

УДК 537.874

РАДИОПОГЛОЩАЮЩАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНО- ЕМКОСТНЫХ ПЛЕНОК

Пономаренко В. И.*, Лагунов И. М., Батраков П. А.

Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В.И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
*E-mail: vponom@gmail.com

На основе дифракционно-квазистатического подхода получены частотные зависимости, в диапазоне сверхвысоких частот, эффективного поверхностного сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости для структуры из резистивно-емкостных лент и диэлектрических слоев. Проведена частотная оптимизация коэффициента отражения от исследуемой структуры. Показано преимущество данной структуры, по сравнению со структурой из чисто резистивных пленок, при разработке радиопоглощающих материалов.

Ключевые слова: радиопоглощающие структуры, композиционные материалы, коэффициент отражения.

PACS: 41.20.Jb

ВВЕДЕНИЕ

Поглотители электромагнитных волн широко применяются в технике сверхвысоких частот для радиомаскировки объектов, оборудования безэховых камер и других целей [1, 2]. Одним из традиционно применяемых радиопоглощающих материалов являются резистивные пленки [3]. В частности, резистивная пленка применяется в четвертьволновом слое, ставшем наиболее ранней реализацией радиопоглотителя, экранирующего металлическую поверхность. Более широкополосными, по сравнению с четвертьволновым поглотителем, являются многослойные структуры, состоящие из нескольких резистивных пленок разных номиналов, разделенных диэлектрическими прослойками [4].

Как показано в [5], если помещенную в переменное электрическое поле с циклической частотой ω плоскую резистивную пленку с поверхностным сопротивлением ρ разделить на отдельные ленты, рис. 1, с шириной $2b$, достаточно малой по сравнению с длиной волны, то при направлении поля вдоль оси Y эффективное поверхностное сопротивление (ЭПС) такой структуры становится комплексным $\rho_{\text{eff}} = \rho' + i\rho''$, приобретая емкостную компоненту.

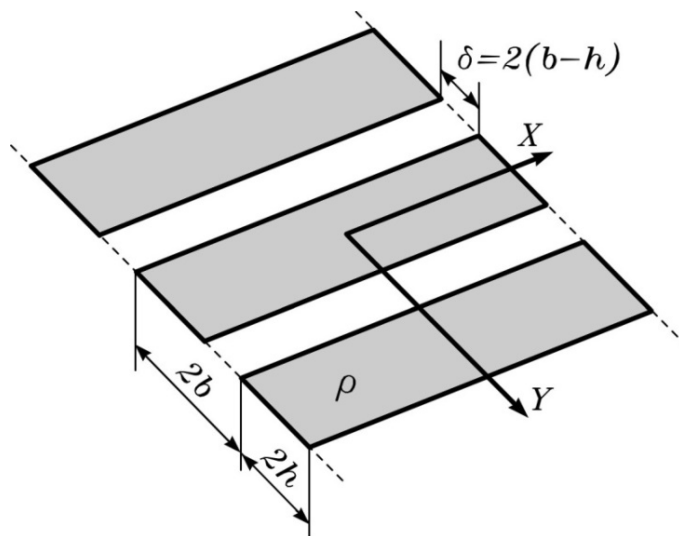


Рис. 1. Плоская решетка из резистивных лент, бесконечная в направлениях X, Y

Возможность варьирования значений ρ' и ρ'' резистивно-емкостной пленки (РЕП), путем изменения параметров ρ , b , h расширяет, по сравнению со сплошной пленкой, обладающей чисто омическим поверхностным сопротивлением, возможность влияния на характеристики искусственных диэлектриков (ИД) и радиопоглощающих структур, содержащих РЕП. Так, в [6–9] показаны преимущества радиопоглощающих структур с наличием емкостной компоненты проводимости, по сравнению со структурами, содержащими резистивную пленку.

Целью настоящей работы является моделирование на основе электродинамических расчетов многослойных структур, содержащих резистивно-емкостные пленки.

1. ИСКУССТВЕННЫЙ ДИЭЛЕКТРИК

Исследуемая структура, изображенная на рис. 2, периодическая с периодом $2b$ по оси Y и бесконечная по оси X, состоит из N решеток резистивных лент одинаковой ширины, $h_1 = h_2 = \dots = h_{N+1} = h$ с поверхностными сопротивлениями $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_N = \rho$, и $N+1$ диэлектрических слоев с толщинами

$$d_1 = d_{N+1} = d/2N, \quad d_n = \frac{d}{N}, \quad n = 2, \dots, N, \quad (1)$$

где d – общая толщина структуры. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрических слоев одинакова и равна ϵ . Относительная эффективная диэлектрическая проницаемость (ЭДП) структуры ϵ_{eff} вводится аналогично [10]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{(R_1 - 1)(R_2 - 1)}{(R_1 + 1)(R_2 + 1)}, \quad (2)$$

где $R_{1,2}$ – комплексные коэффициенты отражения по амплитуде поляризованной вдоль оси Y электромагнитной волны, нормально падающей на структуру рис. 1, расположенную на металлическом зеркале (R_1) и на магнитном зеркале (R_2).

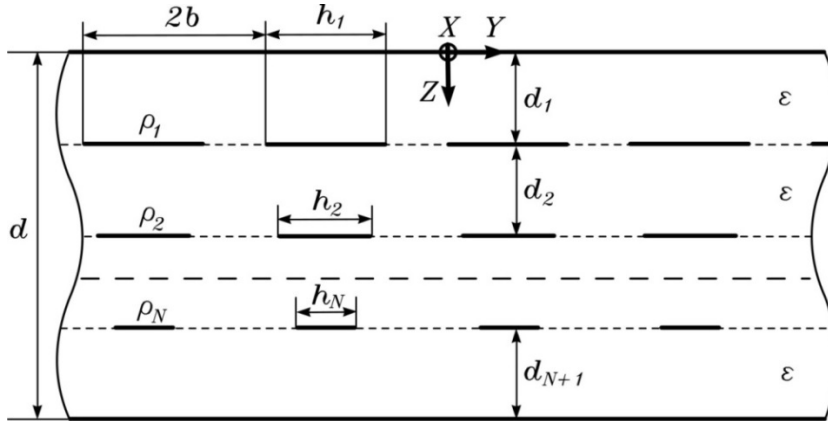


Рис. 2. Структура из резистивно-емкостных решеток и диэлектрических слоев

Значения коэффициента отражения (КО) вычислялись матричным методом [11], при этом каждая резистивно-емкостная пленка рассматривалась как слой предельно малой толщины $\tau \ll \{d_n\}$ с абсолютной диэлектрической проницаемостью, равной $i(\omega\tau\rho)^{-1}$ [12]. ЭПС резистивно-емкостной пленки, изображенной на рис. 1, вычислялось по формулам [5]:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho \left[1 + \frac{\pi}{Ab \left(2K + \ln \frac{2}{\alpha} \right)} \right], \quad (3)$$

$$A = -2i\omega\epsilon_0\epsilon\rho, \quad K = -\frac{\pi}{6}Ab, \quad \alpha = 1 + \cos(\pi h/b), \quad (4)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

На рис. 3, 4 приведены зависимости от длины волны вещественной и мнимой частей эффективного поверхностного сопротивления резистивно-емкостной пленки при $\rho = 100$ Ом, $b = 5$ мм, $\epsilon = 4$ и различных величинах зазора δ между лентами.

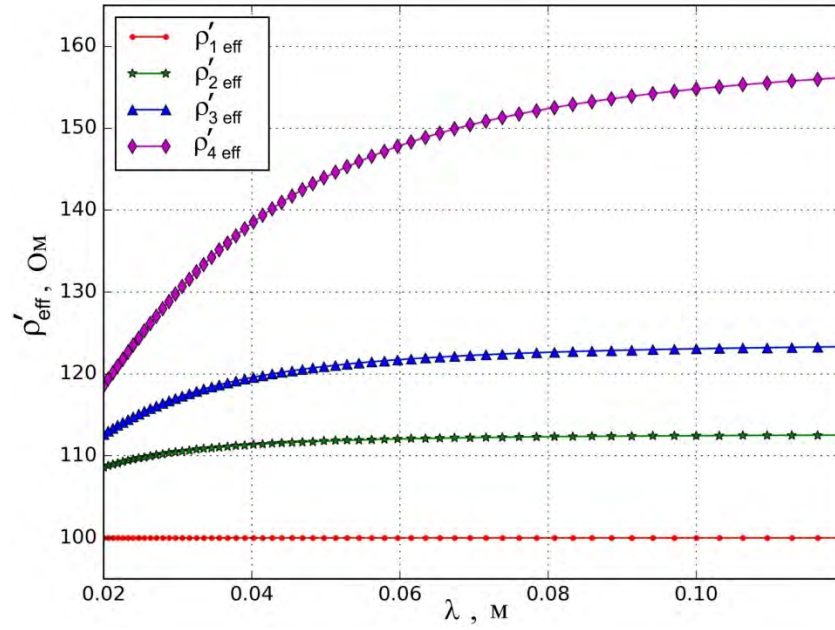


Рис. 3. Зависимость ρ'_{eff} от длины волны при различных величинах зазора между лентами: $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0,5$ мм, $\delta_3 = 1$ мм, $\delta_4 = 2$ мм

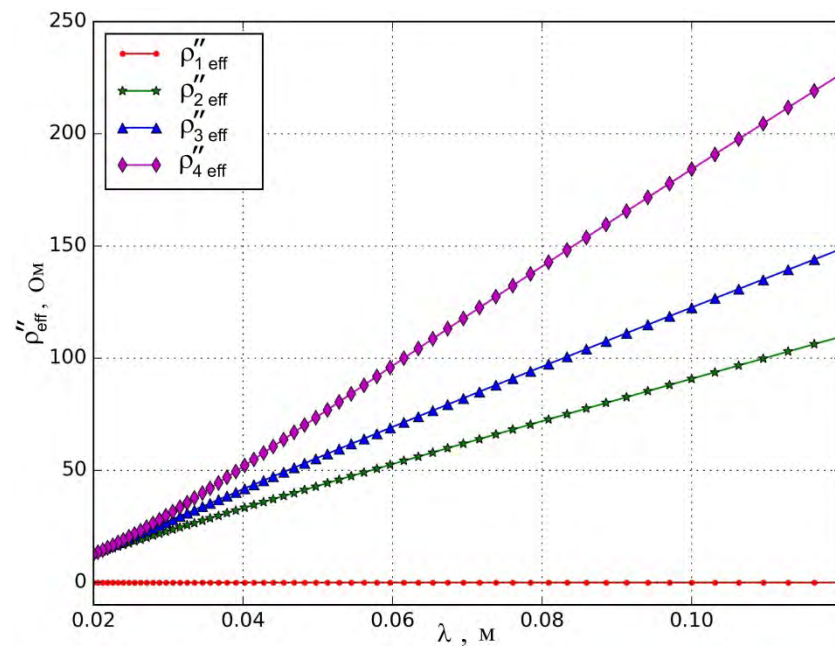


Рис. 4. Зависимость ρ''_{eff} от длины волны при различных величинах зазора между лентами: $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0,5$ мм, $\delta_3 = 1$ мм, $\delta_4 = 2$ мм

Из рисунков видно, что с увеличением зазора возрастает как ρ'_{eff} , так и ρ''_{eff} (от минимальных значений $\rho'_{\text{eff}} = 100 \text{ Ом}$ и $\rho''_{\text{eff}} = 0$ при $\delta = 0$), причем обе компоненты ρ_{eff} возрастают с увеличением длины волны.

На рис. 5, 6 приведены зависимости от длины волны вещественной и мнимой частей ЭДП при $N = 5$, $\rho_i = 100 \text{ Ом}$, $i = 1, 2, \dots, N$, $\epsilon = 4$, $d = 1,5 \text{ см}$, $b = 0,5 \text{ см}$ и различных зазорах между лентами. Из рисунков видно, что, меняя ширину зазора, можно варьировать ρ_{eff} в широких пределах.

С целью проверки адекватности описания ИД с такими параметрами эффективной диэлектрической проницаемостью (процедура гомогенизации) были проведены расчеты КО по амплитуде $R = R' + iR''$ с использованием ЭДП при расположении структуры на бесконечном слое диэлектрика с проницаемостью $\epsilon = 4$, а также структуры двойной толщины с $N = 10$, расположенной на металлическом зеркале. Сравнение полученных значений КО со значениями, вычисленными из решения задачи отражения от многослойной структуры, показало их совпадение с графической точностью. В то же время, при уменьшении числа N точность гомогенизации уменьшается.

На рис. 7 приведены для структуры толщиной $d = 3 \text{ см}$ с $N = 6$ значения R_1 комплексного коэффициента отражения, вычисленные из решения задачи отражения от многослойной структуры, и значения R_2 коэффициента отражения, вычисленные по значениям ϵ_{eff} , причем последние вычислялись из решения задачи отражения при $d = 1,5 \text{ см}$ с $N = 3$.

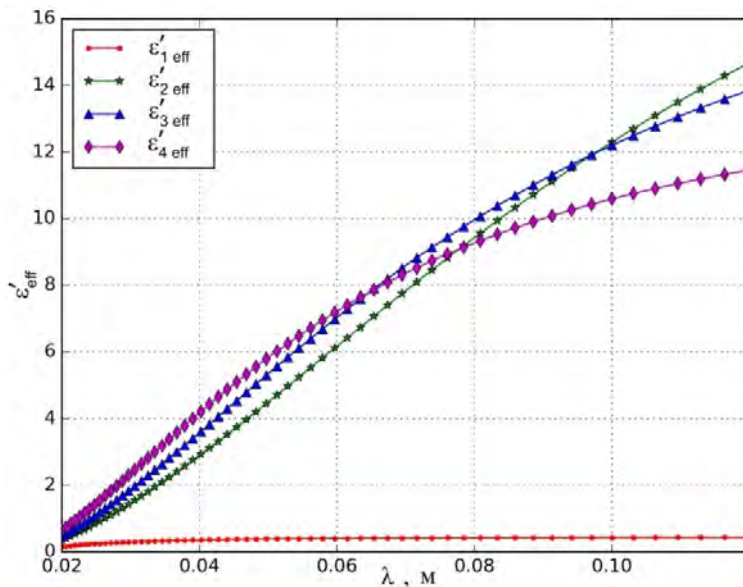


Рис. 5. Зависимость ϵ'_{eff} от длины волны при различных величинах зазора между лентами: $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0,5 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1 \text{ мм}$, $\delta_4 = 2 \text{ мм}$

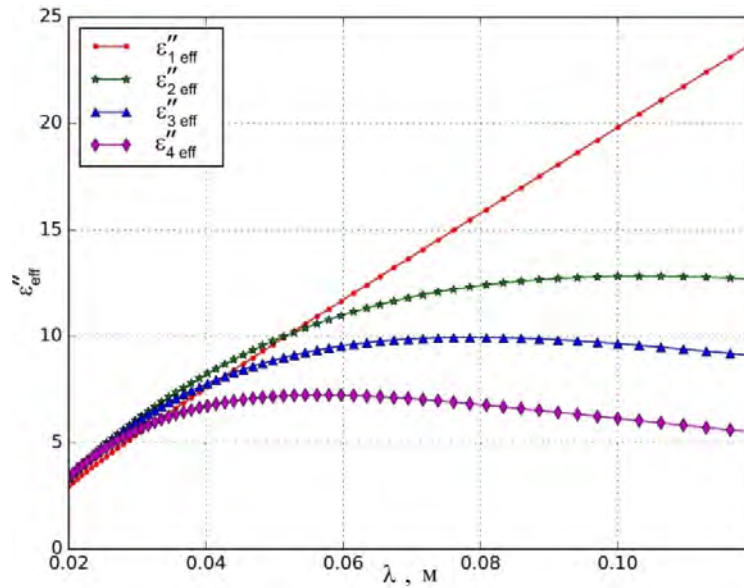


Рис. 6. Зависимость $\varepsilon''_{\text{eff}}$ от длины волны при различных величинах зазора между лентами: $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0,5$ мм, $\delta_3 = 1$ мм, $\delta_4 = 2$ мм

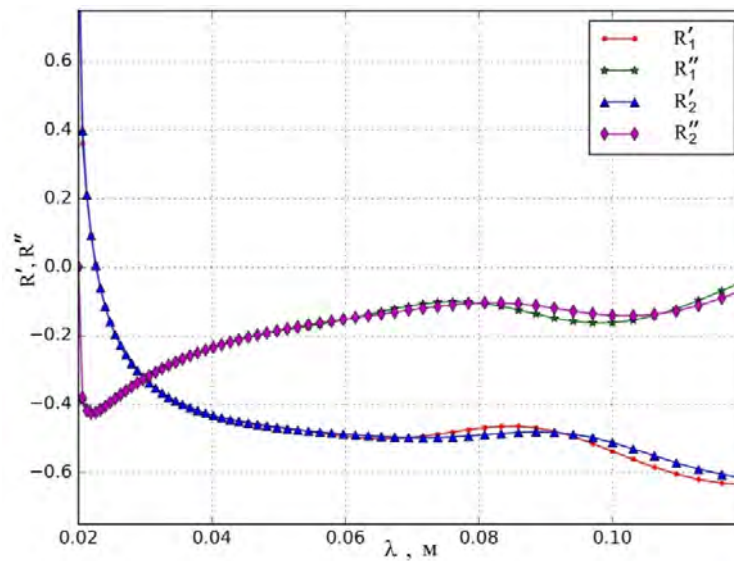


Рис. 7. Зависимость компонент КО от структуры, расположенной на магнитном зеркале, R_1 и R_2 от длины волны, при различном количестве резистивно-емкостных решеток, $N = 6$, $d = 3$ см, $\rho = 100$ Ом, $\delta = 1$ мм, $b = 0,5$ см, $\varepsilon = 4$: R_1 – вычисленные по отражению от структуры; R_2 – вычисленные от слоя толщиной $d = 3$ см с эффективной проницаемостью, найденной для структуры с $d = 1,5$ см, $N = 3$

Из рисунка видно, что величины R_1 и R_2 заметно отличаются, что указывает на снижение точности гомогенизации с уменьшением числа периодов структуры.

2. РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

На рис. 8 приведены зависимости от длины волны коэффициента отражения по мощности R_M от структуры рис. 2, расположенной на металлическом зеркале, при $b = 5$ мм, толщине структуры $d = 1$ см с $N = 3$ и толщине $d = 1,5$ см с $N = 4$.

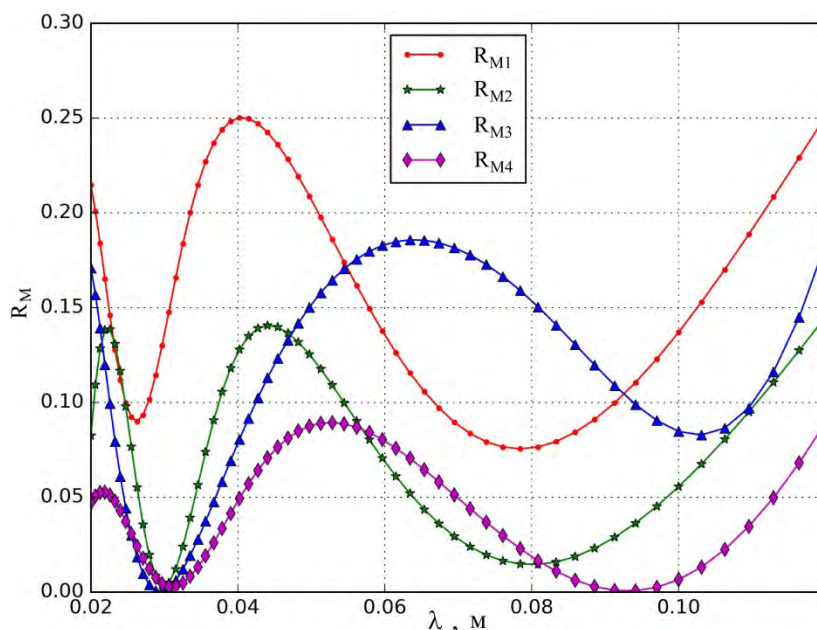


Рис. 8. Зависимости R_M от длины волны при различном количестве резистивно-емкостных решеток для оптимизированных структур, расположенных на металлическом зеркале: R_{M1} – $d = 1$ см, $\delta = 0$, $N = 3$, $\epsilon = 4,9$, $\rho_1 = 380$ Ом, $\rho_2 = 300$ Ом, $\rho_3 = 96$ Ом; R_{M2} – $d = 1,5$ см, $\delta = 0$, $N = 4$, $\epsilon = 2,3$, $\rho_1 = 773$ Ом, $\rho_2 = 552$ Ом, $\rho_3 = 449$ Ом, $\rho_4 = 481$ Ом; R_{M3} – $b = 0,5$ см, $d = 1$ см, $\delta = 1$ мм, $N = 3$, $\epsilon = 1,7$, $\rho_1 = 36$ Ом, $\rho_2 = 31$ Ом, $\rho_3 = 36$ Ом; R_{M4} – $b = 0,5$ см, $d = 1,5$ см, $\delta = 1$ мм, $N = 4$, $\epsilon = 2,1$, $\rho_1 = 1149$ Ом, $\rho_2 = 372$ Ом, $\rho_3 = 229$ Ом, $\rho_4 = 172$ Ом

Рассматривалось нормальное падение электромагнитной волны на структуру. Расчеты проводились как для сплошных пленок ($\delta = 0$), так и для резистивно-емкостных пленок ($\delta = 1$ мм). Диэлектрическая проницаемость ϵ и значения величин ρ_i , $i = 1, 2, \dots, N$, приведенные в подписи к рисунку, вычислялись из решения методом координатного спуска [13] задачи оптимизации, при этом минимизировался критерий $R_{M \max}$ – максимальное в волновом диапазоне значение R_M . С целью нахождения глобального минимума $R_{M \max}$, выбирались различные начальные значения параметров ρ_i , ϵ .

Из рисунков видно, что структуры с резистивно-емкостной пленкой обеспечивают намного лучший критерий оптимальности как при толщине $d = 1$ см, так и при толщине $d = 1,5$ см. Так, структура толщиной $d = 1,5$ см с $\delta = 1$ мм, $b = 5$ мм обеспечивает $R_{M \max} = 8,9\%$, тогда как структура такой же толщины со сплошными пленками ($\delta = 0$) имеет $R_{M \max} = 14,5\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе решения задачи отражения электромагнитной волны от многослойной структуры, состоящей из чередующихся слоев диэлектрика и резистивно-емкостных пленок, составленных из разделенных зазорами резистивных лент, расположенной на идеально отражающей поверхности, вычислена эффективная диэлектрическая проницаемость искусственного диэлектрика на основе резистивно-емкостных пленок. В отличие от предложенного в [10] дифракционного подхода к гомогенизации искусственного диэлектрика, примененный в настоящей работе подход можно охарактеризовать как дифракционно-квазистатический, поскольку эффективное поверхностное сопротивление резистивно-емкостных пленок вычислялось в квазистатическом приближении на основе известного решения соответствующей задачи. Показана адекватность процедуры гомогенизации при достаточно большом количестве слоев и малости характерных размеров структуры по сравнению с длиной волны. Показано, что рассмотренный искусственный диэлектрик имеет характер дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости, благоприятный для его применения в радиопоглощающих покрытиях.

Решена задача оптимизации частотной зависимости коэффициента отражения нормально падающей электромагнитной волны от радиопоглощающей структуры на основе резистивно-емкостных пленок, расположенной на металлическом зеркале. Падающая волна поляризована поперек резистивных лент. Показано существенное преимущество такой структуры по сравнению с аналогичной структурой на основе чисто резистивных пленок. Рассмотренная структура является поляризационно-зависимой. Однако ввиду малости зазоров между лентами следует ожидать, что коэффициент отражения от такой структуры достаточно близок к коэффициенту отражения поляризационно-независимой структуры на основе резистивных квадратов, разделенных малыми зазорами, поскольку зазоры, параллельные электрическому вектору, не размыкают текущие по пленкам электрические токи.

Список литературы

1. Алимин Б. Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 2. С. 75–82.
2. Chung В.-К., Chuah Н.-Т. Modeling of RF absorber for application in the design of anechoic chamber // PIER. 2003. Vol. 43. P. 273–285.
3. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике СВЧ. М.: Госэнергоиздат. 1962. 112 с.
4. Латышева А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник Воронежского государственного университета. Воронеж: Изд. Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 70–76.

5. Пономаренко В. И. Проводящая ленточная решетка в квазистатическом поле // Изв. вузов. Электромеханика. 1982. № 5. С. 518–523.
6. Пономаренко В. И., Журавлев С. И. Неотражающая структура на основе плоской решетки из полупроводящих лент // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 5. С. 812–818.
7. Пономаренко В. И., Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф. Расчет коэффициента отражения электромагнитных волн шахтной структурой из проводящих полос // Радиотехника. 1984. Т. 39. № 11. С. 68–71.
8. Ponomarenko V. I., Lagunov I. M. A Radar Absorbing Structure on the Basis of Conducting Grids // Journal of Communications Technology and Electronics, 2017. Vol. 62, No. 7. P. 765–769.
9. Пономаренко В. И., Попов В. В., Лагунов И. М. Радиопоглощающая структура на основе микропроводов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 4. С. 74–79.
10. Пономаренко В. И., Лагунов И. М. Дифракционный расчет эффективной диэлектрической проницаемости радиопоглощающих решеток на основе графитированных волокон // Композиционные материалы: разработка и применение: монография; [под ред. М. Ю. Звездиной]. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». 2017. С. 112–133.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Мир. 1970. 664 с.
12. Пономаренко В. И., Куприянов И. К., Журавлев С. И. Неотражающая структура на основе резистивной пленки с малой емкостной компонентой проводимости // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 2. С. 346–349.
13. Жиглявский А. А., Жилинскас А. Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука. 1991. 248 с.

A RADAR ABSORBING STRUCTURE ON THE BASIS OF RESISTANT-CAPACITIVE FILMS

*Ponomarenko V. I.**, *Lagunov I. M.*, *Batratkov P. A.*

Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

**E-mail: vponom@gmail.com*

On the basis of the diffraction-quasistatic approach, was obtained frequency dependences, in the ultrahigh frequency range, effective surface resistance and effective dielectric constant for a structure of resistive-capacitive tapes and dielectric layers. Was made frequency optimization of the reflection coefficient from the structure. The advantage of this structure made, in comparison with the structure of purely resistive films, in the development of radio absorbing materials.

Keywords: radio-absorbing structures, composite materials, reflection coefficient.

References

1. B. F. Alimin, *Zarubezhnaya radioelektronika*, No. 2, 75–82 (1989) [in Russian].
2. B.-K. Chung, H.-T. Chuah, *PIER* **43**, 273–285 (2003).
3. V. V. Slutskaya, *Tonkie plenki v tekhnike SVCH [Thin films in microwave technology]* (Gosenergoizdat, Moscow, 1962) [in Russian].
4. A. F. Latysheva, YU. E. Kalinin, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* **8**, No. 6, 70–76 (2012) [in Russian].
5. V. I. Ponomarenko, *Izv. Vuzov (Ehlektrimekhanika)*, No. 5, 518–523 (1982) [in Russian].
6. V. I. Ponomarenko, S. I. Zhuravlev, *Radiotekhnika i ehlektronika* **37**, No. 5, 812–818 (1992) [in Russian].
7. V. I. Ponomarenko, D. I. Mirovitskij, I. F. Budagyan, *Radiotekhnika* **39**, No. 11, 68–71 (1984) [in Russian].

8. V. I. Ponomarenko, I. M. Lagunov, *Journal of Communications Technology and Electronics* **62**, No. 7, 765–769 (2017).
9. V. I. Ponomarenko, V. V. Popov, I. M. Lagunov, *Ehlektromagnitnye volny i ehlektronnye sistemy* **21**, No 4, 74–79 (2016) [in Russian].
10. M. Yu. Zvezdina, L. V. CHerkesova, Yu. A. SHokova, G. P. Sinyavskij, D. A. Bezuglov, G. N. SHalamov, V. I. Ponomarenko, I. M. Lagunov, S. V. Sokolova, M. I. Matveev, *Kompozitsionnye materialy: razrabotka i primeneniye* [Composite Materials: Development and application] (Izd. ANS «SibAK», Novosibirsk, 2017) [in Russian].
11. M. Born, EH. Volf, *Osnovy optiki* [Principles of Optics] (Mir, Moscow, 1970) [in Russian].
12. V. I. Ponomarenko, I. K. Kupriyanov, S. I. Zhuravlev, *Radiotekhnika i ehlektronika* **37**, No. 2, 346–349 (1992) [in Russian].
13. A. A. Zhiglyavskij, A. G. Zhilinskas, *Metody poiska global'nogo ehkstreumuma* [Methods of search global extremum] (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].

*Поступила в редакцию 11.10.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received October 11, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*