

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛОТИТЕЛИ СВЧ-ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ПОГЛОЩЕНИЯ

Экспериментально исследованы материалы на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния с высокими уровнями поглощения СВЧ-энергии. Приведены значения диэлектрических характеристик, теплопроводности, объемного удельного электрического сопротивления и коэффициентов поглощения электромагнитной энергии в этих композитах. Установлена взаимосвязь между уровнем поглощения и удельным электрическим сопротивлением материала поглотителя, а также диэлектрической проницаемостью, тангенсом угла диэлектрических потерь и концентрацией поглощающей фазы.

Ключевые слова: объемный поглотитель, коэффициент поглощения электромагнитной энергии, объемное удельное электрическое сопротивление, композит, нитрид алюминия.

Большинство композитных материалов, поглощающих СВЧ-энергию, имеют коэффициент поглощения электромагнитной энергии на уровне 2,5–4,0 дБ/мм, и только в материале КТ-30 он значительно выше и составляет 5,3–7,5 дБ/мм. Однако коэффициент теплопроводности КТ-30 $\lambda = 5–8$ Вт/(м·К), что совершенно недостаточно для применения его в качестве поглотителя в электронных приборах большой мощности. Такая низкая теплопроводность этого материала обусловлена тем, что поглощающей фазой в нем является полупроводниковое соединение Ti_3O_5 , которое образуется при восстановлении TiO_2 в процессе спекания материала в водороде [1]. Свойства полупроводникового Ti_3O_5 сказываются на общем сопротивлении материала КТ-30, которое равно $5 \cdot 10^2$ Ом·м [2]. При этом следует отметить, что у большинства поглощающих материалов объемное удельное электрическое сопротивление ρ составляет $10^{12}–10^{13}$ Ом·м.

Известен материал марки АН-45Ж, обладающий высоким уровнем поглощения (5,0 дБ/мм) и хорошей теплопроводностью (50 Вт/(м·К)), в котором поглощающей фазой являются частицы железа размером 4–8 мкм. Объемное удельное электрическое сопротивление этого материала равно 10^3 Ом·м [3]. Но, к сожалению, АН-45Ж нельзя использовать в качестве поглотителя для электронных приборов, поскольку из-за наличия в его составе частиц железа он проявляет магнитные свойства, что может вредить фокусировке электронного потока в приборе СВЧ. Материал применяется в качестве согласован-

ных коаксиальных оконечных нагрузок в измерительной аппаратуре.

Похожие свойства по затуханию проявляются и в поглотителях СВЧ-энергии в виде тонких пленок поглощающего материала, которые наносят на опорные керамические стержни, закрепляющие спираль в лампе бегущей волны. Анализ опубликованных данных о величине вносимого погонного затухания для двух спиральных замедляющих систем с разными размерами, приведенных в [4], показывает, что максимальное погонное затухание тоже связано с уменьшением поверхностного сопротивления поглощающего покрытия.

Из проведенного анализа свойств поглотителей можно предположить, что их способность к поглощению больших уровней СВЧ-энергии наряду с пониженным сопротивлением ($\rho = (0,5–1,0) \cdot 10^3$ Ом·м) не является простой случайностью, тем более что и пленочные поглотители проявляют аналогичные свойства.

Целью данной работы была проверка этого предположения, для чего были проведены экспериментальные исследования материалов на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния, полученных в таких условиях, при которых они имеют большой уровень поглощения.

Параметры известных и вновь разработанных материалов — поглотителей СВЧ-энергии приведены в **таблице**, а также на **рис. 1 и 2**.

Композиты, занимающие в таблице номера от 1 до 10, были получены при свободном спе-

Параметры материалов-поглотителей СВЧ-энергии

№	Марка материала (химический состав)	Материал поглощающей фазы	d^* , мкм	Количество материала поглощающей фазы, %		Коэффициент поглощения на частоте 9,5–10,5 ГГц		λ , Вт/(м·К)	ε на частоте 3,35 ГГц	$\text{tg}\sigma$ на частоте 3,35 ГГц	ρ , Ом·м	Литературный источник
				по массе	по объему	дБ/мм	раз/мм					
1	АН–38М (AlN, Mo)	Mo	1–20	38	16,6	3,1–3,5	2,05–2,2	74–78	22–25	0,006–0,008	10^{12}	[5, 6]
2	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	42	44,5	4,2–4,8	2,6–3,0	47–51	20–21	0,044–0,048	$2 \cdot 10^8$	[8]
		Mo	2,2	8	2,6							
3	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	48	48,7	3,4–4,0	2,2–2,5	51–56	26–27	0,095–0,105	10^{12}	[8]
		Mo	2,2	2	0,6							
4	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	46	47,3	3,9–4,5	2,45–2,8	62–68	25–27	0,075–0,085	$3 \cdot 10^8$	[8]
		Mo	2,2	4	1,3							
5	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	5	50	50,5	3,5–3,9	2,2–2,45	38–42	19–21	0,11–0,12	10^{12}	
6	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	3			4,8–5,2	3,0–3,4	33–37	30–32	0,14–0,16	$1 \cdot 10^8$	[6]
7	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	1			6,5–7,1	4,5–5,1	–	36–40	0,21–0,23	$5 \cdot 10^5$	
8	АН–40М (AlN, Mo)	Mo	1–20	40	18,0	3,3–3,7	2,1–2,3	72–78	30–34	0,008–0,009	10^{12}	
9	АН–40М (AlN, Mo)	Mo				4,3–4,7	2,7–2,9	67–73	41–45	0,009–0,011	$5 \cdot 10^9$	
10	АН–40М (AlN, Mo)	Mo				5,4–5,8	3,5–3,8	–	50–54	0,06–0,08	$4 \cdot 10^5$	[7]
11	АН–50М (AlN, Mo)	Mo	4–8	50	24,0	3,0	2,0	70	48 (10 ГГц)	0,005 (10 ГГц)	10^{12}	[3]
12	АН–45Ж (AlN, Fe)	Fe		45	25	5,0	3,1	50	35 (10 ГГц)	0,25 (10 ГГц)	10^3	[3]
13	КТ–30 (Al ₂ O ₃ , TiO ₂)	TiO ₂	–	30	–	5,3–8,0	3,4–6,4	5–8	25–40 (10 ГГц)	0,2–1,0 (10 ГГц)	$5 \cdot 10^2$	[1, 2]

* Размер частиц поглощающей фазы в исходном порошке

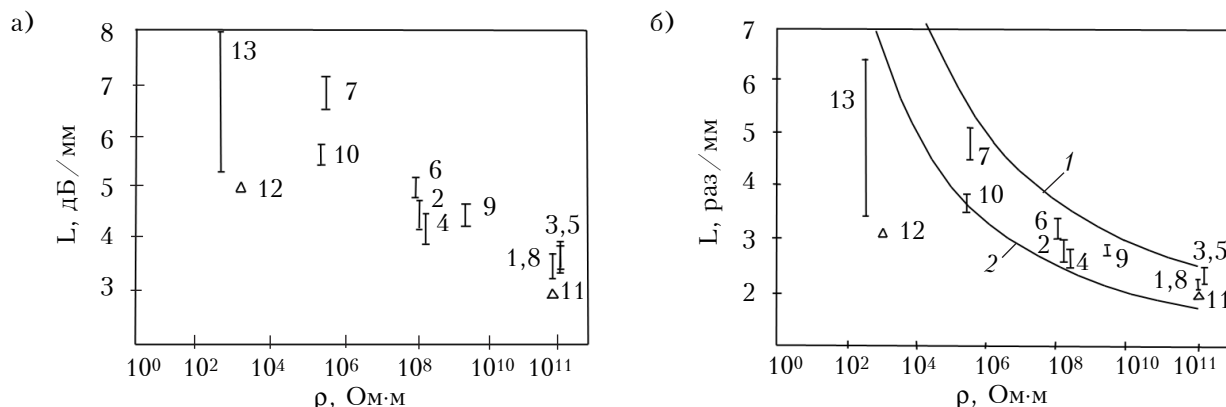


Рис. 1. Значения коэффициента поглощения L (а — в дБ/мм, б — в раз/мм) и соответствующее ему объемное удельное электрическое сопротивление для материалов, приведенных в таблице (цифры соответствуют порядковому номеру материала)

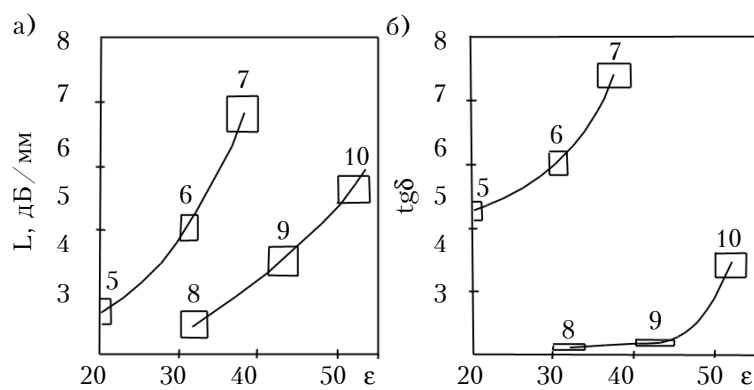


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ (б) от диэлектрической проницаемости ϵ в AlN—SiC (№ 5, 6, 7) и AlN—Mo (№ 8, 9, 10)

кании в среде азота и нормальном атмосферном давлении. В качестве активирующей добавки при спекании всех композитов применяли оксид иттрия в количестве 4% по массе. Для этих композитов в таблице указаны минимальные значения измеренного объемного удельного электрического сопротивления. Материалы с $\rho = 10^{12}$ Ом·м (№ 1, 3, 5, 8, 11) спекались при температуре 1800–1850°C, время выдержки 60 мин. Композиты с $\rho = (4-5) \cdot 10^5$ Ом·м (№ 7, 10) спекались при температуре 1900–1950°C, время выдержки 120 мин. Для композитов № 2, 3, 4 в [8] приведены данные для поглощения и коэффициента теплопроводности, а для композита № 10 в [7] приведен только коэффициент поглощения.

Рассмотрим взаимосвязь поглощения и объемного удельного сопротивления в исследуемых материалах, используя приведенные в таблице данные.

Из рис. 1, а видно, что существуют три группы материалов — поглотителей СВЧ-энергии, значительно отличающихся как по уровню поглощения, так и по величине объемного удельного электрического сопротивления. Материалы

одной группы (№ 1, 3, 5, 8, 11) имеют удельное сопротивление 10^{12} Ом·м (что соответствует сопротивлению керамических изоляторов) и коэффициент поглощения от 3,0 до 4,0 дБ/мм, материалы второй (№ 7, 10) — сопротивление $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м и высокий уровень поглощения 5,4–7,1 дБ/мм. Сопротивление и уровень поглощения материалов третьей группы (№ 2, 4, 6, 9) занимают промежуточные значения.

Анализ рис. 1 показал, что если коэффициент поглощения СВЧ-энергии выразить в раз/мм, то проявляется определенная связь между уровнем поглощения и величиной

электрического сопротивления. Как видно из рис. 1, б, уровни поглощения рассмотренных материалов-поглотителей находятся между кривыми 1 и 2, которые описываются соотношением $L \cdot n = \text{const}$,

$$(1)$$

где L — коэффициент поглощения, выраженный в раз/мм, а n — показатель степени при основании 10 для объемного удельного электрического сопротивления ρ в Ом·м. Для кривой 1 $L \cdot n = 30$, а для кривой 2 $L \cdot n = 20$.

Рассмотрим влияние диэлектрической проницаемости на поглощение и диэлектрические потери на примере композитов на основе керамики из нитрида алюминия с добавками карбида кремния AlN—SiC (№ 5, 6, 7) и молибдена AlN—Mo (№ 8, 9, 10).

Как видно из рис. 2, а, в исследованных поглотителях существует однозначная зависимость — большему уровню поглощения соответствует большее значение диэлектрической проницаемости. Аналогично ведет себя и тангенс угла диэлектрических потерь (см. рис. 2, б). При одинаковой диэлектрической проницаемости поглотители с добавкой карбида кремния имеют боль-

ший уровень поглощения, чем поглотители с добавкой молибдена, а при одном и том же поглощении диэлектрическая проницаемость у них меньше. Например, при $\epsilon = 32$ для AlN—SiC (№ 6) $L = 5,0 \pm 0,2$ дБ/мм, а для AlN—Mo (№ 8) $L = 3,5 \pm 0,2$ дБ/мм.

Подводя итог проведенным исследованиям материалов-поглотителей, можно сделать вывод о том, что поглощение всегда прямо пропорционально диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь и обратно пропорционально удельному электрическому сопротивлению.

Известно, что уровень поглощения СВЧ-энергии в двухфазных композитах увеличивается с ростом концентрации проводящей фазы. Учитывая эту закономерность, можно записать следующее соотношение:

$$L \approx c \epsilon \operatorname{tg} \delta / \rho, \quad (2)$$

где c — концентрация проводящей фазы в % по объему.

Соотношение (2) позволяет по известным значениям концентрации поглощающей фазы, диэлектрической проницаемости, тангенса потерь и электрического сопротивления композита оценить величину поглощения в нем, а также сравнить между собой разные материалы поглотителей для их использования в разрабатываемых СВЧ-приборах средней и высокой выходной мощности.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что для материалов — поглотителей СВЧ-энергии существует разграничение по уровню поглощения и соответствующему этому уровню объемному удельному электрическому сопротивлению. Если необходимо, чтобы материал поглотителя проявлял свойства диэлектрика, т. е. имел сопротивление 10^{12} Ом·м, то в этом случае поглощение будет на уровне $3,5 \pm 0,5$ дБ/мм. Если же главным требованием к материалу является макси-

мальное поглощение $6,5 \pm 1,0$ дБ/мм, то при этом его объемное удельное электрическое сопротивление будет равно $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м.

Обнаруженное постоянство произведения $L \cdot \rho$ позволяет прогнозировать минимальный и максимальный уровни поглощения СВЧ-энергии в двухфазных композитах на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния, исходя из измеренного объемного электрического сопротивления.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Павлова М. А., Рыбкин В. Н., Немогай И. К. Поглотители СВЧ-энергии и их соединения с металлами // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. — 2009. — Вып. 4. — С. 42—47.
2. ТСО.027.029 ТУ. Технические условия на материал КТ-30.
3. Бухарин Е. Н., Власов А. С., Алексеев А. А. Новые высокотеплопроводные объемные СВЧ-поглотители // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1988. — Вып. 6. — С. 66—70.
4. Поздняков Л. В., Селихова Т. Ю. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. II. Методика расчета и измерения // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. — Москва: ЦНИИ «Электроника», 1978. — Вып. 3. — 72 с.
5. Часнык В.И. Влияние структурной иерархии частиц проводящей фазы в материале объемного поглотителя на процесс поглощения СВЧ-энергии // Электроника и связь. — 2011. — № 1. — С. 43—47.
6. Часнык В.И., Фесенко И.П. Теплопроводность внутривакуумных объемных поглотителей СВЧ-энергии // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — № 2. — С. 47—51.
7. 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. Super. Mat. — 2012. — Vol. 34, N 1. — P. 71—73.
8. Часнык В. И., Фесенко И. П. Поглотители СВЧ-энергии с высокой теплопроводностью на основе нитрида алюминия и карбида кремния с добавками молибдена // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 1. — С. 11—14.

Дата поступления рукописи
в редакцию 10.05 2014 г.

В. И. ЧАСНИК

Україна, м. Київ, НДІ «ОРІОН».
E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛИНАЧІ НВЧ-ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ НІТРИДУ АЛЮМІНІЮ З ВИСОКИМ РІВНЕМ ПОГЛИНАННЯ

Представлено результати експериментальних досліджень композитів на основі нитриду алюмінію з добавками молибдену та карбиду кремнію з високим поглинанням НВЧ-енергії. Показано, що в об'ємних поглиначах існує взаємозв'язок між високим рівнем поглинання та питомим об'ємним електричним опором матеріалу: максимальному поглинанню $6,5 \pm 1,0$ дБ/мм відповідає опір $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м. Для матеріалу поглинача з властивостями діелектрика з опором 10^{12} Ом·м рівень поглинання дорівнює $3,5 \pm 0,5$ дБ/мм.

Ключові слова: об'ємний поглинач, коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії, питомий об'ємний електричний опір, композит, нітрид алюмінію.

MICROWAVE ENERGY ATTENUATORS ON THE BASIS OF ALUMINUM NITRIDE WITH HIGH LEVEL OF MICROWAVE ENERGY ABSORPTION

Results of experimental studies of aluminum nitride based composites with addition of silicon carbide and molybdenum having high microwave absorption are presented. The interconnection between high level of absorption and volume electrical resistance was observed: maximum absorption of $6.5 \pm 1,0$ dB/mm corresponds to the electrical resistance of $(4-5) \cdot 10^5$ Ohm-m. Level of absorption of $3.5 \pm 0,5$ dB/mm is revealed for the dielectric material with electrical conductivity of 10^{12} Ohm-m. The patterns detected during the study allow to predict the minimum and maximum levels of absorption of microwave energy in the two-phase composites based on aluminum nitride with molybdenum or silicon carbide, based on the measured volume of electrical resistance.

Keywords: volume attenuators, absorption factor of electromagnetic energy, composite, volume electrical resistance, aluminum nitride.

REFERENCES

1. Pavlova M. A., Rybkin V. N., Nemogai I. K. [Microwave energy absorbers and their compounds with metals]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika*, 2009, iss. 4, pp. 42-47. (in Russian)
2. TCO.027.029 TY. [Technical specifications for CT-30 material]
3. Bukharin E. N., Vlasov A. S., Alekseev A. A. [New highly voluminous microwave absorbers]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy*, 1988, iss. 6, pp. 66-70. (in Russian)
4. Pozdnyakov L. V., Selikhova T. Yu. [Energy absorbers in vacuum microwave devices. Chapter II. Methods for calculating and measuring] *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1978, iss. 3, 72 p. (in Russian)
5. Chasnyk V.I. [The impact of structural hierarchy of particles of conducting phase in the volume absorber material on the absorption process of microwave energy]. *Elektronika i svyaz'*, 2011, no 1, pp. 43-47. (in Russian)
6. Chasnyk V.I., Fesenko I.P. [Thermal conductivity of vacuum volume attenuators of microwave energy]. *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no 2, pp. 47-51. (in Russian)
7. 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. Super. Mat.*, 2012, vol. 34, no 1, pp. 71-73.
8. Chasnyk V. I., Fesenko I. P. [Microwave energy attenuators of high thermal conductivity based on AlN and SiC with addition of molybdenum]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no 1, pp. 11-14. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Гилмор-мл. А. С. Лампы с бегущей волной.— Москва: Техносфера, 2013.

Книга основана на материалах лекций и семинаров по СВЧ-лампам, которые автор многократно представлял в ведущих фирмах и университетах США. В ней сосредоточены базовые знания по теории и технике наиболее востребованного в течение многих, в том числе и последних десятилетий, прибора — лампы с бегущей волной (ЛБВ). Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала. Книга может быть полезна как для подготовки студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники.

