

Моделирование связи не параллельных регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения

Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе производилось моделирование характеристик передачи связанной системы, состоящей из двух идентичных непараллельных диэлектрических волноводов прямоугольного сечения. Показано, что с увеличением угла расходимости между волноводами происходит уменьшение значения мощности, переизлучаемой из одного волновода в другой. Такой ход зависимостей коэффициентов передачи обусловлен двумя процессами: увеличением «скорости» отдаления волноводов друг от друга ($\partial g / \partial z$) и ростом фазового рассогласования между модами, распространяющимися в волноводах.

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

1. Введение

Одними из важнейших элементов компонентной базы интегральной оптики и интегральной радиофотоники являются связанные оптические волноводы. Такие связанные волноводы служат для перераспределения оптического излучения между с требуемым коэффициентом связи. В реальных оптических устройствах таких, как направленные ответвители [1, 2], микрокольцевые резонаторы [3], различные фильтрующие системы [4-7] и другие, помимо идеальных параллельных секций связанных волноводов существуют и не параллельные (наклонные под определенным углом или искривленные с определенным радиусом), которые служат для ввода мощности в область связи и вывода мощности из нее. Учет таких областей важен при проведении моделирования оптических процессов возбуждения при разработке фотонных и оптоэлектронных приборов и устройств, так как такие области вносят дополнительный вклад в процессы возбуждения всей системы в целом.

В данной работе представлены результаты численного исследования влияния угла расхождения волноводов в составе связанной двухволноводной системы, на результирующую величину коэффициента передачи.

2. Теоретическая модель

Непараллельные волноводы зачастую характеризуются малыми углами расходимости и в литературе называются «квазипараллельными» или «почти параллельными» волноводами. Электромагнитные поля в таких волноводах могут быть представлены в форме близкой к модальным полям в регулярном базовом неискривлённом волноводе:

$$\begin{aligned} \vec{E}_m^p(\vec{r}_t, z) &= \hat{E}_m^p(\vec{r}_t, z) e^{-i\gamma_m^p(z)z} \\ \vec{H}_m^p(\vec{r}_t, z) &= \hat{H}_m^p(\vec{r}_t, z) e^{-i\gamma_m^p(z)z}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \hat{E}_m^p и \hat{H}_m^p – мембранные функции напряженностей электрического и магнитного поля m -моды p -волновода, зависящие только от поперечных координат

волновода; \vec{r}_i – координата, лежащая в плоскости поперечного сечения волновода; γ_m^p – продольное волновое число m -моды p -волновода; z – продольная координата вдоль области связи.

Отметим, что в отличие от параллельных многоволноводных систем, рассмотренных ранее [8], собственные поля в непараллельных системах содержат локальную зависимость от z .

Рассмотрим подробнее влияние угла наклона между волноводами на распределение мощности в двухволноводной системе. На рисунке 1 схематично представлена топология исследуемой структуры, которая состоит из двух идентичных непараллельных волноводов p и q с распространяющимися модами m и n , соответственно. На рисунке минимальное расстояние между волноводами обозначено g и угол расходимости между волноводами θ .

Для поворота одного из волноводов в системе относительно базового применим к волноводу матрицу поворота. Тогда координаты волновода в результате преобразования примут значения:

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos(\theta) + z \cdot \sin(\theta), \\ z' &= -x \cdot \sin(\theta) + z \cdot \cos(\theta). \end{aligned} \quad (2)$$

При этом компоненты электромагнитных полей базового волновода трансформируются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{mz}^{p'}(x', z') &= -E_{mx}^p(x', z') \cdot \sin(\theta) + E_{mz}^p(x', z') \cdot \cos(\theta), \\ H_{mz}^{p'}(x', z') &= -H_{mx}^p(x', z') \cdot \sin(\theta) + H_{mz}^p(x', z') \cdot \cos(\theta), \\ E_{mx}^{p'}(x', z') &= E_{mx}^p(x', z') \cdot \cos(\theta) + E_{mz}^p(x', z') \cdot \sin(\theta), \\ H_{mx}^{p'}(x', z') &= H_{mx}^p(x', z') \cdot \cos(\theta) + H_{mz}^p(x', z') \cdot \sin(\theta), \\ E_{my}^{p'}(x', z') &= E_{my}^p(x', z'), \\ H_{my}^{p'}(x', z') &= H_{my}^p(x', z'). \end{aligned} \quad (3)$$

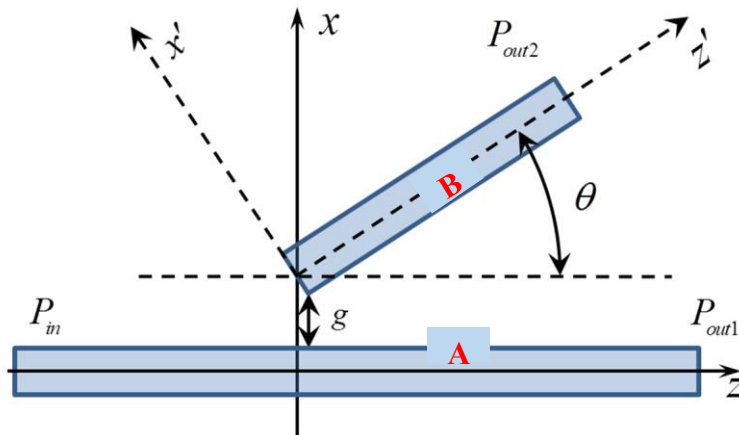


Рисунок 1. Топология рассматриваемой структуры

а компоненты волнового числа можно преобразовать к виду:

$$\beta_m^{p'} = \beta_m^p \cos(\theta) - k_{mx}^p \sin(\theta), \quad (4)$$

$$k_{mx}^{p'} = \beta_m^p \sin(\theta) + k_{mx}^p \cos(\theta), \quad (5)$$

$$k_{my}^{p'} = k_{my}^p. \quad (6)$$

На следующем шаге полученные выражения (4) – (6) подставляются в аналитическую теорию связи регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения для случая двухволноводной системы в отсутствии потерь [8]. В отличие от случая параллельных волноводов уравнения связанных мод для непараллельных волноводов приобретают зависимость от продольной координаты z . Для упрощения математической задачи будем использовать уравнения связанных волн для случая параллельных волноводов, состоящих из k отрезков. При этом начальная амплитуда на каждом отрезке равна конечной амплитуде на предыдущем.

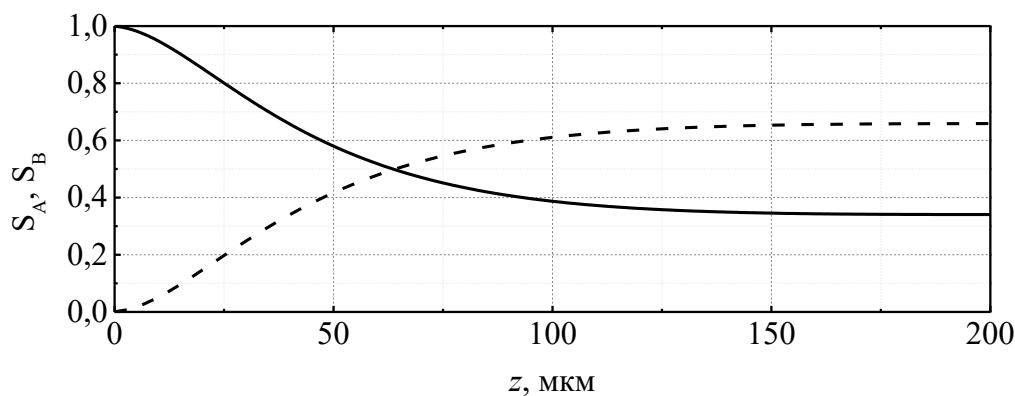
3. Результаты численного моделирования

Перейдём теперь к численному моделированию, в ходе которого исследовалось влияние угла расхождения волноводов. На рисунке 2 представлены результаты расчета коэффициентов передачи E_x^{II} -моды от продольной координаты z в двухволноводной системе с идентичными волноводами при различных углах расхождения волноводов θ . Отметим, что моделирование проводилось для волноводов с поперечными сечениями $1,5 \times 0,7$ мкм из нитрида кремния, окруженных единой внешней однородной средой из оксида кремния. Минимальное расстояние между волноводами при моделировании составляло $0,2$ мкм.

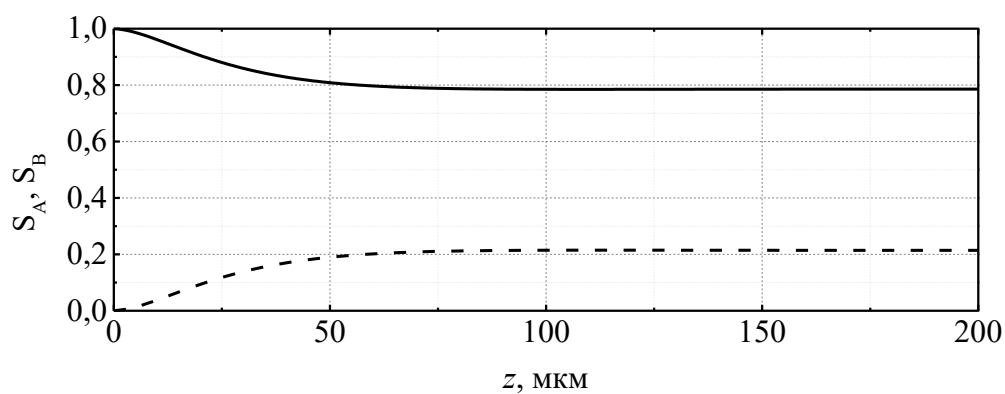
Из рисунка видно, что с увеличением угла расхождения волноводов за счет уменьшения их эффективной области взаимодействия происходит уменьшение значения мощности, переизлучаемой из одного волновода в другой. Такой ход зависимостей коэффициентов передачи обусловлен двумя процессами. С одной стороны, с увеличением угла расхождения волноводов происходит увеличение «скорости» отдаления волноводов друг от друга, т. е. $\partial g / \partial z$. С другой стороны, происходит увеличение фазового рассогласования между модами, распространяющимися в волноводах.

4. Заключение

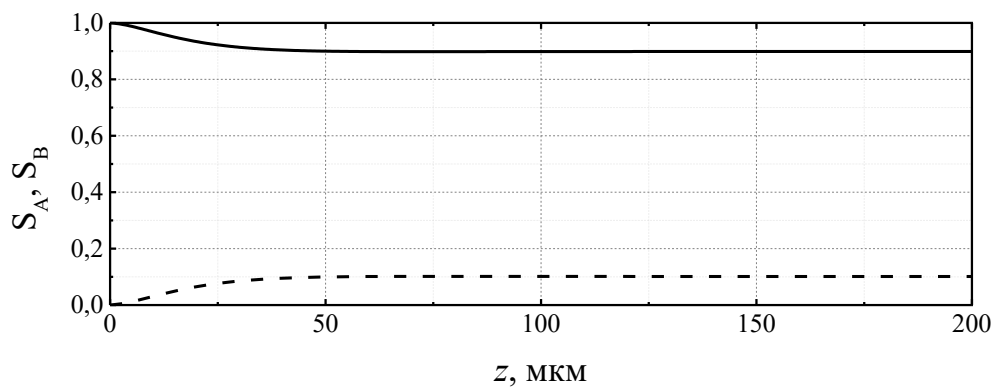
Таким образом, в работе показан расчет характеристик передачи связанной системы, состоящей из двух идентичных непараллельных диэлектрических волноводов прямоугольного сечения. При расчетах использованы микроволноводы из нитрида кремния, а в качестве окружающей структуру среды – оксид кремния. Длина волны оптического излучения составляла $1,55$ мкм. Показано, что с увеличением угла расходимости между волноводами происходит уменьшение значения мощности, переизлучаемой из одного волновода в другой. Такой ход зависимостей коэффициентов передачи обусловлен двумя процессами. С одной стороны, с увеличением угла расхождения волноводов происходит увеличение «скорости» отдаления волноводов друг от друга, т. е. $\partial g / \partial z$. С другой стороны, происходит увеличение фазового рассогласования между модами, распространяющимися в волноводах.



а



б



в

Рисунок 2. Зависимость коэффициента передачи от координаты недиссипативной системы, состоящей из двух идентичных волноводов при различных значениях угла расхождения волноводов (θ); (а) – $\theta = 0,25^\circ$, (б) – $\theta = 0,5^\circ$, (в) – $\theta = 0,75^\circ$; сплошная линия – коэффициент передачи волновода А, пунктирная – волновода В

Список литературы

1. Lu Z. et al. Comparison of photonic 2×2 3-dB couplers for 220 nm silicon-on-insulator platforms //2015 IEEE 12th International Conference on Group IV Photonics (GFP). – IEEE, 2015. – С. 57-58.
2. Lu Z. et al. Broadband silicon photonic directional coupler using asymmetric-waveguide based phase control //Optics express. – 2015. – Т. 23. – №. 3. – С. 3795-3808.
3. Zhuang L. et al. Ring resonator-based single-chip 1×8 optical beam forming network in LPCVD waveguide technology //Proc. 11th IEEE/LEOS Symp. Benelux, Eindhoven, The Netherlands. – 2006. – Т. 30. – С. 45-48.

4. Song S. et al. Tunable single passband microwave photonic filter using a cascaded pair of microring resonators //2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). – IEEE, 2017. – С. 1-4.
5. Palací J. et al. Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator //IEEE Photonics Technology Letters. – 2010. – Т. 22. – №. 17. – С. 1276-1278.
6. Marpaung D. et al. Si₃N₄ ring resonator-based microwave photonic notch filter with an ultrahigh peak rejection //Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 20. – С. 23286-23294.
7. Marpaung D. et al. Ultrahigh suppression and reconfigurable RF photonic notch filter using a silicon nitride ring resonator //CLEO: Science and Innovations. – Optical Society of America, 2014. – С. SF2O.1.
8. Зарецкая Г. А., Дроздовский А. В. Влияние контраста показателей преломления на характеристики передачи системы, состоящей из двух связанных оптических микроволноводов //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – №. 1. – С. 448-452.