

Усенко Ольга Александровна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: Usenko_olga77@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; кафедра микропроцессорных систем; к.т.н.; доцент.

Usenko Ol'ga Aleksandrovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; the department of microprocessor systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 683.22.15

Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, В.А. Черемисов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ВИДЕ КВАДРАТНЫХ
ДВОЙНЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

Метаматериалы – это искусственные материалы, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Они представляют собой набор элементов разнообразных форм, объединенных в периодические структуры. Необычайные их свойства обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в гетерогенной среде, наполненной включениями, которые имеют специальную форму, обеспечивающую резонансное возбуждение токов во включениях. Исследовано рассеяние плоской монохроматической волны на периодической решетке из квадратных двойных резонаторов. Показано, что в такой решетке наблюдается резонансное отражение падающей волны. Рассмотрено влияние геометрических размеров решетки (высота элементов и ширина разреза) на положение минимума коэффициента прохождения. Приведены результаты численного моделирования периодических структур с использованием пакета FEKO. Результаты представлены в виде обобщенных номограмм для периодических структур, расположенных в свободном пространстве и на подложке.

Метаматериал; частотно-селективная поверхность; периодические структуры.

N.N. Kisel', S.G. Grishchenko, V.A. Cheremisov

**RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF FREQUENCY-SELECTIVE
SURFACES ON THE BASIS OF ELEMENTS IN THE FORM OF SQUARE
DOUBLE RESONATORS**

Metamaterials are artificial materials engineered to have properties that may not be found in nature. They are assemblies of multiple individual elements fashioned from conventional microscopic materials which it are usually arranged in periodic patterns. Unusual properties due to the resonant interaction of an electromagnetic wave propagating in a heterogeneous environment filled with inclusions, which have a special shape that provides a resonant excitation currents in the inclusions. Dispersion of a plane wave on a periodic structure from square double resonators is investigated. It is shown that in such structure resonant reflection of a falling plane wave is observed. Influence of the geometrical sizes of elements of structure (height of elements and section width) on the provision of a minimum of coefficient of transmission is considered. Results of numerical modeling of periodic structures with software FEKO use are given. Results are presented in the form of the generalized nomograms for the periodic structures located in a free space and on a dielectric substrate.

Metamaterial; frequency-selective surface; periodic structure.

Метаматериалы – это искусственные материалы со свойствами, которые невозможно реализовать для материалов, существующих в природе, представляющие упорядоченный набор элементов различной геометрии. Плотность располо-

жения, ориентация в пространстве и форма элементов, из которых состоит метаматериал, определяют его уникальные электрофизические свойства. Изменяя эти параметры, можно создавать искусственные материалы с регулируемыми свойствами, не характерными для исходных образующих их элементов, например отрицательные эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости искусственной структуры. Использование метаматериалов позволяет проектировать СВЧ-устройства (фильтры, фазовращатели и др.) с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями [1–3].

Одним из примеров метаматериалов является материал на основе кольцевых и кольцеподобных структур, например квадратные разрезные элементы (SRR – split-ring resonators, рис. 1). Такие элементы представляют интерес как типовые базовые элементы для создания искусственных диэлектриков, их можно рассматривать как колебательные LC -контуры, резонансная частота которых определяется геометрическими параметрами колец (разомкнутых рамок).

Емкость между двумя кольцами (рамками) компенсируется их индуктивностью. Наведенный магнитный момент, перпендикулярный поверхности элементов, создает магнитное поле, которое при определенных условиях (в зависимости от размеров кольца) противодействует (препятствует) исходному, что приводит к отрицательным эффективным значениям магнитной проницаемости μ материала. Частотный диапазон реализации отрицательного μ определяется геометрическими размерами элемента (толщины, величины разрыва) при заданной геометрии базового элемента.



Рис. 1. Базовый элемент частотно-селективной поверхности в виде двойных кольцевых и квадратных резонаторов

В данной работе было выполнено 3D-моделирование метаматериала на основе прямоугольных кольцевых резонаторов. Периодическая структура состоит из так называемых «ячеек» определенного размера, «ячейки» расположены на диэлектрике, представляют собой систему из двух очень тонких квадратных колец с разрезом на одной из сторон. Одно кольцо находится внутри другого, величина разреза одинакова в обоих кольцах. Размеры ячейки заданы параметрами: $a = 2,5$ мм – размер квадратной диэлектрической подложки, $b = 2,1$ мм – размер внешнего квадратного кольца, $c = 1,4$ мм – размер внутреннего квадратного кольца, $w = 0,35$ мм – расстояние между кольцами.

Периодическая система из ячеек исследуется при различных размерах рамок внутри ячейки, а именно при изменении величины зазора d от 0,47 мм до 0,12 мм с шагом в 0,05 мм; а также при изменении значения толщины кольца h от 0,01 мм до 0,13 мм с шагом 0,02 мм.

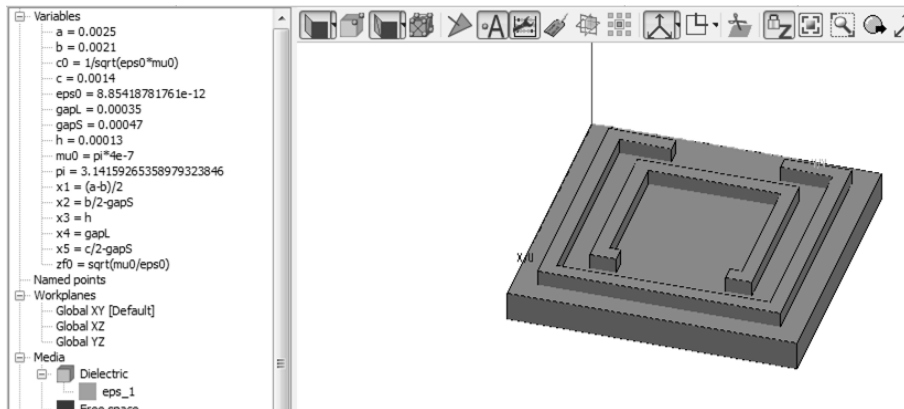


Рис. 2. Ячейка периодической структуры в программе FEKO

Номер кривой на рис. 1	Толщина колец, мм	Номер кривой на рис. 2	Величина зазора, мм
1	0,13	1	0,47
2	0,11	2	0,42
3	0,09	3	0,37
4	0,07	4	0,32
5	0,05	5	0,27
6	0,03	6	0,22
7	0,01	7	0,17
8	0	8	0,12

На основе полученных численных результатов были построены обобщенные зависимости (рис. 3, 4) для определения частотного положения минимума коэффициента прохождения от геометрических параметров базового элемента (толщины рамок, величины зазора в рамке).

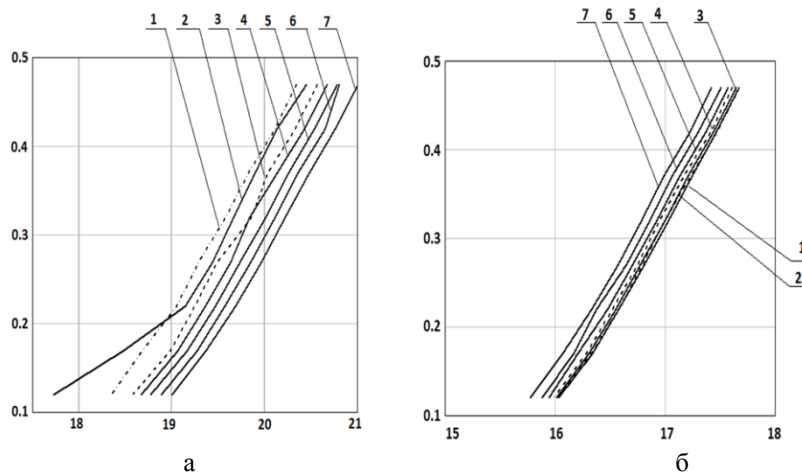


Рис. 3. Семейство зависимостей частотного положения минимума коэффициента прохождения от величины зазора при постоянном значении толщины колец: а – диэлектрическая подложка – свободное пространство; б – на диэлектрической подложке $\epsilon=2$

Как видно из графиков, зависимость практически квазилинейная, с увеличением размера зазора при неизменной толщине колец системы, частоты, на которых наблюдается минимум коэффициента прохождения, смещается в сторону более высоких частот. Изменение размера зазора в 2 раза приводит к изменению частотного положения минимума приблизительно на 10 % для случая расположения элементов в свободном пространстве и приблизительно на 5 % при расположении в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью 2. Из рис. 1 видно, что уменьшение толщины элементов колец приводит к смещению минимума коэффициента прохождения в область более высоких частот для структур в свободном пространстве и в сторону более низких частот для структур, расположенных в диэлектрике.

Ниже приведено семейство зависимостей положения минимума коэффициента прохождения от толщины элементов рамок при фиксированной величине зазора (рис. 4). Как видно из графиков, характеристики по-прежнему квазилинейные, размещение структуры в диэлектрик приводит к тому, что меняется угол наклона характеристик: в свободном пространстве при фиксированном значении зазора уменьшение толщины элементов приводит к смещению положения минимума в сторону более высоких частот, а при расположении в диэлектрике наблюдается обратное явление. При уменьшении величины зазора в рамках значения частоты, при которой коэффициент прохождения минимален, смещается в сторону более низких частот.

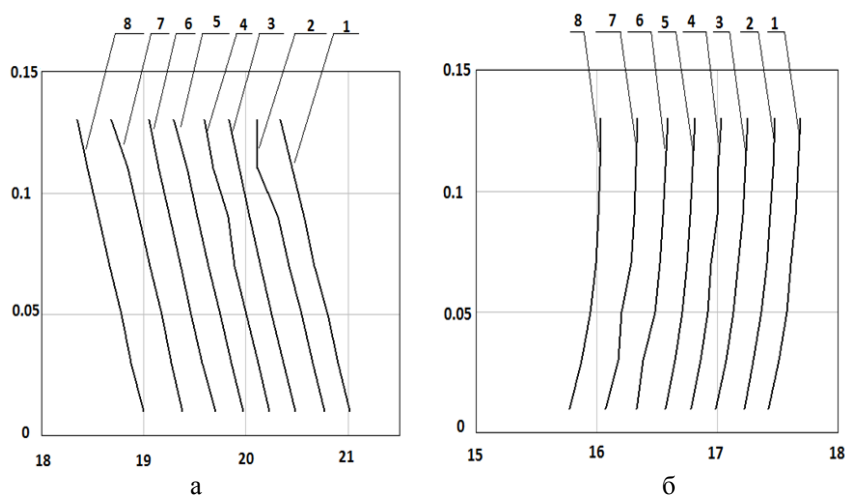


Рис. 4. Семейство зависимостей частотного положения минимума коэффициента прохождения от толщины колец при постоянном значении величины зазора на диэлектрической подложке: а – диэлектрическая подложка – свободное пространство; б – на диэлектрической подложке $\epsilon=2$ –

Таким образом, на основе полученного численного моделирования в пакете **FEKO** проанализированы основные закономерности влияния ширины зазора, толщины элементов и параметров диэлектрической подложки на частотное положение минимума коэффициента прохождения частотно-селективной структуры в виде сдвоенных разомкнутых рамок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Solymar L. and Shamonina E. Waves in Metamaterials* Published in the United States by Oxford University Press Inc., New York. 2009.

2. *Nader Engheta, Richard W. Ziolkowski* Metamaterials. Physics and Engineering Explorations Published by John Wiley & Sons, Inc. Published simultaneously in Canada. 2009.
3. *Панычев А.И.* Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 31-42.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Зори.

Кисель Наталья Николаевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Грищенко Сергей Григорьевич – радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

Черемисов Виталий Анатольевич – радиотехнический факультет, студент.

Kisel' Natalia Nikolayevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

Grishchenko Sergey Grigorievich – the college of radio engineering; dean; cand. of eng. sc.; associate professor.

Cheremisov Vitaliy Anatolyevich – the college of radio engineering; engineer's degree; student.

УДК 621.12.3

Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, Д.А. Богаченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ СО СТРУКТУРОЙ МИКРОПОЛОСКОВОГО ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Рассмотрены вопросы моделирования характеристик фазовращателя на основе перестраиваемого полосно-заграждающего фильтра, представляющего собой набор резонаторов-шлейфов. Полоса пропускания устройства формируется резонансами этих резонаторов и управляется подключением емкостей (варакторов) к концам шлейфов. Для численного анализа использован пакет электромагнитного моделирования FEKO. Решение задачи получено точным методом с использованием функции Грина слоистой среды. Расчеты выполнялись в диапазоне частот при различных значениях емкости варакторных элементов. Исследовались амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики вносимых S_{21} и обратных S_{11} потерь и частотная характеристика коэффициента стоячей волны (КСВ). При увеличении емкости варактора (что соответствует изменению управляющего напряжения) происходит смещение полосы пропускания в сторону более низких частот. В полосе частот 1,75–2,4 МГц уровень вносимых потерь не превышает 1 дБ, а уровень обратных потерь не хуже чем 9 дБ.

Фазовращатель; микрополосковая линия; варактор.

N.N. Kisel', S.G. Grishchenko, D.A. Bogachenko

MODELLING ELECTRICALLY THE OPERATED PHASE SHIFTER WITH STRUCTURE OF THE MICROSTRIP BAND BLOCKING FILTER

Questions of modeling of characteristics of the phase shifter on the basis of the reconstructed band blocking filter representing a set of resonators loops are considered. The pass-band of the device is formed by resonances of these resonators and control by connection of capacities (varac-