

Исследование возможности реализации оптических изоляторов на основе структур с распределенной обратной связью и рассмотрение их применения в оптических системах

К.А. Захаренков*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича
Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1, литера А, Ж
(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 08.07.2024)

Для реализации оптических изоляторов на основе дифракционных решеток были рассмотрены структуры с распределенной обратной связью в виде волноводов с дифракционной решеткой, используемых в DFB лазерах. Рассмотрены условия Брэгга, на основе которых происходят брэгговское отражение, и проведено конструктивное сравнение реализации оптических изоляторов на основе дифракционных и брэгговских решеток. В результате были смоделированы волноводы со встроеной дифракционной решеткой и построены графики спектра отражения.

Результаты моделирования демонстрируют потенциал применения асимметричных дифракционных решеток в разработке новых типов оптических изоляторов, обеспечивающих более высокую степень контроля за распространением света в интегрально-оптических системах, где обратные отражения сигнала могут быть критичны.

PACS: 42.79.Ci УДК: 535.015

Ключевые слова:

ВВЕДЕНИЕ

В гетеролазерах с распределенной обратной связью [1, 2] для создания обратной связи одна из гетерограниц делается гофрированной, что приводит к интерференционному отражению определенного спектра длин волн по закону Брэгга, т.е. выступает в роли фильтра и отражает сигнал обратно в активную зону лазерного резонатора. Аналогичным образом применяется распределенный брэгговский отражатель, который, в частности, используется в оптоволоконных брэгговских решетках.

В качестве применения свойств фильтра [3] и обеспечения эффекта обратного отражения на сегодняшний день такие ступенчатые структуры распределенной обратной связи используются зачастую в DFB лазерах, поскольку в оптоволоконных системах для фильтрации сигнала существуют более дешевые и более легкие в производстве аналоги, например, оптоволоконные брэгговские решетки [4] или оптические кольцевые резонаторы [5, 6].

Используя фазовые отражательные дифракционные решетки или другие виды решеток, асимметричные по форме, можно добиться того, что волновод станет анизотропным для распространения сигнала в прямом и обратном направлении.

1. РАСЧЕТ

Период решетки подбирается так, чтобы при отражении в обратном направлении выполнялось условие

Брэгга, т.е. когда период решетки равен целому числу полуволн [7]:

$$d = \frac{\lambda}{2n_{eff}}, \quad (1)$$

где λ — отражаемая длина волны, d — период решетки, n — показатель преломления волновода.

Существует методика расчета спектральных зависимостей коэффициента отражения различных типов решеток по форме [8].

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Диаметр волновода в брэгговских решетках не является критическим параметром, так как ступени решетки выполнены в виде сечений волновода с измененным показателем преломления и условие Брэгга для процесса конструктивной интерференции (фазовой согласованности) отраженного сигнала обеспечивается по большей части самими ступенями брэгговской решетки, в которых и между которыми происходит процесс интерференции. Важным является то, что ступени брэгговской решетки сохраняют угол распространения луча, из-за чего луч продолжает соответствовать условию полного внутреннего отражения.

Для дифракционных решеток в волноводах ситуация иная: существенным для обеспечения интерференции и, как следствие, усиления отраженного сигнала по условию Брэгга является фазовая согласованность отраженных сигналов от гребней дифракционной решетки и нижней поверхности волновода (впадины дифракционной решетки) с верхней поверхностью волновода. Из-за этого сам диаметр волновода или его высота и ширина играют ключевую роль для интерференционного усиления необходимого отраженного сигнала. В

* zacharenkov28@mail.ru

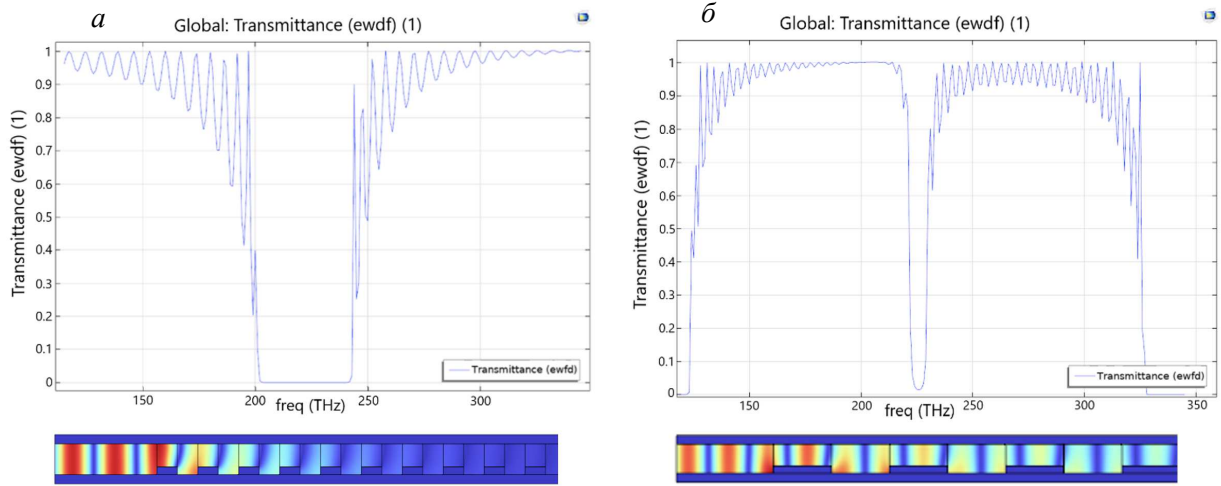


Рис. 1. Симуляция зависимости отражения дифракционной решетки от частоты излучения в программе COMSOL Multiphysics

таким случае, чтобы получить график спектра отражения, аналогичный брэгговской решетке, диаметр волновода может быть равен $\lambda/4$. При большем диаметре волновода можно добиться выполнения условий Брэгга для выбранной частоты, но возникают условия для более сложной картины отражений и интерференций, при которой могут начать отражаться полностью или частично другие частоты, близкие к выбранной. Существенным недостатком является то, что для создания асимметричных решеток одна или обе стороны ступеней должны отличаться углом наклона, то есть быть не перпендикулярными относительно центральной оси волновода, из-за чего не сохраняется угол распространения излучения в волноводе, и для мод может нарушиться условие полного внутреннего отражения. В таком случае конструкция дифракционной решетки может приобрести более сложную форму. Прямоугольные же дифракционные решетки сохраняют это условие. Для лучшей наглядности анизотропии распространения сигнала в дальнейших примерах оболочку волновода будем представлять зеркальной, подразумевая, что полное внутреннее отражение выполняется.

Рассмотрим пример. Зададим следующие параметры дифракционной решетки для $\lambda = 1310$ нм, что соответствует частоте $f = 228$ ТГц, а также

$$n_{eff} = 1.45, \quad d = d_H + d_L = \frac{\lambda}{2n}, \quad (2)$$

$$d_H = \frac{(\lambda/2n)}{2}, \quad (3)$$

$$d_L = \frac{(\lambda/2n)}{2}, \quad (4)$$

$$h_L = \frac{\lambda}{4n}, \quad (5)$$

$$h_H = \frac{h_L}{4}, \quad (6)$$

где n_{eff} — период решетки, d_H — ширина гребня, d_L — ширина впадины, h_L — диаметр (высота) волновода, h_H — высота гребня.

Результат изображен на рис. 1, а. При увеличении периода решетки, как и в брэгговских решетках, уменьшается ширина спектра отражения [9], что изображено на рис. 1, б

3. АНИЗОТРОПНЫЕ ВОЛНОВОДЫ С ОТРАЖАЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ

Для того, чтобы добиться анизотропии распространения сигнала в прямом и обратном направлении волновода, можно использовать асимметричные дифракционные решетки, например, треугольные. В ходе симуляций волноводов с треугольными и трапециевидными решетками не удалось добиться минимально необходимой анизотропии распространения сигнала при диаметре волновода равном $\lambda/4$ или меньше с корректировкой параметра высоты и ширины дифракционной решетки. Это связано с низкой чувствительностью излучения к изменению параметров волновода, поскольку при таком размере волновода интерференционная картина особо не меняется. В результате возникла необходимость увеличивать диаметр самого волновода, что усложняло картину отражений в волноводе и приводило к более тяжело предсказуемым отражениям различных длин волн, но повышало чувствительность волновода к изменению его параметров и как следствие приводило к более выраженным анизотропным свойствам. Рассмотрим примеры симуляций волноводов с такими дифракционными решетками и их спектры отражения. На рис. 2 изображено дифракционная решетка с прямоугольными ребрами и график спектра отражения. Рассмотрим частоту $f = 220$ ТГц,

что соответствует длине волны 1362 нм. Данная длина волны посредством отражений и ослабления интерференцией пропускается вперед по волноводу на 70% (коэффициент пропускания $\tau = 0.7$).

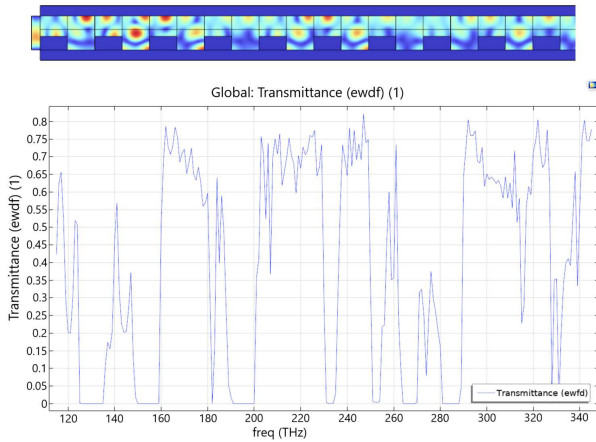


Рис. 2. Волновод с распределенной обратной связью, в котором ребра расположены перпендикулярно волноводу

Создадим фаску на ступенях решетки со стороны пропускания сигнала под углом 45° . В таком случае данная длина волны ослабляется интерференцией и отражается назад практически полностью с коэффициентом пропускания $\tau = 0$, как изображено на рис. 3.

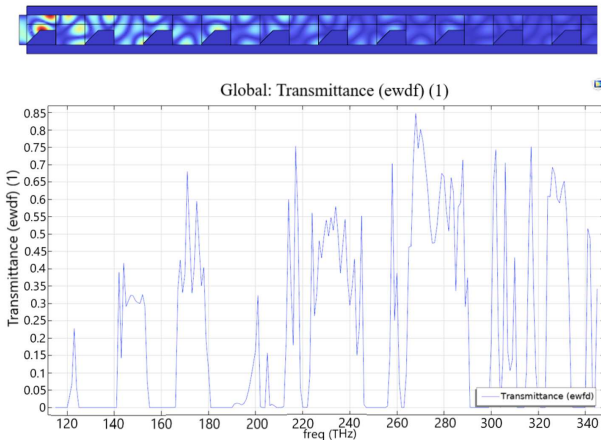


Рис. 3. Волновод с распределенной обратной связью, в котором ребра наклонены вправо на 45°

Инвертируем полученную решетку, то есть представим случай прохождения сигнала в обратном направлении. Тогда данная длина волны будет пропускаться вдоль волновода с коэффициентом пропускания $\tau = 0.75$, как изображено на рис. 4.

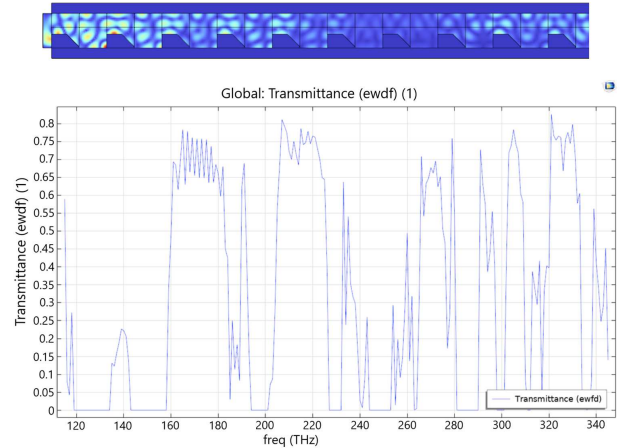


Рис. 4. Волновод с обратной связью, в котором ребра наклонены влево на 45°

4. АНИЗОТРОПНЫЕ ВОЛНОВОДЫ С ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ

Зададим высоту волновода для треугольной дифракционной решетки по формуле:

$$h_L = \frac{\lambda}{4n_{eff}} \quad (7)$$

Также используем показатель преломления $n_0 = 1.45$, а показатель преломления самой решетки зададим $n_1 = 1.5$. Такая решетка частично уже начинает работать по механизму брэгговских решеток. В таком случае спектр отражения станет сильно узким со значительно меньшим количеством боковых лепестков (рис. 5), для минимизации которых используются различные методы аподизации [10].

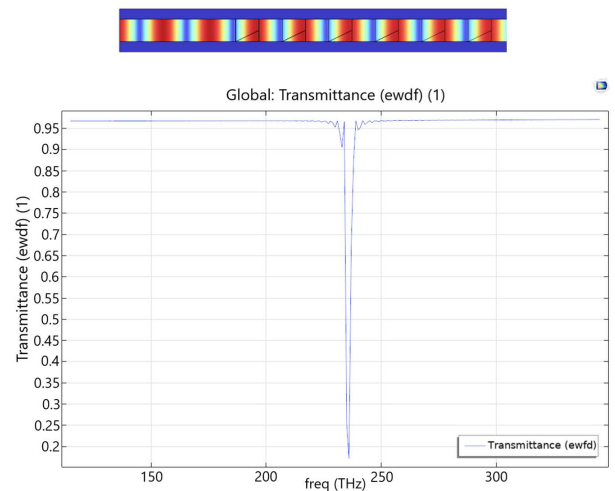


Рис. 5. Волновод с треугольной дифракционной решеткой

Аналогично прошлым результатам дифракционная решетка с диаметром волновода (7) не будет обладать

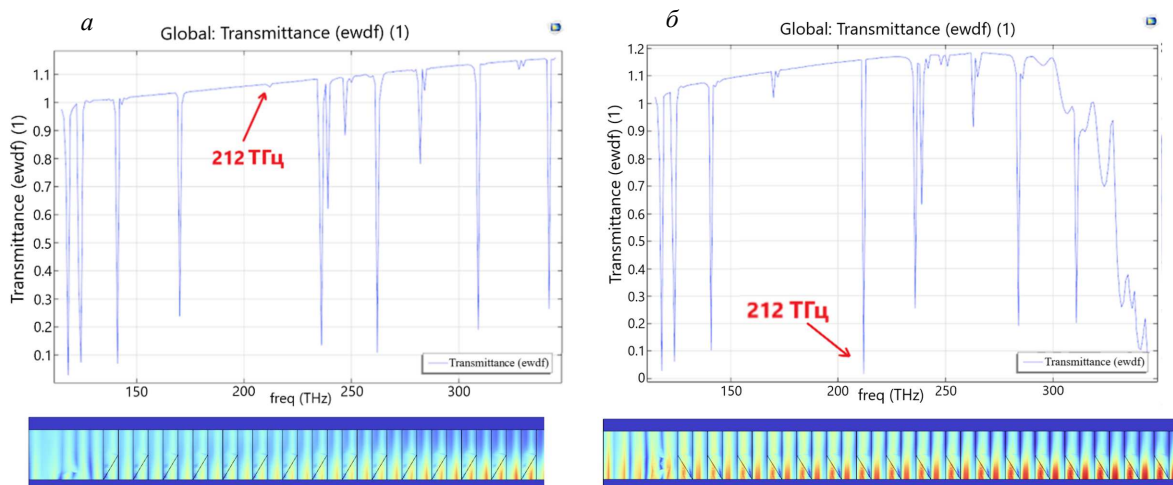


Рис. 6. Волновод на основе преломляющей дифракционной решетки с распределенной обратной связью

анизотропией для распространения сигнала в прямом и обратном направлении.

Для проявления анизотропии распространения сигнала, по аналогии с прошлыми результатами, необходимо увеличивать диаметр волновода. Увеличив его диаметр в 1.5 раза, получили волновод с преломляющей дифракционной решеткой с распределенной обратной связью для частоты 212 ТГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом можно создавать волноводы с распределенной обратной связью в качестве изоляторов, которые анизотропны для распространения сигнала в прямом и обратном направлении, что можем пригодиться

в различных конфигурациях оптических систем, например, для интегральной оптики, где могут присутствовать критичные для системы обратные отражения. Сложность математического моделирования и конструирования таких решеток заключается в том, что необходимо обеспечивать соблюдение полного внутреннего отражения и увеличивать размер волновода на значение больше, чем при классическом подходе расчета по закону Брэгга. Такой подход усложняет картину отражений и интерференций в волноводе, тем самым увеличивая количество отражений и интерференций для других частот, что в результате приводит к более тяжело предсказуемым результатам с точки зрения математического анализа. Так же усложняется расчет для отражения конкретной частоты по закону Брэгга.

- [1] Ghafouri-Shiraz H., Chu C.Y.J. // *Fiber and Integrated Optics*. **10**, N 1. 23 (1991).
- [2] Carroll J., Whiteway J., Plumb D. // *The Institution of Engineering and Technology*. 1998.
- [3] Nazmi M., Ayman E., Moustafa A. // *Optoelectronics and advanced materials - Rapid communications*. **9**. 1093 (2015).
- [4] Othonos A. // *Review of Scientific Instruments*. **68**, N 12. (1997).
- [5] Geuzebroek D.H., Driessen A. *Springer Series in Optical Sciences*. **123**. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006.

- [6] Rabus D.G., Sada C. *Springer Series in Optical Sciences*. **127**. Springer, Cham. 2020.
- [7] Palmer C. *MKS Instruments, Inc.* 2020. *Diffraction grating handbook* 8th Edition. P. 117–122.
- [8] Васильева В.В., Винокуров Д.А., Золотарев В.В. и др. // *Физика и техника полупроводников*. **46**, N 2. (2012).
- [9] AttiaHesham A., Mula E.A., Adel Sh. et al. // *Photonics*. **11**, N 3. 194. (2024).
- [10] Guo Qi, Zhongming Zheng, Bo Wang et al. // *Photonics*. **8**, N 4. 110. (2021).

Research on the Feasibility of Implementing Optical Isolators Based on Distributed Feedback Structures and Their Application in Optical Systems

K. A. Zakharenkov

Saint Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruевич
Saint Petersburg 193232, Russia
E-mail: azaharenkov28@mail.ru

To implement optical isolators based on diffraction gratings, structures with distributed feedback in the form of waveguides with diffraction gratings, used in DFB lasers, were considered. Bragg conditions, which form the basis for Bragg reflection, were examined, and a constructive comparison of the implementation of optical isolators based on diffraction and Bragg gratings was conducted. As a result, waveguides with embedded diffraction gratings were modeled, and a reflection spectrum graph was constructed. The simulation results demonstrate the potential of using asymmetric diffraction gratings in the development of new types of optical isolators, providing a higher degree of control over light propagation in integrated optical systems where back reflections of the signal can be critical.

PACS: 42.79.Sz

Keywords: diffraction grating, Bragg grating, distributed feedback, DFB.

Received 2024.

Сведения об авторе

Захаренков Константин Александрович — студент; e-mail: zacharenkov28@mail.ru.