

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ  
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 621.396.96:537.874

СЛОИСТЫЙ РАДИОПОГЛОТИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ  
ДВУПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕТОК ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ КВАДРАТОВ

© 2013 г. Ю. Н. Казанцев<sup>1</sup>, В. А. Бабаян<sup>2</sup>, Н. Е. Казанцева<sup>1</sup>, О. А. Дьяконова<sup>1</sup>,  
Р. Моучка<sup>2</sup>, Я. Вилчакова<sup>2</sup>, П. Сага<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

Российская Федерация, 141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

<sup>2</sup>Университет Томаша Бати,

Чешская Республика, 76272, Злин, пл. Т.Г. Масарика, 275

E-mail: doa52@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2012 г.

Рассмотрен слоистый радиопоглощающий композиционный материал на основе двупериодических решеток из резистивных квадратов. Методами теории электрических цепей и длинных линий получены выражения для оценки эффективной диэлектрической проницаемости такого композита. Показано, что частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости реализованного композита близка к релаксационной. Исследованы отражательные характеристики радиопоглопителя на основе композита с двупериодическими решетками из резистивных квадратов. Установлено, что в таком радиопоглопителе отношение разности крайних длин волн его рабочего диапазона по уровню отражения минус 10 дБ находится в интервале 4.2...4.5.

DOI: 10.7868/S003384941303008X

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одним из способов расширения рабочей полосы частот радиопоглопителей (РП) является применение композитов с частотной дисперсией магнитной  $\mu$  и диэлектрической  $\epsilon$  проницаемостей [1–9]. На практике применение магнитных композитов для РП часто ограничено их значительным весом, и поэтому исследование немагнитных композитов различного типа с частотной дисперсией  $\epsilon$  представляется достаточно важной задачей. В работах [8, 9] теоретически рассмотрен эффект расширения рабочей полосы частот РП на основе материалов с релаксационным и резонансным законами частотной дисперсии  $\epsilon$ . Такой тип дисперсии  $\epsilon$  можно реализовать в композитах, наполненных углеродными волокнами определенной длины и электропроводности [7]. Одной из технологических трудностей создания композитов с углеродными волокнами является ломкость волокон, что приводит к “размыванию” области дисперсии. Такая трудность не возникает при синтезе композитов на основе периодических решеток из резистивных элементов. Решетки  $RC$ - и  $RLC$ -типов применяются в РП называемых “Circuit Analog Absorber” (CAA) [10, 11]. В CAA две–три решетки определенной конфигурации и местоположения обеспечивают рабочую полосу малого отражения, близкую к П-

образной. В работе [12] показана возможность повышения угловой устойчивости CAA и, следовательно, уменьшения его существенного недостатка.

В данной работе предложен и реализован слоистый РП на основе композита из одинаковых двупериодических решеток с резистивными элементами квадратной формы. Характер частотной дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости такого композита близок к релаксационному, что обеспечивает определенное расширение рабочего диапазона РП по сравнению со случаем без релаксации  $\epsilon$ .

1. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
РЕШЕТКИ ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
И ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

На рис. 1а и 1б представлены двупериодическая решетка из квадратных резистивных элементов и соответствующая ей эквивалентная схема. В эквивалентной схеме  $r$  – сопротивление квадратного элемента,  $C$  – емкость между двумя соседними элементами,  $Z = r - j/\omega C$ , где  $\omega$  – круговая частота,  $W$  – волновое сопротивление среды, в которой находится решетка. При этом предполагается,

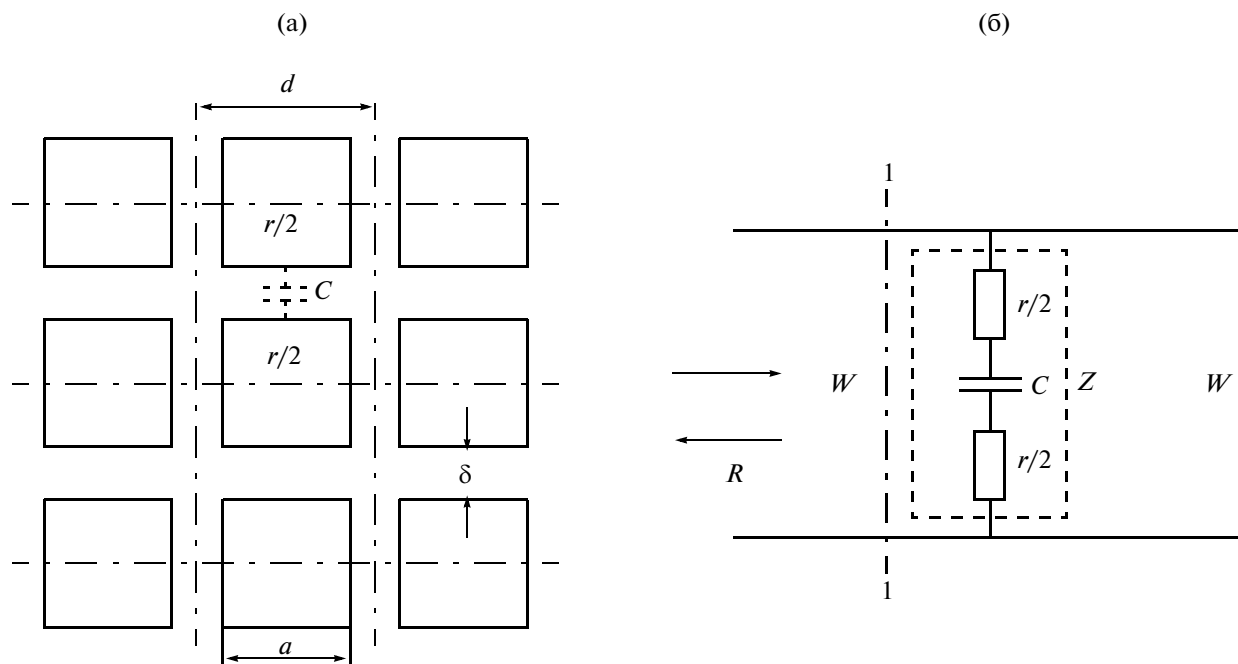


Рис. 1. Решетка из резистивных квадратов: а – геометрия решетки, б – эквивалентная схема.

что размеры структуры малы по сравнению с длиной волны, а индуктивностью элемента можно пренебречь. Входной импеданс  $Z_{вх}$  и коэффициент отражения  $R$  в сечении 1–1 соответственно равны

$$Z_{вх} = \frac{WZ}{W + Z}, \tag{1}$$

$$R = \frac{Z_{вх} - W}{Z_{вх} + W}. \tag{2}$$

Подставив в формулу (2) выражение (1) для  $Z_{вх}$ , получим

$$R = -\frac{1}{\left(2\frac{r}{W} + 1\right) - \frac{2j}{W\omega C}}. \tag{3}$$

Если заменить решетку толщиной  $l_1$  слоем однородного диэлектрика такой же толщины с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1 = \epsilon_1' - j\epsilon_1''$ , то коэффициент отражения от этого слоя, вычисленный методом длинных линий, определяется следующей формулой:

$$R = -\frac{1}{1 + \frac{2c}{\omega l_1} \frac{\epsilon_1''}{(\epsilon_1')^2 + (\epsilon_1'')^2} - j \frac{2c}{\omega l_1} \frac{\epsilon_1'}{(\epsilon_1')^2 + (\epsilon_1'')^2}}, \tag{4}$$

где  $c$  – скорость света.

Приравняв выражения для коэффициента отражения (3) и (4), найдем из полученного уравне-

ния эффективную диэлектрическую проницаемость решетки:

$$\epsilon_1' = WC \frac{c}{l_1} \frac{1}{1 + (r\omega C)^2}, \tag{5}$$

$$\epsilon_1'' = WC \frac{c}{l_1} \frac{r\omega C}{1 + (r\omega C)^2}. \tag{6}$$

Введя обозначения

$$A = WC \frac{c}{l_1} \text{ и } X = r\omega C, \tag{7}$$

формулы (5) и (6) можно записать в следующем виде:

$$\epsilon_1' = A \frac{1}{1 + X^2}, \tag{8}$$

$$\epsilon_1'' = A \frac{X}{1 + X^2}. \tag{9}$$

На рис. 2 приведены графики функций  $\epsilon_1'/A$  (кривая 1) и  $\epsilon_1''/A$  (кривая 2), являющиеся типичными релаксационными кривыми, где максимум зависимости  $\epsilon_1''/A$  совпадает с точкой максимальной кривизны  $\epsilon_1'/A$ .

На практике решетка из резистивных элементов располагается на подложке – диэлектрической пленке толщиной  $l_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ . В этом случае эффективная диэлектри-

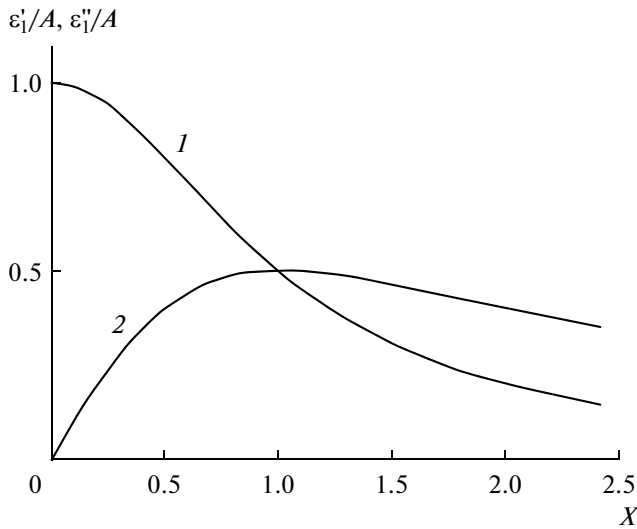


Рис. 2. Нормированные частотные зависимости действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей эффективной диэлектрической проницаемости решетки из резистивных квадратов.

ческая проницаемость решетки на подложке с  $\epsilon_e$  определяется формулами усреднения:

$$\begin{aligned}\epsilon_e' &= \frac{\epsilon_1' l_1 + \epsilon_2' l_2}{l_1 + l_2}, \\ \epsilon_e'' &= \frac{\epsilon_1'' l_1}{l_1 + l_2}.\end{aligned}\quad (10)$$

Очевидно, что если диэлектрическая проницаемость подложки не зависит от частоты, то максимум  $\epsilon_e''$  совпадает с максимумом  $\epsilon_1''$ , а точка максимальной кривизны  $\epsilon_e'$  — с аналогичной точкой  $\epsilon_1'$ .

## 2. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Композит на основе решеток из резистивных элементов представляет собой многослойную структуру из чередующихся решеток и слоев диэлектрика. Комплексную диэлектрическую проницаемость композита легко вычислить по известным формулам, приведенным, например, в монографии [13]. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости композита определяется как характеристиками самих решеток, так и диэлектрических слоев между решетками. Очевидно, что чем больше промежутки между решетками и больше их диэлектрическая проницаемость, тем меньше относительная величина дисперсии диэлектрической проницаемости композита. Эффективная диэлектрическая проницаемость решетки определяется, как следует из формулы (7),

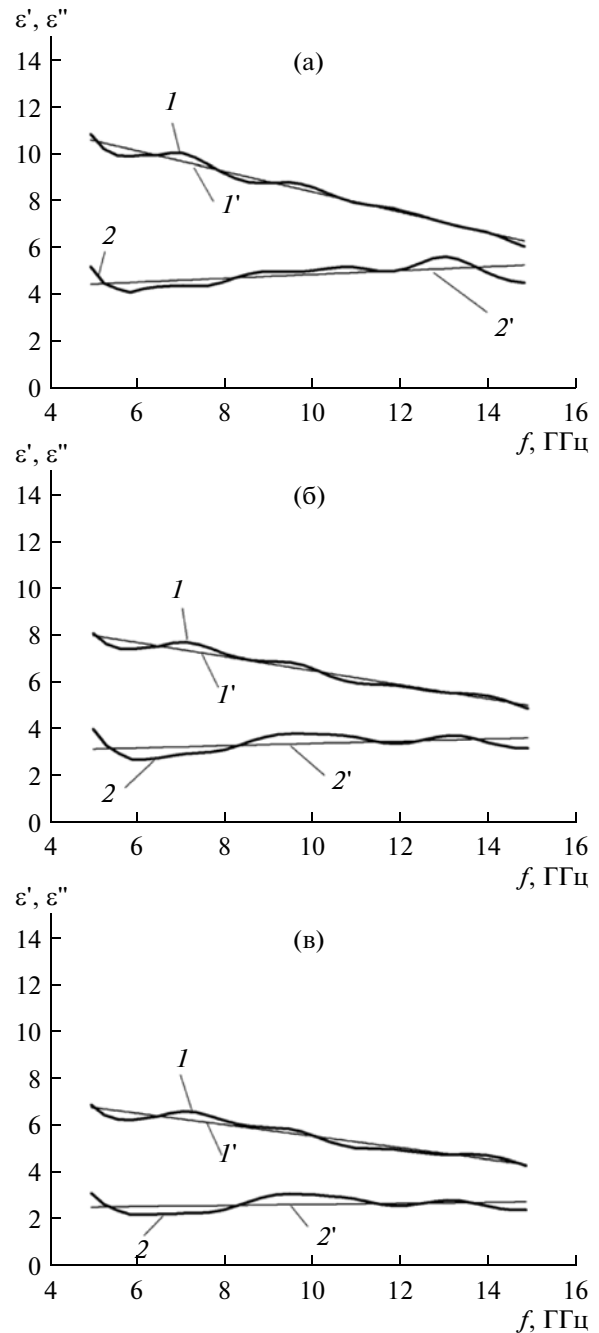


Рис. 3. Измеренные частотные зависимости эффективных комплексных диэлектрических проницаемостей решеток для вариантов 1 (а); 2 (б); 3 (в) соответственно. Кривая 1 — реальная часть диэлектрической проницаемости, прямая 1' — ее линейная аппроксимация; кривая 2 — мнимая часть диэлектрической проницаемости, прямая 2' — ее линейная аппроксимация.

емкостью  $C$  между элементами решетки, что естественно — чем “плотнее” решетка, тем больше  $\epsilon$ . В то же время частотная область максимальной дисперсии  $\epsilon$  зависит от отношения омического сопротивления элементов решетки к емкостному сопротивлению между этими элементами. При

Результаты расчета по измеренным частотным зависимостям эффективной диэлектрической проницаемости решеток из резистивных квадратов

Вариант решетки	$f$ , ГГц	$\varepsilon_e'$	$\varepsilon_e''$	$\varepsilon_e'/\varepsilon_e''$	$\varepsilon_1'$	$\varepsilon_1''$	$\frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1''} = \frac{1}{X}$	$f_p$ , ГГц	$C$ , пФ	$A$
1	10	8.5	5.0	1.7	16.5	11.7	1.41	14.1	0.028	21.1
	15	6.3	5.4	1.17	11.4	12.6	0.90	13.5	0.029	21.9
2	10	6.5	3.5	1.85	17.2	12.8	1.34	13.4	0.030	22.6
	15	5.0	3.7	1.35	11.7	13.6	0.86	12.9	0.031	23.4
3	10	5.5	2.7	2.03	17.5	13.5	1.3	13.0	0.031	23.4
	15	4.4	2.8	1.57	12.0	14.0	0.87	13.1	0.031	23.4

использовании композита в качестве РП его рабочий диапазон частот рекомендуется выбирать вблизи частоты релаксации  $f_p = 1/(2\pi cr)$ , где величина  $r$  определяется удельной проводимостью и толщиной квадратного элемента, а емкость  $C$  — еще и расстоянием между элементами. При синтезе решетки емкость  $C$  можно приближенно оценить при помощи формулы для решетки из проводящих полос в свободном пространстве, полученной из выражений для коэффициентов отражения и прохождение, приведенных в монографии [14]:

$$C \approx \frac{a}{2\pi^2} \ln \frac{2d}{\pi\delta} [\text{пФ}], \quad (11)$$

где размеры  $a$  [см],  $d$  и  $\delta$  указаны на рис. 1а.

### 3. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕТОК ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ КВАДРАТОВ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

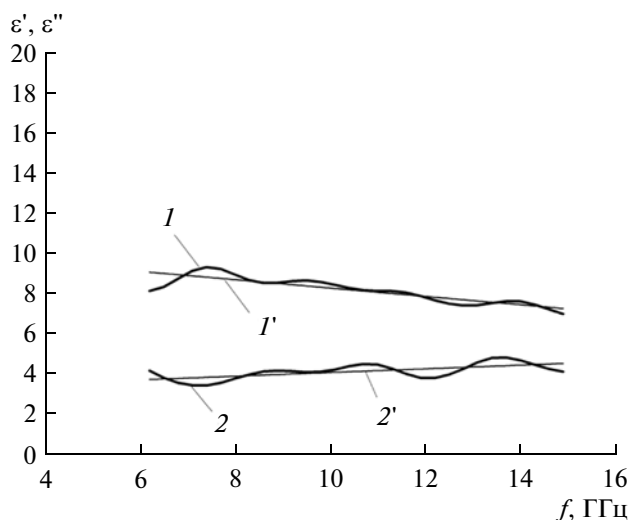
Для изготовления решеток была использована углеродосодержащая бумага с объемной проводимостью 20 См. При толщине квадратного элемента 0.12 мм его сопротивление  $r$  составляло около 400 Ом на квадрат. Задав частоту релаксации  $f_p = 15$  ГГц, получим требуемую величину емкости  $C = 0.027$  пФ. При выбранных периоде решетки  $d = 7$  мм и размере квадрата  $a = 5$  мм согласно оценке по формуле (11) без учета диэлектрика подложек получим меньшее значение емкости (0.02 пФ).

Были изготовлены три варианта решеток (1, 2 и 3), различавшихся толщиной подложек (0.2 мм, 0.4 мм и 0.6 мм соответственно), и измерены их эффективные диэлектрические проницаемости. На рис. 3а–3в приведены частотные зависимости  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  этих решеток и их линейная аппроксимация.

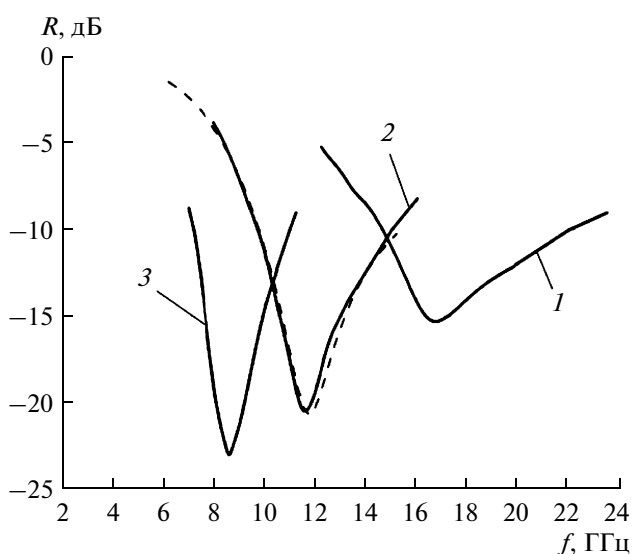
По этим зависимостям при помощи формулы (10) несложно построить для  $\varepsilon_2' = 2.5$  частотные зависимости собственной эффективной диэлектрической проницаемости решеток (без подложек) и по ним определить частоту релаксации и емкость между элементами решетки. В таблице представлены результаты этих расчетов на двух частотах для каждого из вариантов. Значения частоты релаксации  $f_p$  и емкости  $C$ , приведенные в таблице, не противоречат результатам предварительных оценок ( $f_p = 15$  ГГц и  $C = 0.027$  пФ).

### 4. РЕАЛИЗАЦИЯ РП И ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Радиопоглощающий композиционный материал изготовлен из стопки четырех двупериодических решеток с резистивными элементами квадратной формы, выполненных по вариантам 1, 2, и 3. Решетки склеены диэлектрическим связующим материалом и расположены друг под другом. Клей между решетками увеличивает общую толщину образцов: 1.5 мм, 2.4 мм и 3.4 мм для решеток по вариантам 1, 2, и 3 соответственно. При измерении частотных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости этих образцов выявлено следующее. Как и следовало ожидать, измеренные частотные зависимости  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  расположены выше аналогичных для одиночных решеток. Указанный факт обусловлен тем, что емкости между соседними элементами решеток в образце из четырех решеток больше, чем в одиночной решетке. Поэтому амплитуда  $A$  в выражениях для эффективной диэлектрической проницаемости решеток в образце также больше. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты измерения  $\varepsilon'$



**Рис. 4.** Измеренные частотные зависимости эффективных комплексных диэлектрических проницаемостей образца композита из четырех решеток по варианту 2. Кривая 1 – реальная часть диэлектрической проницаемости, прямая 1' – ее линейная аппроксимация; кривая 2 – мнимая часть диэлектрической проницаемости, прямая 2' – ее линейная аппроксимация.



**Рис. 5.** Частотная зависимость коэффициента отражения от образцов РП, кривые 1, 2 и 3 – для образцов по вариантам 1, 2 и 3 соответственно.

(кривая 1),  $\varepsilon''$  (кривая 2) и их линейная аппроксимация (прямые 1' и 2' соответственно) для образца из четырех решеток по варианту 2.

Радиопоглотители на основе описанных выше многослойных композитов были реализованы путем металлизации их задних поверхностей. На рис. 5 приведены измеренные частотные зависимости коэффициента отражения от образцов РП на основе решеток по вариантам 1, 2 и 3. На этом же рисунке представлена штриховая расчетная

кривая для образца с решетками по варианту 2, соответствующая частотной зависимости  $\varepsilon$  на рис. 4. Эффективность РП принято оценивать по величине отношения разности  $\Delta\lambda$  крайних длин волн рабочего диапазона (обычно по уровню отражения минус 10 дБ) к толщине РП  $d$  ( $\Delta\lambda/d$ ). Эта величина для всех образцов находится в пределах 4.2...4.5. Заметим, что в случае однородного материала без дисперсии  $\varepsilon$  это отношение может составлять только 3.3 в случае идеального согласования со свободным пространством на центральной частоте рабочего диапазона РП.

## 5. ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Комплексная диэлектрическая проницаемость отдельных решеток и образцов композита из нескольких решеток измерялась в условиях свободного пространства на двухрупорной установке в комплекте с векторным анализатором цепей Agilent N5230A. Частотные зависимости коэффициента отражения от образцов РП измерялись рупорным методом в комплекте со скалярными анализаторами цепей серии P-2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами теории электрических цепей и длинных линий получены выражения для оценки эффективной диэлектрической проницаемости слоистого композита на основе дупериодических решеток из резистивных квадратов. Измерена частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости для такого композита и показано, что характер этой зависимости близок к релаксационному. Получены частотные зависимости коэффициента отражения от трех вариантов РП, различающихся диэлектрическими промежутками между решетками. Показано, что отношения  $\Delta\lambda/d$  по уровню отражения минус 10 дБ для этих РП находятся в интервале 4.2...4.5, в то время как аналогичное отношение  $\Delta\lambda/d$  для РП, согласованного на средней частоте, но без частотной дисперсии диэлектрической проницаемости составляет 3.3.

Работа поддержана средствами Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 10-02-00053-а, 10-08-00018-а, 11-02-90403), а также средствами проекта CZ.1.05/2.1.00/03.0111 центра полимерных исследований (Чешская республика) в рамках совместной программы Бюджета Чешской республики и Европейского регионального фонда развития (ERDF).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schloemann E. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 209. № 1–3. P. 15.

2. *Pardavi-Horvath M.* // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 215–216. P. 171.
3. *Ott G., Wrba J., Lucke R.* // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V. 254–255. P. 535.
4. *Zhang B.S., Feng Y., Xiong H., et al.* // IEEE Trans. 2006. V. MAG-42. № 7. P. 1778.
5. *Abshinova M.A., Lopatin A.V., Kazantseva N.E., et al.* // Composites Pt. A: Appl. Sci. Manufacturing. 2007. V. 38. № 12. P. 2471.
6. *Лопатин А.В., Казанцева Н.Е., Казанцев Ю.Н.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 5. С. 517.
7. *Lagarkov A.N., Matytsin S.M., Rozanov K.N., Sarychev A.K.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. № 7. P. 3806.
8. *Rozanov K.N.* // IEEE Trans. 2000. V. AP-48. № 8. P. 1230.
9. *Старостенко С.Н., Виноградов А.П., Кибец С.Т.* // РЭ. 1999. Т. 44. № 7. С. 817.
10. *Liu H.T., Cheng H.F., Chu Z.Y., Zhang D.Y.* // Mater. Design. 2007. V. 28. № 7. P. 2166.
11. *Munk B.A.* Frequency Selective Surface: Theory and Design. N.Y.: Wiley and Sons, 2000.
12. *Munk B.A., Munk P., Prior J.* // IEEE Trans. 2007. V. AP-55. № 1. P. 186.
13. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах М.: Наука, 1973.
14. *Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н.* Антенны УКВ. Ч. 2. М.: Связь, 1977.