

文章编号: 0258-7025(2008)04-0577-05

啁啾相移光纤光栅的反射谱特性

鲁韶华 许 鸥 董小伟 刘 艳 李 彬 简水生

(北京交通大学光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 相移光纤光栅作为透射型滤波器件降低了使用成本,在光通信和传感领域有着较高的应用价值。将传输矩阵法与谐振理论相结合,详细分析了相移量、相移点位置对啁啾相移光栅反射谱特性的影响,数值模拟和实验结果表明,啁啾相移光栅与均匀相移光栅不同,当位于啁啾光栅中点的相移调制量偏离 $\pi/2$ 时,透射峰在偏离光栅反射谱中心的同时深度逐渐减小;当相移点在光栅上的位置发生变化时,透射峰位置也随之改变,但深度基本保持不变。利用啁啾光栅的这种特性,可形成具有多个透射峰的多点相移光栅。

关键词 光纤光学;啁啾相移光栅;谐振理论;传输矩阵法;多通道滤波

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Analysis for the Reflective Spectrum Characteristics of Chirped Phase-Shifted Fiber Gratings

Lu Shaohua Xu Ou Dong Xiaowei Liu Yan Li Bin Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract As a transmission type filter, chirped phase-shifted fiber grating has the advantage of low cost, which makes it a critical component in optical communication and sensor system. Reflective spectrum of chirped phase-shifted fiber grating is analyzed about the influence of phase shift and position on reflection characteristic by the transfer matrix method combined with resonance theory. Different characteristics from uniform phase-shifted fiber gratings are obtained; the transmission window is away from the center of the reflective spectrum and becomes shallow when the phase shift in the center of the grating is unequal to $\pi/2$; the transmission window varies with the location of the $\pi/2$ -phase shift, but all the transmission windows are of the same depth. Numerical predictions agree well with the experimental results. Multiple phase shifts can be used to open several transmission windows with the same depth which makes chirped phase-shifted gratings have a good application prospect in multi-channel filter and dispersion compensator.

Key words fiber optics; chirped phase-shifted gratings; resonance theory; transfer matrix method; multi-channel filter

1 引言

光纤光栅因其体积小、成本低和插入损耗低等优点在光通信和传感领域占有重要地位。普通布拉格光栅作为反射型带阻滤波器件,通常要与光耦合器、环形器联合使用,提高了成本。与之相比,相移光纤光栅能在反射谱的阻带中打开一透射窗口,实现透射型滤波。而且,可以根据需要调整相移量、相

移位置、相移点数量以及加入切趾等方式得到不同线宽、滚降特性的透射峰^[1,2]。这些优良特性,使得相移光栅在窄带滤波、波分复用/解复用、掺铒光纤增益平坦以及单频光纤激光器等领域有着广阔的应用前景^[3~8]。基于相移光栅的这些优点,国内外已经有很多关于均匀相移光栅的分析及应用^[1~6],但是关于啁啾相移光栅的分析以及实验却甚少。

收稿日期:2007-07-17; 收到修改稿日期:2007-10-11

基金项目:国家自然科学基金(60477017)和北京市自然科学基金(052023)资助项目。

作者简介:鲁韶华(1981—),女,山东人,博士研究生,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail:lsh971@163.com

导师简介:简水生(1929—),男,江西人,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件、光纤网方面的研究。E-mail:ssjian@center.bjtu.edu.cn

本文将传输矩阵法与谐振理论相结合,分析了相移量、相移点位置对啁啾相移光栅反射谱特性的影响,得到了一些区别于均匀相移光栅的特有性质。

2 理论模型

啁啾相移光栅的折射率分布如图 1 所示,相移是由光栅上某处折射率调制的突变引起的。采用谐

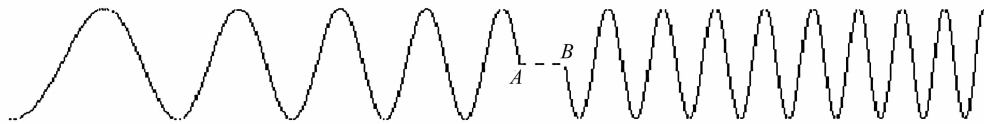


图 1 啁啾相移光栅折射率分布示意图

Fig. 1 Induced index change of chirped phase-shifted gratings

假设等效谐振腔长度为 Δz , 则相移量 ϕ 与 Δz 之间的关系为

$$\phi = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_B} \Delta z, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光栅的有效折射率, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_\phi$, Λ_ϕ 为相移点处的光栅周期, λ_B 为相移点处的布拉格波长。

法布里-珀罗腔的透射光强与入射光强之比为^[9]

$$\frac{A_T^2}{A_0^2} = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho)^2 + 4\rho \sin^2 \phi}, \quad (2)$$

式中 ρ 为两镜面的反射率。由(2)式得到如图 2 所示的干涉图样,表明了透射光强与入射光强之比随相移量 ϕ 的变化。可以看到曲线以 π 为周期,即最大值出现在 $0, \pi, 2\pi, \dots$ 的位置上,最小值出现在 $\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ 的位置上, ρ 越大,条纹可见度越高。

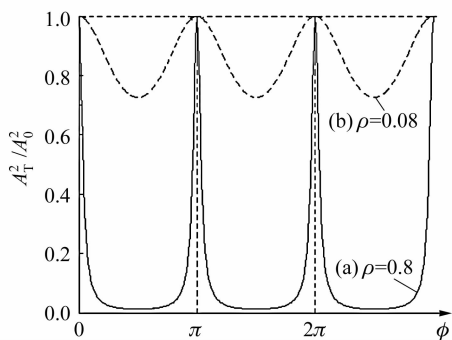


图 2 法布里-珀罗腔透射光干涉图

Fig. 2 Interference pattern of F-P cavity
上面相移调制的作用可以用矩阵表示为

$$\mathbf{F}_\phi = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

依据传输矩阵法^[10],啁啾光栅虽然各点的周期不同,但可以将其分为 M 小段,每一段近似为均匀光栅,每段具有不同的周期 Λ_i ($i = 1, 2, \dots, M$)。这样采用传输矩阵级联,可以推导出啁啾光栅的传输函

振理论解释,可以把折射率的突变看作是二个反射镜,则 A 和 B 两点之间就形成一小段产生多光束干涉的法布里-珀罗(F-P)腔。由于相移是啁啾光栅上某点处的折射率突变引起的,实际上 A 和 B 两点之间的距离无穷小,所以谐振腔两侧的布拉格反射波长一致。由此可以将光栅上的相移等效成法布里-珀罗腔进行分析。

数为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_i \cdots \mathbf{F}_{M-1} \cdot \mathbf{F}_M, \quad (4)$$

式中 F_i 为第 i 小段均匀光栅的传输矩阵。

如果在啁啾光栅中引入调制相移,将(3)与(4)式相结合,就可得到单相移点啁啾相移光栅传输函数的矩阵形式

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{F}_\phi \cdot \mathbf{F}_{i+1} \cdots \mathbf{F}_{M-1} \cdot \mathbf{F}_M = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则啁啾相移光栅的反射特性 R 和透射特性 T 由矩阵 \mathbf{F} 求得

$$R = |F_{21}/F_{11}|^2, \quad T = 1 - R. \quad (6)$$

3 数值计算及结果分析

假设啁啾光栅的参数分别为 $n_{\text{eff}} = 1.4466$, $\nu \overline{\delta n_{\text{eff}}} = 1.2 \times 10^{-4}$, 啁啾量 $c = \frac{1}{30}$ nm/cm, 光栅长度 $L = 6$ cm, 用传输矩阵法数值仿真得到的反射谱如图 3(a) 所示。在啁啾光栅的中点引入相移量 $\phi = \pi/2$ 时的结果如图 3(b) 所示,原反射谱中心位置出现了一个很窄的透射峰。

由谐振理论,当啁啾相移光栅的相移量为 $\pi/2$ 时,等效的谐振腔长度 $\Delta z = \lambda_B/4n_{\text{eff}}$ 。波长为 λ_B 的反射光满足光程差 $2\Delta z$ 为半波长的奇数倍,位于图 2 所示谐振谱线的波谷处,且相移点处光栅对波长为 λ_B 的反射光具有较高的反射率(参照图 2(a)),于是当在啁啾光栅中点引入的相移量为 $\pi/2$ 时,在反射谱中点形成一个很深的透射谐振峰。

3.1 相移调制量对啁啾相移光栅特性的影响

当在该啁啾相移光栅中点引入的相移量不等于 $\pi/2$ 时,从图 4(b) 数值分析结果可以看出,与均匀

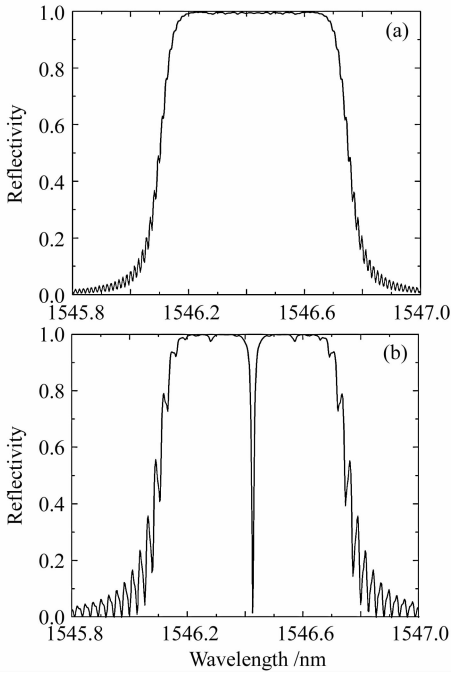


图 3 (a) 啁啾光栅的反射谱; (b) 啁啾光栅中点引入 $\pi/2$ 相移后的反射谱

Fig. 3 Reflective spectra of a chirped grating (a) without a phase shift and (b) with a phase shift $\phi = \pi/2$ in the center of the grating

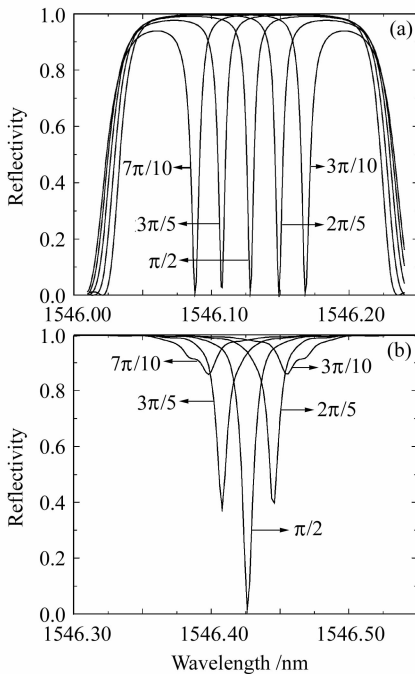


图 4 (a) 均匀光栅中点引入不同相移量的反射谱; (b) 啁啾光栅中点引入不同相移量的反射谱

Fig. 4 Reflective spectra of (a) uniform gratings and (b) chirped gratings with different phase shifts in the center of the gratings

相移光栅不同(图 4(a))。以 $\pi/2$ 为基点, 随着绝对

相移偏移量逐渐增大, 在啁啾光栅反射谱中形成的透射谐振峰将逐渐偏离中心位置, 并且其深度逐渐减小。相移量变大或变小相同的量时, 透射峰的位置是对称的。

啁啾相移光栅的这种特性可以用谐振理论解释如下。若位于啁啾光栅中点的相移调制量偏离 $\pi/2$, 由(1)式可知, 当相移量 ϕ 变化时, 对于 λ_B^* (啁啾光栅中点的布拉格波长) 来说相当于等效谐振腔的腔长 Δz^* 发生变化。假设变化后的腔长为 $\Delta z'$, 此时波长为 λ' 的反射光满足 $\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda'} \Delta z' = \frac{\pi}{2}$, 则 λ' 位于图 2 所示的谐振谱线的波谷处, 于是透射谐振峰出现在偏离中点 λ_B^* 的位置 λ' 上。由于相移点处光栅只对 λ_B^* 有高反射率, 对于 λ' 反射率 ρ 降低(参照图 2 (b)), 所以透射深度减小。

3.2 相移点位置对啁啾相移光栅特性的影响

假设相移点左右的长度之比分别为 $1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1$, 此时计算得到的光谱特性如图 5 所示。从图可见, 对于均匀相移光栅, 透射峰位置不变, 深度发生变化(见图 5(a)); 但是, 对于啁啾相移光栅, 当在光栅的不同位置引入 $\pi/2$ 相移调制量时, 其透射峰在光栅反射谱中的位置将随相移点位置的变化而变化, 但其透射峰深度基本保持不变, 如图 5(b)

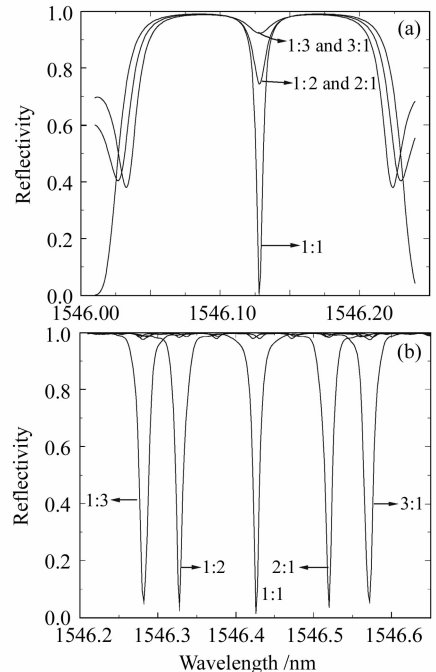


图 5 (a) 均匀光栅不同位置引入 $\pi/2$ 相移的反射谱; (b) 啁啾光栅不同位置引入 $\pi/2$ 相移的反射谱

Fig. 5 Reflective spectra of (a) uniform gratings and (b) chirped gratings with a phase shift $\phi = \pi/2$ in different locations of the gratings

所示。

啾啾相移光栅的这种特性可以用谐振理论解释如下。如果在啾啾光栅的偏离中点的位置引入 $\pi/2$ 相移,则透射峰出现在由该点光栅周期决定的布拉格波长位置上,而不是中点的布拉格波长 λ_B^* 上。由于此时 $\pi/2$ 是相对于相移点的布拉格波长而言的,所以不同位置透射深度基本没有变化。

利用啾啾相移光栅透射峰位置随相移点位置变化的特性,通过在光栅的不同位置引入多点相移调制,可以在啾啾光栅反射谱中形成多个透射峰。图 6 中,曲线 1 的啾啾系数为 $c = \frac{1}{30}$ nm/cm,曲线 2 的为 $c = \frac{2}{75}$ nm/cm,可以看出,透射峰的间隔随着光栅啾啾系数不同而变化。因此,啾啾相移光栅的这种特性将会使其在多通道滤波或多波长色散补偿方面具有很好的应用前景。

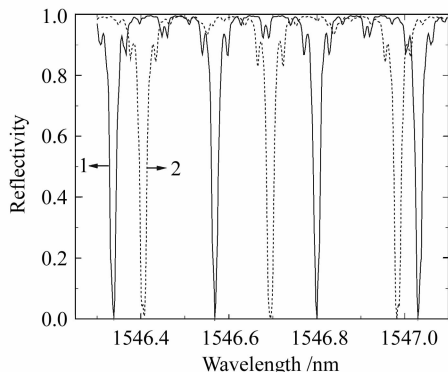


图 6 不同啾啾系数下多相移点啾啾相移光栅的反射谱
Fig. 6 Reflective spectra of chirped phase-shifted gratings with multiple phase shifts and with different chirped coefficients

4 实验结果

采用相位掩模板法制作啾啾光栅,然后用定点后曝光的方法引入相移。实验中使用的啾啾相位掩模板中心周期为 1072.023 nm,啾啾量为 0.256 nm。图 7 是光谱分析仪测得的啾啾相移光栅的反射谱,纵轴采用归一化的坐标。当相移点在光栅中点而相移量改变时,得到反射谱如图 7(a),实线是近似 $\pi/2$ 相移量的结果,透射峰中心波长为 1551.627 nm,而啾啾光栅反射谱的中心波长为 1551.634 nm,两者非常接近;虚线和点划线是远离 $\pi/2$ 相移量的结果,可以看到透射峰波长变化很小,深度有所改变。图 7(a)与图 4(b)相吻合。图 7(b)是相移点在距啾啾光栅短波长端 1/3 处的结果,啾啾光栅 3 dB 带宽的

起始波长分别为 1551.45 nm 和 1551.714 nm,而透射峰的中心波长是 1551.535 nm,位于距短波长约 1/3 处,与图 5(b)一致。

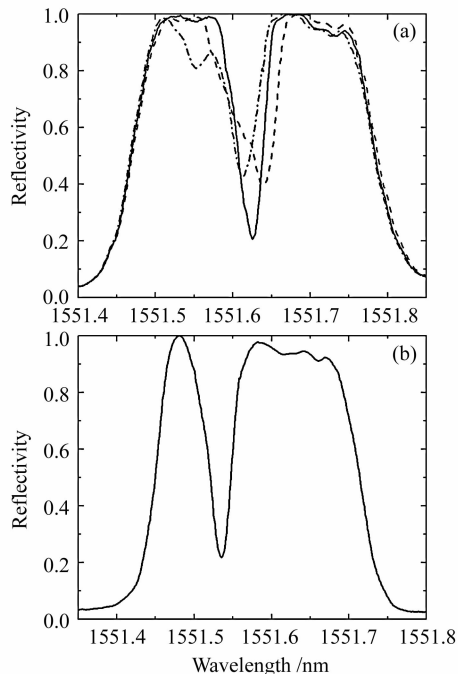


图 7 啾啾相移光栅反射谱的实验结果
Fig. 7 Experimentally measured reflective spectra of chirped phase-shifted fiber grating

5 结 论

结合传输矩阵法与谐振理论分析了相移量和相移点位置对啾啾相移光栅特性的影响,并进行了实验验证。显示出啾啾相移光纤光栅的良好应用前景,可用于波分复用/解复用、多通道滤波器、多通道的色散补偿等方面,比普通均匀相移光栅更具优势。

参 考 文 献

- 1 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Liu Zhiguo *et al.*. Analyses for characteristics of the phase-shifted fiber grating [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(3):177~180
赵东晖,杨秀峰,刘志国等. 相移光纤光栅的特性分析及其应用[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(3):177~180
- 2 Fan Yi, Chen Heming. Study on transmission spectrum of apodized phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(6):26~30
范毅,陈鹤鸣. 变迹相移光纤光栅传输谱的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(6):26~30
- 3 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8):995~997
- 4 A. Asseh, H. Storoy, J. T. Kringlebotn *et al.*. 10 cm Yb³⁺ DFB fibre laser with permanent phase shifted grating [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12):969~970
- 5 M. J. Guy, J. R. Taylor, R. Kashyap. Single-frequency erbium fibre ring laser with intracavity phase-shifted fibre Bragg

grating narrowband filter [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(22): 1924~1925

6 Fan Wei, Chen Bai, Li Xuechun *et al.*. Stress-induced single polarization phase-shifted DFB fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5):568~571

范薇,陈柏,李学春等. 应力所致单偏振相移分布反馈光纤激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5):568~571

7 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):221~224

燕萌,姚敏玉,张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址

编/解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):221~224

8 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Narrow bandwidth add-drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):621~625

董小伟,裴丽,简水生. 光纤布拉格光栅耦合器型窄带上下话路滤波器的数值分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):621~625

9 Yao Qijun. *Optics Tutorial* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 61~65

姚启钧. *光学教程*[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 61~65

10 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294



· 广告 ·



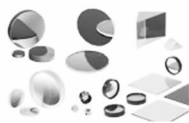
上海瞬渺光电技术有限公司

上海瞬渺光电技术有限公司主要从事国际品牌先进光纤、激光、光电子、光机械、光学仪器和光纤通讯产品的设计、引进、咨询、代理和经销。

主要代理产品有:

» 美国Edmund Optics公司光学产品:

1. 高精度的光学透镜、棱镜;
2. 光学机械装置;
3. 光电子装置;
4. 计算机视觉系统;
5. 高精度的CCD光学元件;
6. 平面、球面镜,光学光圈等。



» 白俄罗斯ELECTROOPTIC公司红外激光观察镜和红外相机:

用于准直红外激光输出光束和调整光学元件的理想工具, 该产品性能指标优于国外其他同类产品。



» 美国Terahertz Technologies Inc公司

专业生产激光测试及光通讯测试仪表, 主要产品C-995速度可调的微处理光学斩波器、LTX-5515 信号收发器、TIA-950 光电转化模块。

» 美国Thorlabs公司

1. 光斑测量仪;
2. F-P扫描干涉仪;
3. CCD摄像仪、光电探测器;
4. 光功率计/能量计;
5. 偏振态测量仪;
6. 半导体激光器及电流源、温控器;
7. 光电探测器;
8. 激光光源和光斩波器;
9. 光学调制架、光学微机械、光学测试元件;
10. 红外显示卡、激光防护眼镜、静电防护装置及其相关组件等。



» 其他代理产品公司:

Crystal Fiber公司, 主要产品:保偏光子晶体光纤;
 MPB公司, 主要产品:拉曼放大器, EDFA, 光纤激光器等;
 Fibercore公司, 主要产品:光纤陀螺领域保偏光纤, 各类掺铒光纤产品;
 Coractive 公司, 主要产品:衰减光纤, 红外光纤, 掺铒光纤, 双包层光纤, 紫外光纤;
 INO公司, 主要产品:双包层光纤, FBG, 光纤激光器, 放大器, PPLN晶体等;
 DenseLight公司, 主要产品:超辐射二极管, 窄带宽激光器, GPON transceiver;
 Superlum Diodes公司, 主要产品:高精度SLD, 波长范围为 650~1620 nm, 有多种封装形式。

地址: 上海市春申路3758弄2号404室(201100)
 电话: 021-64600964/54157625 传真: 021-64600974

Web: www.rayscience.com Email: saleschina@rayscience.cn