

**В. І. Часник<sup>1,\*</sup>, Д. В. Часник<sup>2</sup>, О. М. Кайдаш<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Державне підприємство НДІ “Оріон”, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

\*vassiliyiv@gmail.com

## **Дослідження поверхневого та об'ємного електричного опору вільноспечених композитів AlN–50 % (за масою) SiC**

*Досліджено електричний опір вільноспечених керамічних композитів AlN–50 % (за масою) SiC, придатних для використання як об'ємні поглиначі мікрохвильового випромінювання. Для чотирьох груп зразків з добротністю  $Q = 30, 33, 37, 44$  середні значення поверхневого опору складають 42, 64, 92, 136 кОм, а середні значення об'ємного опору – 2,8, 4,1, 5,2, 7,0 кОм відповідно. Аналіз масиву експериментальних даних виявив взаємозв'язок між поверхневим та об'ємним електричним опором – більшому об'ємному опору переважно відповідає більший поверхневий опір, причому з ростом добротності від 30 до 44 поверхневий опір більший об'ємного у 14,7–19,5 разів.*

**Ключові слова:** *поверхневий та об'ємний електричний опір, нітрид алюмінію, карбід кремнію, об'ємний поглинач мікрохвильового випромінювання, добротність, поглинання електромагнітної енергії, вимірювання поверхневого електричного опору.*

### **ВСТУП**

Особливістю застосування об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання в електровакуумних приладах мікрохвильової техніки є те, що конструктивно вони містяться у тій частині приладу, де близько протікає електронний потік. А оскільки струмопроходження потоку, особливо у робочому режимі, практично завжди менше 100 %, це призводить до того, що електрони з пучка, рухаючись, осідають на сповільнювальній системі (СпС), а деякі з них попадають на поверхню об'ємного поглинача. Якщо об'ємний опір матеріалу поглинача великий ( $10^9$ – $10^{12}$  Ом), тобто провідність матеріалу поглинача є малою ( $10^{-12}$ – $10^{-9}$  См), то відбувається накопичення заряду на його поверхні. Це може призвести до пробойів і навіть руйнування поглинача і, як наслідок, до виходу з ладу всього надвисокочастотного (НВЧ) приладу. Тому бажано, щоб на постійному струмі матеріал поглинача мав достатню провідність, тоді навіть помірна ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$  См) провідність сприятиме розсіюванню накопиченого поверхневого заряду на поглиначі мікрохвильового випромінювання, і тим самим відверне пробій та іскріння у приладі НВЧ [1]. Особливо важливо це для приладів НВЧ із середньою та великою вихідною потужністю у сотні ват і одиниці кіловат, коли на СпС приладу попадає від десятків до сотень ват потужності мікрохвильового випромінювання. Оскільки частина цієї потужності потрапляє на поглиначі, важливим параметром

для об'ємного поглинача мікрохвильового випромінювання, поряд зі значеннями діелектричної проникності  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  і  $\tan \delta$  та об'ємного опору матеріалу, є значення поверхневого опору.

Керамічні композити AlN–SiC з вмістом карбіду кремнію від 20 до 50 % за своєю природою є типовими напівпровідниками з досить високим опором, який може коливатися у великому інтервалі, в залежності від кількості добавок і способу отримання композита. Проте робіт, у яких є відомості про об'ємний чи питомий електричний опір композитів системи AlN–SiC, небагато [2–12], а публікація, яка містила дані про поверхневий електричний опір композитів AlN–SiC, є тільки одна [9]. Це може бути пов'язане з тим, що зазвичай для вимірювання поверхневого електричного опору застосовують чотиризондовий метод вимірювання, а для цього треба мати не тільки зразок доволі великих розмірів, але і приєднувальні електроди спеціальної форми і розмірів. Так, наприклад, розмір центрального (екранованого) електроду складає 22,5 мм. У такому разі діаметр вимірюваного зразку композита має бути близьким до 30 мм, а його товщина – до 3–5 мм. Зрозуміло, що у даному разі для дисків композита розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм ця методика вимірювання поверхневого електричного опору непридатна, тому було використано методику вимірювання малих за розміром зразків композита AlN–50SiC<sup>1</sup> для визначення поверхневого електричного опору за допомогою тільки двох приєднувальних електродів. Для іншої (більшої) кількості електродів на поверхні диска малого розміру місця недостатньо.

Метою роботи було дослідження поверхневого і об'ємного електричного опору вільноспеченого композита AlN–50SiC за допомогою цифрового мультиметра UT 30D на малих за розміром зразках – дисках діаметром 4,2 мм та встановлення взаємозв'язків між поверхневим та об'ємним електричним опором композитів з використанням масиву експериментальних даних.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### Характеристика вихідних порошків

Для виготовлення вихідної шихти суміш порошків AlN, SiC та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> розмелювали на планетарному активаторі. Порошок AlN виробництва БАТ “Донецький завод хімічних реактивів” (Україна) має питому поверхню 2 м<sup>2</sup>/г. Порошки SiC пічного синтезу різної дисперсності було виготовлено на ПрАТ “Запорізький абразивний комбінат” (Україна). Як активатор спікання AlN використано 4 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> виробництва Киргизького гірничо-металургійного комбінату (Киргизстан). Диски з композита, сформовані холодним одноосовим пресуванням, одержували вільним спіканням у шахтній печі опору за температури 1900 °C протягом 60 хв у середовищі азоту.

За даними гранулометричного аналізу порошок SiC складався з двох фракцій. Середній розмір частинок карбіду кремнію у субмікронній фракції дорівнював 0,34 мкм, а у мікронній фракції – 2,4 мкм. З усього діапазону розмірів субмікронна фракція SiC становила 77 %, а мікронна – 23 %. З яких частинок SiC формуються провідні ланцюжки, що визначають електричний опір, є процесом більшою чи меншою мірою випадковим і під час спікання не контролюваним.

### Методи дослідження

Добротність дисків з композита AlN–SiC вимірювали в резонаторі діаметром 5,5 мм і висотою 10 мм, який розташовували у височастотному (ВЧ)

<sup>1</sup> Тут і надалі склад композитів наведено у % (за масою) та позначено як AlN–50SiC.

тракті Панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою та ослаблення Р2–65, який працює в частотному діапазоні 25,9–37,7 ГГц, з перерізом ВЧ тракту 7,2×3,4 мм. Похибка вимірювання становила менше 5 %.

Розміри резонатора  $\varnothing 5,5 \times 10$  мм спеціально обрані такими, щоб визначати 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 згасанню, тобто, чим більша ширина резонансної кривої (чим більше  $\Delta f$ ), тим більше згасання. Тобто добротність  $Q$  визначає рівень поглинання НВЧ випромінювання в циліндричному резонаторі – чим менша добротність, тим вище поглинання.

Було визначено добротність 300 шт. дисків розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм, виготовлених з композита AlN–50SiC. Для дослідження відібрано 48 шт. дисків, які було поділено на чотири групи по 12 шт. за добротністю  $Q$ , що становила 30, 33, 37, 44.

Вимірювання електричного опору зразків виготовлених композитів проведено за постійного струму, а отже, їхній опір не залежить від частоти електромагнітного випромінювання електромагнітної хвилі.

Електричний опір дисків вимірювали цифровим мультиметром UT 30D за напруги 9 В за шкалою 20 та 200 кОм. Похибка вимірювання опору становила 0,05 %, тобто  $\pm 10$  Ом за шкалою 20 кОм та  $\pm 100$  Ом за шкалою 200 кОм.

Вимірювання об'ємного електричного опору дисків композита проводили мультиметром у модифікованій струбчині, детальний опис якої зроблено в [11]. Струбцина для вимірювання електричного опору потрібна для забезпечення належного сильного затискання зразка між мідним і латунним дисками, до яких приєднуються проводи мультиметра.

Вимірювання поверхневого електричного опору малих за розміром зразків композита (діаметром менше 5 мм) проводили двозондовим методом. За допомогою шаблона-трафарета (диска з нержавіючої сталі) наносили контактні площадки на поверхню композита. Спочатку наносили шар з міді за допомогою мідного стрижня, а після цього формували другий шар стрижнем з латуні. Якщо не наносити два шари (міді і латуні), то значення поверхневого опору буде визначатися з перевищенням на 30–50 %.

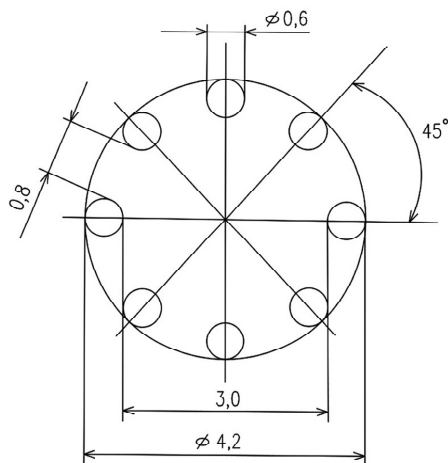


Рис. 1. Розташування чотирьох пар контактних площадок  $\varnothing 0,6$  мм на поверхні диска  $\varnothing 4,2$  мм.

Вимірювання поверхневого опору проводили між чотирма парами контактних площадок розміром  $\varnothing 0,6$  мм, розташованими одна навпроти одної через  $45^\circ$  (рис. 1), і нанесеними на поверхню диска з композита  $\varnothing 4,2$  мм. Відстань між протилежними контактними площадками складала 3,0 мм. З ними взаємодіяли малогабаритні напівсферичні контактні електроди від мультиметра з радіусом напівсфери  $\sim 0,2$  мм. В якості контактних електродів (зондів) було застосовано наконечники під'єднувальних дровів мультиметра UT 30D, виготовлені з покритих нікелем латунних стрижнів.

Після вимірювання визначали середнє значення поверхневого електричного опору для кожного диска.

Після подання постійної напруги 9 В перед вимірюванням необхідна витримка більше 1 хв для закінчення поляризаційних процесів, які пов'язані з наявністю сповільнених видів поляризації. Далі цифровим мультиметром UT 30D визначали поверхневий електричний опір  $R_{\text{пов.}}$

На результати визначення питомого об'ємного  $R_{\text{об.}}$  і поверхневого  $R_{\text{пов.}}$  електричного опору впливають наступні фактори: амплітуда і час прикладання напруги, геометрія і матеріал електрода, температура і вологість зразків та навколишнього середовища під час вимірювання. Слід зауважити, що поверхня основи диска діаметром 4,2 мм невелика і складає тільки 13,85 мм<sup>2</sup>. Окрім цього, вона після шліфування є гладкою і її шорсткість становить менше 1,2 мкм. Перед вимірюванням поверхню диска ретельно очищали від пилу та вологи.

Усі вимірювання  $R_{\text{пов.}}$  і  $R_{\text{об.}}$  здійснювали за кімнатної температури 22 °С і вологості повітря не вище 75 % за напруги 9 В. Час прикладання напруги під час вимірювання  $R_{\text{пов.}}$  становив більше 1 хв, а під час вимірювання  $R_{\text{об.}}$  – ~ 5–10 с.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що чим менша добротність дисків з композита AlN–SiC, тим меншим є значення об'ємного опору  $R_{\text{об.}}$  і тим більше поглинання електромагнітної енергії [9, 11]. Для зручності їхнього співставлення на рис. 2 наведено параметри матеріалу композита, визначені на дисках розміром Ø4,2×1,0 мм.

Групи зразків спеціально відбирали з невеликою добротністю  $Q$  від 30 до 44, бо найцікавішими з них є ті, які мають найбільше поглинання мікрохвильового випромінювання. На рис. 2 видно, що значенням  $Q = 30, 33, 37, 44$  відповідають значення коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії  $L = 7,8, 7,0, 6,2, 5,4$  дБ/мм. Такі високі значення поглинання електромагнітної енергії у дисках невеликого розміру Ø4,2×1,0 мм з вільноспечених композитів AlN–50SiC є дуже важливими, бо вони визначають придатність композитів для застосування в якості поглиначів у електровакуумних приладах НВЧ-техніки діапазону 20–100 ГГц.

На рис. 3 наведено значення виміряного поверхневого (криві 1–4) та об'ємного (криві 5–8) електричного опору для чотирьох груп зразків – дисків, виготовлених з композита AlN–50SiC з різною добротністю. Як видно, значення  $R_{\text{пов.}}$  та  $R_{\text{об.}}$  значно (більше, ніж на порядок) відрізняються одне від одного для одних і тих же зразків композита.

Основні експериментальні дані вимірювання об'ємного та поверхневого електричного опору зразків малого розміру, виготовлених з композита AlN–50SiC зведено у таблицю. Розраховані середні значення  $R_{\text{пов.}}$  для кожної з чотирьох партій зразків композита складають 42, 64, 92, 136 кОм, а відповідні їм середні значення  $R_{\text{об.}}$  становлять 2,8, 4,1, 5,2, 7,0 кОм за добротності 30, 33,

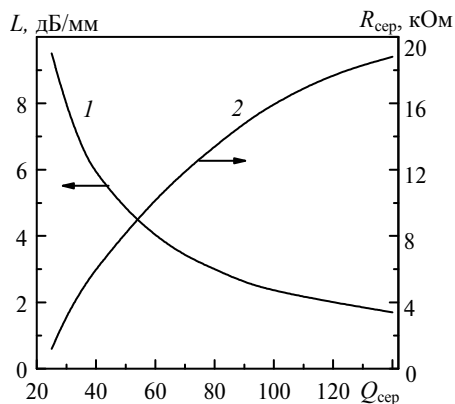


Рис. 2. Взаємозв'язок коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії  $L$  (1) [9] та середнього об'ємного електричного опору  $R_{\text{сер}}$  (2) [11], композита AlN–50SiC, у залежності від середньої добротності  $Q_{\text{сер}}$ .

37, 44. Отже, середні значення  $R_{\text{пов.}}$  та  $R_{\text{об.}}$  відрізняються у 14,7, 15,7, 17,7, 19,5 разів.

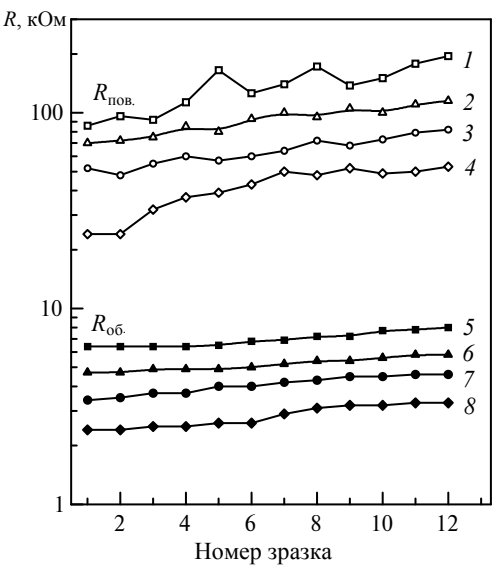


Рис. 3. Поверхневий  $R_{\text{пов.}}$  (1, 2, 3, 4) та об’ємний  $R_{\text{об.}}$  (5, 6, 7, 8) електричний опір для чотирьох груп зразків з композита  $\text{AlN-50SiC}$  за добротності  $Q = 44$  (1, 5), 37 (2, 6), 33 (3, 7), 30 (4, 8).

**Результати дослідження електричних параметрів зразків вільноспеченого композита  $\text{AlN-50SiC}$  у залежності від добротності  $Q$**

| $Q$                                                                                   | 30   | 33   | 37   | 44   |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| $L$ [9], дБ/мм                                                                        | 7,8  | 7,0  | 6,2  | 5,4  |
| раз/мм                                                                                | 6,0  | 5,0  | 4,2  | 3,5  |
| $R_{\text{пов.сер.}}$ , кОм                                                           | 42   | 64   | 92   | 136  |
| $R_{\text{об.сер.}}$ , кОм                                                            | 2,8  | 4,1  | 5,2  | 7,0  |
| $R_{\text{пов.сер.}}/R_{\text{об.сер.}}$                                              | 14,7 | 15,7 | 17,7 | 19,5 |
| $R_{\text{пов.мін.}}$ , кОм                                                           | 24   | 52   | 70   | 80   |
| $R_{\text{пов.макс.}}$ , кОм                                                          | 52   | 82   | 115  | 195  |
| $R_{\text{об.мін.}}$ , кОм                                                            | 2,4  | 3,4  | 4,7  | 6,4  |
| $R_{\text{об.макс.}}$ , кОм                                                           | 3,3  | 4,6  | 5,8  | 8,0  |
| $R_{\text{пов.мін.}}/R_{\text{об.мін.}}$                                              | 10,0 | 13,7 | 14,9 | 13,4 |
| $R_{\text{об.макс.}}/R_{\text{пов.макс.}}$                                            | 17,2 | 17,8 | 19,8 | 24,4 |
| $(R_{\text{об.макс.}}/R_{\text{пов.макс.}})/(R_{\text{пов.мін.}}/R_{\text{об.мін.}})$ | 1,72 | 1,30 | 1,33 | 1,82 |

Примітка:  $L$  – коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії;  $R_{\text{пов.сер}}$  та  $R_{\text{об.сер}}$  – середні значення поверхневого та об’ємного електричного опору; мінімальне  $R_{\text{пов.мін.}}$  та максимальне  $R_{\text{пов.макс.}}$  значення поверхневого електричного опору; мінімальне  $R_{\text{об.мін.}}$  та максимальне значення  $R_{\text{об.макс.}}$  об’ємного електричного опору.

За даними таблиці видно, що максимальні та мінімальні значення  $R_{\text{пов.}}$  відрізняються в 2,17, 1,71, 1,64, 2,44 рази для чотирьох груп зразків з різною добротністю. Для тих же зразків максимальні та мінімальні значення  $R_{\text{об.}}$  відрізняються в 1,38, 1,35, 1,23, 1,25 разів. Тобто, різниця у розкиді значень

$R_{\text{пов.}}$  та  $R_{\text{об.}}$  є суттєвою. Середні значення  $R_{\text{пов.}}$  та  $R_{\text{об.}}$  чотирьох груп композитів відрізняються у 2 і 1,3 рази, тобто різниця складає 50 %.

Як свідчать експериментальні дані дослідження електричних параметрів по 48 зразкам композита, маємо типові напівпровідники, бо  $R_{\text{об.}}$  змінюється від  $2,4 \cdot 10^3$  до  $8,0 \cdot 10^3$  Ом, а  $R_{\text{пов.}}$  – від  $2,4 \cdot 10^4$  до  $2,0 \cdot 10^5$  Ом, причому значення  $R_{\text{пов.}}$  більше  $R_{\text{об.}}$  у 14,7–19,5 разів. Цікавим є те, що у якісних діелектриків питомий об'ємний  $\rho_V$  і питомий поверхневий  $\rho_S$  опори також відрізняються за своїми значеннями на порядок.

За даними таблиці добротність зразків, а також відповідний коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії, у чотирьох групах зразків значно змінюються:  $Q$  від 30 до 44, а  $L$  від 6,0 до 3,5 раз/мм. Розкид значень поверхневого і об'ємного опору для однієї і тієї ж добротності і поглинання, ймовірно, пов'язаний з опором провідних ланцюжків різної довжини, що складаються з частинок карбіду кремнію різного розміру (від 0,34 до 2,4 мкм). Зрозуміло, що їхня кількість у ланцюжку може бути дуже різною в залежності від розміру частинок. Частинки SiC випадково збираються в провідні ланцюжки, випадковими є також площа контактів та проміжок між частинками. Але саме від цього залежить значення опору між частинками, що контактують. Можна припустити, що більшою мірою це стосується саме значення поверхневого опору, оскільки в поверхневих шарах напівпровідникового композита AlN–50SiC міститься значно менше таких провідних ланцюжків, ніж у товщі матеріалу. Це пов'язане з тим, що у глибині матеріалу композита кожна частинка карбіду кремнію може бути оточена шістьма іншими частинками і контактувати з найближчою з них. Очевидно, що у поверхневому шарі таких можливостей менше. Слід додати, що коли вимірюють об'ємний опір, то площею контакту є уся поверхня основи диска –  $13,85 \text{ мм}^2$ . Об'ємний опір зразка композита складається з великої кількості паралельних (рівнобіжних) провідних ланцюжків, а сумарний опір всіх паралельних ланцюжків менший, ніж найменший опір одного ланцюжка.

Під час вимірювання поверхневого опору площа контакту між площадкою діаметром 0,6 мм і наконечником електрода з радіусом  $\sim 0,2$  мм є значно меншою і складає не більше 20 мкм. А це означає, що на цій площі, точніше на плямі діаметром  $\sim 20$  мкм може знаходитися не більше кількох десятків частинок SiC навіть найменшого розміру. До цього треба додати, що і відстань між площадками становить 3 мм, а не 1 мм, як у разі вимірювання  $R_{\text{об.}}$ . Це призводить до того, що провідних ланцюжків у поверхневих шарах значно менше, ніж у товщі матеріалу композиту, і тому значення  $R_{\text{пов.}}$  буде значно більшим за  $R_{\text{об.}}$ .

Для порівняння на рис. 4 показано середні значення  $R_{\text{пов.сер.}}$  та  $R_{\text{об.сер.}}$  в інтервалі досліджених значень середньої добротності  $Q_{\text{сер}}$  (див. таблицю).

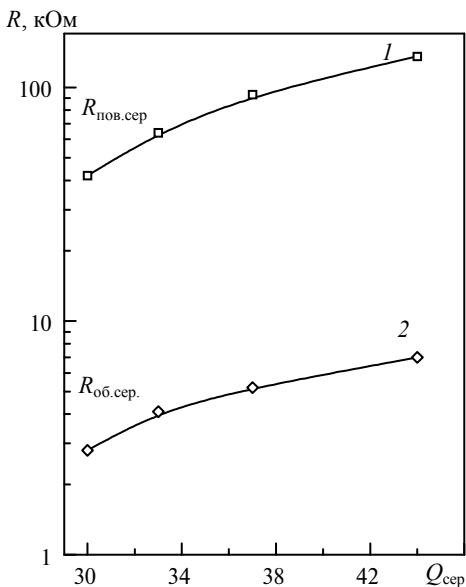


Рис. 4. Взаємозв'язок  $R_{\text{пов.сер.}}$  (1) та  $R_{\text{об.сер.}}$  (2) з  $Q_{\text{сер}}$  композита AlN–50SiC, визначених для чотирьох груп дисків розміром  $\varnothing 4,2 \times 1,0$  мм.

Видно, що з підвищенням  $Q_{\text{ср}}$  у 1,47 разів (від 30 до 44) значення  $R_{\text{пов.ср}}$  зростають у 3,24 рази (від 42 до 136 кОм), а  $R_{\text{об.ср.}}$  – у 2,5 разів (від 2,8 до 7,0 кОм). Отже, встановлено, що для дослідженого інтервалу  $Q = 30\text{--}44$  спостерігали зростання поверхневого опору в 1,3 рази швидше, ніж зростання об'ємного опору.

Рис. 4 дозволяє оцінити взаємозв'язок зростання значень поверхневого та об'ємного опору зі збільшенням добротності у керамічних композитах AlN–50SiC. А це також дає можливість зробити бажаний обґрунтований вибір необхідного за параметрами поглинача для його застосування у приладах НВЧ-техніки із середньою та великою вихідною потужністю.

## ВИСНОВКИ

Дослідження електричного опору вільноспечених керамічних композитів AlN–50SiC, придатних для використання у якості об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання, показало, що для 4-х груп зразків з добротністю  $Q = 30, 33, 37, 44$  середні значення поверхневого електричного опору складають 42, 64, 92, 136 кОм, розкид значень по опору становить 2,2, 1,5, 1,64, 2,4 рази; середні значення об'ємного електричного опору складають 2,8, 4,1, 5,2, 7,0 кОм, розкид значень по опору становить 1,38, 1,35, 1,23, 1,25 разів.

Аналіз масиву експериментальних даних виявив взаємозв'язок між поверхневим та об'ємним електричним опором: більшому об'ємному опору переважно відповідає більший поверхневий опір, причому поверхневий опір більший за об'ємний у 14,7–19,5 разів.

Розкид значень об'ємного та поверхневого електричного опору, ймовірно, пов'язаний з опором провідних ланцюжків, які складаються з частинок карбіду кремнію різного розміру, що випадково утворюються у композиті під час спікання.

V. I. Chasnyk<sup>1</sup>, D. V. Chasnyk<sup>2</sup>, O. M. Kaidash<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Enterprise Scientific Research Institute ORION, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>The Ukrainian Scientific and Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Investigation of surface and bulk electrical resistance of pressureless sintered AlN–50 % wt SiC composites

*The electrical resistance of pressureless sintered AlN–50 wt % SiC ceramic composites, suitable for use as microwave radiation volume absorbers, was investigated. For four groups of samples with  $Q$  factor = 30, 33, 37, 44, the average surface resistance values are 42, 64, 92, 136 kΩ, and the average bulk resistance values are 2.8, 4.1, 5.2, 7.0 kΩ respectively. The analysis of the array of experimental data revealed a relationship between the surface and bulk electrical resistance - a higher bulk resistance mainly corresponds to a higher surface resistance, and with an increase in the  $Q$  factor from 30 to 44, the surface resistance is greater than the bulk resistance by 14.7–19.5 times.*

**Keywords:** surface and volume electrical resistance, aluminum nitride, silicon carbide, volume absorber of microwave radiation,  $Q$  factor, absorption of electromagnetic energy, measurement of surface electrical resistance.

1. Mikijelj B., Abe D.K., Hutcheon R. AlN-based lossy ceramics for high average power microwave devices: performance–property correlation. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2003. Vol. 23. P. 2705–2709.

2. Kobayashi R., Tatami J., Wakihara T., Meguro T., Komeya K., Electrical properties of AlN–SiC ceramics. *Key Eng. Mater.* 2006. Vol. 317–318. P. 641–644.
3. 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.
4. Avrov D.D., Bakin A.S., Dorozhkin S.I., Rastegaev V.P., Tairov Y., Bilalov B., Safaraliev G., Shabanov S.A., Lebedev A. 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.
5. 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, no. 11. P. 3463–3469.
6. Lu Y., Zang X., Du B. Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN–SiC composite ceramic. *Mater. Chem. Phys.* 2021. Vol. 261, no. 1. P. 124222–124229.
7. Kultayeva S., Kim Y.-W. Mechanical, thermal, and electrical properties of pressureless sintered SiC–AlN ceramics. *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46, is. 11, Part B. P. 19264–19273.
8. Serbenyuk T.B., Prikhna T.O., Sverdun V.B., Sverdun N.V., Moshchil' V.Ye., Ostash O.P., Vasylyv B.D., Podhurska V.Ya., Kovylyayev V.V., Chasnyk V.I. 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.* 2018. Vol. 40, no. 1. P. 8–15.
9. Chasnyk V.I., Fesenko I.P., Vovk L.M., Kaidash O.M. Enhanced absorption of microwave radiation in the frequency range of 9.5–34.2 GHz by a pressureless sintered AlN–SiC composite. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 2. P. 91–101.
10. Chasnyk V.I., Kaidash O.M. Effect of the sintering temperature on the bulk electrical resistance and electromagnetic energy absorption of pressureless sintered AlN–SiC composites. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 450–452.
11. Chasnyk V.I., Fesenko I.P., Kaidash O.M. Study of electrical resistance and absorption of microwave radiation in AlN–SiC composites with a high silicon carbide content. *Tooling Mater. Sci.* Proceeding confer. Kyiv: Bakul INM, NAS Ukraine. 2022. Vol. 25. P. 322–330.
12. Chasnyk V.I., Chasnyk D.V., Kaidash O.M. Effect of silicon carbide content on bulk electrical resistance of free-sintered AlN–SiC composites. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 5. P. 402–404.

Надійшла до редакції 06.04.24

Після доопрацювання 23.04.24

Прийнята до опублікування 25.04.24