

* *
*

УДК 537.876.4:535.217

Г.Е. ДУНАЕВСКИЙ, А.А. ЖУКОВ, В.А. МЕЩЕРЯКОВ

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ СРЕДАМИ. Ч. 2¹

Представлены результаты компьютерного моделирования коэффициентов распространения волноводных мод круглого двухслойного экранированного волновода. Центр волновода заполнен средой с отрицательным показателем преломления. Представленные результаты позволяют сделать вывод о существовании в таких волноводах частотных окон прозрачности, комплексных волн, волн с аномальной дисперсией и волн с существенным замедлением фазовой скорости.

Ключевые слова: метаматериалы, круглые волноводы, комплексные волны, фазовая скорость.

Введение

Авторство термина «левые» среды, или LHM (Left-Handed-Medium), и первые теоретические исследования в области электромагнитных волновых процессов в таких средах принадлежат В.Г. Веселаго [1]. Электромагнитным дескриптором таких сред является отрицательный показатель преломления. LHM принадлежат к классу искусственных композиционных материалов с периодической структурой (метаматериалов). Уникальность физических явлений при отражении и преломлении электромагнитных волн на границах раздела «правых» и «левых» сред, теоретически предсказанная В.Г. Веселаго, послужила толчком к синтезу метаматериалов («правыми» – RHM (Right-Handed-Medium) называют среды с положительным показателем преломления). Первые публикации о создании «левых» сред в СВЧ-диапазоне принадлежат авторам [2], а развитие теории «левых» сред – авторам [3, 4].

Особенность физических явлений при отражении и преломлении электромагнитных волн на границах раздела «правых» и «левых» приводит к особенностям распространения электромагнитных волн в слоистых волноводах [5–12]. В [5] представлены результаты моделирования волновых процессов в двухслойном волноводе с центральным RHM- (Right-Handed-Medium) и внешним LHM-слоями. Были отмечены новые, уникальные свойства волновода с метаматериалом, примыкающим к его стенке. Целью настоящей работы является компьютерное моделирование волновых процессов в круглом волноводе с центральным LHM- и внешним RHM-слоями.

Постановка задачи

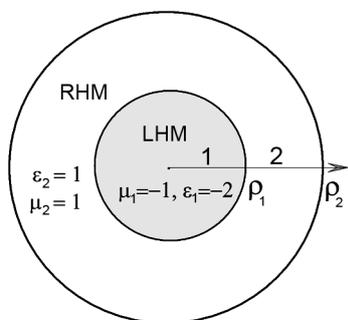


Рис. 1. Двухслойный волновод

На рис. 1 представлено поперечное сечение двухслойного волновода с идеально проводящим внешним экраном и указаны исходные относительные материальные и геометрические характеристики слоев. Использована цилиндрическая система координат r, ϕ, z_0 . Радиусы слоев и продольная координата нормированы на волновое число свободного пространства: $\rho_{1,2} = k_0 r_{1,2}$, $z = k_0 z_0$, $k_0 = \omega/c$, где c – скорость света в свободном пространстве, ω – круговая частота электромагнитного процесса.

Волны распространяются вдоль координаты z , направленной перпендикулярно плоскости рисунка. Зависимость компонентов полей от азимутальной ϕ и продольной координат выражена в форме $\exp(in\phi + i\beta z_0)$, где n – азимутальное число, β – комплексная постоянная распро-

¹ Работа выполнялась в рамках фонда РФФИ «офи_м» № 13-02-122-40.

странения, $i = \sqrt{-1}$. Дисперсионное уравнение для вычисления постоянных распространения собственных волн вытекает из выполнения граничных условий для касательных компонентов полей на границе раздела между слоями и на экране волновода. Исследуемыми характеристиками являются нормированные постоянные распространения волноводных мод $\Gamma = \beta/k_0 = c/v$, где v – фазовая скорость волны в волноводе. Мнимый характер Γ обозначает отсутствие волнового процесса и экспоненциальное затухание поля «запредельной» моды (в терминах микроскопической структуры метаматериала – накопление энергии в реактивных элементах). Комплексный характер моделируемых величин $\Gamma = \text{Re}(\Gamma) + i\text{Im}(\Gamma)$ (точнее, появление комплексно-сопряженных пар Γ) обозначает распространение комплексных мод [13]. Целью моделирования является выяснение влияния толщины центрального слоя и его диэлектрической и магнитной проницаемостей на величину Γ различных волноводных мод.

Результаты модельных экспериментов

На рис. 2 в качестве контрольного варианта представлены графики зависимости Γ для ряда мод от радиуса первого слоя ρ_1 для волновода с РНМ-слоями. Имена мод указаны в соответствии с принятыми в литературе рекомендациями [14]. Моды имеют вариации поля по азимуту (первый нижний индекс в наименовании мод). Значения Γ волноводных мод для крайних положений радиуса центрального слоя легко вычисляются по известным алгоритмам [13]. На рис. 2 оси действительного ($\text{Re}(\Gamma)$) и мнимого ($\text{Im}(\Gamma)$) значений постоянной распространения совмещены. Это позволяет проследить переход мод из запредельной области в область распространения.

Результаты, приведенные на рис. 2, указывают на наличие в пустом волноводе ($\rho_1 = 0, \rho_2 = 3$) одной распространяющейся моды H_{11} , имеющей вещественное значение Γ и трех (H_{21}, E_{11}, H_{31}) и более «запредельных» мод, имеющих мнимые значения. Увеличение радиуса центрального слоя приводит к росту числа распространяющихся мод, при этом все моды становятся гибридными (HE_{nm}, EH_{nm}). В случае ($\rho_1 = \rho_2 = 3$) все указанные моды являются распространяющимися, а волновод – многомодовым. Эти факты представлены для контроля получаемых в дальнейшем результатов.

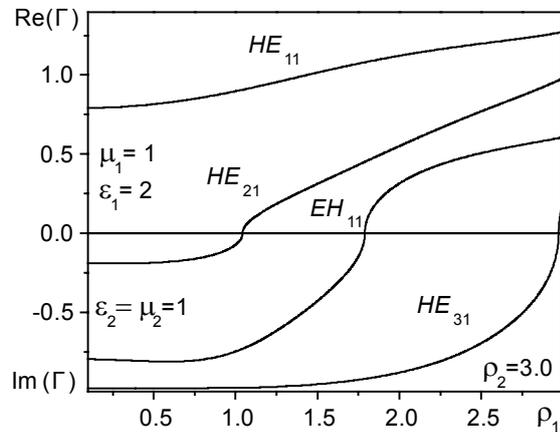


Рис. 2. Зависимость параметра распространения Γ от радиуса первого слоя ρ_1 для ряда мод волновода с «правыми» слоями

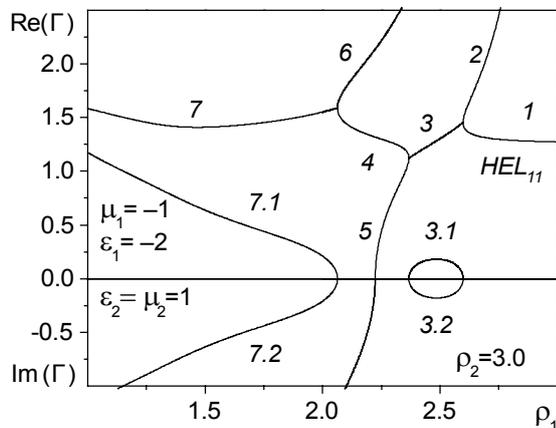


Рис. 3. Зависимость параметра распространения Γ от радиуса первого слоя ρ_1 для ряда мод. Мода HEL_{11} помечена цифрой 1

Учитывая универсальность граничных условий для полей на идеально проводящей поверхности, можно говорить о равенстве Γ соответствующих мод для волноводов одинакового радиуса, полностью заполненных средами с противоположными показателями преломления. Доказательством являются результаты, представленные на рис. 3 и 4. Графики удобнее рассматривать со стороны уменьшения радиуса центрального слоя от экрана ($\rho_1 \leq 3, \rho_2 = 3$), т.е. вытеснения ЛНМ-слоя воздухом. Графики демонстрируют сложный, бифуркационный характер преобразования мод, затрудняющий введение классификации их по типам. Для проверки

утверждения выбраны моды HE_{11} (рис. 3) и EH_{11} (рис. 4). Здесь в имени мод добавлен символ L (HEL_{11} , EHL_{11}), указывающий на распространение волн в «левой» среде. Действительно, при $\rho_1 = \rho_2 = 3$ кривые, обозначенные цифрой 1 на рис. 3 и 4, берут начало от значений, указанных на рис. 2.

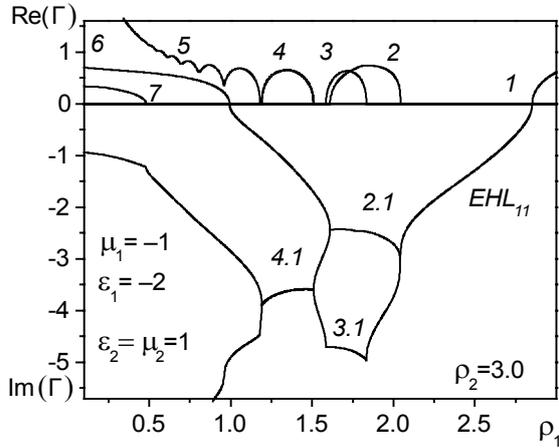


Рис. 4. Зависимость параметра распространения Γ от радиуса первого слоя ρ_1 для ряда мод. Мода EHL_{11} помечена цифрой 1

распространения (кривые 3, 3.1 и 3.2). Для данного волновода это также новый результат. Участок кривой, помеченный цифрой 6, указывает на наличие в волноводе еще одной моды с высоким коэффициентом замедления фазы, а участок 4 – моды с аномальной дисперсией. С уменьшением радиуса центрального слоя одна из мод становится запредельной (кривая 5). Дальнейшее уменьшение радиуса центрального слоя приводит к появлению мод с комплексно-сопряженными показателями распространения (кривые 7, 7.1 и 7.2).

На рис. 4 представлена «динамика» мод, «порожденных» волной EH_{11} . Уменьшение радиуса центрального слоя приводит к отсечке моды EHL_{11} (кривая 1) и появлению ряда комплексных мод. На графике присутствует множество точек бифуркации и соответственно ветвей, характеризующих сложный модовый спектр волновода. Представляет интерес одна из веток этого спектра мод, представленная на рис. 5. С учетом того, что в слоях, заполняющих волновод, отсутствуют потери, комплексный характер параметра распространения, представленный на этом рисунке, можно отнести к реактивному сопротивлению среды. Это подтверждается элементной базой «левой» искусственной среды, представляющей собой резонансные проводящие объекты, различным образом ориентированные в пространстве [2]. Наличие резонансных объектов приводит к возникновению частотных окон прозрачности ($\rho_1 \sim \omega_0$). Таким образом, двухслойный волновод с центральным ЛНМ-слоем является полосно-пропускающим частотным или пространственным модовым фильтром.

На рис. 3 представлена «динамика» мод, «порожденных» модой HE_{11} . Уменьшение радиуса центрального слоя приводит к незначительному росту Γ для моды HEL_{11} (кривая 1), наблюдается участок аномальной дисперсии. Компьютерное моделирование показывает наличие в волноводе моды с очень высоким показателем распространения (кривая 2), чего не наблюдается в волноводе с «правыми» средами. Высокий коэффициент замедления фазы может быть объяснен поворотом фронта парциальных волн в противоположную сторону при переходе в «левую» среду или интерференцией волн на микроскопических элементах метаматериала.

Рассматриваемые моды объединяются в точке бифуркации и порождают две моды с комплексно сопряженными показателями

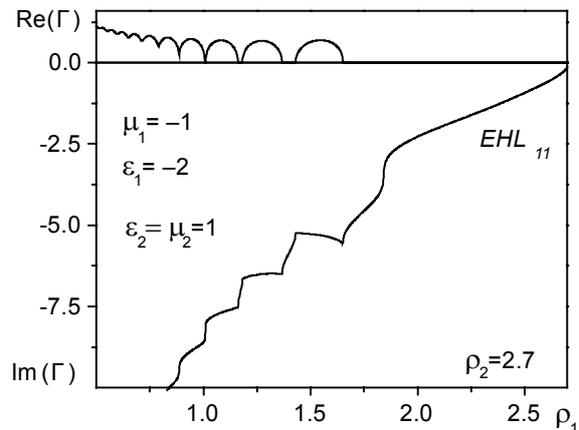


Рис. 5. Зависимость параметра распространения Γ от радиуса первого слоя ρ_1 для моды EHL_{11}

Заключение

В процессе компьютерного моделирования были рассмотрены различные варианты соотношения толщины внутреннего диэлектрического стержня из «левого» материала и слоя «правого» материала. Качественная картина поведения параметра Γ существенно отличается от известной для волновода с двумя правыми средами. Таким образом, можно говорить о следующих особенностях распространения электромагнитных волн в рассматриваемом волноводе:

1. В двухслойном экранированном волноводе, центральный слой которого характеризуется отрицательным показателем преломления, а внешний представляет собой воздух, при определенных значениях радиусов внутреннего слоя и экрана можно реализовать как волновой процесс, так и область отсечки собственных волноводных мод.
2. Появление слоя «левой» среды приводит к возникновению ряда мод с высокими коэффициентами замедления.
3. Наблюдаются области существования комплексных волн (в отсутствие потерь в заполняющих средах).
4. Существуют волны с аномальным поведением параметра распространения.
5. Наличие центрального ЛНМ-слоя приводит к возникновению частотных окон прозрачности. Волновод является полосно-пропускающим фильтром.

Таким образом, можно говорить о возможности конструирования на отрезках таких волноводов полосно-пропускающих фильтров, линий задержки и устройств, использующих для своего функционирования замедляющие системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселаго В. Г. // УФН. – 1967. – Т. 92. – Вып. 3. – С. 517–526.
2. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., et al. // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – P. 4184–4187.
3. Pendry J. B. // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 85. – P. 3966–3969.
4. Schurig D., Mock J. J., Justice B. J., et al. // Science. – 2006. – V. 314. – P. 977–980.
5. Дунаевский Г. Е., Мещеряков В. А., Журавлев В. А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 12. – С. 69–74.
6. Мещеряков В. А., Овсянников В. В. // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т. 47. – № 6. – С. 89–94.
7. Ubeid M. F., Shabat M. M., and Sid-Ahmed M. O. // Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPC), Saudi International. – 2011. – P. 1–4.
8. He J. and Sailing He // IEEE. Microwav. Wireless Component. Lett. – 2006. – V. 16. – Is. 2. – P. 96–98.
9. Salehi H. and Mansour Raafat // IEEE. MTT. – 2005. – V. 53. – P. 3489–3497.
10. Antipov S. et al. // IEEE. PAC. – 2007. – P. 2906–2908.
11. Suping Li, Zihua Wang, and Wei Wu // 3rd IEEE International Conference: Multimedia Technology (IC-BNMT). – 2010. – P. 1145–1149.
12. Mousa H. M. and Shabat M. M. Antenna Technology (iWAT), 2013. – P. 286–289.
13. Веселов Г. И., Раевский С. Б. Слоистые металлodieлектрические волноводы. – М.: Радио и связь, 1988.
14. Неганов В. А., Осипов О. В. и др. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2005. – 648 с.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: mva@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 23.04.14,
после доработки – 23.07.14.