Посвящается
70-летию РНТОРЭС

КрыМиКо 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

COMPLEX WAVES IN THE CIRCULAR TWO-LAYER WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED WITH A METAMATERIAL

Zhukov A. A., Meshcherykov V. A.
Tomsk State University
36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation
Ph.: (3822) 413973, e-mail: gyk@mail.tsu.ru

Abstract — The results of the calculation of the propagation constant E_{01} and H_{01} modes circular two-layer waveguide with metamaterial filling are presented. Complex waves can exist in such waveguide.

КОМПЛЕКСНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ

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

Аннотация — Проведено моделирование затухания волн E_{01} и H_{01} в двухслойном запредельном круглом волноводе частично заполненном метаматериалом. Показано, что при определенных параметрах слоев в такой структуре возможно существование комплексных волн.

I. Введение

Запредельные цилиндрические волноводы с радиально ступенчатыми на поперечном сечении неоднородностями обладают рядом особенностей, что позволяет создавать на их основе преобразователи для контроля диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов и сред [1]. При заполнении слоев волновода средами с положительными диэлектрической и магнитной проницаемостями в таких структурах возможно существование комплексных волн в отсутствии потерь в заполняющих средах. Причем комплексными становятся только волны с числами вариации поля по азимутальной координате отличными от нуля (несимметричные волны). Например, комплексными могут быть волны HE_{11} и EH_{11} [2,3], но не волны E_{01} и H_{01}.

В работе показано, что при заполнении одного из слоев двухслойного цилиндрического волновода метаматериалом, т.е. средой с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями, постоянные распространения симметричных волн (E_{01} и H_{01}) могут принимать комплексные значения в отсутствии потерь в заполняющих средах.

II. Основная часть

На рис. 1 приведено поперечное сечение круглого двухслойного волновода. Постоянная распространения электромагнитной волны в такой структуре определяется из решения уравнений Максвелла для поставленной граничной задачи [4].

Предполагается, что электромагнитное поле в волноводе описывается функцией вида:

$$E,H \sim \Phi(\rho)\exp[j(\omega t + n\varphi + k_0\Gamma z)],$$

где ω – круговая частота; Γ – постоянная распространения, нормированная на волновое число свободного пространства k_0; $j=\sqrt{-1}$ – мнимая единица, z – направление распространения (ось волновода) в цилиндрической системе координат (ρ,φ,z).

В этом случае уравнения Максвелла сводятся к системе к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно продольных составляющих электрического E_z и магнитного полей H_z.

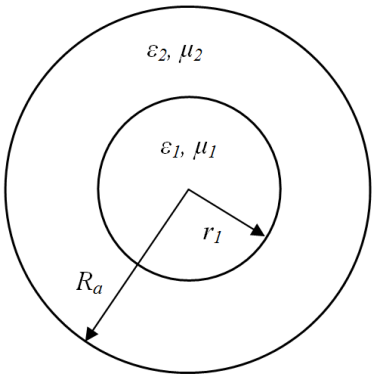

Рис. 1. Круглый двухслойный волновод.
Fig. 1.Two-layer circular waveguide

$$\xi^2\frac{d^2e_z}{d\xi^2}+\xi\frac{de_z}{d\xi}+(\xi^2-n^2)e_z=0,$$

$$\xi^2\frac{d^2h_z}{d\xi^2}+\xi\frac{dh_z}{d\xi}+(\xi^2-n^2)h_z=0,$$

где $\boldsymbol{h}=\rho_0\boldsymbol{H}$ – нормированный вектор магнитного поля; $\boldsymbol{e}=j\boldsymbol{E}$ – нормированный вектор электрического поля; ρ_0=120π(Ом) – волновое сопротивление свободного пространства; ξ=ρχ; $\chi^2=\varepsilon\mu-\Gamma^2$; ρ= k_0r – нормированная радиальная координата; ε, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости. Поперечные составляющие электромагнитного поля выражаются через продольные составляющие и их производные.

В работе проведено численное решение системы обобщенных волновых уравнений и рассчитаны зависимости постоянной распространения Γ волн E_{01} и H_{01} от изменения геометрических и материальных параметров волновода в запредельной области частот.

На рис. 2 приведены зависимости мнимой (сплошные линии) и действительной (пунктирные линии) частей постоянной распространения Γ волны

2015 25th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015). 6—12 September, Sevastopol, Crimea
© 2015: CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788

E_{01} двухслойного волновода от отношения радиусов слоев при различных значениях диэлектрической проницаемости внутреннего слоя. Расчеты проведены для случая μ_1=1, k_0R_a=0.09. Кривые 1, 2 рассчитаны для $\mu_2=\varepsilon_2$=-1 и диэлектрической проницаемости ε_1 внутреннего слоя равной 2 и 20 соответственно. Кривые 3, 4 рассчитаны для $\mu_2=\varepsilon_2$=1 и диэлектрической проницаемости ε_1 внутреннего слоя равной 2 и 20 соответственно. Кривые 1.1, 1.2 и 2.1, 2.2 соответствуют действительным частям постоянной распространения рассчитанным для случаев $\mu_2=\varepsilon_2$=-1, ε_1=2(1), ε_1=20(2) соответственно. Как видно из рисунка характер зависимости мнимой частей постоянной распространения от отношения радиусов слоев волноводе со слоем метаматериала качественно отличается поведения мнимых частей постоянных распространения в двухслойном волноводе, заполненном диэлектриком. Кроме этого, при определенных значениях отношения радиусов слоев в волноводе со слоем метаматериала постоянная распространения становится комплексной величиной.

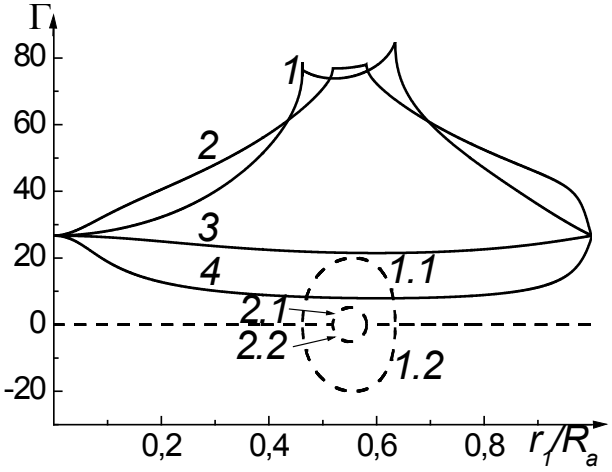

Рис. 2. Зависимости постоянной распространения волны E_{01} в двухслойном волноводе от отношения радиусов и диэлектрической проницаемости внутреннего слоя.

Fig. 2. The propagation constant E_{01} mode as function of relations radiuses layers and the of permittivity ε_1 inner layer

На рис. 3 приведены зависимости мнимой и действительной частей постоянной распространения Г волны H_{01} двухслойного волновода от отношения радиусов слоев для различных значений магнитной проницаемости μ_2 внешнего слоя. Расчеты проведены для случая ε_2=2, k_0R_a=0.09. Кривые 1 (пунктирная линия) и 2 (сплошная линия) рассчитаны для случая $\mu_1=\varepsilon_1$=-1 и магнитной проницаемости μ_2 внешнего слоя равной 4 и 20 соответственно. Кривые 3, 4 рассчитаны для $\mu_1=\varepsilon_1$=1 и магнитной проницаемости μ_2 внешнего слоя равной 4 и 20 соответственно. Кривые 1.1, 1.2 и 2.1, 2.2 (пунктирные линии) соответствуют действительным частям постоянной распространения рассчитанным для случаев $\mu_1=\varepsilon_1$=-1, ε_2=2, μ_2=4(1), μ_2=20(2) соответственно. Значения Г при r_1/R_a=0 и r_1/R_a=1 равны затуханию волны в однородно заполненном волноводе с диэлектрической и магнитной проницаемостями заполнения равными μ_2,ε_2 и μ_1,ε_1 соответственно.

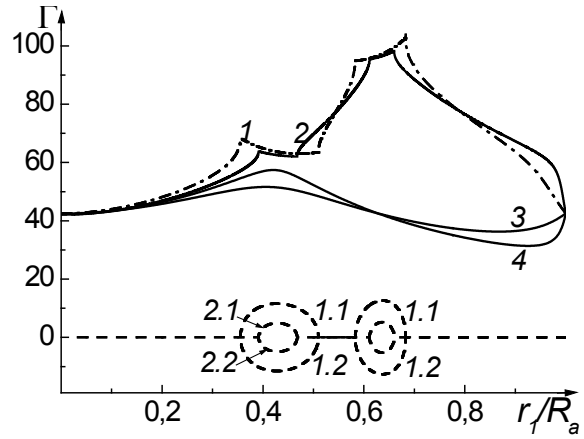

Рис. 3. Рис. 3. Зависимости постоянной распространения волны H_{01} в двухслойном волноводе от отношения радиусов слоев и магнитной проницаемости внешнего слоя.

Fig. 3. The propagation constant H_{01} mode as function of relations radiuses layers and the of magnetic permeability μ_2 of the outer layer

Как видно из рисунка характер зависимости мнимой части постоянной распространения от отношения радиусов слоев волноводе со слоем метаматериала качественно отличается от поведения мнимых частей постоянных распространения в двухслойном волноводе, заполненном средой с положительными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. При определенных значениях отношения радиусов слоев в волноводе со слоем метаматериала постоянная распространения волны становится комплексной величиной. Причем при изменении отношения радиусов слоев область комплексных волн появляется дважды, в отличие от волны E_{01}.

III. Заключение

Основываясь на результатах расчетов можно сделать вывод, что в цилиндрическом двухслойном запредельном волноводе, частично заполненном метаматериалом при определенных параметрах заполнения волновода постоянная распространения волны становится комплексной величиной (появляются окна прозрачности). При этом комплексные волны возникают при размещении метаматериала как во внутреннем, так и во внешнем слое двухслойного волновода.

Работа поддержана государственным заданием РФ 2015 г. в сфере научной деятельности.

IV. References

[1] Raevskij A.S., Raevskij S.B. *Kompleksnye volny* [Complex wave]. Moscow, Radiotehnika, 2010. 224 p.

[2] Pollock J.G., Iyer A.K. Below-cutoff propagation in metamaterial lined circularwaveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, vol. 61, No. 9, pp.3169 -3178.

[3] Dunaevskii G.E., Meshcheryakov V.A. , Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I., Bashlykov A.K. Special features of electromagnetic wave propagation in a two-layered cylindric waveguide with right- and left-handed media. *Russian Physics Journal,* 2009, Vol. 52, No. 12, pp. 1325-1330.

[4] 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.

2015 25th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015). 6—12 September, Sevastopol, Crimea
© 2015: CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788