

В. І. Часник¹, Д. В. Часник², О. М. Кайдаш^{3, *}

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

*oksana.kaidash@gmail.com

Вплив вмісту і розподілу за розмірами частинок молибдену на діелектричні характеристики та поглинання електромагнітної енергії композитів AlN–Mo

Наведено експериментально встановлені значення діелектричної проникності ϵ' і тангенса кута діелектричних втрат $\tan\delta$ для вільноспечених композитів на основі AlN з вмістом частинок провідника (Mo) у широкому інтервалі від нуля до досягнення критичної концентрації частинок молибдену, тобто поблизу порога перколяції. Показано, що в досліджених композитах як дійсна ϵ' , так і уявна ϵ'' частини діелектричної проникності монотонно збільшуються за зростання вмісту частинок провідника, досягають максимальних значень поблизу порогу перколяції і дорівнюють $\epsilon' = 25\text{--}33\text{--}48$. Визначено поглинання мікрохвильової енергії в композитах AlN–Mo для різного вмісту та дисперсності частинок провідника. Встановлено взаємозв'язок між діелектричними втратами ϵ'' і рівнем мікрохвильового поглинання в залежності від вмісту частинок провідника поблизу порога перколяції.

Ключові слова: нітрид алюмінію, молибден, об'ємний поглинач, діелектрична проникність, діелектричні втрати, тангенс кута діелектричних втрат, поглинання електромагнітної енергії, поріг перколяції.

ВСТУП

Широке застосування композитів на основі AlN пов'язане як з їхнім використанням в якості діелектричної кераміки для тепловідводів у радіоелектронній техніці, так і як композитів для поглинання електромагнітної енергії. Їхні діелектричні характеристики та поглинання необхідно покращувати для розробки електронних приладів нового покоління з високою вихідною потужністю та для забезпечення стабільної роботи існуючих приладів.

Основним напрямком розвитку техніки радіозв'язу, що забезпечує передачу зростаючих обсягів інформації, є використання надвисоких і вкрай високих¹ частот випромінювання. Наразі інтенсивно використовують діапазон міліметрових хвиль з частотами від 10 до 40 ГГц. Нова апаратура має забезпечувати високу вихідну потужність в широкій смузі частот за одночасного

¹ Діапазони вищих частот: надвисокі (НВЧ, 3–30 ГГц); вкрай високі (ВВЧ, 30–300 ГГц).

зменшення її габаритів і ваги. Тому розвитку і вдосконаленню електронних приладів нового покоління з високою вихідною потужністю приділяють особливу увагу, оскільки вони багато у чому визначають рівень розвитку електровакуумних НВЧ-приладів [1]. Найбільшою мірою це стосується потужних підсилювачів міліметрового діапазону електромагнітних хвиль, оскільки їхня безвідмовна робота вимагає контролю значних теплових потоків, які виникають під час експлуатації [2]. Завдяки своїм високим діелектричним властивостям і теплопровідності нітрид алюмінію AlN і нітрид кремнію Si₃N₄ дедалі ширше застосовують в електроніці високої потужності та у вакуумній електроніці. Теплопровідність полікристалічного нітриду алюмінію складає 63–68 % від її теоретичного значення і становить $\lambda = 200\text{--}220 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [3]. Відомо, що головною домішкою, яка суттєво знижує теплопровідність AlN є кисень [4].

Широке застосування матеріалів на основі AlN пов'язане як з використанням їх як діелектричної кераміки для тепловідводів в радіоелектронній техніці, так і в якості поглинаючих електромагнітну енергію композитів. Така кераміка має матрицю з AlN з включеннями молібдену [5–10], вольфраму [11–14], або карбіду кремнію [15–19] замість матеріалів на основі оксиду берилію, токсичних у процесі виготовлення [17]. Композити на основі нітриду алюмінію є перспективними матеріалами для поглинання інтенсивних потоків мікрохвиль у приладах вакуумної електроніки типу ламп біжучої хвилі (ЛБХ), клістронів, магнетронів [1, 2, 8].

Зазвичай вивчають макровластивості композитних структур типу діелектричної матриці з включеннями провідника, і саме для них визначають діелектричну проникність. Наприклад, наведено мікрохвильові діелектричні характеристики композитів на основі AlN, які поглинають мікрохвилі у смузі частот 0,5–18 ГГц [20]. Але тільки у невеликій кількості публікацій, які стосуються композитів на основі AlN, наведено дані з рівня поглинання мікрохвильового випромінювання [7–9, 21–23], також мало публікацій щодо впливу вмісту і дисперсності частинок провідника (молібдену) на поглинання електромагнітної енергії [19–24].

Метою роботи було дослідження діелектричних характеристик (ϵ' , $\text{tg}\delta$) композитів системи AlN–Mo з різним вмістом частинок провідника у широкому інтервалі від нуля до порога перколяції та визначення рівня поглинання електромагнітної енергії в композитах у залежності від вмісту Mo, на підставі цього встановлення взаємозв'язку між діелектричними втратами ϵ'' і рівнем мікрохвильового поглинання за вмісту частинок провідника поблизу порога перколяції, та аналіз зміни поглинання мікрохвиль за умови досягнення в композиті критичної концентрації електропровідних частинок поблизу та на всій протяжності порога перколяції.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порошок AlN було синтезовано прямим азотуванням алюмінієвого порошку (Донецький завод хімічних реактивів, Україна). Питома поверхня вихідного порошку складала $2,5 \text{ м}^2/\text{г}$. В якості активатора спікання до AlN додавали 2,3 % Y_2O_3 ² дисперсністю 4 мкм виробництва Киргизького гірничо-металургійного комбінату (КТМК, Киргизстан). Було використано різні порошки молібдену: перший складався з правильно огранованих частинок розміром 10–20 мкм, друзок та ланцюжків з частинок до 10 мкм та зрощених

² Тут і далі склад матеріалів наведено в % (за об'ємом).

дрібних частинок 1–5 мкм, другий (ТУ 48-19-69–73) мав менший середній розмір частинок – 2,6 мкм.

Шихту з порошків AlN , Y_2O_3 , Mo розмелювали у планетарному активаторі до питомої поверхні 6–7 $\text{м}^2/\text{г}$. Було отримано суміші для виготовлення композитів трьох видів з різним об'ємним вмістом Mo – від нуля до максимальних значень перед порогом перколяції. Першу суміш для композита з порогом перколяції 16,6 % виготовлено тільки з використанням першого порошку Mo ; другу суміш для композита з порогом перколяції 17,9 % – з першого порошку Mo в кількості 16,6 % з додаванням 1,3 % дрібнішого другого порошку Mo ; третю суміш для композита з порогом перколяції 21,4 % тільки з дрібного другого порошку Mo .

Циліндричні зразки та кільця поглиначів з композитів отримували одновісним двостороннім пресуванням в сталених пресформах. Вільне спікання здійснювали за температури 1800 °C протягом 30 хв в середовищі азоту в печі опору з вольфрамовими нагрівниками.

Для визначення діелектричних характеристик отриманих композитів на основі AlN використовували резонансний метод вимірювання в циліндричному резонаторі діаметром 47 мм і висотою 13,8 мм на моді TE_{010} [21]. Всі вимірювання проведено в діапазоні частот 3,15–3,2 ГГц. Похибка вимірювання частоти складала 0,03 %. Циліндричні зразки композита для вимірювання діелектричних характеристик (ϵ' і $\text{tg}\delta$) після спікання і шліфовки мали діаметр 2,4–3,0 мм і висоту 13,8 мм. За виміряною резонансною частотою резонатора зі зразком композита визначали значення діелектричної проникності ϵ' . За виміряної добротності резонатора зі зразком композита визначали тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$. Похибка вимірювання добротності становила 2 %.

Вимірювання затухання мікрохвиль в децибелах (дБ) і коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) проводили на приладі “Панорамний вимірювач КСХН та ослаблення Р2–61”, який працює в частотному діапазоні 8–12 ГГц і має переріз мікрохвильового тракту 23×10 мм. Похибка вимірювання ослаблення складала 0,3 дБ для значень затухання мікрохвиль до 10 та 0,4 дБ для затухання до 20 дБ. Докладно метод вимірювання затухання у кільці поглинача композита описано у [9]. Кільця поглиначів для вимірювання затухання мікрохвиль після спікання та шліфовки мали розмір $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,7$ мм.

Для вимірювання затухання кільце поглинача розміщували в 15-му резонаторі секції сповільнювальної системи (СпС). Секція СпС складалася з вхідної і вихідної камер з вакуумщільними вікнами входу і виходу мікрохвильової енергії та сповільнювальної системи з 18-ти резонаторів. У вхідній і вихідній камерах є установчі гвинти для узгодження входу і виходу СпС. Секції СпС налаштовували в діапазоні частот 9,5–10,5 ГГц, в якому рівень КСХН входу і виходу повинен бути не більше 2,0. Власне затухання 18-ти резонаторів СпС разом з камерами і вікнами входу і виходу без кільця поглинача становило 2,9 дБ. Виміряне затухання вважається достовірним, якщо на вході і виході секції СпС КСХН був не більший за 1,3–1,4 в одних і тих же смугах частот шириною 50–80 ГГц. Діапазон частот 9,5–10,5 ГГц відповідає пологій ділянці дисперсійної характеристики СпС, на якій її власне затухання майже не змінюється і тому не спричиняє похибки за умови вимірювання затухання в кільці об'ємного поглинача. Діаметр усіх резонаторів секції СпС становив 16 мм, висота резонатора (його розмір вздовж осі СпС) – 3,3 мм, товщина діафрагми – 1,1 мм. Висота кільця поглинача (його товщина вздовж осі) становила 2,7 мм, отже спеціально залишали зазор 0,6 мм для кращого узгодження кільця поглинача в резонаторі СпС.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Виготовлені композити на основі AlN склалися з двох основних фаз – діелектричної матриці AlN та частинок провідника – тугоплавкого металу молібдену. Дані SEM і XRD аналізу засвідчили, що фаза нітриду алюмінію представлена зернами мікронного розміру рівновісної форми. Середній розмір включень молібдену після спікання композитів AlN–16,6Mo³ становив 12 мкм, у композитах AlN–17,9Mo він був дещо менший і дорівнював 7 мкм, а у композитах третього виду AlN–21,4Mo – тільки 3,3 мкм. За даними XRD матеріал містив також сліди алюмоітрієвого граната YAlG (Y₃Al₅O₁₂), який утворюється внаслідок спікання в системі AlN(O)–Y₂O₃. Додаток активатора спікання Y₂O₃ забезпечує як появу рідкої фази, чим сприяє покращенню усадки, так і одночасно сприяє очищенню поверхні зерен AlN від адсорбованого кисню. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу ці включення субмікронного розміру розташовані по границях зерен AlN.

Корисною особливістю композитів AlN–Mo на відміну від композитів AlN–SiC, є те, що їхні діелектричні характеристики ϵ' , ϵ'' і $\operatorname{tg} \delta$ не змінюються в залежності від частоти випромінювання в діапазоні хвиль від 1 до 100 ГГц [19]. Рівень поглинання в композитах зазвичай пов'язують зі значеннями діелектричних втрат $\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg} \delta$. Але, на думку авторів, краще порівнювати композити з втратами не за ϵ'' , а за рівнем поглинання мікрохвильового випромінювання. Поглинання мікрохвильового випромінювання необхідно досліджувати в реальних умовах об'ємного поглиначу в НВЧ-приладі: безпосередньо в резонаторі клістрона, коли визначають добротність резонатора на робочій частоті, яка недвозначно пов'язана з поглинанням, або за умови, коли поглинач знаходиться у одному з резонаторів секції СпС ЛБХ на ланцюжку зв'язаних резонаторів (ЛЗР). Ще краще порівнювати композити за коефіцієнтом поглинання, оскільки поглинання визначається в залежності від діапазону частот на зразках поглиначу різної товщини і різного розміру [22]. Один з таких способів визначення поглинання зразків композита з діелектричними втратами в секції СпС для ЛБХ на ЛЗР в діапазоні частот 9,5–10,5 ГГц докладно описано в [9].

Залежність визначених діелектричних характеристик – діелектричної проникності ϵ' та тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ для чотирьох композитів на основі AlN з різним вмістом Mo, наведено на рис. 1 та у табл. 1. Як видно з

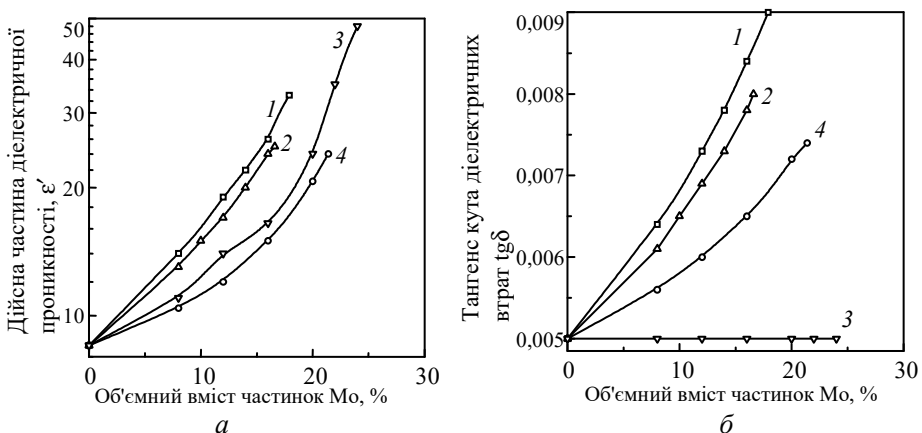


Рис. 1. Залежність діелектричних характеристик: діелектричної проникності ϵ' (а) та тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ (б) в композитах AlN–Mo від об'ємного вмісту частинок провідника (Mo) різного розміру: 12 (2), 7 (1), 4–8 (3) [7], 3,3 (4) мкм.

³ Склад композита AlN–Y₂O₃–Mo для спрощення позначено AlN–Mo.

рис. 1 зі зростанням об'ємного вмісту Мо значення дійсної частини діелектричної проникності ϵ' і $\text{tg}\delta$ монотонно збільшуються до порога перколяції. Дані для зразка 4 взято з публікації [7].

Таблиця 1. Фізичні властивості композитів AlN–Мо: діелектрична проникність ϵ' , діелектричні втрати ϵ'' , тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, поглинання електромагнітної енергії L , коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії L , формула для обчислення та величина співвідношення між L та ϵ''

Зразок	Вміст Мо, %	ϵ'	$\text{tg}\delta$	ϵ''	L , дБ	L		$L \text{ (дБ/мм)} = \sqrt{46\epsilon''}$
						дБ/мм	разів/мм	
1	16,6	25	0,0078	0,196	8,1	3,0	2,00	$\sqrt{46\epsilon''} = 3,08$
2	17,9	32	0,0088	0,282	9,7	3,6	2,29	$\sqrt{46\epsilon''} = 3,60$
3	21,4	20	0,0068	0,136	5,9	2,2	1,66	$\sqrt{35,6\epsilon''} = 2,20$
4	24,0	48	0,0050	0,240	–	3,0	2,00	$\sqrt{37\epsilon''} = 2,98$

За даними рис. 1 (а, б) для ϵ' і $\text{tg}\delta$ розраховано значення ϵ'' , які наведено на рис. 2.

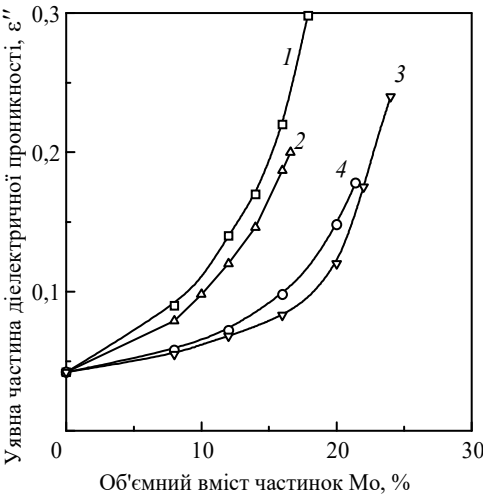


Рис. 2. Залежність уявної частини діелектричної проникності ϵ'' в композитах AlN–Мо від об'ємного вмісту частинок провідника (Мо) середнього розміру: 12 (2), 7 (1), 4–8 (3) [7], 3,3 (4) мкм.

У перших роботах з поглинання електромагнітної енергії в композитах на основі діелектричної матриці (Al₂O₃, BeO, AlN) з частинками провідника – металами Мо, W, Fe, Cr, стверджували, що за малої кількості частинок поглинання змінюється практично лінійно зі збільшенням їхнього вмісту [6]. Але за більшої кількості частинок металу поглинання електромагнітної енергії починає помітно зростати, до цього додається ще їхній вплив одна на одну. Завдяки цьому залежність поглинання від вмісту частинок, від ~8–10 % і до порога перколяції, є явно нелінійною [6, 7]. Треба зауважити, що всі ці пояснення поведінки експериментально одержаної залежності поглинання від вмісту частинок провідника в дійсності нічого не з'ясовують внаслідок того, що частинки провідника (металу) фізично і принципово не можуть впливати одна на одну. Є тільки одна можливість відносного впливу в об'ємі компози-

та, коли фотони електромагнітної енергії не поглинаються якоюсь частинкою металу, а відбиваються від неї, тоді такі фотони будуть потрапляти на сусідні, близько розташовані частинки. Ті фотони, які були поглинуті якоюсь частинкою металу, не в змозі залишити її внаслідок того, що енергія активації на частотах від 1 до 100 ГГц є дуже малою у порівнянні з енергією виходу електрона. Наприклад, енергія активації на частоті 100 ГГц становить $E_a = 4,13 \cdot 10^{-4}$ eV [24]. Звичайно, є невелика ймовірність того, що електрони з однієї частинки зможуть перейти до іншої внаслідок тунельного ефекту, але для цього відстань між ними повинна бути меншою за 10 нм [25], тільки тоді діелектричний шар між частинками є прозорим і не затримує електрони. Тобто повністю виключати таку можливість не можна, хоча її ймовірність в дійсності мала. Внаслідок цього такий механізм не може бути головним і визначальним в поясненні фізики виникнення об'ємного опору матеріалу композита AlN–Mo за вмісту частинок молібдену вище порога перколяції. Спочатку звернемося до залежності рівня мікрохвильового поглинання L в композитах від об'ємного вмісту частинок провідника (Mo), яка представлена на рис. 3 в напівлогарифмічному масштабі. Застосований для відображення залежності поглинання електромагнітної енергії від об'ємного вмісту частинок Mo, він допомагає зрозуміти фізику процесу поглинання електромагнітної енергії. Як видно з рис. 3, у будь-якому разі за різного розміру частинок Mo в композиті AlN–Mo, залежність поглинання має два характерних інтервали до порога перколяції і один – після початку порога перколяції. На всіх цих інтервалах залежності за вмістом Mo є прямими лініями, а це безпосередній доказ того, що поглинання електромагнітної енергії для різного вмісту Mo є процесом нелінійним, бо прямі лінії в логарифмічному масштабі не відповідають лінійній залежності.

Визначені з рис. 3 кути нахилу залежностей в трьох інтервалах за вмістом Mo, якісно показують різницю в процесі поглинання електромагнітної енергії в цих інтервалах. Значно більше інформації можна одержати, якщо порівняти значення питомого коефіцієнта мікрохвильового поглинання електромагнітної енергії $L_{\text{питом}}$ в кожному з трьох інтервалів за вмістом частинок Mo: $\Delta L/\Delta \text{Mo}$, у (дБ/мм)/% (за об'ємом).

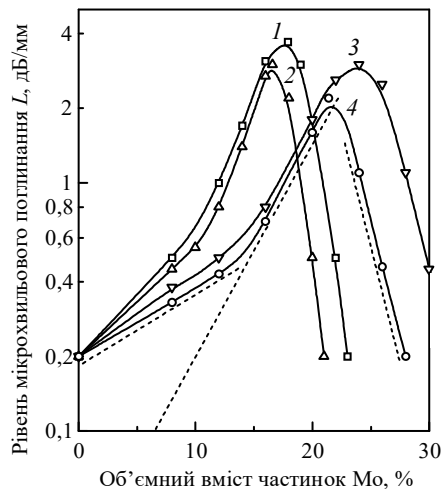


Рис. 3. Залежність рівня поглинання електромагнітної енергії L в композитах AlN–Mo від об'ємного вмісту частинок Mo розміром: 12 (2), 7 (1), 4–8 (3) [7], 3,3 (4) мкм; штриховими лініями показано три інтервали кутів нахилу для складу композита AlN–Mo з вмістом частинок Mo розміром 3,3 мкм.

Наприклад, для композита з вмістом частинок Мо розміром 12 мкм у першому інтервалі за вмістом Мо маємо $\Delta Mo = 10\%$, і відповідно, $\Delta L = 0,65 - 0,20 = 0,45$ дБ/мм. Отже, $\Delta L / \Delta Mo = 0,45 : 10 = 0,045$. Аналогічно розраховано значення $L_{\text{питом}}$ для кожного з трьох інтервалів досліджених композитів AlN–Mo. Результати цих розрахунків $L_{\text{питом}}$, кутів нахилу залежності коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії ΔL (дБ/мм), а також початку порога перколяції у композитів приведено в табл. 2, дані якої дозволяють об'єктивно і кількісно оцінювати рівні $L_{\text{питом}}$ у різних композитах AlN–Mo. Так, наприклад, відношення $L_{\text{питом}}$ другого інтервалу за вмістом Мо до $L_{\text{питом}}$ першого інтервалу становить 11,7, 13,6, 13,1 та 10,5 відповідно для 1, 2, 3 та 4-го композита AlN–Mo. Тобто відношення $L_{\text{питом}}$ у середньому дорівнює 12,7 для композитів з більшими за розміром частинками Мо (1 і 2) та 11,8 для композитів з меншими частинками (3 і 4). В даному випадку різниця між ними невелика – лише 12 %. З іншого боку, середні значення $L_{\text{питом}}$ у другому інтервалі для композитів з більшими за розміром частинками Мо становлять 0,50 і 0,29 (дБ/мм)/% Мо для композитів з меншими частинками Мо. Отже, вони відрізняються в 1,7 рази, тобто така різниця вже є істотною. Це дозволяє зробити висновок, що зростання поглинання електромагнітної енергії в композитах AlN–Mo з меншими за розмірами частинками молібдену за їхнього вмісту до порога перколяції йде повільніше у 1,7 рази.

Таблиця 2. Кут нахилу залежності коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії L в трьох інтервалах за вмістом частинок Мо у композитах, коефіцієнт питомого мікрохвильового поглинання електромагнітної енергії $L_{\text{питом}}$, початок порога перколяції

Зразок	Номер інтервалу	Вміст молібдену в композиті AlN–Mo, % (за об'ємом)	Кут нахилу залежності коефіцієнта поглинання, град	$L_{\text{питом}}$ в інтервалах за вмістом Мо ΔL (дБ/мм)/% Мо	Початок порога перколяції, за вмісту Мо, %
1	1	0–10	44	0,045	16,6
	2	12–16	70	0,525	
	3	19–23	81	0,700	
2	1	0–10	41	0,035	17,9
	2	12–16	70	0,475	
	3	18–21	81	0,670	
3	1	0–14	29	0,0214	21,4
	2	16–21	64	0,280	
	3	22–26	77	0,375	
4	1	0–13	32	0,0286	24,0
	2	16–21	61	0,300	
	3	26–32	75	0,383	

Як видно з рис. 3, для усіх досліджених композитів процес поглинання електромагнітної енергії є нелінійним для усього інтервалу зміни вмісту частинок Мо як до початку порога перколяції, так і після, включно до значень $L = 0,2$ дБ/мм. Нелінійний характер поглинання електромагнітної енергії пов'язаний з цілою низкою причин і факторів. Безсумнівно, що у першу чергу він залежить від кількості частинок провідника Мо та їхньої морфології, а також від їхнього взаємного розташування. Відомо, що зі збільшенням кіль-

кості частинок відстань між ними зменшується [26]. У досліджених компози- тах з різними розмірами частинок провідника за вмісту Мо поблизу порогу перколяції, що становить 14–16 % у компози- тах 1 і 2 та 19–22 % у компози- тах 3 і 4, збільшення їхньої кількості та одночасне зменшення відстані між ними приводить до зростання $L_{\text{питом}}$ у 12,7 та 11,8 рази.

Треба відзначити, що у більшості публікацій рівень поглинання чи рівень коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії починається з нуля і закін- чується теж за нульового значення [6, 7]. Але це фізично невірно. В [21] по- казано, що рівень поглинання в композиті діелектрик–метал не може бути менше, ніж у самому діелектрику без домішок/включень (власне поглинання), що дорівнює 0,2 дБ/мм.

У [23] було визначено співвідношення L (дБ/мм) = $\sqrt{2,8\epsilon''}$, яке дозволяє просто розрахувати коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії в залеж- ності від значення діелектричних втрат ϵ'' . Для будь-якого композита системи AlN–Mo, AlN–W, AlN–SiC коефіцієнт k дорівнює L^2 (дБ/мм)/ ϵ'' .

ВИСНОВКИ

Експериментально визначено діелектричну проникність ϵ' і тангенс кута діелектричних втрат $\tan\delta$ для композитів на основі AlN за вмісту частинок провідника (Mo) в широкому інтервалі від 0 до досягнення критичної концент- рації молибдену, тобто до порога перколяції. Поблизу порога перколяції мак- симальні значення ϵ' становлять 25, 33, 48 за вмісту частинок молибдену в композиті 16,6, 17,9, 24,0 % (за об'ємом) відповідно.

Тангенс кута діелектричних втрат $\tan\delta$ досягає значень 0,0078 та 0,0088 для композитів за вмісту Mo 16,6 та 17,9 %, і становить 0,0068 та 0,005 для ком- позитів за вмісту Mo 21,4 та 24,0 %.

Виміряно значення поглинання електромагнітної енергії L в досліджених компози- тах AlN–Mo в залежності від вмісту та дисперсності частинок прові- дника. Встановлено, що зростання поглинання електромагнітної енергії в компози- тах AlN–Mo з меншими за розміром частинками молибдену за їхнього вмісту до порога перколяції іде повільніше в середньому в 1,6 рази для пер- шого і 1,7 рази для другого інтервалу за вмістом Mo.

Встановлено взаємозв'язок між діелектричними втратами ϵ'' і рівнем мік- рохвильового поглинання L (дБ/мм) за вмісту частинок провідника (Mo) по- близу порога перколяції. Для композитів з AlN із вмістом Mo 16,6 та 17,9 % поглинання дорівнює $L = \sqrt{46\epsilon''}$, для складу з вмістом 21,4 % Mo $L = \sqrt{35,6\epsilon''}$, а для 24 % Mo – $L = \sqrt{37\epsilon''}$.

Для відображення залежності поглинання електромагнітної енергії від об'ємного вмісту частинок провідника (Mo) використано напівлогарифміч- ний масштаб, завдяки цьому виявлено фізику процесу поглинання електро- магнітної енергії у компози- тах системи AlN–Mo. Показано, що у будь-якому разі залежність поглинання має два характерних інтервали до порога перко- ляції і один – після початку порога перколяції. Для всіх інтервалів залежності є прямими лініями, що є доказом того, що процес поглинання електромагнітної енергії завжди є нелінійним для будь-якого з трьох інтервалів за вмістом Mo.

Запропоновано поняття питомого коефіцієнта мікрохвильового поглинан- ня електромагнітної енергії $L_{\text{питом}} = \Delta L / \Delta \text{Mo}$, яке має розмірність (дБ/мм)/% (за об'ємом). Значення $L_{\text{питом}}$, які розраховані для будь-якого ін- тервалу за вмістом Mo, дозволяють об'єктивно і кількісно порівнювати рівні $L_{\text{питом}}$ для різних композитів AlN–Mo. Встановлено, що у досліджених компо-

зитах значення $L_{\text{питом}}$ у інтервалах 12–16 і 16–21 % є на порядок більшими у порівнянні з $L_{\text{питом}}$ у інтервалах 0–10 і 0–14 % Мо, тобто за меншої кількості частинок Мо. Це явище спостерігали для всіх розмірів частинок молибдену у досліджених композитах.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

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

Influence of content and particle size distribution

of molybdenum on the dielectric characteristics

and electromagnetic energy absorption of AlN–Mo composites

Experimentally determined values of the dielectric permittivity ϵ' and the dielectric loss tangent $\tan\delta$ for pressureless sintered composites based on AlN with the content of conductor particles (Mo) in a wide range from zero to the critical concentration of molybdenum particles, i.e. near the percolation threshold, are presented. It is shown that in the studied composites both the real ϵ' and the imaginary ϵ'' parts of the dielectric permittivity monotonically increase with increasing content of conductor particles, reach maximum values near the percolation threshold and are $\epsilon' = 25\text{--}32\text{--}48$. The microwave energy absorption in AlN–Mo composites for different contents and size distribution of conductor particles was measured. The relationship between the dielectric losses ϵ'' and the level of microwave absorption L depending on the conductor particles content near the percolation threshold is established.

Keywords: aluminum nitride, molybdenum, bulk absorber, dielectric permittivity, dielectric loss, dielectric loss angle tangent, absorption of electromagnetic energy, percolation threshold.

1. Касаткин Л.В., Рукин В.П., Еременко В.Д., Науменко В.Д., Рапопорт Г.П., Мирошниченко В.С. Электровacuумные приборы диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2007. 252 с.
2. Calame J. P. High heat flux thermal management of microfabricated upper millimeter-wave vacuum electronic devices. 2008 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. 2008. P. 50–51.
3. Slack G.A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity. *J. Phys. Chem. Solids*. 1973. Vol. 34. P. 321–335.
4. Slack G.A., Tanzilli R.A., Pohl R.A., Vandersande J.W. The intrinsic thermal conductivity of AlN. *J. Phys. Chem. Solids*. 1987. Vol. 48, no. 7. P. 641–647.
5. Khan A.A., Labbe J.C. Aluminium nitride-molybdenum ceramic matrix composites: Characterization of ceramic-metal interface. *J. Eur. Ceram. Soc.* 1996. Vol. 16, is. 7. P. 739–744.
6. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. 164 с.
7. 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.
8. Часнык В.И. Объемные поглотители СВЧ-излучения для электровacuумных приборов. Киев: ИПЦ АЛКОН, 2014. 70 с.
9. 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–Y₂O₃–Mo and AlN–Y₂O₃–TiN composites. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, is. 3. P. 165–176.

10. Hoff B.W., Hayden S.C., Hilario M.S., Grudt R.O., Dynys F.W., Baros A.E., Rittersdorf I.M., Ostraat M.L. Characterization of AlN-based ceramic composites for use as millimeter-wave susceptor materials at high temperature: Dielectric properties of AlN:Mo with 0.25 vol% to 4.0 vol% Mo from 25 to 550 °C. *J. Mater. Res.* 2019. Vol. 34, is. 15. P. 2573–2581.
11. Wang J., Jia X., Jia C., Dong G., Zhang Y., Jia L. Dielectric properties of spark plasma sintering AlN–W composite ceramics. *Rare Metals*. 2011. Vol. 30, is. 6. P. 633–638.
12. Ma H.N., Yang Z.M., Du J. Influence of tungsten particles on the electrical properties of AlN ceramic. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2012. Vol. 23, is. 12. P. 2181–2185.
13. Yun Y.-H., Choi S.-C. The contributions of microstructural characteristics and residual stress distribution to mechanical properties of AlN/W composite system. *J. Mater. Sci.* 1998. Vol. 33, is. 3. P. 707–712.
14. Ma H., Yang Z., Du J. Effect of conductive particles tungsten on properties of aluminum nitride ceramics. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao / J. Chinese Ceram. Soc.* 2008. Vol. 36, is. 3. P. 296–300.
15. 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.
16. 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, 2006, April 25–27. P. 37–38. AD022433.
17. Calame J.P., Abe D.K. Applications of advanced materials technologies to vacuum electronic devices. *Proc. IEEE*. 1999. Vol. 87, no. 5. P. 840–864.
18. 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. Vol. 11, no. 6, art. 969.
19. 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, nos. 1–2. P. 66–76.
20. Calame J.P., Savrun E. Dielectric and thermal conductivity characterization of aluminum nitride-based microwave absorbing ceramics for vacuum electronics. *2018 IEEE Int. Vacuum Electronica Conf. IVEC*. P. 411–412.
21. 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.
22. 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.
23. 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, nos. 1–2. P. 50–59.
24. Chasnyk V.I., Chasnyk D.V., Kaidash O.M. Activation energy of electrical conductivity and characteristics of microwave radiation absorption in AlN–SiC composite. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, is. 4. P. 285–292.
25. Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы. Київ: Техніка, 1987. 152 с.
26. Фесенко І.П., Прокопів М.М., Часник В.І., Кайдаш О.М., Олійник Г.С., Кузенкова М.А. Алумонітридні функціональні матеріали, одержані з нанодисперсних та мікронних порошків гарячим пресуванням та вільним спіканням. Моногр. / ред. М. В. Новіков. Київ: ІВЦ АЛКОН, 2015. 172 с.

Надійшла до редакції 24.11.25

Після доопрацювання 28.11.25

Прийнята до опублікування 02.12.25