

多波长啁啾叠栅的矩阵分析

满文庆

(广州大学物理与电子工程学院, 广州 510400)

摘 要 在分析多波长啁啾叠栅特征的基础上,提出了多波长啁啾叠栅的矩阵分析模型,采用矩阵分析模型对 4 波长和 8 波长啁啾叠栅的反射谱特性进行了理论分析,数值分析结果与实验结果非常一致.还首次数值模拟了波长间隔 0.8 nm 的 16 波长啁啾叠栅.此方法对多波长啁啾叠栅的设计和制作具有参考价值.

关键词 多波长光纤光栅;矩阵分析模型;多波长色散补偿;啁啾光纤光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

单波长的啁啾光纤光栅在色散补偿方面的应用已逐渐成熟^[1],多波长的光纤光栅的应用和研究也越来越受到重视^[2~4].目前,在密集波分复用系统中色散补偿主要用色散补偿光纤 DCF 进行补偿,但随着光纤通信数据速率的不断提高,光纤的非线性效应和偏振模色散的问题将成为主要问题,用多波长啁啾叠栅实现色散补偿将是很有前景的方法.多波长啁啾叠栅(MCFBG)是指在同一段光纤上多次重复刻写多个周期不同的啁啾光栅,多波长啁啾叠栅在光纤通信的色散补偿方面有许多优点,国内也有许多实验方面的研究^[5,6],但至今尚无完整的理论分析的报道.本文采用矩阵分析模型对多波长啁啾叠栅的反射谱特性进行了理论分析.理论分析结果和已报道的实验结果非常一致,本文的分析方法对多波长啁啾叠栅的设计和制作具有较高的参考价值.

1 多波长啁啾叠栅的矩阵模型

单波长的啁啾光纤光栅中,令 R 和 S 分别是通过光栅的前向、后向场振幅,其满足模耦合方程^[4]

$$\begin{aligned} dR/dz &= i\sigma R + ikS \\ dS/dz &= -i\sigma S - ik^* R \end{aligned} \quad (1)$$

对于多波长啁啾叠栅,考虑到在重复刻写的过程中,对纤芯的有效折射率的调制都是浅调制,其模型如图 1.



图 1 多波长啁啾叠栅的矩阵分析模型
Fig. 1 Model of superimposed multi-wavelength CFBG for Matrix analysis

多波长啁啾叠栅中对纤芯的有效折射率调制的

综合结果仍可认为是多个啁啾光栅的调制的线性叠加,即

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \delta n_{1\text{eff}}(z) + \delta n_{2\text{eff}} + \dots + \delta n_{\text{neff}} \quad (2)$$

式中

$$\delta n_{\text{neff}} = \overline{\delta n_{\text{neff}}} \left[1 + \nu_n \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_n} \cdot z + \phi_n(z) \right] \right] \quad (3)$$

是啁啾光栅中第 n 次刻写光栅引起的折射率微扰. $\overline{\delta n_{\text{neff}}}$ 是第 n 个光栅折射率调制的平均值, ν_n 是调制系数, $\phi_n(z)$ 描述光栅的啁啾,以后的计算中,假设各个光栅的这三个量相同.

矩阵分析法是将非均匀的光纤光栅分成 M 小段, $M \ll 2n_{\text{eff}}L/\lambda_B$, 则可假定每个小段的光栅是均匀的. 根据以上分析,多波长啁啾叠栅的第 i 段的传输矩阵为

$$[F_i] = [F_{i1}] \cdot [F_{i2}] \dots [F_{in}] \quad (4)$$

矩阵 F_{in} 是每 i 段中对应的第 n 次刻写的光栅的传输矩阵^[7], n 是啁啾叠栅的重复刻写的光栅数.

$$\begin{aligned} F_{in} &= [\cosh(r_{Bn}\Delta z) - i(\sigma_n/r_{Bn})(r_{Bn}\Delta z), \\ &\quad -i(\sigma_n/r_{Bn})\sinh(r_{Bn}\Delta z) \quad i(\sigma_n/r_{Bn})\sinh(r_{Bn}\Delta z), \\ &\quad \cosh(r_{Bn}\Delta z) + i(\sigma_n/r_{Bn})(r_{Bn}\Delta z)] \end{aligned} \quad (5)$$

式中的 r_{Bn} 和 σ_n 等是 i 段中第 n 次刻写的光栅的本地值.

$$r_{Bn} = \sqrt{k^2 - \sigma^2}, k = \frac{\pi}{\lambda} \nu_n \overline{\delta n_{\text{neff}}}, \sigma_n = \Delta\beta_n - \frac{1}{2} \frac{d\phi_n}{dz},$$

$\Delta\beta_n = \beta - \frac{\pi}{\Lambda_n} = 2\pi n_{\text{eff}} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{Bn}} \right], \frac{1}{2} \frac{d\phi_n}{dz}$ 是啁啾系数,

$\frac{1}{2} \frac{d\phi_n}{dz} = \frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_{Bn}^2} \cdot \frac{d\lambda_{Bn}}{dz}$. 把 M 段“均匀”小光栅的传输

矩阵相乘,根据边界条件 $R_0(-L/2) = 1, S_0(-L/2) = 0$, 可得

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F_M \cdot F_{M-1} \dots F_i \dots F_1 \cdot \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$[F_i]$ 的表达式见式(4). 根据式(6)即可求出多波长

啾啾叠栅的反射系数 $\rho=S_M/R_M$,反射功率 $r=|\rho|^2$.
多波长啾啾叠栅的时延

$$\tau = \frac{d\theta_p}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\theta_p}{d\lambda} \quad (7)$$

式中 θ_p 是反射系数的相位部分, C 是光速.

2 多波长啾啾叠栅的特性

很显然,多波长啾啾叠栅的反射谱特性与光栅的长度有关系,下面是光栅长度较小时的反射谱特性.

2.1 光栅长度 $L=1$ mm

先分析四波长啾啾叠栅,取啾啾系数 $C=5 \times 10^{-9}$, $L=1$ mm, $\nu_n \overline{\delta_{m\text{eff}}} = 8 \times 10^{-5}$,标称波长差 1.6 nm,光栅的反射谱如图 2. 反射光谱只有一个反射峰,这是因为当光栅长度较小时,四个光栅重度关联,各自的反射光谱充分交叠干涉,形成一个反射峰^[5]. 当啾啾系数 $C=0$,啾啾叠栅数量 $n=2$,数值分析的结果和文献^[8]的结果一致.

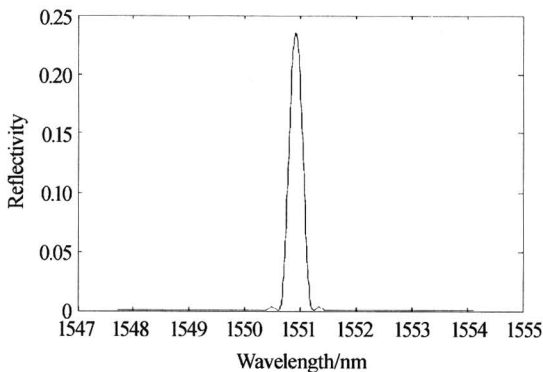


图 2 1 mm 长四重啾啾叠栅的反射谱

Fig. 2 Reflected spectra of superimposed four wavelength gratings when $L=1$ mm

2.2 光栅长度 $L=10$ mm

四波长啾啾叠栅的长度 $L=10$ mm,其他条件同 2.1,光栅的反射谱呈现出多个反射峰,如图 3,这是因为光栅长度增加,四个光栅的反射峰部分干涉叠加的结果. 这种反射谱可用于多波长的滤波,通

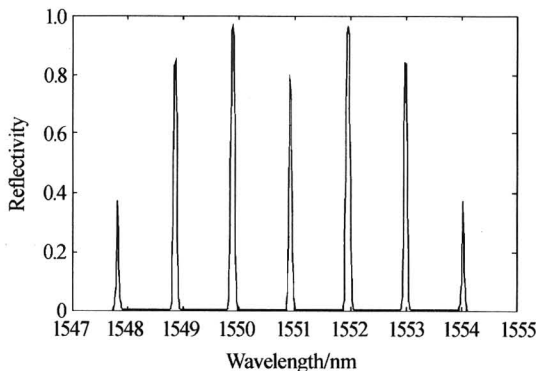


图 3 10 mm 长四重啾啾叠栅的反射谱

Fig. 3 Reflected spectra of superimposed four wavelength gratings when $L=10$ mm

过调节啾啾系数,可改变反射峰的个数和反射峰的距离.

当啾啾系数 $C=0$,啾啾叠栅数量 $n=2$,数值分析的结果和文献^[5]的结果一致.

3 用于色散补偿的多波长啾啾叠栅

目前,多波长啾啾叠栅的一个重要的应用方向是密集波分复用系统的多信道色散补偿. 下面分析多信道色散补偿啾啾叠栅的反射谱特性并和实验结果进行对比.

3.1 波长间隔 1.6nm 的四波长色散补偿器

(1) 光栅长度 $L=5$ cm

在 2.1 的条件下,取啾啾系数 $C=5 \times 10^{-9}$, $\nu_n \overline{\delta_{m\text{eff}}} = 8 \times 10^{-5}$,标称波长差 1.6 nm,只增加光栅长度,进行数值模拟时发现,当 $L=5$ cm,光栅的反射谱如图 4,这是由于光栅的长度还不是足够大,反射峰在边缘处产生的交叠干涉,此反射谱是能用于多波长色散补偿的雏形. 而光栅的长度小于 5 cm 时,因四个光栅的反射峰部分干涉叠加不能出现这样的反射谱.

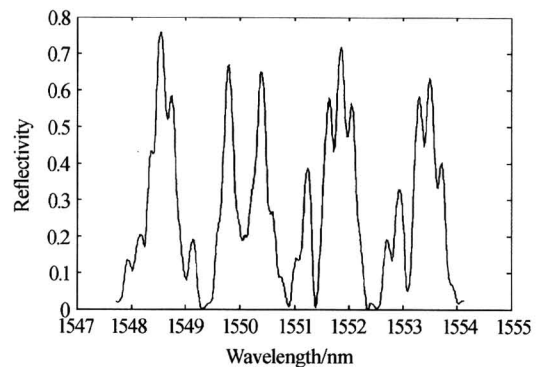


图 4 50 mm 长四重啾啾叠栅的反射谱

Fig. 4 Reflected spectra superimposed of four wavelength gratings when $L=50$ mm

(2) 光栅长度 $L=10$ cm

继续增加光栅的长度,当 $L=10$ cm 时,光栅的反射谱如图 5,这是因为光栅的长度增大,四个光

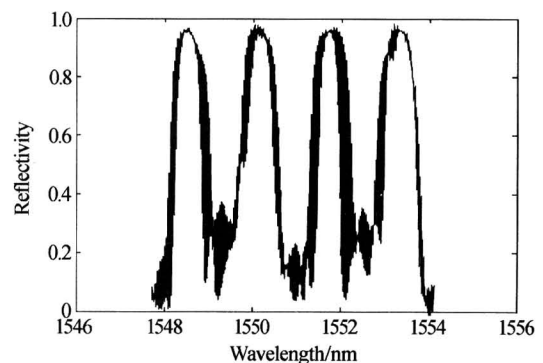


图 5 10 cm 长四重啾啾叠栅的反射谱

Fig. 5 Reflected spectra of superimposed four wavelength gratings when $L=10$ cm

表1 10 cm 四重啁啾叠栅反射谱特性

标称波长/nm	计算所得波长/nm	反射率	带宽/nm
1548.51	1548.49	0.88	>0.3
1550.12	1550.10	0.91	>0.3
1551.72	1551.70	0.88	>0.3
1553.33	1553.28	0.90	>0.3

栅的反射峰互相独立,在边缘处不再产生交叠干涉,从而出现这样的反射谱,这样的反射谱能用于四信道的色散补偿.各个反射峰的标称波长和数值计算的结果如表1,根据式(7)可估算各光栅的色散值是1700 ps/nm,此计算结果与文献[5]的实验结果非常一致.

3.2 波长间隔 1.6nm 的八波长色散补偿器

下面作进一步分析,计算八重啁啾叠栅的反射谱特性,取光栅长度 $L=12.5$ cm,啁啾系数 $C=2 \times 10^{-9}$, $\nu_n \overline{\delta_{meff}} = 8 \times 10^{-5}$,标称波长差 1.6 nm,反射谱特性如图6.根据式(7)可估算光栅的色散值超过1700 ps/nm,此计算结果与文献[6]的实验结果非常一致.尽管反射谱形有一些不光滑,但并不影响其分析结果,毕竟矩阵分析法是一种近似的分析方法.

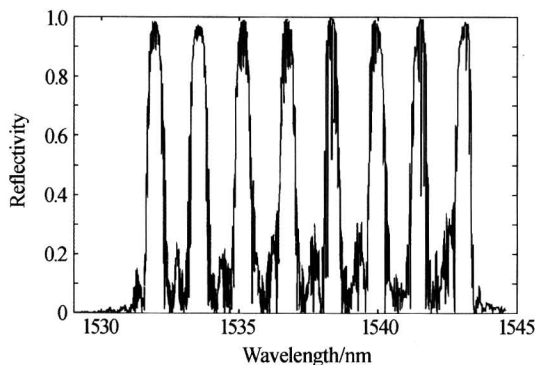


图6 12.5 cm 长八重啁啾叠栅的反射谱
Fig. 6 Reflected spectra of superimposed eight wavelength gratings when $L=12.5$ cm

3.3 波长间隔 0.8 nm 的 16(或 32)波长色散补偿器

目前,密集型波分复用系统中,相邻的两个波长的波长间隔已经达到 0.8 nm,国外也有报道用多波长啁啾叠栅来实现色补偿.取光栅长度 $L=12.5$ cm,啁啾系数 $C=0.11 \times 10^{-9}$, $\nu_n \overline{\delta_{meff}} = 8 \times 10^{-5}$,标称

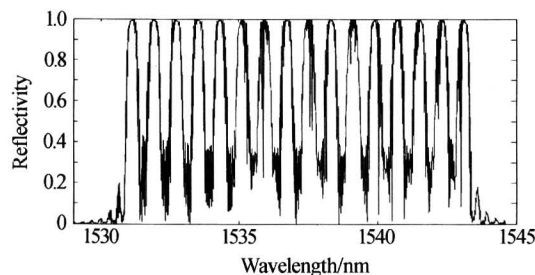


图7 12.5 cm 长 16 重啁啾叠栅的反射谱
Fig. 7 Reflected spectra of superimposed sixteen wavelength gratings when $L=12.5$ cm

波长差 0.8 nm,计算 16 重啁啾叠栅的反射谱,其特性如图7,反射谱形较好,带宽 0.3 nm 左右.比较 3.2和3.3发现,在相同条件下,如果波长间隔从 1.6 nm 变成 0.8 nm,即相同的光栅长度下,如果重复刻写的光栅数增加一倍,为了得到好的反射波形,各个光栅的啁啾系数应减小.目前,国内尚未有 16 重的啁啾叠栅的实验报道.

可作进一步计算,计算 32 重啁啾叠栅的反射谱,取光栅长度 $L=15$ cm,啁啾系数 $C=0.1 \times 10^{-9}$, $\nu_n \overline{\delta_{meff}} = 8 \times 10^{-5}$,标称波长差 0.8 nm.这种条件下,反射谱的带宽较小,实现色散补偿的范围小.但如果增加光栅的长度,则反射谱的带宽有明显的增加,但长度大于 15 cm 啁啾光栅的掩模板较难实现.实际应用中,可用两个 16 波长的叠栅串联实现 32 波长的应用.

4 结论

提出了多波长啁啾叠栅的矩阵分析模型,采用矩阵分析模型对 4 波长和 8 波长啁啾叠栅的反射谱特性进行了理论分析,分析结果与实验结果非常一致.还首次数值模拟了波长间隔 0.8 nm 的 16 波长啁啾叠栅.此方法对多波长啁啾叠栅的设计和制作具有指导意义.

参考文献

- 宁提纲,简伟,裴丽,等. 40Gb/s 光时分复用传输光纤光栅补偿色散研究. 光学学报, 2004, **24**(8): 1092~1094
Ning T G, Jian W, Pei L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1092~1094
- Cong J, Chen X, Zhang X M. On the group delay characteristics of chirped dual overwritten fiber Bragg gratings. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 299~302
- 吴强,余重秀,王葵如,等. 啁啾 sinc 取样光纤光栅研究. 光子学报, 2005, **34**(3): 404~408
Wu Q, Yu C X, Wang K R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 404~408
- Chen J H, Luo X L, Fang X H, et al. The performance analysis of the OCDMA with the encoder/decoder based on step chirped fiber Bragg gratings. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1039~1041
- 宁提纲,简水生,裴丽,等. 4×10Gb/s 412 km 密集波分复用光纤光栅色散补偿的实验. 光学学报, 2002, **22**(7): 839~841
Ning T G, Jian S S, Pei L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 839~841
- 宁提纲,谢增华,裴丽,等. 8×10Gb/s 103 km DWDM 色散补偿的实验. 光电子·激光, 2001, **12**(1): 77~79
Ning T G, Xie Z H, Pei L, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(1): 77~79

- 7 Erdogan T. Fiber grating spectra. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 8 鲍吉龙,章献民,陈抗生,等. 双重光纤布拉格光栅的耦合

理论分析. 光学学报, 2001, **21**(10):1165~1170

Bao J L, Zhang X M, Chen K S, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10):1165~1170

Analysis of Superimposed Multi-wavelength Fiber Optic Bragg Gratings Using Martrix Method

Man Wenqing

Faculty Of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510400

Received date: 2005-03-17

Abstract According to the characteristics of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings, present a mathematic model for superimposed multi-wavelength fiber Bragg Gratings. Theoretical analysis is made using Matrix method for four and eight wavelength superimposed fiber Bragg gratings. The theoretical analysis results is agreement well with the experimental results. Also, the numerical simulation of sixteen wavelength superimposed fiber Bragg gratings which wave gap equals 0.8 nm is made firstly. This method is conducive to the design and fabrication of multi-wavelength superimposed fiber Bragg gratings.

Keywords Superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings; Matrix model; Multi-channel dispersion compensation; Chirped FBG



Man Wenqing was born in August, 1971. He obtained Bachelor degree from the Northeast Normal University in 1993 and received optic Master degree from the South China Normal University. His book named 《Computer Networks Technology and Device》 was published by Tshinghua University Press in April, 2004.