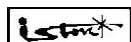




Посвящается
70-летию РНТОРЭС



КрымМуКо 2015 CriMiCo

**25-я Международная Крымская конференция
СВЧ-техника
и телекоммуникационные технологии
Материалы конференции**

**6—12 сентября 2015 г.
Севастополь, Крым, Россия**

**2015 25th International Crimean Conference
Microwave &
Telecommunication Technology
Conference Proceedings**

**September 6—12, 2015
Sevastopol, Crimea, Russia**

**В двух томах
In Two Volumes**

**Том 1
Volume 1**

Moscow • Minsk • Sevastopol
2015

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российское научно-техническое общество радиотехники,
электроники и связи (РНТОРЭС) им. А. С. Попова
Крымский научно-технологический центр
им. проф. А. С. Попова (Севастополь)
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)
Севастопольский государственный университет
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники (Минск)
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
НП ОАО «Фаза» (Ростов-на-Дону)
ОАО «НПП "Исток" им. Шокина» (Фрязино)
ЗАО «Микроволновые системы» (Москва)
НПП «Системные ресурсы» (Москва)
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
НПФ «Микран» (Томск)
ООО «Радиокомп» (Москва)
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)
Keysight Technologies (Москва)
SD Solutions (Санкт-Петербург)
Крымский федеральный университет
им. проф. В. И. Вернадского (Симферополь)
НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (Кацивели)

Информационная поддержка:

Журнал «Вестник электроники»

25-я Международная Крымская конференция «**СВЧ-техника** и телекоммуникационные
С255 технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015 г. : материалы конф. в 2 т. —
Севастополь, 2015. — Т. 1: 666 с. (1—596) + 70 с.: ил. — ISBN 978-1-4673-9414-7.

В 1-й том сборника материалов включены 277 из 588-ти прошедших рецензирование и включенных в программу конференции докладов, которые будут представлены на секциях: Материалы и технология СВЧ-приборов; Нанотехнологии и наноматериалы; Наноэлектроника; Нанотехнологии и наноэлектроника; СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты; Радиационная стойкость материалов и ЭКБ; Электромагнитная стойкость материалов и ЭКБ; Измерение параметров цепей и сигналов; Измерение параметров материалов и технологических процессов; Антенные измерения; Обработка результатов измерений и другие приложения; Контроль и управление в технологических процессах; СВЧ-технологии в задачах мониторинга окружающей среды; Радиофотоника; Микроволновые технологии в биологии и медицине; Радиоастрономия и распространение радиоволн в атмосфере Земли; Методы и средства ДЗЗ; Моделирование и реализация комплексов и систем. Авторами представленных на конференции докладов являются 1216 ученых и специалистов 194-х университетов и предприятий 14-ти стран: Беларуси, Великобритании, Дании, Ирака, Казахстана, Канады, Кореи, Польши, России, Румынии, Украины, Швеции, ЮАР и Японии.

Материалы конференции изданы также на компакт-диске.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

IEEE Catalog Number CFP15788-PRT
ISBN 978-1-4673-9413-0 (CD)
ISBN 978-1-4673-9414-7

© Оргкомитет КрыМиКо'2015
© КНТЦ им. Попова, 2015

THE WAVE PARAMETERS OF A CIRCULAR WAVEGUIDE WITH FERRITE AND METAMATERIAL LAYERS

Meshcheryakov V. A., Zhukov A. A.
National Research Tomsk State University
36, Lenin Ave., 36, Tomsk, Tomsk, 634050, Russia
Tel.: +7-3822-413973, e-mail: mva@mail.tsu.ru

Abstract — The paper presents the simulation results of the parameters of wave propagation round four-layer waveguide, which contains the materials with positive (RHM – Right-Handed-Medium) and negative (LHM – Left-Handed-Medium) refractive indices and magnetized ferrite. The results presented show the possibility of improving the characteristics of the ferrite waveguide devices.

ВОЛНОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА СО СЛОЯМИ ФЕРРИТА И МЕТАМАТЕРИАЛА

Мещеряков В. А., Жуков А. А.
Национальный исследовательский Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, Томск, Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-413973, e-mail: mva@mail.tsu.ru

Аннотация — В работе представлены результаты моделирования коэффициентов распространения волноводных мод круглого четырехслойного волновода, заполненного средами с положительным (RHM – Right-Handed-Medium) и отрицательным (LHM – Left-Handed-Medium) показателями преломления и намагниченным ферритом. Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности существенного улучшения характеристик ферритовых волноводных устройств.

I. Введение

Электромагнитные свойства анизотропных сред и композиционных RHM и LHM [1,2] материалов достаточно хорошо изучены в отдельности и с успехом используются при создании различных устройств миллиметрового, субмиллиметрового диапазона волн [2-9]. Целью настоящей работы является моделирование распространения основной волны круглого четырехслойного волновода, заполненного поперечно намагниченным слоем феррита (гиромагнитной средой) и среды с отрицательным показателем преломления.

II. Основная часть

На рис.1 представлено поперечное сечение волновода с идеально проводящим внешним экраном и указаны относительные материальные характеристики слоев. Использована цилиндрическая система координат r, φ, z_0 .

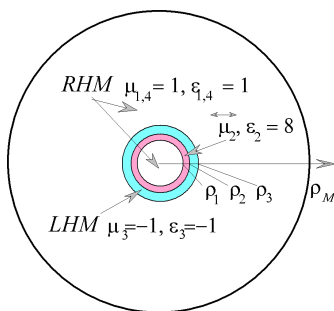


Рис. 1. Поперечное сечение волновода.
Fig. 1. The cross section of the waveguide

Волны распространяются внутрь плоскости рисунка. Зависимость полей от t, φ и z выбрана в форме $\exp(i\omega t + in\varphi + i\beta z)$, где n – азимутальное число, β – константа распространения. Размеры устройств нормированы на волновое число свободного пространства k_0 : $\rho = k_0 r, z = k_0 z_0, k_0 = \omega/c$, где c скорость света в свобод-

ном пространстве. Феррит намагничен азимутально. В качестве модели тензора магнитной проницаемости феррита использовались соотношения из [3]. Компоненты тензора магнитной проницаемости зависят от намагничивающего поля σ , намагниченности насыщения p . Параметр потерь $\alpha=0.07$. Значения намагничивающего поля σ и намагниченности насыщения p нормированы и не имеют размерности [3].

Из граничных условий получено дисперсионное уравнение [7]. Моделируемой характеристикой является нормированная постоянная распространения основной волноводной моды $\Gamma(\sigma) = \beta/k_0 = c/v$, где v – фазовая скорость волны в волноводе. Целью моделирования является выяснение влияния LHM слоя и намагничивающего поля σ на комплексное значение $\Gamma(\sigma) = \text{Re}(\Gamma) + i\text{Im}(\Gamma)$.

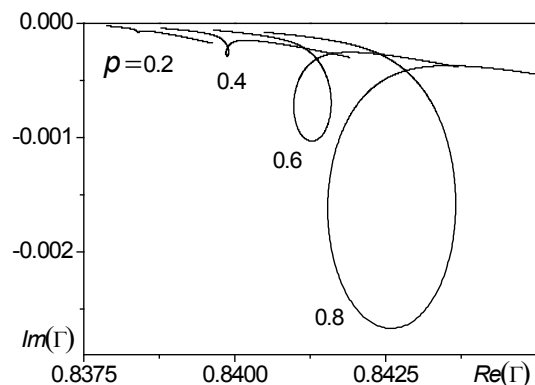


Рис. 2. Зависимость $\Gamma(\sigma, p)$. Третий слой – воздух. Феррит намагничен по часовой стрелке.

Fig. 2. The dependence of $\Gamma(\sigma, p)$. The third layer is the air. The ferrite magnetized in a clockwise direction

Геометрические характеристики слоев следующие: $\rho_1=0.5, \rho_2=0.6, \rho_3=0.8, \rho_M=3.0$. Слои 1 и 4 – RHM, слой 2 – феррит. Для того, чтобы оценить влияние слоя метаматериала на волновые параметры, рас-

смотрены два варианта заполнения волновода. Первый вариант представлен рис. 2, 3, слой 3 – RHM (воздух). Второй вариант представлен рис. 4, 5, слой 3 – LHM (метаматериал).

На рис. 2, 4 представлены зависимости комплексного параметра распространения от нормированного намагничивающего поля σ направленного азимутально по часовой стрелке. На рис. 3, 5 представлены зависимости комплексного параметра распространения от нормированного намагничивающего поля σ направленного азимутально против часовой стрелки.

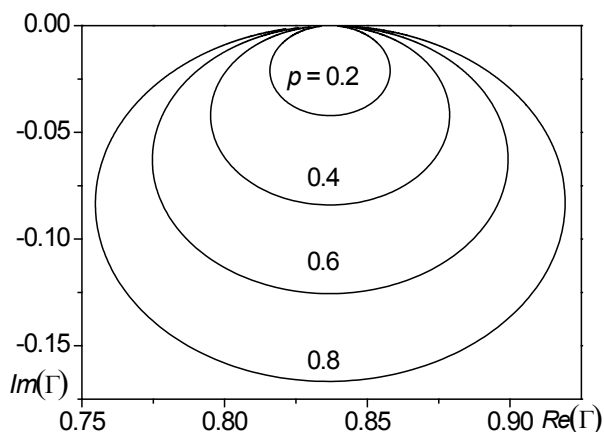


Рис. 3. Зависимость $\Gamma(\sigma, p)$. Третий слой – воздух. Феррит намагничен против часовой стрелки.

Fig. 3. The dependence of $\Gamma(\sigma, p)$. The third layer is the air. The ferrite magnetized in a counterclockwise direction

Параметр σ изменялся от 0 до 2. На участке 0.8-1.1 наблюдается ферромагнитный резонанс. На этом участке происходит максимальное поглощение энергии волны.

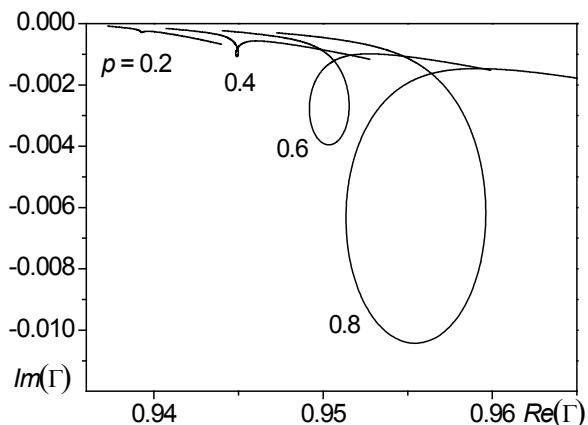


Рис. 4. Зависимость $\Gamma(\sigma, p)$. Третий слой – метаматериал. Феррит намагничен по часовой стрелке.

Fig. 4. The dependence of $\Gamma(\sigma, p)$. The third layer is the metamaterial. The ferrite is magnetized in a clockwise direction

Изменение направления намагничивания феррита приводит к существенному изменению параметров распространения. Замена диэлектрического слоя на метаматериал приводит к увеличению приращения фазы и потерь примерно в 2.5 раза. Это говорит

о возможности улучшения характеристик фазовращателей и развязывающих устройств СВЧ.

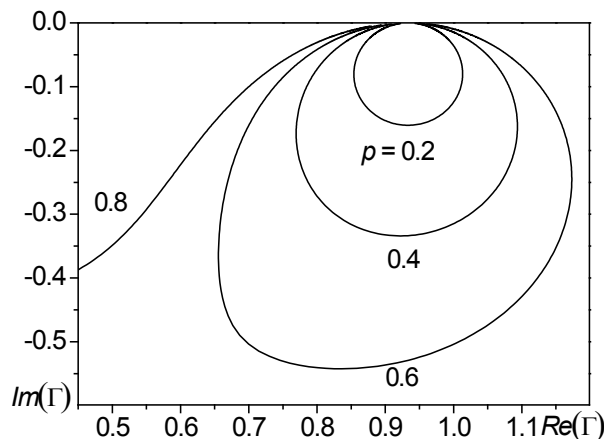


Рис. 5. Зависимость $\Gamma(\sigma, p)$. Третий слой – метаматериал. Феррит намагничен против часовой стрелки.

Fig. 5. The dependence of $\Gamma(\sigma, p)$. The third layer is the metamaterial. The ferrite is magnetized in a counterclockwise direction

III. Заключение

В процессе моделирования было показано, что замена диэлектрического слоя метаматериалом ведет к увеличению невязанного фазового сдвига. Это позволяет улучшить характеристики ферритовых волноводных устройств.

This Research is supported by Tomsk State University Competitiveness Improvement Program.

IV. References

- [1] Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.*, 1968, vol. 10. No 4, pp. 509 - 14.
- [2] Pendry J.B. Photonic Band Structures. *J. Mod. Optic*, 1994, vol. 41. No 2, pp. 209 - 229.
- [3] Suhl H., Walker L. R. Topics in guided wave propagation through gyromagnetic media. *Bell Syst. Tech. J.* 1954, vol. 33. pp. 579–659,
- [4] Dunaevskii G.E., Meshcheryakov V.A., Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Bashlykov A.K. Special features of electromagnetic wave propagation in a two-layered cylindrical waveguide with right- and left-handed media. *Russian Physics Journal*, 2009, vol. 52. No 12, pp. 1325 - 1330.
- [5] Red'kin G.A., Meshcheryakov V.A., Zhukov A.A. Natural electromagnetic waves in round inhomogeneous layered waveguides. *Russian Physics Journal*, 2006, vol. 49. No 9, pp. 917 - 922.
- [6] Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Meshcheryakov V.A., Magnetic field influence on the spectrum of magnetic permeability of composite material containing single domain uniaxial magnetic. *CriMiCo 2014. 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings* 6959591, pp. 698-699.
- [7] Meshcheryakov V.A., Mudrov A.E., Red'kin G.A. Eigenwaves in an inhomogeneous azimuthally bigyrotropic medium. *Russian Physics Journal*, 1983, vol. 25. No 11, pp. 1015 - 1018.
- [8] Salehi H., Mansour Raafat. Analysis, modeling, and applications of coaxial waveguide-based left-handed transmission lines. *Microwave Theory and Techniques*, 2005, vol. 53, pp. 3489 - 3497.
- [9] Barroso J.J. Castro P.J. Neto J.P.L. Experiments on microwave propagation through a metallic waveguide loaded by an array of split-ring resonators. *Microwave and Optoelectronics Conference*, Belem, Brazil, 2009, pp. 778 - 782.