

文章编号: 1001-3806(2007)03-0235-03

多波长啁啾光纤光栅叠栅的数值分析和设计

满文庆, 彭 军

(广州大学 物理与电子工程学院, 广州 510006)

摘要: 为了研究多波长啁啾光纤光栅叠栅的反射和时延特性, 提出多波长啁啾光纤光栅叠栅的耦合模理论方法, 得到波长间隔 $\Delta\lambda = 1.6\text{nm}$ 的 4 波长和 8 波长的啁啾叠栅的反射谱和时延特性的数值分析结果, 并设计了波长间隔 $\Delta\lambda = 0.4\text{nm}$ 的 8 波长的啁啾叠栅, 数值分析结果与实验结果非常一致。结果表明, 多波长啁啾光纤光栅叠栅的耦合模理论是可靠的, 可用于分析其各种特性, 此方法对多波长啁啾叠栅的设计和制作具有重要的参考价值。

关键词: 光通信; 啁啾光纤布喇格光栅叠栅; 多波长光纤布喇格光栅; 耦合理论模型

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Numerical analysis and design of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings

MAN Wen-qing, PENG Jun

(Faculty of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract In order to study the characteristics of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings, the coupled mode theory of the superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings was presented and the numerical analysis result about the reflected spectra and time delay of 4 and 8 wavelengths superimposed FBG whose wavelength gap equals to 1.6nm was obtained. The reflected spectra of 8 wavelength superimposed FBG whose wavelength gap equals to 0.4nm is designed. The numerical result was in good agreement with the experimental results. The result shows that the coupled mode theory of the superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings is reliable, which can be used to analyze the characteristics of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings and is conducive to the design and fabrication of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings.

Key words optical communication; superimposed chirped fiber Bragg gratings; multi-wavelength fiber Bragg gratings; coupled mode theory

引 言

多波长的光纤光栅叠栅自 1994 年由 OTHONOS 实验实现以来^[1], 其应用越来越多。均匀的多波长光纤光栅叠栅可用于光码分复用系统中编码/解码^[2], 也可于光梳状滤波器和多波长激光器^[3]; 多波长啁啾光纤光栅叠栅可实现密集波分复用多通道色散补偿^[4]和滤波器^[5], 多波长啁啾光纤光栅叠栅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。多波长啁啾叠栅和取样光纤光栅^[6]、光纤光栅阵列^[7,8]相比, 其反射谱幅度一致, 结构紧凑, 便于封装, 更适合用在密集波分复用光纤通信的色散补偿方面, 国内也有许多实验方面的研究^[9,10]。但至今尚无完整的理论分析的报道。在 40Gbit/s 高速光纤通信系统中, 光纤的非线性效应成为主要问题, 用多波长啁啾叠

栅实现多波长色散补偿将是很有前景的方法^[11,12]。作者用矩阵分析法分析多波长啁啾光纤光栅叠栅^[13], 虽然计算速度快, 但分析中存在近似处理, 精度不高。作者采用耦合模理论模型对多波长啁啾叠栅的特性进行了数值分析。反射特性和时延特性的数值分析结果和已报道的实验结果非常一致。

1 多波长啁啾光纤光栅叠栅的耦合理论

根据介质光波导理论和麦克斯韦方程组, 并考虑在浅调制情况下, 纵向耦合系数远小于横向耦合系数, 忽略纵向耦合系数的影响, 可得任意折射率分布 $n(x, y, z)$ 光纤中的耦合方程组^[14]:

$$\begin{cases} \frac{dA_m}{dz} = -i \sum_l \{ A_l K_{ml}^1 \exp[i(\beta_m - \beta_l)z] + B_l K_{ml}^1 \exp[i(\beta_m + \beta_l)z] \} \\ \frac{dB_m}{dz} = i \sum_l \{ A_l K_{ml}^1 \exp[-i(\beta_m + \beta_l)z] + B_l K_{ml}^1 \exp[-i(\beta_m - \beta_l)z] \} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $K_{ml}^1(z)$ 是模式 m 和模式 l 之间的横向耦合系数,

作者简介: 满文庆 (1971-), 男, 讲师, 主要从事光电子和光通信技术研究和教学工作。

E-mail: optin@126.com

收稿日期: 2006-06-10 收到修改稿日期: 2006-07-18

上标 i 表示横向模式。

$$K_{ml}^i(z) = \frac{\omega}{4} \iint \mathcal{E}(x, y, z) e_{m1}(x, y) \cdot e_{li}^*(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中, $\Delta\epsilon \approx 2n\delta n$, 是介电常数的扰动, n 是折射率。

在浅调制情况下, 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纤光栅的折射率调制的线性叠加, 即:

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \delta n_{1\text{eff}}(z) + \delta n_{2\text{eff}}(z) + \dots + \delta n_{j\text{eff}}(z) + \dots + \delta n_{y\text{eff}}(z) \quad (3)$$

式中, 下标 j 是重复刻写的啁啾光纤光栅的个数。

$$\delta n_{i\text{eff}} = \overline{\delta n_{i\text{eff}}} \left\{ 1 + \cos v_i \left[\frac{2\pi}{\Lambda_i} \cdot z + \phi_i(z) \right] \right\} \quad (4)$$

是啁啾光纤光栅中第 i 次刻写光栅引起的折射率微扰。 $\overline{\delta n_{i\text{eff}}}$ 是第 i 个子光栅折射率调制的平均值, v_i 是调制系数, $\phi_i(z)$ 描述光栅的啁啾, 为简化处理, 不考虑初始相位。将文献 [14] 和文献 [15] 中的处理办法推广应用到多波长啁啾光纤光栅叠栅, 可得如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = -\sigma A - B \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \exp[i(2\delta z - \phi_i)] \right\} \\ \frac{dB}{dz} = -\sigma B - A \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \exp[-i(2\delta z - \phi_i)] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\sigma = \sum_i \sigma_i$, $k_i = (v_i/2)\sigma_i$, 是交流耦合系数。

$\sigma_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \overline{\delta n_{i\text{eff}}}$ 是直流耦合系数。 $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda_i} = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$, 表示失谐量。 λ_B 表示第 i 个光纤光栅的布喇格反射波长。 ϕ_i 是啁啾引起的相位:

$$\frac{1}{2} \frac{d\phi_i}{dz} = \frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_B^2} \cdot \frac{d\lambda_B}{dz} \quad (6)$$

式中, n_{eff} 是有效折射率, $\frac{d\lambda_B}{dz}$ 是第 i 次刻写的子光栅的啁啾系数。对 (6) 式两边积分, 可得:

$$\phi_i = \frac{4\pi n_{\text{eff}} z^2}{\lambda_B^2} \cdot \frac{d\lambda_B}{dz} \quad (7)$$

至此, 方程组 (5) 式的各系数表达式已全部推导出来。

(5) 式是多重啁啾光纤光栅叠栅的耦合模方程组, 根据 (5) 式可计算出前向、后向传输模的振幅, 光栅反射系数 $\rho = S_V / R_V$, 多波长啁啾叠栅的时延:

$$\tau = \frac{d\theta_p}{d\omega} = - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\theta_p}{d\lambda} \quad (8)$$

式中, θ_p 是反射系数的相位部分, c 是光速。为简化计算, 下面的数值计算中, 假设所有子光栅的折射率调制的平均值 $\overline{\delta n_{i\text{eff}}}$ 相同, 调制系数 $v_i = 1$, 啁啾系数 $\frac{d\lambda_B}{dz}$ 相同。

由于多波长啁啾叠栅中对纤芯的有效折射率调制的线性叠加, 使得纤芯的总有效折射率增加, $n = n_0 +$

$\sum_i \overline{\delta n_{i\text{eff}}}$, n_0 是未刻写光纤光栅时纤芯的折射率。故各个子光栅的布喇格反射波长向长波长方向微小移动。

2 数值分析与设计

2.1 4 波长啁啾叠栅的反射特性和时延特性

以 4 波长啁啾叠栅为例, 刻写的子光栅的标称波长符合 ITU-T 规定的波长, 波长间隔 1.6nm。取有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 折射率调制的平均值 $\overline{\delta n_{i\text{eff}}} = 4 \times 10^{-5}$, 光栅长度 $L = 10\text{cm}$, 啁啾系数 $C = 1 \times 10^{-9}$, 反射谱如图 1 所示, 各反射峰的波长符合标称波长, 反射谱带宽 0.3nm, 各信道的色散大于 1700ps/(ns·km)。文献 [8] 中使用 4 重啁啾叠栅进行色散补偿实验, 此实验用的 4 波长光纤光栅啁啾叠栅结果是国内报道的唯一的 4 重啁啾叠栅, 本文中数值分析和此实验结果非常一致。

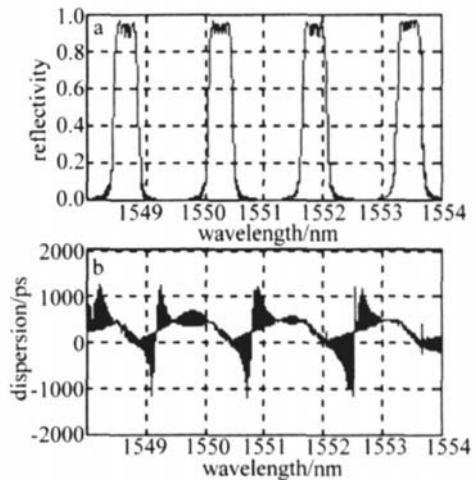


Fig 1 Reflected spectra (top) and group delay time (bottom) of superimposed four wavelength gratings when $L = 10\text{cm}$

另外, 在多信道的色散补偿中, 由于存在色散斜率, 利用多波长啁啾叠栅进行色散补偿, 可通过独立改变不同子光栅的啁啾系数实现色散斜率补偿。利用 (5) 式, 也可进行不同啁啾系数的多重啁啾叠栅的特性分析, 图略; 当折射率调制的平均值 $\overline{\delta n_{i\text{eff}}} = 3.5 \times 10^{-5}$, 光栅长度 $L = 12.5\text{cm}$, 啁啾系数等于 1×10^{-9} , 反射谱各峰值波长符合 ITU-T 建议, 各反射峰的带宽大于 0.3nm, 此结果和文献 [9] 中的实验中 8 波长的啁啾叠栅的反射谱一致, 图略。

2.2 反射谱峰值波长的移动

在 2.1 节中的实验条件下, 只增加折射率调制的平均值 $\overline{\delta n_{i\text{eff}}} = 6 \times 10^{-5}$, 计算 4 波长啁啾叠栅的反射谱, 如图 2 所示。

反射峰中心波长向长波长方向微小移动, 主要是各个子光栅折射率调制叠加引起。设计 4 波长啁啾叠栅时调整标称波长即可; 实际刻写啁啾叠栅时, 还需考

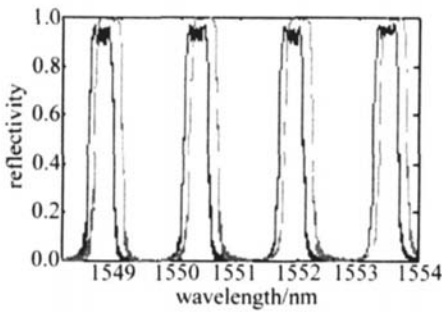


Fig 2 Reflected spectra of superimposed four wavelength gratings when $L=14\text{nm}$, $\delta n_{\text{eff}}=4 \times 10^{-5}$ (solid line), $\delta n_{\text{eff}}=6 \times 10^{-5}$ (dashed line) 考虑啁啾叠栅退火后的反射峰中心波长的移动^[9,10]。

2.3 波长间隔 0.4nm 的 8重啁啾叠栅的设计

目前,波分复用系统中,相邻的两个波长的波长间隔已经达到 0.4nm,也可用多波长啁啾叠栅实现色散补偿。取光栅长度 $L=10\text{nm}$,啁啾系数 $C=0.8 \times 10^{-9}$,折射率调制的平均值 $\delta n_{\text{eff}}=4 \times 10^{-5}$,标称波长差 0.4nm,计算 8重啁啾叠栅的反射谱,其特性如图 3 所示,反射谱各峰值波长符合 ITU-T 建议,带宽 0.27nm,色散大于 $1700\text{ps}/(\text{ns} \cdot \text{km})$ 。目前,国内尚未见波长间隔 0.4nm 的 8重啁啾叠栅的实验报道。

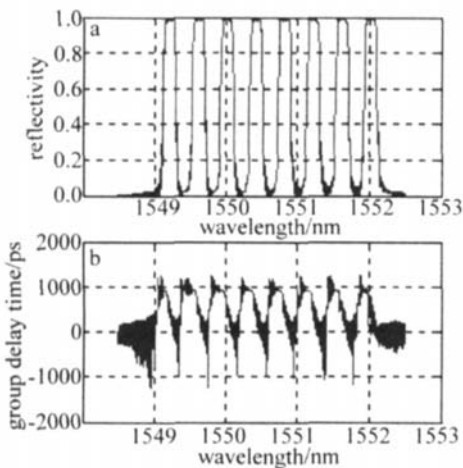


Fig 3 Reflected spectra (top) and group delay time (bottom) of superimposed eight wavelength gratings when $\Delta\lambda=0.4\text{nm}$

最后指出,利用本文中的分析方法可进一步模拟切趾实验和计算更多重啁啾叠栅的反射特性和其它特性,但由于计算的量太多,需要更多的计算时间,这个问题还需要进一步研究。当啁啾系数取为 0 时,即可分析研究多重均匀光纤光栅叠栅^[3]的各种特性。

3 结论

提出了多波长啁啾叠栅的耦合理论模型,并计算了波长间隔 $\Delta\lambda=1.6\text{nm}$ 的 4 波长和 8 波长的啁啾叠

栅的反射谱和时延特性。数值计算结果与实验结果非常一致,结果表明,多波长啁啾光纤光栅叠栅的耦合理论是可靠的,可用来分析多波长啁啾光纤光栅叠栅的各种特性,此方法对多波长啁啾叠栅的设计和制作具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] OTHONOS A, LEE X, MEASURES R M. Superimposed multiple Bragg gratings [J]. Electron Lett 1994, 30(23): 1972~1974
- [2] AYOTTE S, ROCHETTE M, MAGNÉ J *et al*. Experimental verification and capacity prediction of FE-OCMA using superimposed FBG [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 724~731.
- [3] LIU Y, NING T G, TAN Zh W *et al*. Fiber gratings comb filter and its application in novel wavelength selectable fiber laser [J]. Acta Optica Sinica 2004, 24(6): 763~766 (in Chinese).
- [4] PANCHAUD Y, CHOTARD H, MAILLOUX A *et al*. Superposition of chirped fibre Bragg grating for third order dispersion compensation over 32 WDM channels [J]. Electron Lett 2002, 38(24): 1572~1573
- [5] QI J, WANG J, ZHANG Y *et al*. Efficient structure for optical interleavers using superimposed chirped fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2005, 17(2): 387~389
- [6] WU Q, YU Gh X, WANG K R *et al*. Research of chirped sinc sampled fiber Bragg gratings [J]. Acta Photonica Sinica 2005, 34(3): 404~408 (in Chinese).
- [7] CHEN Y, CAO JH, TANG Zh W. $8 \times 10\text{Gb/s}$ Transmission system over 2015km with dispersion compensation by CFBG [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2005, 16(8): 942~946 (in Chinese).
- [8] CHEN Ch Y, QIAO X G, JIA Zh A *et al*. Study on wavelength detection system based on tunable filters with a novel multiplexing structure [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 150~152 (in Chinese).
- [9] NING T G, JIAN Sh Sh, PEIL *et al*. $4 \times 10\text{Gb/s}$ 412km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica 2002, 22(7): 839~841 (in Chinese).
- [10] NING T G, XIE ZH, PEIL *et al*. $8 \times 10\text{Gb/s}$ 103km DWDM dispersion compensation using chirped multiwavelength fiber Bragg grating [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2001, 12(1): 77~79 (in Chinese).
- [11] NING T G, JIAN W, PEIL *et al*. Study on dispersion compensation of 40Gb/s optical time division multiplexing transmission over G. 652 fiber [J]. Acta Optica Sinica 2004, 24(8): 1092~1094 (in Chinese).
- [12] WANG R X. Numerical study of initial chirp compensating for fiber dispersion function [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 109~112 (in Chinese).
- [13] MAN W Q. Analysis of superimposed multiwavelength fiber Bragg gratings using matrix method [J]. Acta Photonica Sinica 2006, 35(6): 873~876 (in Chinese).
- [14] ERDOGAN T. Fiber gratings spectra [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277~1294.
- [15] BAO J L, ZHANG X M, CHEN K Sh *et al*. Spectra of dual overlaid ten fiber Bragg grating [J]. Opt Commun 2001, 188 31~39.