

18. Zhou, Y., Li, Y., Tan, N., et al. (2023). Preparation process and mechanical properties of laser cladding gradient molybdenum coating on copper alloy. *Surface and Coatings Technology*, 470, 129888.
19. Experimental study on crushing and dispersion behavior of alumina inclusions. (2021). *Journal of Mechanical Engineering*, 57(22), 172.
20. Yoo, C. G., & Ragauskas, A. J. (2021). Opportunities and challenges of lignin utilization. In *ACS Symposium Series* (pp. 1–12). American Chemical Society.

УДК 669.018.25:001.895

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-363-371

В. І. Часник¹, кандидат технічних наук; **Д. В. Часник**²,
О. М. Кайдаш³ доктор технічних наук

¹Державне підприємство НДІ “Оріон”, м. Київ, Україна

²Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України,
м. Київ, Україна

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна
E-mail: vassiliyiv@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ВІЛЬНОСПЕЧЕНИХ КОМПОЗИТІВ AlN–50% SiC

Досліджено електричний опір вільноспечених керамічних композитів AlN–50% SiC, придатних для використання у якості об’ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання. Об’ємний і поверхневий електричний опір композитів виміряли цифровим мультиметром UT 30D та цифровим мегаометром VM 500A. З цією метою розроблена двозондова методика вимірювання поверхневого опору малих за розміром зразків $\sim 4,2 \times 1,0$ мм з композита. Виготовлено комплект пристроїв для нанесення чотирьох пар контактних площадок $\sim 0,6$ мм на поверхню диска та його надійного закріплення під час вимірювання поверхневого електричного опору.

Для трьох груп дисків з різною добротністю $Q = 44, 55$ та 70 визначені середні значення поверхневого опору складають: $136, 212$ та 300 кОм, а відповідні їм середні значення об’ємного опору становлять: $7,0; 9,2$ та $11,8$ кОм. Аналіз масиву експериментальних даних виявив взаємозв’язок між поверхневим та об’ємним електричним опором: більшому об’ємному опору відповідає більший поверхневий опір, причому поверхневий опір більший ніж об’ємний у $19,4$ – $25,4$ рази.

Ключові слова: поверхневий та об’ємний електричний опір, нітрид алюмінію, карбід кремнію, об’ємний поглинач мікрохвильового випромінювання, добротність, методика вимірювання поверхневого електричного опору, пристрої для вимірювання електричного опору.

Вступ

Об’ємні поглиначі мікрохвильового випромінювання в електровакуумних приладах НВЧ-техніки конструктивно містяться у тій частині приладу, де близько протікає електронний потік. Струмопроходження потоку у робочому режимі практично завжди менше 100 %, отже електрони з пучка, рухаючись від катоду до колектора приладу, осідають на сповільнювальній системі (СПС), а деякі попадають на поверхню об’ємного поглинача. Тому бажано, щоб на постійному струмі матеріал поглинача мав достатню провідність. Це потрібно для того, щоб на його поверхні не відбувалося накопичення статичного заряду. Тоді навіть помірна

провідність (10^{-5} – 10^{-4} См), матиме тенденцію розсіювати накопичення поверхневого заряду на поглиначі мікрохвильового випромінювання, і тим самим відверне пробій та іскріння у приладі НВЧ [1]. В зв'язку з цим важливим параметром для об'ємного поглинача мікрохвильового випромінювання, поряд зі значенням об'ємного опору матеріалу, є значення величини *поверхневого опору*.

Проте робіт, у яких є відомості про об'ємний чи питомий електричний опір композитів системи AlN–SiC, небагато [2–12]. А публікацій, які містять дані про поверхневий електричний опір композитів AlN–SiC, майже немає [9]. Це може бути пов'язане з тим, що зазвичай для вимірювання поверхневого електричного опору застосовують 4-х зондовий метод вимірювання. Для цього треба мати зразок доволі великих розмірів. Так, наприклад, розмір центрального (екранованого) електроду складає 22,5 мм. У цьому випадку діаметр вимірюваного зразку композита повинен бути близьким до 30 мм, а його товщина – до 3–5 мм. Зрозуміло, що у нашому випадку для зразків композита розміром $\sim 4,2 \times 1,0$ мм ця методика вимірювання поверхневого електричного опору непридатна. В зв'язку з цим необхідно розробити методику вимірювання малих за розміром зразків композита AlN–50% SiC для визначення поверхневого електричного опору за допомогою тільки двох приєднувальних електродів. Для іншої (більшої) кількості електродів на поверхні диска малого розміру місця недостатньо.

Мета роботи – виміряти поверхневий і об'ємний електричний опір композита AlN–50% SiC цифровим мультиметром UT 30D та цифровим мегаометром BM 500A. Визначити поверхневий електричний опір на дисках розміром $\sim 4,2 \times 1,0$ мм на основі розробленої двозондової методики вимірювання поверхневого опору малих за розміром зразків. Для цих же зразків виміряти об'ємний електричний опір з використанням модифікованої струбцини. На основі великої кількості експериментальних даних встановити взаємозв'язок між поверхневим та об'ємним електричним опором для вільноспечених композитів складу AlN–50% SiC.

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. В подальшому для спрощення будемо позначати склад композита як AlN–50% SiC¹.

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 субмікронна фракція SiC становить 77%, а мікронна – 23%.

Методи дослідження. Добротність Q 200 дисків з композита AlN–SiC вимірювали в резонаторі діаметром 5,5 мм і висотою 10 мм, який розташовували у високочастотному (ВЧ) тракці Панорамного вимірювача КСХН² та ослаблення P2–65, який працює в частотному діапазоні 25,9–37,7 ГГц, з перерізом ВЧ тракту $7,2 \times 3,4$ мм. Похибка вимірювання-затухання на фіксованій частоті становить менше 5%. Докладно метод вимірювання затухання та добротності в кільці поглинача композита описано в [11].

¹ Тут і надалі склад композитів наведено у % (за масою)

² КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою

Розміри резонатора ($\sim 5,5 \times 10$ 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 Δf на рівні половинної потужності: $Q = f_0/\Delta f$. Добротність Q визначає рівень поглинання НВЧ випромінювання в циліндричному резонаторі – чим менша добротність, тим вище поглинання.

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

Електричний опір дисків розміром $\sim 4,2 \times 1,0$ мм з різною добротністю $Q = 44, 55$ та 70 вимірювали цифровим мультиметром UT 30D та цифровим мегаометром ВМ 500А за напруги 9 В на шкалах 20, 200 та 2000 кОм. Похибка вимірювання опору цими приладами становить 0,05%, тобто ± 10 Ом на шкалі 20 кОм, ± 100 Ом на шкалі 200 кОм та ± 1000 Ом на шкалі 2000 кОм.

Вимірювання об'ємного електричного опору зразків композита проводили мультиметром у модифікованій струбціні, детальний опис якої зроблено у [11]. Струбцина для вимірювання електричного опору потрібна, щоб забезпечити належне сильне затискання зразка між мідним і латунним дисками, до яких приєднуються проводи мультиметра.

Вимірювання поверхневого опору проводили між контактними площадками, які наносили на поверхню. Вони взаємодіяли з електродом з радіусом напівсфери $\sim 0,2$ мм.

Вимірювання поверхневого електричного опору малих за розміром зразків композита (діаметром менше 5 мм) проводили за розробленою методикою двозондовим методом між чотирма парами контактних площадок, нанесених за допомогою шаблону-трафарету на одну з поверхонь (основ) керамічного диска. Розміри шаблону трафарету показані на рис. 1.

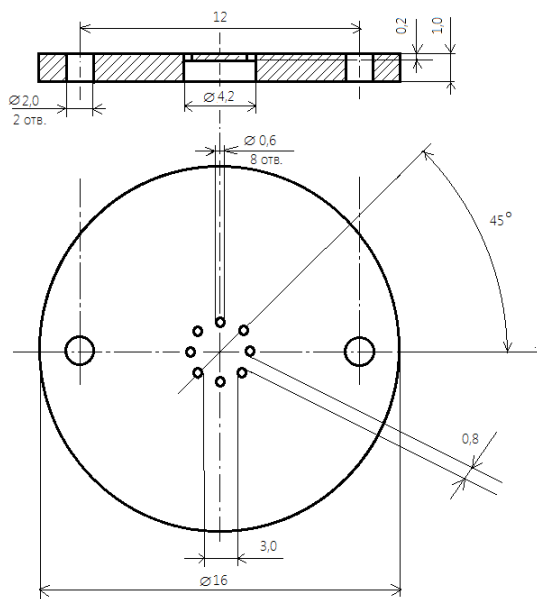


Рис. 1. Шаблон-трафарет

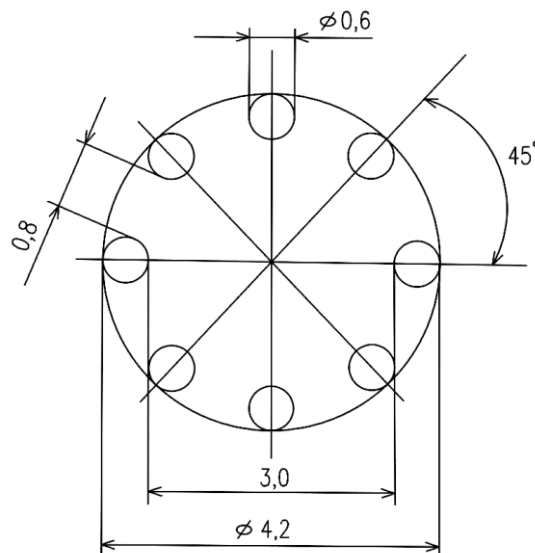


Рис. 2. Розташування восьми контактних площадок $\varnothing 0,6$ мм на поверхні диска розміром $\varnothing 4,2$ мм

В якості контактних електродів (зондів) були застосовані наконечники під'єднувальних дротів мультиметра UT 30D та мегаометра ВМ 500А. Ці наконечники виготовлені з покритих

нікелем латунних стрижнів діаметром 2,0 мм і довжиною 14,5 мм. На кінці стрижня на довжині 2,0 мм його діаметр зменшувався до 0,4 мм.

На поверхню диска з композита $\varnothing 4,2$ мм наносили вісім контактних площадок розміром $\varnothing 0,6$ мм, розташованих одна навпроти одної через 45° (рис. 2). Відстань між протилежними контактними площадками складає 3,0 мм. Таким чином, одержували чотири пари контактів для вимірювання поверхневого опору у чотирьох положеннях малогабаритними напівсферичними контактними електродами від мультиметра чи мегаомметра. Після вимірювання визначали середнє значення поверхневого електричного опору кожного диска.

На рис. 3 показано пристрій для закріплення шаблону-трафарету зі зразком композита для нанесення на поверхню зразка контактуючих площадок.

Шаблон-трафарет – це диск з нержавіючої сталі 14X17H2 діаметром 16 мм і товщиною 1 мм (див. рис. 1). В центрі диска шаблону зроблено вибірку $\varnothing 4,2$ мм $^{+0,02}_{+0,05}$ на глибину

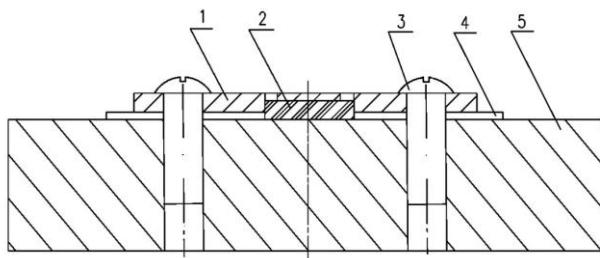


Рис. 3. Пристрій для закріплення шаблону-трафарету зі зразком композита для нанесення на поверхню зразка контактуючих площадок $\varnothing 0,6$ мм: 1 – шаблон-трафарет; 2 – зразок композита; 3 – гвинт з різьбою M2,0; 4 – прокладка з фторопласта, 5 – підставка з нержавіючої сталі

0,8 мм $^{+0,02}_{+0,05}$. Отже товщина стінки шаблону, у якій було зроблено вісім отворів $\varnothing 0,6$ мм через 45° , становила 0,2 мм.

Для запобігання забрудненню поверхні диска композита нержавіючою сталлю, шаблон-трафарет (1 на рис. 3) та пластину (5 на рис. 3) окислили за температури 900°C у зволоженому водні. В результаті цього на їхніх поверхнях утворилася стійка захисна плівка чорного кольору. Після розташування диска композита у вибірці шаблону, вістрям загостреного стрижня довжиною ~ 130 мм і діаметром 3 мм, зробленого з міді та латуні, через отвори у шаблоні малювали контактні площадки на поверхні диска з композита

спочатку мідним стрижнем, а потім стрижнем з латуні. Таким чином забезпечувалося надійне повторення розмірів контактних площадок $\varnothing 0,6$ мм на усіх дисках композита, що є необхідною умовою для достовірного вимірювання поверхневого електричного опору зразків із композита.

Для запобігання деформації та руйнування шаблону під час нанесення контактних площадок на диск його кріпили на підставці пристрою. Роль фіксуючої підставки виконує пластина з нержавіючої сталі 14X17H2 розміром $30 \times 30 \times 4$ мм. Шаблон з диском із композита кріпили на пластині за допомогою двох гвинтів M2,0 довжиною 4 мм з латуні. Для запобігання прогину шаблону між ним та пластиною (5 з рис. 3) розміщується прокладка з фторопластової пластинки розміром $25 \times 25 \times 0,2$ мм (4 на рис. 3).

При вимірюванні поверхневого опору в зразках композита покази приладу (мультиметра UT 30D чи мегаомметра ВМ 500А) треба знімати не раніше, ніж через 60 с після подання постійної напруги, оскільки для завершення поляризації необхідний деякий час. Це пов'язано з тим, що в перший момент часу витримки під напругою крізь поверхню зразка протікає не тільки наскрізний струм, але і також струм абсорбції (поляризації), який пов'язаний з наявністю сповільнених видів поляризації. Зрозуміло, що тримати більше хвилини два контактних електрода щільно притискаючи їх до невеликих контактних площадок $\varnothing 0,6$ мм на диску невеликого розміру дуже незручно. Внаслідок цього диск спочатку встановлювали в заглиблення $\varnothing 4,2$ мм $^{+0,02}_{+0,05}$ і глибиною 1 мм, яке зроблене у

фторопластовій пластині розміром $25 \times 25 \times 3$ мм. Фторопластова пластина, в свою чергу, зафіксована двома гвинтами з різьбою M2,0 довжиною 6 мм з латуні на підставці з нержавіючої сталі 14X17H2 розміром $30 \times 30 \times 4$ мм. Диск добре фіксувався в заглибленні пластини внаслідок малої різниці в їх діаметрах. Розташування зразка композита у пластині з фторопласта на підставці з нержавіючої сталі показано на рис. 4.

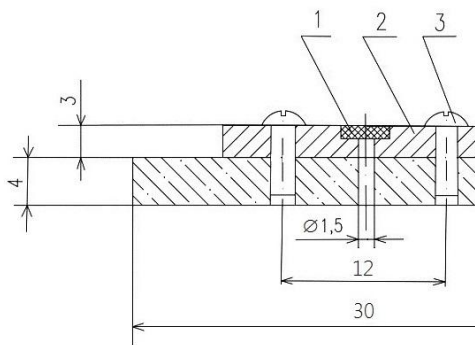


Рис. 4. Пристрій для вимірювання поверхневого електричного опору зразка композита: 1 – зразок композита; 2 – пластина з фторопласта; 3 – гвинт з різьбою M2,0; 4 – підставка з нержавіючої хромонікелевої сталі 14X17H2.

Слід зауважити, що поверхня основи диска $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм невелика і складає тільки $13,85 \text{ мм}^2$. Окрім цього, вона після шліфування є гладкою і її шорсткість становить менше 1,2 мкм. Перед вимірюванням поверхню диска ретельно очищують від пилу та вологи.

Усі вимірювання поверхневого і об'ємного опору здійснювали за кімнатної температури $+ 22 \text{ }^\circ\text{C}$ і вологості повітря не вище 75% за напруги 9 В. Час прикладання напруги для вимірювання поверхневого опору становив більше 60 с для закінчення поляризаційних процесів, а для вимірювання об'ємного опору – ~ 5 с.

Результати та їх обговорення

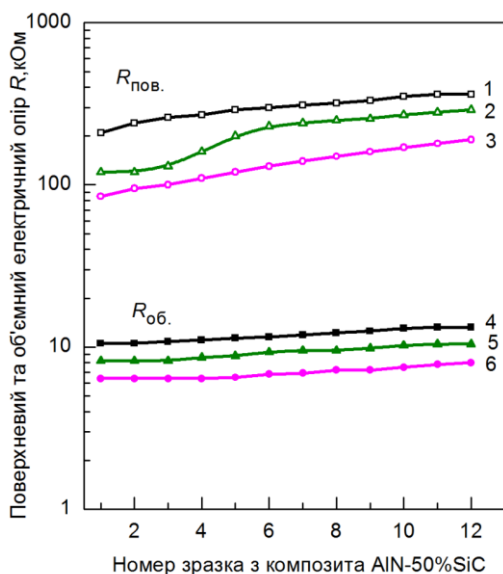


Рис. 5. Поверхневий (криві 1, 2, 3) та об'ємний (криві 4, 5, 6) електричний опір R для трьох груп зразків – дисків розміром $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм з композита AlN-50% SiC за добротності Q : 70 (криві 1, 4); 55 (криві 2, 5) та 44 (криві 3, 6)

Була визначена добротність Q 200 шт. дисків розміром $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм, виготовлених з композита AlN-50% SiC. Після цього для дослідження відібрано 36 шт. дисків, які поділено на три групи по 12 шт. за добротністю Q , яка становила: 44, 55 та 70. В цих трьох групах на зразках композита проведено вимірювання цифровим мультиметром та цифровим мегаметром за допомогою розробленого та виготовленого комплексу пристроїв поверхневого опору розробленим двозондовим методом та об'ємного опору з використанням модифікованої струбцини.

Значення поверхневого (криві 1–3) та об'ємного (криві 4–6) електричного опору для трьох груп зразків – дисків $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм, виготовлених з композита AlN-50% SiC з різною добротністю, наведено на рис. 5. Як видно з рисунку, значення поверхневого та об'ємного опору значно (більше ніж на порядок) відрізняються одне від одного для одних і тих же зразків композитів.

Основні експериментальні дані вимірювання об'ємного та поверхневого електричного опору зразків малого розміру,

виготовлених з композитів AlN–50% SiC, наведені у таблиці. Розраховані середні значення поверхневого опору для кожної з трьох груп зразків композита складають 136, 212 та 300 кОм, а відповідні їм середні значення об'ємного опору становлять 7,0; 9,2 та 11,8 кОм за добротності 44, 55 та 70. Таким чином, відмінність по середнім значенням між поверхневим та об'ємним опором складає 19,4 23,0 та 25,4 разів.

Добротність Q , середні/мінімальні/максимальні значення поверхневого та об'ємного електричного опору R та їх відношення, визначені для трьох груп зразків – дисків розміром $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм з композита AlN–50% SiC

Добротність дисків Q	44	55	70
Середнє значення поверхневого електричного опору $R_{\text{пов. сер.}}$, кОм	136	212	300
Середнє значення об'ємного електричного опору $R_{\text{об. сер.}}$, кОм	7,0	9,2	11,8
Відношення середніх значень опору: $R_{\text{пов. сер.}}/R_{\text{об. сер.}}$	19,4	23,0	25,4
Мінімальні // максимальні значення поверхневого електричного опору, кОм $R_{\text{пов. мін.}} // R_{\text{пов. макс.}}$ та їх різниця	85 // 190 2,23	120 // 290 2,42	210 // 360 1,71
Мінімальні // максимальні значення об'ємного електричного опору, кОм $R_{\text{об. мін.}} // R_{\text{об. макс.}}$ та їх різниця	6,4 // 8,0 1,25	8,2 // 10,4 1,27	10,5 // 13,2 1,26
Відношення мінімальн. // максимальн. значень $R_{\text{пов.}}/R_{\text{об.}}$ та їх різниця	13,3 // 23,8 1,79	14,6 // 27,9 1,91	20,0 // 27,2 1,36

Як видно з даних таблиці, максимальні та мінімальні значення поверхневого електричного опору $R_{\text{пов.}}$ відрізняються в 2,23; 2,42 та 1,71 раз для трьох груп зразків з різною добротністю $Q = 44, 55$ та 70 . Для тих же зразків максимальні та мінімальні значення об'ємного електричного опору $R_{\text{об.}}$ майже не відрізняються і складають 1,25; 1,27 та 1,26 разів. Різниця між максимальними та мінімальними значеннями відношень $R_{\text{пов.}}/R_{\text{об.}}$, які складають 1,79; 1,91 та 1,36 відповідно для $Q = 44, 55$ та 70 .

Як свідчать експериментальні дані по 36 зразкам композита, ми маємо справу з типовим напівпровідником, бо $R_{\text{об.}}$ змінюється від $6,4 \times 10^3$ до $1,32 \times 10^4$ Ом, а $R_{\text{пов.}}$ – від $8,5 \times 10^4$ до $3,6 \times 10^5$ Ом. Причому значення $R_{\text{пов.}}$ більше $R_{\text{об.}}$ у 19,4–25,4 рази.

Розкид значень поверхневого і об'ємного опору для однієї і тієї ж добротності, ймовірно, пов'язаний з опором провідних ланцюжків різної довжини, що складаються з частинок карбиду кремнію різного розміру (від 0,34 до 2,4 мкм). Зрозуміло, що їх кількість у ланцюжку може бути дуже різною в залежності від розміру частинок. Частинки SiC випадковим чином збираються в провідні ланцюжки, також випадковим є і площа контактів між частинками. Але від цього залежить значення опору між контактуючими частинками.

Слід додати, що коли вимірюється об'ємний опір, то площею контакту є уся поверхня основи диска $\varnothing 4,2$ мм ($13,85$ мм²). Об'ємний опір зразка композита складається з великої

кількості паралельних провідних ланцюжків, а сумарний опір всіх паралельних ланцюжків менший, ніж найменший опір одного ланцюжка.

При вимірюванні поверхневого опору площа контакту між площадкою $\varnothing 0,6$ мм і наконечником електрода з радіусом $\sim 0,2$ мм є значно меншою і складає не більше 20 мкм. Це означає, що на цій площі, точніше на плямі діаметром 20 мкм, може знаходитися не більше кількох десятків частинок SiC навіть найменшого розміру. Окрім цього при вимірюванні $R_{\text{пов.}}$ відстань між площадками становить 3 мм, а не 1 мм, як при вимірюванні $R_{\text{об.}}$.

Висновки

1. Для визначення поверхневого опору малих за розміром зразків композита $\varnothing 4,2 \times 1,0$ мм розроблена двозондова методика вимірювання опору. Виготовлено комплект пристроїв для нанесення контактних площадок на поверхню диска та забезпечення його надійного закріплення під час вимірювання поверхневого опору. Цей комплект складається з трьох пристроїв та двох загострених стрижнів з міді та латуні діаметром 3 мм і довжиною 130 мм.

2. Досліджено електричний опір вільноспечених керамічних композитів AlN–50% SiC, придатних для використання у якості об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання. Об'ємний і поверхневий електричний опір композитів виміряно цифровим мультиметром UT 30D та цифровим мегаометром BM 500A.

3. Середні значення величини поверхневого електричного опору складають 136, 212 та 300 кОм; розкид значень по опору становить 2,23; 2,42 та 1,71 рази для 3-х груп з різною добротністю Q 44, 55 та 70.

4. Середні значення величини об'ємного електричного опору складають 7,0; 9,2 та 11,8 кОм; розкид значень по опору становить 1,25; 1,27 та 1,26 рази для 3-х груп з різною добротністю Q 44, 55 та 70.

5. Аналіз великої кількості експериментальних даних виявив взаємозв'язок між поверхневим та об'ємним електричним опором: більшому об'ємному опору відповідає більший поверхневий опір, причому поверхневий опір більший об'ємного у 19,4–25,4 рази.

5. Розкид значень об'ємного та поверхневого електричного опору для фіксованої Q , ймовірно, пов'язаний з опором провідних ланцюжків, які складаються з частинок карбиду кремнію різного розміру, які випадковим чином утворюються у композиті при спіканні.

Chasnyk V. I.¹, Chasnyk D. V.², Kaidash O. M.³

¹ State Enterprise Scientific Research Institute ORION

² The Ukrainian Scientific and Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine

³ Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, vassiliyiv@gmail.com

FEATURES THE ELECTRICAL RESISTANCE OF MEASURING OF PRESSURELESS SINTERED ALN–50% SiC COMPOSITES

The electrical resistance of pressureless sintered ceramic AlN–50% SiC composites, suitable for use as bulk microwave radiation absorbers, has been investigated. The bulk and surface electrical resistance of the composites were measured with a digital multimeter UT 30D and a digital megohmmeter BM 500A. For this purpose, a two-probe method for measuring the surface resistance of small-sized samples $\varnothing 4.2 \times 1.0$ mm from the composite was developed. A set of devices was manufactured for applying four pairs of contact pads $\varnothing 0.6$ mm to the surface of the disk and its reliable fixation during the measurement of the surface electrical resistance. For three groups of disks with different quality factors $Q = 44, 55$ and 70 , the average values of the surface resistance determined are: $136, 212$ and 300 k Ω , and the corresponding average values of the bulk

resistance are: 7.0; 9.2 and 11.8 k Ω . Analysis of the experimental data set revealed a relationship between surface and bulk electrical resistance: higher bulk resistance corresponds to higher surface resistance, with surface resistance being 19.4–25.4 times higher than bulk resistance.

Key words: surface and bulk electrical resistance, aluminum nitride, silicon carbide, bulk absorber of microwave radiation, Q factor, surface electrical resistance measurement method, devices for measuring electrical resistance

Література

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 Engineering Materials.* 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., et al. Electrical conductivity of ceramics of SiC–AlN, SiC–BeO, Al₂O₃ 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. *Materials Chemistry and Physics.* 2021, Vol. 261, N 1, P. 124222–124229.
7. Kultayeva S., Kim Y.-W. Mechanical, thermal, and electrical properties of pressureless sintered SiC–AlN ceramics. *Ceramics International.* 2020. Vol. 46, Is. 11, Part B, P. 19264–19273.
8. Сербенюк Т.Б., Пріхна Т.О., Свєрдун В.Б., та ін. Вплив добавки Y₂O₃ на структуроутворення та властивості композиційних матеріалів на основі AlN–SiC. *Надтверді матеріали.* 2018. № 1, С. 12–22.
9. Часник В.І., Фесенко І.П., Вовк Л.М., Кайдаш О.М. Високе поглинання мікрохвильового випромінювання у вільноспеченому композиті AlN–SiC в діапазоні частот 9,5–34,2 ГГц. *Надтверді матеріали.* 2022. № 2. С. 26–39.
10. Часник В.І., Кайдаш О.М. Вплив температури спікання на об’ємний електричний опір та поглинання електромагнітної енергії вільноспечених композитів AlN–SiC. *Надтверді матеріали.* 2022. № 6. С. 88–92.
11. Часник В.І., Фесенко І.П., Кайдаш О.М. Дослідження електричного опору і поглинання мікрохвильового випромінювання в композитах AlN–SiC з високим вмістом карбіду кремнію. *Інструментальне матеріалознавство: зб. наук. праць.* Вип. 25. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, НАН України, 2022. С. 322–330.
12. Часник В.І., Часник Д.В., Кайдаш О.М. Вплив вмісту карбіду кремнію на об’ємний електричний опір композитів AlN–SiC. *Надтверді матеріали.* 2023. № 5. С. 103–106.

Надійшла 28.05.25

References

1. Mikijelj, B., Abe, D.K., Hutcheon, R. (2003). AlN-based lossy ceramics for high average power microwave devices: performance–property correlation. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 23, 2705–2709.
2. Kobayashi, R., Tatami, J., Wakihara, T., et al. (2006). Electrical properties of AlN–SiC ceramics. *Key Engineering Materials*, 317–318, 641–644
3. 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.
4. Avrov, D.D., Bakin, A.S., Dorozhkin, S.I. et al. (1998). Electrical conductivity of ceramics of SiC–AlN, SiC–BeO, Al₂O₃ in the temperature range 300–1800 K. *High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference*. (Cat. No. 98EX132). 196–198.
5. 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.
6. 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.
7. Kultayeva, S., Kim, Y.-W. (2020). Mechanical, thermal, and electrical properties of pressureless sintered SiC–AlN ceramics. *Ceramics International*. 46 B(11), 19264–19273.
8. Serbenyuk, T.B., Prikhna, T.O., Sverdun, V.B., et al. (2018). Effect of the additive of Y₂O₃ on the structure formation and properties of composite materials based on AlN–SiC. *J Superhard Mater.*, 40(1), 8–15.
9. Chasnyk, V.I., Fesenko, I.P., Vovk, L.M., & Kaidash, O.M. (2022). 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.*, 44(2), 91–101.
10. Chasnyk, V.I., Kaidash, O.M. (2022). Effect of the sintering temperature on the bulk electrical resistance and electromagnetic energy absorption of pressureless sintered AlN–SiC composites. *J. Superhard Mater.*, 44(6), 450–452.
11. Chasnyk, V.I., Fesenko, I.P., Kaidash, O.M. (2022). Doslidzhennia elektrychnoho oporu i pohlynannia mikrokhvylovoho vyprominiuvannia v kompozytakh AlN–SiC z vysokym vmistom karbidu kremniuu [Study of electrical resistance and absorption of microwave radiation in AlN–SiC composites with a high silicon carbide content]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*. (25nd, p, 322–330) [in Ukrainian].
12. Chasnyk, V.I., Chasnyk, D.V., Kaidash, O.M. (2023). Effect of silicon carbide content on bulk electrical resistance of free-sintered AlN–SiC composites. *J. Superhard Mater.* 45(5), 103–106.