

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

СТРУКТУРА ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА С ВЫСОКОЙ УГЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

© 2020 г. Ю. Н. Казанцев^{а, *}, Г. А. Крафтмахер^а, В. П. Мальцев^а, В. С. Солосин^а^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.

После доработки 24.12.2018 г.

Принята к публикации 11.01.2019 г.

Рассмотрен искусственный магнитный проводник на основе емкостной решетки, период которой велик по сравнению с расстоянием между решеткой и экраном. Показано, что электромагнитное поле в такой структуре идентично полю в тонком плоском волноводе, а резонансные частоты определяются в основном периодом и расстоянием между соседними элементами решетки. Численный расчет частотной зависимости фазы коэффициента отражения подтвердил свойство структуры как искусственного магнитного проводника с высокой угловой устойчивостью резонансной частоты: так, смещение резонансной частоты не превышает 1.5% при изменении угла падения волны в интервале $0^\circ \dots 60^\circ$. Измерения, проведенные на волноводных моделях, подтвердили свойства структуры и как искусственного магнитного проводника, и как резонансного радиопоглопителя.

DOI: 10.31857/S0033849420030079

ВВЕДЕНИЕ

Искусственный магнитный проводник (ИМП) — это плоская структура, для которой коэффициент отражения электромагнитной волны (по электрическому полю) равен $+1$, а не -1 , как в случае отражения от электропроводящей плоскости. Типичная конструкция ИМП представляет собой емкостную решетку (либо пару решеток), расположенную на слое диэлектрика, металлизированном с противоположной стороны [1–6]. Такая конструкция обладает свойствами ИМП в ограниченной рабочей полосе частот вблизи резонансной частоты, которая, в частности, зависит от угла падения волны. Эта зависимость может быть снижена с помощью проводников, связывающих элементы решетки с металлическим экраном [7–13], что, однако, усложняет конструкцию ИМП. Поэтому поиск и анализ других способов снижения угловой зависимости резонансной частоты представляется достаточно важным.

Цель данной работы — изучить свойства ИМП-структуры на основе емкостных решеток, в которой период решетки много больше расстояния между решеткой и металлическим экраном.

1. ИМП НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОЙ РЕШЕТКИ

Типовая схема ИМП на основе решетки из квадратных металлических элементов дана на рис. 1а. Обычно размер элемента решетки $2a$ и период P

сравнимы с толщиной D структуры ИМП, а промежуток между элементами $\delta \ll 2a$. Причем все эти размеры малы по сравнению с резонансной длиной волны. Типичная картина электрического поля на резонансной длине волны в сечении 1-1 схематически представлена на рис. 1в. Резонанс происходит в тонком слое диэлектрика с проницаемостью ϵ между решеткой, которую можно рассматривать как однородную полупрозрачную поверхность, и металлическим экраном. Резонансная частота f_p определяется характеристиками решетки и толщиной D . При нормальном падении волны на ИМП эта частота вычисляется по следующей приближенной формуле [14]:

$$f_p = c/4\sqrt{\pi^3 C_0 DP}, \quad (1)$$

где $C_0 = \frac{(\epsilon + 1) \ln(2P/\pi\delta)}{4\pi^2}$, c — скорость света.

При наклонном падении волны резонансная частота и, соответственно, положение полосы рабочих частот ИМП существенно изменяются, поскольку меняется как “прозрачность” решетки, так и эффективная электрическая толщина слоя.

Совершенно иная картина электрического поля на резонансной частоте имеет место в случае, когда период и размеры элемента решетки существенно превышают толщину ($2a, P \gg D$). Схематически картина поля в этом случае изображена на рис. 1б. Квадратный элемент решетки и металлический экран образуют плоский волновод с

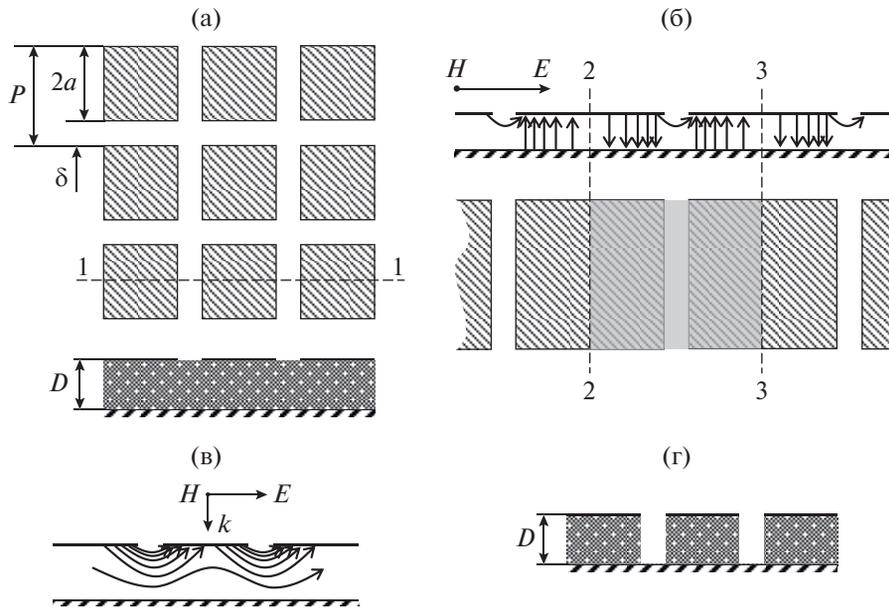


Рис. 1. Искусственный магнитный проводник: а – типовая схема, б – картина электрического поля в сечении 1-1 при $2a, P \gg D$, в – типичная картина электрического поля в сечении 1-1, г – схема при заполнении диэлектрическим материалом только пространства под элементами решетки.

волной типа *TEM*, и эта волна резонирует, преотражаясь от краев элемента. Отметим, что слой диэлектрика между решеткой и экраном может быть неоднородным, как показано на рис. 1г. В двух крайних случаях ($\delta \geq D$ либо величина δ чрезвычайно мала) можно аналитически оценить значение резонансной частоты f_p .

В первом случае для грубой оценки f_p можно считать, что коэффициент отражения *TEM*-волны от открытого конца плоского волновода по электрическому полю равен +1, и тогда

$$f_p = c/4a\sqrt{\epsilon}. \quad (2)$$

В случае $\epsilon \approx 1$ для расчета f_p можно использовать следующее более точное уравнение

$$2ak_p = \pi - \frac{2k_p D}{\pi} \left(0.423 + \ln \frac{2\pi}{k_p D} \right) \quad (3)$$

для волнового числа $k_p = 2\pi f_p/c$, в котором учтена фаза коэффициента отражения от открытого конца плоского волновода, найденная в [15].

При уменьшении зазора между элементами решетки резонансная частота снижается, так что при очень малых значениях δ резонансная длина волны может стать много больше размера элемента $2a$. Для оценки f_p в этом крайнем случае выделим объем между элементами решетки и экраном с помощью бесконечно тонких электропроводящих плоскостей (2–2) и (3–3), перпендикулярных плоскости решетки и проведенных через середины соседних элементов, как показано на рис. 1в. На резонансной частоте энергия электри-

ческого поля будет сосредоточена вблизи зазора, а магнитного поля (практически однородного) – в основной части выделенного объема. Резонансная частота f_p может быть тогда вычислена по известной формуле

$$f_p = c/2\pi\sqrt{LC}, \quad (4)$$

где

$$C = \frac{a}{2\pi^2} (\epsilon + 1) \ln(2P/\pi\delta) \quad (5)$$

– емкость между соседними квадратными элементами,

$$L = 4\pi D \quad (6)$$

– индуктивность выделенного объема.

В качестве примера возьмем структуры ИМП со следующими параметрами: $P = 34$ мм, $D = 6.5$ мм, $\epsilon = 1$, $2a = 26$ мм ($\delta = 8$ мм) либо $2a = 33.99$ мм ($\delta = 0.01$ мм). Оценка резонансных частот, проведенная по уравнению (3) для большого зазора и по формулам (4)–(6) для малого зазора дает $f_p = 4$ и 1.4 ГГц соответственно. Сужение зазора способствует уменьшению связи резонаторов с внешним пространством и, следовательно, уменьшению полосы рабочих частот ИМП. Поэтому наибольший интерес представляет случай достаточно больших зазоров между элементами решетки ИМП. Этот случай интересен также тем, что резонансная частота определяется только размерами отдельных резонаторов, образованных элементами решетки и экраном, и не должна зависеть от угла падения волны на ИМП.

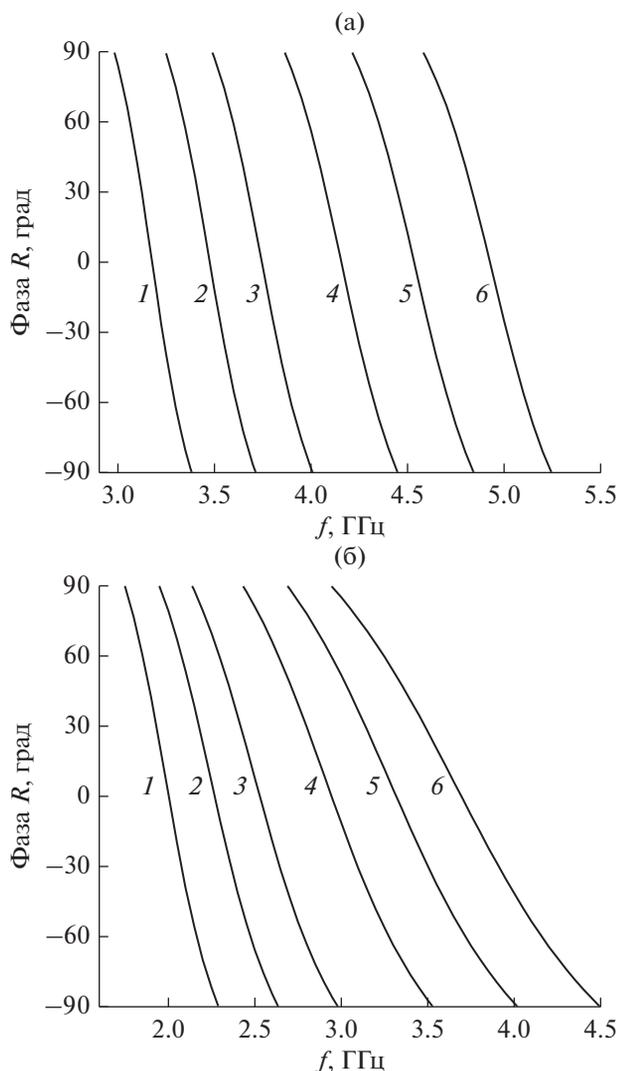


Рис. 2. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП для моделей типа 1, $D = 2$ мм (а), и типа 2, $D = 6.5$ мм (б) для $\epsilon = 1$ и $\delta = 0.3$ (1), 1 (2), 2 (3), 4 (4), 6 (5) и 8 мм (6).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

В численных расчетах использованы модели ИМП двух типов. Тип 1: $P = 34$ мм, $D = 2$ мм. Тип 2: $P = 34$ мм, $D = 6.5$ мм.

Целью этих расчетов было подтверждение свойств моделей как искусственных магнитных проводников с высокой угловой устойчивостью характеристик отражения.

Для моделей типа 1 и типа 2 на рис. 2а и 2б соответственно даны частотные зависимости фазы коэффициента отражения при $\delta = 0.3, 1, 2, 4, 6, 8$ мм. Диэлектрическая проницаемость слоя ϵ между решеткой и экраном принята равной 1.

Из приведенных зависимостей следует, что с увеличением связи резонирующих объемов со свободным пространством:

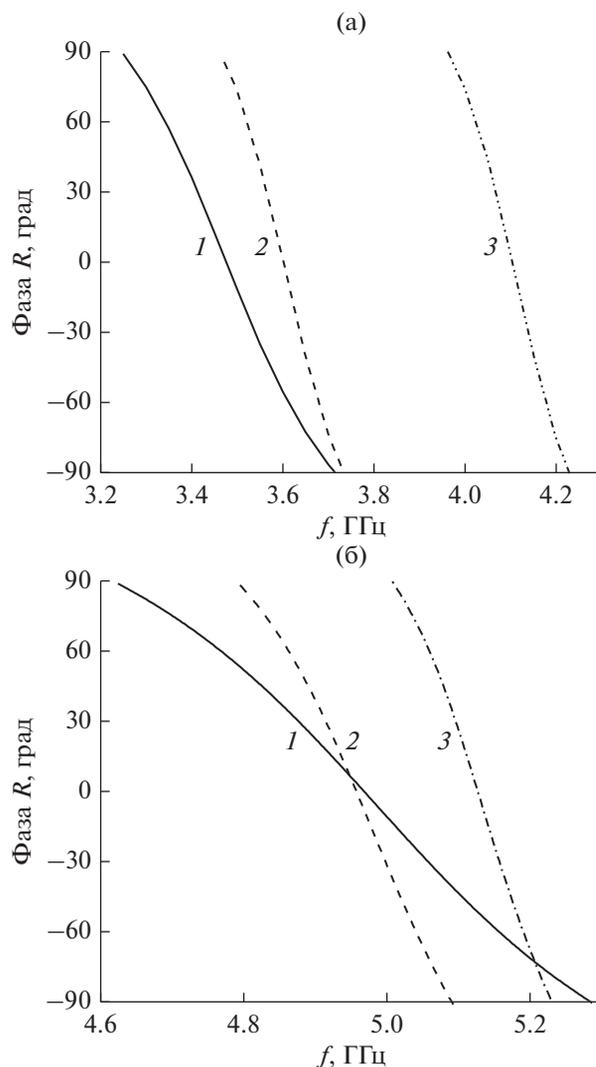


Рис. 3. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП для $\epsilon = 1$ и $D = 2$ мм при $\delta = 1$ (а) и 8 мм (б) и при углах падения 0° (кривая 1) и 45° (2, 3) для TE - (2), TM -поляризации (3).

– при увеличении зазора δ ширина полосы рабочих частот ИМП растет:

– при одинаковых значениях зазора δ полосы рабочих частот более толстых моделей типа 2 шире, чем моделей типа 1.

На рис. 3а и 3б представлены частотные зависимости фазы коэффициента отражения для модели типа 1 с размерами щели $\delta = 1$ и 8 мм соответственно при углах падения 0° и 45° плоской волны TE - и TM -поляризации. При TE -поляризации вектор \vec{E} перпендикулярен плоскости падения, а при TM -поляризации вектор \vec{H} перпендикулярен плоскости падения. Из сравнения рис. 3а и 3б следует, что сдвиги резонансных частот при изменении угла падения от 0° до 45° для $\delta = 1$ мм составили 3%

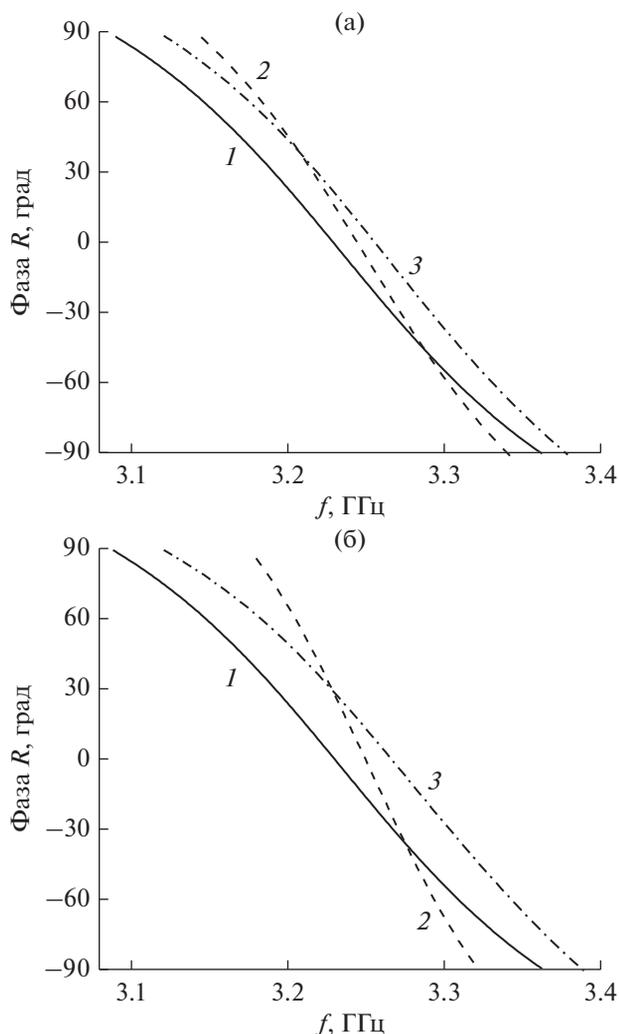


Рис. 4. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП для $\epsilon = 2.55$, $D = 2$ мм и $\delta = 8$ мм при различных углах падения: а) 0° (1) и 45° (2, 3); б) 0° и 60° (2, 3), для TE - (кривые 2) и TM -поляризации (кривые 3).

(TE -поляризация) и 15% (TM -поляризация); для $\delta = 8$ мм эти сдвиги составили соответственно 0.5 и 3%, т.е. увеличение зазора между элементами решетки от 1 до 8 мм привел к пятикратному снижению величины сдвига резонансных частот.

Отметим, что при больших углах падения в случае воздушного слоя между решеткой и экраном ($\epsilon = 1$) в отраженном поле присутствует боковая лепесток, которого в реальном случае, при использовании полистирола ($\epsilon = 2.55$) в качестве материала между решеткой и экраном, не будет. В этом случае был сделан расчет в диапазоне углов падения $0^\circ \dots 60^\circ$.

На рис. 4а приведены частотные зависимости фазы коэффициента отражения от модели типа 1 при $\delta = 8$ мм и $\epsilon = 2.55$ для углов падения 0° и 45°

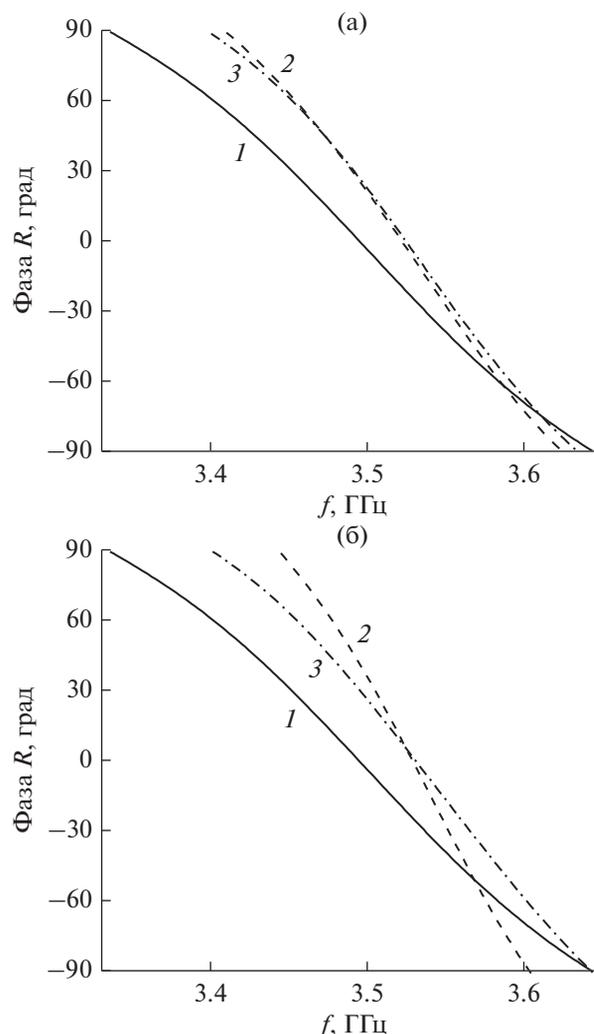


Рис. 5. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП для $D = 2$ мм и $\delta = 8$ мм (материал с $\epsilon = 2.55$ только под элементами решетки), при различных углах падения: а) 0° (1) и 45° (2, 3); б) 0° и 60° (2, 3), для TE - (кривые 2) и TM -поляризации (кривые 3).

плоской волны TE - и TM -поляризации соответственно. На рис. 4б – такие же кривые для углов падения 0° и 60° . На рис. 5а и 5б аналогичные зависимости для случая, отличающегося от предыдущего лишь тем, что материал с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.55$ помещен только под элементами решетки (см. рис. 1г). Из графиков, приведенных на рис. 4 и 5 следует, что в интервале углов падения $0^\circ \dots 60^\circ$ сдвиг резонансных частот ИМП, т.е. центров диапазонов рабочих частот, не превышает 1.5% для поляризаций обоих типов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью эксперимента была реализация характеристик ИМП рассматриваемого типа на модели,

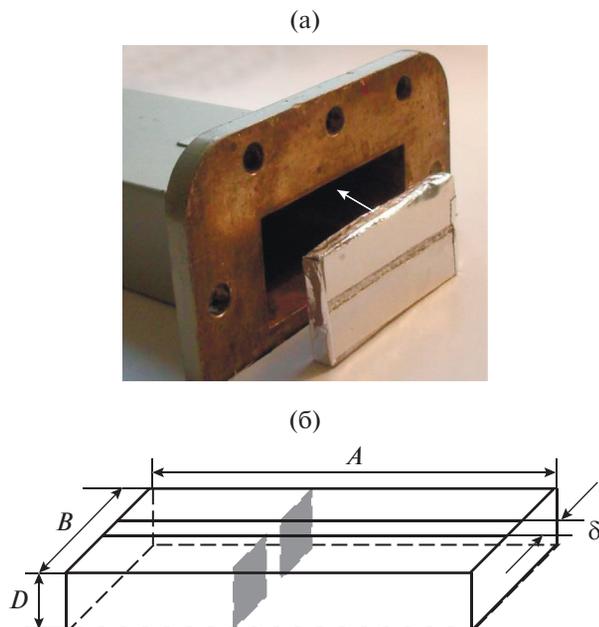


Рис. 6. Модель ИМП для волноводных измерений.

адаптированной к условиям волноводной передачи (рис. 6а). Такая модель представляет собой металлизированный по всем граням диэлектрический прямоугольный параллелепипед с размерами A, B, D (рис. 6б), где размеры A и B совпадают с поперечными размерами волновода 72×34 мм. На фронтальной грани прорезана щель длиной A и шириной δ , имитирующая зазор между элементами решетки ИМП. Такой параллелепипед, будучи вставлен в волновод, является приближенной имитацией ИМП с одномерной емкостной решеткой бесконечных размеров с периодом $P = B$ из щелей шириной δ в металлическом экране. В качестве диэлектрического материала параллелепипеда использовались пенополистирол ($\epsilon = 1.1$), полистирол ($\epsilon = 2.55$) либо гетинакс ($\epsilon' = 3.6, \epsilon'' = 0.3$).

Резонансные частоты такого образца ИМП определялись по минимуму на частотной характеристике модуля коэффициента отражения в волноводе. В случае образца с малыми потерями (пенополистирол) внутрь образца внедрялись

Таблица 1. Измеренные и рассчитанные резонансные частоты образцов ИМП с пенополистиролом $D = 6.5$ мм

δ , мм	$f_{р\text{ изм}}$	$f_{р\text{ расч}}$
0.3	2.3	—
2	3.2	—
4	3.4	—
6	3.7	4.0
8	4.1	4.2
12	4.7	4.7

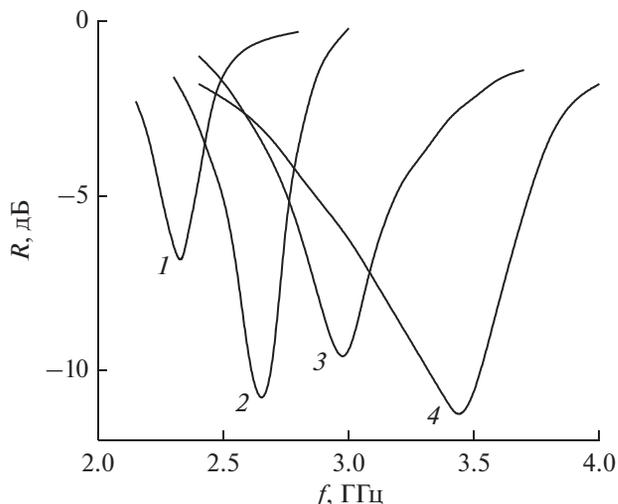


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения от волноводного образца ИМП (полистирол) с резистивной пленкой перед ним, $D = 2$ мм, $\delta = 0.3$ (1), 2 (2), 4 (3) и 8 мм (4).

небольшие фрагменты резистивной пленки (показано серым цветом на рис. 6б). Результаты измерения резонансных частот в таких образцах толщиной $D = 6.5$ мм для нескольких значений ширины щели δ представлены в табл. 1. Там же для значений $\delta \geq D$ приведены резонансные частоты, полученные с помощью уравнения (3), модифицированного для условий волноводной передачи:

$$2a\sqrt{k_p^2\epsilon - (\pi/A)^2} = \pi - \frac{2k_p D}{\pi} \left(0.423 + \ln \frac{2\pi}{k_p D} \right). \quad (7)$$

Отражательные свойства образца как ИМП тестировались в присутствии резистивной пленки вблизи его поверхности, т.е. там, где электрическое поле максимально. В качестве диэлектрического материала был использован полистирол, а в качестве резистивной пленки — углеродистая бумага толщиной 60 мкм и удельной электропроводимостью $\sigma = 20$ См/м.

На рис. 7 представлены измеренные частотные зависимости коэффициента отражения для нескольких значений δ при расположении резистивной пленки на расстоянии 5 мм перед образцом. Как и следовало ожидать, вблизи резонансных частот, т.е. в области рабочих частот ИМП, наблюдается сильное поглощение энергии в резистивной пленке.

Одним из важных отличий рассматриваемых здесь ИМП от традиционных является то, что электрическое поле в диэлектрическом слое между решеткой и экраном на резонансных частотах может становиться большим, а следовательно, большим может быть и поглощение энергии в этом слое. Поэтому исследование радиопоглощающих свойств

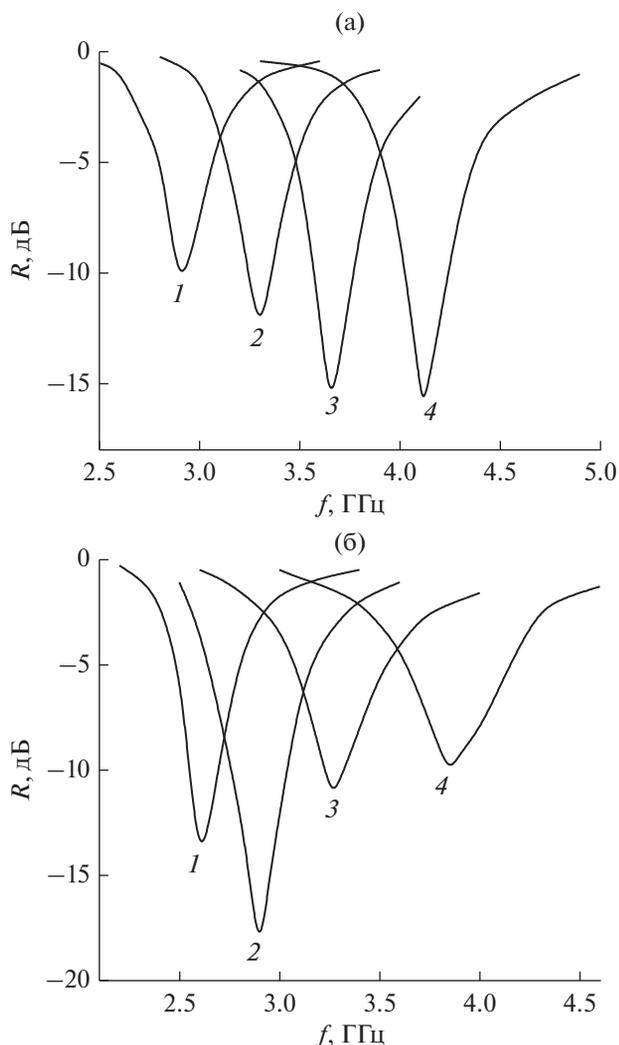


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения от волноводного образца ИМП в случае материала с потерями (гетинакс): а) $D = 2$ мм, $\delta = 9$ (1), 13 (2), 15 (3) и 17 мм (4); б) $D = 4$ мм, $\delta = 8$ (1), 10 (2), 14 (3) и 18 мм (4).

образцов, в которых использован диэлектрик с потерями, представляет отдельный интерес.

На рис. 8а и 8б показаны частотные зависимости величины коэффициента отражения от образцов толщиной 2 и 4 мм соответственно, в которых в качестве диэлектрика использован гетинакс с достаточно умеренным значением потерь. На этих графиках прослеживается изменение глубины резонансных “провалов” при изменении ширины щели δ . Это обусловлено изменением связи между резонатором и волноводом, что меняет соотношение между тепловыми потерями и потерями на излучение в резонаторе, причем наибольшая глубина провала соответствует равенству тепловых потерь и потерь на излучение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приближенная оценка резонансных частот ИМП на основе емкостных решеток позволила определить условия, при которых эти частоты в основном зависят от размеров структуры ИМП и слабо зависят от угла падения волны. Эти условия состоят в следующем:

- период и размер элементов решетки велики по сравнению с расстоянием между решеткой и экраном, т.е. по сравнению с толщиной ИМП,
- зазор между соседними элементами решетки существенно превышает толщину ИМП.

Численные расчеты частотной зависимости фазы коэффициента отражения от предложенных структур бесконечной площади при нормальном и наклонном падении плоской волны показали хорошую угловую устойчивость характеристик этих структур как искусственных магнитных проводников. Так, в конкретном случае использования полистирола в слое диэлектрика между решеткой и экраном смещение резонансной частоты не превышает 1.5% в интервале углов падения волны $0^\circ \dots 60^\circ$ для TM - и TE -поляризации.

Измерение частотных зависимостей коэффициента отражения от моделей предложенных структур в условиях волноводной передачи подтвердило их свойства и как ИМП, и как резонансных радиопоглотителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yung F.-R., Ma K.-P., Qian Y. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2092.
2. Coccioli R., Yung F.-R., Ma K.-P., Itoh T. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2123.
3. Zhang Y., von Hagen J., Younis M. et al. // IEEE Trans. 2003. V. MTT-51. № 10. P. 2704.
4. Feresidis A.P., Goussetis G., Wang Sh., Vardaxoglou J.C. // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 1. P. 209.
5. Kern D.J., Werner D.H., Monorchio A. et al. // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 1. P. 8.
6. Казанцев Ю.Н., Анлеталин В.Н. // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
7. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.F.J. et al. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
8. Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E. // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
9. Clavijo S., Diaz R.E., McKinzie W.E. // IEEE Trans. 2001. V. AP-51. № 10. P. 2678.
10. Yang F., Rahmat-Samii Y. // IEEE Trans. 2003. V. MTT-51. № 10. P. 2691.
11. Simovski C.R., de Maagt P., Tretyakov S.A. et al. // Electronics Lett. 2004. V. 40. № 2. P. 92.
12. Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E. // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 10. P. 1377.
13. Kushwaha N., Kumar R. // J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl. 2014. V. 13. № 1. P. 16.
14. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П. // РЭ. 2019. Т. 64. № 6. С. 543.
15. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. М.: Сов. радио, 1966.