

文章编号: 0253-2239(2008)09-1671-04

# 光纤布拉格光栅自致啁啾效应的研究

刘长军 张伟刚 姜 萌 涂勤昌 赵天明

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 根据耦合模理论,采用传输矩阵法分析了相位掩模法制作的光纤布拉格光栅的反射谱特性。设计了一种新的写制光纤光栅的光路,利用高斯激光光束写制出具有短波自致啁啾效应的切趾光栅(栅长 0.015 m)。对具有短波自致啁啾效应的光纤光栅进行了物理切割(剩余光栅的长度分别取 0.007 m 和 0.0055 m),得到了一种新型的具有长波自致啁啾效应的光纤光栅,原本的自致啁啾光栅反射谱中旁瓣分布在短波长方向,而得到的新型自致啁啾光栅的反射谱中长波长方向的旁瓣更为明显。基于对光纤布拉格光栅自致啁啾效应的分析,提出一种新型类高斯切趾函数,以此函数对自致啁啾效应进行数值模拟,得到了与实验结果相一致的光谱图。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 切趾光栅; 自致啁啾; 传输矩阵法

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1671

## Study on Self-Induced Chirping for Fiber Bragg Grating

Liu Changjun Zhang Weigang Jiang Meng Tu Qinchang Zhao Tianming

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Based on coupled mode theory, the reflection properties of the fibre Bragg grating fabricated with phase mask are analysed by transfer matrix method. A new beam path is designed to fabricate fiber gratings and a new short-wavelength self-induced chirping apodized grating with length of 0.015 m is fabricated by Gaussian ultraviolet (UV) beam. Furthermore, a new long-wavelength self-induced chirping grating is obtained by cutting the original fiber grating shorter to 0.007 m and 0.0055 m separately. By contrast with the original grating, the new one has more side lobes on the long-wavelength side of the reflection spectrum and the side-lobes on the short-wavelength side are suppressed. On the basis of analysis of the new self-induced chirping grating, a new type of Gaussian-like apodization function is presented and used to simulate the self-induced chirping of the fiber grating. The theoretical results accord with the experimental results.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; apodized grating; self-induced chirping; transfer matrix method

## 1 引 言

光纤布拉格光栅是一种新型光纤无源器件,具有体积小、重量轻、成本低、易于集成、插入损耗低、抗干扰能力强、结构简单、可重复性强等诸多优点,现已广泛应用于光纤通信和光纤传感领域<sup>[1~3]</sup>。它既可作为窄带滤波器用于波分复用,也可作为高反镜构成光纤激光放大器,同时也可作为传感探头用于各种传感器。

均匀的光纤布拉格光栅的谱形在长波长和短波

长方向都会有非常大的旁瓣,而大的旁瓣会给相邻的信道产生极大的串扰,因此在实际应用中,要发挥光纤光栅的诸多功能就必须制作出性能优良的光纤光栅,而制作性能优良的光纤光栅需采用有效的切趾技术<sup>[4]</sup>,某些光栅经切趾后具有自致啁啾效应<sup>[4,5]</sup>,即在短波长方向仍存在一系列较明显的旁瓣。本文介绍了产生自致啁啾效应的光纤光栅写制实验装置,然后进行理论分析,引入一种新型类高斯切趾函数进行数值模拟,提出了一种物理切割方法,

**收稿日期:** 2007-12-24; **收到修改稿日期:** 2008-01-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(10674075, 60577018)资助课题。

**作者简介:** 刘长军(1981—),男,硕士研究生,主要从事光子技术及光通信等方面的研究。

E-mail: liuchangjun@mail.nankai.edu.cn

**导师简介:** 张伟刚(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

实验验证并解释了有关理论分析。

## 2 实验装置和理论分析

设计了一种相位掩模法<sup>[6]</sup> 写制光纤光栅的光路,用以产生具有自致啁啾效应的光纤光栅。相位掩模法是一种抑制零级衍射光的方法。准分子激光照射相位掩模后,其能量主要集中在±1级,而在近场形成周期的条纹分布,利用近场光强对光敏光纤进行曝光,可以在纤芯中写入光栅,如图1所示。

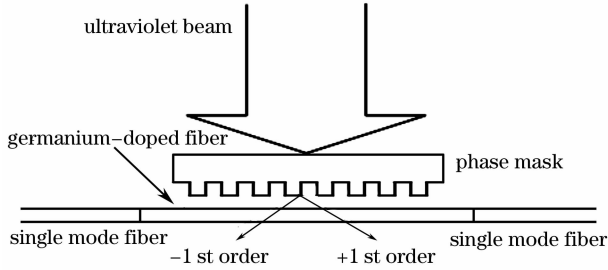


图1 相位掩模法

Fig.1 Phase mask method

对于光纤光栅写制光子线路,通过控制光束的性质(强度、位置等)可以产生光栅自致啁啾效应。若忽略光纤横截面上折射率分布的不均匀性,则光纤光栅纤芯中的折射率分布为

$$n_{\text{eff}}(z) = n_0 + \Delta n(z) = n_0 + \Delta \bar{n} g(z) \times \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda(z)} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $n_0$  为写入光栅之前的纤芯折射率,  $\Delta \bar{n}$  为纤芯折射率平均变化量,  $g(z)$  为切趾函数,  $\Lambda(z)$  为光栅的栅格周期,  $\phi(z)$  为光栅啁啾。对于均匀光纤布拉格光栅,则有  $g(z) = 0$ , 且  $\Lambda(z)$  和  $\phi(z)$  均为常量。

用紫外光在光纤上制作光栅时,所得光栅从理论上可以看作是对光纤的一种微扰。光栅中的光场在忽略包层模耦合时,其前向光场和后向光场可以用如下耦合模方程<sup>[7~10]</sup> 来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dz} &= i\delta R(z) + i\kappa S(z), \\ \frac{dS}{dz} &= -i\delta S(z) - i\kappa^* R(z), \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $R, S$  分别为前向和后向传输模式,  $\delta$  为直流自耦合系数,  $\kappa$  为交流耦合系数。

传输矩阵法<sup>[11,12]</sup> 是分析光纤光栅的重要方法,它将一个非均匀的光栅近似为  $M$  个均匀周期的小光栅的串联。  $M$  不能无限大,一般  $M > 50$  即可得到较为准确的结果。整段光纤光栅的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}^M \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

解耦合模方程和传输矩阵单元可得

$$\begin{aligned} F_{11} &= \cosh(\gamma_B \Delta z) - i(\delta/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z), \\ F_{12} &= -i(\kappa/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z), \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{21} = i(\kappa/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z),$$

$$F_{22} = \cosh(\gamma_B \Delta z) + i(\delta/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z),$$

$$\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}.$$

根据反向传输光纤光栅的边界条件

$$\begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

可解得反射振幅比

$$\rho = S(-L/2)/R(-L/2),$$

进而得到光纤光栅的反射率  $|\rho|^2$ 。

## 3 数值模拟和实验结果

采用传输矩阵法,首先对均匀光纤布拉格光栅进行数值模拟,得到的反射谱存在左右对称的旁瓣,如图2所示;然后,以高斯函数作为切趾函数进行数值模拟,得到的反射谱其旁瓣得到了很好的抑制,如图3所示。

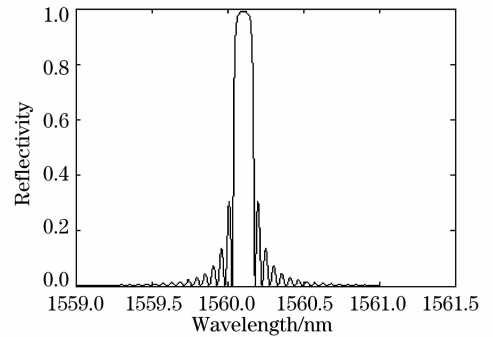


图2 布拉格光栅反射谱

Fig.2 reflection spectrum of fiber Bragg grating

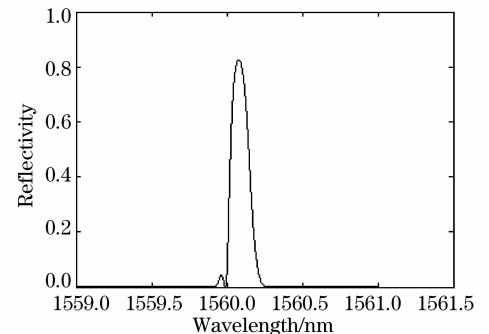


图3 高斯切趾光栅反射谱

Fig.3 reflection spectrum of Gaussian apodized fiber grating

实验中写制的光纤光栅与均匀光纤布拉格光栅和高斯切趾光纤光栅相比,存在明显的不同,如图 4 所示(光栅长度  $L=0.015\text{ m}$ )。由如图 4 可见,光谱长波长方向的旁瓣得到了抑制,而短波长方向的旁瓣则有所保留。

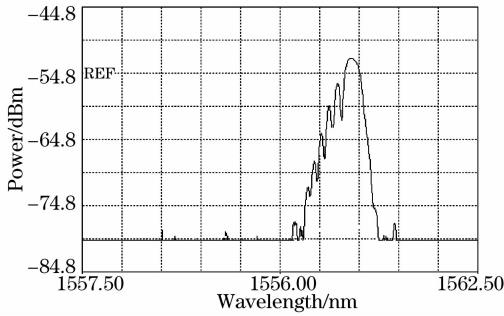


图 4 光纤布喇格光栅自致啁啾效应反射谱  
Fig. 4 Reflection spectrum of a fiber grating for self-induced chirping

经分析可知,产生上述现象的原因是相位掩模法使用的准分子激光器发出的激光经柱透镜后,其光强分布沿光纤轴向由光束的中心到两边逐渐减小,实际上由此写出的光栅是一种切趾光栅。但其并没有经过二次曝光进行补偿,所以用这种方法写出光纤光栅的平均折射率调制深度不是常量,将会引入一个啁啾量,相当于产生了一系列的法布里-珀罗腔(F-P 腔),从而产生自致啁啾效应。

对此种光栅的切趾函数进行了深入研究和拟合,提出了一种新型类高斯分布的切趾函数,其一般形式为可表示为

$$g(z) = f(z) \exp\left[-4\ln 2\left(\frac{z}{bL}\right)^2\right] - f(z) + 1, \quad (5)$$

式中  $bL$  为光栅包络的半峰全宽,  $f(z)$  可为一个函数,也可将其设为常量,且  $0 < f(z) < 1$ 。

采用这种类高斯分布的切趾函数进行模拟分析,当  $f(z) = 0.3$  时得到了与实验结果相符的模拟光谱,如图 5 所示。函数  $f(z)$  越接近 1,则折射率分布与光强分布越接近正比关系。因此,将  $f(z)$  定义为正比相关参量。

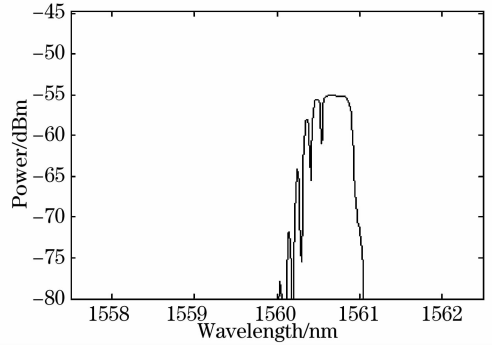


图 5 利用类高斯切趾函数模拟的反射谱  
Fig. 5 Simulated reflection spectrum by using Gaussian-like apodization function

由此可见,实验中得到的折射率分布与光强分布并非正比关系,而是一种接近线性的关系。这说明,折射率调制深度与曝光量是一种接近线性的关系,但不是正比例关系。

为了进一步研究光纤光栅的自致啁啾效应,采用一种物理切割方法,即切短光纤光栅观察其实验反射谱的变化,同时采用传输矩阵法对该过程数值模拟对比分析,如图 6(图中  $l$  为切割后剩余光栅的长度)、图 7 所示。

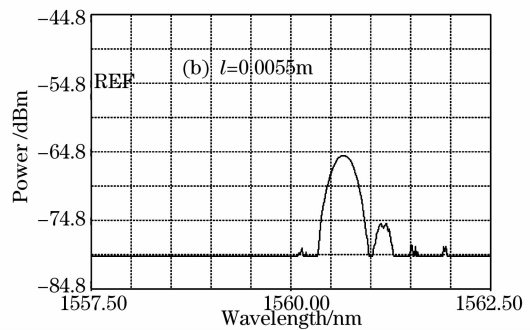
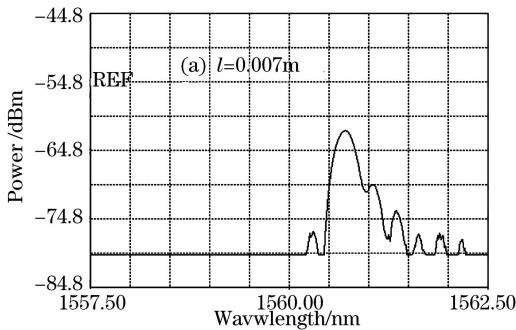


图 6 切短后光纤光栅的实验反射谱

Fig. 6 reflection spectrum after the a fiber grating is cut and becomes shorter

由图 6 可见,缩短光栅长度后,短波长方向的旁瓣逐渐被抑制,而长波长方向的旁瓣则有所保留。这是由于缩短光栅长度也改变了产生自致啁啾效应的若干 F-P 腔的分布,从而引起了旁瓣和主反射峰

相对位置的变化,形成了长波长自致啁啾效应。由图 7 可见,采用(5)式的新类型高斯切趾函数对相位掩模法制作的光纤光栅数值模拟结果与实验光谱图是一致的。这说明提出的类高斯切趾函数在分析、

解释相位掩模法制作的光纤光栅产生的自致啁啾效

应时,是合理的,也是有效的。

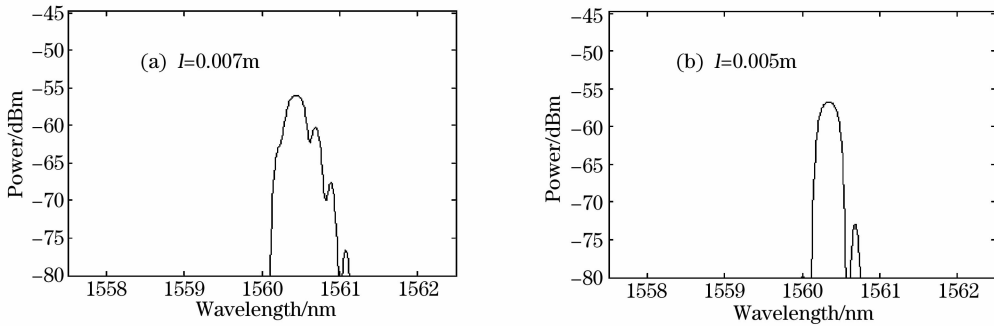


图 7 模拟光栅切短后的反射谱

Fig. 7 Simulated reflection spectrum for a shorter fiber grating

## 4 结 论

利用相位掩模法写制光栅,由于所用准分子激光器发出的激光经柱透镜后,其光强分布是沿光纤轴向由光束的中心到两边逐渐减小,因而得到的一种切趾的光栅。理论分析表明,切趾光栅具有一种新型类高斯函数的折射率分布,且具有明显的短波自啁啾效应。理论分析与实验结果相符。将切趾光栅进行物理切割后,可形成一种具有长波自啁啾效应的光纤光栅,即可有效抑制反射谱中短波长方向的旁瓣,而长波长方向的旁瓣则有所保留。利用这种新的自啁啾效应,可以设计一类特殊功能的新光子器件——具有特定波长旁瓣的光纤光栅,从而有望研制出具有特殊性质的滤波器、色散补偿器以及光纤光栅传感器件等。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang *et al.*. High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1136~1139  
陈建军, 张伟刚, 涂勤昌等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1136~1139
- 2 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical amplification[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 680~683  
饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 680~683
- 3 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 207~211

- 郭 团, 赵启大, 刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 207~211
- 4 Hong Congsheng, Xu Xinhua, Lü Changgui *et al.*. Technologies and new progress of apodized fiber gratings[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(3): 1~6  
洪从胜, 徐新华, 吕昌贵等. 切趾光纤光栅技术及其研究进展[J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(3): 1~6
- 5 Lü Changgui, Xu Xinhua, Cui Yiping. A new fabricating method for apodized fiber Bragg gratings without self-induced chirp and its mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1049~1052  
吕昌贵, 徐新华, 崔一平. 无自致啁啾布拉格光纤光栅的制作方法及其原理[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1049~1052
- 6 K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*. Bragg grating fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~1037
- 7 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **QE-9**(9): 919~933
- 8 Qian Jingren, Wang Xuxu. Coupled-mode theory for spun multi-lobe stress region fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 550~554  
钱景仁, 王许旭. 多叶应力区扭转光纤的耦合模理论[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 550~554
- 9 S. M. Norton, T. Erdogan, G. M. Morris. Coupled-mode theory of resonant-grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(3): 629~639
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 Tang Shucheng. Numerical simulations of the characteristics of the fiber Bragg grating[J]. *Modern Cable Transmission*, 2002, **6**(2): 23~28  
汤树成. 光纤光栅谱特性的数值模拟[J]. *现代有线传输*, 2002, **6**(2): 23~28
- 12 W. Huang, J. Hong. A transfer matrix approach based on local normal modes for coupled waveguides with periodic perturbations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(10): 1367~1375