

В. И. Часнык¹, В. Г. Полторацкий^{2,*}, О. В. Лещенко^{2,}**

¹Государственное предприятие НИИ “Орион”, г. Киев, Украина

²Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

*vg.poltoratsky@gmail.com

**olesh@ism.kiev.ua

**Затухание СВЧ-излучения на частотах
34,09–34,19 ГГц в композиционном материале
на основе микропорошка алмаза,
структурированном нанокристаллической
связкой, осажденной из газовой фазы
при давлении ниже атмосферного**

Затухание СВЧ-излучения в образцах композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного нанокристаллической связкой при давлении ниже атмосферного, измерено на частотах 34,09–34,19 ГГц в цилиндрическом резонаторе на моде H_{111} . По результатам измерений рассчитаны обратные потери. Измерено удельное объемное электросопротивление образцов. Показана возможность использования композиционных алмазо-содержащих структурированных материалов в качестве поглотителей СВЧ-излучения.

Ключевые слова: затухание СВЧ-излучения, обратные потери, поглотитель СВЧ излучения, композит, микропорошки алмаза, углеродные нанотрубки, нанокристаллическая связка.

ВВЕДЕНИЕ

Главным направлением в развитии СВЧ-электроники миллиметрового диапазона волн (частотой от 3 до 60 ГГц) является создание приборов и различной аппаратуры военного и гражданского назначения с более высокой выходной мощностью в широкой полосе частот при уменьшении их габаритов и веса. Чтобы выполнить эти требования, часто противоречащие друг другу при конструировании прибора, нужны нестандартные подходы при разработке такой аппаратуры, а также требуются материалы сочетающие определенные свойства. Например, для решения проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, снижения радиозаметности объектов, а также для защиты систем хранения и обработки информации необходимы радиопоглощающие материалы нового поколения с высокой эффективностью поглощения электромагнитного излучения, малым удельным весом, высокой прочностью и высокой термостойкостью, химической стойкостью и устойчивостью к воздействию внешней среды [1–4].

Задача данной работы – исследование свойств композиционных алмазо-содержащих структурированных материалов с целью использования в качестве поглотителей СВЧ-излучения и расширение области применения таких материалов.

МАТЕРИАЛЫ

К новому поколению материалов, поглощающих СВЧ-излучение, относится композиционный алмазосодержащий материал, структурированный углеродной связкой, осажденной из газовой фазы при давлении ниже атмосферного [5–7].

Процесс формирования композиционного материала на основе микропорошка синтетического алмаза АСМ 5/3 за счет связывания в предварительно спрессованных компактах частиц порошка углеродом, осажденным из углеродсодержащего газа – метана (CH_4) или природного газа (95 % CH_4), является двустадийным. Первый этап – смешивание порошка с жидким связующим, брикетирование (выбор формы) и сушка. На втором этапе в газотермическом реакторе установки физико-химического синтеза при температуре 1100–1200 °С и давлении ниже атмосферного происходит образование собственно композита. Технологический процесс получения такого композиционного материала на основе микропорошка алмаза подробно описан в [5, 7].

Разработана технология получения композиционных компактов различных форм и размеров:

- цилиндры диаметром от 8 до 120 мм и высотой от 10 до 25 мм;
- шары диаметром от 8 до 12 мм;
- пластины длиной 120 мм, шириной 120 мм (и более) и высотой от 3 до 10 мм.

Плотность предварительно спрессованного компакта из микропорошка синтетического алмаза АСМ 5/3 составляет $1,16 \text{ г/см}^3$, плотность композиционного материала – $1,81 \text{ г/см}^3$. Результаты исследования композиционного материала на основе АСМ 5/3 [5] были следующими:

- объемная доля алмаза – 0,377, углеродной связки – 0,323, пор – 0,30 (в том числе открытых – 0,102, полуоткрытых (менее 20 нм) – 0,062);
- коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- предел прочности при изгибе $\sigma = 12,4 \text{ МПа}$;
- микротвердость $H = 11,5 \text{ ГПа}$.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала довольно низок, что объясняется низкими значениями ТКЛР компонентов композита: алмаза – $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, углеродного связующего – менее $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. В интервалах температур 293–373, 293–423, 293–473 К ТКЛР композита равен $0,93 \cdot 10^{-6}$, $1,18 \cdot 10^{-6}$, $1,44 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно [5].

Микроструктура поверхности образца композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного нанougлеродной связкой, показана на рис. 1: крупные образования (темные) представляют собой агломераты частиц синтетического алмаза, средние (светлые) – частицы синтетического алмаза, покрытые нанougлеродом, самые мелкие образования (основной фон) – нанougлеродные глобулы.

Для исследования затухания СВЧ-излучения в композиционном материале на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного углеродной связкой, из композиционного материала были изготовлены цилиндрические образцы (диски) диаметром 4,2 мм и высотой 1 мм (рис. 2).

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерение ослабления (затухания) СВЧ-излучения в образцах композиционного материала проводили на панорамном измерителе КСВН¹ и ослабле-

¹ КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению.

ния P2-65, работающем в диапазоне частот 25,9–37,5 ГГц, сечение высоко-
частотного (ВЧ) тракта – 7,2×3,4 мм; единицы измерения – дБ.

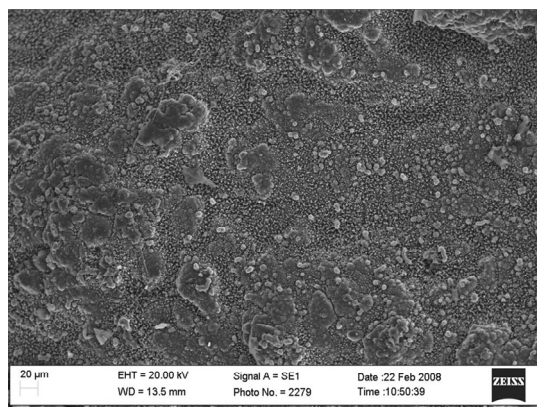


Рис. 1. Микроструктура поверхности образца композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного нанокуглеродной связкой.

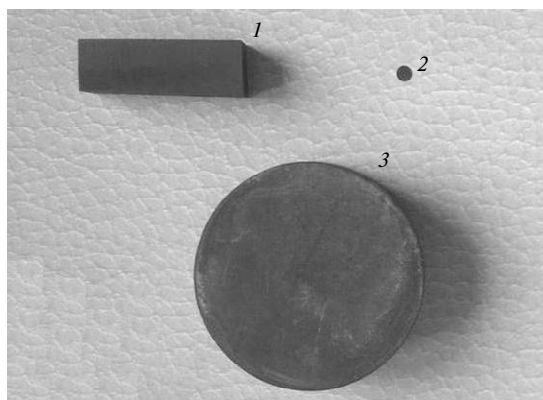


Рис. 2. Исходный образец композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного нанокуглеродной связкой, размером 60×20×12 мм (1), из которого были изготовлены образцы-диски: Ø 4,2 мм, $h = 1$ мм (2); образец композиционного материала в форме цилиндра: Ø 80 мм, $h = 20$ мм (3).

Было исследовано 10 образцов композиционного материала. Образец представляет собой диск диаметром 4,2 мм и высотой 1 мм.

При измерении ослабления (затухания) СВЧ-излучения образец-диск помещали в нижнем торце цилиндрического объемного резонатора. Для входа и выхода СВЧ-волны в резонаторе имеются диафрагмы связи – отверстия, расположенные симметрично в средней части резонатора. Вплотную к этим отверстиям подходят отрезки волновода сечением 7,2×3,4 мм, оканчивающиеся стандартными фланцами размером 24×24 мм для подсоединения к ВЧ-тракту. При измерении затухания СВЧ-волны, резонатор помещается между направленными ответвителями падающей и отраженной волны. К выходу ВЧ-тракта присоединяется согласованная нагрузка с КСВН $\leq 1,1$. Отношение длины объемного цилиндрического резонатора к радиусу – более 3,6. При таком соотношении размеров резонатора основным видом колебания резонатора является низший вид колебания – H_{111} [8]. Погрешность измерения затухания на фиксированной частоте составляет менее 5 %.

Для получения достоверных результатов по затуханию СВЧ-волны в исследуемом материале объем образца должен занимать небольшую часть объема цилиндрического резонатора. Исходя из этого требования и были выбраны форма и размеры образца: диск диаметром 4,2 мм и высотой 1 мм. При таких размерах объем образца-диска составляет < 6 % от объема цилиндрического резонатора и не нарушает структуру ВЧ-поля вида H_{111} при измерении затухания и КСВН.

После измерения ослабления СВЧ-излучения ВЧ-тракт перестраивали на измерение КСВН образцов. К выходному фланцу цилиндрического резонатора подсоединяли согласованную нагрузку с собственным КСВН $\leq 1,1$. Образец композита при этом помещали в тот же цилиндрический резонатор.

Были измерены характеристики самого цилиндрического резонатора для определения собственного затухания резонатора (т. е. без измеряемого образца). Собственное затухание резонатора составляет 1,6 дБ, ненагруженная добротность² резонатора $Q_{рез} = 280$, частота резонанса $f_0 = 33,66$ ГГц, собственный КСВН = 1,9 на частоте 33,66 ГГц, вид колебания – H_{111} .

Отражающие свойства образца исследуемого материала были определены на основании результатов измерения КСВН образца (КСВН_{обр}) с последующим перерасчетом в общепринятую величину – обратные потери (RL , дБ).

Коэффициент стоячей волны по напряжению связан с обратными потерями соотношением

$$RL = 20 \log \frac{КСВН + 1}{КСВН - 1}. \quad (1)$$

Поскольку измеренные уровни КСВН являются суммарными (КСВН_Σ) (с учетом КСВН резонатора (КСВН_{рез})), то измеренные КСВН_Σ были пересчитаны в суммарный коэффициент отражения Γ_{Σ} по известному соотношению [9]:

$$\Gamma = \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1} \quad (2)$$

с заменой КСВН на КСВН_Σ³, т. е.

$$\Gamma_{\Sigma} = \frac{КСВН_{\Sigma} - 1}{КСВН_{\Sigma} + 1}. \quad (3)$$

Учитывая, что $\Gamma_{\Sigma} = \Gamma_{обр} + \Gamma_{рез}$, где $\Gamma_{обр}$ и $\Gamma_{рез}$ – коэффициент отражения образца и резонатора соответственно, и при измерениях $\Gamma_{рез} = \text{const}$ ($\Gamma_{рез} = 0,31$, так как КСВН_{рез} = 1,9), то $\Gamma_{обр} = \Gamma_{\Sigma} - 0,31$.

После определения $\Gamma_{обр}$ значение КСВН_{обр} вычисляли по соотношению [9]

$$КСВН_{обр} = \frac{1 + \Gamma_{обр}}{1 - \Gamma_{обр}}. \quad (4)$$

Затем по этим значениям КСВН_{обр} определяли обратные потери RL , обусловленные влиянием непосредственно самого материала образца.

Результаты измерений и вычислений приведены в табл. 1.

² Параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и определяющий во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан.

³ Так как вычисление КСВН_{обр} без перехода к коэффициенту отражения невозможно.

Таблица 1. Параметры исследованного композиционного материала на основе микропорошка синтетического алмаза АСМ 5/3

Образец	f_0 , ГГц	Q	L_{Σ} , дБ	КСВН $_{\Sigma}$	$L_{обр}$, дБ	КСВН $_{обр}$	$RL_{обр}$, дБ
1	34,19	112	7,9	4,3	6,3	1,90	-10,16
2	34,14	137	6,8	4,15	5,2	1,86	-10,40
3	34,15	104	8,8	5,4	7,2	2,21	-8,40
4	34,12	137	6,6	4,0	5,0	1,80	-10,90
5	34,14	114	8,2	5,15	6,6	2,15	-8,76
6	34,18	110	8,9	5,05	7,3	2,12	-8,85
7	34,15	103	10,1	5,8	8,5	2,30	-8,10
8	34,11	124	7,3	4,25	5,7	1,88	-10,20
9	34,09	136	6,8	3,95	5,2	1,78	-11,0
10	34,13	116	8,3	5,0	6,7	2,11	-8,9
Среднее значение	34,14	119,3	7,97	4,7	6,37	2,0	-9,57

Добротность Q численно равна отношению резонансной частоты f_0 к ширине резонансной кривой Δf на уровне половинной мощности [10]:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (5)$$

Добротность обратно пропорциональна затуханию L , т. е. чем шире резонансная кривая (больше Δf), тем больше затухание. Так, например, для образца 4 – $Q = 137$, $L_{обр} = 5,0$ дБ, а для образца 7 – $Q = 103$, $L_{обр} = 8,5$ дБ. Таким образом, значение Q однозначно определяет уровень поглощения СВЧ-излучения в цилиндрическом резонаторе.

На основании полученных результатов (см. табл. 1) построены зависимости затухания СВЧ-излучения от частоты резонансов, КСВН и обратных потерь (рис. 3–5).

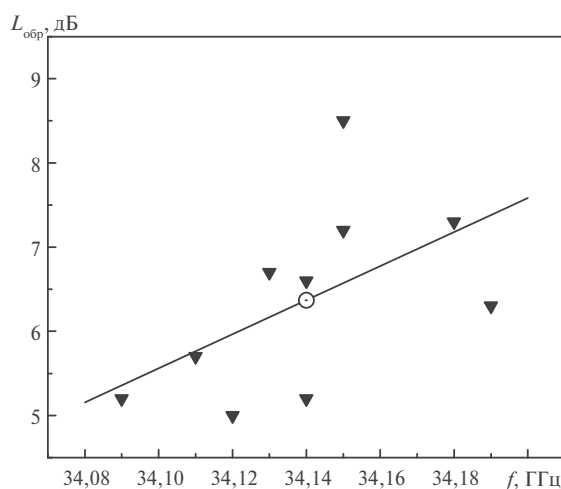


Рис. 3. Затухание СВЧ-излучения на частотах 34,09–34,19 ГГц в образцах композита на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3; среднее значение затухания (○) $L_{обр,ср} = 6,37$ дБ.

На рис. 3 показано затухание СВЧ-излучения и соответствующие частоты резонансов для 10 образцов композиционного материала. Из приведенных данных следует, что отклонение значений затухания в образцах композита составляет от 1,37 до 2,13 дБ. Отклонение по частоте от средней частоты (34,14 ГГц) – менее 0,2 %.

Взаимосвязь затухания СВЧ-излучения и коэффициента стоячей волны по напряжению в 10 образцах композита показана на рис. 4, видно, что КСВН образцов растет линейно с ростом затухания в образце. Это связано с тем, что образец, имеющий большее затухание, сильнее влияет на распределение магнитных силовых линий электромагнитного колебания вида H_{111} в цилиндрическом резонаторе. Это влияние проявляется в увеличении коэффициента отражения СВЧ-волны, а, следовательно, возрастает и КСВН.

Взаимосвязь затухания СВЧ-излучения и обратных потерь в образцах композита показана на рис. 5, видно, что чем больше затухание L , тем меньше обратные потери RL .

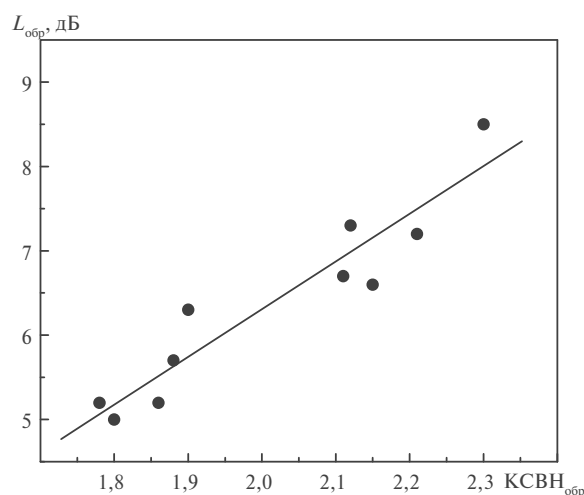


Рис. 4. Взаимосвязь затухания СВЧ-излучения на частотах 34,09–34,19 ГГц и коэффициента стоячей волны по напряжению $КСВН_{обр}$ в образцах композита на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3.

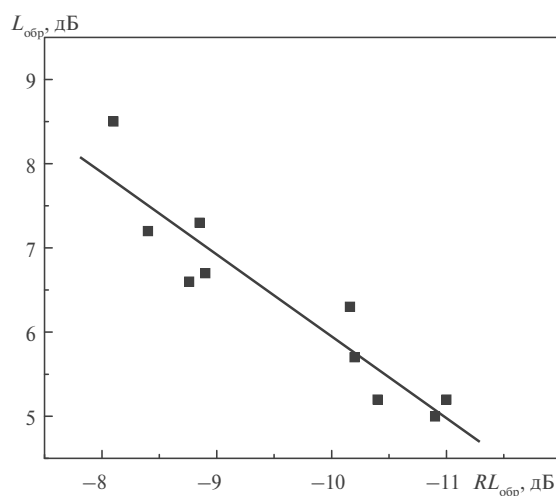


Рис. 5. Взаимосвязь затухания СВЧ-излучения на частотах 34,09–34,19 ГГц и обратных потерь $RL_{обр}$ в образцах композита на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3.

При увеличении толщины слоя исследуемого материала затухание СВЧ-излучения растет прямо пропорционально.

Также было измерено удельное объемное электрическое сопротивление образцов композита $R_{обр}$ с помощью прибора Л2-56 (табл. 2).

Таблица 2. Параметры исследованного композита: затухание СВЧ-излучения $L_{обр}$ и удельное электрическое сопротивление $R_{обр}$

Образец	$L_{обр}$, дБ	$L_{обр}$, раз	$R_{обр}$, Ом·см	Среднее значение $R_{обр}$, Ом·см	$\lg R_{обр}$
1	6,3	4,3	5,8–6,8	6,3	0,80
2	5,2	3,3	5,8–6,6	6,2	0,79
3	7,2	5,2	3,8–4,8	4,3	0,63
4	5,0	3,1	7,8–9,6	8,7	0,94
5	6,6	4,6	4,4–5,6	5,0	0,70
6	7,3	5,4	6,0–7,0	6,5	0,81
7	8,5	7,1	4,7–6,2	5,5	0,74
8	5,7	3,7	7,8–8,6	8,2	0,91
9	5,2	3,3	6,0–7,3	6,7	0,83
10	6,7	4,7	7,2–8,2	7,7	0,89

Существует закономерность, связывающая коэффициент поглощения СВЧ-излучения, выраженный в раз/мм, и удельное объемное электрическое сопротивление R материала поглотителя [11]. Установлено, что значения поглощения L исследуемых материалов (поглотителей СВЧ-излучения) находятся в области ограниченной кривыми 1 и 2 (рис. 6), которые подчиняются соотношению [11]

$$L \cdot n = \text{const}, \quad (6)$$

где L – коэффициент поглощения, раз/мм, n – показатель степени при основании 10 удельного объемного электросопротивления R , Ом·м. Кривые 1 и 2 на рис. 6 описываются соотношениями $L \cdot n = 30$ и $L \cdot n = 20$ соответственно. Объяснить такую закономерность пока затруднительно, но сама закономерность является очень интересной из-за простоты математического выражения.

Для проверки обнаруженной закономерности, связывающей поглощение и электросопротивление образца, измеренное затухание $L_{обр}$, дБ, было пересчитано в другие единицы – $L_{обр}$, разы (см. табл. 2). Там же приведены результаты измерения удельного объемного электросопротивления 10 образцов композиционного материала. В табл. 2 для каждого образца указан интервал изменения сопротивления, измеренного на нескольких участках поверхности образца, также приведено значение логарифма удельного электросопротивления $R_{обр}$, необходимого для построения логарифмической зависимости (см. рис. 6).

Видно, что все значения затухания $L_{обр}$, разы и соответствующие значения удельного объемного электросопротивления образцов $\lg R_{обр}$ находятся меж-

ду кривыми 1 и 2. Верхняя кривая 1 соответствует соотношению $L \cdot n = 5,5$, кривая 2 – $L \cdot n = 2$.

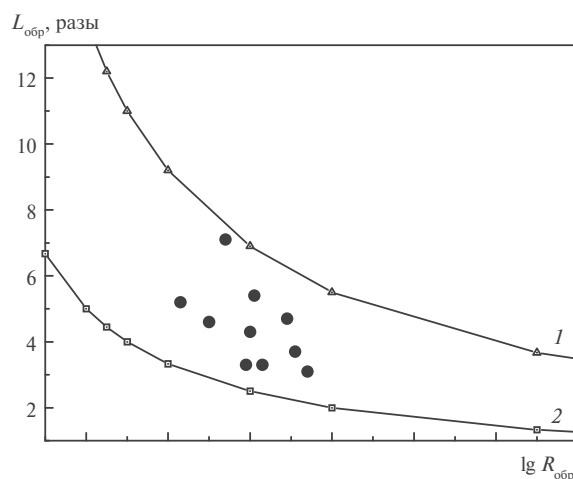


Рис. 6. Затухание СВЧ-излучения $L_{обр}$, выраженное в разы, на частотах 34,09–34,19 ГГц и соответствующее ему значение $\lg R_{обр}$ в образцах композита на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3: $L \cdot n = 30$ (1) и $L \cdot n = 20$ (2).

Таким образом, описанная выше закономерность (6), имеет место и для исследованного композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, хотя по значению удельного объемного электросопротивления этот материал имеет большее сходство с проводниками электрического тока, чем с изоляторами или полупроводниками, которые были исследованы ранее в качестве объемных поглотителей СВЧ-излучения [11, 13, 14].

Для адекватного сравнения параметров исследуемого композита на основе АСМ 5/3, структурированного углеродной связкой, в табл. 3 приведены также данные материалов (объемных поглотителей СВЧ-излучения) на основе нитрида алюминия и корундо-титанового материала КТ-30.

Измерение поглощения СВЧ-излучения материалами-поглотителями (четыре материала) было проведено на образцах-дисках такого же размера (диаметром 4,2 мм, высотой 1 мм) в том же цилиндрическом объемном резонаторе панорамного измерителя на моде H_{111} . Частоты измеренных резонансов образцов-поглотителей находятся в диапазоне от 34,00 до 34,17 ГГц и близки к интервалу резонансных частот в образцах композиционного материала на основе АСМ 5/3 (табл. 1).

Из анализа данных табл. 3 следует, что, если поглощение СВЧ-излучения представить в виде удельного поглощения, выраженного в дБ, приходящегося на 1 г массы материала-поглотителя – L , дБ/г, то удельное поглощение композита на основе АСМ 5/3, структурированного углеродной связкой, соответствует уровню лучших материалов – объемных поглотителей СВЧ-излучения. По этой величине композит на основе АСМ 5/3 немного (в 1,15–1,3 раза) уступает только материалу АН-50КК на основе нитрида алюминия и карбида кремния (50 % (по массе)). Например, если сравнивать затухание СВЧ-излучения в образце-диске (диаметром 4,2 мм, высотой 2 мм) композита на основе АСМ 5/3 и в образце-диске такой же массы из материала АН-50КК (диаметром 4,2 мм, высотой 1 мм), то значения затухания СВЧ-излучения будут примерно равными – 12–13 дБ.

Таблица 3. Параметры материалов-поглотителей СВЧ-излучения и уровни затухания СВЧ излучения

Марка материала (химический состав)	Плотность, г/см ³	L _{обр}		Частота измерения, ГГц	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	Удельное электросопротивление R, Ом·см	Удельное поглощение L _{обр} , дБ/г
		дБ	раз				
АН-38М	4,3	13,0	20,0	34,0	74–78	1·10 ¹²	3,0
(AlN, Mo)		14,0	25,0	34,0			3,3
АН-47КК	3,2	10,8	12,0	34,05	40–45	(2–5)·10 ⁶	3,4
(AlN, SiC)		11,2	13,0	34,06			3,5
АН-50КК	3,0	12,0	15,8	34,15	37–41	(6–8)·10 ³	4,0
(AlN, SiC)		13,4	22,0	34,17			4,5
КТ-30	3,6*	13,1	20,3	34,11	5*	(0,6–1,0)·10 ³	3,6
(Al ₂ O ₃ , TiO ₂)		14,2	26,0	34,13			5,0·10 ⁴ *
Композит на основе АСМ 5/3	1,8	6,4	4,4	34,14	1,2	5–9	3,5

*Данные из ТУ на материал КТ-30 [12].

Следует отметить, что в некоторых конструктивных элементах или аппаратуре, где необходимо применять поглотители СВЧ-излучения при небольших уровнях мощности излучения (доли Вт или мВт), низкий коэффициент теплопроводности исследуемого композита на основе АСМ 5/3 ($\lambda = 1,2$ Вт/(м·К)) может оказаться позитивным фактором. Так, деталь или экран, выполненные из такого материала, будут служить своего рода изолятором при передаче тепла от той части конструкции, где находится поглотитель, препятствуя таким образом перегреву остальных элементов. Например, при необходимости ограничить приток тепла от окружающих деталей на плату, где расположен ЧИП или матрица вычислительного устройства, и в то же время защитить ее от воздействия нежелательного внешнего СВЧ-сигнала, можно использовать тонкостенный экран из композиционного материала в виде полого цилиндра или полого параллелепипеда.

При необходимости практически полного подавления нежелательного СВЧ-воздействия на электронное устройство подобные тонкостенные экраны должны иметь на одной из поверхностей – внутренней или внешней – металлизированное покрытие из металла (Cu, Ni, Mo) или металлоида (TiN, TiC) толщиной 9–12 мкм. Такое покрытие наносится методом вакуумного испарения или гальваническим осаждением. Покрытие толщиной 9–12 мкм позволяет увеличить затухание электромагнитного излучения на частотах от 10 до 40 ГГц более чем на порядок (в 20–50 раз), поскольку указанная толщина покрытия в 3–4 раза больше глубины скин-слоя даже для металлоидов (TiN, TiC).

ВЫВОДЫ

Композиционные материалы на основе СТМ, структурированные углеродной связкой, можно использовать в качестве объемных поглотителей СВЧ-излучения.

Результаты экспериментальных исследований влияния электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на композиционный алмазосодержащий материал, структурированный нанокремнеземом, показали перспективность применения таких материалов для защитных покрытий от СВЧ-излучения.

Затухание СВЧ-излучения в диапазоне частот 34,09–34,19 ГГц в образцах композиционного материала на основе микропорошка синтетического алмаза АСМ 5/3, структурированного нанокремнеземной связкой, толщиной 1 мм составляет 5,0–8,5 дБ, при этом уровень обратных потерь равен 8,4–11 дБ. При толщине слоя композита 2 мм затухание равно 12–13 дБ, что соответствует затуханию излучения в объемном поглотителе из композита АН-50КК (AlN, SiC) на основе нитрида алюминия и карбида кремния (50 % (по массе)) толщиной 1 мм.

Удельное объемное электросопротивление образцов алмазосодержащего композита, структурированного нанокремнеземом, равно 5–9 Ом·см.

Достоинством композиционного материала на основе микропорошка алмаза АСМ 5/3, структурированного нанокремнеземной связкой, является возможность получения и изготовления из него деталей больших размеров и сложных форм, поскольку формирование материала происходит при давлении ниже атмосферного.

Авторы выражают благодарность А. А. Бочечке за помощь в разработке композиционных материалов на основе микро- и субмикропорошков СТМ, структурированных нанокремнеземом, Т. А. Прихне и Т. Б. Сербенюк – за предоставленные образцы композитов на основе нитрида алюминия, И. П. Фесенко – за измерение теплопроводности композитов на основе нитрида алюминия.

Затухання НВЧ-випромінювання в зразках композиційного матеріалу на основі мікро-порошку алмазу АСМ 5/3, структурованого нанокремнеземовою зв'язкою під тиском нижче атмосферного, виміряно на частотах 34,09–34,19 ГГц в циліндричному резонаторі на моді H_{111} . За результатами вимірювань було розраховано зворотні втрати. Було виміряно питомий об'ємний електроопір зразків. Показано можливість використання алмазовмістких композиційних структурованих матеріалів як поглиначів НВЧ-випромінювання.

Ключові слова: затухання НВЧ-випромінювання, зворотні втрати, поглинач НВЧ-випромінювання, композит, мікропорошки алмазу, вуглецеві нанотрубки, нанокремнезем.

Microwave attenuation in samples of composite material based on ACM 5/3 diamond micron powder structured by nanocarbon binder at sub-atmospheric pressure was measured at the frequencies of 34,09–34,19 GHz in cylindrical resonator at H_{111} mode. Return loss were determined by the results of measuring. Specific volume electrical resistance of samples was measured as well. The potential for a use of composite structured materials as microwave radiation absorbers is considered.

Keywords: microwave attenuation, return loss, microwave radiation absorber, composite, diamond micron powders, carbon nanotubes, nanocarbon.

1. Петров В. В., Николайчук Г. А., Яковлев С. В., Луцев Л. В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 147–150.
2. Николайчук Г. А., Иванов В., Яковлев С. В. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 1. – С. 92–95.
3. Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. – 2012. – 8, № 6. – С. 70–76.

4. Вовченко Л. Л., Мацуй Л. Ю., Олейник В. В. и др. Резонансный характер взаимодействия многослойных углеродных нанотрубок с излучением миллиметрового диапазона волн // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2011. – 9, № 4. С. 759–769.
5. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Никитин Ю. И., Полторацкий В. Г. Композиционные материалы ультрадисперсные алмазы-пироуглерод // Неорганические материалы. – 1995. – 31, № 4. – С. 470–474.
6. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Полторацкий В. Г., Гордеев С. К. Нитевидные углеродные кристаллы // Сверхтв. материалы. – 1995. – № 2. – С. 40–45.
7. Poltoratskiy V. G., Lavrinenko V. I., Safonova M. N., Petasyuk G. A. A novel composite diamond-containing dispersed material of natural and synthetic diamonds powders and abrasive tools made of it // Diamond Relat. Mater. – 2016. – 68. – P. 66–70.
8. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. – М.: Советское радио, 1957. – 581 с.
9. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Том 1. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
10. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 620 с.
11. Часнык В. И. Поглотители СВЧ энергии на основе нитрида алюминия с высоким уровнем поглощения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 4. – С. 8–12.
12. ТСО.027.029 ТУ. Технические условия на материал КТ-30.
13. Фесенко І. П., Часник В. І., Кузенкова М. О. та ін. Діелектричні властивості композитів на основі AlN в мікрохвильовій області // Сверхтв. материалы. – 2004. – № 1. – С. 16–22.
14. Сербенюк Т. Б., Івженко В. В., Свердун В. Б. та ін. Спінання композиційного матеріалу AlN–SiC // Там же. – 2006. – № 1. – С. 38–46.

Поступила 15.09.16