

Исследование собственных потерь оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения

Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе предложен аналитический метод определения собственных потерь распространяющихся электромагнитных волн в диэлектрических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Произведено численное моделирование частотных характеристик декремента затухания оптических микроволноводов. На примере двух низших мод ортогональной поляризации показано, что в формировании частотной зависимости декремента затухания участвуют два процесса: перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости. При этом дисперсия групповой скорости, обусловленная геометрией волноводящей структуры, приводит к образованию локального максимума декремента затухания на его частотной характеристике.

Ключевые слова: радиофотоника, собственные потери, оптические микроволноводы, интегральная оптика

1. Введение

В последние десятилетия основными проблемами микро- и функциональной электроники в являются массогабаритные параметры и быстродействие используемых устройств [1]. В связи с этим, появилось новое научное-техническое направление, возникшее на стыке радиоэлектроники, СВЧ-оптоэлектроники, интегральной и волоконной оптики, фотоники, – радиофотоника [2-4]. На основе принципов радиофотоники были разработаны и в последствии создан ряд устройств таких, как: различные системы фильтрации [5], мультиплексоры и демультиплексоры [6], электрооптические модуляторы [7], оптоэлектронные генераторы [8], аналоговые процессоры [4] и др.

Основной компонентной базы интегральной радиофотоники являются оптические микроволноводы. В свою очередь, одним из главных факторов, ограничивающих применение устройств на основе таких микроволноводов, являются вносимые потери. Потери в микроволноводах зависят от нескольких факторов, важнейшими из которых являются качество изготовления микроволновода и свойства материалов волновода и окружающего его диэлектрика. Вторым фактором является геометрия оптического волновода.

Как показал анализ литературы, потери в оптических диэлектрических волноводах прямоугольного поперечного сечения в основном исследуются двумя путями: экспериментальным и путем моделирования свойств оптических волноводов методом конечных элементов в различных программных пакетах, например, в COMSOL Multiphysics. Кроме того, исследования влияния геометрических и физических параметров оптических волноводов на значение вносимых потерь не производилось.

Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния геометрических и физических параметров на вносимые потери.

2. Аналитическая теория потерь ЭМВ в прямоугольном диэлектрическом волноводе

При численном моделировании потерь оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения использовалась аналитическая теория, основанная на теории приближенного модового анализа, предложенной в работе [9]. Теория базируется на совместном решении уравнений Максвелла и материальных уравнений. Отличие от теории [9], заключается в том, что предложенная аналитическая теория учитывает собственные потери материалов волновода и окружающего пространства путем введения в уравнения Максвелла и в материальные уравнения комплексных диэлектрических проницаемостей сред. При этом предполагается, что внутри волновода поля описываются тригонометрическими функциями, а снаружи экспоненциальными. Отметим, что в угловых областях волновода поля исключаются из электродинамического анализа (см. Рис. 1). После применения граничных условий электродинамики к соответствующим компонентам электрического и магнитного поля в решении можно выделить четыре случая, каждый из которых описывает определённый набор мод, распространяющихся в прямоугольном волноводе вдоль оси z . Характер мод в диэлектрическом волноводе прямоугольного поперечного сечения имеет гибридную структуру, т. е. существуют все три компоненты электрического и магнитного поля. Моды в таком волноводе принято обозначать E_x^{mn} и E_y^{mn} , где m и n обозначают количество вариаций электрического поля по x и y -координатам, а E_x и E_y – поперечную компоненту электрического поля, имеющую максимальное значение в сечении волновода. В дальнейшем будем интересоваться только двумя низшими модами ортогональной поляризации – E_x^{11} и E_y^{11} . Дисперсионное уравнение для низшей моды E_x^{11} выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} k_{1x}\alpha_{13} \operatorname{ctg}\left(\frac{a}{2} \cdot k_{1x}\right) - k_{1y}\alpha_{12} \operatorname{tg}\left(\frac{b}{2} \cdot k_{1y}\right) + ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)k_0^2 - k_{1x}^2 - k_{1y}^2) = 0 \\ k_{1x}\alpha_{13} \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2} \cdot k_{1x}\right) - k_{1y}\alpha_{12} \operatorname{ctg}\left(\frac{b}{2} \cdot k_{1y}\right) - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)k_0^2 - k_{1x}^2 - k_{1y}^2) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

для E_y^{11} -моды:

$$\begin{cases} k_{1x}\alpha_{13} \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2} \cdot k_{1x}\right) - k_{1y}\alpha_{12} \operatorname{ctg}\left(\frac{b}{2} \cdot k_{1y}\right) - ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)k_0^2 - k_{1x}^2 - k_{1y}^2) = 0 \\ k_{1x}\alpha_{13} \operatorname{ctg}\left(\frac{a}{2} \cdot k_{1x}\right) - k_{1y}\alpha_{12} \operatorname{tg}\left(\frac{b}{2} \cdot k_{1y}\right) + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)k_0^2 - k_{1x}^2 - k_{1y}^2) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где ε_1 и ε_2 – комплексные диэлектрические проницаемости материала волновода и окружающего его пространства; a и b – ширина и высота поперечного сечения микроволновода; $\alpha_{12} = ik_{2y} = \sqrt{k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - k_{1y}^2}$, $\alpha_{13} = ik_{3x} = \sqrt{k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - k_{1x}^2}$; k_{1x} и k_{1y} – поперечные волновые числа внутри волновода вдоль осей x и y , являющиеся решениями систем уравнений (1) и (2). В отличие от теории приближенного модового анализа [1], поперечные волновые числа имеют комплексную форму. При этом мнимые части k_{1x} и k_{1y} характеризуют потери рассматриваемой моды в структуре. Постоянная распространения в волноводе определяется следующим образом:

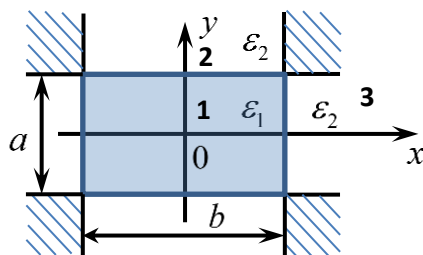


Рисунок 1. Поперечное сечение рассматриваемого диэлектрического волновода

$$\gamma = \beta - i\alpha = \sqrt{\omega^2 \cdot \varepsilon_1 \cdot \mu_0 - k_{1x}^2 - k_{1y}^2} \quad (3)$$

Запишем декремент затухания по мощности в дБ/м:

$$\alpha_{p, dB} = 20 \cdot \log(e^{-\alpha}), \quad (4)$$

и эффективный показатель преломления как:

$$n_{eff} = \frac{\gamma}{k_0}. \quad (5)$$

3. Результаты численного моделирования

Перейдем к численному исследованию собственных потерь оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения. Для этого по полученной аналитической теории в математическом пакете Matlab была написана программа, производящая решение дисперсионных уравнений (1) и (2) с заданными параметрами среды и позволяющая определить собственные потери распространяющихся мод в оптических микроволноводах. Отметим, что при моделировании в качестве материала, окружающего волновод (оболочки), был выбран оксид кремния (SiO_2) как наиболее часто используемый диэлектрик, применяемый для изоляции оптических интегральных схем, а в качестве материала волновода использовались следующие материалы: кремний (Si), нитрид кремния (Si_3N_4), нитрид кремния обогащенный кремнием (Si_7N_3). Данные материалы наиболее перспективны для создания интегральных радиофотонных приборов и устройств, так на базе кремния уже реализован ряд различных устройств с электронным управлением [2], нитрид кремния обладает наиболее низкими оптическими потерями [3, 4], а нитрид кремния, обогащенный кремнием, обладает наиболее высоким коэффициентом нелинейности [4].

На рисунке 2 представлены результаты моделирования эффективного показателя преломления, декремента затухания и значения групповой скорости мод E_x^{11} и E_y^{11} в зависимости от частоты электромагнитного излучения, (а) – моделирование выполнено для волновода из Si_3N_4 , (б) – из Si_7N_3 , (в) – из Si. При моделировании размер поперечного сечения волновода составлял $1,5 \times 0,3$ мкм, значение декремента затухания материала волновода – 0,5 дБ/см, декремента затухания SiO_2 – 0,25 дБ/см.

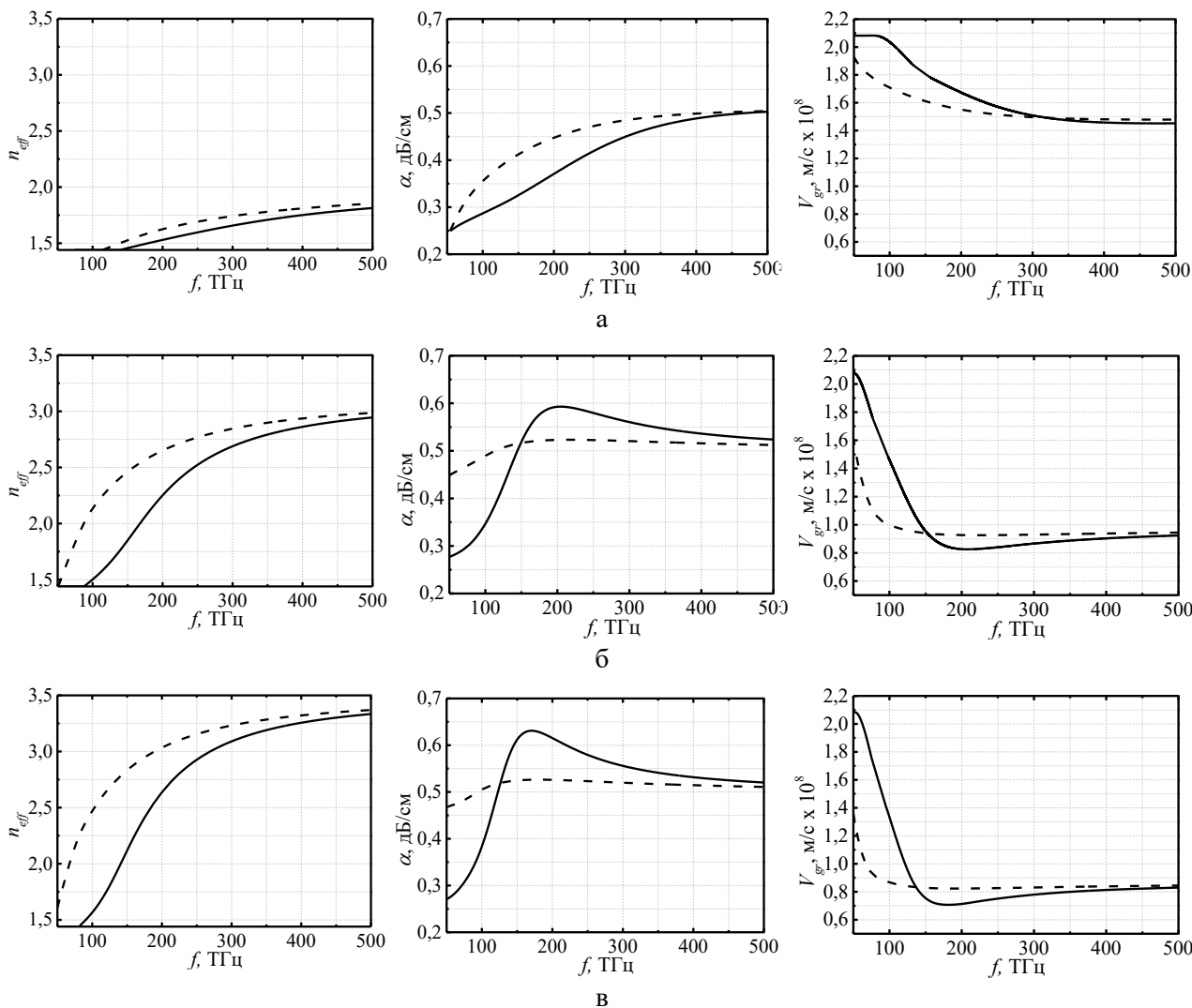


Рисунок 2. Частотные зависимости эффективного показателя преломления и значения собственных потерь в микрополноводе; сплошная линия соответствует E_y^{11} -моду, пунктирная – E_x^{11} .

Из дисперсионных характеристик видно, что с увеличением частоты, значение эффективного показателя преломления стремится от показателя преломления среды, окружающей волновод, к показателю преломления материала, из которого изготовлен волновод, соответственно, и значение декремента затухания стремится от значения декремента затухания окружающего пространства к декременту затухания материала волновода с образованием локального максимума. Такой ход зависимости объясняется тем, что в формировании частотной характеристики декремента затухания участвуют два процесса: перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости. Заметим, что чем выше значение разницы в коэффициентах преломления системы волновод-оболочка, тем больше крутизна изгиба дисперсионных ветвей (ниже минимум групповой скорости), тем, соответственно, выше становится максимальное значение потерь в диэлектрическом волноводе.

Отметим, что когда влияние групповой скорости незначительно, значение декремента затухания моды E_y^{11} ниже, чем у моды E_x^{11} и с увеличением частоты стремится к декременту затухания волновода (см. рис. 2(а)). Такой ход характеристики обусловлен тем, что E_y^{11} -мода имеет большую эффективную площадь, чем E_x^{11} и,

соответственно, большая часть ее энергии распространяется в окружающем волновод пространстве, имеющем меньшие потери. При увеличении разницы в показателях преломления становится существенным влияние групповой скорости на частотную характеристику декремента затухания и, соответственно, потери E_y^{11} -моды начинают увеличиваться и становятся выше потерь E_x^{11} -моды с образованием локального максимума (см. рис. 2(а) и 2(б)).

3. Заключение

Таким образом, в работе теоретически исследуется влияние геометрических и физических параметров оптических микроволноводов прямоугольного сечения на значение собственных потерь при распространении низших мод ортогональной поляризации. Показано, что в формировании частотной зависимости декремента затухания участвуют два процесса: перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости. Перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда приводит к тому, что с увеличением частоты оптического сигнала значение потерь стремится от значения потерь оболочки к значению потерь материала волновода, а дисперсия групповой скорости, приводит к образованию локального максимума декремента затухания. При этом чем больше значение контраста показателей преломления структуры, тем выше значение данного максимума.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (соглашение 14.575.21.0157, идентификатор проекта RFMEFI57517X0157).

Список литературы

1. Daldosso N., et al. "Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional Si₃N₄ waveguides." *Materials science in semiconductor processing*. – 2004. – Т. 7. – №. 4. – С. 453-458.
2. Capmany J., Novak D., Microwave photonics combines two worlds // *Nature Photon.* – 2007. – V.1. – P. 319-330.
3. Yao J., Microwave Photonics // *J. Lightwave Technol.* – 2009. – V.27. – P. 314-335.
4. Marpaung D., Roeloffzen C., et al., Integrated microwave photonics // *Lasers Photon. Rev.* – 2013. V.7. – P. 506-538.
5. Dai T. et al. Bandwidth and wavelength tunable optical passband filter based on silicon microring resonators // *Optics letters.* – 2016. – V. 41. – №. 20. – P. 4807-4810.
6. Wu D. et al. Reconfigurable optical add-drop multiplexer based on thermally tunable micro-ring resonators // *Optics Communications.* – 2016. – V. 367. – P. 44-49.
7. Xu Q. et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator // *nature.* – 2005. – V. 435. – №. 7040. – P. 325.
8. Levy J. S. et al. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects // *Nature photonics.* – 2010. – V. 4. – №. 1. – P. 37.
9. Menon, V.J. The rectangular dielectric waveguide revisited / V.J. Menon, S. Bhattacharjee, K.K. Dey // *Optics communications.* – 1991. – Vol. 85(5-6). – P. 393-396.