

**В. І. Часник^{1, *}, Д. В. Часник², О. М. Кайдаш³,
І. П. Фесенко³, С. А. Кухаренко³**

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

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

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*vassiliyiv@gmail.com

Вплив стану поверхні об'ємного поглинача з композита AlN–Mo на зменшення відбиття мікрохвильового випромінювання

Для подальшого удосконалення конструкцій та забезпечення стабільної роботи електровакуумних приладів, які працюють в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні на частотах 1–100 ГГц було покращено характеристики поглинання НВЧ-випромінювання. Вирішено надскладне завдання одержання об'ємних поглиначів з композитів AlN–Mo з високим (10–12,3 дБ) рівнем затухання, що відповідає коефіцієнту поглинання мікрохвильового випромінювання 37–56 дБ/см, та досягнуто доброго низького (1,5–1,6) значення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) в діапазоні частот 9,3–10 ГГц. Встановлено, що хімічна обробка поверхні поглинача, яка полягає у видаленні з неї частинок молибдену сумішшю кислот, поліпшує узгодження за рахунок зменшення значень відбиття мікрохвильового випромінювання, а відповідно, і максимуму КСХН на 26–30 %.

***Ключові слова:** нітрид алюмінію, молибден, поглинання мікрохвильового випромінювання, об'ємний поглинач, лампа біжучої хвилі, узгодження, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН).*

ВСТУП

Розвиток галузей точного машинобудування (радіотехніки, радіоелектроніки і електронної техніки), а саме: удосконалення електротехнічних і радіоелектронних систем зв'язку, бортової апаратури, різних систем приймання, обробки і передачі інформації, потребує помітних зусиль матеріалознавців та розробників нових матеріалів. Значну увагу зосереджено на покращенні роботи електронних приладів та спеціальних вимірювальних пристроїв великої потужності у вакуумній електронній техніці в діапазоні надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання для поглинання мікрохвиль високої інтенсивності. Одним з основних компонентів конструктивних блоків і модулів систем НВЧ є підсилювачі НВЧ-сигналів. В частині з них застосовують електровакуумні прилади (магнетрони, клістрони, лампи біжучої хвилі (ЛБХ)). Для повного або часткового поглинання НВЧ-сигналу, зменшення рівня відбитого сигналу, вибіркового поглинання небажаного виду коливань використовуються поглиначі електромагнітної енергії.

Наразі, як об'ємні поглиначі в ЛБХ використовують в основному композити на основі оксиду берилію BeO [1], нітриду алюмінію AlN [2], або нещого-

давно розроблені матеріали з нітриду кремнію Si_3N_4 [3]. Композити на основі оксиду берилію токсичні під час виготовлення, тому всі зусилля розробників апаратури зосереджено на заміні їх на інші матеріали. Найбільш перспективними матеріалами для поглинання мікрохвильового випромінювання є композити на основі AlN , у складі яких міститься електропровідна металева фаза з частинок молібдену [4–6] чи вольфраму [6, 7], фаза металоподібного нітриду титану TiN [6, 8], діоксиду цирконію ZrO_2 [9] або напівпровідникових частинок SiC [10, 11].

Для забезпечення стабільної і стійкої роботи приладів необхідно покращувати характеристики поглинання (затухання) НВЧ-випромінювання. Без цього неможливе подальше удосконалення конструкцій і покращення параметрів електровакуумних приладів, які працюють в НВЧ-діапазоні на частотах 1–100 ГГц.

Відомо, що поглинання енергії електромагнітної хвилі зростає з 4 до 28 дБ (і залишається на цих рівнях в діапазоні частот 2–4 ГГц) у разі збільшення розміру частинок аустенітної сталі з 1–50 до 160–200 мкм у композиті, що містить 50 % (за масою)¹ частинок аустенітної сталі і 50 % (за масою) Al_2O_3 [12]. Рівні поглинання для поглинаючих частинок різних розмірів визначає крива *A* на рис. 1. Для цих же композитів є відомості по розсіюванню НВЧ-випромінювання. Рівні енергії електромагнітної хвилі для композитів були пронормовані до рівня відбиття для листа аустенітної сталі: $P_{\text{відб}} = 260$ (відн. од.). Коефіцієнт відбиття НВЧ-випромінювання $|\Gamma|$ для композитів із різним розміром частинок демонструє крива *B* (див. рис. 1), обчислена на підставі літературних даних [12].

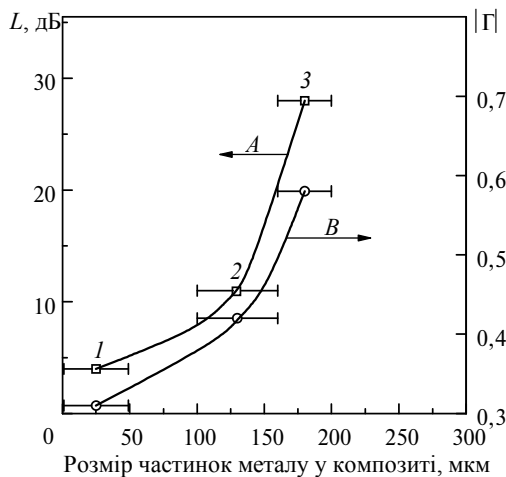


Рис. 1. Вплив частинок металу різного розміру в композиті з 50 % аустенітної сталі та 50 % Al_2O_3 на поглинання енергії електромагнітної хвилі L (*A*) і коефіцієнт відбиття $|\Gamma|$ (*B*); діапазон розмірів частинок сталі становить 1–50 (*1*), 100–160 (*2*), 160–200 мкм (*3*).

І хоча у цих композитах відбувається велике затухання, наприклад 28 дБ, але внаслідок присутності у мікроструктурі великих частинок аустенітної сталі розміром 160–200 мкм, вони мають великий коефіцієнт відбиття $|\Gamma| = 0,58$ (див. рис. 1). Тобто, відбивається до 33,6 % енергії електромагнітної хвилі, що не дозволяє використовувати композити для об'ємних поглиначів у приладах НВЧ (ЛБХ і клістронах). Крім цього, внаслідок наявності в своєму

¹ Відповідає вмісту 32,9 % (за об'ємом).

складі частинок аустенітної сталі цей композит виявляє магнітні властивості ($\mu > 1$), що шкодить фокусуванню електронного потоку, оскільки в ЛБХ електронні потоки фокусуються магнітними фокусувальними системами.

Як було визначено, поглинання у гетерофазних композитах завжди збільшується з ростом концентрації частинок провідної фази за умови, що композити залишаються непровідними за постійного струму, тобто до порогу перколяції [5]. Тоді для збільшення поглинання необхідно використовувати композити з максимальним вмістом частинок провідної фази. Високий коефіцієнт поглинання мікрохвильового випромінювання властивий композиційному матеріалу на основі нітриду алюмінію з добавками тугоплавких металів [6]. У складі композитів AlN–Mo поріг перколяції починається за об'ємної частки металевих частинок 16,6–17,9 % Mo. Якщо їхній вміст буде вищий, то починається відбиття мікрохвильового випромінювання і матеріал стає неефективним для поглинання потоків мікрохвиль високої інтенсивності, а значить, непридатним для використання у ЛБХ. Перевагою таких композитів є те, що вони мають високий коефіцієнт поглинання мікрохвильового випромінювання до 32–56 дБ/см, вимірний для максимального вмісту провідних частинок перед самим порогом перколяції. Однак було встановлено, що у разі переходу у вищий діапазон НВЧ-випромінювання (з 3 до 10 ГГц), значно зростає коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН)², а це суттєво ускладнює узгодження³ секції ЛБХ з поглиначем. Отримати одночасно високий рівень затухання і низьке значення КСХН є надскладним завданням.

Збільшення затухання в об'ємному поглиначі на основі композита AlN–Mo за обраного об'єму провідних частинок пов'язане з встановленням оптимального режиму спікання і вибором активуючих спікання добавок (Y_2O_3 та інших рідкоземельних оксидів) та оптимальної морфології частинок, їхнього розміру і взаємного розташування в поглиначі. З урахуванням взаємного впливу провідних частинок визначено, що максимуму затухання відповідає вміст сфероїдальних провідних частинок 19,5 % (за об'ємом) з оптимальним фактором форми $\Theta = 2,8$ [13].

Встановлено взаємозв'язок затухання і діелектричної проникності ϵ в композиті AlN–Mo [5] – чим більше ϵ , тим більшим є затухання. Але, чим більша діелектрична проникність, тим буде більшим коефіцієнт відбиття $|\Gamma|$ від поглинача [12]. А з підвищенням $|\Gamma|$, буде зростати і КСХН – тобто буде суттєво важче узгодити секцію ЛБХ з поглиначем⁴. Тому донині отримати одночасно в секції сповільнювальної системи (СпС) низьке значення КСХН = 1,5–1,6 і рівень затухання 10–12 дБ залишається складним завданням. У кожному конкретному приладі ЛБХ доводиться шукати це компромі-

² Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою – це відношення максимальної амплітуди стоячої хвилі до мінімальної амплітуди стоячої хвилі.

³ Узгодження – це процес настроювання (підстроювання) розмірів резонаторів (у даному разі їх 12 шт.). В ЛБХ на ланцюжку зв'язаних резонаторів в процесі настроювання СпС прагнуть так скорегувати розміри резонаторів СпС, розташованих поряд з об'ємними поглиначами, щоб відбивання НВЧ-сигналу було мінімальним. Цей процес настроювання СпС на ланцюжку зв'язаних резонаторів називають узгодженням вхідної або вихідної секції НВЧ-приладу.

⁴ Оскільки значення $|\Gamma|$ може змінюватися в межах від 0 до 1, межами зміни КСХН є 1 і ∞ . Режим ідеального узгодження з навантаженням характеризується значенням КСХН = 1. Повному відбиттю від навантаження відповідає нескінченно великий КСХН.

сне рішення – між необхідним високим рівнем затування в поглиначі і узгодженням в кожній секції СпС.

Метою роботи було створення для приладів НВЧ середньої та великої потужності (1–10 кВт) об'ємних поглиначів мікрохвильового випромінювання з композитів системи AlN–Mo з високим рівнем затуванням 10–12 дБ та одночасно з поліпшеним узгодженням (зменшеним відбиттям), що відповідає низькому значенню КСХН = 1,5–1,6 у діапазоні частот 9–10 ГГц.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості поглиначів у ЛБХ використано кільця 1 і 2 розміром $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,7$ мм та кільця 3 розміром $\varnothing 15,6 \times \varnothing 9,2 \times 2,2$ мм. Їх виготовили з керамічного матеріалу, що містить непровідну тугоплавку діелектричну складову з нітриду алюмінію AlN і оксиду ітрію Y_2O_3 з вмістом електропровідної фази: 16,6 % (за об'ємом) Mo (кільце 1), 17,9 % (за об'ємом) Mo (кільця 2 і 3). Поглиначі були одержані традиційним способом вільного спікання у шахтній печі опору з вольфрамівими нагрівниками за температури 1850 °С протягом 1 год в середовищі азоту для кілець 1 і 2, а для кільця 3 – протягом 2 год. За рахунок більшої витримки під час спікання та іншому режиму охолодження кільце 3 мало підвищену усадку. Так, наприклад, внутрішній діаметр кільця 3 збільшився до 9,2 мм, порівняно з 6,0 мм у кільці 2.

Середній розмір включень молібдену в одержаних композитах AlN–Mo становить 12 мкм. Водночас в мікроструктурі поглиначів присутні також частинки Mo великого (до 65 мкм) розміру. Окрім цього, утворюються і частинки більшого (до 100–120 мкм) розміру, внаслідок того, що 2–3 зерна металу великого розміру можуть контактувати між собою.

В кільцях поглиначів проведено експериментальне вимірювання затування мікрохвиль в децибелах (дБ) і КСХН на Панорамному вимірювачі КСХН та ослаблення P2–61, який працює в частотному діапазоні 8–12 ГГц і має переріз мікрохвильового тракту 23×10 мм [5]. Затування “на прохід” у вхідній секції СпС без кільця поглиначів, тобто власне затування 12-и резонаторів СпС разом зі вхідною камерою та вікном вводу енергії, становило 2 дБ. Для зменшення власного затування СпС перші одинадцять резонаторів були спаяні між собою високотемпературним срібним припоєм ПСр72 в нерозбірний блок.

У вхідній секції ЛБХ з СпС на ланцюжку зв'язаних резонаторів з вихідною потужністю 1 кВт в діапазоні 9,3–9,7 ГГц було передбачено і використано всі відомі методи поліпшення узгодження вхідної секції [14]:

- збільшено кут розкриття щілини зв'язку діафрагми між 11-им та 12-им резонатором на 9 %;
- зменшено зазори між прольотними трубками у 10-му та 11-му резонаторах;
- за допомогою узгоджувальних гвинтів, які знаходяться у вхідній камері, здійснено настроювання (підстроювання), тобто покрашено, наскільки це можливо, узгодження всієї секції з поглиначем.

Усі резонатори у вхідній секції СпС мали один розмір $\varnothing 16 \times 3,3$ мм. Поліпшення узгодження та зменшення відбиття від кілець поглиначів з композитів AlN–Mo з високим рівнем затування 10,0–12,3 дБ досягали за рахунок того, що поглинач заповнює 12-й резонатор СпС не повністю. Розмір резонатора вздовж осі СпС складав 3,3 мм, кільце 1 і 2 поглиначів – 2,7 мм, а кільця 3 – 2,2 мм. Отже, зменшенню відбиття сприяє утворений зазор 0,6 мм для кілець 1 і 2 та 1,1 мм для кільця 3. Невелике зменшення діаметра кільця 3

поглинача до 15,6 мм також сприяє зменшенню відбиття НВЧ-випромінювання. Однак усіх цих додатково вжитих заходів з поліпшення узгодження виявилось недостатньо для досягнення необхідного рівня КСХН = 1,5–1,6 в ЛБХ з вихідною потужністю 1 кВт.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Збільшення затухання в об'ємних поглиначачах можна підвищити за рахунок використання максимальної кількості частинок молібдену (до порога перколяції). Однак, чим більше затухання, тим більшим буде коефіцієнт відбиття $|\Gamma|$ від поглиначача. А чим більший $|\Gamma|$, тим більший і КСХН – тобто буде суттєво важче узгодити секцію ЛБХ з поглиначем.

Наведений на рис. 2 експериментально визначений рівень затухання L у вхідній секції С з 12-и зв'язаних резонаторів для трьох різних кілець поглиначача з композита AlN–Mo складає 10,6, 12,0 та 14,3 дБ, відповідно.

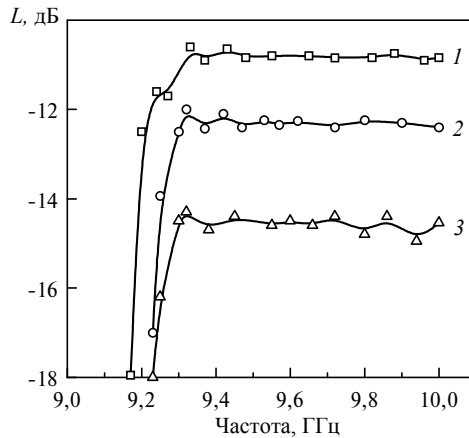


Рис. 2. Затухання мікрохвильової енергії L у вхідній секції сповільнювальної системи з 12-и зв'язаних резонаторів для кілець 1 (1), 2 (2), 3 (3) поглиначача з композита AlN–Mo в діапазоні частот 9,15–10,0 ГГц.

Не було взято до уваги затухання на частотах менших за 9,3 ГГц, бо воно пов'язане з близькістю до краю смуги пропускання даної сповільнювальної системи ЛБХ ($f \approx 9,15$ ГГц) на ланцюжку зв'язаних резонаторів.

Більше затухання у кільцях 2 і 3 у порівнянні з кільцем 1 спричинене тим, що в матеріалі композита знаходиться більша кількість частинок молібдену (вміст Mo складає 17,9 %, а не 16,6 %), які присутні як у всьому об'ємі кільця, так і на його поверхні. І вони дають більше затухання, але і більше відбиття (КСХН та коефіцієнт відбиття $|\Gamma|$) в діапазоні частот 9,3–10,0 ГГц.

Окрім цього, за рахунок більшої усадки матеріалу композита у кільці 3 поглинаючі частинки молібдену стали ближчими одна до одної. Це і сприяє більшому затуханню у кільці 3 у порівнянні з кільцем 2 поглиначача.

Підйоми і спади на кривих (див. рис. 2) безсумнівно пов'язані з КСХН, тобто з відбиттям в секції СпС. Підйоми на кривих – це мінімальне відбиття ($\text{КСХН}_{\min} = 1,1$, $|\Gamma|_{\min} = 0,0476$), що відповідає мінімумам затухання: 10,6 (крива 1), 12,0 (крива 2) і 14,3 дБ (крива 3). І навпаки: провали (спади) на кривих 1–3 відповідають максимальним значенням КСХН_{\max} або $|\Gamma|_{\max}$. Тому затухання L в цих точках максимальне, наприклад $L = 14,95$ дБ на частоті $f = 9,94$ ГГц для кільця 3.

Коли в мікроструктурі композита контактують два або три крупних включення молібдену, то вони утворюють великі частинки довжиною 100–150 мкм. Всередині композита – це позитивний фактор, тому що поглинання збільшується. Але на поверхні поглиначи ці частинки краще видалити, тому що вони помітно впливають на збільшення КСХН. Поліпшення узгодження (зменшення відбиття) можна досягнути за рахунок обробки поверхні однієї з основ кільця поглиначи шляхом вилучення з неї частинок молібдену, що дозволить значно знизити КСХН. Як показує практика, зазвичай на поверхні основи кільця поглиначи знаходиться кілька крупних частинок Мо розміром більше 100 мкм. Їх можна видалити сумішшю сірчаної (H_2SO_4) і азотної (HNO_3) кислот. Інші поверхні водночас вкривають шаром кислотостійкого лаку, який після обробки очищують.

Додаткова обробка, що полягає у видаленні з поверхні однієї з основ кільця поглиначи металічної фази, дозволяє зменшити відбиття і, отже, поліпшити КСХН в електронних приладах (ЛБХ, клістронах). Видалення металу з поверхні тільки однієї основи кільця об'ємного поглиначи пов'язано з тим, що взаємодія електромагнітної хвилі відбувається тільки з цією основою поглиначи, а друга основа, як і бічна поверхня кільця, контактує з металом стінки резонатора СпС.

На рис. 3 наведено вимірний КСХН у входній секції СпС з 12-и резонаторів для трьох різних кілець поглиначи до і після обробки поверхні, де видно, що більшому затуханню мікрохвильової енергії L в кільці поглиначи відповідає і більший КСХН. Цей факт відзначали і раніше [5].

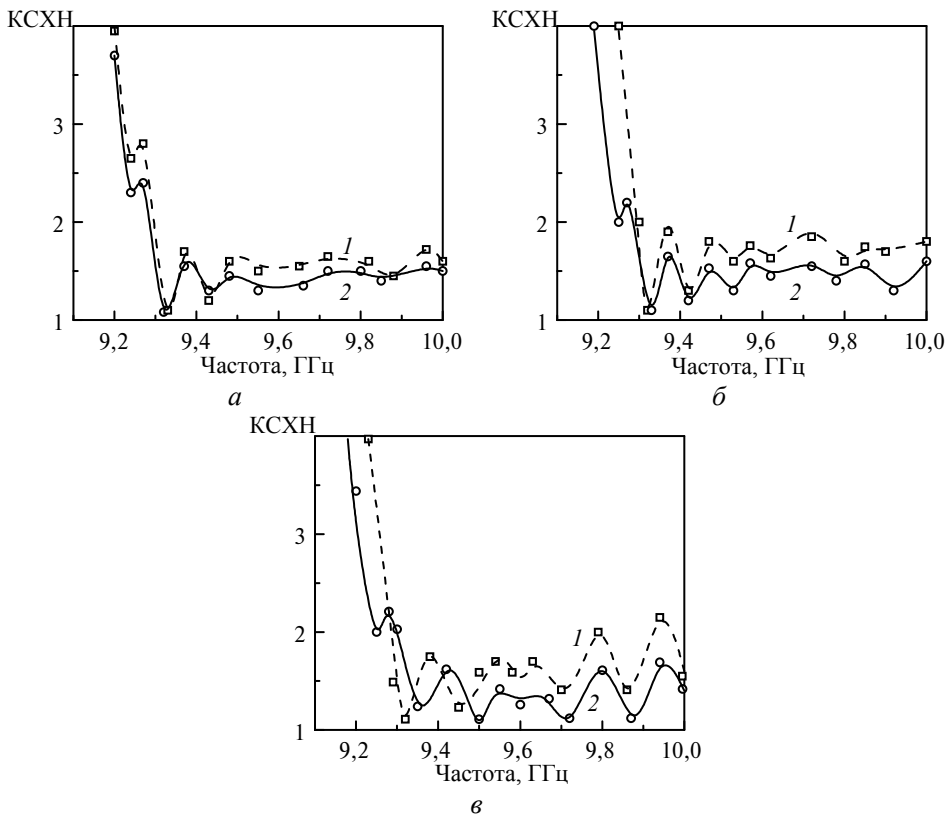


Рис. 3. Узгодження для кілець 1 (а), 2 (б) та 3 (в) поглиначи з композита AlN–Мо до (1) та після обробки поверхні (2) у входній секції сповільнювальної системи з 12-и зв'язаних резонаторів в діапазоні частот 9,15–10,0 ГГц; поглинач знаходиться у 12-ому резонаторі СпС.

Щоб технічно грамотно порівнювати рівні КСХН до і після обробки (вилучення частинок металу з однієї з основ кільця), краще значення КСХН перерахувати в коефіцієнт відбиття $|\Gamma|$ згідно з відомим співвідношенням [15]

$$|\Gamma| = \frac{КСХН - 1}{КСХН + 1}$$

Після порівнювання значень $|\Gamma|$ можна зробити висновок, у скільки разів вони відрізняються, наприклад, у 1,2 рази або на 20 %.

Для більш наочного порівняння значень КСХН у максимумах та відповідних максимумів коефіцієнтів відбиття у трьох поглиначів (див. рис. 3) до та після обробки поверхні кільця, їх було зведено у таблицю, де також наведено середні значення КСХН у максимумах та відповідні їм значення $|\Gamma|$ до та після обробки поверхні кільця. На думку авторів, порівнювати треба якраз середні значення $КСХН_{\max}$ і $|\Gamma|_{\max}$ у робочому інтервалі частот 9,4–9,8 ГГц. Це дозволяє об'єктивно оцінити взаємозв'язок рівнів затухання L у поглиначих зі зменшеним відбиттям і поліпшення КСХН в секції СпС. У цьому разі аналіз взаємозв'язку буде повнішим і достовірнішим, ніж аналіз окремо узятих значень КСХН і $|\Gamma|$ та їхній вплив на узгодження в секції ЛБХ.

Рівні КСХН у максимумах і відповідні коефіцієнти відбиття $|\Gamma|$ та їхні середні значення у кільцях поглиначів, виготовлених з композитів AlN–Mo, до і після обробки поверхні (видалення молібдену)

Склад композита, % (за об'ємом)	Частота f , ГГц	КСХН		$ \Gamma $		Відмінність, рази
		до обробки	після обробки	до обробки	після обробки	
AlN–16,6 Mo, кільце 1	9,37	1,70	1,53	0,260	0,209	1,24
	9,48	1,60	1,46	0,230	0,187	1,23
	9,72	1,65	1,50	0,245	0,200	1,22
	9,96	1,72	1,55	0,265	0,216	1,23
Середні значення для кільця 1	9,4–10,0	1,67	1,51	0,250	0,203	1,23
AlN–17,9 Mo, кільце 2	9,37	1,90	1,63	0,310	0,242	1,28
	9,47	1,80	1,59	0,286	0,228	1,25
	9,57	1,76	1,57	0,275	0,222	1,24
	9,72	1,85	1,61	0,300	0,234	1,28
	9,85	1,75	1,56	0,273	0,219	1,25
Середні значення для кільця 2	9,4–10,0	1,81	1,59	0,289	0,239	1,26
AlN–17,9 Mo, кільце 3	9,38	1,80	1,58	0,310	0,242	1,27
	9,55	1,70	1,53	0,260	0,209	1,24
	9,66	1,65	1,49	0,245	0,197	1,24
	9,80	2,00	1,67	0,333	0,251	1,33
	9,94	2,20	1,74	0,375	0,270	1,39
Середні значення для кільця 3	9,4–10,0	1,87	1,60	0,300	0,230	1,30

Примітка. Відмінність – це частка від ділення коефіцієнтів відбиття до і після обробки.

Для визначення коефіцієнта поглинання визначили затування самих кілець. З врахуванням того, що власне затування СпС становить 2 дБ, власне затування кільця 1 дорівнює 8,6 дБ, кільця 2 – 10 дБ, а кільця 3 – 12,3 дБ. Це відповідає коефіцієнту поглинання у композиті для кільця 1 – 3,2 дБ/мм, для кільця 2 – 3,7 дБ/мм, для кільця 3 – 5,6 дБ/мм.

На основі даних таблиці побудовано рис. 4, де показано взаємозв'язок відношення середніх значень $|\Gamma|$ та середніх значень КСХН у максимумах до та після обробки поверхні кілець поглиначів. На рис. 4 видно, що за рахунок видалення з поверхні кільця поглиначів частинок молібдену, середні значення КСХН у максимумах зменшились від 1,81–1,87 до прийнятного рівня КСХН 1,59 та 1,60 для кілець 2 і 3 з великим рівнем затування L 10 та 12,3 дБ. Водночас відмінність середніх значень коефіцієнтів відбиття складає 1,26–1,30 раз або 26–30 %. Для поставленої мети рівень затування 8,6 дБ для кільця 1 є недостатнім, тому далі його не брали до уваги.

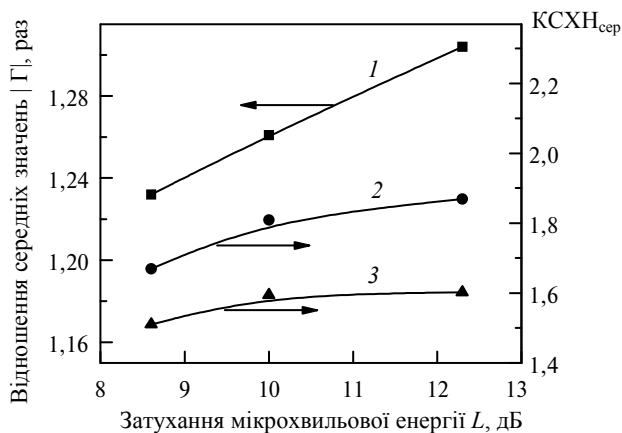


Рис. 4. Взаємозв'язок відношення середніх значень $|\Gamma|$ (1) та середніх значень КСХН у максимумах до (2) та після обробки (3) поверхні кілець поглиначів, які мають затування мікрохвильової енергії L 8,6, 10 та 12,3 дБ.

Наведені дані свідчать про те, що за рахунок обробки поверхні кільця поглиначів, відбиття $|\Gamma|$, а відповідно і КСХН, суттєво зменшилося. Отже, встановлено, що поліпшення узгодження (зменшення відбиття) можна досягнути за рахунок вилучення частинок молібдену з поверхні поглиначів.

ВИСНОВКИ

Одержано об'ємні поглиначі з композитів AlN–Mo з високим рівнем затування 10,0–12,3 дБ, що відповідає коефіцієнту поглинання мікрохвильового випромінювання 37–56 дБ/см. Водночас досягнуто низьке значення КСХН, що складає 1,5–1,6 в діапазоні частот 9,3–10 ГГц

Обробка поверхні поглиначів, яка полягає у видаленні з неї частинок молібдену сумішшю кислот, поліпшує узгодження за рахунок зменшення значень коефіцієнта відбиття, а відповідно, і максимуму КСХН на 26–30 %.

V. I. Chasnyk¹, D. V. Chasnyk², O. M. Kaidash³, I. P. Fesenko³,
S. A. Kukharenko³

¹State Enterprise Scientific Research Institute ORION, Kyiv, Ukraine

²Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine (ISEE SSU), Kyiv, Ukraine

³Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The influence of the surface condition of the volume absorber made of AlN–Mo composite on the reduction of microwave radiation reflection

In order to further improve designs, make better parameters, and ensure stable operation of electro-vacuum devices operating in the microwave range at frequencies of 1–100 GHz, it is necessary to improve the characteristics of microwave radiation absorption. The extremely difficult task of obtaining volumetric absorbers from AlN–Mo composites with a high attenuation level of 10.0–12.3 dB, corresponds to the absorption coefficient of microwave radiation of 37–56 dB/cm, was solved, and an acceptable level of voltage standing wave ratio (VSWR) 1.5–1.6 was achieved in the frequency range of 9.3–10 GHz. It was established that chemical treatment of the absorber surface, which consists in removing molybdenum particles from it with a mixture of acids, improves matching by reducing the values of the microwave radiation reflection and, accordingly, the maximum of VSWR by 26–30%.

Keywords: aluminum nitride, molybdenum, absorption of microwave radiation, volume absorber, traveling wave lamp, matching, voltage standing wave ratio (VSWR)

1. 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. *2006 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. held jointly with 2006 IEEE Int. Vacuum Electron Sources*, Monterey, California, 25–27 April, 2006. P. 37–38.
2. 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, is. 14. P. 2705–2709.
3. Zang X., Li H., Lu Y., Tan H., Ji H., Yan M., Liu Z.. Dielectric properties and thermal conductivity of Si₃N₄–SiC composite ceramics. *J. Korean Ceram. Soc.* 2022. Vol. 59, no. 6, P. 903–908.
4. 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. P. 2573–2581.
5. 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, no. 3. P. 165–176.
6. Chasnyk V., Chasnyk D., Fesenko I., Kaidash O., Turkeyvych 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.
7. 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, no. 6. P. 633–638.
8. Tangen I.-L., Yu Y., Grande T., Hoier R., Einarsrud M.-A. Preparation and characterization of aluminium nitride–titanium nitride composites. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2004. Vol. 24, is. 7. P. 2169–2179.
9. Zang X., Lu Y. Preparation and dielectric properties at high frequency of AlN-based composited ceramic. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2020. Vol. 31. P. 2826–2832.
10. 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.
11. 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, # 1–2. P. 66–76.
12. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. Москва: Наука, 1982. 164 с.

13. Chasnyk D.V., Chasnyk V.I., Kaidash O.M. Estimating the dielectric permittivity in nonconductive composites by the content and morphology of conducting particles in the microwave frequencies range. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 1. P. 45–51.
14. Батыгин В.Н., Ефимова Н.В., Иноземцева А.В., Мазурова Л.Г. Объемные поглотители для мощных ЛБВ. Электронная техника. Серия 1. *Электроника СВЧ*. 1970. Вып. 11. С. 95–102
16. Лебедев И.В. Стоячие волны и согласования. Техника и приборы СВЧ. Москва: Высшая школа, 1970. 440 с.

Надійшла до редакції 06.04.24

Після доопрацювання 23.04.24

Прийнята до опублікування 25.04.24