

# Исследование влияния геометрических и физических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения

А.В. Дроздовский<sup>1</sup>, Г.А. Зарецкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

**Аннотация.** Аналитически исследовано формирование собственных потерь распространяющихся колебаний в диэлектрических волноводах прямоугольного поперечного сечения. Показано, что в формировании частотной характеристики декремента затухания участвуют два процесса: перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости. При этом дисперсия групповой скорости, обусловленная геометрией волноведущей структуры, приводит к образованию локального максимума декремента затухания на его частотной характеристике.

## 1. Введение

Одной из важнейших характеристик оптических волноводов, помимо дисперсии, являются собственные потери, возникающие при распространении электромагнитной волны. В свою очередь, потери в диэлектрических волноводах определяются несколькими составляющими. Во-первых, поскольку в диэлектрических волноводах часть ЭМВ распространяется внутри волновода, а часть в окружающем волновод пространстве, то собственные потери определяются потерями материалов, из которых изготовлена волноведущая структура. Во-вторых, вследствие несовершенства технологии изготовления, существуют потери на поверхностных неоднородностях на границе раздела волновод-окружающее пространство. 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 при распространении.

## 2. Аналитическая теория потерь ЭМВ в прямоугольном диэлектрическом волноводе

Аналитическая теория потерь электромагнитных волн в прямоугольном диэлектрическом волноводе основана на теории приближенного модового анализа, предложенной в работе [1]. Теория базируется на совместном решении уравнений Максвелла и материальных уравнений с учетом собственных потерь материалов, из которых изготовлен волновод и окружающее его

пространство (см. Рис. 1). В ходе полученного решения можно выделить четыре случая, каждый из которых описывает определённый набор мод, распространявшихся в прямоугольном волноводе вдоль оси  $z$ . Дисперсионное уравнение для низшей моды  $E_x^{11}$  выглядит следующим образом:

для  $E_x^{11}$ -моды

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

для  $E_y^{11}$ -моды:

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

где  $\alpha_{12} = ik_{2y} = \sqrt{k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - k_{1x}^2}$   $\alpha_{13} = ik_{3x} = \sqrt{k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - k_{1y}^2}$   $k_{1x}$  и  $k_{1y}$  – поперечные волновые числа внутри волновода вдоль осей  $x$  и  $y$ , в системе с потерями, имеющие комплексную форму (см. рис.1);  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – комплексные диэлектрические проницаемости материала волновода и окружающего его пространства;  $a$  и  $b$  – ширина и высота поперечного сечения микроволновода. Постоянная распространения в волноводе определяется следующим образом:

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

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

На следующем этапе работы исследовано влияние параметров волноведущей структуры на собственные потери диэлектрического волновода с прямоугольным поперечным сечением. Отметим, что при моделировании в качестве материала, окружающего волновод (оболочки), был выбран оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) как наиболее часто используемый диэлектрик, применяемый для изоляции оптических интегральных схем, а в качестве материала волновода использовались следующие материалы: кремний ( $\text{Si}$ ), нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), нитрид кремния обогатённый кремнием ( $\text{SiN}_x$ ). 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, обогатённый кремнием, обладает наиболее высоким коэффициентом нелинейности [4].

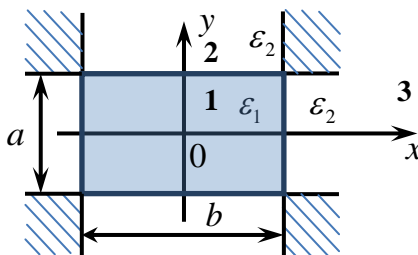
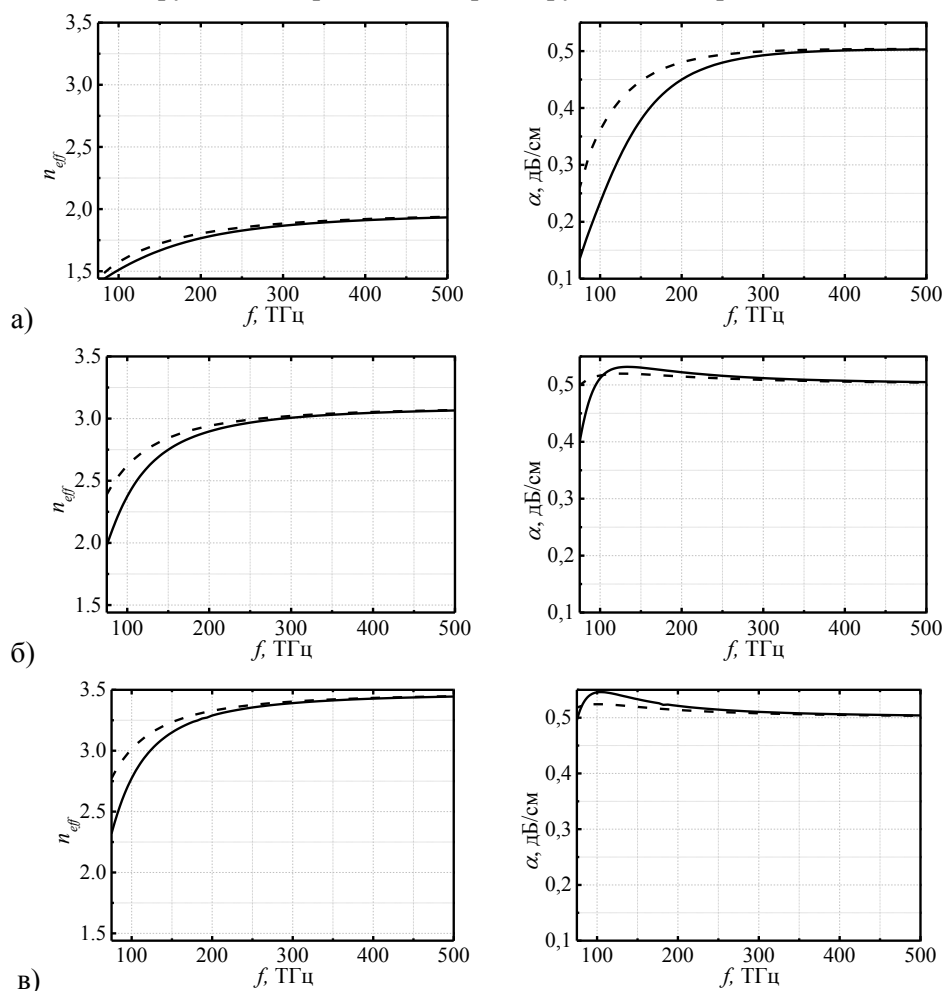


Рисунок 1. Поперечное сечение рассматриваемого диэлектрического волновода.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования эффективного показателя преломления и декремента затухания мод  $E_x^{11}$  и  $E_y^{11}$  зависимости от частоты электромагнитного излучения, (а) – моделирование выполнено для волновода из  $Si_3N_4$ , (б) – из  $SiN_x$ , (в) – из Si. При моделировании размер поперечного сечения волновода составлял  $1,5 \times 0,7$  мкм, значение декремента затухания материала волновода – 0,5 дБ/см, декремента затухания  $SiO_2$  – 0,2 дБ/см. 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.



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

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)).

#### 4. 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.

#### 5. Литература

- [1] 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.
- [2] Xu, Q. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator / Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, M. Lipson // *Nature*. – 2005. – Vol. 435(7040). – P. 325-327.
- [3] Bauters, J.F. Ultra-low-loss high-aspect-ratio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  waveguides / J.F. Bauters, M. Heck, D. John, D. Dai, M.-C. Tien, J. Barton, A. Leinse, R.G. Heideman, D.J. Blumenthal, J.E. Bowers // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(4). – P. 3163-3174.
- [4] Ooi, K.J.A. Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN:  $\text{Si}_7\text{N}_3$  above the two-photon absorption edge / K.J.A. Ooi, D.K.T. Ng, T. Wang, A.K.L. Chee, S.K. Ng, Q. Wang, L.K. Ang, A.M. Agarwal, L.C. Kimerling, D.T.H. Tan // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – P. 13878.

# Investigation of the influence of the geometric and physical parameters on the losses in the optical microwaveguides of rectangular cross section

A.V. Drozdovskii<sup>1</sup>, G.A. Zaretskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», Professora Popova 5, St. Petersburg, Russia, 197376

**Abstract.** The formation of the propagating wave insertion losses in the dielectric waveguides of rectangular cross section is analytically studied. It is shown that two processes are involved in the formation of the frequency characteristic of the attenuation constant: the redistribution of energy in the waveguide-environment system and the group velocity dispersion. In this case, the group velocity dispersion determined by the geometry of the waveguiding structure leads to the formation of a local maximum of the attenuation constant in the frequency response.