

УДК 621.396

Д.Н. Москалев¹, У.О. Салгаева², Р.С. Пономарев^{1, 2}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

² ООО «Малое инновационное предприятие «Пермские нанотехнологии»,
Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ С ВЫСОКИМИ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДОВ ИХ Si_3N_4 ⁵

Представлено проектирование и моделирование спектральных характеристик интегрально-оптической брэгговской решетки (ИО БР) с модуляцией эффективного показателя преломления $\Delta n \sim 10^{-4}$ на основе волноводов из Si_3N_4 . При моделировании и расчете спектральных характеристик ИО БР были использованы методы матрицы передачи, двунаправленного распространения собственных мод, согласованных плечных мод и эффективного показателя преломления. По результатам моделирования, топология ИО БР была оптимизирована, введена аподизация.

Ключевые слова: интегрально-оптические брэгговские решетки, Si_3N_4 , метод матрицы передачи, метод эффективного показателя преломления, аподизированные решетки.

D.N. Moskalev¹, U.O. Salgaeva², R.S. Ponomarev^{1, 2}

¹ Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² LLC «Innovation Company «Perm Nanotechnologies», Perm, Russian Federation

DEVELOPING OF THE PHOTONIC INTEGRATED BRAGG GRATING WITH HIGH SELECTIVE SPECTRAL PROPERTIES BASED ON Si_3N_4 WAVEGUIDE

In this paper, developing and simulation of the spectral properties of the photonic integrated bragg grating (PI BG) based on Si_3N_4 waveguides with differences of the effective refractive indices $\Delta n \sim 10^{-4}$ are presented. Methods of the effective refractive index, bidirectional eigenmode propagation, transfer matrix and film mode matching were used for simulation and calculation the spectral properties PI BG. Design of PI BG was optimized, apodization was used.

Keywords: photonic integrated bragg grating, Si_3N_4 , transfer matrix method, effective refractive index method, apodized gratings.

⁵ Статья по материалам доклада на конференции «Оптическая рефлектометрия 2018».

Брэгговские решетки являются распространенными элементами интегральной оптики. Стандартным методом формирования брэгговских решеток является создание модуляции эффективного показателя преломления (ПП) фундаментальной моды волновода вдоль направления распространения оптического излучения. Модуляцию эффективного показателя преломления фундаментальной моды волновода получают путем периодического изменения геометрических параметров волноводов (ширины или высоты) травлением. Минимальное значение модуляции эффективного показателя преломления ограничено разрешающей способностью фотолитографии и процесса травления и часто превышает $\Delta n \sim 10^{-2}$ ($\Delta n = n_1 - n_{\text{эфф.волновода}}$, где n_1 – эффективный ПП области с отличными геометрическими параметрами). Величина модуляции влияет на ширину отраженного пика на полувысоте [1, 2]. Подобные брэгговские решетки не могут быть использованы в качестве фильтров с высокими спектрально-селективными свойствами или в качестве детектирующих элементов, так как ширина пика на полувысоте составляет 10 нм. В данной работе описана разработка топологии низко-контрастной (с $\Delta n \sim 10^{-4}$) брэгговской решетки на основе волноводов из Si_3N_4 на подложке из SiO_2 на Si с шириной пика на полувысоте не более 1 нм.

Выбор нитрида кремния Si_3N_4 обусловлен низкими потерями на распространение излучения, термооптическими свойствами, высоким контрастом волноводов и широким окном прозрачности (от 0,4 до 2,0 мкм). Параметры поперечного сечения волновода (рис. 1) выбирались из условия одномодовости и наименьших оптических потерь для фундаментальной моды излучения ТЕ поляризации. Размеры волновода составили по ширине $W = 1,2$ мкм и по высоте $T = 0,3$ мкм. Для Si_3N_4 и SiO_2 были получены значения показателей преломления при нормальных условиях на длине волны излучения 1,55 мкм [3]: 2,00 и 1,47 соответственно.

Идея получения низкоконтрастной ИО БР на волноводах из Si_3N_4 заключается в периодическом чередовании областей А и Б (А – область с возмущенным эффективным показателем преломления оптической моды ТЕ поляризации прямого волновода) (рис. 2). Возмущение эффективного показателя преломления в области А создается путем расположения на расстоянии G от края волновода участков из Si_3N_4 с шириной W и периодом Λ .

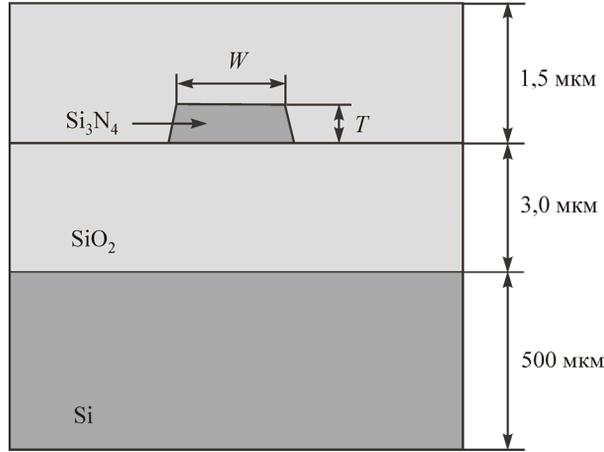


Рис. 1. Схема поперечного сечения волновода [3]

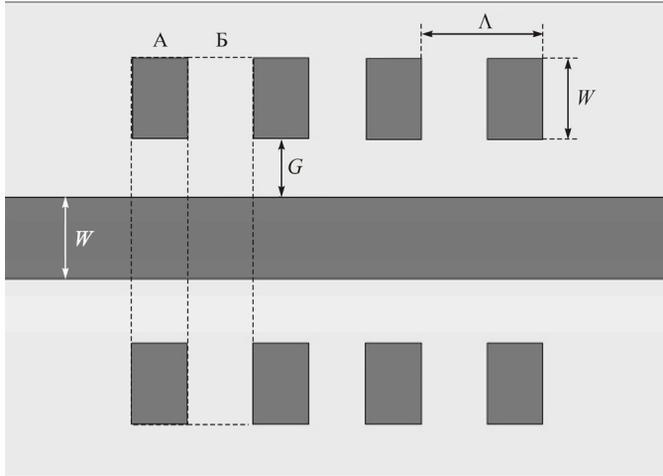


Рис. 2. Схема проектируемой решетки

Расстояние между краями периодически расположенных областей из Si_3N_4 и границей волновода G определяет эффективный ПП области А. Тогда разница эффективного ПП области Б и эффективного ПП области А есть модуляция эффективного показателя преломления на заданной длине волны или контрастность ИО БР. В данной статье для определения степени возмущения оптической моды проводилось моделирование методом согласованных пленочных мод поперечных сечений областей А и Б на длине волны $1,55 \text{ мкм}$ ТЕ поляризации. Для моделирования применялся метод, реализованный в пакете для численного моделирования Optiwave.

С помощью моделирования поперечного сечения прямого волновода методом согласованных пленочных мод (профиль распределения мощности оптического излучения в области Б представлен на рис. 3) был получен эффективный показатель преломления фундаментальной моды, равный 1,60537 [4]. Тогда период брэгговской решетки для первого порядка дифракции должен быть равен 0,482 мкм.

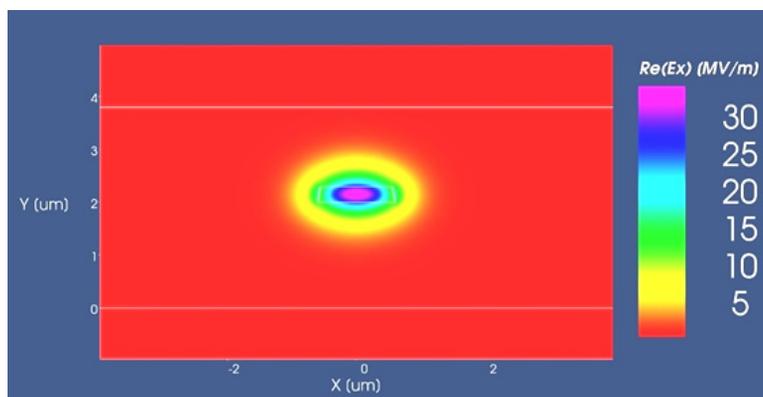


Рис. 3. Профиль распределения мощности оптического излучения в области Б

Расчет поперечного сечения области А проводился для набора расстояний G от 0,6 до 2 мкм (профиль распределения мощности оптического излучения представлен на рис. 4). Значение эффективного показателя преломления фундаментальной ТЕ моды на длине волны 1,55 мкм на расстоянии 0,6 мкм составило 1,61115, а на расстоянии 2 мкм – 1,60586. Расстояние $G = 1,5$ мкм обеспечивает модуляцию эффективного показателя преломления $\Delta n \sim 10^{-4}$, длина ИО БР со 100%-ной степенью отражения составляла около 9,5 мм и могла быть размещена на интегрально-оптическом чипе стандартного размера (5,5 мм \times 11 мм), поэтому полученное значение G использовалось для последующего моделирования и закладывалось в топологию ИО БР.

Задача построения спектров решетки на пропускание и отражение решалась методом матрицы передачи с помощью пакета Optiwave Grating [5]. Использовалось число периодов Λ , равное 20 000 элементов в моделируемой брэгговской решетке (длина решетки 9,64 мм). Для подавления интенсивности боковых лепестков применялась гауссова аподизация [6]. Аподизация в широком смысле – это настройка оптической системы, снижающая интенсивности боковых лепестков,

не изменяющая интенсивности основных максимумов. В случае интегральной фотоники аподизация выражается в изменении величины модуляции эффективного показателя преломления вдоль брэгговской решетки по гауссовому закону. В данной работе изменение величины модуляции достигалось изменением расстояния G . Для наглядности на рис. 5 представлена топология низкоконтрастной аподизированной ИО БР с малым числом периодов.

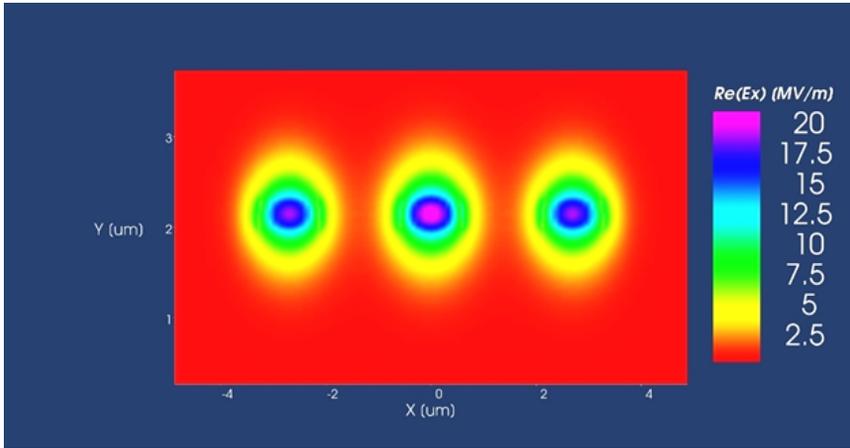


Рис. 4. Профиль распределения мощности оптического излучения в области А

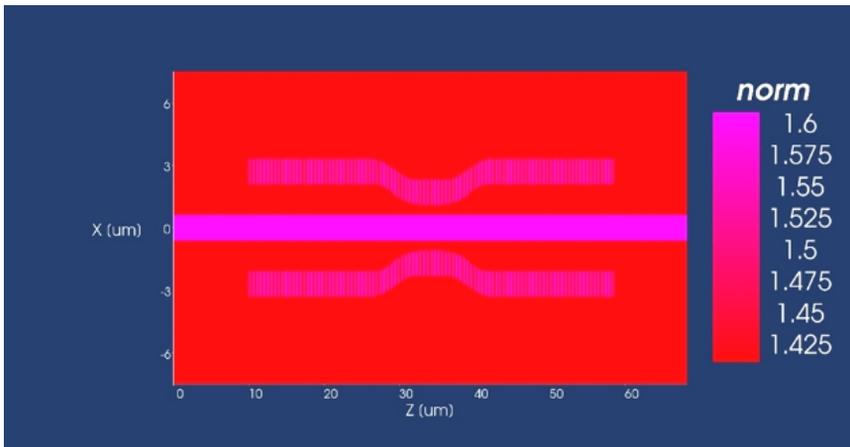


Рис. 5. Пример топологии низкоконтрастной аподизированной ИО БР с малым числом периодов

Спектральные характеристики аподизированной ИО БР на отражение и пропускание представлены на рис. 6. Ширина спектрального пика отражения на полувысоте составила 0,2 нм. Разница интенсивностей основного и побочных пиков отражения составила около 20 дБ.

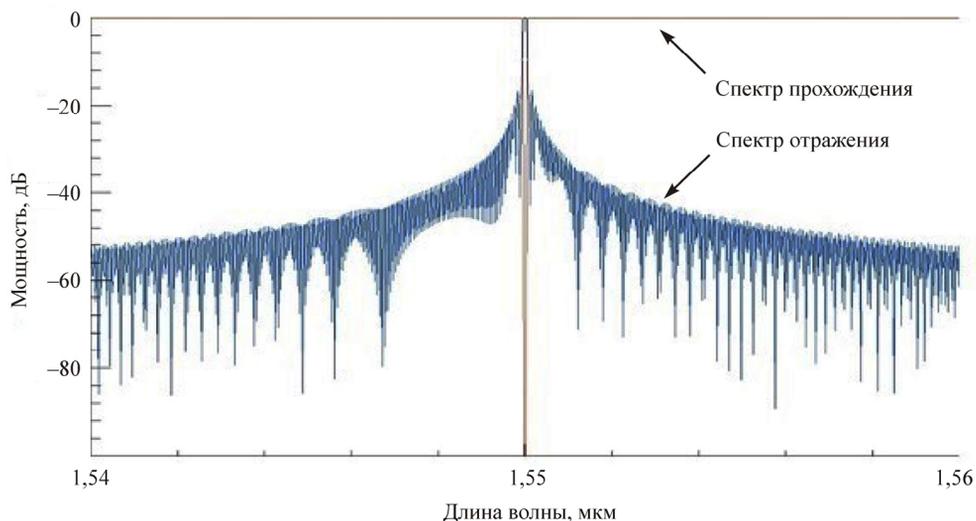


Рис. 6. Спектры прохождения и отражения брэгговской решетки с гауссовой аподизацией

Для сведения трехмерной задачи в двумерное пространство к поперечному сечению волновода применялся метод эффективного показателя преломления [7, 8]. В результате были получены значения эффективных показателей преломления подложки и волноводного слоя, содержащие в себе информацию о третьей исключенной координате. Чтобы убедиться в том, что максимум отраженного сигнала приходится на длину волны 1,55 мкм, применялся метод двунаправленного распространения собственных мод путем моделирования распространения излучения в брэгговской решетке на длинах волн от 1,50 до 1,60 мкм с шагом 0,01 мкм [9, 10, 11]. Ниже представлены распределения мощности оптического излучения (нормированная напряженность электрического поля) с длинами волн 1,55 мкм (рис. 7) и 1,50 мкм (рис. 8), распространяющегося по ИО БР длиной 500 мкм (1000 периодов, уровень отраженного сигнала составляет 5,2 %).

Как видно из рис. 7, часть мощности распространяющегося излучения с длиной волны 1,55 мкм отражается от ИО БР ($\approx 5\%$), осталь-

ное излучение распространяется далее по оптическому волноводу. Также сравнивая величины интегралов перекрытия, полученных в моделировании для набора длин волн, было подтверждено, что максимум отражения приходится на длину волны 1,55 мкм, таким образом, проведенные выше результаты корректны.

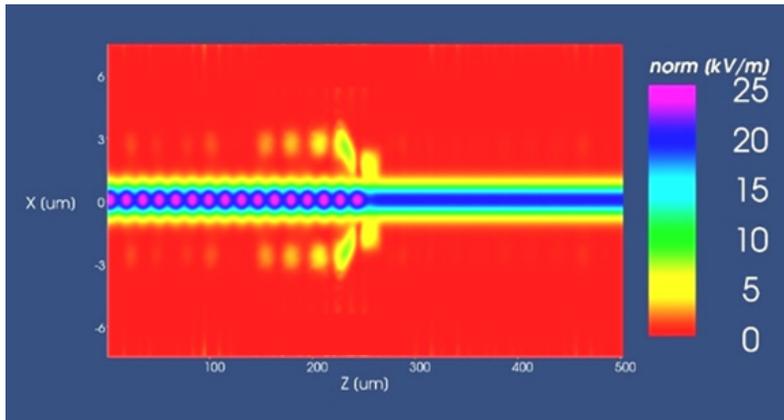


Рис. 7. Распределение излучения в ИО БР с аподизацией с длиной волны 1,55 мкм

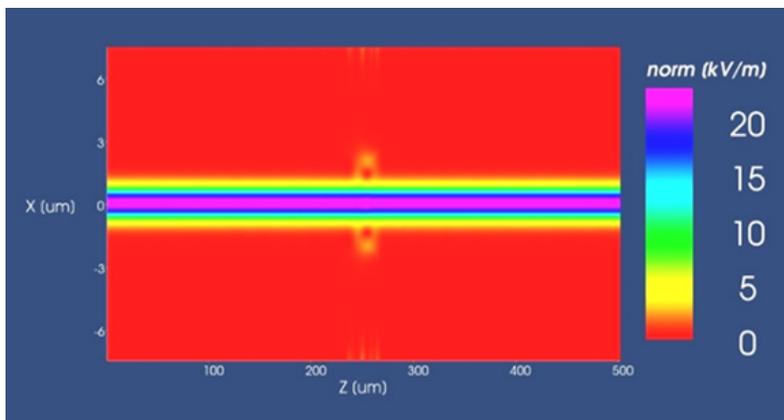


Рис. 8. Распространение излучения в ИО БР с аподизацией с длиной волны 1,50 мкм

На рис. 8 видно, что сигнал с длиной волны 1,50 мкм, отличающейся от длины волны отражения, проходит через решетку без отражений и испытывает незначительное рассеяние в области максимальной аподизации.

Значение интеграла перекрытия между фундаментальной модой невозмущенного волновода (области Б) и модами отраженного и прошедшего сигналов на заданных длинах волн позволило оценить оптические потери на рассеяние излучения и генерацию связанных мод в решетке. Величина потерь составила менее 4 %. Потери, вызванные шероховатостями поверхности волновода, не учитывались.

Таким образом, выбранная топология и геометрическая конфигурация волновода позволяют проектировать решетки с узким пиком отражения, низкими потерями и высокой изолированностью полезного сигнала от шумов. Топология, содержащая решетки с числом периодов от 13 000 до 20 000, будет передана на фабрику для производства, дальнейшего измерения параметров брэгговской решетки и внесения корректировок в численную модель.

Список литературы

1. Integrated waveguide Bragg gratings for microwave photonics signal processing / Maurizio Burla, Luis Romero Cortés [et. al] // *Optics Express*. – 2013. – Т. 21, iss. 21.

2. Distributed Bragg grating integrated optical filters: Synthesis and fabrication / V.V. Wong, J. Ferrera, J.N. Damask [et. al] // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 1998. – Vol. 13.

3. Чувствительный элемент на основе интегрально-оптического кольцевого резонатора и одномерного фотонного кристалла для датчиков физических величин / У.О. Салгаева, А.Р. Хасаншина, А.А. Козлов, А.А. Кондаков [и др.] // *Элементы МНСТ*. – 2018. – Т. 20, вып. 6.

4. Sudbo A.S. Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides // *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*. – 1973. – P. 211–233.

5. Chilwell John, Hodgkinson Ian. Thin-films field-transfer matrix theory of planar multilayer waveguides and reflection from prism-loaded waveguides // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1984. – Vol. 1, iss. 7. – P. 742–753.

6. Garidel Sophie, Vilcot Jean-Pierre, Decoster Didier. Apodized filters on InP-material ridge waveguides using sampled Bragg grating // *SPIE. Optical Components and Materials II*. – 2005. – Vol. 5723.

7. Chiang K.S. Dual effective-index method for the analysis of rectangular dielectric waveguides // *Applied Optics*. – 1986. – Vol. 25, iss. 13. – P. 2169–2174.

8. Chiang K.S. Performance of the effective-index method for the analysis of dielectric waveguides // *Optics Letters*. – 1991. – Vol. 16, iss. 10.

9. Sztefka G., Nolting H.P. Bidirectional Eigenmode Propagation for Large Refractive Index Steps // *Ieee photonics technology letters*. – 1993. – Vol. 5, iss. 5.

10. Gallagher Dominic F.G., Felici Thomas P. Eigenmode Expansion Methods for Simulation of Optical Propagation in Photonics – Pros and Cons // *SPIE*. – 2003. – Vol. 4987. – P. 69–82.

11. Čtyroký Jirř Improved Bidirectional-Mode Expansion Propagation Algorithm Based on Fourier Series // *Journal of Lightwave Technology*. – 2007. – Vol. 25.

References

1. Maurizio Burla, Luis Romero Cortés et al Integrated waveguide Bragg gratings for microwave photonics signal processing. *Optics Express*, 2013, vol. 21, iss. 21.

2. Wong V.V., Ferrera J., Damask J.N. et al. Distributed Bragg grating integrated optical filters: Synthesis and fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1998, vol. 13.

3. Salgaeva U.O., Khasanshina A.R., Kozlov A.A., Kondakov A.A. et al. Chuvstvitelnyy element na osnove integralno-opticheskogo koltsevego rezonatora i odnomernogo fotonnogo kristalla dlya datchikov fizicheskikh velichin [A sensor basing integral optical ring resonator and 1-dimension photon crystal for picking up physical quantity's]. *Elementy MNST*, 2018, vol. 20, iss. 6.

4. Sudbo A.S. Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1973, pp. 211-233.

5. Chilwell J., Hodgkinson I. Thin-films field-transfer matrix theory of planar multilayer waveguides and reflection from prism-loaded waveguides. *Journal of the Optical Society of America A*, 1984, vol. 1, iss. 7, pp. 742-753.

6. Garidel S., Vilcot J.-P., Decoster D. Apodized filters on InP-material ridge waveguides using sampled Bragg grating. *SPIE. Optical Components and Materials II*, 2005, vol. 5723.

7. Chiang K.S. Dual effective-index method for the analysis of rectangular dielectric waveguides. *Applied Optics*, 1986, vol. 25, iss. 13, pp. 2169-2174.

8. Chiang K.S. Performance of the effective-index method for the analysis of dielectric waveguides. *Optics Letters*, 1991, vol. 16, iss. 10.

9. Sztefka G., Nolting H.P. Bidirectional eigenmode propagation for large refractive index steps. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, vol. 5, iss. 5.

10. Gallagher D.F.G., Felici T.P. Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics - pros and cons. *SPIE*, 2003, vol. 4987, pp. 69-82.

11. Čtyroký J. Improved bidirectional-mode expansion propagation algorithm based on fourier series. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, vol. 25.

Получено 04.06.2018