

В. І. Часник¹, Д. В. Часник², О. М. Кайдаш^{3, *}¹Державне підприємство НДІ “Оріон”, м. Київ, Україна²Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України, м. Київ, Україна

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*oksana.kaidash@gmail.com

Дослідження відбиття електромагнітної хвилі в композитах на основі діелектричної матриці та частинок провідника чи напівпровідника

На основі виведених формул для обчислення коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ для значень тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ від 0 до 100 розраховано залежності Γ для діелектричної проникності ϵ' в інтервалі $1 \leq \epsilon' \leq 100$ і значень $\operatorname{tg} \delta$ в інтервалі $0,01 < \operatorname{tg} \delta < 100$. Аналіз розрахованих залежностей Γ від ϵ' і $\operatorname{tg} \delta$ показав, що радикальним рішенням зменшення Γ є застосування композитів з $\epsilon' \leq 10\text{--}15$. Проаналізовано діелектричні характеристики ϵ' , ϵ'' , $\operatorname{tg} \delta$ та коефіцієнт відбиття Γ існуючих композитів на основі AlN у діапазонах частот 12–40 ГГц за вмісту 16,6–17,9 % (за об'ємом) частинок провідника Mo та 20 і 40–50 % (за об'ємом) частинок напівпровідника SiC. Виявлено, що досліджені композити на основі AlN мають найбільші значення ϵ' у діапазоні частот 12–18 ГГц. Встановлено, що для цього діапазону діелектрична проникність дорівнює $\epsilon' = 25\text{--}32$, коефіцієнт відбиття $\Gamma = 0,45\text{--}0,49$, а $\operatorname{tg} \delta < 0,01$ для композитів із вмістом 16,6–17,9 % (за об'ємом) частинок Mo. Для матеріалів з вмістом 40–50 % (за об'ємом) частинок напівпровідника SiC, значення цих величин дорівнюють відповідно $\epsilon' = 18\text{--}36$, $\Gamma = 0,38\text{--}0,58$ і $\operatorname{tg} \delta < 0,45$.

Ключові слова: нітрид алюмінію, молибден, карбід кремнію, частинки провідника та напівпровідника, коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі, діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат.

ВСТУП

Розвиток електровакуумної електроніки в діапазоні міліметрових хвиль жорстко пов'язаний з досягненнями у багатьох галузях науки і техніки. Майбутнє електровакуумних НВЧ-приладів великою мірою залежить від створення і впровадження нових діелектричних матеріалів як з мінімальними, так і з максимальними втратами у мікрохвильовому діапазоні. Одночасно ці нові матеріали повинні мати мінімальне значення діелектричної проникності ϵ' і високу теплопровідність.

Будь-які вакуумні чи електронні твердотільні джерела, такі як генератори і підсилювачі, обов'язково мають у своїй конструкції вакуумщільне вхідне і вихідне вікно для введення і виведення НВЧ-сигналу. Матеріалом для цих вакуумщільних вікон є керамічні матеріали з дуже малими діелектричною проникністю $\epsilon' < 8\text{--}10$, тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta \leq (1\text{--}2) \cdot 10^{-3}\text{--}2 \cdot 10^{-4}$

і високою теплопровідністю 50–100 Вт/(м·К) [1]. Крім того, для забезпечення великого підсилення НВЧ-сигналу, наприклад, у 30–40 дБ (у 2000–10 000 разів), необхідно, щоб на виході приладу було його мінімальне відбиття. Тобто, має бути мінімальне значення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН)¹. Нагадаємо, що КСХН пов'язаний з коефіцієнтом відбиття електромагнітної хвилі Γ відомим рівнянням: $\text{КСХН} = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ [2].

Так, якщо в якості підсилювача НВЧ-сигналу на 33–40 дБ використовувати лампу біжучої хвилі (ЛБХ) зі сповільнювальною системою (СПС) на ланцюжку зв'язаних резонаторів (ЛЗР), то СПС такої ЛБХ складається з трьох секцій. У кожній секції СПС є кільця з композита, який має максимальне $\text{tg}\delta$ чи максимальне значення уявної частини діелектричної проникності ϵ'' для забезпечення мінімального коефіцієнта відбиття Γ чи мінімального КСХН. Крім того, бажано, щоб матеріал композита мав найменше значення діелектричної проникності ϵ' і найвищу теплопровідність. Частинками, що поглинають мікрохвильове випромінювання є включення металу (Mo, W), металоподобної сполуки (TiN) чи напівпровідника (SiC). Такі композити з керамічною матрицею з AlN, Al₂O₃, або BeO і поглинаючими частинками називають об'ємними поглиначами електромагнітної енергії чи поглиначами мікрохвильового випромінювання. Це матеріали з доволі високими значеннями $\text{tg}\delta$, діелектричними втратами ϵ'' , високою теплопровідністю, які можна застосувати як об'ємні поглиначі електромагнітної енергії у приладах НВЧ-техніки.

Метою дослідження є вибір оптимальних діелектричних параметрів композитів, що складаються з діелектричної матриці та частинок провідника (металу) чи напівпровідника, для забезпечення мінімального відбиття електромагнітної хвилі. Для цього необхідно визначити діапазон частот в якому відбувається найменше відбиття електромагнітної хвилі.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що коли електромагнітна хвиля падає на поверхню матеріалу, то поряд з процесом поглинання має місце і відбиття хвилі від границі розділу середовища [2]. Це явище обумовлене відмінними хвильовими опорами первісного середовища (вільного простору) в якому розповсюджується електромагнітна хвиля і другого середовища – матеріалу, що поглинає хвилю. Чим більша є ця відмінність, тим більше значення коефіцієнта відбиття Γ . Водночас коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі зрештою є основним параметром, який характеризує поглинач мікрохвильового випромінювання. Якщо електромагнітна хвиля падає нормально на поверхню розділу двох немагнітних середовищ, то коефіцієнт відбиття має наступний вигляд [3]:

$$\Gamma = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \right|^2, \quad (1)$$

де ϵ_1 і ϵ_2 – значення діелектричної проникності першого і другого середовища відповідно.

Формула (1) придатна як для прозорого, так і для поглинаючого середовища. Якщо електромагнітна хвиля падає із вакуумного середовища (або з повітря), то використовують комплексний показник заломлення

$$n = \lambda_0/\lambda = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (2)$$

¹ КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (VSWR – Voltage Standing Wave Ratio) – відношення максимальної амплітуди стоячої хвилі до її мінімального значення.

де λ_0 , λ – довжина хвилі (фазова швидкість) у вакуумі та в матеріалі відповідно; μ – магнітна проникність матеріалу. Тоді для Γ одержимо

$$\Gamma = \frac{(n'_2 - 1)^2 + (n''_2)^2}{(n'_2 + 1)^2 + (n''_2)^2}. \quad (3)$$

З врахуванням того, що для ідеальних діелектриків $\epsilon'' = 0$ і $\mu = 1$, вираз (2) перетворюється у відоме співвідношення Максвелла

$$n = \sqrt{\epsilon'} \quad (4)$$

Загально для поглинаючих матеріалів показник заломлення n є величиною комплексною:

$$n = n' - in'', \quad (5)$$

що зв'язана з хвильовим числом k співвідношенням

$$k = \frac{\omega n}{c} \quad (6)$$

де ω – кругова частота електромагнітної хвилі; $\omega = 2\pi f$; c – швидкість світла.

Дійсну n' та уявну n'' частини за $\mu'' = 0$ можна розрахувати за формулою [3]

$$n' = \sqrt{\epsilon' \mu'} \sqrt{0,5(1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})}; \quad (7.1)$$

$$n'' = \sqrt{\epsilon' \mu'} \sqrt{0,5(-1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})}. \quad (7.2)$$

Якщо $\text{tg} \delta \ll 1$ і $\mu' = 1$ (а у композита AlN–Mo до порога перколяції $\text{tg} \delta = 0,005$), квадрат цієї величини дорівнює $2,5 \cdot 10^{-5}$, то можна прийняти, що $\text{tg}^2 \delta = 0$, і тоді формули (7.1) і (7.2) спрощуються до $n' = \sqrt{\epsilon'}$, а $n'' = 0$.

В цьому разі формулу (3) можна спростити до

$$\Gamma = \left(\frac{\sqrt{\epsilon'_2} - 1}{\sqrt{\epsilon'_2} + 1} \right)^2 \quad (8)$$

де ϵ'_2 – дійсна частина комплексної діелектричної проникності матеріалу (другого середовища), що одночасно поглинає і відбиває електромагнітну хвилю.

Точні формули для обчислення коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ (з урахуванням (7.1) і (7.2)) для різних значень тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta$ в діапазоні від 0 до 100 наведено у табл. 1.

На рис. 1 приведено залежності коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ від діелектричної проникності ϵ' для діапазону значень тангенса кута діелектричних втрат від 0 до 3. Ці залежності розраховані за формулами (3) (див. рис. 1, криві 1–4) і (8) (див. рис. 1, крива 5). Діелектричну проникність ϵ' наведено у логарифмічному масштабі на рис. 1, де видно, що коефіцієнт відбиття Γ найбільш стрімко зростає за $\text{tg} \delta = 0$. Так, наприклад, у разі збільшення діелектричної проникності ϵ' від 4 до 60 і $\text{tg} \delta = 0$ коефіцієнт відбиття збільшується в 6 раз (від 0,1 до 0,6), а за $\text{tg} \delta = 3$ (у тому ж інтервалі ϵ') Γ зростає тільки у 2 рази – від 0,4 до 0,8. Для $\text{tg} \delta = 0$ залежність коефіцієнта відбиття Γ в інтервалі збільшення діелектричної проникності ϵ' від 4 до 100 є прямою лінією. Для більших значень $\text{tg} \delta$ кут нахилу залежностей $\Gamma(\epsilon')$ зменшується і вони проходять більш полого, але водночас значення Γ є значно більшими.

Для полідисперсного AlN (без домішок) $\epsilon' = 8,5$, у різних матеріалах об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання $\epsilon' = 16$ –54 [1, 3], а значення $\text{tg} \delta = 0,005$ –1,0. З урахуванням цього на рис. 2 приведено залежності коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від тангенса кута діелектричних

втрат $\text{tg}\delta$ для значень дійсної частини діелектричної проникності ϵ' в інтервалі від 10 до 50. Як видно на рис. 2, залежність коефіцієнта відбиття Γ від $\text{tg}\delta$ є доволі неординарною і цікавою, є три інтервали для $\text{tg}\delta$: 0,01–1, 1–10 та 10–100, у яких значення коефіцієнта відбиття Γ у разі зміни ϵ' від 10 до 50 збільшуються подібно. Так, у першому інтервалі значення Γ зростають у 1,12–1,37 разів, у другому інтервалі це зростання найбільше – у 1,38–2,03 рази, а у третьому Γ зростає не так стрімко – лише у 1,09–1,21 рази.

Таблиця 1. Значення тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, дійсної n' і уявної n'' частин комплексного показника заломлення та формули для обчислення коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ

$\text{tg}\delta$	n'	n''	Γ
0	$\sqrt{\epsilon'}$	0	$\frac{(\sqrt{\epsilon'} - 1)^2}{(\sqrt{\epsilon'} + 1)^2}$
0,3	$1,011\sqrt{\epsilon'}$	$0,148\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(1,011\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 0,022\epsilon'}{(1,011\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 0,022\epsilon'}$
0,5	$1,03\sqrt{\epsilon'}$	$0,243\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(1,03\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 0,059\epsilon'}{(1,03\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 0,059\epsilon'}$
1	$1,1\sqrt{\epsilon'}$	$0,455\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(1,1\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 0,207\epsilon'}{(1,1\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 0,207\epsilon'}$
4	$1,6\sqrt{\epsilon'}$	$1,25\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(1,6\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 1,56\epsilon'}{(1,6\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 1,56\epsilon'}$
18	$3,08\sqrt{\epsilon'}$	$3,0\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(3,08\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 9,0\epsilon'}{(3,08\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 9,0\epsilon'}$
40	$4,53\sqrt{\epsilon'}$	$4,416\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(4,53\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 19,5\epsilon'}{(4,53\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 19,5\epsilon'}$
100	$7,107\sqrt{\epsilon'}$	$7,036\sqrt{\epsilon'}$	$\frac{(7,107\sqrt{\epsilon'} - 1)^2 + 49,5\epsilon'}{(7,107\sqrt{\epsilon'} + 1)^2 + 49,5\epsilon'}$

Слід звернути особливу увагу на те, що навіть у першому інтервалі зміни значень $\text{tg}\delta$ від 0,01 до 1,0 значення коефіцієнта відбиття Γ є доволі великими: від 0,4–0,5 за $\epsilon' = 20$ і до 0,57–0,64 за $\epsilon' = 50$, тобто втрачається від 16–25 % до 32–41 % потужності електромагнітної хвилі. Для того, щоб зменшити відбиття електромагнітної хвилі в приладах НВЧ використовують відомі конструктивні рішення, які дозволяють значно покращити узгодження мікрохвильового випромінювання, але немає радикальних рішень конструктивного плану, які б цілком виключили відбиття електромагнітної хвилі в таких приладах. Окрім цього, у разі використання в лампі біжучої хвилі або в лазерах матеріалів з високою діелектричною проникністю в металевих резонаторах сповільнювальній системі суттєво підвищуються вимоги до точності механічного виготовлення деталей. Це обумовлено не тільки зменшенням геометричних розмірів, але також тим, що властивості резонаторів сильно змінюються, якщо виникають навіть незначні повітряні проміжки між поглиначем і стінкою резонатора СпС. Водночас дисперсійна крива сповільнювальної системи істотно змінюється у разі виникнення навіть найменшого такого проміжку.

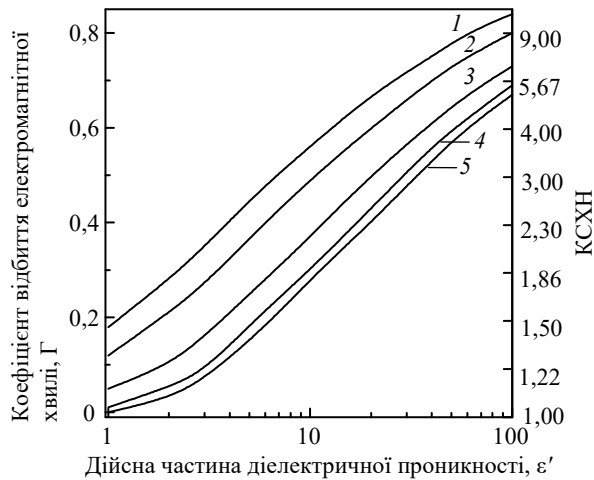


Рис. 1. Залежність коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ та КСХН від дійсної частини діелектричної проникності ϵ' в композитах AlN–Mo для значень $\text{tg}\delta$: 3 (1), 2 (2), 1 (3), 0,5 (4), 0 (5).

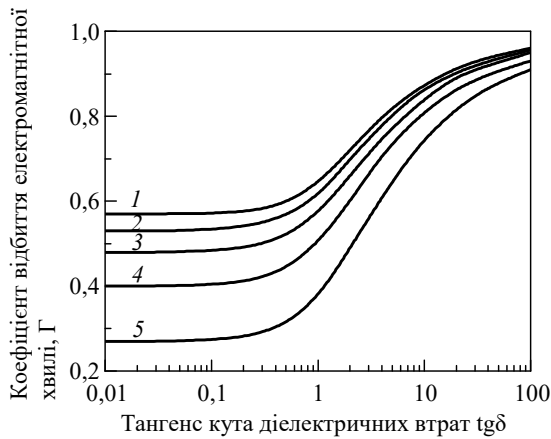


Рис. 2. Залежність коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ від тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ в композитах AlN–Mo для значень ϵ' : 50 (1), 40 (2), 30 (3), 20 (4), 10 (5).

Значення $\text{tg}\delta > 0,5$ –1 є характерними для вмісту частинок провідника і напівпровідника у композитах на основі AlN, який відповідає значенням електричного опору після порогу перколяції. З іншого боку, великі значення коефіцієнта відбиття $\Gamma > 0,6$ за $\text{tg}\delta > 1$ є яскравим прикладом того, що після порога перколяції більша частина електромагнітної енергії відбивається від матеріалу композитів навіть за $\epsilon' > 6$.

Було зроблено аналіз мікрохвильових діелектричних характеристик – дійсної (ϵ') і уявної (ϵ'') частин комплексної діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ керамічних композитів на основі нітриду алюмінію (AlN–SiC, AlN–Mo) і на основі оксиду берилію (BeO–SiC) у смузі частот 12–40 ГГц. Склад цих композитів, які поглинають мікрохвильову енергію, та їхні діелектричні характеристики у діапазоні частот 12–40 ГГц наведено у табл. 2. Результати показали, що чим менша частота, тим більшою є діелектрична проникність ϵ' , що узгоджується з даними [9].

Таблиця 2. Склад композита, його діелектричні характеристики (ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$) та коефіцієнт відбиття Γ у діапазоні частот $f = 12\text{--}40$ ГГц

Склад композита, % (за об'ємом)	Дійсна ϵ' та уявна ϵ'' частини комплексної діелектричної проникності та коефіцієнт відбиття Γ за частоти f , ГГц					$\text{tg}\delta^*$	Джерело
		12	18	30	40		
AlN–20SiC	ϵ'/ϵ''	16,3/4,3	15,0/4,0	13,6/3,6	12,8/3,8	0,27	[4, 5]
	Γ	0,37	0,36	0,34	0,33	–	
AlN–20SiC	ϵ'/ϵ''	14,5/3,5	12,9/3,1	10,5/2,5	9,1/2,2	0,24	[7]
	Γ	0,37	0,36	0,34	0,33	–	
AlN–20SiC	ϵ'/ϵ''	16,4/4,5	14,2/3,9	12,3/3,4	11,4/3,2	0,28	[8]
	Γ	0,37	0,35	0,325	0,31	–	
AlN–20SiC	ϵ'/ϵ''	10,3/1,0	9,5/0,9	8,6/0,8	8,1/0,77	0,10	[9, 11]
	Γ	0,27	0,255	0,235	0,225	–	
AlN–40SiC	ϵ'/ϵ''	36,4/15,3	29,1/12,2	23,6/9,9	21,5/9,0	0,42	[4]
	Γ	0,55	0,505	0,46	0,45	–	
AlN–40SiC	ϵ'/ϵ''	18,2/4,7	16,7/4,3	15,1/3,9	14,3/3,7	0,26	[9, 11]
	Γ	0,40	0,38	0,36	0,35	–	
AlN–50SiC	ϵ'/ϵ''	24,7/7,5	22,8/6,9	20,6/6,3	19,4/5,9	0,30	[9, 11]
	Γ	0,40	0,38	0,36	0,35	–	
BeO–20SiC	ϵ'/ϵ''	18,0/2,2	17,4/4,0	–	–	0,12/0,23 (12/18 ГГц)	[6]
	Γ	0,38	0,37	–	–	–	
BeO–40SiC	ϵ'/ϵ''	42,0/19,0	–	–	–	0,45	[6]
	Γ	0,58	–	–	–	–	
AlN–16,6Mo	ϵ'/ϵ''	25,0/0,2	25,0/0,2	25,0/0,2	25,0/0,2	0,008	[3, 12]
	Γ	0,45	0,45	0,45	0,45	–	
AlN–17,9Mo	ϵ'/ϵ''	32,0/0,3	32,0/0,3	32,0/0,3	32,0/0,3	0,0094	[3, 12]
	Γ	0,49	0,49	0,49	0,49	–	

*Значення тангенса кута діелектричних втрат розраховані за відомою формулою $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$

Усі досліджені композити на основі AlN мають найбільші значення ϵ' у діапазоні 12–18 ГГц, причому, чим більший вміст SiC, тим вищі будуть значення ϵ' і ϵ'' . Якщо вміст SiC зростає і складає 40 чи 50 %², то відповідно підвищується і ϵ' до 19–26 [10], 12–37 [7]³, 14,3–18,2 [9, 11] та 19,4–24,7 [9, 11] для AlN–50 % SiC, і 42 [6] для BeO–40 % SiC (див. табл. 2). Видно, що в дослідженому інтервалі 12–40 ГГц у композитах AlN–Mo діелектрична проникність не залежить від частоти. Це підтверджується результатами досліджень наведеними у [10–12]. Значення ϵ' у композитах AlN–16,6 % Mo та AlN–17,9 % Mo становлять відповідно 25 та 32 у діапазоні частот 12–40 ГГц, а $\text{tg}\delta$ дорівнює 0,008 та 0,01.

² Тут і далі склад композитів приведено в % (за об'ємом).
³ Залежності дійсної ϵ' та уявної ϵ'' частин комплексної діелектричної проникності від частоти для композитів AlN–SiC [7, 8] було скориговано та наведено на рис. 6 (а–в) у [10].

Як показує аналіз даних табл. 2, для усіх композитів AlN–20 % SiC тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta < 0,3$ [4–9], а коефіцієнт відбиття $\Gamma \leq 0,37$ для частоти 12 ГГц і $\Gamma \leq 0,35$ для $f = 18$ ГГц. У діапазоні частот 30–40 ГГц значення коефіцієнта відбиття ще менше – $\Gamma < 0,24$ –0,34. І тільки коли вміст SiC підвищується до 40–50 %, тангенс кута діелектричних втрат зростає до $\operatorname{tg}\delta = 0,42$ –0,45, а коефіцієнт відбиття – до значень $\Gamma = 0,40$ –0,58 в інтервалі частот 12–18 ГГц. У діапазоні частот 30–40 ГГц значення коефіцієнта відбиття дорівнює $\Gamma = 0,36$ –0,46. За вмісту SiC 40–50 % значно зростає $\epsilon' = 25$ –36 [4, 9, 11] в інтервалі частот 12–18 ГГц і зменшується до $\epsilon' = 15$ –24 для частот 30–40 ГГц. Аналіз залежностей $\Gamma(\operatorname{tg}\delta)$ на рис. 1 і 2 показав, що на зростання коефіцієнта відбиття Γ більшою мірою впливає збільшення дійсної частини діелектричної проникності ϵ' , ніж збільшення тангенса кута діелектричних втрат в інтервалі $\operatorname{tg}\delta < 0,4$ –0,5. Як видно на рис. 2, значення коефіцієнта відбиття Γ зростає дуже повільно в інтервалі $0,01 < \operatorname{tg}\delta < 0,5$ для усіх значень ϵ' від 10 до 50 і складає 1,06–1,08, тобто збільшується всього на 6–8 %. Головним фактором збільшення коефіцієнта відбиття є зростання діелектричної проникності ϵ' . Так, наприклад, для $\operatorname{tg}\delta = 0,01$ –0,1 у разі збільшення ϵ' від 10 до 50 значення коефіцієнта відбиття зростають у 2 рази – від 0,280 до 0,566. Аналогічно на зростання Γ впливає збільшення ϵ' від 10 до 50 за $\operatorname{tg}\delta = 0,5$. Як показують розрахунки, в цьому разі Γ збільшується також вдвічі – від 0,3 до 0,6. Тобто зростання $\operatorname{tg}\delta$ у 50 разів в інтервалі $\operatorname{tg}\delta = 0,01$ –0,5 збільшує Γ на 6–8 %, а зростання ϵ' у 5 разів (від 10 до 50) збільшує Γ у 2 рази.

Отже, з аналізу розрахованих залежностей коефіцієнта відбиття Γ від $\operatorname{tg}\delta$ і значень дійсної частини комплексної діелектричної проникності ϵ' , а також експериментальних значень $\operatorname{tg}\delta$ в досліджених композитах на основі AlN видно, що найбільш суттєво на зростання коефіцієнта відбиття впливає збільшення діелектричної проникності ϵ' у порівнянні з аналогічним збільшенням $\operatorname{tg}\delta$, особливо для інтервалу $\operatorname{tg}\delta < 0,4$ –0,5. А саме такими є значення $\operatorname{tg}\delta$ більшості досліджених композитів на основі AlN у діапазоні частот 12–40 ГГц.

ВИСНОВКИ

Для обчислення коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі Γ для значень тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ від 0 до 100 отримано відповідні формули. Для композитів на основі AlN приведено залежності коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від діелектричної проникності ϵ' в інтервалі $1 \leq \epsilon' \leq 100$ і значень тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ в інтервалі $0,01 < \operatorname{tg}\delta < 100$. На основі аналізу розрахованих залежностей Γ від ϵ' і $\operatorname{tg}\delta$ обґрунтовано радикальні рішення для зменшення відбиття електромагнітної хвилі, яке дозволяє значно поліпшити узгодження мікрохвильового випромінювання для застосування композиційних матеріалів з діелектричною проникністю меншою за $\epsilon' < 10$ –15.

Проведено аналіз діелектричних характеристик ϵ' , ϵ'' , $\operatorname{tg}\delta$ та коефіцієнта відбиття Γ існуючих композитів на основі AlN у діапазонах частот 12–40 ГГц за вмісту частинок провідника Mo 16,6–17,9 % і частинок напівпровідника SiC 20 % та 40–50 %. Виявлено, що досліджені композити мають найбільші значення ϵ' в діапазоні частот 12–18 ГГц. Встановлено, що для композитів AlN–Mo з вмістом частинок провідника Mo 16,6–17,9 % у цьому діапазоні частот діелектрична проникність дорівнює $\epsilon' = 25$ –32, коефіцієнт відбиття $\Gamma = 0,45$ –0,49, $\operatorname{tg}\delta < 0,01$. Для матеріалів AlN–SiC із вмістом 40–50 % частинок напівпровідника SiC ці величини мають значення $\epsilon' = 18$ –36, $\Gamma = 0,38$ –0,58 і $\operatorname{tg}\delta < 0,45$.

Показано, що розраховані значення коефіцієнта відбиття Γ зростають дуже повільно (лише на 6–8 %) в інтервалі змін тангенса кута діелектричних втрат $\tan\delta$ від 0,01 до 0,5 для усіх фіксованих значень діелектричної проникності ϵ' від 10 до 50. З іншого боку, у разі збільшення діелектричної проникності ϵ' від 10 до 50 значення коефіцієнта відбиття зростає вдвічі. Отже, головним фактором збільшення коефіцієнта відбиття Γ є зростання діелектричної проникності ϵ' композита.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не мала зовнішнього фінансування.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

V. I. Chasnyk¹, D. V. Chasnyk², O. M. Kaidash³

¹State Enterprise Scientific Research Institute ORION, Kyiv, Ukraine

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

³Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Research of electromagnetic waves reflection in composites based on a dielectric matrix and particles of conductor or semiconductor

Formulas for calculating the electromagnetic wave reflection coefficient Γ are given for the values of the dielectric loss tangent $\tan\delta$ from 0 to 100. Based on the given formulas, the dependences Γ for the dielectric permittivity ϵ' in the interval $1 \leq \epsilon' \leq 100$ and the values of $\tan\delta$ in the interval $0,01 < \tan\delta < 100$ were calculated. Analysis of the calculated dependences Γ on ϵ' and $\tan\delta$ showed that a radical solution to reduce Γ is the use of composites with $\epsilon' \leq 10$ –15. The dielectric characteristics ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ and the reflection coefficient Γ of existing AlN-based composites in the frequency ranges of 12–40 GHz with a content in % (by volume) particles of the conductor Mo 16.6–17.9 % and particles of semiconductor SiC 40–50 % were analyzed. The studied AlN-based composites was found to have the highest values of ϵ' in the frequency range of 12–18 GHz. It was established that for this range the dielectric constant is $\epsilon' = 25$ –32, the reflection coefficient $\Gamma = 0.45$ –0.49, and $\tan\delta < 0.01$ for the composites with a content of 16.6–17.9 % Mo particles. For materials with a content of 40–50 % SiC semiconductor particles, these values are $\epsilon' = 18$ –36, $\Gamma = 0.38$ –0.58 and $\tan\delta < 0.45$, respectively.

Keywords: aluminum nitride, molybdenum, silicon carbide, particles of conductor and semiconductor, electromagnetic wave reflection coefficient, dielectric constant, dielectric loss tangent.

1. Часнык В.И. Объемные поглотители СВЧ-излучения для электровакуумных приборов. Київ: ИПЦ АЛКОН, 2014. 70 с.
2. Лебедев И.В. Стоячие волны и согласования. Техника и приборы СВЧ. 7-я глава. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
3. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. 164 с.
4. Calame J.P., Abe D.K., Levush B., Danly B.G. Variable temperature measurements of the complex dielectric permittivity of lossy AlN–SiC composites from 26.5–40 GHz. *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89, is. 10. P. 5618–5621.
5. Calame J.P., Garven M., Lobas D.A., Myers R.E., Wood F.N., Abe D.K. Broadband microwave and W-band characterization of BeO–SiC and AlN-based lossy composites for vacuum electronics. *IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. held jointly with 2006 IEEE Int. Vacuum Electron Sources*. Monterey, California, April 25–27, 2006. P. 37–38.

6. Calame J.P., Abe D.K. Applications of advanced materials technologies to vacuum electronic devices. *Proc. IEEE*. 1999. Vol. 87, is. 5, P. 840–864.
7. Gu J., Sang L., Pan B., Feng Y., Yang J. and Li X. Thermal conductivity and high-frequency dielectric properties of pressureless sintered SiC–AlN multiphase ceramics. *Materials*. 2018. Vol. 11, is. 6. P. 969.
8. Zang X., Lu Y. Preparation and dielectric properties at high frequency of AlN-based composited ceramic. *J. Mater. Sci. – Mater. Electron*. 2020. Vol. 31, is. 6. P. 2826–2832.
9. Chasnyk V.I., Chasnyk D.V., Kaidash O.M. Complex permittivity in the AlN–SiC composite in the 1–100 GHz microwave frequency range. *Powder Metall. Met. Ceram*. 2023. Vol. 62, is. 1–2. P. 66–76.
10. 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, is. 2, P. 91–101.
11. Chasnyk V.I., Kaidash O.M., Vovk L.M., Fesenko I.P. Influence of the silicon carbide particle size on dielectric characteristics, thermal conductivity, and microwave absorption of pressureless-sintered AlN–(20–50)% SiC composites. *Powder Metall. Met. Ceram*. 2022. Vol. 61, is. 1–2. P. 50–59.
12. Chasnyk V., Chasnyk D., Fesenko I., Kaidash O., Turkevych V. Dielectric characteristics of pressureless sintered AlN-based composites in the 3–37 GHz frequency range. *J. Mater. Sci.:Mater. Electron*. 2021. Vol. 32, is. 2. P. 2524–2534.

Надійшла до редакції 29.08.25

Після доопрацювання 08.09.25

Прийнята до опублікування 11.09.25