

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

КОМПЕНСАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ ОТ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТКИ ИЗ ДВОЙНЫХ РАЗОМКНУТЫХ КОЛЕЦ

© 2016 г. Ю. Н. Казанцев, Г. А. Крафтмахер, В. П. Мальцев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

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

E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2015 г.

Рассмотрены частотные зависимости коэффициентов отражения от решетки из двойных разомкнутых колец в условиях их возбуждения высокочастотным магнитным полем и от радиопоглощающего композита на основе резистивных пленок либо волокон. Показано, что парциальные отражения от поверхности композита и близко расположенной к ней решетки могут компенсировать друг друга, существенно уменьшая отражение от композита. Экспериментально подтверждено, что отражение может снижаться более чем на 15 дБ по сравнению с отражением от композита без решетки.

DOI: 10.7868/S0033849416060127

ВВЕДЕНИЕ

Проблема снижения отражения электромагнитных волн от границы двух сред, несмотря на свой возраст, остается до сих пор актуальной ввиду многообразия сред, диапазонов частот и конкретных задач, ради которых эта проблема решается. В оптике обычным решением являются интерференционные покрытия с определенными показателем преломления и толщиной [1]. Такое же решение может использоваться и на радиоволнах, однако физическая толщина покрытия становится весьма большой. Поэтому, например на СВЧ, широкое применение нашли методы компенсации отражения с помощью емкостных и индуктивных решеток. Местоположение и тип решеток определяются спецификой задачи и электромагнитными характеристиками материалов. Так, чтобы улучшить прозрачность антенных обтекателей, решетки обычно помещают внутри согласуемого слоя [2]. При этом компенсируются отражения как от внешней, так и от внутренней границ этого слоя. При другом расположении решеток могут компенсироваться отражения от каждой из двух поверхностей согласуемого слоя. Так, в работе [3] показано, что согласующие емкостные решетки, расположенные вблизи обеих поверхностей слоя материала с большими значениями действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, в определенном диапазоне частот значительно увеличивают коэффициент прохождения через слой. Данный эффект обусловлен резонансом между решеткой и поверхностью материала аналогично тому, что имеет место в искусствен-

ных магнитных проводниках на основе емкостных решеток [4].

Для “просветления” материалов в инфракрасном и терагерцовом диапазонах применяются решетки из металлических элементов крестообразной формы [5, 6] и слои композита с большим коэффициентом преломления [7].

В последние годы большую известность приобрели метаматериалы со свойствами, отсутствующими в окружающей нас природе, в частности, материалы на основе решеток из двойных разомкнутых колец [8]. Такие кольца в условиях возбуждения высокочастотным магнитным полем позволяют реализовать среду, обладающую искусственным магнетизмом, что находит применение в материалах и структурах с отрицательным лучепреломлением [8, 9].

В данной статье рассматривается еще одно важное применение решеток из двойных разомкнутых колец – для согласования легких объемных радиопоглощающих материалов (РПМ) со свободным пространством. В этом направлении важно идентифицировать тип возбуждения (магнитным или электрическим переменным полем) [10], учитывая трудности прямых измерений, требующих специальных образцов [11].

1. ОБЪЕМНЫЕ ЛЕГКИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Объемные легкие РПМ изготавливаются с помощью резистивных пленок либо с помощью отрезков резистивных волокон в пенообразной диэлектрической матрице. На рис. 1 приведены

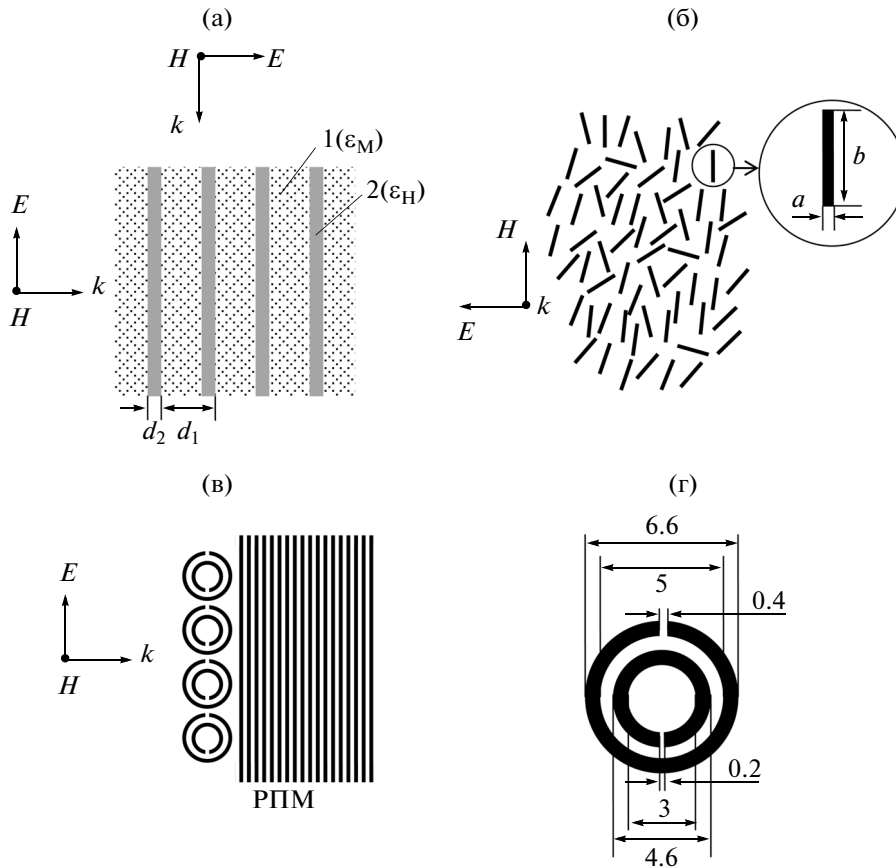


Рис. 1. Схемы РПМ: а – композит на основе резистивных пленок; б – композит на основе резистивных нитей; в – РПМ с решеткой из двойных разомкнутых колец; г – двойное разомкнутое кольцо.

простейшие схемы этих РПМ. Так, на рис. 1а изображен композит, представляющий собой слоистую структуру из резистивных пленок (2), разделенных слоями пенопласта (1), а на рис. 1б показан композит на основе хаотически расположенных отрезков резистивных волокон в пенообразной диэлектрической матрице. При малом относительном объеме резистивных пленок и волокон может быть реализован композит, относительная комплексная диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ на СВЧ удовлетворяет условиям

$$\varepsilon' - 1 \ll 1 \text{ и } \varepsilon'' < 2, \quad (1)$$

что гарантирует малое отражение от плоской границы этого композита со свободным пространством (около -10 дБ и менее). Оценим выполнимость условий (1) для композитов на основе реальных резистивных пленок и волокон. Диэлектрическая проницаемость наполнителя (резистивных пленок и волокон) таких композитов может быть выражена через удельную проводимость σ (См/м) и частоту f (Гц)

$$\varepsilon_n = -j \frac{1.8 \times 10^{10} \sigma}{f}. \quad (2)$$

Например, относительная диэлектрическая проницаемость науглероженного волокна с удельной электропроводимостью 10^4 См/м на частоте 10 ГГц равна $\varepsilon_n = -j1.8 \times 10^4$, а мнимая часть диэлектрической проницаемости пленки в виде науглероженной бумаги с проводимостью 30 См/м на этой же частоте составляет $-j54$.

Эффективная диэлектрическая проницаемость ε_3 композита на основе резистивных пленок (рис. 1а) определяется известным выражением для слоистой структуры, приведенным, например, в работе [12]:

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_M d_1 + \varepsilon_n d_2}{d_1 + d_2}. \quad (3)$$

Подставив выражение (2) в формулу (3) и учитывая условие $d_1 \gg d_2$, получим

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_M - j \frac{A}{f}, \quad A = 1.8 \times 10^{10} \sigma \frac{d_2}{d_1}. \quad (4)$$

Так, при $\varepsilon_M = 1.02$, $\sigma = 30$ См/м и $d_2/d_1 = 0.01$ комплексная диэлектрическая проницаемость композита на частоте 10 ГГц составляет $\varepsilon_3 = 1.02 - j0.54$ и удовлетворяет условию (1).

Диэлектрическая проницаемость композита, наполненного отрезками резистивных волокон (см. рис. 1б) малой концентрации (много меньше порога протекания), может быть оценена с помощью следующего выражения, полученного из формулы Оделевского [13] с учетом выражения (2):

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_m \left(1 + \frac{C_k}{3N(1 + f^2/f_{\text{рел}}^2)} - j \frac{C_k f/f_{\text{рел}}}{3N(1 + f^2/f_{\text{рел}}^2)} \right), \quad (5)$$

где C_k – объемная концентрация волокон в композите, $N = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \left(\ln \frac{2b}{a} - 1\right)$ – коэффициент деполяризации, $f_{\text{рел}} = 6 \times 10^9 N \sigma / \varepsilon_m$ – так называемая частота релаксации. Так, при $\varepsilon_m = 1.02$, $\sigma = 10^4$ См/м, $a = 0.008$ мм, $b = 3$ мм, $C_k = 3 \times 10^{-4}$ диэлектрическая проницаемость композита на частоте 10 ГГц составляет $\varepsilon_3 = 1.15 - j0.56$. Детальное исследование РПМ на основе резистивных волокон содержится в работах ВИАМ, например [14, 15].

На рис. 2 приведена частотная зависимость модуля и фазы коэффициента отражения нормально падающей плоской электромагнитной волны от границы свободного пространства с РПМ на основе резистивных пленок (см. рис. 1а), рассчитанная по формуле

$$R = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_3}}{1 + \sqrt{\varepsilon_3}}, \quad (6)$$

где ε_3 вычислялась согласно выражению (4) для нескольких значений параметра A . Для простоты в расчете была принята $\varepsilon_m = 1$. Как видно из графиков рис. 2, с ростом частоты модуль и фаза коэффициента отражения уменьшаются, при этом значение фазы остается во втором квадранте $90^\circ \dots 180^\circ$.

Для идеального согласования рассматриваемого РПМ со свободным пространством желательно использовать структуру, собственный коэффициент отражения которой совпадает по модулю с коэффициентом отражения РПМ, а фазы отличаются на 180° . В этом случае электромагнитные поля, отраженные от РПМ и согласующей структуры, будут взаимно компенсировать друг друга. В реальной ситуации различие коэффициентов отражения по модулю и отличие разности фаз от 180° снижает эффект компенсации.

2. РЕШЕТКА ИЗ ДВОЙНЫХ РАЗОМКНУТЫХ КОЛЕЦ

Существенный эффект компенсации отражения от РПМ в достаточно широком диапазоне частот наблюдается при использовании в качестве согласующей структуры решетки из двойных разомкнутых колец. Для этой цели решетку раз-

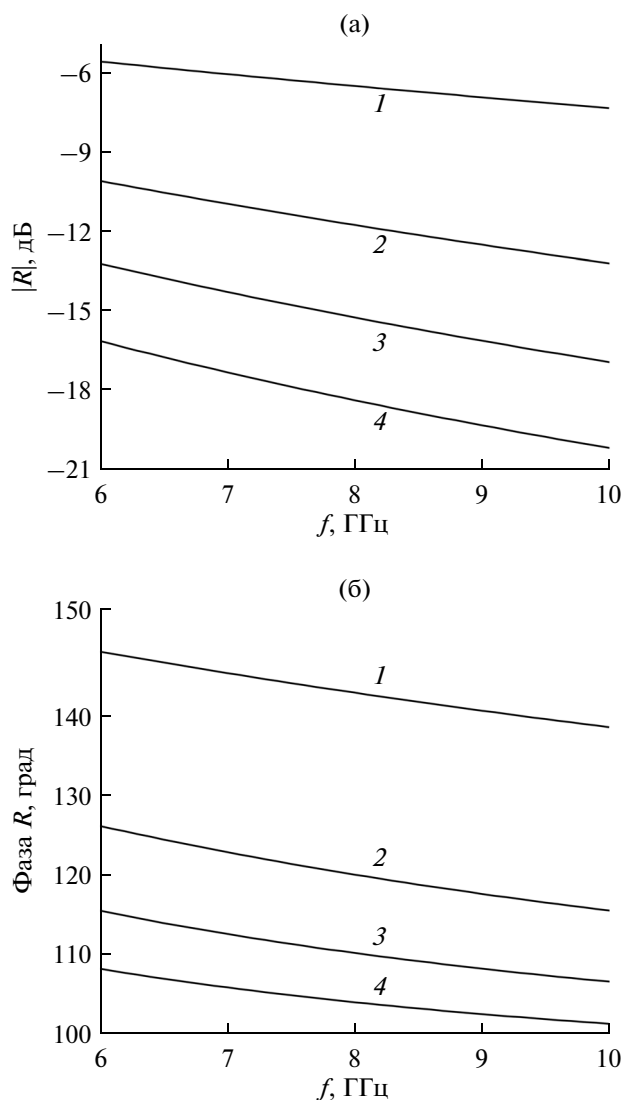


Рис. 2. Рассчитанная частотная зависимость модуля (а) и фазы коэффициента отражения от РПМ (б) на основе резистивных пленок при $A = 3 \times 10^{10}$ (1), 1×10^{10} (2), 0.6×10^{10} (3) и 0.4×10^{10} (4).

мещают в непосредственной близости от границы свободного пространства с РПМ (см. рис. 1в) так, что плоскость колец параллельна вектору \vec{k} падающей волны и перпендикулярна вектору \vec{H} , а разрывы колец ориентированы вдоль вектора \vec{E} (высокочастотное магнитное возбуждение).

На рис. 3 представлена рассчитанная частотная зависимость собственного коэффициента отражения такой решетки для трех значений периода. Фаза коэффициента отражения отсчитывается от плоскости, проходящей через центры кольцевых элементов. Из графиков видно, что на частотах, выше резонансной, модуль и фаза коэффициента отражения уменьшаются, но в этом случае значение фазы остается в четвертом квадранте $-90^\circ \dots 0^\circ$, т.е.

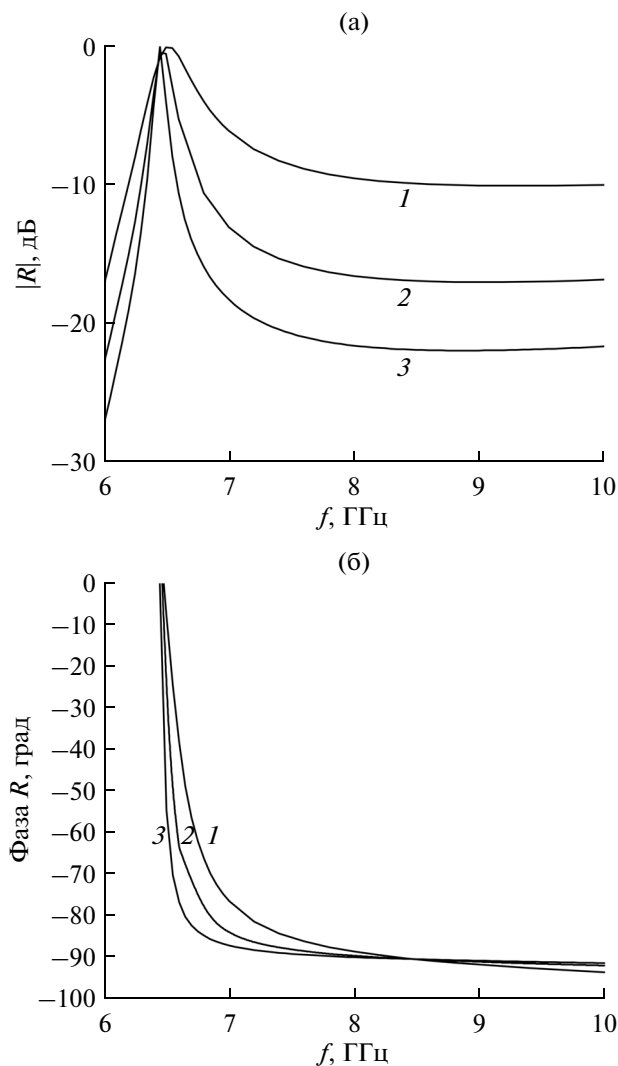


Рис. 3. Рассчитанная частотная зависимость модуля и фазы коэффициента отражения от решетки из двойных разомкнутых колец для трех значений периода $P = 10$ (1), 15 (2), 20 мм (3).

разность фаз коэффициентов отражения РПМ и решетки близка к 180° , и поэтому имеет место компенсация коэффициента отражения от РПМ. Для лучшего согласования модули коэффициентов отражения от решетки и от РПМ должны быть близки, что можно обеспечить выбором периода решетки.

3. СОГЛАСОВАНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА СО СВОБОДНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

На рис. 4 приведены рассчитанные частотные зависимости коэффициента отражения от РПМ с согласующими решетками для нескольких значений параметра $A = 0.6 \times 10^{10}$; 1×10^{10} ; 1.5×10^{10} и

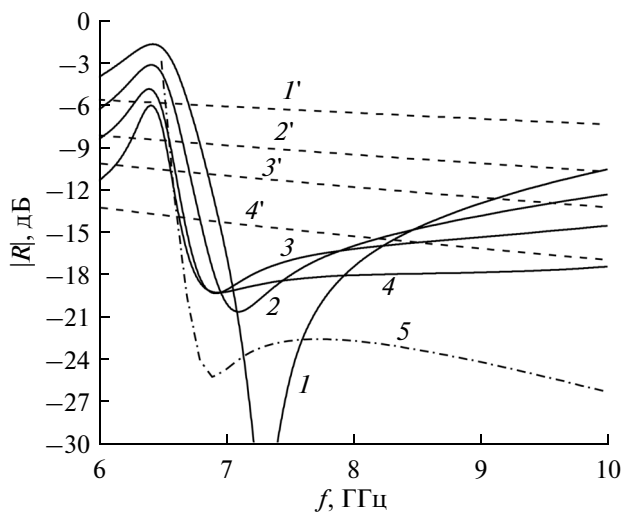


Рис. 4. Сравнение рассчитанных частотных зависимостей коэффициента отражения от РПМ с согласующей решеткой (1–4) и без решетки (1'–4'), кривая 5 построена без учета набега фазы между центром решетки и поверхностью РПМ. Кривые 1, 1' – $A = 3 \times 10^{10}$, $P = 9$ мм; кривые 2, 2' – $A = 1.5 \times 10^{10}$, $P = 11$ мм; кривые 3, 3' – $A = 1 \times 10^{10}$, $P = 14$ мм; кривые 4, 4', 5 – $A = 3 \times 10^{10}$, $P = 17$ мм.

3×10^{10} при оптимальных соответствующих значениях периода $P = 17$; 14; 11 и 9 мм, обеспечивающих наилучшее согласование РПМ со свободным пространством. На том же рисунке для сравнения приведены частотные зависимости коэффициента отражения от тех же РПМ без согласующих решеток.

Отметим, что на результаты согласования существенное влияние оказывает набег фазы между центром элементов решетки и отражающей поверхностью РПМ. Это приводит к тому, что с уменьшением параметра A и, соответственно, увеличением оптимального значения периода P разность фаз коэффициентов отражения от РПМ и решетки оказывается меньше 180° , что ослабляет эффект согласования. Поскольку это ослабление эффекта зависит от электрического расстояния между поверхностью РПМ и центрами элементов решетки, то применение малогабаритных элементов, например разомкнутых колец, нагруженных емкостями [16, 17], заметно улучшит ситуацию. Подтверждением этого служит рис. 4, на котором видно, что кривая 5, построенная без учета набега фазы между центром решетки и поверхностью РПМ, отличается от кривой 4.

Модель слоистого радиопоглощающего композита была выполнена из науглероженной бумаги толщиной 0.07 мм с удельной проводимостью 30 См/м и прослойк из пенополистирола с диэлектрической проницаемостью 1.02. Действительная часть диэлектрической проницаемости углеродосодержащей бумаги в диапазоне 5...15 ГГц составля-

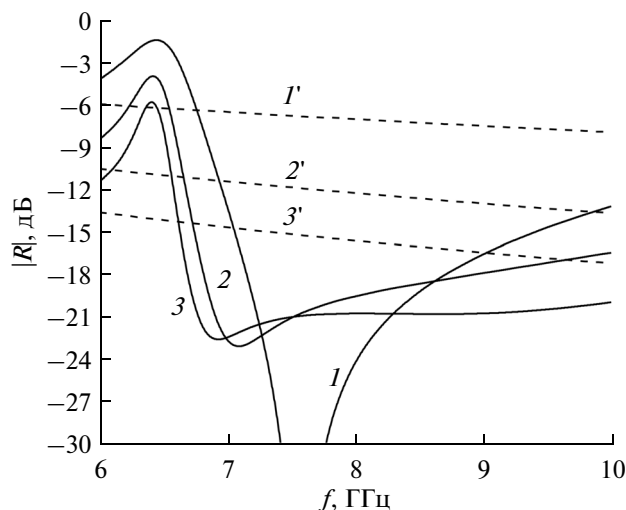


Рис. 5. Сравнение рассчитанных частотных зависимостей коэффициента отражения от трех моделей РПМ с согласующей решеткой (1–3) и без решетки (1'–3') при $\epsilon_3 = 2 - j3 \times 10^{10}/f$, $P = 9$ мм (кривые 1, 1'), $\epsilon_3 = 1.3 - j10^{10}/f$, $P = 13$ мм (кривые 2, 2'), $\epsilon_3 = 1.2 - j0.6 \times 10^{10}/f$, $P = 17$ мм (кривые 3, 3').

ла около 15. Были изготовлены три модели РПМ (№ 1, 2, и 3), различающихся только толщиной пенополистироловых прослоек, со следующими величинами эффективной диэлектрической проницаемости: $\epsilon_3 = 2 - j3 \times 10^{10}/f$; $\epsilon_3 = 1.3 - j10^{10}/f$ и $\epsilon_3 = 1.2 - j0.6 \times 10^{10}/f$ соответственно.

На рис. 5 даны рассчитанные частотные зависимости коэффициентов отражения от этих моделей РПМ с оптимальными согласующими решетками (сплошные кривые) и без них (штриховые кривые).

С целью апробации предложенного метода согласования РПМ со свободным пространством были проведены волноводные измерения коэффициента отражения от моделей РПМ с решеткой из трех элементов с периодом $P_{\text{ср}} = 13$ мм, усредненным по двум поперечным координатам волновода. Результаты измерения коэффициентов отражения, приведенные на рис. 6, показали наилучшее согласование в случае материала № 2. Следует отметить, что расчет коэффициента отражения от этого материала с решеткой в условиях свободного пространства дал то же значение периода $P = 13$ мм для оптимальной согласующей решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет и эксперимент показали, что величина коэффициента отражения от решетки из двойных разомкнутых колец в условиях магнитного воз-

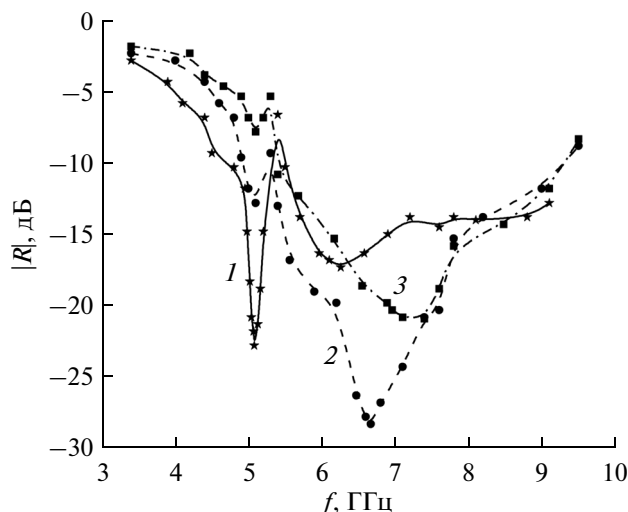


Рис. 6. Измеренные волноводным методом частотные зависимости от трех моделей РПМ с согласующей решеткой со средним значением периода $P_{\text{ср}} = 13$ мм при $\epsilon_3 = 2 - j3 \times 10^{10}/f$ (кривая 1), $\epsilon_3 = 1.3 - j10^{10}/f$ (кривая 2), $\epsilon_3 = 1.2 - j0.6 \times 10^{10}/f$ (кривая 3).

буждения на частотах выше резонансной вначале уменьшается с ростом частоты и затем практически не меняется, оставаясь на уровне, зависящем от периода решетки. При этом фаза коэффициента отражения, оставаясь в четвертом квадранте, вначале быстро уменьшается от 0 до величин, близких к -90° , а затем практически не меняется. Величина коэффициента отражения от радиопоглощающего композита на основе резистивных пленок либо волокон с ростом частоты плавно уменьшается, а фаза, оставаясь во втором квадранте, уменьшается в направлении к $+90^\circ$. Разность фаз коэффициентов отражения от решетки и композита приближается при этом к 180° .

При помещении решетки на поверхность композита в достаточно широкой полосе частот происходит существенная компенсация отражения от композита.

Волноводные измерения отражения от системы решетка–композит подтвердили факт значительного снижения (больше чем на 15 дБ) отражения по сравнению с отражением от композита без решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973.
2. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ. М.: Сов. радио, 1974.
3. Басков К.Н., Кисель В.Н. // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/jan13/7/text.html>

4. Казанцев Ю.Н., Анлеталин В.Н. // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
5. Boyang Zhang, Joshua Hendrickson, Nima Nader, Hou-Tong Chen // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 241113. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904827>
6. Hou-Tong Chen, Jiangfeng Zhou, John F. O'Hara // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. № 7. P. 073901.
7. Xuecheng Wang, Yunzhou Li, Bin Cai, YiMing Zhu // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 231107. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4922574>.
8. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. № 18. P. 4184.
9. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. // РЭ. 2006. Т. 51. № 5. С. 518.
10. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 5. С. 32.
11. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 20. С. 74.
12. Бреховских А.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
13. Оделевский В.Н. // ЖТФ. 1951. Т. 21. № 6. С. 667.
14. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В. // Труды ВИАМ. 2012. № 8. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=703
15. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Широков В.В. // Труды ВИАМ. 2015. № 3. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=788
16. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. // Вестник РАН. 2008. Т. 78. № 5. С. 438.
17. Schelkunoff S.A., Friis H.T. Antennas: Theory and Practice. N.Y.: John Wiley & Sons, 1952. P. 584.