

УДК 537.874

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ СТРУКТУРЫ С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

В.И. Фесенко¹, И.А. Сухоиванов¹, С.Н. Шульга²

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, лаб. «Фотоника», Харьков 61166, пр. Ленина, 14.

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, каф. теор. радиофизики, 61077, пл. Свободы, 4.

Поступила в редакцию 23 ноября 2009

В работе исследована двухсторонняя 1-D микрополосковая структура с фотонной запрещенной зоной. Структура представляет собой микрополосковую линию, с периодически изменяющейся шириной центрального проводника, в нижней пластине, которой вытравлен одномерный периодический ряд круглых отверстий. Представлены спектральные характеристики предложенных микрополосковых фильтров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотонная запрещенная зона, микрополосковая структура, фильтр

В роботі досліджено двосторонню 1-D мікросмужкову структуру з фотонною забороненою зоною. Структура представляє собою мікросмужкову лінію, з періодичною зміною ширини центрального провідника, в нижній пластині, якої витравлено одномірний періодичний ряд круглих отворів. Наведено спектральні характеристики запропонованих мікросмужкових фільтрів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фотонна заборонена зона, мікросмужкова структура, фільтр

In this paper, it is presented a two-sided one-dimensional photonic bandgap microstrip structure. The structure is obtained by etching a one periodic pattern of circles in the ground plane of a microstrip line and variation of the characteristic impedance as a function of the length of the microstrip line. The calculated scattering parameters of the proposed filter are presented.

KEY WORDS: photonics band gap, microstrip, filter

Подобно концепции запрещенной энергетической зоны, в физике твердого тела, материалы с фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ), или как их еще называют фотонные кристаллы (ФК), дают возможность управлять распространением электромагнитных волн в оптическом и СВЧ диапазонах. В СВЧ диапазоне такие структуры могут быть получены, в частности, с использованием микрополосковых линий (МПЛ).

Микрополосковые структуры с фотонной запрещенной зоной вызывают большой интерес, благодаря их уникальным характеристикам, а также возможностью их широкого применения в микроволновых цепях в качестве фильтров [1] – [8], резонаторов [9], микроволновых антенн [1], [2] и т.д.

На сегодняшний день известно несколько способов изготовления микрополосковых структур с фотонной запрещенной зоной: высверливание периодического ряда отверстий различной формы, в подложке микрополосковой линии [1] – [2]; вытравливание периодического ряда отверстий различной формы, в нижней пластине микрополосковой линии [3] – [6]; вытравливание периодических отверстий определенной формы в центральном проводнике линии [7]; периодическое изменение формы центрального проводника микрополосковой линии без травления отверстий в нижней пластине [8].

Полученные, таким образом, микрополосковые структуры, в определенных частотных диапазонах (эти диапазоны зависят от геометрических и материальных параметров исследуемой структуры), обладают свойствами присущими ФК оптического диапазона – в этих частотных областях невозможно распространение электромагнитных волн (фотонная запрещенная зона).

Благодаря простоте изготовления и широкой области потенциальных применений, МПЛ с ФЗЗ становились предметом изучения многих исследователей. Так, например, в работах [1], [2] представлена МПЛ с периодическим массивом прямоугольных отверстий в подложке. Такая структура была теоретически исследована с помощью двухступенчатого метода моментов. Было показано, что ширина запрещенной зоны данной микрополосковой структуры, зависит от места расположения проводника относительно центра блока (центрального ряда отверстий). Данная структура может быть широко использована в СВЧ диапазоне для создания различных микроволновых компонентов, в частности антенн.

К следующему виду относятся микрополосковые структуры, с периодически вытравленными отверстиями в центральном проводнике линии. Этот тип устройств описан в работе [7], где была предложена модель одномерной фотонной ячейки. В цитируемой работе было показано, что ряд таких ячеек, периодически вытравленных в центральном проводнике микрополосковой линии, приведет к

появлению у микрополосковой структуры, запрещенной фотонной зоны, ширину, которой можно регулировать соответствующим выбором геометрических параметров ячеек. Преимуществом данных ФК над другими рассмотренными здесь, являются их малые геометрические размеры, но в тоже время эти структуры более сложны в изготовлении (обычно центральный проводник имеет ширину близкую к 1 мм, а чаще всего меньше 1 мм). Для расчета предложенной структуры был использован метод эквивалентных цепей.

Микрополосковая структуры с ФЗЗ полученная путем синусоидального изменения формы центрального проводника, в направлении, распространения волны, предложена и исследована в [8]. Данная топология не требует вытравливания отверстий в нижней пластине и основана на периодическом изменении характеристического импеданса, который является функцией длины микрополосковой линии. Использование такой структуры приводит к появлению лишь одной запрещенной зоны. Изменение ширины центрального проводника МПЛ приводит к изменению характеристического сопротивления линии. Такая структура характеризуется тремя значениями характеристического сопротивления: минимальным, максимальным и средним. Если поддерживать значение среднего сопротивления постоянным, но изменять размах минимального и максимального сопротивлений, то можно в широких пределах варьировать ширину и глубину запрещенной зоны.

Самое большое внимание было уделено микрополосковым структурам с ФЗЗ, выполненным на основе МПЛ с периодически вытравленными отверстиями в нижней пластине [3] – [6], это в первую очередь связано с простотой их изготовления, по сравнению с описанными выше структурами. Так в работе [3] рассмотрено два типа микрополосковых структур изготовленных с помощью этой технологии. Первая из них получена путем вытравливания в подложке одномерного ряда прямоугольных отверстий, и может быть использована как фильтр; вторая образована двумерным распределением прямоугольных отверстий, и может найти применение в качестве микрополосковых антенн. Для численного моделирования предложенных структур был использован метод конечных разностей. Аналогичные одномерные и двумерные микрополосковые линии с ФЗЗ, но только с круглыми отверстиями были рассмотрены в работах [5] – [6].

Целью данной работы является теоретическое исследование двухсторонних микрополосковых структур с фотонной запрещенной зоной (рис. 1). Такая структура может использоваться в качестве СВЧ фильтра.

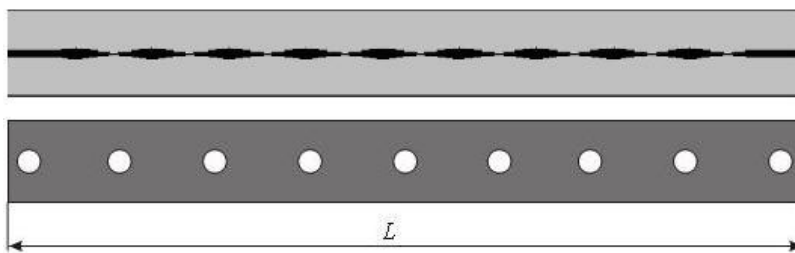


Рис. 1 Двухсторонняя МПЛ структура

Частотная фильтрация – одна из важнейших процедур в микроволновой схемотехнике. Чаще всего, в микрополосковой технологии, нежелательные частоты подавляются при помощи короткозамкнутых штырей помещенных в МПЛ на расстоянии половины длины волны

между ними. К существенным недостаткам фильтрующих элементов полученных с использованием данной технологии, относятся их большие размеры и узкополосность.

В свою очередь, использование МПЛ с ФЗЗ – альтернативный путь решения данной задачи. В дальнейшем они могут быть легко интегрированы с другими микрополосковыми компонентами, что приведет к уменьшению размеров цепи, и улучшит ее частотно-избирательные параметры.

ИССЛЕДУЕМАЯ МПЛ СТРУКТУРА

Исследуемая структура представляет собой микрополосковую линию, с периодически изменяющейся шириной центрального проводника, в нижней пластине, которой вытравлен одномерный периодический ряд круглых отверстий (рис. 1).

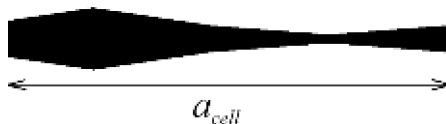


Рис.2 Ячейка с треугольной вариацией характеристического импеданса

Для исследуемой структуры, характеристический импеданс Z , внутри одной ячейки, длиной a_{cell} , имеет треугольную вариацию, как функцию длины микрополосковой линии (рис. 2). Произведение $Z_{min} \cdot Z_{max}$ должно удовлетворять следующему

условию [8]:

$$Z = \sqrt{Z_{min} \cdot Z_{max}} \quad (1)$$

где Z_{\min} и Z_{\max} – минимальное и максимальное значение характеристического импеданса, соответственно. В нашем случае $Z = 50$ Ом.

Ширина полоски w (при фиксированной толщине подложки h) соответствующая Z может быть получена, с погрешностью не более 0.6%, при $Z\sqrt{\varepsilon_{eff}} = 132$ Ом, со следующих формул [10]:

для случая $Z\sqrt{\varepsilon_{eff}} \leq 132$ Ом:

$$\frac{w}{h} = \frac{1}{R} - \frac{2[\ln(\pi/R - 2\ln 2) + 1]}{\pi}, \quad (2)$$

для случая $Z\sqrt{\varepsilon_{eff}} > 132$ Ом:

$$\frac{w}{h} = 8 \cdot e^{(-2\pi R)}, \quad (3)$$

где:

$$R = \frac{Z\sqrt{\varepsilon_{eff}}}{120\pi}. \quad (4)$$

В (2 – 4) ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость регулярного региона МПЛ, которая определяется следующим образом [3, 10]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 10h/w}}, \quad (5)$$

здесь ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки МПЛ.

К основным характеристикам МПЛ с ФЗЗ относятся: центральная частота запрещенной зоны, ширина запрещенной зоны, глубина запрещенной зоны, а также максимальный коэффициент отражения. Центральная частота, глубина и ширина запрещенной зоны для микрополосковой структуры с ФЗЗ определяется через период

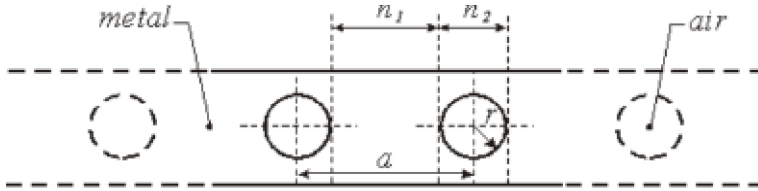


Рис.3 Нижняя пластина 1-D микрополосковой структуры с ФЗЗ.

определяется через период $a = a_{cell}$ (рис. 2 – 3); радиус, выравненных в нижней пластине МПЛ, отверстий r ; количество этих отверстий N и динамику вариации характеристического импеданса МПЛ (Z_{\min}, Z_{\max}).

Высокая динамика вариации Z и большой радиус отверстий r дают

широкую и глубокую запрещенную зону. Низкая динамика Z и небольшой радиус r дают узкую и неглубокую запрещенную зону.

Центральная частота запрещенной зоны может быть определена, со следующего соотношения [11]:

$$f_c = \frac{c}{\lambda_B}, \quad (6)$$

где

$$\lambda_B \cong 2(n_1(a - 2r) + 2rn_2) = 2an_{eq}, \quad n_{eq} = (n_1 \cdot (a - 2r) + 2r \cdot n_2) / a, \quad (7)$$

В (6) – (7) использованы следующие обозначения: c – скорость света в вакууме, λ_B – Брегговская длина волны, $n_1 = \sqrt{\varepsilon_{eff}}$, $n_2 = \sqrt{\varepsilon'_{eff}}$, ε_{eff} и ε'_{eff} эффективная диэлектрическая проницаемость регулярного региона МПЛ и региона с отверстием, соответственно. Эффективная диэлектрическая проницаемость регулярного региона МПЛ может быть получена из формулы (5), а эффективная диэлектрическая проницаемость региона с отверстием, определяется в соответствии с [11]:

$$\varepsilon'_{eff} \cong \left(\frac{n_1 \cdot h + n_{air} \cdot d_{eff}}{h + d_{eff}} \right)^2, \quad (8)$$

где $n_{air} = 1$, d_{eff} эквивалентная толщина воздуха, на которую «провисает» э/м поле внутри отверстия.

Согласно с [10] выше некоторой частоты, а именно:

$$f_0 = 0.956\sqrt{Z} / (\sqrt{h^4\epsilon_r - 1}), \quad (9)$$

необходимо учитывать дисперсионную зависимость $\epsilon(f)$. В (9) f – рабочая частота, ГГц.

Если удовлетворяется следующее соотношение: $w/h \leq 4$, то для определения $\epsilon(f)$ можно использовать следующую эмпирическую формулу:

$$\epsilon(f) = \epsilon_{eff} + 11.08 \cdot 10^{-5} (\epsilon_r^2 - 1) h^4 \sqrt{Zw/h} \cdot (f - f_0). \quad (10)$$

Погрешность расчетов с использованием (10) не хуже 2 %. В нашем случае $f_0 = 3.5$ ГГц.

Для расчета спектральных характеристик предложенного фильтра, использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD), детально изложенный в предыдущих работах авторов [12] – [14], в которых он применялся для моделирования трехмерных волноведущих структур СВЧ диапазона с анизотропным заполнением.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе численного моделирования было исследовано три типа микрополосковых структур: 1) микрополосковый фильтр, полученный путем периодической модуляции ширины центрального проводника МПЛ; 2) микрополосковый фильтр, полученный путем вытравливания периодического ряда круглых отверстий, в нижней пластине МПЛ; 3) двухсторонняя структура, полученная объединением структур 1 и 2.

Исследуемые МПЛ структуры характеризуются следующими параметрами: $h = 1,27$ мм, $\mu = 1$, $\epsilon_r = 10,2$, $\tan\delta = 0,0026$, $Z = 50$ Ом. С применением формул (2) – (9), получены следующие значения: количество отверстий $N = 9$; радиус отверстий $r = 5,1$ мм; период $a_{cell} = a = 21,2$ мм; $Z_{max} = 80$ Ом, $Z_{min} = 31$ Ом. Данные параметры МПЛ соответствуют фотонной запрещенной зоне центрированной на 2,8 ГГц

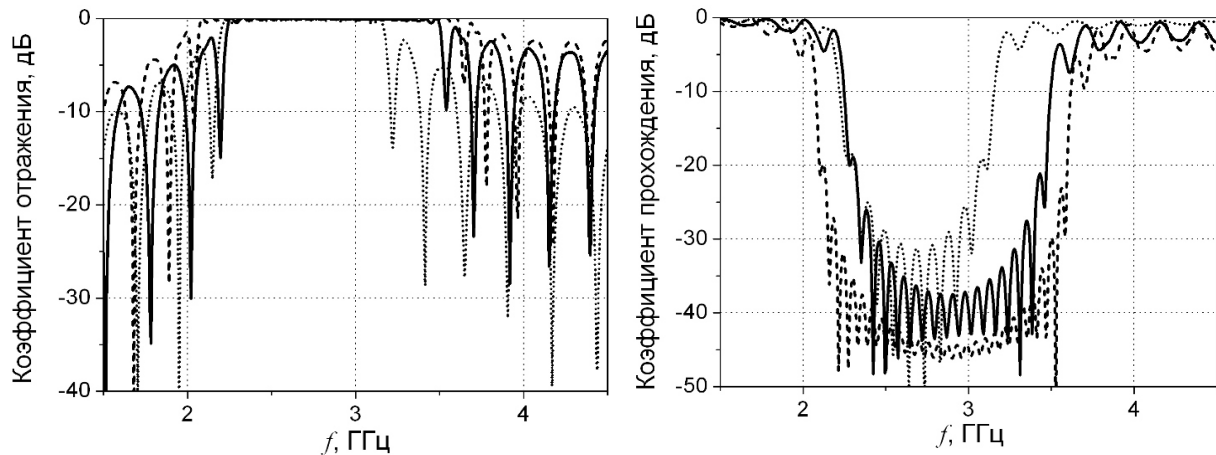


Рис. 4 Спектральные характеристики МПЛ структур: точки – структура 1, сплошная линия – структура 2, пунктирная линия структура 3

На рисунке 4 представлены результаты расчета спектральных характеристик для структур 1 – 3. Как следует из полученных характеристик, для всех образцов присутствует ФЗЗ с центром около 2,8 ГГц, что соответствует расчетным значениям. В то же время, ширина и глубина запрещенной зоны зависят от типа исследуемой структуры: наиболее узкая ФЗЗ получена для структуры первого типа, а самая широкая ФЗЗ с минимальным коэффициентом прохождения получена для структуры третьего типа. Исходя из данных результатов, можно сделать вывод, что в качестве полосовых фильтров, наиболее целесообразно использовать двухсторонние структуры. Полученные результаты, для структур 1 и 2 типов, были сравнены с результатами работ других авторов [1] – [8], в результате чего было отмечено их хорошее соответствие. Для структуры второго типа также был проведен ряд экспериментальных измерений, которые подтвердили адекватность разработанного численного алгоритма [15].

На рисунке 5. представлены результаты расчета коэффициентов пропускания для двухсторонней структуры (рис. 1) с различным положением отверстий, под центральным проводником, а именно

отверстия располагаются под регионами с разным характеристическим сопротивлением центрального проводника. На рис. 5 кривая из точек соответствует случаю, когда отверстия находятся под участком с характеристическим сопротивлением $Z = 31$ Ом, сплошная кривая – $Z = 50$ Ом и пунктирная кривая – $Z = 80$ Ом. Как следует из спектральных характеристик глубина, и ширина запрещенной зоны сильно зависят от месторасположения отверстий. Максимальная ширина и глубина ФЗЗ отвечает случаю расположения отверстий под регионом с максимальным сопротивлением $Z = 80$ Ом.

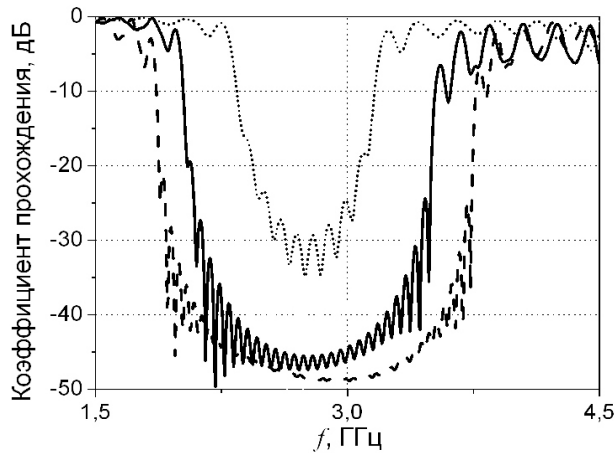


Рис.5 Спектральные характеристики двухсторонней структуры

Полученная закономерность может быть использована при проектировании перестраиваемых микрополосковых фильтров на основе двухсторонних микрополосковых структур с ФЗЗ.

ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты проведенного численного моделирования свидетельствуют о возможности широкого применения двухсторонних микрополосковых структур, с фотонной запрещенной зоной, в качестве дешевых и простых в изготовлении частотно-избирательных фильтров СВЧ диапазона. В зависимости от области применения, а соответственно и от требований, выдвигаемых к спектральным характеристикам структуры, могут

применяться, как односторонние структуры, исследованные ранее [1] - [8], так и предложенная двухсторонняя структура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hung-Yu David Yang. Theory Of Microstrip Lines On Artificial Periodic Substrates // IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. Vol.47. - 1999. - pp. 629-635.
2. Hung-Yu David Yang, Reonghee Kim, David R. Jackson // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. Vol. 48. – 2000 - No. 12. - P. 2233 - 2239.
3. M. M. Karbassian and H. Ghafouri-Shiraz Effect of Shape of Patterns on the Performance of Microstrip Photonic Band-Gap Filters// IEEE Microwave and Optical Technology Letters. Vol. 48. – 2006. - No. 6. PP. 1007 – 1011.
4. Miguel A. G. Laso, Txema Lopetegui, Maria J. Erro, David Benito, Maria J. Garde, Mario Sorolla. Multiple-Frequency-Tuned Photonic Bandgap Microstrip Structures // IEEE Microwave And Guided Wave Letters. Vol. 10. - 2000. - No. 6.
5. Rumsey J., Picket-May M., Keith Kelly P. Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits // IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8. - 1998. - No. 10.
6. V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines, IEEE Microwave Guided. Wave Lett. 1998 , pp. 69-71.
7. Quan Xue, Kam Man Shum, Chi Hou Chan. Novel 1-D Microstrip Pbg Cells // IEEE Microwave And Guided Wave Letters, Vol. 10. - 2000. - No. 10. – P. 403.
8. Nestic D., Nestic A. Bandstop Microstrip PBG Filter with Sinusoidal Variation of the Characteristic Impedance and without Etching in the Ground Plate // Microwave and Optic Technology Letters, Vol. 29. - 2001. - No. 6. – P. 418–420.
9. Yeoul Yun T., Chang. Uniplanar K. One-Dimensional Photonic-Bandgap and Resonators // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 49. - 2001. - No. 3 – P. 549-553.
10. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
11. M. J. Erro, M. A. G. Laso, T. Lopetegui, D. Benito, M. J. Garde, M. Sorolla Modeling and Testing of Uniform Fiber Bragg Gratings Using 1-D Photonic Bandgap Structures in Microstrip Technology // Fiber and Integrated Optics, Vol. 19. – 2000. PP. 311 – 325.
12. Шульга С.Н., Фесенко В.И. Структура полей в поперечном сечении магнитоэлектрической неоднородной анизотропной вставки прямоугольного волновода // Известия вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. 45. N 12. – С. 1049 – 1057.
13. O. V. Bagatskaya, V. I. Fesenko, S. N. Shulga. Electric Field Lines in a Rectangular Waveguide with an Inhomogeneous Anisotropic Insert// Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – Vol. 63, No 1.
14. Н.П. Жук, В.И. Фесенко, С.Н. Шульга, О.В. Багацкая, Хе Ши. Рассеяние электромагнитных волн от анизотропной вставки в прямоугольном закороченном волноводе // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радиофізика та електроніка. – 2007. – № 756. – С. 33 – 37.
15. Fesenko V.I., Kublik A.V., Naboka A.N. One-dimensional nonperiodic photonic bandgap microstrip structure // 5 Int. Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2003). – Alushta (Ukraine). – 2003. – P. 185.