УДК 537.876.46

# ЗАТУХАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОМ ВОЛНОВОДЕ С ТОНКОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПЛЕНКОЙ И СЛОЕМ МЕТАМАТЕРИАЛА

Головкина М.В.

*ПГУТИ, г. Самара*

*E-mail: nauka77@yandex.ru*

Рассмотрено распространение электромагнитных волн в прямоугольном двухслойном волноводе, содержащем слой метаматериала с отрицательным показателем преломления и слой обычного диэлектрика, разделенные тонкой резистивной пленкой. Исследовано затухание волн в зависимости от параметров сред и резистивной пленки.

Ключевые слова: волновод, электромагнитные волны, затухание.

В настоящее время успехи нанотехнологий позволяют изготовить искусственные структуры, которые обладают новыми свойствами, которые нельзя наблюдать в природных средах. Применение новых искусственных материалов позволяет создать пассивные и активные устройства СВЧ и оптического диапазона с новыми свойствами. К таким новым материалам относятся метаматериалы с отрицательным показателем преломления, представляющие собой искусственные композитные среды, состоящие из отдельных структурных единиц, размеры которых много меньше длины волны. Электродинамические свойства метаматериалов можно описать путем введения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости. Как было показано в работе [1], среды с отрицательным показателем преломления должны

обладать одновременно отрицательными значениями и $\varepsilon$ и $\mu$. Первые искусственные композитные среды, обладающие отрицательным показателем преломления, были созданы в конце 90-х годов [2, 3]. В материалах с отрицательным показателем преломления необычным образом реализуется закон преломления Снеллиуса, эффекты Доплера и Черенкова, формулы Френеля [1].

Волноводные устройства на левых средах изучались многими авторами. Нефедов и Третьяков [4] рассмотрели теоретически волноводные свойства плоских двухслойных волноводов, содержащих слои магнитодиэлектрика и метаматериала конечной толщины. В работе [5] исследованы собственные волны прямоугольного двухслойного волновода, содержащего комбинацию слоя диэлектрика и метаматериала с отрицательным показателем преломления. В работе [6] изучены характеристики собственных волн в двухслойном волноводе, содержащем слои обычного диэлектрика и метаматериала, разделенные тонкой резистивной пленкой. В настоящей работе мы рассматриваем особенности затухания электромагнитных волн в двухслойном волноводе со слоями диэлектрика, метаматериала и тонкой резистивной пленкой.

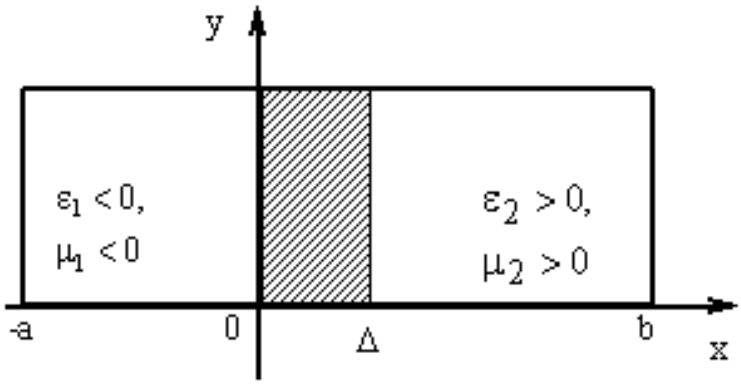


Рис. 1. Геометрия структуры.

Геометрия структуры показана на рис. 1. Прямоугольный волновод содержит слой метаматериала толщиной a ($\varepsilon_1 < 0$, $\mu_1 < 0$) и слой обычного магнитодиэлектрика толщиной b ($\varepsilon_2 > 0$, $\mu_2 > 0$). Эти слои разделены тонкой резистивной пленкой толщиной $\Delta$. Рассмотрим ТЕ-волны, которые могут распространяться в данном волноводе. Дисперсионное уравнение для них известно [7]. Характеристики волн, распространяющихся в двухслойном волноводе с резистивной пленкой, содержащем два слоя обычных магнитодиэлектриков, подробно изучены в работе [7]. Дисперсионные характеристики двухслойного волновода с двумя слоями - метаматериала и обычного магнитодиэлектрика, представлены в работе [6]. Они существенно отличаются от дисперсионных характеристик волновода с обычными материалами, имея две ветви, соответствующие волнам с положительной и отрицательной групповой скоростью. Целью нашей работы является исследование затухания электромагнитных волн в рассматриваемом волноводе в зависимости от затухания в слоях метаматериала и магнитодиэлектрика и в тонкой резистивной пленке.

Известно, что метаматериалы с отрицательным показателем преломления с необходимостью должны обладать частотной дисперсией [1]. Более того, в соответствии с соотношением Крамерса-Кронига, в метаматериалах с отрицательным показателем преломления обязательно должны присутствовать отличные от нуля мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости. Большинство из экспериментально продемонстрированных метаматериалов с отрицательным показателем преломления имеют резонансные частотные зависимости для $\mu$, что приводит к наличию

существенных потерь в частотном диапазоне, в котором наблюдаются одновременно отрицательные значения ε и μ. Нами показано, что параметры слоев влияют на распространение электромагнитных волн, которое становится невозможным при больших значениях потерь в слое метаматериала. Однако теоретические значения потерь в структуре, состоящей из массива длинных металлических проволок и двойных разомкнутых колец, не превышают допустимого уровня, при котором распространение волн еще возможно.

Таким образом, в работе исследовано затухание электромагнитных волн в прямоугольном двухслойном волноводе, содержащем комбинацию слоев обычного магнитодиэлектрика и метаматериала с отрицательным показателем преломления, разделенных резистивной пленкой. Показано, что распространение волн возможно в волноводе с метаматериалом на основе резонансной структуры из массива длинных металлических проволок и двойных разомкнутых колец.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // УФН. –1967. –Т. 92. –№ 3. – С. 517–526.

2. 2. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity.// Phys. Rev. Lett. –2000. –Vol. 84. –№ 18. –P.4184 – 4187.

3. 3. Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. // Science. –2001. –Vol. 292. –P.77–79.

4. Nefedov I.S., Tretyakov S.A. Waveguide containing a backward-wave slab.// Radio Science. –2003. –Vol. 38. –Issue 6. – P. 9-1.

5. Cory H., Shtrom A. Wave propagation along a rectangular metallic waveguide longitudinally loaded with a metamaterial slab.// Microwave and optical technology letters. –2004. -Vol. 41. –№ 2, –P. 123-127.

6. Golovkina M.V. Two-layered waveguide containing a negative index material slab with resistive film // First International Congress on Advanced Materials in Microwaves Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, October 2007, Rome, Italy. P. 377-379.

7. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металло- диэлектрические волноводы. М.: Радио и связь, –1988. –248 С.