

УДК 537.226.1:666.3-1

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-322-330

**В. І. Часник**, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
**І. П. Фесенко, О. М. Кайдаш**, доктори технічних наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державне підприємство НДІ «Оріон», 8А, вул. Антона Цедіка, 03057, м. Київ, Україна, e-mail: [vassiliyiv@gmail.com](mailto:vassiliyiv@gmail.com)

<sup>2</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 2, вул. Автозаводська, 04074, м. Київ, e-mail: [oka07@ism.kiev.ua](mailto:oka07@ism.kiev.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ І ПОГЛИНАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В КОМПОЗИТАХ $AlN-SiC$ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Досліджено керамічні композити  $AlN-SiC$ , придатні для використання у якості об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання. За великої кількості експериментальних даних встановлено взаємозв'язок між об'ємним електричним опором, добротністю та поглинанням мікрохвильового випромінювання в діапазоні частот 30–40 ГГц у напівпровідникових композитах  $AlN-SiC$  з високим вмістом частинок карбіду кремнію. В одній і тій же партії з 100 виробів поглинання мікрохвильового випромінювання змінюється лише на 10–15%. Показано, що поглинання випромінювання зростає при зменшенні об'ємного опору в композитах  $AlN-50\%SiC$ : коефіцієнт поглинання зростає в 5 разів (з 1,58 до 8,0 дБ/мм) зі зменшенням опору в 8,9 рази (з 17,8 до 2,0 кОм). Розкид значень об'ємного електричного опору ймовірно пов'язаний з опором провідних ланцюжків різної довжини, що складаються з частинок карбіду кремнію різного розміру. Для збільшення поглинання електромагнітної енергії керамічні композити  $AlN-SiC$  з високим вмістом карбіду кремнію повинні мати знижений об'ємний опір порядку 1–2 кОм.

**Ключові слова:** нітрид алюмінію, карбід кремнію, об'ємний поглинач мікрохвильового випромінювання, електричний опір, добротність, поглинання електромагнітної енергії

### Вступ

Дослідженню композитів  $AlN-SiC$  з високим вмістом карбіду кремнію від 20 до 50% присвячена велика кількість публікацій. Це пов'язане з тим, що ці композити використовуються в приладах НВЧ-техніки – магнетронах, клістродах та лампах біжучої хвилі (ЛБХ) – як об'ємні поглиначі мікрохвильового випромінювання. Найчастіше вони мають форму кілець і дисків, розміри яких безпосередньо пов'язані з діапазоном робочої смуги частот. Чим вища частота, тим менші розміри всіх деталей у вакуумній частині приладів. Відповідно, менші і розміри об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання. Так, наприклад, за частоти 30–40 ГГц діаметр кільця об'ємного поглиначя, що розміщується в резонаторі сповільнювальної системи ЛБХ, становить близько 4 мм, а його товщина – 1,0–1,2 мм. Незважаючи на такі невеликі розміри, кільця поглиначя мають поглинати значну частину відбитої НВЧ потужності. Отже, для забезпечення стійкої роботи ЛБХ поглинання НВЧ енергії повинно бути досить високим.

Керамічні композити  $AlN-SiC$  з вмістом карбіду кремнію від 40 до 50% відповідають цим вимогам. Хоча за своєю природою вони є типовими напівпровідниками з досить високим опором, який може коливатися в достатньо великому інтервалі, в залежності від кількості добавок і способів отримання композитів. Проте робіт, у яких є відомості про питомий електричний опір композитів  $AlN-SiC$ , дуже мало [1–6]. Причому ці дані помітно відрізняються

в залежності від способів спікання композитів. Найчастіше використовують гаряче пресування [1–4] або вільне спікання [5, 6]. Так, при гарячому пресуванні за вмісту 50–65% SiC питомий електричний опір змінюється на 6 порядків з  $8,9 \cdot 10^5$  Ом·см [1] до  $10^{10}$  Ом·см [2] і  $10^{12}$  Ом·см [3]. При вільному спіканні (без тиску) питомий електричний опір теж змінюється з  $10^5$  Ом·см [5] до  $6 \cdot 10^7$  Ом·см [6], тобто майже на три порядки, але це все ж значно менше, ніж при гарячому пресуванні. Тому дослідження електричного опору в композитах AlN–SiC, отриманих методом вільного спікання, на нашу думку, є перспективним завданням. Саме той факт, що питомий електричний опір вільноспечених композитів змінюється на три, а не на шість порядків, є підставою для припущення про те, що можна встановити взаємозв'язок електричного опору з поглинанням мікрохвильового випромінювання в цих композитах.

Мета роботи – на основі великої кількості експериментальних даних по питомому електричному опору композитів AlN–SiC встановити взаємозв'язок між опором та поглинанням мікрохвильового випромінювання в діапазоні частот 30–40 ГГц.

#### **Матеріали та методи дослідження**

*Характеристика вихідних порошків.* Для виготовлення вихідної шихти суміш порошків AlN, SiC та  $Y_2O_3$  розмелювали на планетарному активаторі. Порошок AlN виробництва ДЗХР (Україна) має питому поверхню  $2 \text{ м}^2/\text{г}$ . Порошки SiC пічного синтезу різної дисперсності виготовили на ЗАК (Україна). Як активатор спікання AlN використали 4%  $Y_2O_3$  виробництва КГМК (Киргизстан). Композити одержали вільним спіканням у шахтній печі опору за температури  $1900 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 60 хв у середовищі азоту. Технологічні подробиці їх виготовлення докладно описані у [7]. В подальшому для спрощення будемо позначати склад композита як AlN–50%<sup>1</sup>SiC.

За даними гранулометричного аналізу порошок SiC складається з двох фракцій. Середній діаметр частинок карбиду кремнію у субмікронній фракції дорівнює 0,34 мкм, а у мікронній фракції – 2,4 мкм. З усього діапазону розмірів мікронна фракція SiC становить 23%, а субмікронна – 77%. З яких частинок SiC сформуються провідні ланцюжки, що визначають електричний опір, процес є більшою чи меншою мірою випадковим і при спіканні не контрольованим.

Досліджено три партії виробів з композита AlN–50%SiC: дві партії дисків розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм по 20 і 40 шт. і 20 шт. кілець розміром  $\varnothing 4,2 \times \varnothing 1,9 \times 1,0$  мм.

*Методи дослідження.* Вимірювання електричного опору виготовлених композитів не вимагає вартісного обладнання та спеціальної апаратури. Усі виміри опору зразків проводяться за постійного струму, а отже, не залежать від частоти електромагнітного випромінювання (коливання) електромагнітної хвилі. Привабливою стороною вимірювань електричного опору композитів є безсумнівна простота на відміну від вимірювання чи визначення інших електрофізичних характеристик композитів – таких як діелектрична проникність, теплопровідність, чи поглинання мікрохвильового випромінювання. Тим більше, що саме для таких вимірювань необхідні зразки композитів певного розміру і з досить високою точністю. Найчастіше необхідне не тільки шліфування, а й полірування поверхні. А для вимірювання опору зразків високої точності їх розмірів не потрібно.

Електричний опір дисків розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм з добротністю  $Q = 50$ , виготовлених з композита AlN–50%SiC, вимірювали двома приладами: цифровим мультиметром UT 30D у модифікованій струбціні (рис. 1) та приладом Л2-56 – вимірювачем характеристик напівпровідникових приладів – за напруги  $U = 3,5$  і струму  $I = 0,52\text{--}0,56$  мА. Похибка

---

<sup>1</sup> Тут і надалі склад композитів наведено у % (за масою)

вимірювання опору цифровим мультиметром UT 30D становить 0,05%, тобто  $\pm 10$  Ом на шкалі 20 кОм. Прилад Л2-56 вимірює струми від  $1 \cdot 10^{-9}$  до 1 А та напругу від  $1 \cdot 10^{-3}$  до 103 В.

Вигляд модифікованої струбцини показано на рис. 1, її опис наведено нижче.

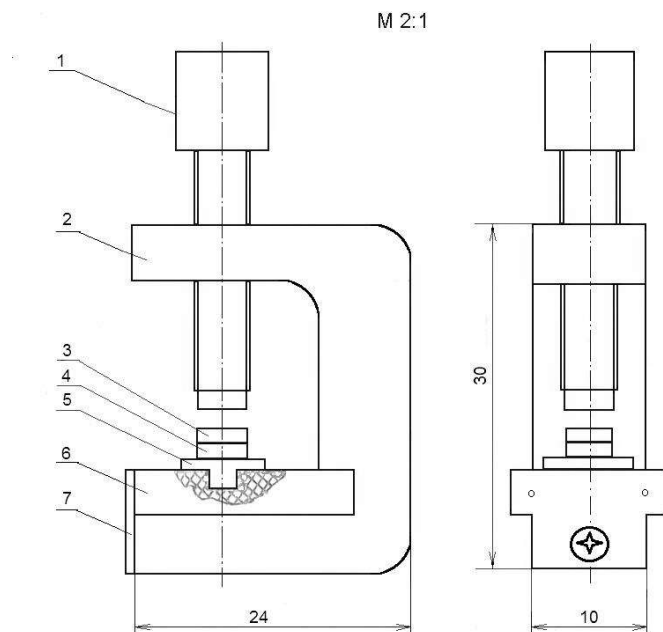


Рис. 1. Струбцина для забезпечення належного контакту при вимірюванні електричного опору в зразках композита  $AlN-SiC$ : 1 – гвинт з різьбою M5, 2 – корпус струбцини, 3 – мідний диск, 4 – зразок для вимірювання, 5 – латунний диск, 6 – пластина з фторопласту, 7 – фіксуюча пластина

Струбцина потрібна для забезпечення належного сильного притискання зразка для вимірювання електричного опору між мідним і латунним дисками, до яких приєднуються проводи мультиметру.

Корпус струбцини (2) виготовлений зі сталі та покритий шаром нікелю товщиною 10–12 мкм (рис. 1). На основі корпусу шириною 10 мм та висотою 5 мм розташована пластина з фторопласту  $\Phi$ -4 (6) розміром  $20 \times 14 \times 4$  мм. Пластина має два виступи довжиною 3 мм і товщиною 2 мм, що фіксують її положення щодо основи струбцини від зміщення праворуч-ліворуч. Щоб уникнути зсування пластини з  $\Phi$ -4 вперед-

назад, вона зафіксована пластиною (7) з латуні. Пластина (7) прикріплена до основи струбцини гвинтом. У пластині (7) є два отвори для штифтів  $\varnothing 1$  мм довжиною 5 мм, що фіксують пластину з  $\Phi$ -4. На цій пластині розташований диск  $\varnothing 8 \times 1$  мм з латуні ЛЗ-59 (5). Диск (6) має невелику циліндричну частину  $\varnothing 3 \times 2$  мм.

Цей виступ входить в пластину з фторопласту і надійно фіксується в проточці 3 мм глибиною 2,5 мм. Шорсткість поверхні диска (5) і мідного диска (3), що дотикаються до вимірюваного зразка (4) з композита  $AlN-SiC$ , становить не більше 1,2 мкм, для належного контакту при вимірюванні електричного опору зразка. Головка гвинта (1) з різьбленням M5 має накатку для виключення прослизання при остаточному притисканні гвинтом (1) мідного диска (3) до вимірюваного зразка (4) та латунного диска (5).

Питомий електричний опір  $R_{пит}$  (у Ом·см) обчислюється за відомим співвідношенням:

$$R_{пит} = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{h} = R \cdot \frac{\pi r^2}{h_d} \quad (1)$$

де  $U$  – напруга в В,  $I$  – струм в А,  $S$  – поперечний переріз провідника (зразка) довжиною  $h$ , виражений в см,  $R$  – об'ємний електричний опір в Ом. Для випадку диска:  $r$  – радіус диска в см,  $h_d$  – його товщина в см.

Питомий електричний опір для дисків  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм становить  $R_{\text{пит}} = 1,4R$  (Ом·см), а для кілець  $\varnothing 4,2 \times \varnothing 1,9 \times 1,0$  мм –  $R_{\text{пит}} = 1,1R$  (Ом·см). Надалі всі значення наводяться для об'ємного електричного опору в кОм.

Вимірювання затухання (ослаблення) мікрохвиль в децибелах (дБ) в кільці поглинача проводили на Панорамному вимірювачі КСХН<sup>2</sup> та ослаблення Р2–65, який працює в частотному діапазоні 25,9–37,7 ГГц, з перерізом високочастотного (ВЧ) тракту 7,2×3,4 мм. Похибка вимірювання затухання на фіксованій частоті становить менше 5 %. Докладно метод вимірювання затухання в кільці поглинача композита описано в [7]. Для співставлення затухання в зразках об'ємних поглиначів, що мають різні розміри, зазвичай використовують коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії  $L$  (в дБ/мм), тобто затухання в поглиначі у відношенні до одиниці довжини.

Розміри резонатора  $\varnothing 5,5 \times 10$  мм спеціально обрані такими, щоб досліджувати добротність дисків або кілець в діапазоні частот 33–35 ГГц. Досліджували добротність  $Q$  кожного зразка з композита AlN–SiC, що чисельно дорівнює відношенню резонансної частоти  $f_0$  до ширини резонансної кривої  $\Delta f$  на рівні половинної потужності:  $Q = f_0/\Delta f$ . Добротність обернено пропорційна затуханням, тобто, чим більша ширина резонансної кривої (чим більше  $\Delta f$ ), тим більше затухання. Тобто,  $Q$  визначає рівень поглинання НВЧ випромінювання в циліндричному резонаторі – чим менша добротність, тим вище поглинання.

### Результати та їх обговорення

На рис. 2 наведено значення електричного опору для десяти дисків з композита AlN–50%SiC, виміряні двома приладами: цифровим мультиметром UT 30D (1) та приладом Л2-56

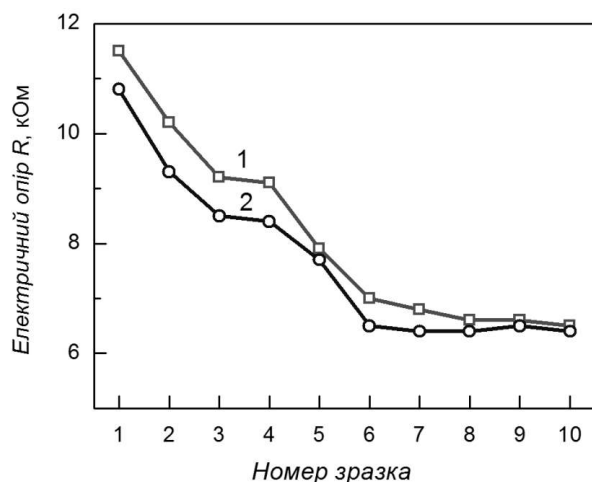


Рис. 2. Електричний опір композита AlN–50%SiC, визначений по 10-ти дискам розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм, виміряний цифровим мультиметром UT 30D (1) та приладом Л2-56 (2)

(2) – вимірювачем характеристик напівпровідникових приладів. Як видно із рис. 2, електричний опір, визначений цими двома приладами, мало відрізняється один від одного для одних і тих же дисків.

Максимальна відмінність у трьох дисках становить 8%. Середнє значення опору і  $R_{\text{сер}} = 8,1$  кОм (1) та  $R_{\text{сер}} = 7,7$  кОм (2). Відмінність по середнім значенням опору складає лише 5%. Отже, для практичних цілей виміряні значення електричного опору дисків у струбціні (рис. 1) досить точні та достовірні. Тому всі подальші значення електричного опору у цій роботі проведено на цифровому мультиметрі UT 30D. Слід зазначити, що всі десять дисків мають

одне і те саме значення добротності  $Q = 50$ , тобто, поглинання мікрохвильового випромінювання у них однакове і становить  $L = 4,9$  дБ/мм. Разом з цим існує розкид значень щодо опору від 6,5 до 11,5 кОм – у 1,77 рази (1), та від 6,4 до 10,8 кОм – у 1,69 рази (2). Це свідчить про те, що електричний опір у зразках дослідженого композита AlN–50%SiC більш

<sup>2</sup> КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі

чутливий до різного роду відмінностей та змін у макроструктурі дисків, ніж поглинання мікрохвильового випромінювання. І, ймовірно, це пов'язане як із розмірами частинок SiC, з яких формуються ланцюжки, так і з відстанями між сусідніми частинками у цих ланцюжках.

Розкид значень по електричному опорі у 1,7–1,8 разів у десяти дисках (рис. 2) показав, що для з'ясування взаємозв'язку опорі з поглинанням мікрохвильового випромінювання та для виключення випадковостей у визначенні середнього значення опорі в групі з малою зміною добротності необхідно брати для аналізу досить велику кількість зразків. Тому для достовірно визначеного значення середнього опорі з кілець та дисків було сформовано три групи зразків. У цих групах значення добротності, виміряної в резонаторі  $\varnothing 5,5 \times 10$  мм, а отже, і поглинання мікрохвильового випромінювання відрізнялося на 5–8%. Розподіл зразків композита AlN–50%SiC по електричному опорі у цих трьох групах представлено на рис. 3: для 20 шт. кілець  $\varnothing 4,2 \times \varnothing 1,9 \times 1,0$  мм з добротністю  $34 \leq Q \leq 38$  (а), 40 шт. дисків  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм з добротністю  $48 \leq Q \leq 52$  (б), та 20 шт. дисків  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм із добротністю  $88 \leq Q \leq 92$  (в).

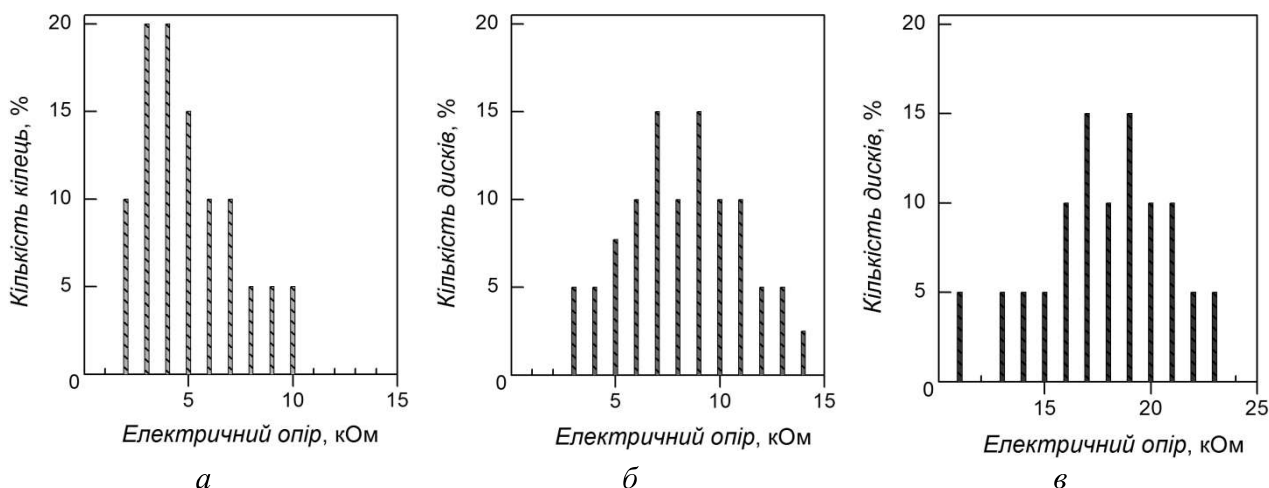


Рис. 3. Характеристика зразків композита AlN–50%SiC по електричному опорі для партії: з 20 шт. кілець за добротності  $34 \leq Q \leq 38$  (а); 40 шт. дисків за добротності  $48 \leq Q \leq 52$  (б); 20 шт. дисків за добротності  $88 \leq Q \leq 92$  (в)

Як випливає з рис. 3, розкид значень по електричному опорі становить до 5 разів для кілець, до 4,7 разів для дисків з добротністю  $48 \leq Q \leq 52$  і до 2,1 разів для дисків з  $88 \leq Q \leq 92$ .

Розраховані середні значення опорі для кожної з трьох груп зразків складають: 5 кОм за  $Q_{\text{сер}} = 36$  для кілець у першій групі, 8,2 кОм за  $Q_{\text{сер}} = 50$  для дисків у другій групі та 14,9 кОм за  $Q_{\text{сер}} = 90$  для дисків у третій групі. Ці результати представлені на рис. 4 точками 2, 3, 4. Серед партії виготовлених кілець були два кільця з опором 2 кОм та  $Q = 27$ . Ці значення відповідають т. 1 на рис. 4.

У двох партіях виготовлених дисків  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм (по 100 шт. у кожній), було 7 дисків з добротностями  $117 \leq Q \leq 123$ , тобто  $Q_{\text{сер}} = 120$ . Їхні опори склали 13, 14, 16, 18, 19, 21 і 24 кОм, тобто  $R_{\text{сер}} = 17,8$  кОм. Ці середні значення опорі і добротності позначено на рис. 4 точкою 5. Таким чином, крива на рис. 4 показує взаємозв'язок середнього значення електричного опорі в інтервалі  $2,0 \leq R_{\text{сер}} \leq 17,8$  кОм та середнього значення добротності в інтервалі  $27 \leq Q \leq 120$ . Як видно з рис. 4, що більший опір, то більша і добротність зразків композита AlN–50%SiC.

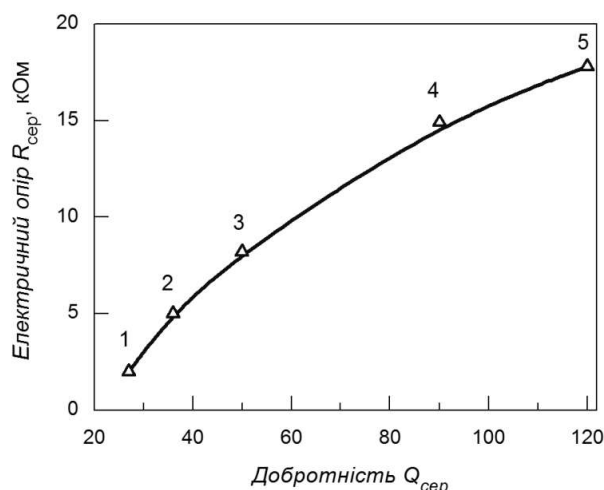


Рис. 4. Взаємозв'язок середнього об'ємного електричного опору  $R_{сер}$  та середньої добротності  $Q_{сер}$  композита AlN–50%SiC в кільцях розміром  $\varnothing 4,2 \times \varnothing 1,9 \times 1,0$  мм (1, 2) та у дисках розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм (3, 4, 5)

електромагнітної енергії  $L$  та середнього об'ємного електричного опору композита AlN–50%SiC, – це точки 1, 2 у кільцях та точки 3, 4, 5 у дисках. Цей взаємозв'язок носить закономірний характер – чим менший об'ємний опір, тим більшим є поглинання електромагнітної енергії (мікрохвильового випромінювання). Принаймні при вимірюванні

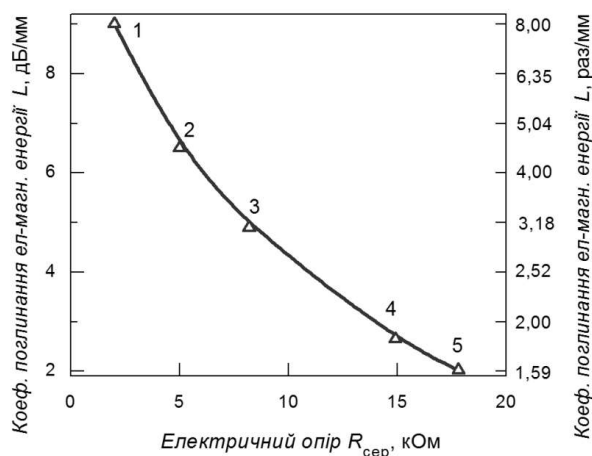


Рис. 5. Взаємозв'язок коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії  $L$  і середнього об'ємного електричного опору  $R_{сер}$  композита AlN–50%SiC в кільцях розміром  $\varnothing 4,2 \times \varnothing 1,9 \times 1,0$  мм (1, 2) та в дисках розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм (3, 4, 5)

4,1 рази (з 8,2 до 2,0 кОм – див. точки 3 і 1), то поглинання збільшиться на 4,1 дБ/мм (з 4,9 до 9,0 дБ/мм), що відповідає збільшенню поглинання у 2,5 рази.

Це дуже суттєве збільшення поглинання електромагнітної енергії особливо важливе для виготовлення об'ємних поглиначів, призначених для роботи в приладах НВЧ міліметрового діапазону хвиль (30–300 ГГц). Тому тепер перед фахівцями-матеріалознавцями можна поставити цілком конкретне завдання – отримати композити AlN–SiC не тільки з

Як відомо, добротність однозначно пов'язана з поглинанням мікрохвильового випромінювання, тобто поглинання буде тим більшим, чим меншою буде добротність зразків. Цей встановлений взаємозв'язок поглинання та добротності для кілець та дисків, вимірний у резонаторі  $\varnothing 5,5 \times 10$  мм у діапазоні частот 34,1–34,2 ГГц, наведено у [8].

З урахуванням цієї інформації побудовано залежність на рис. 5, що показує взаємозв'язок коефіцієнта поглинання

опору композита AlN–50%SiC від одиниць до десятків кОм, це твердження можна вважати встановленим фактом. Так, наприклад, зменшення опору в 2,5 рази (з 5,0 до 2,0 кОм – точки 1 та 2 на рис. 4) призводить до зростання поглинання електромагнітної енергії з 6,5 до 9,0 дБ/мм, тобто на 2,5 дБ/мм, що відповідає збільшенню у 1,8 рази. Якщо ж зменшити опір композита AlN–SiC в

високою теплопровідністю і високим вмістом карбїду кремнію, але одночасно з цим з метою збільшення поглинання – знизити об'ємний питомий електричний опір до величини 1–2 кОм.

Тим більше, що труднощів у його вимірюванні та контролі немає. При створенні цих композитів головною рекомендацією є одне – достовірними значеннями об'ємного електричного опору вважатимуться лише його середні значення, виміряні на десятках зразків однієї і тієї ж виготовленої партії. При цьому розкид значень опору до 2-х разів при тій же добротності або тому самому поглинанні можна вважати цілком прийнятним результатом для розробленого композита AlN–SiC.

На макроскопічному рівні розкид значень вимірюваного об'ємного електричного опору пов'язаний головним чином з опором провідних ланцюжків, що складаються з частинок карбїду кремнію різних розмірів, і з проміжками між частинками SiC у цих провідних ланцюжках. Частинки випадковим чином збираються в провідні ланцюжки і їх кількість нам невідома. Важливо те, що сумарний опір має бути близько 1–2 кОм при хорошій повторюваності значень опору від партії до партії.

Виміряна добротність зразків і пов'язане з нею поглинання електромагнітної енергії визначається лише вмістом SiC, присутністю різних домішок і дефектів кристалічної ґратки карбїду кремнію. А все це визначається складом спеченого композита, і тому зразки з однієї партії за значенням добротності відрізняються всього на 5–10%, незалежно від форми зразків (кільця або диски). На мікроскопічному (атомному) рівні поглинання електромагнітної енергії залежить від кількості вільних електронів, що взаємодіють з квантами електромагнітного поля, тобто з квантами електромагнітної хвилі. Ця хвиля має певну частоту та відповідну цій частоті енергію. У нашому випадку ця частота становить 34,1–34,2 ГГц. На цій частоті фотони (кванти електромагнітної хвилі) мають енергію близько  $1,4 \cdot 10^{-4}$  еВ.

Електрон, поглинаючи фотон з такою енергією, знаходиться у збудженому стані близько  $10^{-8}$  с, а потім випромінює фотон на тій же частоті в навколишній простір. У нашому випадку – переважно в ту саму частинку карбїду кремнію. Глибина проникнення фотонів становить приблизно 100 нм, що відповідає близько 200 площинам кристалічної ґратки карбїду кремнію. Таким чином, майже весь процес поглинання та випромінювання фотонів відбувається всередині частинок SiC, тобто всередині об'єму композита AlN–SiC. Тому великого розкиду у рівні поглинання електромагнітного випромінювання у зразках композита, виготовлених з однієї партії за однакових умов (температурі та тривалості спікання, тиску), не може бути. Цілком ясно, що кількість вільних електронів, що взаємодіють з фотонами електромагнітної хвилі, не залежить від того, яким чином частинки SiC збираються в провідні ланцюжки або провідні конгломерати.

### **Висновки**

Аналіз експериментальних даних по питомому об'ємному електричному опору та поглинанню електромагнітної енергії дозволив встановити, що між ними існує певна кореляція у композитах AlN–50%SiC. Причому цей взаємозв'язок носить закономірний характер: поглинання електромагнітної енергії тим більше, чим менший об'ємний електричний опір.

Значний розкид значень за величиною електричного опору завжди існує навіть у одній партії виробів з композита AlN–SiC, виготовлених за однакових умов спікання. Варто наголосити, що навіть за одного і того ж значення поглинання електромагнітної енергії електричний опір композита може відрізнятися до 2 разів.

Розкид значень об'ємного опору, ймовірно, пов'язаний з опором провідних ланцюжків різної довжини, що складаються з частинок карбїду кремнію різного розміру.

Встановлено, що з метою збільшення поглинання електромагнітної енергії керамічні композити AlN–SiC з високим вмістом карбіду кремнію повинні мати об'ємний опір порядку 1–2 кОм.

V. I. Chasnyk<sup>1</sup>, I. P. Fesenko<sup>2</sup>, O. M. Kaidash<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Enterprise Scientific Research Institute ORION

<sup>2</sup>Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

### STUDY OF ELECTRICAL RESISTANCE AND ABSORPTION OF MICROWAVE RADIATION IN AlN–SiC COMPOSITES WITH A HIGH SILICON CARBIDE CONTENT

*AlN–SiC ceramic composites suitable for use as bulk microwave absorbers has been studied. With a large amount of experimental data, a relationship between the volume electrical resistance, the quality factor, and the absorption of microwave radiation in the frequency range of 30–40 GHz has been established in AlN–SiC semiconductor composites with a high content of silicon carbide particles. In the same batch of 100 products, the absorption of microwave radiation changes by only 10–15%. It is shown that the absorption of radiation increases with a decrease in the volume resistance in the AlN–50% SiC composites: the absorption coefficient increases by a factor of 5 (from 1.58 to 8.0 dB/mm) with a decrease in resistance by a factor of 8.9 (from 17.8 up to 2.0 kΩ). The scatter in the values of volumetric electrical resistance is probably related to the resistance of leading chains of different lengths, consisting of silicon carbide particles of different sizes. To increase the absorption of electromagnetic energy, AlN–SiC ceramic composites with a high content of silicon carbide should have a reduced volume resistance on the order of 1–2 kΩ.*

**Key words:** aluminum nitride, silicon carbide, bulk absorber of microwave radiation, electrical resistance, quality factor, absorption of electromagnetic energy

### Література

1. Гетьман О. И., Коблянский Ю. В., Зависяк И. В. и др. Электрофизические характеристики высокопоглощающей керамики на основе системы AlN–SiC // Порошковая металлургия. – 2019. – № 9/10. – С. 24–35.
2. Kim K. J., Kim Y. W., Lim K. Y., Nishimura T., Narimatsu E. Electrical and thermal properties of SiC–AlN ceramics without sintering additives // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – Vol. 35. – P. 2715–2721.
3. Avrov D.D., Bakin A.S., Dorozhkin S.I., et al. Electrical conductivity of ceramics of SiC–AlN, SiC–BeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the temperature range 300–1800 K // High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference. (Cat. No. 98EX132). – 1998. – P. 196–198.
4. Kim K.J., Lim K.-Y., Kim Y.-W. Control of electrical resistivity in silicon carbide ceramics sintered with aluminum nitride and yttria // J. Am. Ceram. Soc. – 2013. – Vol. 96, N 11. – P. 3463–3469.
5. Lu Y., Zang X., Du B. Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN–SiC composite ceramic // Materials Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 261, N 1. – P. 124222–124229.
6. Сербенюк Т.Б., Прихна Т.О., Свердун В.Б., та ін. Вплив добавки Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на структуроутворення та властивості композиційних матеріалів на основі AlN–SiC // Надтверді матеріали. – 2018. – № 1. – С. 12–22.
7. Часник В. І., Часник Д. В., Фесенко І. П., Кайдаш О. М. Дослідження теплопровідності, питомого електричного опору і поглинання мікрохвильового випромінювання вільноспечених композитів AlN–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Mo і AlN–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiN //

Надтверді матеріали. – 2020. – № 3. – С. 51–65.

8. Часник В. І., Кайдаш О. М., Вовк Л. М., Фесенко І. П. Вплив дисперсності карбіду кремнію на діелектричні характеристики, теплопровідність і поглинання мікрохвильового випромінювання вільноспечених композитів AlN–(20–50)%SiC // Порошкова металургія. – 2021. – № 11–12. – С. 31–39.

Надійшла 11.06.22

### References

1. Getman, O., Kobljanskyj, Yu. V., Zavislyak, I. V., et al. (2019). Electrical characteristics of highly-absorbing ceramics in the AlN–SiC system. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 9/10, 24–35.
2. Kim, K. J., Kim, Y. W., Lim, K. Y., et al. (2015). Electrical and thermal properties of SiC–AlN ceramics without sintering additives. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 35, 2715–2721.
3. Avrov, D. D.; Bakin, A. S.; Dorozhkin, S. I.; et al. (1998). Electrical conductivity of ceramics of SiC–AlN, SiC–BeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the temperature range 300–1800 K. *High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference*. (Cat. No. 98EX132). 196–198.
4. Kim, K. J., Lim, K.-Y., & Kim, Y.-W. (2013). Control of electrical resistivity in silicon carbide ceramics sintered with aluminum nitride and yttria. *J. Am. Ceram. Soc.* 96, 11, 3463–3469.
5. Lu, Y., Zang, X., & Du, B. (2021). Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN–SiC composite ceramic. *Materials Chemistry and Physics.*, 261, 1, 124222–124229.
6. Serbenyuk, T. B., Prikhna, T. O., Sverdun, V. B., et al. (2018). Effect of the additive of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the structure formation and properties of composite materials based on AlN–SiC. *J Superhard Mater.*, 40, 1. 8–15. doi.: 10.3103/S1063457618010021.
7. Chasnyk, V. I., Chasnyk, D. V., Fesenko, I. P., & Kaidash O. M. (2020). A study of the thermal conductivity, electrical resistivity and microwave absorption of pressureless sintered AlN–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Mo and AlN–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiN composites. *J. Superhard Mater.*, 42, 3, 165–176.
8. Chasnyk, V. I., Kaidash, O. M., Vovk, L. M., & Fesenko, I. P. (2021). Influence of the silicon carbide dispersion on dielectric characteristics, thermal conductivity and microwave radiation absorption of pressureless sintered AlN–(20–50)%SiC composites. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 11–12, 31–39.