

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКУССТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛОСНО-ОТРАЖАЮЩИХ И ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2019 г. Ю. Н. Казанцев¹, *, Г. А. Крафтмахер¹, В. П. Мальцев¹

¹Фрязинский 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 09.07.2018 г.

После доработки 09.07.2018 г.

Принята к публикации 02.09.2018 г.

Рассмотрены искусственные магнитные проводники (ИМП) на основе полосно-отражающих и полосно-пропускающих частотно-селективных поверхностей (ЧСП). Получены аналитические выражения, связывающие характеристики ИМП (положение и ширину полосы рабочих частот) с характеристиками ЧСП (резонансной частотой и добротностью). Возможность оценки характеристик ИМП с помощью аналитических выражений подтверждена численными расчетами для конкретных структур ЧСП (с элементами в форме квадратных щелей и “гантелей”). Экспериментально подтверждена возможность управления характеристиками ИМП путем перестройки резонансной частоты ЧСП.

DOI: 10.1134/S0033849419080096

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные магнитные проводники (ИМП), или поверхности с высоким импедансом, обычно относят к классу метаматериалов, т.е. материалов и структур с необычными электромагнитными свойствами. Так, коэффициент отражения от поверхности ИМП равен +1, а не –1 как в случае отражения от идеальной металлической поверхности. Конструкция ИМП включает в свой состав емкостную решетку [1–8] либо частотно-селективную поверхность [9–12], расположенную на одной стороне диэлектрика, а другая сторона металлизирована. Емкостная решетка обычно выполнена из близко расположенных металлических элементов прямоугольной или гексагональной формы малых (по сравнению с длиной волны) размеров. ЧСП представляют собой периодическую решетку из резонансных элементов, по типу которых ЧСП можно разделить на два класса: полосно-отражающие и полосно-пропускающие. Полосно-отражающие ЧСП – это периодическая решетка из электропроводящих элементов различной формы (диполи, кресты, петли и т.п.), расположенных, например, на тонкой диэлектрической пленке, в то время как полосно-пропускающие ЧСП представляют собой решетку – тонкий электропроводящий экран с отверстиями

различной формы. В работе [9] было показано, что в конструкции ИМП могут быть использованы ЧСП обоих классов. Также было отмечено, что при одинаковых размерах элементов, используемых ЧСП обоих классов, резонансные частоты и, соответственно, полосы рабочих частот ИМП существенно различаются. А именно: резонансная частота ИМП на основе полосно-отражающей ЧСП ниже резонансной частоты ИМП на основе полосно-пропускающей ЧСП. При этом могут существенно различаться и полосы рабочих частот этих ИМП.

Цель данной работы – исследовать функциональные связи между характеристиками ЧСП (тип ЧСП, резонансная частота и добротность) и характеристиками ИМП на основе соответствующей ЧСП (положение и ширина полосы рабочих частот), а также исследовать возможности управления характеристиками ИМП путем перестройки резонансной частоты ЧСП.

1. ИМП НА ОСНОВЕ ПОЛОСНО-ОТРАЖАЮЩИХ И ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ЧСП

На рис. 1а представлена схема ИМП, представляющего собой ЧСП и металлический экран, разделенные диэлектриком. На одной стороне

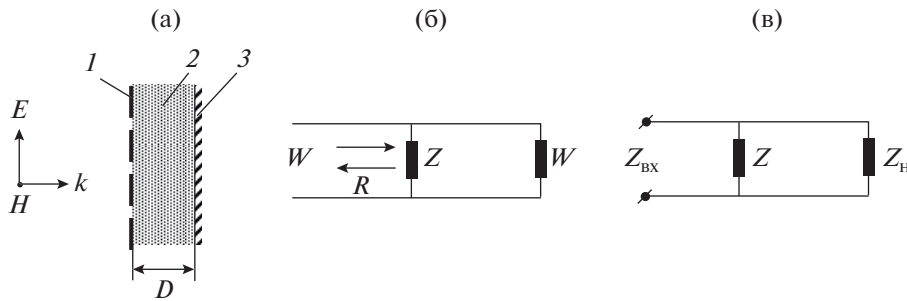


Рис. 1. Искусственный магнитный проводник на основе ЧСП (а) и эквивалентные схемы ЧСП (б) и ИМП (в).

диэлектрика 2 толщиной D расположена ЧСП 1, а другая его сторона металлизирована 3. Для простоты аналитических оценок относительную диэлектрическую проницаемость слоя ϵ будем считать равной единице.

Частотные зависимости коэффициента отражения R от ЧСП в свободном пространстве выражаются следующими формулами: для полосно-отражающих ЧСП –

$$R = \frac{-1}{1 + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \quad (1)$$

и для полосно-пропускающих ЧСП –

$$R = \frac{-1}{1 + j/Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}, \quad (2)$$

где f_0 и Q – резонансная частота и добротность ЧСП соответственно.

Зная коэффициент отражения R и используя эквивалентную схему (см. рис. 1б), несложно определить импеданс Z ЧСП: для полосно-отражающих ЧСП –

$$Z = j \frac{W}{2} Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \quad (3)$$

и для полосно-пропускающих ЧСП –

$$Z = -jW / 2Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right), \quad (4)$$

где W – волновое сопротивление свободного пространства, $k = 2\pi f/c$ – волновое число свободного пространства (c – скорость света в свободном пространстве).

На рис. 1в показана эквивалентная схема ИМП, из которой можно определить входной импеданс $Z_{\text{вх}}$:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{ZZ_{\text{н}}}{Z + Z_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где импеданс нагрузки

$$Z_{\text{н}} = jW \operatorname{tg}(kD). \quad (6)$$

При $Z + Z_{\text{н}} = 0$ входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ обращается в бесконечность, т.е. выполняется условие, при котором коэффициент отражения от ИМП равен +1. Подставив в уравнение $Z + Z_{\text{н}} = 0$ выражения (3) и (6) или (4) и (6), получим уравнения, из которых можно определить резонансные частоты f_1 (или пропорциональные f_1 волновые числа k_1) ИМП, на которых ИМП является идеальным магнитным проводником: для полосно-отражающих ЧСП –

$$\operatorname{tg}(k_1 D) + \frac{1}{2} Q \left(\frac{k_1}{k_0} - \frac{k_0}{k_1} \right) = 0 \quad (7)$$

и для полосно-пропускающих ЧСП –

$$\operatorname{tg}(k_1 D) + 1 / 2Q \left(\frac{k_1}{k_0} - \frac{k_0}{k_1} \right) = 0. \quad (8)$$

Решив уравнения (7) и (8) в предположении электрически тонкого слоя диэлектрика ($k_1 D \ll 1$), получим для полосно-отражающих ЧСП

$$k_1 = k_0 \sqrt{\frac{Q}{Q + 2k_0 D}} \quad (9)$$

и для полосно-пропускающих ЧСП

$$k_1 = k_0 \sqrt{1 + \frac{1}{2Qk_0 D}}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что резонансная частота ИМП может быть как ниже резонансной частоты ЧСП (в случае использования полосно-отражающих ЧСП), так и выше резонансной частоты ЧСП (в случае использования полосно-пропускающих ЧСП).

Полосу рабочих частот ИМП определим как диапазон, в котором фаза коэффициента отражения изменяется в пределах $\pm\pi/2$. Выражения для коэффициента отражения R ИМП несложно получить по формуле

$$R = \frac{Z_{\text{вх}} - W}{Z_{\text{вх}} + W}, \quad (11)$$

используя соотношения (3)–(6):

1) для случая ИМП на основе полосно-отражающих ЧСП –

$$R = \frac{\left[\frac{Q}{2} \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \operatorname{tg}(kD) + j \left(\operatorname{tg}(kD) + \frac{Q}{2} \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \right) \right]^2}{\left[\frac{Q}{2} \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \operatorname{tg}(kD) \right]^2 + \left[\operatorname{tg}(kD) + \frac{Q}{2} \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \right]^2}, \quad (12)$$

2) для случая ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП –

$$R = \frac{\left[\operatorname{tg}(kD) / 2Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) + j \left(1 / 2Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) - \operatorname{tg}(kD) \right) \right]^2}{\left[\operatorname{tg}(kD) / 2Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \right]^2 + \left[1 / 2Q \left(\frac{k}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) - \operatorname{tg}(kD) \right]^2}. \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) следуют уравнения для крайних частот f_+ (или k_+) и f_- (k_-) рабочего диапазона ИМП: для случая ИМП на основе полосно-отражающих ЧСП –

$$\begin{aligned} & \frac{Q}{2} \left(\frac{k_{\pm}}{k_0} - \frac{k_0}{k_{\pm}} \right) \operatorname{tg}(k_{\pm}D) = \\ & = \pm \left[\operatorname{tg}(k_{\pm}D) + \frac{Q}{2} \left(\frac{k_{\pm}}{k_0} - \frac{k_0}{k_{\pm}} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

и для случая ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП –

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg}(k_{\pm}D) / 2Q \left(\frac{k_{\pm}}{k_0} - \frac{k_0}{k_{\pm}} \right) = \\ & = \pm \left[1 / 2Q \left(\frac{k_{\pm}}{k_0} - \frac{k_0}{k_{\pm}} \right) - \operatorname{tg}(k_{\pm}D) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Знаки $\pm$ в уравнениях (14) и (15) соответствуют фазам коэффициента отражения $\pm\pi/2$.

Подставив в уравнения (14) и (15) $k_{\pm}$ в форме $k_{\pm} = k_1 + \Delta_{\pm}$, где $|\Delta_{\pm}|/k_1 \ll 1$, и используя уравнения (7) и (8), получим в приближении электрически тонкого слоя диэлектрика ($k_1D \ll 1$) следующие формулы для оценки рабочей полосы частот ИМП: для случая полосно-отражающих ЧСП –

$$\frac{2\Delta}{k_1} = \frac{2(k_1D)^2}{Q} \quad (16)$$

и для случая полосно-пропускающих ЧСП –

$$\frac{2\Delta}{k_1} = \frac{1}{2Q\sqrt{1 + 1/2 Q k_0 D}}, \quad (17)$$

где $\Delta = |\Delta_+| \approx |\Delta_-|$.

Из формул (16) и (17) следует, что для типичных значений Q и k_1D ИМП на основе полосно-пропускающей ЧСП обладают более широкой полосой рабочих частот, чем ИМП на основе полосно-отражающей ЧСП. Для определения характеристик ИМП по формулам (9), (10), (16) и

(17) следует предварительно найти значения $f_0(k_0)$ и Q , например, путем численного расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения (прохождения) для ЧСП, используемой в конструкции ИМП.

Численные расчеты и измерения будут выполнены для более широкополосных ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП, поскольку опубликованные результаты исследований ИМП этого типа являются наименее полными.

2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ

В качестве расчетных моделей взяты ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП с вырезанными в металлическом экране элементами в форме квадратных щелей (рис. 2а) и “гантелей” (рис. 2б) следующих размеров: $a_1 = 10$ мм, $a_2 = 9$ мм, $P = 12$ мм, $d = 8$ мм, $b = 0.5$ мм, $P_1 = 10$ мм, $P_2 = 24$ мм. Для понижения резонансной частоты эти элементы нагружены дополнительными емкостями C_d в виде металлических накладок прямоугольной формы размером $m \times n = 2 \times 3$ мм² с воздушным зазором δ между накладкой и экраном. Одна из накладок на рис. 2б не показана для наглядности. При изменении величины зазора δ меняется дополнительная емкость C_d , например, при $\delta = 0.02$ мм емкость $C_d \approx 0.5$ см.

На рис. 3 и 4 представлены частотные зависимости коэффициента отражения для ЧСП с элементами в форме квадратных щелей и “гантелей” соответственно при различных значениях дополнительных емкостей. По этим зависимостям найдены резонансные частоты f_0 и вычислены добротности Q , приведенные в таблице. По полученным значениям f_0 и Q с помощью формулы (13) рассчитаны частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП на основе элементов в форме квадратных щелей (рис. 5) “гантелей” (рис. 6). Там же для сравнения приведены численные за-

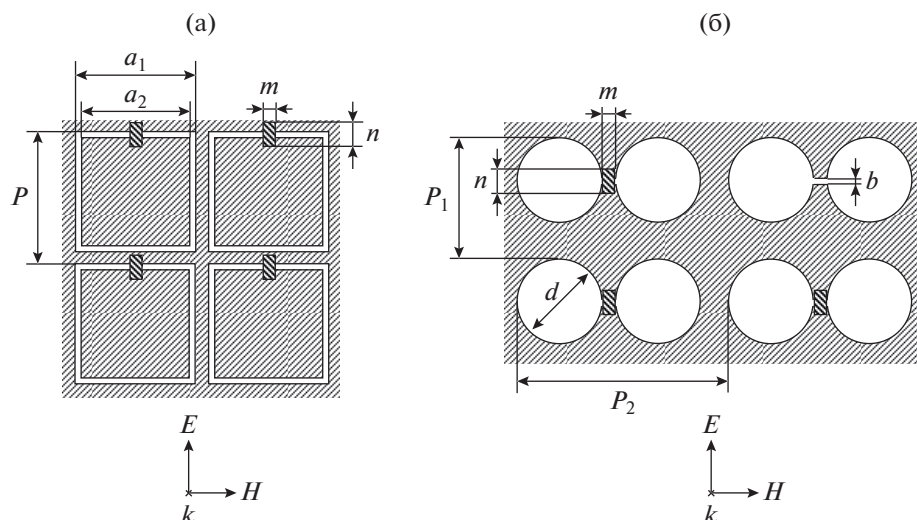


Рис. 2. Расчетные модели ИМП на основе ЧСП с элементами в форме квадратных щелей (а) и “гантелей” (б).

висимости, полученные для соответствующих ИМП. Некоторые расхождения в результатах расчетов связаны с небольшими различиями форм “стандартной” и реальной резонансных кривых.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы полосно-пропускающих ЧСП и на их основе ИМП с элементами в форме квадратных щелей и “гантелей”, нагруженных дополнительными емкостями. Исследовали их характеристики в условиях волноводной передачи. Образец ЧСП с элементами в форме “гантелей” выполнен

на фольгированной лавсановой пленке толщиной 0.05 мм. В качестве дополнительной емкости использовали прямоугольные металлические накладки размером $m \times n = 2 \times 3 \text{ мм}^2$ с обратной стороны лавсановой пленки (рис. 7а). Образец с элементами в форме квадратных щелей выполнен на фольгированном текстолите толщиной 0.5 мм. В качестве дополнительной емкости применены варакторы ВВ857 (рис. 7б). Все отверстия и прорезы выполняются в фольгированном слое.

В образцах ИМП в качестве диэлектрика между ЧСП и металлическим экраном был использован пенополистирол ($\epsilon = 1.1$) толщиной $D = 2; 4; 6; 8 \text{ мм}$ для элементов в форме “гантелей” и $D = 4 \text{ мм}$ для

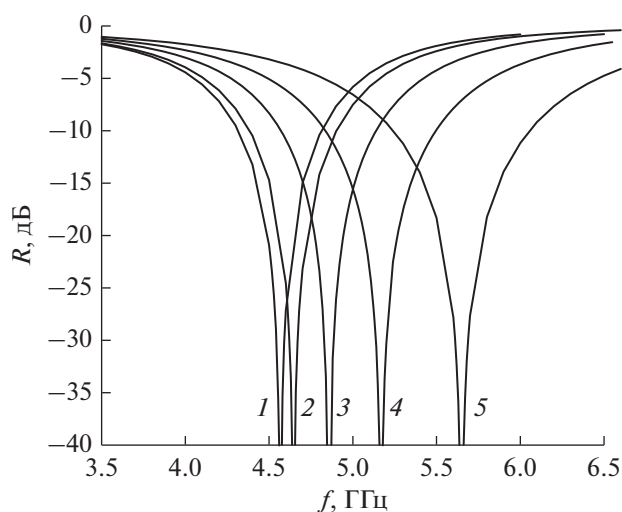


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения для ЧСП с элементами в форме квадратных щелей при $C_d = 7$ (1), 4 (2), 2 (3), 1 (4) и 0.5 см (5).

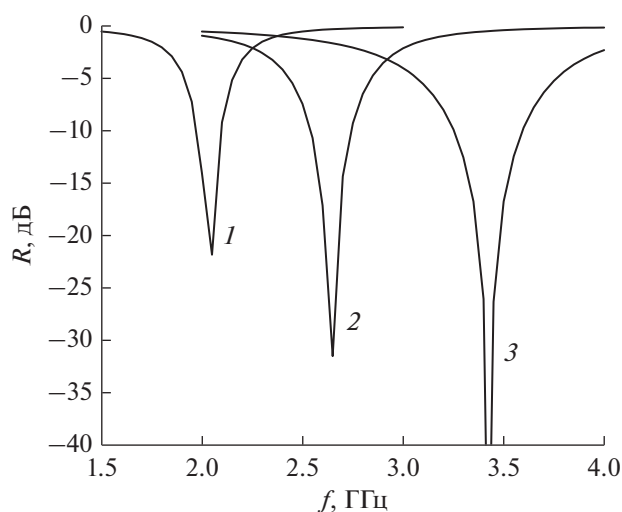


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения для ЧСП с элементами в форме “гантелей” при $C_d = 1$ (1), 0.5 (2) и 0.25 см (3).

Резонансные частоты и добротности ЧСП при различных значениях дополнительной емкости

C_d , см	f_0 , ГГц	Q
ЧСП с элементами в форме квадратных щелей		
7	4.57	4.07
4	4.65	3.96
2	4.86	3.81
1	5.17	3.51
0.5	5.65	3.18
ЧСП с элементами в форме “гантелей”		
1	2.04	6.75
0.5	2.62	5.48

элементов в форме квадратных щелей. Внешний вид образцов ИМП обоих типов и их размеры (в мм) показаны на рис. 7.

Были измерены частотные зависимости коэффициента отражения от ИМП в волноводах сечением 34×72 мм² и 24×48 мм².

Образец с элементами в форме “гантелей” помещали внутрь волновода сечением 34×72 мм², а образец с элементами в форме квадратных щелей был плотно прижат к открытому концу волновода сечением 24×48 мм². Поскольку модуль коэффициента отражения от ИМП равен 1, то для фиксации резонансных частот на поверхности ИМП размещали резистивную пленку, толщина которой 70 мкм и комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 15 - j20$, измеренная на частоте 4 ГГц. На рис. 8 представлены частотные зависимости коэффициента отражения от данной системы при различной толщине D диэлектрического слоя. Как видим, при увеличении толщины D ди-

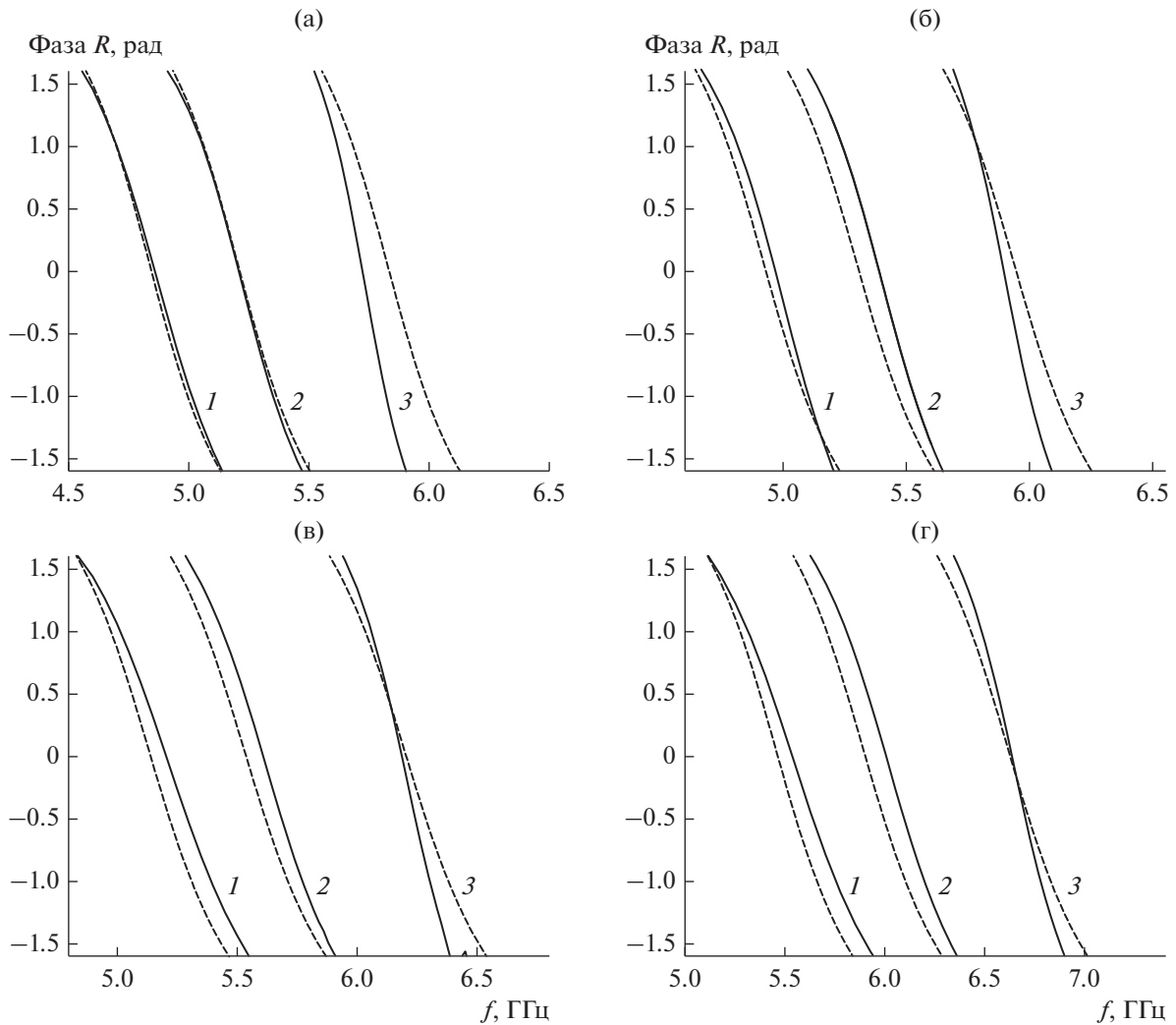


Рис. 5. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП на основе ЧСП с элементами в форме квадратных щелей при $C_d = 7$ (а), 4 (б), 2 (в) и 1 см (г), рассчитанные численно (сплошные кривые) и по приближенной формуле (13) (штриховые) при $D = 8$ (1), 4 (2) и 2 мм (3).

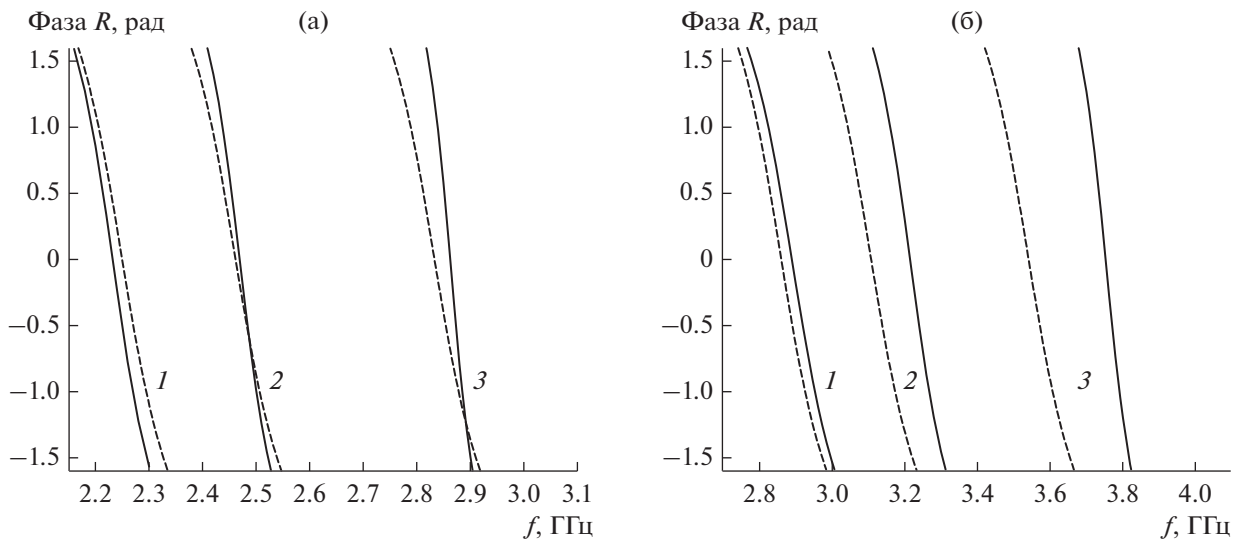


Рис. 6. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП на основе ЧСП с элементами в форме “гантелей” при $C_d = 1$ (а), 0.5 см (б), рассчитанные численно (сплошные кривые) и по приближенной формуле (13) (штриховые) при $D = 8$ (1), 4 (2) и 2 мм (3).

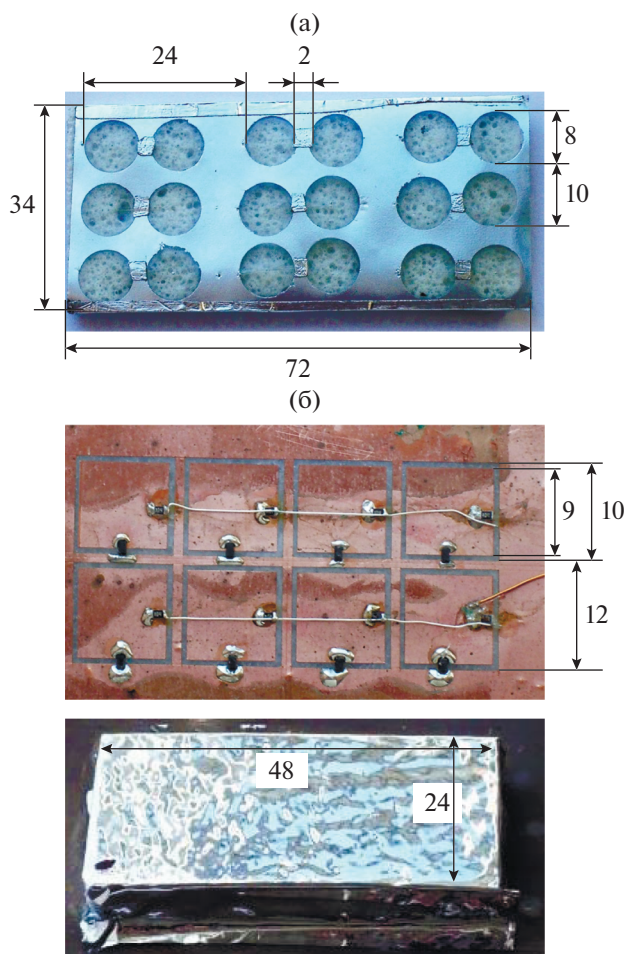


Рис. 7. Внешний вид экспериментальных образцов ИМП с элементами в форме “гантелей” (а) и в форме квадратных щелей, вид сверху и вид снизу (б), размеры в мм.

электрического слоя резонансная частота ИМП снижается, приближаясь к резонансной частоте ЧСП (кривая 1).

Аналогичный эффект снижения резонансной частоты ИМП с элементами ЧСП в форме квадратных щелей наблюдался и при изменении дополнительной емкости в элементах, когда эта емкость растет с уменьшением управляющего напряжения на варакторах (рис. 9).

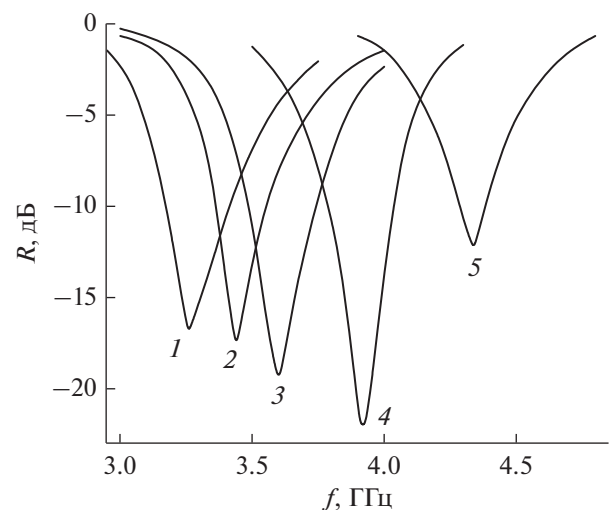


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента отражения от образца ИМП в форме “гантелей” с резистивной пленкой при $D = 8$ (2), 6 (3), 4 (4) и 2.5 мм (5), а также от ЧСП (кривая 1).

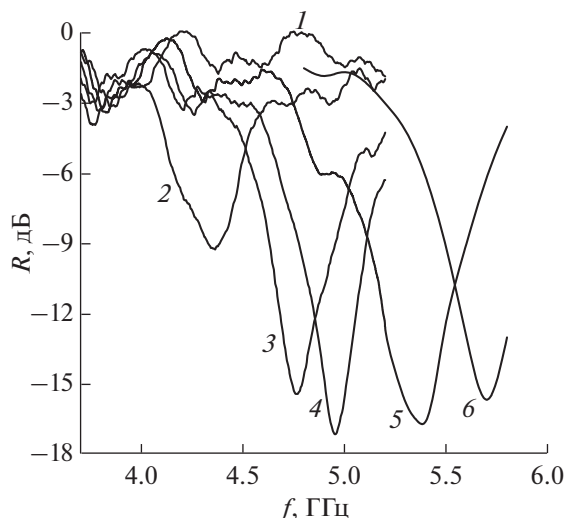


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента отражения от образца ИМП в форме квадратных щелей, нагруженных варакторами с резистивной пленкой при различных управляющих напряжениях на варакторах: $U = 0$ (1), 8 (2), 13 (3), 15 (4), 18 (5) и 29 В (6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование функциональных связей между характеристиками ЧСП и характеристиками ИМП на их основе показало, что более широкой полосой рабочих частот обладают ИМП на основе полотно-пропускающих ЧСП. При этом полоса рабочих частот таких ИМП лежит выше резонансной частоты соответствующей ЧСП. Полученные аналитические выражения позволяют оценить характеристики ИМП (резонансные частоты и рабочие полосы) по характеристикам, используемым в конструкции ЧСП (резонансные частоты и добротности). Результаты численного расчета частотных зависимостей коэффициента отражения от ИМП с щелевыми элементами в форме «гантелей» и квадратов, нагруженных дополнительными емкостями, неплохо соответствуют результатам расчета по аналитическим выражениям. Расчеты показали, что ширина рабочей полосы ИМП определяется в основном добротностью ЧСП и в

меньшей степени толщиной диэлектрического слоя, т.е. толщиной ИМП.

Результаты эксперимента подтвердили возможность управления рабочей полосой ИМП как путем изменения толщины диэлектрического слоя, так и путем изменения дополнительных емкостей, нагружающих щелевые элементы. Так, применение в качестве дополнительных емкостей варакторов типа ВВ857 позволило обеспечить перестройку резонансных частот ИМП с элементами в форме щелевых квадратов в интервале от 4.3 до 5.7 ГГц.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.F.J. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
2. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
3. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 4. P. 1377.
4. *Clavijo S., Diaz R.E., McKinzie W.E.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2678.
5. *Feresidis A.P., Goussetis G., Shenhong Wang, Vardaxoglou J.C.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 1. P. 209.
6. *Ying Zhang, von Hagen J., Younis M. et al.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2704.
7. *Fan Yang, Rahmat-Samii Y.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2691.
8. *Казанцев Ю.Н., Анлеталин В.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
9. *Hiranandani M.A., Yakovlev A.B., Kishk A.A.* // IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. 2006. V. 153. № 5. P. 487.
10. *Kern D.J., Werner D.H., Monorchio A. et al.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 1. P. 8.
11. *Sohn J.R., Kim K.Y., Tae H.-S., Lee H.J.* // Progress in Electromagnetics Research, PIER. 2006. V. 61. P. 27.
12. *Fei-Ran Yang, Kuang-Ping Ma, Yongxi Qian, Itoh T.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2092.