальних робіт ми використали метод лиття на плівку. Мікроструктура одержаних зразків із вмістом 1 та 5 % (за масою)  $Y_2O_3$  представлена на рис. 5.

З мікрофотографій видно, що вміст ітрій-алюмінієвого гранату (світла фаза в потрійних точках), який утворився при застиганні рідкої фази, приблизно однаковий. Вимірювалися електрофізичні параметри отриманих зразків та їх теплопровідність. Результати вимірювань коефіцієнта теплопровідності представлені на графіку (рис. 6).

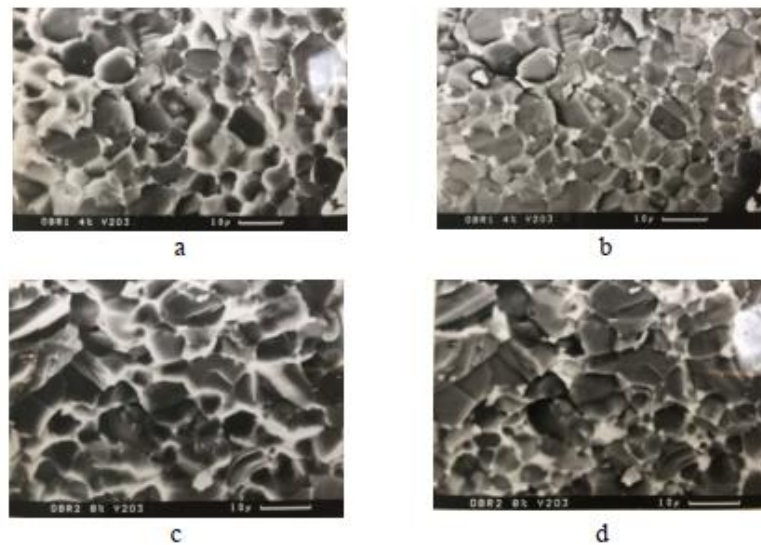


Рисунок 5 - Топологія (а, с) і фазовий контраст (b, d) зразків (злам) композиту на основі AlN, одержаних методом лиття на плівку із наступним спіканням, з різним вмістом у вихідній порошковій суміші  $Y_2O_3$ :  
1% (за масою) – а, b; 5% –с, d.

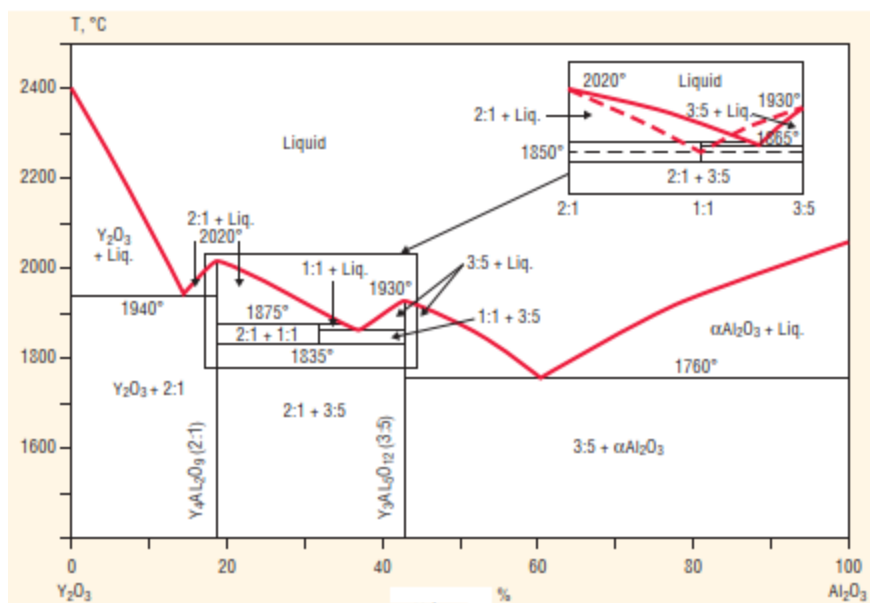


Рисунок 6 - Діаграма стану двофазної системи  $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$

У світловому теплообміні величина потоку, що падає на поверхню, залежить від кутового коефіцієнта ( $A$ ), який залежить від відношення кута до нормалі поверхні. Розрахунки підтвердили, що при використовуваних режимах довжина вільного пробігу нанесеного матеріалу в 10 разів менша, ніж відстань до джерела підкладки:

$$L = \frac{0.63}{p} = \frac{0.63}{1} = 0.63 \text{ см, } 1/10 \text{ (1)}$$

Температура підкладки вимірювалась у різних її положеннях. Результати вимірювання температури для різних положень підкладки щодо мішені представлені на рис 7.

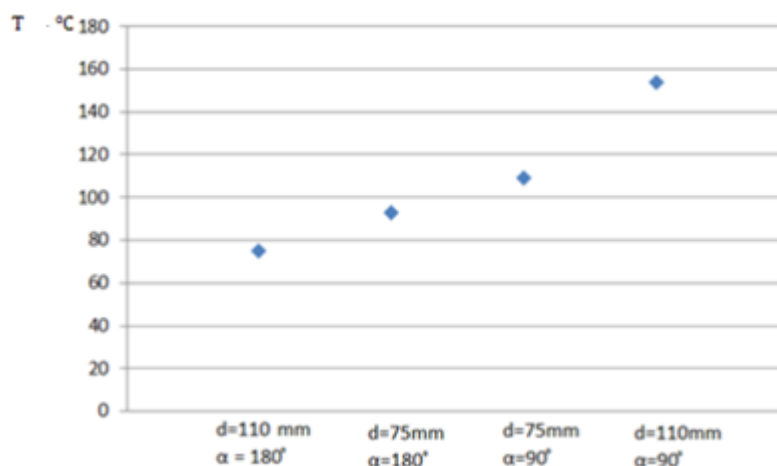


Рисунок 7 Залежність температури підкладки від кута та її розташування щодо мішені

Температура підкладки ( $d = 110$  мм,  $\alpha = 180^\circ$  становить  $75^\circ$  C), ( $d = 75$  мм,  $\alpha = 180^\circ$  становить  $93^\circ$  C), ( $d = 75$  мм,  $\alpha = 90^\circ$  становить  $109^\circ$  C) і ( $d = 110$  мм,  $\alpha = 90^\circ$



становить 153° С).

Похибка внаслідок температурного впливу має бути статичною, що спонукає використовувати методи температурної стабілізації. З точки зору особливостей конструкції та рівня потужності тепловиділення не доцільно використовувати термостати. Вольтметр з температурною корекцією і часовим розподілом каналів зображений на рис. 8.

Як показано в [13], похибки вольтметра включають адитивні і мультиплікативні похибки його блоків. Корекція похибок найбільш ефективна тоді, коли у вимірювальному каналі його мультиплікативні похибки переважають адитивні. У підсилювачів їх частотні похибки є мультиплікативними, в широкому діапазоні частот переважають адитивні. Саме тому в найбільш широкосмугових високочутливих вольтметрах застосовується мультиплікативна корекція.

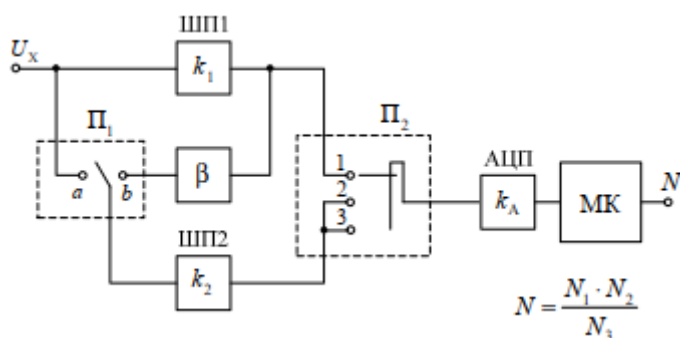


Рисунок 8 - Структурна схема вольтметра з температурною корекцією і часовим розподілом каналів

Рішення про тепловідведення з високочастотних підсилювачів з окремим віртуальним живленням не обмежується лише процесом розміщення компонентів на радіаторах. Через те, що 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. Розроблений нами високовольтний підсилювач з керамічними ізоляційними деталями розміром 60×70×5 мм складається із чотирьох мікросхем операційних підсилювачів Арех РА94 в корпусі DQ12 (рис. 9).



Рисунок 9 - Широкосмуговий високовольтний підсилювач з віртуальним живленням, який складається з чотирьох операційних підсилювачів, три з яких (ліворуч) розміщені на керамічних пластинах з нітриду алюмінію



Для усунення похибки підсилення можна використати методи ітераційної корекції. Для цього розміщуємо в кожному з трьох корпусів операційних мікросхем підсилювачі керамічної 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 і, крім того, відповідні отвори для примусового охолодження кожного операційного підсилювача окремим вентилятором. Отвір у загальному радіаторі і місце під деталь з нітриду алюмінію зображені на рис. 10.



Рисунок 10 - Вид радіатора, в якому розташоване місце під операційний підсилювач, та вид з боку охолодження

На підставі проведених досліджень зразків та аналізу отриманих даних можна стверджувати, що при використанні ітераційної корекції вплив статичної похибки може бути скомпенсований. Для використання ітераційної корекції система має бути стабільною і її параметри не повинні змінюватись у часі.

#### **Висновки:**

1. Керамічні плати AlN є особливим класом плат, які використовують унікальні переваги підкладок з нітриду алюмінію для керування температурним режимом, стійкістю та надійністю, особливо в складних умовах експлуатації.

2. Найбільш ефективно видалення кисню з кристалічної решітки нітриду алюмінію досягається при еквівалентному співвідношенні оксиду ітрію в кількості 5%. Для подальшого підвищення коефіцієнта теплопровідності та покращення теплофізичних характеристик зразків необхідне проведення додаткових досліджень у цьому напрямі.

3. Похибку підсилення усували методом ітераційної корекції, з розміщенням в трьох корпусах операційних мікросхем нітриду алюмінію розмірами  $60 \times 70 \times 5$  мм і теплопровідністю  $160 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

4. Запропоновано раціональний метод стабілізації параметрів для забезпечення спільного та однорідного температурного поля що буде впливати однаково на всі компоненти шляхом використання високо теплопровідних матеріалів.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Теплопровідність надтвердих матеріалів / І.П. Фесенко, В.З. Туркевич, В.І. Часник та ін. – Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В., 2018. – 68 с.

2. Туз Ю.М. Спосіб визначення динамічних характеристик термопар за допомогою радіоімпульсу струму / Туз Ю.М., Козир О.В., Порхун А.В. // Системи обробки інфор-

мації. – 2016. – №6. – С. 164-166.

3. Chen K. Ultrahigh Thermal Conductivity in Isotope-Enriched Cubic Boron Nitride / Chen K., Song B., Ravichandran N.K., Zheng Q., Chen X., Lee H., Sun H., Shi L. // *Science*. – 2020. – № 367. – PP. 555-559.
4. Chen Y. Influence of the Growth Temperature of AlN Nucleation Layer on AlN Template Grown by High-Temperature MOCVD / Chen Y., Song H., Li D., Sun X., Jiang H., Li Z., Miao G., Zhou Y. // *Mater. Lett.* – 2014. doi.org/10.1016/j.matlet.2013.09.096.
5. Cheng Z. Experimental Observation of High Intrinsic Thermal Conductivity of AlN / Cheng Z., Koh Y.R., Mamun A., Shi J., Bai T., Huynh K., Yates L., Graham S. // *Phys. Rev. Mater.* – 2020. – № 4. – PP. 044602.
6. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M. Martin. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – 936 p.
7. Kim N.-I. Piezoelectric Sensors Operating at Very High Temperatures and in Extreme Environments Made of Flexible Ultrawide-Bandgap Single-Crystalline AlN Thin Films / Kim N.-I., Yarali M., Moradnia M., Aqib M., Liao C.-H., AlQatari F., Nong M., Ryou J.-H. // *Adv. Funct. Mater.* – 2023. – № 33. – P. 2212538.
8. Koh Y.R. Bulk-like Intrinsic Phonon Thermal Conductivity of Micrometer Thick AlN Films / Koh Y.R., Cheng Z., Mamun A., BinHoque M.S., Liu Z., Bai T., Hussain K., Hopkins P.E. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2020. – № 12. – P. 29443–29450.
9. Neher M. Liquid Phase Formation in the System AlN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Part I. Experimental Investigations / Neher M., Hermann M., Fabrichnaya O., Pavlyuchkov D., Seifert H.J. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2013. – vol. 33. – № 13-14. – PP. 2447-2455.
10. Okada G. Aluminum Nitride Ceramic as an Optically Stimulable Luminescence Dosimeter Plate / Okada G., Fukuda K., Kasap S., Yanagida T. // *Photonics*. – 2016. – vol. 3. – № 23. doi:10.3390/photonics3020023.
11. Pandit S. Impact of AlN Seed Layer on Microstructure and Piezoelectric Properties of Y<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N (x=15%) Thin Films / Pandit S., Schneider M., Berger C., Schwarz S., Schmid U. // *Adv. Electron. Mater.* – 2023. – № 9. – PP. 2200789.
12. Rauchenecker J. Additive Manufacturing of Aluminum Nitride Ceramics with High Thermal Conductivity Via Digital Light Processing / Rauchenecker J., Konegger T. // *Open Ceramics*. – 2022. – № 9. – P. 100-215. doi:10.1016/j.oceram.2021.100215.
13. Shih H.Y. Low-Temperature Atomic Layer Epitaxy of AlN Ultrathin Films by Layer-by-Layer *Situ* Atomic Layer Annealing / Shih H.Y., Lee W.H., Kao W.C., Chuang Y.C., Lin R.M., Lin H.C., Shiojiri M., Chen M.J. // *Sci. Rep.* – 2017. doi.org/10.1038/srep39717.
14. Signore M.A. Fabrication and Characterization of AlN-based Flexible Piezoelectric Pressure Sensor Integrated into an Implantable Artificial Pancreas / Signore M.A., Rescio G., DePascali C., Iacovacci V., Dario P., Leone A., Quaranta F., Francioso L. // *Sci. Rep.* – 2019. – № 9. – P. 17130.
15. Signore M.A. Effect of Silicon-based Substrates and Deposition Type on Sputtered AlN Thin Films: Physical & Chemical Properties and Suitability for Piezoelectric Device Integration / Signore M.A., Velardi L., DePascali C., Kuznetsova I., Blasi L., Biscaglia F., Quaranta

F., Francioso L. // *Appl. Surf. Sci.* – 2022. – № 599. – PP. 154017.

16. Tuz Y.M. Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz / Tuz Y.M., Vdovychenko A.V. // *Proc. International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*. – Paris France, 2018. – PP. 8-13.

17. Xu R.L. Thermal Conductivity of Crystal line AlN and the Influence of Atomic-Scale Defects / Xu R.L., Muñoz Rojo M., Islam S., Sood A., Vareskic B., Katre A., Mingo N., Pop E. // *J. Appl. Phys.* – 2019. – № 126. – P. 185105.

18. Zheng Q. Thermal Conductivity of GaN, 71GaN, and SiC from 150 to 850 K / Zheng Q., Li C., Rai A., H. Leach J., Broido D.A., Cahill D.G. // *Phys. Rev. Mater.* – 2019. – № 3. – P. 014601.

## REFERENCES

1. Thermal conductivity of superhard materials / I.P. Fesenko, V.Z. Turkevich, V.I. Chasnyk and others. – Korsun-Shevchenkivskiy: FOP Maidachenko I.V., 2018. – 68 p. [In Ukrainian].

2. Tuz Yu.M. The method of determining the dynamic characteristics of thermocouples using a radio current pulse / Yu.M. Tuz, O.V. Kozyr, A.V. Porhun. // *Information processing systems*. – 2016. – No. 6. – P. 164-166. [In Ukrainian].

3. Chen K. Ultrahigh Thermal Conductivity in Isotope-Enriched Cubic Boron Nitride / Chen K., Song B., Ravichandran N.K., Zheng Q., Chen X., Lee H., Sun H., Shi L. // *Science*. – 2020. – № 367. – PP. 555-559. [In English].

4. Chen Y. Influence of the Growth Temperature of AlN Nucleation Layer on AlN Template Grown by High-Temperature MOCVD / Chen Y., Song H., Li D., Sun X., Jiang H., Li Z., Miao G., Zhou Y. // *Mater. Lett.* – 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.09.096>. [In English].

5. Cheng Z. Experimental Observation of High Intrinsic Thermal Conductivity of AlN / Cheng Z., Koh Y.R., Mamun A., Shi J., Bai T., Huynh K., Yates L., Graham S. // *Phys. Rev. Mater.* – 2020. – № 4. – PP. 044602. [In English].

6. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M. Martin. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – 936 p. [In English].

7. Kim N.-I. Piezoelectric Sensors Operating at Very High Temperatures and in Extreme Environments Made of Flexible Ultrawide-Bandgap Single-Crystalline AlN Thin Films / Kim N.-I., Yarali M., Moradnia M., Aqib M., Liao C.-H., AlQatari F., Nong M., Ryou J.-H. // *Adv. Funct. Mater.* – 2023. – № 33. – P. 2212538. [In English].

8. Koh Y.R. Bulk-like Intrinsic Phonon Thermal Conductivity of Micrometer Thick AlN Films / Koh Y.R., Cheng Z., Mamun A., BinHoque M.S., Liu Z., Bai T., Hussain K., Hopkins P.E. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2020. – № 12. – P. 29443–29450. [In English].

9. Neher M. Liquid Phase Formation in the System AlN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Part I. Experimental Investigations / Neher M., Hermann M., Fabrichnaya O., Pavlyuchkov D., Seifert H.J. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2013. – vol. 33. – № 13-14. – PP. 2447-2455. [In English].

10. Okada G. Aluminum Nitride Ceramic as an Optically Stimulable Luminescence Dosimeter Plate / Okada G., Fukuda K., Kasap S., Yanagida T. // *Photonics*. – 2016. – vol. 3. – № 23.

DOI: 10.3390/photronics3020023. [In English].

11. Pandit S. Impact of AlN Seed Layer on Microstructure and Piezoelectric Properties of  $YxAl_{1-x}N$  ( $x=15\%$ ) Thin Films / Pandit S., Schneider M., Berger C., Schwarz S., Schmid U. // Adv. Electron. Mater. – 2023. – № 9. – PP. 2200789. [In English].

12. Rauchenecker J. Additive Manufacturing of Aluminum Nitride Ceramics with High Thermal Conductivity Via Digital Light Processing / Rauchenecker J., Konegger T. // Open Ceramics. – 2022. – № 9. – P. 100-215. DOI: 10.1016/j.oceram.2021.100215. [In English].

13. Shih H.Y. Low-Temperature Atomic Layer Epitaxy of AN Ultrathin Films by Layer-by-Layer Situ Atomic Layer Annealing / Shih H.Y., Lee W.H., Kao W.C., Chuang Y.C., Lin R.M., Lin H.C., Shiojiri M., Chen M.J. // Sci. Rep. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep39717>. [In English].

14. Signore M.A. Fabrication and Characterization of AlN-based Flexible Piezoelectric Pressure Sensor Integrated Into an Implantable Artificial Pancreas / Signore M.A., Rescio G., DePascali C., Iacovacci V., Dario P., Leone A., Quaranta F., Francioso L. // Sci. Rep. – 2019. – № 9. – P. 17130. [In English].

15. Signore M.A. Effect of Silicon-based Substrates and Deposition Type on Sputtered AlN Thin Films: Physical & Chemical Properties and Suitability for Piezoelectric Device Integration / Signore M.A., Velardi L., DePascali C., Kuznetsova I., Blasi L., Biscaglia F., Quaranta F., Francioso L. // Appl. Surf. Sci. – 2022. – № 599. – PP. 154017. [In English].

16. Tuz Y.M. Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz / Tuz Y.M., Vdovychenko A.V. // Proc. International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). – Paris France, 2018. – PP. 8-13. [In English].

17. Xu R.L. Thermal Conductivity of Crystal Line AlN and the Influence of Atomic-Scale Defects / Xu R.L., Muñoz Rojo M., Islam S., Sood A., Vareskic B., Katre A., Mingo N., Pop E. // J. Appl. Phys. – 2019. – № 126. – P. 185105. [In English].

18. Zheng Q. Thermal Conductivity of GaN, 71GaN, and SiC from 150 to 850 K / Zheng Q., Li C., Rai A., H. Leach J., Broido D.A., Cahill D.G. // Phys. Rev. Mater. – 2019. – № 3. – P. 014601. [In English].

Received 30.09.2024.  
Accepted 05.10.2024.

### ***Use of aluminum nitride ceramic plates to ensure the temperature stability of measurement amplifiers***

*Analysis of recent research and publications. The outlined scientific issues are presented from different angles in the works of many modern scholars. For example, the peculiarities of the production of ceramic boards made of aluminum nitride and the possibilities of their use in various devices are presented in the articles of such researchers as J. Raueneker, G. Okada, Rauchenecker, T. Konegger, H. Okada, K. Fukuda, S. Kasap, T. Yanagida, M. Signor, G. Reschio, C. DePasquale, V. Iacovacci, P. Dario, A. Leone, F. Quaranta, L. Francioso.*

*The main dynamic physical and chemical properties, in particular, the thermal conductivity parameters of crystal lines, thin (thick) films and ceramic boards of the AlN type, as well as the possibilities of their application in various fields of electronics production, are*

covered in the works of the following scientists: Y. Tuz, O. Kozyr, A. Porhun, Y. Chen, H. Song, D. Li, X. Sun, H. Jiang, G. Miao, Y. Zhou, Z. Cheng, Y. Ko, A. Mamun, T. Bai, K. Hein, L. Yates, S. Graham, N. Kim, M. Yarali, M. Moradnya, M. Aqib, S. Liao, F. Al-Qatar, M. Nong, J. Rhee, Y. Ko, Z. Cheng, A. Mamun, Z. Liu, T. Bai, K. Hussein, P. Hopkins, M. Neger, M. Herman, O. Fabrishna, D. Pavlyuchkov, H. Seifert, S. Pandit, M. Schneider, S. Berger, S. Schwartz, U. Schmid, H. Shi, W. Li, W. Kao, Y. Chuang, R. Lin, H. Lin, M. Shiojiri, M. Chen, M. Signor, L. Velardi, C. Depascali, I. Kuznetsova, L. Blasi, F. Biscaglia, F. Quaranta, L. Francioso, R. Xu, M. Rojo, S. Islam, A. Sud, B. Vareskic, A. Catre, N. Mingo, E. Pop.

*The aim of the study is to obtain temperature-stable nitride-aluminum ceramic boards that would ensure the temperature stability of measuring amplifiers*

*Summary of the main material. The article presents the results of synthesis and manufacturing technology of aluminum nitride ceramics. It has been established that the introduction of various additives into the initial mixture increases the toxicity of gaseous emissions, complicates the work, and increases the cost of aluminum nitride. Large-sized parts (60×70×5 mm) with a thermal conductivity of 160 W/(m·K) from a temperature-stable ceramic composite based on AlN were obtained by free sintering for use in the development of a broadband high-voltage amplifier. It is proved that the most effective removal of oxygen from the crystal lattice of aluminum nitride is achieved at an equivalent ratio of yttrium oxide in the amount of 5%. The effect of yttrium oxide additive on the thermal conductivity of a functional composite with a ceramic matrix based on aluminum nitride obtained by free sintering was studied.*

*Conclusions. Based on the studies of the samples and the analysis of the data obtained, it can be argued that the effect of static error can be compensated for by using iterative correction. To use iterative correction, the system must be stable and its parameters must not change over time. A rational method of parameter stabilization is proposed to ensure a common and homogeneous temperature field that will affect all components equally by using highly thermally conductive materials.*

*Key words: nitride aluminates; ceramic boards; temperature stability; amplifiers; yttrium oxide; aluminum oxide; thermal conductivity; high voltage amplifier.*

**Довгаль Артем Володимирович** – аспірант, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Dovgal Artem Volodymyrovych** – postgraduate student, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.