

УДК 621.37

ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭКРАНОМ В ДИАПАЗОНЕ КВЧ

© 2022 г. С. Ю. Молчанов¹ *, И. Ш. Бахтеев¹, В. М. Муравьев¹, П. А. Гусихин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: canishe@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментально-измеренные зависимости спектрального поведения частотно-селективных поверхностей на диэлектрической подложке с отражающим экраном. Были выявлены факторы, позволяющие получить схожие поглощающие характеристики у отражающих экранов с разной перфорацией. Полученная информация может быть использована в качестве рекомендаций при проектировании частотно-селективных экранов, а физическое понимание механизма работы будет являться ключом к дальнейшим усовершенствованиям и позволит создавать более сложные поверхности с требуемыми частотными откликами.

DOI: 10.31857/S0367676522040160

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные поверхности (ЧСП) или искусственно созданные пространственные фильтры образуются периодическими матрицами обычно металлических элементов на диэлектрической подложке. Падающая электромагнитная волна на такие поверхности рассеивается с заданной частотной характеристикой. В настоящее время частотно-селективные поверхности, изготовленные на подложке с заземлением, используются в качестве компонентов антенн для улучшения их характеристик [1–9]. Например, эти поверхности характеризуются такими свойствами как низкая зависимость от угла падения возбуждающей волны, способность работать в непосредственной близости от источника излучения. Также стоит отметить, что размер поверхностных элементов матрицы меньше длины волны, и частотные характеристики таких поверхностей не зависят от собственных резонансов структурных элементов.

Спектральное поведение ЧСП полностью определяется геометрией поверхности за один период (единичная ячейка) при условии, что размер поверхности бесконечен. Матрица из металлических элементов (патчей) имеет емкостную частотную характеристику и без металлического экрана ведет себя как фильтр нижних частот. Массив из отверстий в металле имеет индуктивную частотную характеристику и ведет себя как фильтр верхних частот [10]. Индуктивные и емкостные поверхности могут быть собраны вместе для получения желаемой характеристики фильтра [11, 12].

В диапазоне дм волн [5, 6, 9] и см волн [4, 7, 8] емкостные элементы, расположенные на диэлектрической подложке с металлическим экраном, активно используются как “back reflector”. С уменьшением длин волн электромагнитного излучения и переходом современной радиоэлектроники на более высокие частоты необходимым является перестройка таких структур под волны миллиметровой длины. Причем численные методы расчета экранов с периодически повторяющимися элементами для диапазона КВЧ будут занимать гораздо большего времени и ресурсов ЭВМ, нежели при расчете на более низкие частоты. Поэтому актуальным является определение основных принципов построения и вывод закономерностей для более быстрого расчета и оптимизации таких структур.

ВИДЫ РАССМАТРИВАЕМЫХ СТРУКТУР

Наш интерес будет привязан к периодически повторяющимся металлическим элементам, расположенным на диэлектрической подложке с металлическим экраном. Прообразом появления подобных структур является матрица щелей [13]. Такая структура, образованная на диэлектрике с металлом, имеет полосы резонансного поглощения при направлении вектора напряженности электрического поля перпендикулярно щелевым вырезам. Частота этих резонансов подчиняется формуле:

$$f_N \approx \frac{Nc}{2nT}, \quad (1)$$

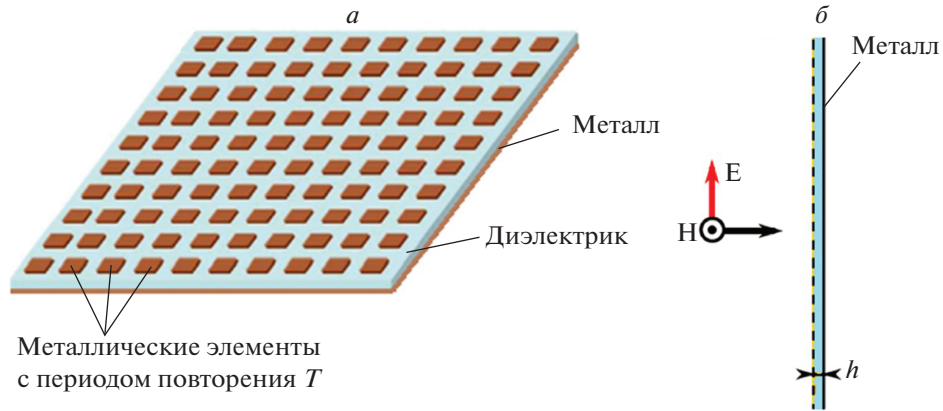


Рис. 1. Исследуемая структура с перфорацией в виде периодически повторяющихся элементов (а) вид спереди (б) вид сбоку.

где f_N – частота N -ой гармоники резонанса Фабри–Перо, c – скорость света в вакууме, n – коэффициент преломления диэлектрической подложки, T – период шели. Стоит отметить, что длина волны основной гармоники много больше, чем толщина диэлектрика. Однако такая структура не имеет резонансов поглощения и ведет себя как металлический экран при падении волны с направлением вектора напряженности электрического поля параллельно щелевым вырезам. Структура, поддерживающая поглощающие характеристики при ТЕ и ТМ поляризациях и рассмотренная в работах [14, 15], представлена на рис. 1. Она представляет собой периодически повторяющиеся элементы в виде квадратов с одинаковым периодом в обоих направлениях. Авторами представлены аналитически полученные формулы и выражения, основанные на поверхностном сопротивлении таких композиций, а частотные характеристики остаются стабильны при широких углах падения.

Описанные выше два типа структур, расположенные на диэлектрической подложке с заземлением, рассмотрены в работах [16, 17]. Авторами показан одинаковый отклик и, как следствие, схожие частотные характеристики отражения при ТЕ поляризации. Отмечено, что представленные в [14, 15] аналитические формулы описывают поведение коэффициента отражения от таких структур при изменении толщины диэлектрического слоя не точно. При уменьшении толщины диэлектрической подложки происходит смещение резонанса в сторону более высоких частот. Причем у резонанса уменьшается амплитуда и увеличивается полоса.

Коэффициент отражения таких структур с высокой точностью можно просчитать на современном компьютере, например, с помощью пакета программ HFSS или Comsol, использующие метод конечных элементов. Но при увеличении частотного диапазона, такие вычисления будут требовать большие ресурсы ЭВМ и отнимать много времени. Поэтому полученные в [16] аналитические формулы, способные с высокой точностью предсказывать частотные характеристики, вносят

большой вклад в изучение и применение ЧСП, которые из-за простоты изготовления, легкого веса и малой толщины активно внедряются в устройства СВЧ, КВЧ и терагерцевого диапазонов [18, 19].

При увеличении толщины подложки гармонические резонансы становится исследовать затруднительно. Первая гармоника уходит в сторону низких частот и имеет очень малую амплитуду. В подложке возникают резонансы сложной формы. Выражение (1) перестает работать. Примерная частота (ГГц), выше которой начинают возникать такие резонансы (т.е. до которой можно исследовать подобные экраны на наличие гармонических резонансов), определяется по формуле:

$$f \approx \frac{75}{h\sqrt{\epsilon - 1}}, \quad (2)$$

где h – толщина диэлектрика в миллиметрах, ϵ – диэлектрическая проницаемость подложки. Таким образом, для диапазона КВЧ прогнозирование гармонического сигнала возможно только на ультратонких подложках. Но при увеличении толщины подложки количество резонансов в полосе увеличивается. Такие структуры могут быть востребованы в антеннах с несколькими близко расположенными рабочими диапазонами.

Как уже было сказано, для расчета структуры с периодически повторяющимися элементами на подложке можно использовать численное электродинамическое моделирование на основе метода конечных элементов и канала Флоке [20]. Чаще всего в таких исследованиях встречаются квадратные элементы [21, 22]. Или элементы с прямыми гранями [23, 24]. И очень редко элементы в виде кругов или с закругленными гранями [25, 26]. Одна из причин такой дискриминации круглых элементов – более долгий расчет на ЭВМ. Это связано с тем, что строгий расчет периодически повторяющихся кружков накладывает дополнительные сложности в виде необходимости описания треугольными конечными элементами структуру круга. И чтобы исследуемая модель не имела сильных искажений и была близка к аппроксимируемой

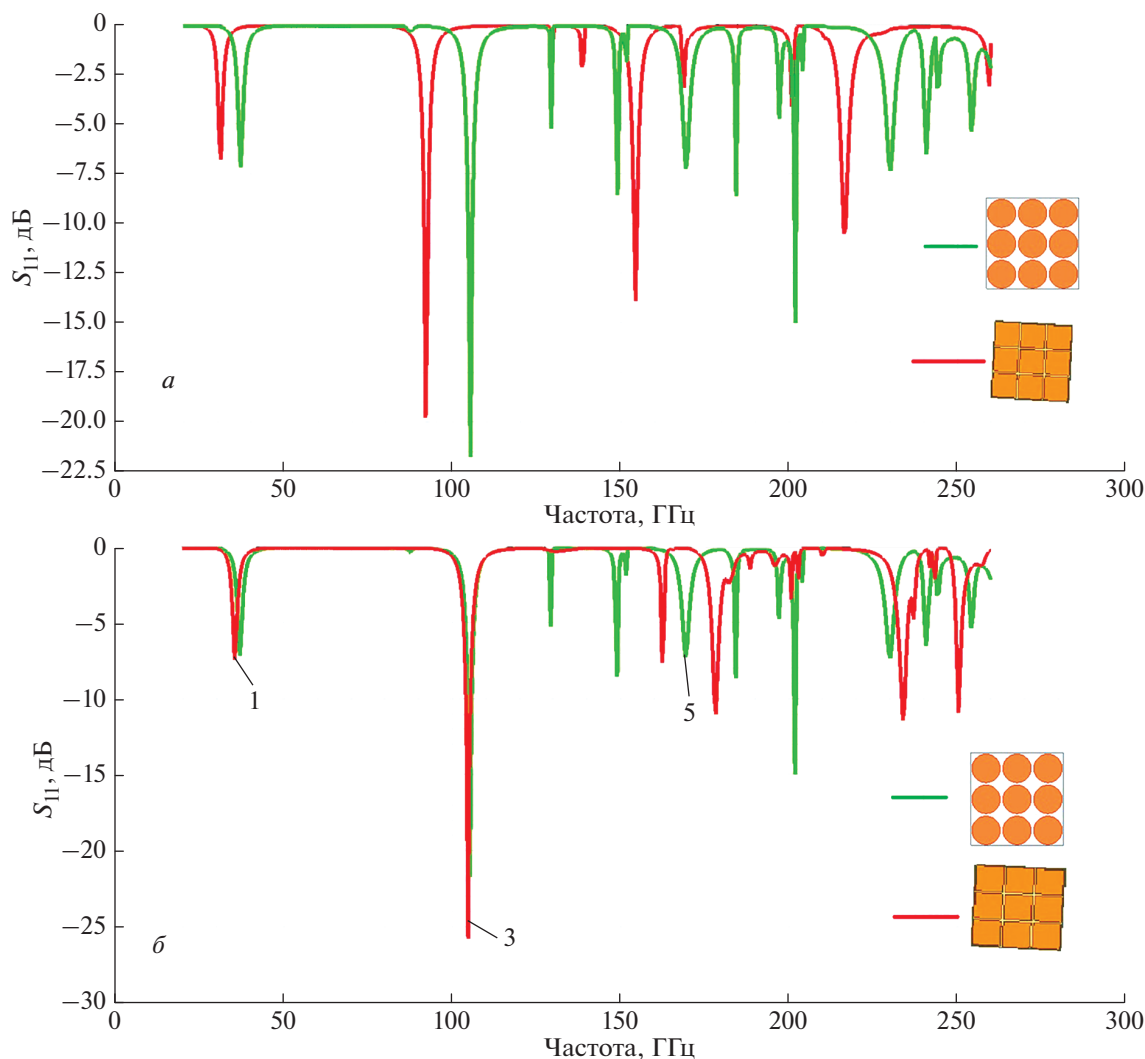


Рис. 2. Рассчитанные значения коэффициента отражения (S_{11} , дБ) в диапазоне 20–260 ГГц для двух видов ЧСП при периоде $T = 2.3$ мм и толщине подложки $h = 0.1$ мм, диаметр круга $d = 2.1$ мм и сторона квадрата $a = 2.1$ мм (а); $d = 2.1$ мм, $a = 1.86$ мм (б).

структуре, количество единичных элементов разбиения значительно возрастает.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве диэлектрической подложки для частотно-селективных поверхностей был выбран текстолит FR-4, применяемый в [9, 13, 17]. Он имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 4.5$, магнитную проницаемость $\mu = 1$ и низкие микроволновые потери. Для моделирования электромагнитных полей в исследуемых ЧСП с металлическим экраном мы использовали схожую с [27] математическую модель, основанную на расчете единичной ячейки, которая включает область с одним элементом массива и учитывает все размеры, включая толщину металлизации. Упрощенная модель решения уравнения Гельмгольца, описывающего распространение

и рассеяние электромагнитных волн в этой единичной ячейке, удовлетворяют периодическим граничным условиям Флоке, граничным условиям Неймана и Дирихле на металлических поверхностях. 3D модель единичной ячейки рассчитывалась численно методом конечных элементов (МКЭ).

Апробацию точности моделирования мы провели на примере материала, опубликованного в работах [13, 25]. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных показало достаточно высокую точность конечно-элементной модели.

На первом этапе моделирования был произведен расчет для ультратонкой подложки толщиной $h = 0.1$ мм и диэлектрическими характеристиками $\epsilon = 4.5$, $\text{tg}\beta = 0.001$. На рис. 2а показан рассчитанный коэффициент отражения двух частотно-селективных поверхностей в виде повторяющихся кругов (зеленый цвет) и повторяющихся квадра-

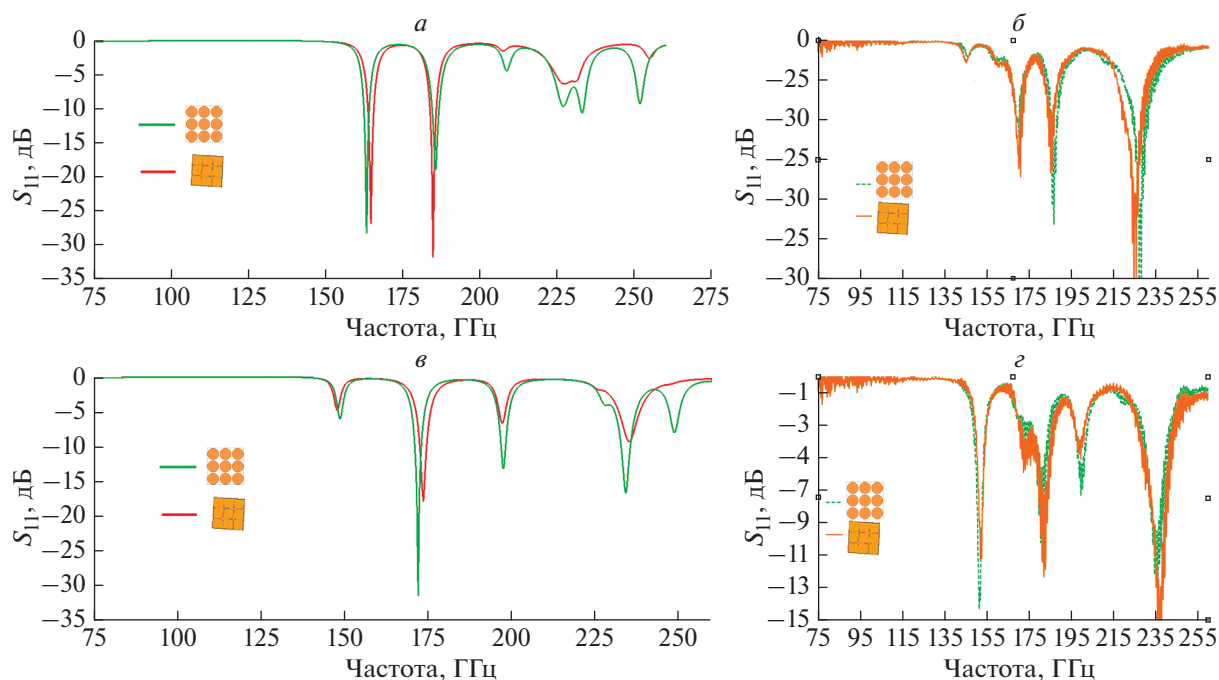


Рис. 3. Коэффициент отражения (S_{11} , дБ) для двух видов ЧСП при $h = 0.5$ мм: моделирование период $T = 1$ мм, диаметр круга $d = 0.7$ мм, сторона квадрата $a = 0.6$ мм (а); эксперимент, $T = 1$ мм, $d = 0.7$ мм, $a = 0.6$ мм (б); моделирование, $T = 0.9$ мм, $d = 0.7$ мм, $a = 0.6$ мм (в); эксперимент, $T = 0.9$ мм, $d = 0.7$ мм, $a = 0.6$ мм (г).

тов (красный цвет). ЧСП располагались на диэлектрической подложке, позади которой находился металл с бесконечной проводимостью. Периодически повторяющиеся элементы имели период $T = 2.3$ мм, и равную длину элементов: длина квадратного элемента $a = 2.1$ мм, диаметр круга $d = 2.1$ мм. Как видно из графика, резонансы у массива из квадратов и у массива из кружков не совпадают по частоте, несмотря на одинаковую длину элементов. На рис. 2б приведены данные расчета массива из периодически повторяющихся кружков с параметрами, как и на рис. 2а. А вот массив из квадратов имел уменьшенную длину единичного элемента: сторона квадрата имела значение $a = 1.86$ мм. При таких геометрических размерах резонансы первой и третьей гармоник у обоих ЧСП совпадают с высокой точностью. Причем одинаковым является и площадь каждого элемента: для квадрата $S_{\text{кв}} = a^2 = 1.86 \cdot 1.86 \approx 3.46 \text{ мм}^2$, для круга $S_{\text{кр}} = \pi d^2/4 \approx 3.14 \cdot 2.1 \cdot 2.1/4 = 3.46 \text{ мм}^2$. Дальнейшие исследования подтвердили, что и при других геометрических параметрах ЧСП характеристики отражения для 1 и 3 гармоник являются одинаковыми или очень близкими для массивов квадратов и кружков с одинаковой площадью.

На втором этапе моделирования были рассмотрены толстые диэлектрические подложки. Толщина подложки увеличилась в 5 раз: $h = 0.5$ мм. При такой толщине резонансы внутри подложки будут иметь сложную форму и не подчиняться гармоническому закону по формуле (1). Было проведено моделирование для массива из квадратов и круж-

ков с одинаковой площадью. На рис. 3а представлены кривые, полученные для длины квадратных элементов $a = 0.6$ мм, диаметра круга $d = 0.7$ мм и периода $T = 1$ мм. Площадь единичного элемента $S \approx 0.36 \text{ мм}^2$. На рис. 3в построены кривые, полученные для тех же длин элементов, но при периоде $T = 0.9$ мм. Соответственно площадь металлизации не изменилась. Графики коэффициента S_{11} , отложенного в дБ, сходятся с высокой точностью по наиболее выраженным резонансам у ЧСП с одинаковой площадью металлических элементов.

Результатам численного моделирования, полученным для подложки с увеличенной толщиной, требовалась верификация экспериментальными данными. Перфорированные экраны были изготовлены методом травления, активно применяемым для производства подобного типа структур [28]. Это недорогой способ получения требуемого массива металлических элементов на диэлектрической основе. Процесс прост и приспособлен к воспроизведению структур с высокой точностью.

Экспериментальное поглощение структуры оценивалось по коэффициенту отражения. Для измерения параметра S_{11} матрицы рассеяния использовался векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVA-40 и преобразователи частоты ZVA Z-110, ZVA Z-170 и RPG-260, работающие в диапазонах 75–110, 110–170 и 170–260 ГГц соответственно. Оборудование, покрывающее столь большой частотный диапазон, впервые было использовано в работе [29].

Измерения проводились для структур с одинаковой площадью элементов, расчетные данные которых представлены на рис. 3а и 3в. Полученные экспериментальные данные для $T = 1$ мм изображены на рис. 3б, для $T = 0.9$ мм изображены на рис. 3г. Частота резонансов у ЧСП с квадратными элементами сходится с частотами резонансов ЧСП с элементами в виде кругов. Наблюдаемые экспериментальные характеристики свидетельствуют о верности и обоснованности утверждения о спектральном соответствии отражения от перфорированных поверхностей в виде повторяющихся квадратных и круглых элементов одинаковой площади.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены теоретические и экспериментальные исследования частотно селективных поверхностей в виде металлических элементов на диэлектрической подложке с металлическим экраном. Показаны особенности подбора параметров при расчете конструкции экрана. Впервые проведено сравнение массивов квадратных элементов и массивов элементов в виде круга при одинаковых периодах. Обнаружена зависимость между площадью этих элементов и коэффициентом отражения. В случае тонких подложек и распространения в них гармонических сигналов частота отражения первой и третьей гармоник были схожи при одинаковой площади элементов. При увеличенной толщине подложки и возникновению не гармонических резонансов характеристика отражения выглядела одинаково у частотно-селективных поверхностей с равной площадью элементов. Исходя из полученных в исследовании свойств, можно сделать вывод, что расчет характеристик отражения от поверхности с повторяющимися кругами можно производить, заменив круглые элементы на квадраты той же площади.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-30003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kelly J.R., Kokkinos T., Feresidis A.P. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2008. V. 56. No. 9. P. 2817.
2. Dewan R., Rahim M.K.A., Hamid M.R. et al. // Int. J. RF Microwave Comp.-Aid. 2017. V. 27. No. 6. Art. No. e21105.
3. Foroozesh A., Shafai L. // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2008. V. 8. P. 10.
4. Feresidis A.P., Goussetis G., Wang S., Vardaxoglou J.C. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2005. V. 53. No. 1. P. 209.
5. Panda P.K., Ghosh D. // Proc. ICAC 2020 (Singapore, 2020). P. 272.
6. Yao L., Li E., Yan J. et al. // Electronics. 2021. V. 10. No. 9. Art. No. 994.
7. Joshi C., Lepage A.C., Sarrazin J., Begaud X. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. No. 7. P. 3269.
8. Mehrabani A.M., Shafai L. // Proc. APS/URSI 2010. (Toronto, 2010). P. 1.
9. Wu J., Yang S., Chen Y. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 65. No. 1. P. 368.
10. Wu T.K. Frequency-selective surface and grid array. N.Y.: Wiley, 1995. 331 p.
11. Al-Joumayly M., Behdad N. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. V. 57. No. 2. P. 452.
12. Al-Joumayly M., Behdad N. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2010. V. 58. No. 12. P. 4033.
13. Hibbins A.P., Sambles J.R., Lawrence C.R., Brown J.R. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. No. 14. Art. No. 143904.
14. Luukkonen O., Costa F., Simovski C.R. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. V. 57. No. 10. P. 3119.
15. Luukkonen O., Simovski C., Granet G. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2008. V. 56. No. 6. P. 1624.
16. Huang R., Kong L.B., Matitsine S. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. No. 7. Art. No. 074908.
17. Brown J.R., Hibbins A.P., Lockyear M.J. et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. No. 4. Art. No. 043105.
18. Goussetis G., Feresidis A.P., Vardaxoglou J.C. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2006. V. 54. No. 1. P. 82.
19. Todorov Y., Tosetto L., Teissier J. et al. // Opt. Expr. 2010. V. 18. No. 13. Art. No. 13886.
20. Long J., Stevenpiper D.F. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. No. 7. P. 3003.
21. Fu J., Dong H., He J. et al. // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 8. No. 16. Art. No. 2000259.
22. Zhang H.B., Zhou P.H., Lu H.P. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2012. V. 61. No. 2. P. 976.
23. Brown J.R., Hibbins A.P., Lawrence C.R. et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. No. 1. Art. No. 014904.
24. Ramos W.T.S., Mesquita R.C., Silva E.J. // Mater. Res. Expr. 2017. V. 4. No. 7. Art. No. 075801.
25. Lockyear M.J., Hibbins A.P., Sambles J.R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. No. 4. Art. No. 041913.
26. Biginton M.P., Hibbins A.P., Sambles J.R., Youngs I.J. // Opt. Expr. 2010. V. 18. No. 23. Art. No. 23916.
27. Komarov V.V., Zwick T., Marahrens S., Molchanov S.Yu. // IEEE Microwave. Wirel. Compon. Lett. 2019. V. 29. No. 12. P. 775.
28. Tadesse A.D., Acharya O.P., Sahu S. // Int. J. RF Microwave Comp.-Aid. 2020. V. 30. No. 5. Art. No. e22154.
29. Креницкий А.П., Мещанов В.П., Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М. // Изв. вузов. Радиоэлектрон. 2016. № 6. С. 49.

An aspect of reflection of frequency-selective surfaces with metal screen in millimeter wave range

S. Yu. Molchanov^{a,*}, I. Sh. Bahteev^a, V. M. Muravev^a, P. A. Gusikhin^a

^a Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

*e-mail: canishe@yandex.ru

We present both the simulation results and the observed dependencies of the spectral behavior of frequency selective surfaces on a dielectric substrate with a metallic screen. Factors that make it possible to obtain similar absorption characteristics for reflective screens with different perforation holes have been identified. Obtained information can serve as a guide for design of frequency selective screens, and physical understanding of the operating principle will be the key to further improvements and will allow the creation of more complex surfaces with the required frequency responses.