

*Шапран Д.А., Зарецкая Г.А., Дроздовский А.В.*  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический*  
*университет «ЛЭТИ»*

## **Влияние геометрических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения**

*Представлены результаты исследования влияния геометрических параметров оптического микроволновода прямоугольного поперечного сечения на собственные потери и эффективный показатель преломления. Продемонстрировано, что потери в оптическом микроволноводе нелинейно зависят от изменения геометрии поперечного сечения, что, в свою очередь, обусловлено перераспределением энергии в системе волновод/оболочка и, соответственно, дисперсией.*

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

В последние десятилетия основными проблемами микро- и функциональной электроники 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 разработан и в последствии создан ряд устройств таких, как: различные системы фильтрации [5], мультиплексоры и демультимплексоры [6], электрооптические модуляторы [7], оптоэлектронные генераторы [8], аналоговые процессоры [4] и др.

Основой компонентной базы интегральной радиофотоники являются оптические микроволноводы. В свою очередь, одним из главных факторов, ограничивающих применение и скорость работы 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. Повышение качества используемых в микроволноводе материалов является в основном технологической задачей. Поэтому целью данной работы являлось изучение влияния геометрических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения

Поперечное сечение оптического микроволновода схематично представлено на рис 1. Структура представляет собой диэлектрический волновод прямоугольного сечения, окруженный диэлектрической оболочкой. На рис. 1 использовались следующие обозначения:  $n_{core}$  – показатель преломления микроволновода;  $n_{clad}$  – показатель преломления среды, окружающей микроволновод;  $h$  и  $W$  – высота и ширина микроволновода, соответственно.

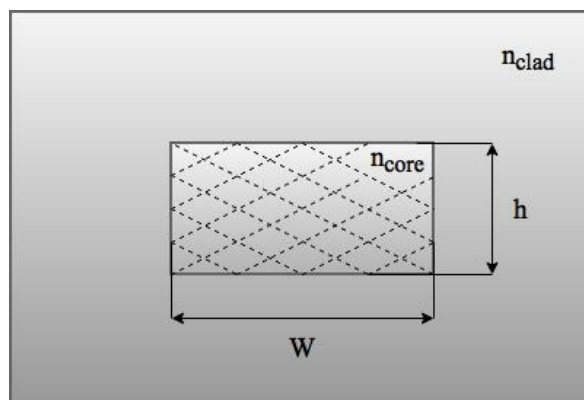
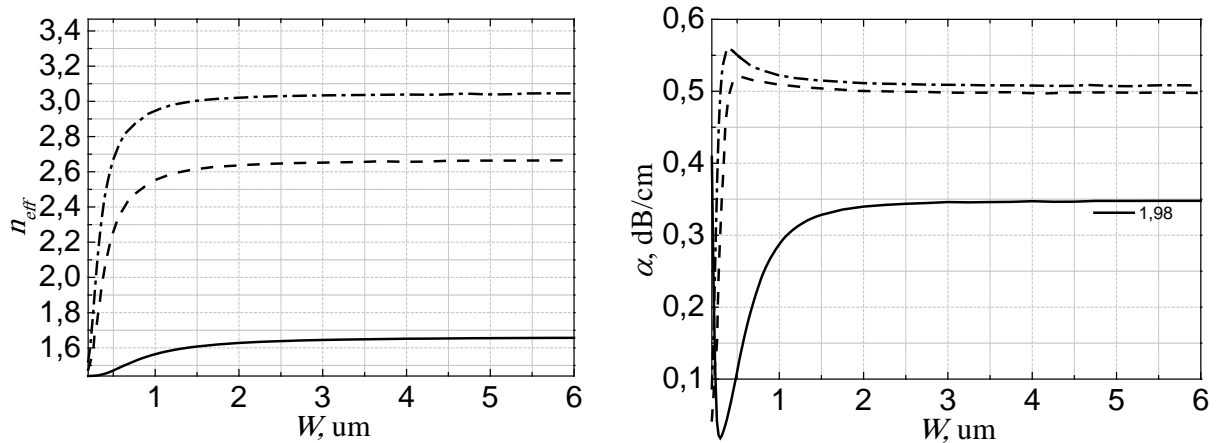


Рис.1 Поперечное сечение исследуемого планарного оптического микроволновода

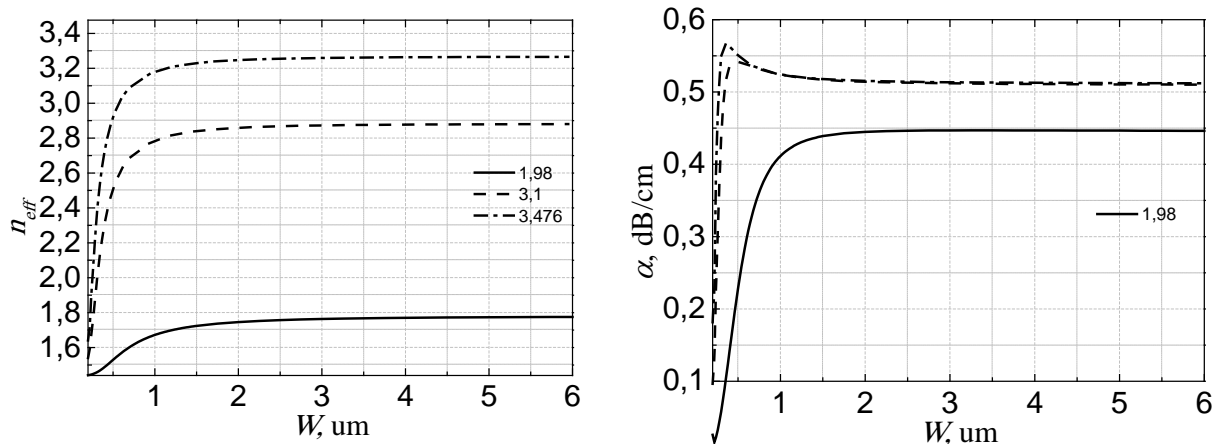
Отдельно следует отметить, что при моделировании в качестве материала оболочки был выбран оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), как наиболее часто используемый диэлектрик, применяемый для изоляции интегральных схем, а в качестве материала волновода при расчёте использовались следующие материалы: кремний ( $\text{Si}$ ), нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), нитрид кремния, обогащенный 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 [7], нитрид кремния обладает наиболее низкими оптическими потерями [8, 9], а нитрид кремния, обогащенный кремнием, обладает наиболее высоким коэффициентом нелинейности [9], что, в свою очередь, позволяет создавать такие устройства, как оптоэлектронные генераторы и генераторы оптических гребенок и т.д.

Моделирование дисперсионных свойств и декремента затухания производилось в пакете COMSOL Multiphysics при помощи модуля Wave Optics Module. При последовательном изменении геометрии и потерь материала волновода производился расчёт действительной части эффективного показателя преломления ( $n_{eff}$ ) и декремента затухания ( $\alpha$ ) диэлектрического волновода для низшей моды  $E_{x11}$ .

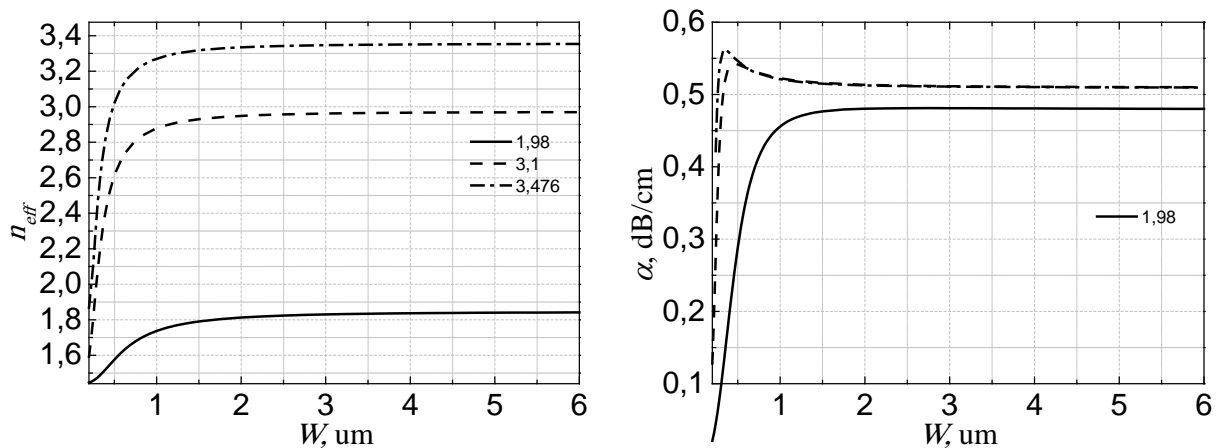
На рис. 2 представлены зависимости эффективного показателя преломления и значения собственных потерь в микроволноводе от его ширины, где, а – моделирование выполнено для микроволновода высотой 300 нм, б – 500 нм, в – 700 нм, при этом сплошная линия соответствует  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , пунктирная –  $\text{SiN}_x$ , штрихпунктирная –  $\text{Si}$ . Следует отметить, что при моделировании значение собственных потерь в материале, из которого изготовлен волновод составляло 0,5 дБ/см, а в окружающем волновод оксиде кремния – 0,2 дБ/км. Из рисунков видно, что зависимость  $n_{eff}$  от  $W$  имеет нелинейный характер. По мере увеличения значения  $W$ ,  $n_{eff}$  растёт и выходит на насыщение. Данный факт можно объяснить за счёт перераспределения полей в системе волновод/оболочка. По мере увеличения размеров волновода поле волны будет всё больше уходить из оболочки и концентрироваться в микроволноводе. Таким образом, по мере увеличения размеров волновода эффективный показатель преломления ( $n_{eff}$ ) будет стремиться от  $n_{clad}$  к  $n_{core}$ . Также следует отметить, что зависимость потерь от геометрии оптического волновода, имеет нелинейный характер. При этом наблюдается выраженный максимум поглощения. Пик поглощения тем выше, чем выше разница в показателях преломления материалов, из которых изготовлен волновод и окружающее его пространство. Возникновение такого максимума связано с существованием двух процессов, влияющих на итоговые потери. С одной стороны увеличение  $W$  ведёт к увеличению вносимых потерь за счёт концентрации волны в оптическом микроволноводе, с другой стороны скорость волны в структуре нелинейно зависит от геометрии волновода.



а



б



в

Рис.2 Зависимости эффективного показателя преломления и значения собственных потерь в микроволноводе от его ширины, где а – моделирование выполнено для микроволновода высотой 300 нм, б – 500 нм, в – 700 нм

Таким образом, в ходе данной работы было исследовано влияние геометрических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного

поперечного сечения. Было выявлено, что значение собственных потерь в таких микроволноводах определяется как собственными потерями материалов, из которых изготовлен волновод и окружающий его диэлектрик, так и законом дисперсии и распределением полей внутри системы оптический волновод/оболочка, соответственно.

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).

#### Библиографический список

1. Daldosso N., et al. "Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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 multiple 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. Ooi K. J. A. et al. Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> above the two-photon absorption edge // *Nature communications*. – 2017. – V. 8. – P. 13878.