

УДК 537.226.1:666.3-1

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

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

<sup>2</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

\*vassiliyiv@gmail.com

\*\*oka07@ism.kiev.ua

## **Вплив температури спікання на об’ємний електричний опір та поглинання електромагнітної енергії вільноспечених композитів AlN–SiC**

*Повідомлено, що з ростом температури спікання від 1800 до 1950 °C у вільноспечених композитів AlN–50 % (за масою) SiC зменшується електричний опір з одночасним збільшенням поглинання електромагнітної енергії. Запропоновано аналітичний вираз, що пов’язує зменшення опору та збільшення поглинання електромагнітної енергії.*

**Ключові слова:** вільне спікання, нітрид алюмінію, карбід кремнію, електричний об’ємний опір, поглинання електромагнітної енергії.

Для розробки нових вакуумних електронних приладів НВЧ діапазону є необхідним та важливим створення матеріалів на основі нітриду алюмінію AlN–Mo, AlN–SiC, які добре поглинають мікрохвильову енергію [1]. Для забезпечення стійкої роботи лампи біжучої хвилі (ЛБХ) зі сповільнювальною системою (СПС) на ланцюжку зв’язаних резонаторів з високою вихідною потужністю об’ємні поглиначі НВЧ енергії повинні мати не тільки високі поглинання і теплопровідність, а також відповідне значення електричного опору.

Електричний опір композитів AlN–SiC залежить не тільки від вмісту карбиду кремнію та розмірів його частинок, які для досліджених композитів AlN–50SiC<sup>1</sup> є постійними, а й від кількості та конфігурації напівпровідникових ланцюжків із частинок SiC.

Мета роботи – встановлення впливу температури та часу ізотермічної витримки за вільного спікання композитів AlN–50SiC на взаємозв’язок електричного опору та поглинання електромагнітної енергії.

---

<sup>1</sup> Тут і далі склад композиту приведено в % (за масою).

Для партії з 30 шт. кільць розміром  $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,6$  мм, виготовлених з композита  $\text{AlN-50SiC}$  і спечених до високощільного стану за температури  $1800^\circ\text{C}$  та витримки 1 год, вимірювали їхній об'ємний електричний опір і поглинання електромагнітної енергії у секції СпС ЛБХ. Електричний опір вимірювали цифровим мультиметром UT 30D (шкала 20 кОм), похибка вимірювання складала  $\pm 10$  Ом. Кільця композита були затиснуті струбцинами між двома дисками з міді  $\varnothing 16 \times 2$  мм. Між основою кожної струбцини та нижнім диском з міді було вставлено ізолюючу прокладку з фторопласту Ф-4 товщиною 1 мм. Вимірювання поглинання у секції детально описано в [2]. Після цього кільця композита розділили на п'ять груп (по 3–4 шт.): А, Б, В, Г, Д. Кільця, що входять до кожної групи, відрізнялися за опором не більше, ніж на 100 Ом. Потім ці кільця допікали за температури 1850, 1900, 1950  $^\circ\text{C}$  з ізотермічною витримкою 1 год і додатково за 1950  $^\circ\text{C}$  ще 1 год. Після кожного спікання повторювали цикл вимірювання електричного опору та поглинання електромагнітної енергії всіх кільць. За допомогою високотемпературного відпалу було одержано ряд композитів одного і того ж складу, структура яких відрізнялася за кількістю утвореного твердого розчину на основі карбиду кремнію. Це спричинило направлену зміну електрофізичних властивостей композита, ймовірно, пов'язану зі збільшенням кількості твердого розчину. Внаслідок цього зростає вміст електропровідної фази і відповідно знижується опір матеріалу.

Результати вимірювання опору та поглинання у кожній групі представлено на рис. 1. Лінії А–Д відповідають середнім значенням електричного опору та поглинання електромагнітної енергії за різної температури спікання кільць композитів. Лінії 1–5, що їх перетинають, поєднують значення опору і поглинання за фіксованої температури спікання – 1800  $^\circ\text{C}$  (1), 1850  $^\circ\text{C}$  (2), 1900  $^\circ\text{C}$  (3), 1950  $^\circ\text{C}$  (4) з ізотермічною витримкою 1 год, і 1950  $^\circ\text{C}$  (5) з витримкою 2 год.

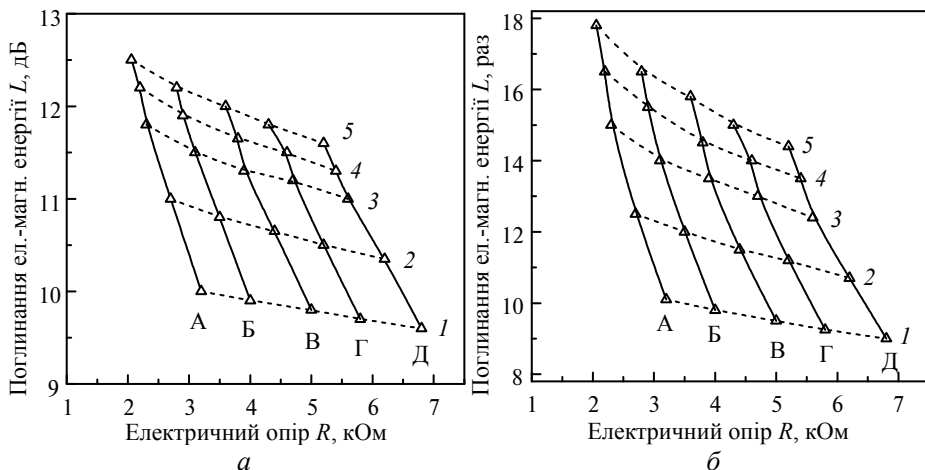


Рис. 1. Взаємозв'язок поглинання електромагнітної енергії  $L$  в дБ (а) та в разях (б) і електричного опору  $R$  композита  $\text{AlN-50SiC}$  в кільцях розміром  $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,6$  мм, спечених за температури 1800 (1), 1850 (2), 1900 (3), 1950 (4)  $^\circ\text{C}$  з ізотермічною витримкою 1 год, і 1950  $^\circ\text{C}$  (5) з витримкою 2 год.

Поглинання електромагнітної енергії кільць вимірювали в децибелах (рис. 1, а). Для правильного порівняння у скільки разів поглинання у кільцях

більше чи менше, значення поглинання було переведено з децибелів у рази (рис. 1, б).

Як видно на рис. 1, для всіх досліджених композитів AlN–50SiC, в інтервалі первинних опорів від 3,2 до 6,8 кОм, у разі збільшення температури спікання від 1800 до 1950 °С поглинання збільшується, а відповідні їм значення електричного опору зменшуються.

Для більшої наочності взаємозв'язок збільшення відносного поглинання електромагнітної енергії  $L_n/L_1$  і відповідного зменшення відносного опору  $R_1/R_n$  представлено на рис. 2.

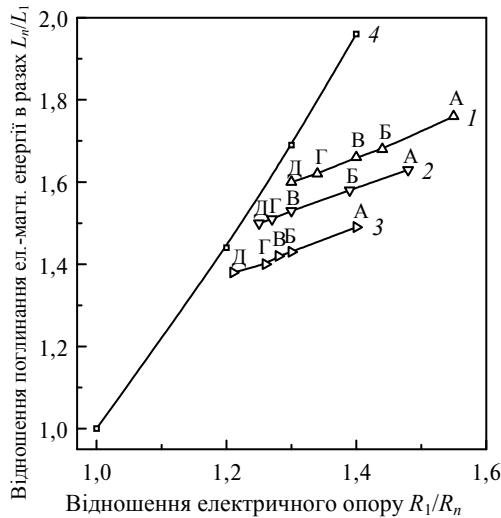


Рис. 2. Взаємозв'язок відносного поглинання електромагнітної енергії  $L_n/L_1$  та відносного електричного опору  $R_1/R_n$  за температури спікання 1950 °С (1) з витримкою 2 год; 1950 °С (2) та 1900 °С (3) з витримкою 1 год; значення  $L_1$  та  $R_1$  одержано для режиму спікання 1800 °С, 1 год; залежність (4) побудована згідно  $(R_1/R_n)^2 = L_n/L_1$ .

Залежність 1 поєднує значення  $R_1/R_5$  і  $L_5/L_1$  за температури спікання 1950 °С з витримкою 2 год, залежність 2 – значення  $R_1/R_4$  і  $L_4/L_1$  для 1950 °С з витримкою 1 год, і 3 – значення  $R_1/R_3$  і  $L_3/L_1$  за 1900 °С. Тут  $R_1$  та  $L_1$  – відповідно значення опору та поглинання за температури спікання 1800 °С. На залежностях 1–3 показано точки А–Д, що відповідають значенням  $R_1/R_n$  і  $L_n/L_1$ , взятим з рис. 1.

Аналіз залежностей 1–3 показав, що відносно збільшення поглинання електромагнітної енергії в кільцях композита пов'язане з відносним зменшенням об'ємного електричного опору наступними аналітичними виразами:

$$L_5/L_1 = \sqrt{\frac{2R_1}{R_5}} \quad (\text{для залежності 1});$$

$$L_4/L_1 = \sqrt{\frac{1,8R_1}{R_4}} \quad (\text{для залежності 2});$$

$$L_3/L_1 = \sqrt{\frac{1,6R_1}{R_3}} \quad (\text{для залежності 3}).$$

Як видно на рис. 2, залежності  $I-3$  йдуть під одним кутом і наближаються до прямої 4:  $(R_1/R_n)^2 = L_n/L_1$ . Пряма 4 фактично є обвідною для прямих  $I-3$  (рис. 2) залежностей  $L_n/L_1 = \sqrt{\frac{KR_1}{R_n}}$  за температури спікання вище 1800 °С.

Тут  $K$  – коефіцієнт від 1,6 до 2,0. Причому, чим більші початкові значення опору (групи Г і Д), тим ближчі ці точки до прямої 4, оскільки відносні значення  $R_1/R_n$  та  $L_n/L_1$  у групах Г та Д стають меншими від значень у групах А та Б, В.

Найчастіше у публікаціях наведено значення питомого об'ємного опору  $R_{\text{пит}}$  (Ом·см), яке обчислювали за відомим співвідношенням  $R_{\text{пит}} = R \cdot S/h$ , де  $R$  – об'ємний електричний опір,  $S$  – поперечний переріз провідника завдовжки  $h$ . Для випадку кільця  $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,6$  мм  $S/h = 6,65$  см, тому  $R_{\text{пит}} = 6,65R$  Ом·см. Оскільки значення об'ємного опору кільць композита AlN–50SiC, для забезпечення максимального поглинання в 11,7–12,5 дБ (див. рис. 1, а), становить 2–4 кОм, то  $R_{\text{пит}} = (1,3-2,7) \cdot 10^4$  Ом·см. Ці значення поглинання відповідають коефіцієнту поглинання електромагнітної енергії 4,5–4,8 дБ/мм (наприклад, для 12,5 дБ : 2,6 мм = 4,8 дБ/мм). На рис. 1, а, б видно, що у разі збільшення температури спікання з 1900 до 1950 °С і витримки до 2 год поглинання електромагнітної енергії зростає в 1,2 рази. Водночас електричний опір знижується від 2,3 до 2,06 кОм (А) та від 3,1 до 2,8 кОм (Б). Побудоване на основі експериментальних даних сімейство залежностей на рис. 1, а, б дозволяє прогнозувати збільшення поглинання до 13 дБ за  $R = 1,25$  кОм, що відповідає коефіцієнту поглинання електромагнітної енергії  $L = 5$  дБ/мм і  $R_{\text{пит}} = 8,3 \cdot 10^3$  Ом·см.

## ВИСНОВКИ

У композитах AlN–SiC збільшення температури спікання з 1800 до 1950 °С приводить до зростання поглинання електромагнітної енергії у 1,76 рази. Водночас преференційний інтервал зміни електричного опору знаходиться в межах  $R_{\text{пит}} = (1,3-2,7) \cdot 10^4$  Ом·см.

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

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

<sup>2</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Influence of sintering temperature on volume electric resistance and absorption of electromagnetic energy of pressureless sintered AlN–SiC composites

*It is reported that with increasing sintering temperature from 1800 to 1950 °C in pressureless sintered AlN–50% SiC composites, the electrical resistance decreases with a simultaneous increase in the absorption of electromagnetic energy. An analytical expression is proposed that connects the decrease in resistance and increase in the absorption of electromagnetic energy.*

**Keywords:** pressureless sintering, aluminum nitride, silicon carbide, electrical bulk resistance, electromagnetic energy absorption.

1. Calame J.P., Garven M., Lobas D., Mayers R.E., Wood F., Abe D.K. Broadband microwave and W-band characterization of BeO–SiC and AlN–based lossy composites for vacuum electronics. 2006 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. held Jointly with 2006 IEEE Int. Vacuum Electron Sources. Monterey, California, USA, 25–27 April, 2006. P. 37–38.

2. Chasnyk V.I., Chasnyk D.V., Fesenko I. P., Kaidash O.M. 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.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 165–176.

Надійшла до редакції 04.04.22

Після доопрацювання 09.05.22

Прийнята до опублікування 10.05.22