

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛОКОННОГО БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

П.С. Серебrenников, А.В. Шмаков, Т.А. Городецкая

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
physp37smat@gmail.com

Проведен численный расчет пяти- и двенадцатиканального волоконного брэгговского отражателя с использованием системы MATLAB. Для получения резонансного брэгговского отражения для различных частот производится дополнительная модуляция периодической функцией показателя преломления вдоль оптического волновода. Сам вид этой функции определяется из требования, чтобы коэффициент отражения в центре каждого канала имел значение, близкое к единице. Модулирующая функция аппроксимируется ступенчатой функцией, так что она задается 20-мерным (по числу ступенек) вектором  $a(k)$  где значение  $k$ -й координаты означает высоту  $k$ -й ступеньки:  $\varphi(z) = \text{ceil}(z/5 \cdot 10^{-3}) \cdot (a(k)/k)$ . Оптимальный вид модулирующей функции находится перебором случайных 20-мерных векторов, так что определяется минимальное квадратичное отклонение каналов от единицы. Для найденной оптимальной модулирующей функции определяется средний коэффициент отражения каналов и разброс этого коэффициента (с.к.о.). Найдены оптимальные модулирующие функции для пяти- и двенадцатиканального волновода. Одномодовый волновод при  $\lambda = 1550$  нм (где кварцевое волокно несет наименьшие потери) имеет положительный коэффициент дисперсии  $D = 6,5$  пс/нм · км с наклоном дисперсионной характеристики  $0,04$  пс/нм<sup>2</sup> · км. Брэгговский отражатель вносит запаздывание сигнала, различное для разных длин волн, и при определенных параметрах этого отражателя возможна компенсация дисперсии сигнала в волноводе. Рассмотрен брэгговский отражатель с изменяющимися периодами решетки и модулирующей функции на предмет компенсации хроматической дисперсии в волноводе. Анализ проведен методом матрицы перехода (Transfer Matrix Method). Выяснено, что для пятиканального волоконного брэгговского отражателя при определенных параметрах линейного чирпа периода решетки и модулирующей функции ( $\delta\Lambda_B/\Lambda_B = 0,15\%$ ,  $\delta\Lambda_s/\Lambda_s = 1,2\%$ ) возможна компенсация хроматической дисперсии одномодового волновода на расстоянии порядка двести километров.

**Ключевые слова:** волоконный брэгговский отражатель, модулирующая функция, коэффициент отражения канала, одномодовый волновод, хроматическая дисперсия, чирп периода решетки

**Ссылка для цитирования:** Серебrenников П.С., Шмаков А.В., Городецкая Т.А. Оптимизация волоконного брэгговского отражателя для оптических линий связи // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 2. С. 80–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-80-83

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) отличаются высокой помехозащищенностью, огромными объемами передаваемой информации. Прокладка линий ВОЛС требует больших затрат поэтому естественно желание передавать по одной линии много каналов. В связи с этим в последние годы интенсивно развиваются технологии DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — уплотнение каналов за счет разнесения их по длинам волн. Важным элементом любого лазерного источника является зеркало для создания селективной обратной линии связи. В монолитных лазерах, сопряженных с пленочными волноводами часто используется брэгговская решетка, полученная за счет модуляции толщины волновода. В ВОЛС самыми перспективными оказались волоконные брэгговские решетки (Fiber Bragg Grating (FBG)), создаваемые непосредственно в волокне путем модуляции показателя преломления волокна. Изменение показателя преломления, равного приблизительно  $10^{-4}$ , достигается путем облучения, например, аргоновым лазером ( $\lambda = 244$  нм). При гармонической зависимости показателя преломле-

ния от координаты получается резонансное брэгговское отражение на одной длине волны  $\lambda_B = 2n\Lambda_B$  ( $n$  — показатель преломления,  $\Lambda_B$  — период решетки). Для получения многоканального брэгговского отражения показатель преломления дополнительно модулируется вдоль оптического волокна периодической функцией [1–11] так, чтобы зависимость показателя преломления от координаты имела вид

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos((2\pi/\Lambda_B)z + \varphi(z)),$$

где  $\varphi(z)$  — функция модуляции (sampling function).

Получающаяся суперструктурная волоконная брэгговская решетка, в отличие от исходной, имеет целый набор пространственных частот

$$\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_B}z + \varphi(z)\right) = \sum_m F_m \exp\left(i\left(\frac{2\pi}{\Lambda_B} + m\frac{2\pi}{\Lambda_s}\right)z\right),$$

где  $\Lambda_s$  — период модулирующей функции (sampling period).

Это приводит к тому, что теперь имеет место резонансное брэгговское отражение на наборе

частот с интервалом между ними  $\Delta\nu = c/2n\Lambda_s$  ( $\Delta\nu \cong 100$  ГГц при  $n = 1,45$ ,  $\Lambda_s = 1$  мм).

### Методы и исследования

Если проводится  $m$ -канальное мультиплексирование, необходимо получить приблизительно одинаковые и близкие к единице коэффициенты отражения для каждого канала. Это достигается выбором вида функции  $\varphi(z)$ . Для центральной частоты канала коэффициент отражения задается формулой

$$R_m = \text{th}^2(|k_m|L),$$

где  $k_m = \pi\Delta n F_m / \Lambda_B$ ;  
 $L$  — длина решетki.

Искомая функция  $\varphi(z)$  представляется ступенчатой функцией, высота ступенек варьируется. Задача сводится к нахождению минимума функции

$$DR = \sum_m (\text{th}^2(|k_m|L) - 1)^2.$$

Численный расчет проводится с помощью системы MATLAB. Модулирующая функция  $\varphi(z)$  представляется ступенчатой функцией (в расчете  $\Lambda_s$  делится на 20 отрезков длиной  $5 \cdot 10^{-3}$  см каждый). В итоге функция  $\varphi(z)$  задается 20-мерным вектором  $a(k)$ , где значение  $k$ -й координаты вектора означает высоту  $k$ -й ступеньки:

$$\varphi(z) = \text{ceil}(z/5 \cdot 10^{-3})(a(k)/k).$$

Период  $\Lambda_s$  делится на  $4096 = 2^{12}$  точек и производится точечное быстрое Фурье-преобразование. Найденное значение  $F_m$  подставляется в коэффициент отражения  $R_m$  и вычисляется функция  $DR$ . Оптимальный вид функции  $\varphi(z)$  находят перебором случайных векторов  $a(k)$ , т. е. вектор записывают в виде  $a(k) = 2\pi \text{rand}(1, 20)$ .

Программа работает следующим образом. При заданном числе  $N$  (50, 100, 200) программа генерирует очередной случайный вектор и вычисляется значение функции  $DR$ . Если полученное значение оказалось меньше предыдущего, он берется для сравнения с последующими значениями. Если она оказалась больше, остается прежнее значение. Такая процедура повторяется  $N$  раз. Таким образом находят минимальное среди всех испытанных значение  $DR$ . Программа выдает: минимальное значение  $DR$ ; вектор  $a(k)$ , при котором было достигнуто; среднее значение коэффициента отражения каналов; среднее квадратическое отклонение (СКО) коэффициента отражения. По вектору  $a(k)$  определяют функцию  $\varphi(z)$ .

### Результаты и обсуждение

Расчеты производились для пяти- и двенадцатиканальных систем.

Для пятиканальной системы вектор  $a(k)$  равен  $a(k) = 2\pi[0,74; 0,06; 0,86; 0,93; 0,98; 0,86; 0,79; 0,51; 0,18; 0,4; 0,13; 0,03; 0,93; 0,30; 0,3; 0,33; 0,47; 0,65; 0,02; 0,84]$ .

Функция  $\varphi(z)$  имеет вид, представленный на рис. 1.

При величине  $\bar{R} = 99,7\%$  среднее значение коэффициента отражения канала — 0,0055.

Для двенадцатиканальной системы имеем

$$a(k) = 2\pi[0,60; 0,01; 0,89; 0,06; 0,19; 0,26; 0,06; 0,15; 0,38; 0,18; 0,04; 0,17; 0,08; 0,82; 0,18; 0,85; 0,24; 0,25; 0,84; 0,25].$$

Результат представлен на рис. 2.

$$DR = 3,5697 \cdot 10^{-4}; \bar{R} = 98,85\%; \text{СКО} = 0,015.$$

После создания волноводов с очень малым затуханием основной причиной деградации сигнала в волноводе стала хроматическая дисперсия. Излучение с различными длинами волн распространяется в волноводе с разными скоростями, что приводит к расплыванию сигнальных импульсов и, соответственно, к потере информации. Компенсировать хроматическую дисперсию в волноводе можно, переходя к волоконному брэгговскому отражателю с изменяемым периодом решетki  $\Lambda_B$  и модулирующей функции  $\Lambda_s$ . Будем считать, что период решетki и модулирующей функции  $\varphi(z)$  изменяется линейно (линейный чирп).

Хроматическая дисперсия определяется как объемными свойствами материала волновода, так и

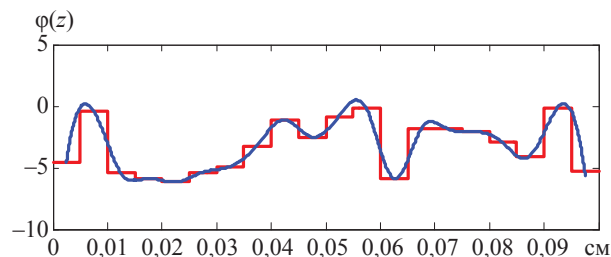


Рис. 1. Моделирующая функция для пятиканального брэгговского отражателя

Fig. 1. Modeling function for a 5-channel Bragg reflector

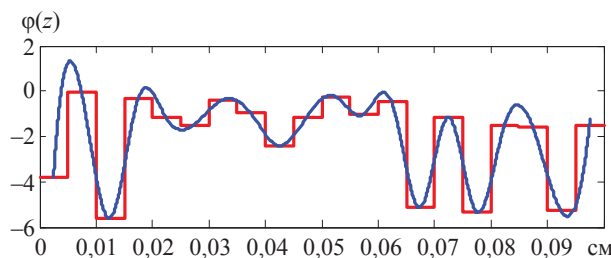


Рис. 2. Моделирующая функция для двенадцатиканального брэгговского отражателя

Fig. 2. Modeling function for a 12-channel Bragg reflector

его волноводными характеристиками, зависящими от размеров волновода, профиля показателя преломления. Удельный коэффициент материальной дисперсии (пс/нм · км) может иметь разные знаки, и для одномодового волокна, волноводный коэффициент которого имеет положительное значение, может произойти компенсация отрицательной материальной дисперсии, приводящая к нулевой результирующей дисперсии при определенной длине волны. Часто для описания хроматической дисперсии волновода пользуются формулой Селлмейера

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right),$$

где  $S_0$  — наклон дисперсионной характеристики при  $\lambda = \lambda_0$

$\lambda_0$  — длина волны нулевой дисперсии.

Для ступенчатого одномодового кварцевого волновода  $\lambda_0 = 1310 \pm 10$  нм.

Для одномодового волокна при  $\lambda = 1310 \pm 10$  нм происходит компенсация волноводной и материальной дисперсии. Длину волны излучения сигнала обычно выбирают приблизительно 1550 нм — значение, при котором кварцевое волокно несет наименьшие потери. На этой длине волны одномодовый волновод имеет положительный коэффициент дисперсии  $D = 6,5$  пс/нм · км с наклоном дисперсионной характеристики  $0,04$  пс/нм<sup>2</sup> · км. Брэгговский отражатель вносит запаздывание сигнала, различное для разных длин волн и при определенных параметрах этого отражателя возможна компенсация дисперсии сигнала в волноводе. Для рассмотрения задержки сигнала, вносимой волоконным брэгговским отражателем, необходимо найти зависимость коэффициента отражения от частоты (длины волны). Решение задачи о коэффициенте отражения при произвольной частоте сводится к анализу распространения двух связанных волн (падающей и отраженной) в этой структуре. Задача решается методом матрицы перехода [1–11]. Матрица, связывающая падающую, отраженную и проходящую волны, имеет вид

$$\begin{aligned} F_{11} &= (\text{ch}(\gamma L) + i\Delta\beta L \text{sh}(\gamma L)/(\gamma L)) \exp(i\beta_B L), \\ F_{12} &= -kL \text{sh}(\gamma L) \exp(-i(\beta_B L + \varphi))/(\gamma L), \\ F_{21} &= -kL \text{sh}(\gamma L) \exp(i(\beta_B L + \varphi))/(\gamma L), \\ F_{22} &= (\text{ch}(\gamma L) - i\Delta\beta L \text{sh}(\gamma L)/(\gamma L)) \exp(-i\beta_B L), \\ \Delta\beta &= \beta - \beta_B, \gamma^2 = k^2 - (\Delta\beta)^2, R = |F_{21}/F_{11}|^2, \end{aligned}$$

где  $\beta, \beta_B$  — волновые векторы волны и брэгговской решетки соответственно;

$L$  — длина решетки;

$k$  — коэффициент связи волн.

Если параметры решетки изменяются с координатой, например, при чирпе периода решетки, то решетка делится на слои и результирующая

матрица вычисляется как произведение матриц, относящихся к отдельным слоям

$$F = \prod_{n=1}^N F_n.$$

Время задержки  $\tau(\lambda) = d\varphi/d\omega$  вычисляется как производная фазы коэффициента отражения по частоте.

## Выводы

Соответственно, дисперсия времени задержки является производной  $\tau(\lambda)$  по  $\lambda$ . Дисперсия этого времени при  $\lambda = 1550$  нм равна приблизительно 1280 пс/нм. Из соотношения  $D = 6,5$  пс/нм · км и  $L = 1280$  пс/нм получаем, что хроматическая дисперсия волновода будет скомпенсирована на расстоянии порядка двухсот километров.

Значения задержки сигнала и наклона дисперсионной характеристики пятиканального брэгговского отражателя для компенсации соответствующих показателей волновода получены подбором параметров линейного чирпа периода брэгговской решетки и периода функции модуляции  $\varphi(z)$  ( $\delta\Lambda_B/\Lambda_B = 0,15\%$ ,  $\delta\Lambda_s/\Lambda_s = 1,2\%$ ).

## Список литературы/References

- [1] Mahanta D.K. Design of Uniform Fiber Bragg grating using Transfer matrix // *Int. J. of Comput. Eng. Research*, 2013, vol. 03, pp. 8–13.
- [2] Yamada M., Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach // *Applied Optics*, 1987, vol. 26, pp. 3474–3478.
- [3] Li H., Sheng Y., Li Y., Rothenberg J.E. Phased-Only Sampled Fiber Bragg Gratings for High-Channel-Count Chromatic Dispersion Compensation // *J. Lightwave Technol.*, 2003, vol. 21, pp. 2074–2083.
- [4] Miesner C., Asperger T., Brunner K., Abstreiter G. Capacitance-voltage and admittance spectroscopy of self-assembled Ge islands in Si // *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 77, pp. 2704–2706.
- [5] Brunner K. *Si/Ge nanostructures* // *Rep. Prog. Phys.*, 2000, vol. 65, pp. 27–72.
- [6] Philips J. Evaluation of the fundamental properties of quantum detectors // *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, pp. 4590–4594.
- [7] Dvurechenskii A.V., Nikiforov A.I., Bloskhin A.A., Nenashev A.V., Volodin V.A. Electronic states in *Si/Ge* quantum dots with type-II band alignment // *Physical Review B.*, 2006, vol. 73, pp. 115–121.
- [8] Wang K.L., Cha D., Liu J., Chen C. Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications // *Proc. of the IEEE*, 2007, vol. 95, pp. 1866–1882.
- [9] Li X., Xu W., Cao S., Cai Q., Lu F. Admittance spectroscopy of GeSi-based quantum dot systems: Experiment and Theory // *Physical Review B.*, 2007, vol. 76, pp. 245–257.
- [10] Yakimov A.I. Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots for mid-infrared photodiode detectors // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, pp. 467–475.
- [11] Lozovoy K.A., Voytsekhovskiy A.V., Kokhanenko A.P., Satarov V.G., Phelyakov O.P., Nikiforov A.I. Heterostructures with self-organized quantum dots of Ge on Si for optoelectronic devices // *Opto-Electronics Review*, 2014, vol. 22, pp. 171–177.

## Сведения об авторах

**Серебренников Павел Семенович** — канд. физ.-мат. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

**Шмаков Андрей Вячеславович** — канд. физ.-мат. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана Мытищинский филиал), -mail: ashmakov62@gmail.ru

**Городецкая Татьяна Александровна** — старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2016 г.

## THE OPTIMIZATION OF FIBER BRAGG REFLECTOR FOR OPTICAL COMMUNICATION LINES

**P.S. Serebrennikov, A.V. Shmakov, N.A. Gorodetskaya**

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

phyp37smat@gmail.com

The numerical calculation of 5 and 12 channel waveguide Bragg reflector has been carried out by using MATLAB. The additional periodic modulation of the refractive index along the optical waveguide is produced to obtain resonant Bragg reflection on a number of frequencies. The shape of this function results from the requirement that the reflectivity in the center of each channel must have a value close to 1. The modulating (sampling) function is approximated by step function, so it is determined by 20-dimensional (according to the number of steps) vector where the  $k$  coordinate value means a height of  $k$  step  $\varphi(z) = \text{ceil}(z/5 \cdot 10^{-3})(a(k)/k)$ . The optimal sampling function is determined by choosing 20-dimensional random vectors, so that it makes possible to minimize the channels' standard reflectivity deviation from 1. For the optimal sampling function developed, the average reflectivity of channels and r.m.s. of this factor have been found. The optimal sampling functions for 5 and 12 channel waveguide are determined. The single mode waveguide at  $\lambda = 1550$  nm (where silicon fiber has the fewest losses) has a positive coefficient of dispersion  $D = 6,5$  ps/nm · km with a slope of dispersion characteristics  $0,04$  ps/nm<sup>2</sup> · km. The Bragg reflector makes a different lag for different waves, and at certain parameters of the Bragg reflector it is possible to compensate chromatic dispersion of a signal in the waveguide. To optimize the fiber Bragg reflector in order to compensate the chromatic dispersion in waveguide, the Bragg reflector with variation of grating chirps and that of sampling function period is considered. The analysis is based on the transfer matrix method. It is obtained that, for the five channel fiber Bragg reflector under certain parameters of the linear grating chirp and those of sampling function period ( $\delta\Lambda_g/\Lambda_g = 0,15$  %,  $\delta\Lambda_s/\Lambda_s = 1,2$  %), the compensation of chromatic dispersion of single mode waveguide takes place at distances of the order of two hundred kilometers.

**Keywords:** fiber Bragg grating, sampling function, reflectivity of the channel, single mode waveguide, chromatic dispersion, chirp of the grating period

**Suggested citation:** Serebrennikov P.S., Shmakov A.V., Gorodetskaya N.A. *Optimizatsiya volokonnogo Breggovskogo otrazhatelya dlya opticheskikh liniy svyazi* [Optimization of fiber Bragg reflector for optical communication lines]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 80–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-80-83

## Author's information

**Serebrennikov Pavel Semenovich** — Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

**Shmakov Andrey Vyacheslavovich** — Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: ashmakov62@gmail.ru

**Gorodetskaya Tat'yana Aleksandrovna** — senior teacher, BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Received 18.08.2016