

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

<sup>1</sup>Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Державне підприємство “Оріон”, м. Київ, Україна

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

НАН України, м. Київ, Україна

\*vassiliyiv@gmail.com

\*\*oka07@ism.kiev.ua

## **Оцінка діелектричної проникності в непровідних композитах по вмісту і морфології провідних частинок в мікрохвильовій області частот**

*Для різних значень відносної діелектричної проникності  $\epsilon/\epsilon_0$  в системі ізолятор-сфероїдальні частинки теоретично встановлено взаємозв'язок фактора форми і об'ємного вмісту провідних частинок при відсутності макроскопічної електропровідності. Порівняння теоретичних розрахунків діелектричної проникності  $\epsilon$  з експериментальними даними для композита AlN–24 % (за об'ємом) Мо з провідними частинками-сферами дозволило відкорегувати раніше отримані співвідношення  $\epsilon/\epsilon_0$ . Запропоновані нові теоретичні залежності враховують взаємний вплив провідних частинок при наближенні до порога перколяції і дозволяють визначити діелектричну проникність непровідних композитів за об'ємним вмістом і морфологією провідних частинок.*

**Ключові слова:** провідні сфероїдальні частинки, фактор форми, діелектрична проникність, поріг перколяції.

### **ВСТУП**

Діелектрична проникність, як для чистих діелектриків, так і для двофазних діелектричних композитів, що складаються з діелектричної матриці і добавок у вигляді провідних частинок металу або металоподібних сполук, є однією з головних фізичних характеристик цих матеріалів, поряд з теплопровідністю і міцністю. Щороку з'являється все більше робіт, присвячених високотеплопровідній кераміці на основі нітриду алюмінію (AlN) з теплопровідністю  $\lambda = 140\text{--}200$  Вт/(м·К), яка знаходить застосування в різних областях електронної техніки [1–8]: як однофазна кераміка – для ізоляторів в мікрохвильових приладах і в якості підкладок в різних електронних системах; у вигляді двофазних композитів з добавками частинок молібдену, вольфраму, нітриду титану, карбїду кремнію – для об'ємних поглиначів мікрохвильових приладів: лампах біжучої хвилі і клістронів [9–14]. Діелектрична проникність нітриду алюмінію, отриманого вільним спіканням з добавками 3–4 %\* оксиду ітрію ( $Y_2O_3$ ), становить зазвичай  $\epsilon = 8,5\text{--}8,8$  [4]. Діелектрична проникність

---

\* Тут і далі склад матеріалів наведено в % (за об'ємом).

© Д. В. ЧАСНИК, В. І. ЧАСНИК, О. М. КАЙДАШ, 2020

матеріалів AlN–Mo, AlN–W і AlN–TiN дорівнює від 18 до 34 і залежить від об'ємного вмісту провідних частинок (16–20 %).

Метою роботи є оцінка діелектричної проникності  $\epsilon$  в композиційних матеріалах з діелектричною матрицею і металічними провідними частинками мікронного розміру (від 1 до 50–80 мкм) без експериментального вимірювання  $\epsilon$  в мікрохвильовій області частот 3–40 ГГц за рахунок аналізу мікрошліфа композита і визначення по ньому розміру, фактора форми і об'ємного вмісту провідних частинок з подальшим використанням відкорегованих теоретичних залежностей, приведених в [15].

## МЕТОДИКА

Теоретичне оцінювання діелектричної проникності в системі ізолятор–сфероїдальні зерна провідника і її порівняння з експериментально визначеним значенням у мікрохвильовій області для вільноспечених композиційних AlN-матеріалів з вмістом молібдену 16,6–24,0 % (або у відносних одиницях  $c = 0,166–0,240$ ) і фактором форми\*\* зерен Mo, що становить  $\Theta = 1,3–2,9$  за відсутності макроскопічної електропровідності наведено в [15].

Оскільки об'ємний вміст провідної фази у виготовленому матеріалі відомий заздалегідь, то при аналізі структури композита слід звернути особливу увагу на кількість провідних частинок в полі зору на поверхні шліфа та визначити їх фактор форми  $\Theta$ . Для підвищення достовірності і більш точного визначення фактора форми, а отже і діелектричної проникності, необхідно проаналізувати кілька десятків полів зору, в тому числі й після протравлювання шліфа для врахування впливу включень молібдену, що складаються з об'єднаних в ланцюжки декількох частинок, які на поверхні шліфа можуть виглядати як одна довга частинка. Це необхідно для виключення значної погрішності у визначенні довжини провідних частинок. В іншому разі фактор форми для композита буде завищений, а відповідно, завищена і діелектрична проникність композита. Так, наприклад, в інтервалі  $c$  від 0,16 до 0,20, найцікавішому для практики (в переважній частині двофазних композитів початок порога перколяції спостерігається саме в цьому інтервалі), при збільшенні фактора форми на 10 % відносна діелектрична проникність  $\epsilon/\epsilon_d$  зростає на 12 %, якщо  $\Theta = 2,5$  і підвищується на 12–15 % при збільшенні  $\Theta$  до 3,0.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Наведемо дані експериментального визначення діелектричної проникності композита AlN–24Mo з діелектричною матрицею з нітриду алюмінію і провідними частинками молібдену. Цей композит цікавий тим, що має велику діелектричну проникність  $\epsilon = 48$  і унікально великий вміст провідних частинок – 24 % і при цьому залишається діелектриком з об'ємним питомим електричним опором  $10^{12}$  Ом·м [2]. В структурі композита частинки молібдену виглядають як світлі округлі зерна, розташовані у темно-сірій матричній фазі нітриду алюмінію (рис. 1). По мікроструктурі визначено морфологію та розмір 576 частинок молібдену.

На рис. 2 показано відносний кількісний (а) та об'ємний (б) розподіл частинок Mo за розмірами, який враховує всі частинки (1), або обрані із загального масиву частинки виключно сферичної форми (2). Частинки сферичної форми (фактор форми  $\Theta = 1$ ) складають 87 %, причому в цьому композиті міститься значна кількість дрібних сферичних частинок молібдену діаметром

\*\* Фактор форми  $\Theta = l/d$ , де  $l$  – довжина,  $d$  – ширина (діаметр) частинок.

0,7–2,0 мкм, які становлять 69 % від загальної кількості, хоча їх об'єм складає тільки 5 %.

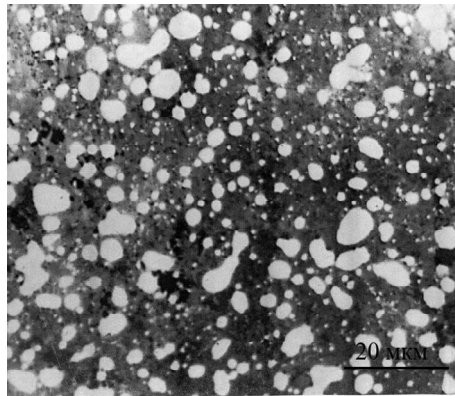


Рис. 1. Мікроструктура шліфа композита AIN–24Mo.

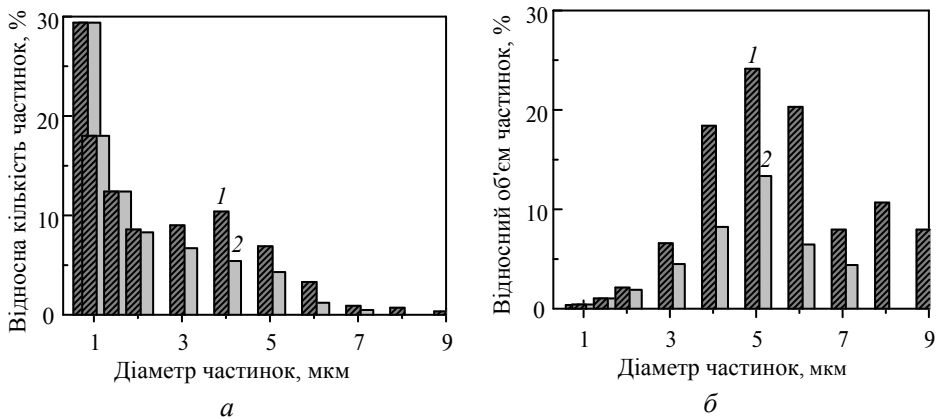


Рис. 2. Гістограма розподілу в композиті частинки Мо за діаметром (а) та об'ємом (б) всього масиву частинки (1) і частинки виключно сферичної форми (2)

Існує певна кореляція між великою кількістю дрібних частинки молибдену і діелектричною проникністю  $\epsilon$  в AIN–Mo. Збільшення кількості дрібних частинки молибдену приводить до збільшення діелектричної проникності [2, 14], що є характерним для композита AIN–24Mo, особливо при наблизенні вмісту провідних частинки молибдену до порогу перколяції ( $c = 0,24$ ). На рис. 3 наведено встановлені експериментально (1) і теоретично (2) залежності відносної діелектричної проникності  $\epsilon/\epsilon_d^{***}$  від об'ємного вмісту  $c$  провідних частинки для композита AIN–Mo [2, 15]. Видно, що експериментальна залежність  $\epsilon/\epsilon_d$  з різними за розмірами частинками молибдену (див. рис. 3, крива 1) і теоретично встановлені залежності для сфероїдних частинки (див. рис. 3, крива 2) мало відрізняються за значеннями діелектричної проникності тільки у області малого вмісту частинки (при  $c \leq 0,16$ ), але з ростом  $c$  різниця у діелектричній проникності, отриманій експериментально і розрахованій теоре-

\*\*\* Обчислюється як відношення діелектричної проникності композита  $\epsilon$  до діелектричної проникності непровідної матричної фази нітриду алюмінію  $\epsilon_d = 8,5$ .

тично, зростає і досягає максимуму при гранично допустимому вмісті молібдену  $c = 0,24$ .

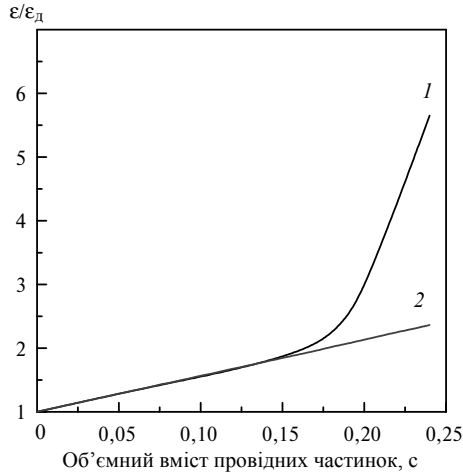


Рис. 3. Експериментальна (1) та розрахована (2) залежності відносної діелектричної проникності  $\epsilon/\epsilon_d$  від вмісту  $c$  провідних частинок у композиті AlN–Mo.

Слід відмітити, що різке зростання діелектричної проникності  $\epsilon$  з 25 до 48 відбувається у вузькому діапазоні зростання вмісту Mo 20–24 %, внаслідок чого  $\epsilon/\epsilon_d$  збільшується вдвічі – з 2,80 до 5,65. Це пов'язано з тим, що при наближенні максимально допустимого вмісту частинок провідної фази  $c = 0,24$  до порогу перколяції віддалі між частинками молібдену суттєво скорочується, деякі з них починають контактувати між собою, утворюючи ланцюжки і розгалужені об'ємні структури, які підвищують поглинання мікрохвильового випромінювання, при цьому значно збільшується і  $\epsilon$  [1, 14]. Аналіз зображення мікроструктури композита (див. рис. 1) свідчить про наявність таких контактуючих частинок молібдену: 35 об'єднань по 2 частинки, 10 – по 3 та 19 ланцюжків по 4–7 частинок, що складає майже 33 % від їх загальної кількості. У теоретично встановлених співвідношеннях між фактором форми  $\Theta$ , різними значеннями  $\epsilon/\epsilon_d$  і об'ємним вмістом провідних сфероїдних частинок це явище ніяк не враховується.

На рис. 4 наведено теоретично встановлені співвідношення між фактором форми  $\Theta$  та об'ємним вмістом провідних сфероїдних частинок  $c$  при різних значеннях відносної діелектричної проникності  $\epsilon/\epsilon_d$  – від 1,6 до 2,8 [15]. Точка 1 на розрахованій граничній перколяційній лінії  $p_c$  (див. рис. 4) визначає максимально досяжну відносну діелектричну проникність  $(\epsilon/\epsilon_d)_{\max} = 2,8$  при оптимальному значенні фактора форми  $\Theta_{\text{теор}} = 3,9$  і об'ємному вмісту провідних сфероїдальних частинок  $c = 0,175$  за умови відсутності макроскопічної електропровідності композита.

У зв'язку з тим, що експериментально виміряна діелектрична проникність  $\epsilon$  композита AlN–Mo в два рази більша, ніж теоретично розрахована, що на думку авторів пов'язано з взаємним впливом провідних частинок при наближенні до порогу перколяції, необхідно провести корекцію теоретичних залежностей.

Для цього було проведено:

– співставлення відносної діелектричної проникності в залежності від вмісту молібдену (див. рис. 3) для композита AlN–Mo з фактором форми  $\Theta = 1,1$  і  $(\epsilon/\epsilon_d)_{\max} = 5,65$  (крива 1), побудованої на основі експериментально встанов-

леної функції  $\varepsilon = f(c)$ , і теоретично розрахованої кривої 2 при максимально досяжному рівні  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\max} = 2,8$  (див. рис. 4), і визначено відповідність  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$  і  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$  при однаковому об'ємному вмісті провідних частинок  $c$ . На рис. 5 представлено залежність співвідношення  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}/(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$  від об'ємного вмісту частинок в інтервалі  $0,14 < c < 0,24$ , тобто до порога перколяції, який для композита AlN–24Mo починається при  $c \geq 0,25$  [2]. За допомогою рис. 5 визначаємо, що ряд фіксованих значень  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}} = 1,6, 1,9, 2,2, 2,5$  і  $2,8$  (див. рис. 4), відповідає новим значенням  $\varepsilon/\varepsilon_d = 1,6, 1,9, 2,5, 3,85$  і  $5,65$ . Перші два значення  $\varepsilon/\varepsilon_d = 1,6$  і  $1,9$  не змінюються, оскільки знаходяться на лінійній ділянці зміни  $\varepsilon/\varepsilon_d$  при низькому вмісті  $c < 0,15$  (див. рис. 3).

– по експериментальній кривій 1 (див. рис. 3) залежності  $\varepsilon/\varepsilon_d = f(c)$  для  $\varepsilon/\varepsilon_d = 1,6, 1,9, 2,5, 3,85$  і  $5,65$  визначаємо відповідні їм значення  $c$ , вони дорівнюють:  $0,11, 0,163, 0,19, 0,215$  і  $0,24$ . Ці реперні точки по  $c$  (за вмістом провідної фази) розташовуємо на рівні  $\Theta = 1,1$ .

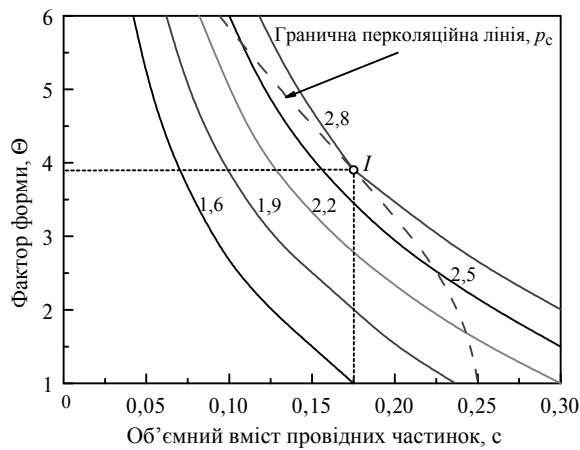


Рис. 4. Теоретично встановлені співвідношення між фактором форми  $\Theta$ , відносною діелектричною проникністю  $\varepsilon/\varepsilon_d$  (показана цифрами на кривих) і об'ємним вмістом  $c$  провідних сфероїдних частинок у композиті.

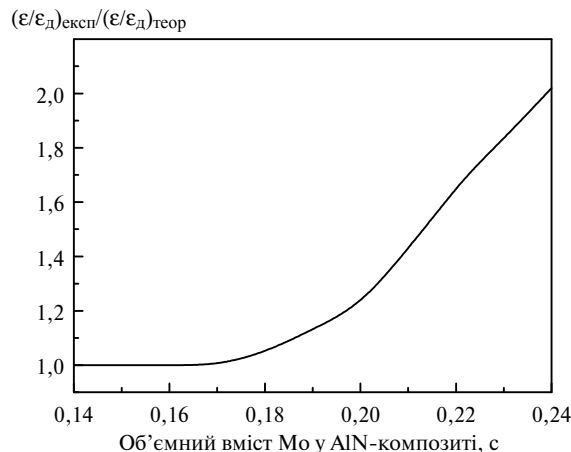


Рис. 5. Зміна співвідношення відносною діелектричною проникністю, вимірюваної експериментально  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$ , і розрахованого значення  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$  при зростанні об'ємного вмісту провідних частинок Mo в AlN-композиті.

– до цих точок проводимо спрямлені лінії  $\varepsilon/\varepsilon_d = 1,6, 1,9, 2,5, 3,85$  і  $5,65$ . Таким чином отримуємо нові теоретичні співвідношення між фактором форми частинок  $\Theta = f(c)$  і відносною діелектричною проникністю  $\varepsilon/\varepsilon_d$ , відкореговані з урахуванням взаємного впливу провідних частинок (рис. 6). З порівняння кривих на рис. 6 і 4 видно, що при значеннях фактора форми  $\Theta > 4$ , відносній діелектричній проникності  $\varepsilon/\varepsilon_d < 3,8$  і  $c < 0,14$ , вони практично не відрізняються одна від одної. Помітна відмінність в значеннях  $c$  починається при зменшенні  $\Theta < 3$  і стає максимальною при наближенні  $\Theta$  до 1. Гранична перколяційна лінія на рис. 6 дещо випрямлена в порівнянні з такою ж лінією  $p_c$  на рис. 4.

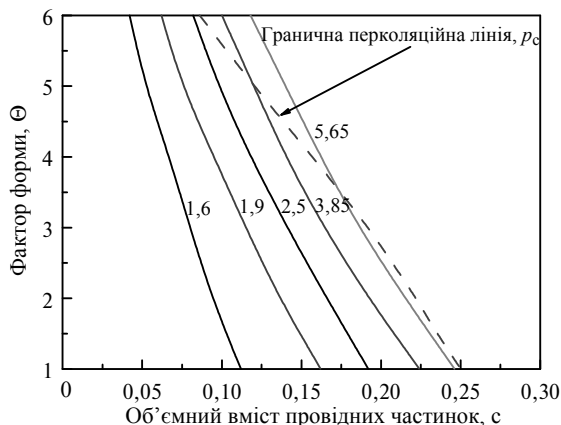


Рис. 6. Теоретичні співвідношення фактора форми  $\Theta$  і об'ємного вмісту  $c$  провідних сферіодних частинок з урахуванням їх взаємного впливу на діелектричну проникність композита  $\varepsilon$ , а відтак і на відносну діелектричну проникність  $\varepsilon/\varepsilon_d$  (показана цифрами на кривих).

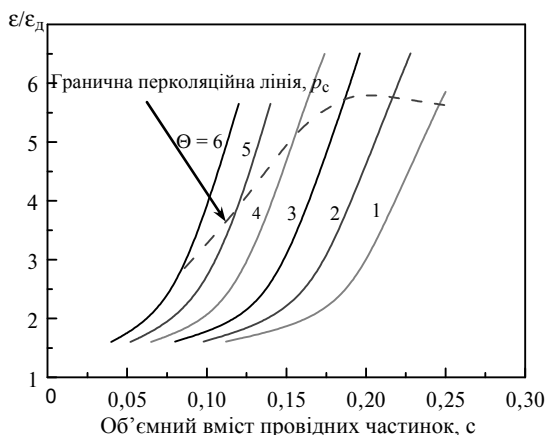


Рис. 7. Теоретичні залежності відносної діелектричної проникності  $\varepsilon/\varepsilon_d$  від об'ємного вмісту  $c$  провідних сферіодних частинок з урахуванням їх взаємного впливу на діелектричну проникність композита  $\varepsilon$ ; цифри на кривих відповідають різним значенням фактора форми  $\Theta$ .

На основі даних рис. 6 побудовано теоретичні співвідношення відносної діелектричної проникності  $\varepsilon/\varepsilon_d$  і об'ємного вмісту провідних частинок з урахуванням їх взаємного впливу одна на одну та сумарного впливу всіх частинок на діелектричну проникність композита (рис. 7).

Як видно на рис. 7, максимальне значення  $\varepsilon/\varepsilon_d = 5,9$  досягається при  $\Theta = 2,8$  і  $c = 0,195$ . Зі співставлення рис. 4 і 7 випливає, що внаслідок врахування взаємного впливу провідних частинок на діелектричну проникність, а відповідно і на  $\varepsilon/\varepsilon_d$ , оптимум по фактору форми  $\Theta$  змістився з 3,9 на 2,8, а вміст провідної фази збільшився з 0,175 до 0,195. Звідси випливає, що максимальне значення діелектричної проникності в композитах з провідними частинками сферіодного типу дорівнює  $\varepsilon = 50$  при діелектричній проникності матриці нітриду алюмінію  $\varepsilon_d = 8,5$ . Слід зазначити, що оптимум по фактору форми досить пологий і в інтервалі  $1,1 < \Theta < 3,3$ , як  $\varepsilon/\varepsilon_d$ , так і  $\varepsilon$  матеріалу, менше свого максимального значення лише на 5 %. Ця обставина є важливою для практичного застосування композиційних матеріалів з частинками сферіодальної (або близької до неї) форми.

По запропонованій в роботі методиці було проаналізовано мікроструктури шліфів двофазних композитів AlN–16,6Mo, AlN–17,9Mo [15], AlN–15,0W [4], AlN–20,4TiN [4, 16], AlN–21TiN [17]. Експериментальні дані по значенню діелектричної проникності  $\varepsilon$  для цих композитів взято з [4, 15]. Результати розрахунків фактора форми провідних частинок Mo, W і TiN, а також значення  $\varepsilon$  та відносної діелектричної проникності  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$  і  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$  наведено в таблиці.

**Фактор форми частинок провідної фази  $\Theta$ , діелектрична проникність  $\varepsilon$ , визначена в мікрохвильовій області на частоті  $f$ , експериментальні і теоретично розраховані значення відносної діелектричної проникності  $(\varepsilon/\varepsilon_d)$  різних AlN-композитів**

| Склад композита, % (за об'ємом) | $\Theta$ | $\varepsilon$ ( $f = 3\text{--}37$ ГГц) | $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$ | $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$ | $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}/\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$ |
|---------------------------------|----------|---|---|---|--|
| AlN–16,6Mo                      | 2,2      | 24                                      | 2,82  | 2,75  | 0,98   |
| AlN–17,9Mo                      | 2,6      | 32                                      | 3,76  | 4,20  | 1,12   |
| AlN–24,0Mo                      | 1,1      | 48 ( $f = 10$ ГГц)                      | 5,65  | 5,65  | 1,00   |
| AlN–15,0W                       | 1,2      | 15                                      | 1,76  | 1,86  | 1,06   |
| AlN–20,4TiN                     | 1,3      | 26,5                                    | 3,12  | 3,40  | 1,09   |

Як видно з даних таблиці, відмінність розрахункових  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{теор}}$  від експериментальних значень  $(\varepsilon/\varepsilon_d)_{\text{експ}}$  становить не більше 12 %, що цілком прийнятно для оцінки діелектричної проникності двофазних композитів типу AlN–Mo, AlN–W, AlN–TiN.

**ВИСНОВКИ**

Запропоновані теоретичні співвідношення відносної діелектричної проникності  $\varepsilon/\varepsilon_d$  і об'ємного вмісту провідних частинок при різних значеннях фактора форми дозволяють визначити діелектричну проникність з точністю 12–15 % у двофазних непровідних композитах і враховують взаємний вплив провідних частинок при наближенні до порога перколяції, який полягає в утворенні ланцюжків і розгалужених об'ємних структур.

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

<sup>1</sup>The Ukrainian Scientific and Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>State Enterprise Scientific Research Institute ORION, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Estimation of the dielectric permeability in non-conductive  
composites with the content and morphology of the conducting  
particles in the microwave frequencies

*For various values of the relative permittivity  $\varepsilon/\varepsilon_0$  in the insulator–spheroidal particles system, the relationship between the aspect ratio and the volume content of conductive particles in the absence of macroscopic electrical conductivity was theoretically calculated. A comparison of the theoretical calculations of the dielectric constant  $\varepsilon$  with the experimental data for the AlN–24 % Mo composite with conductive particles–spheres made it possible to correct the previously obtained  $\varepsilon/\varepsilon_0$  ratios. The proposed new theoretical dependences take into account the mutual influence of conductive particles when approaching the percolation threshold and allow to determine the dielectric constant of non-conductive composites by volume content and morphology of conductive particles.*

**Keywords:** *conductive spheroidal particles, aspect ratio, dielectric constant, percolation threshold.*

1. Бухарин Е.Н., Власов А.С., Алексеев А.А. Керамика на основе нитрида алюминия и металлов. *Стекло и керамика*. 1985. № 2. С. 23–25.
2. Бухарин Е.Н., Власов А.С., Алексеев А.А. Новые высокотеплопроводные объемные СВЧ поглотители. *Электронная техника. Сер. Материалы*. 1988. Вып. 6 (235). С. 66–70.
3. Khan A.A., Labbe J.C. Aluminum nitride–molybdenum ceramic matrix composites: characterization of the ceramic–metal interface. *J. Europ. Ceram. Soc.* 1996. V. 16. P. 739–744.
4. Фесенко І.П., Прокопів М.М., Часник В.І., Кайдаш О.М., Олійник Г.С., Кузенкова М.А. Алюмонітридні функціональні матеріали, одержані з нанодисперсних та мікронних порошків гарячим пресуванням та вільним спіканням. Монограф. / під ред. М. В. Новікова. Київ: ІВЦ АЛКОН, 2015. 172 с.
5. Gu J., Sang L., Pan B., Feng Y., Yang J., Li X. Thermal conductivity and high–frequency dielectric properties of pressureless sintered SiC–AlN multiphase ceramics. *Materials*. 2018. V. 11, no. 6. 969, P. 1–10.
6. Куликов В.И., Мушкаренко Ю.Н., Пархоменко С.И., Прохоров Л.Н. Новый класс керамических материалов на основе теплопроводного нитрида алюминия. *Электронная техника. Сер. СВЧ-техника*. 1993. Вып. 2 (546). С. 45–47.
7. Chasnyk V.I., Fesenko I.P., Kuzenkova M.A., Oleinik G.S., Panichkina V.V., Sverdun V.B., Sergienko N.V., Skryshevska M.G. Microwave dielectric properties of AlN-based composites *Sverkhtverdye Materialy*. 2004. no. 1. P. 16–22.
8. 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.
9. Calame J.P., Abe D.K. Applications of advanced materials technologies to vacuum electronic devices. *Proceedings IEEE*. 1999. Vol. 87, no. 5. P. 840–864.
10. 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, 25–27 April 2006. P. 37–38.
11. Chasnyk V.I. High absorption of the microwave energy in a system with strongly elongated molybdenum grains in aluminum nitride matrix at frequencies of 9.5–10.5 GHz. *J. Superhard Mater.* 2012. V. 34, no. 1. P. 71–73.
12. Часнык В.І. Поглотители СВЧ–энергии на основе нитрида алюминия с высоким уровнем поглощения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2014. № 4. С. 8–12.
13. Calame J.P., Savrun E. Dielectric and thermal conductivity characterization of aluminum nitride-based microwave absorbing ceramics for vacuum electronics. *2018 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf., IVEC*. P. 411–412.
14. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ–излучения. Москва, 1982, 164 с.



15. Chasnyk V.I., Fesenko I.P., Kaidash O.M., Kushch V.I., Zakharchuk G.P. Theoretical and experimental estimations of the dielectric permittivity of AlN–Mo pressureless sintered composites at the frequencies of 3.2–10.0 GHz. *J. Superhard Mater.* 2017. V. 39, no. 4. P. 230–242.
16. Fesenko I.P., Kisly P.S., Kuzenkova M.A., Prikhna T.O., Sulzenko V.K., Dub S.M. Properties of AlN–TiN composite ceramics. *British Ceramic Transaction.* 2000. Vol. 99, no. 6. P. 278–279.
17. Tangen I.-L., Yu Y., Grande T., Hoier R., Einarsrud M.-A. Preparation and characterization of aluminium nitride–titanium nitride composites. *J. Europ. Ceram. Soc.* 2004. Vol. 24, no. 7. P. 2169–2179.

Надійшла до редакції 10.12.19

Після доопрацювання 04.02.20

Прийнята до опублікування 07.02.20