

文章编号: 0253-2239(2008)09-1675-06

# 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用

鲁韶华<sup>1,2</sup> 许 鸥<sup>1,2</sup> 冯素春<sup>1,2</sup> 董小伟<sup>1,2</sup> 简水生<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; <sup>2</sup> 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 相移光纤光栅作为透射型带通滤波器降低了使用成本和插入损耗,在光通信和传感领域有着较高的应用价值。啁啾相移光纤光栅的透射峰波长和数量由相移点的位置和数量来确定,透射峰特性受相移量的影响。采用分段切趾的方法获得满足光通信要求的滤波特性,利用传输矩阵法分析了切趾前后透射峰特性的变化,结果表明:切趾改善了滤波器的幅度和相位响应,依据滤波器的设计要求选取不同的切趾函数以及切趾比例;切趾还大大减弱了透射峰波长和深度对相移量的敏感度,适当切趾后相移量的影响可以忽略。并提出一种应用双通道啁啾相移光纤光栅滤波器产生脉冲毫米波副载波信号的方案。

**关键词** 光纤光学; 啁啾相移光栅滤波器; 传输矩阵法; 切趾; 毫米波副载波

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1675

## Design and Application of Optical Filters Based on Chirped Phase-Shifted Fiber Gratings

Lu Shaohua<sup>1,2</sup> Xu Ou<sup>1,2</sup> Feng Suchun<sup>1,2</sup> Dong Xiaowei<sup>1,2</sup> Jian Shuisheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China  
<sup>2</sup> Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** As a transmission type filter, phase-shifted fiber grating has the advantage of low cost and low additional loss, and it is a critical component in optical communication and sensor systems. As for chirped phase-shifted fiber gratings, the transmission peak wavelength and number are determined by the position and number of phase shift and the characteristics of the transmission peak are significantly affected by the amount of phase shift. Sectional apodization is used on chirped phase-shifted grating to obtain appropriate filtering properties for optical communication. The transmission peak characteristics are theoretically analyzed by transfer matrix method for chirped phase-shifted gratings with and without apodization. The numerical results show that the amplitude and phase response of the filter are improved and design requirements can be satisfied by proper apodization function and ratio. Meanwhile, the dependence of the transmission peak wavelength and depth on phase shift is diminished greatly and the impact of phase shift can be ignored by proper apodization. A method is proposed to generate millimeter subcarrier optical signal by using a double-channel chirped phase-shifted grating filter.

**Key words** fiber optics; chirped phase-shifted grating filters; transfer matrix method; apodization; millimeter subcarrier

## 1 引 言

光纤光栅因其体积小、成本低、插损小和全光纤结构等优点在光通信和传感领域占有重要地位<sup>[1~5]</sup>。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,导致成本的提高和插入损耗的增加。与之相比,相移光纤光栅能在反射谱的阻带中打开一个或多个透射窗口,实现透射型带通滤波。通过调整折射率调制深度、

**收稿日期**: 2008-03-17; **收到修改稿日期**: 2008-06-19

**基金项目**: 国家自然科学基金(60771008)、国家 863 计划(2007AA01Z258)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0091)资助课题。

**作者简介**: 鲁韶华(1981—),女,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,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、光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

相移量、相移位置以及相移数量可得到不同带宽和滚降特性的透射峰<sup>[6~8]</sup>。这些优良特性,使得相移光栅在带通滤波器、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<sup>[6,8~13]</sup>。与均匀相移光栅不同,啁啾相移光纤光栅由相移点的位置和数量来确定透射峰波长和数量<sup>[14]</sup>,且啁啾光栅具有较宽的带宽,反射谱中可容纳更多的透射峰,更加适于多波长滤波。

为了使啁啾相移光栅满足光通信滤波要求,本文提出一种分段切趾的方法,运用传输矩阵法分析了切趾前后啁啾相移光栅阻带中透射峰特性的变化,发现切趾后滤波器幅度和相位响应得到明显改善,而且透射峰波长和深度对相移量的敏感度大大减小,降低了实际制作的难度。适当选取切趾函数以及切趾比例可获得所需的带宽、滚降系数等通带特性。

## 2 理论分析

啁啾相移光纤光栅的折射率分布如图 1 所示,

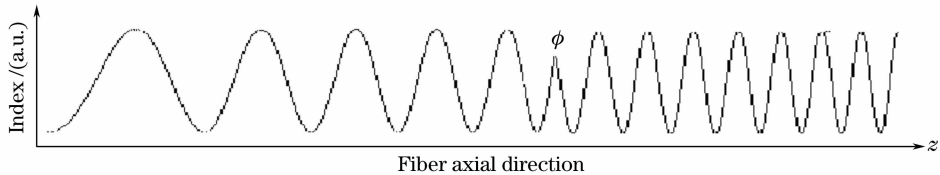


图 1 啁啾相移光纤光栅折射率分布示意图

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

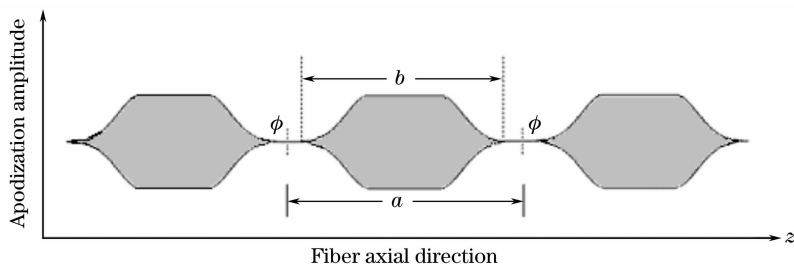


图 2 幅度切趾示意图

Fig. 2 Scheme of amplitude apodization

依据基于耦合模理论的传输矩阵法<sup>[15]</sup>,相移调制的作用可以用矩阵形式表示为

$$\mathbf{F}_\phi = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\phi$  表示相移量的大小,则单相移点啁啾相移光栅传输函数的矩阵表示形式为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_A \cdot \mathbf{F}_\phi \cdot \mathbf{F}_B = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{F}_A$  和  $\mathbf{F}_B$  分别为相移点两侧光栅的传输矩阵

相移是由光栅上某处折射率调制的突变引起的,相移点把啁啾光栅分为两段,相当于两个啁啾光栅的无缝级联。依据文献<sup>[14]</sup>,采用谐振理论解释,可以把折射率的突变看作是两个反射镜,相移的作用则等效为一小段产生多光束干涉的法布里-珀罗(F-P)腔。满足谐振条件的光将通过光栅,在反射谱阻带中打开一个带宽很窄的透射谐振峰。在波分复用(WDM)光通信系统中,滤波器的带宽需要与信号带宽相匹配,带宽过窄的透射峰不能满足此要求,为了改善透射峰的滤波特性,本文提出一种分段切趾的方法,在相移点两侧分别进行幅度切趾,图 2 所示的是两个相移点的情况,可以根据具体的需要确定相移点的个数。定义切趾比例 AR (Apodization ratio) 为切趾函数包含的光栅长度  $b$  与两个相移点之间距离  $a$  之比,即  $AR = b/a$ ,其中切趾函数未包含的光栅区域未曝光、折射率调制为零。通过分段切趾,降低相移点两侧折射率的调制深度,使得透射峰带宽增大。切趾函数和切趾比例依据滤波器的设计要求适当选取。

(切趾或未切趾均可)。则啁啾相移光栅的反射率  $R$  和透射率  $T$  由矩阵  $\mathbf{F}$  求得,如(3)式所示

$$R = |F_{21}/F_{11}|^2, \quad T = 1 - R. \quad (3)$$

## 3 数值计算

在啁啾光栅的某点引入相移且相移量  $\phi = \pi/2$  时,假设由该点光栅周期决定的布拉格反射波长为  $\lambda_B$ ,则在反射谱中波长  $\lambda_B$  位置上出现一个很窄的透射峰<sup>[14]</sup>。

考虑啁啾光栅的参数分别为：有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.4466$ ，折射率调制  $\delta n = 1.2 \times 10^{-4}$ ，啁啾系数  $c = 1/30$  (nm/cm)，光栅长度  $L = 6$  cm。针对一个相移点的情况，假设相移点左右的光栅长度之比分别为

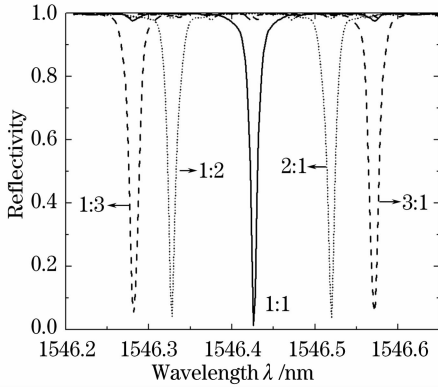


图3 啁啾光栅不同位置引入  $\phi = \pi/2$  相移的反射谱  
Fig. 3 Reflective spectra of chirped gratings with a phase shift  $\phi = \pi/2$  in different locations of the gratings

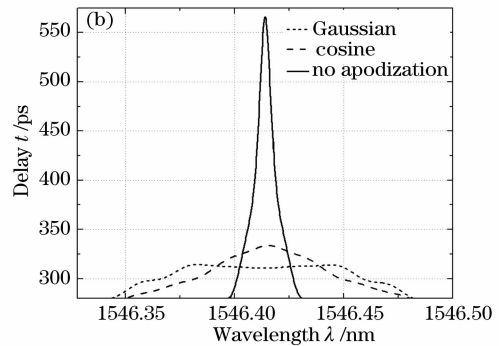
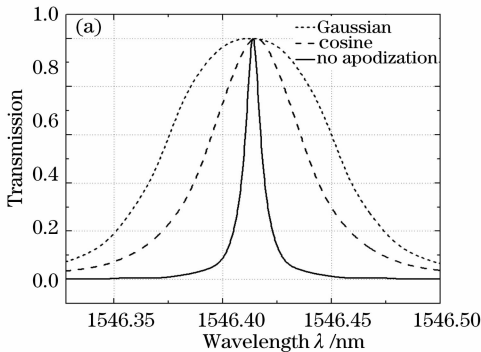


图4 高斯切趾、余弦切趾和未切趾时透射峰的(a)谱线和(b)时延曲线

Fig. 4 Transmission (a) and group delay (b) of the transmission peak for Gaussian and cosine apodization compared with no apodization

对于同一切趾函数，改变切趾比例也可获得不同的滤波特性。采用 0.65 倍的高斯函数分段切趾，切趾比例分别为 1、0.8、0.6，透射谱如图 5 所示。

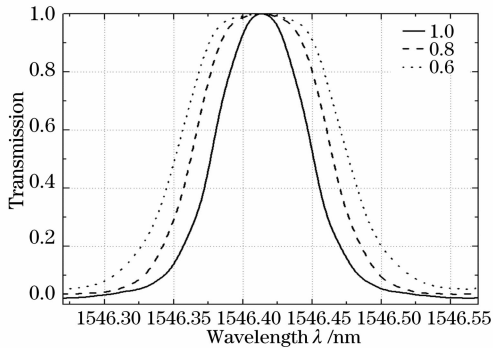


图5 高斯切趾不同切趾比例时的透射峰谱线  
Fig. 5 Transmission spectra of transmission peak for Gaussian apodization with different apodization ratio

1:3, 1:2, 1:1, 2:1 和 3:1, 此时计算得到的光谱特性如图 3 所示, 其透射峰在光栅反射谱中的位置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。这种特性可用于波分复用系统中对多路光信号同时进行滤波, 根据通道波长、间隔以及通道数量结合光栅的啁啾系数选择相移点的位置和数量。

### 3.1 分段切趾对滤波器通带响应的影响

啁啾光栅在采用不同切趾函数进行切趾后其反射谱和时延特性是不同的, 同样, 对于啁啾相移光栅采用不同的分段切趾函数, 其透射谐振峰的特性也有所变化。当相移量为  $\pi/2$  时, 选取余弦函数和 0.6 倍的高斯函数进行切趾, 切趾比例为 1, 与未切趾的情况比较, 其透射谱和时延曲线如图 4(a) 和图 4(b) 所示。切趾后透射峰平坦度提高, 通带内时延曲线平坦化, 且高斯切趾比余弦切趾效果更好。切趾使啁啾相移光栅带通滤波器具有较平坦的幅度响应, 且克服了相位响应的问题。

比较发现, 当切趾比例减小时, 透射峰的滚降特性基本不变, 而带宽增大。由于切趾比例的减小使得相移点两侧未曝光区域增大, 则相移点处布拉格波长  $\lambda_B$  两侧波长的反射率降低, 表现为透射峰带宽增加。可根据滤波器的带宽设计要求结合光栅的啁啾系数, 选择适当的切趾函数以及切趾比例。

### 3.2 分段切趾对相移误差敏感度的影响

3.1 节的分析是相移量为  $\pi/2$  的情况, 当在该啁啾相移光栅中引入的相移量不等于  $\pi/2$  时, 从图 6(a) 数值分析结果可以看出, 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。相移光栅用于透射型带通滤波时, 应具有较低的附加损耗, 这要求阻带中的透射峰

有较高的透射深度。所以在未切趾的情况下,应使相移调制量尽量接近  $\pi/2$ 。而在光栅实际制作过程中,相移量具有很大的随机性,难以控制。采用分段余弦切趾且切趾比例为 1 时,不同相移量下的反射

谱如图 6(b)所示。比较图 6(a)和图 6(b)可知,切趾后,透射波长以及透射深度对相移量的敏感度大大减小,降低了实际制作中对相移量控制的要求。

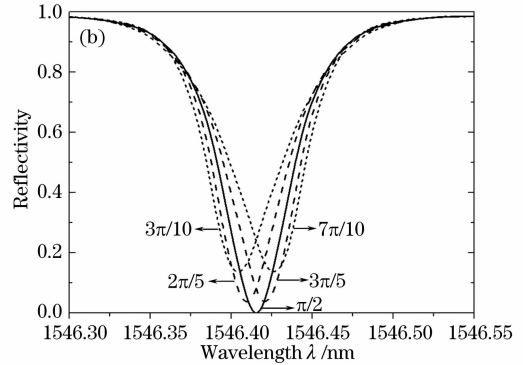
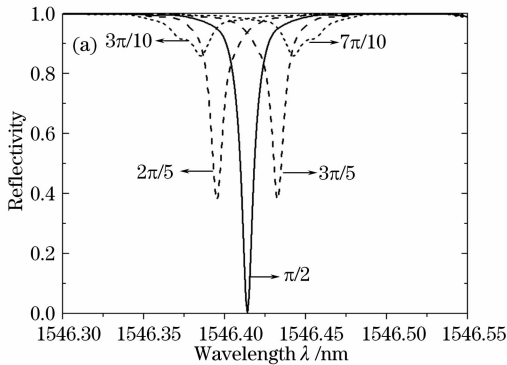


图 6 不同相移量下啁啾相移光栅的反射谱。(a)未切趾,(b)分段余弦切趾

Fig. 6 Reflective spectra of chirped phase-shifted gratings with different phase shift. (a) Without apodization, (b) sectional cosine apodization

相移量对透射峰波长和深度的影响可以归结为光栅相移处 F-P 腔效应的结果<sup>[9]</sup>。光栅切趾技术可以较好地抑制由于折射率突变形成的 F-P 腔效应,分段切趾不仅抑制了啁啾光栅两端 F-P 腔效应产生的旁瓣干扰,而且也抑制了相移点处的 F-P 腔效应,使得透射谐振峰对相移量的敏感程度降低。

用余弦函数和高斯函数切趾,切趾比例为 1,与未切趾的情况比较,透射谐振峰的深度随相移量的变化如图 7(a)所示,谐振峰波长偏移量(与相移量为  $\pi/2$  时的波长相比)随相移量的变化如图 7(b)所示。比较发现,采用高斯切趾后,透射峰波长受相移量的影响可以忽略,透射深度随相移量的变化也不大,滤波器的附加损耗不超过 0.5 dB,满足带通滤波器的要求。

不同切趾函数对 F-P 腔效应的抑制效果不同,使得透射谐振峰对相移量的敏感程度有所不同。采

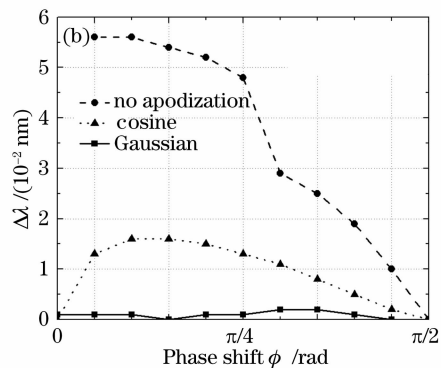
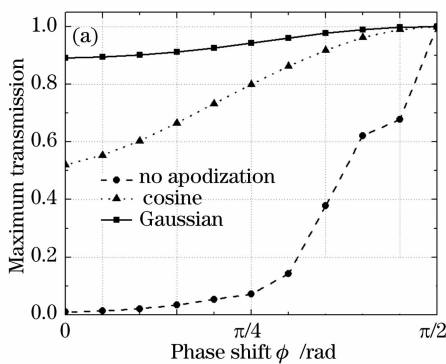


图 7 不同切趾函数下(a)透射峰深度和(b)波长偏移量随相移量的变化

Fig. 7 Maximum transmission (a) and wavelength shift (b) of the transmission peak versus phase shift for gratings with different apodization

若高斯切趾的切趾比例小于 1,相移点两侧折射率调制为零的区域增大,则相移量的影响会更小。图 8 给出了当高斯切趾的切趾比例分别为 0.8 和 1 时的结果比较,本文参数条件下,当采用切趾比例为

0.8 的高斯切趾时,滤波器的附加损耗不超过 0.03 dB,与切趾比例为 1 时的情况相比,性能又大大提高。

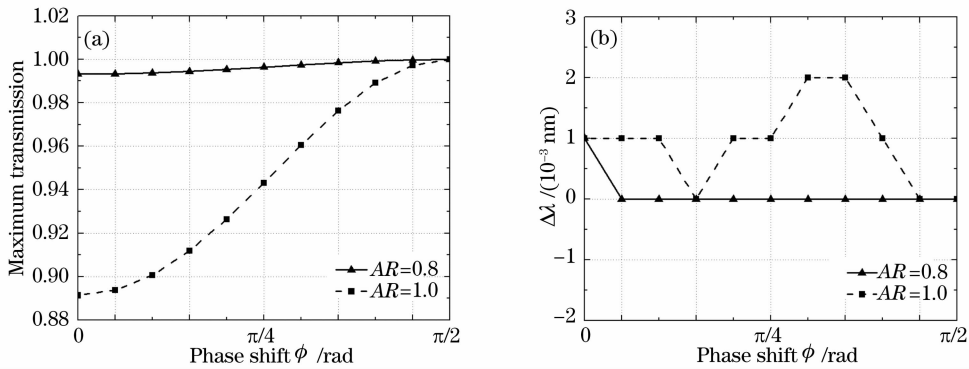


图 8 高斯切趾不同切趾比例下(a)透射峰深度和(b)波长偏移量随相移量的变化

Fig. 8 Maximum transmission (a) and wavelength shift (b) of the transmission peak versus phase shift for Gaussian-apodized gratings with different AR

## 4 应 用

通过在啁啾光栅的不同位置引入多个相移点,可获得所需的滤波器通道数、通道间隔以及中心波长;适当设计分段切趾函数,可调整透射峰的形状和个数,得到平坦的带内相位响应,使得啁啾相移光栅在多通道滤波方面颇具优势。将光纤通信与毫米波技术结合的无线光纤(Radio over fiber, ROF)通信被认为是满足更高速率和更大容量无线通信的最佳解决方案<sup>[16]</sup>。用光波传送毫米波副载波信号是需要解决的关键技术之一,近年来,脉冲的毫米波副载波发生器逐渐吸引了人们的注意。

本文提出一种应用啁啾相移光纤光栅作为多通道滤波器以产生脉冲毫米波副载波信号的方案,全光纤结构,简单易行,可作为毫米波发生器应用于 ROF 通信,其结构示意图如图 9 所示。基本原理如下:光栅 A 是宽带啁啾光纤光栅,光栅 B 具有与光栅 A 相同的反射谱中心波长,带宽略大于光栅 A。光栅 B 有两处相移,两个透射谐振峰之间的波长差由所需的毫米波频率确定,假设其为 60 GHz,则两个透射谐振峰之间的波长差为 0.48 nm。宽带光脉冲经过光栅 A 和 B 滤波后只剩下两个窄带的波长

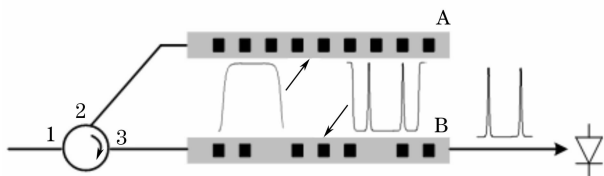


图 9 双通道啁啾相移光栅滤波器产生脉冲毫米波副载波信号结构示意图

Fig. 9 Structural diagram for generation of millimeter subcarrier optical signal using double-channel chirped phase-shifted grating filter

间隔为 0.48 nm 的频率成分,则经过光电转换后输出一个被 60 GHz 波段毫米波调制的光脉冲。实际应用中,为了避免光栅中心波长的温度漂移,可对其进行封装,达到不受温度干扰的目的<sup>[17]</sup>。

## 5 结 论

为了获得满足滤波要求的透射峰特性,提出在啁啾相移光栅相移点两侧分段切趾的方法。数值分析了未切趾、余弦切趾和高斯切趾情况下透射峰的频谱以及时延特性,发现切趾改善了滤波器的幅度和相位响应,且采用同一切趾函数时透射峰带宽受切趾比例影响。同时,切趾降低了透射峰波长和深度对相移量的敏感度,适当切趾后,透射峰波长受相移量的影响可以忽略,降低了制作难度,且滤波器的附加损耗不超过 0.5 dB,满足带通滤波的要求。

提出一种应用啁啾相移光纤光栅作为多通道滤波器以产生脉冲毫米波副载波信号的方案,可作为毫米波发生器应用于 ROF 通信。分段切趾提高了啁啾相移光栅滤波器设计的灵活性以及制作的可行性,将使其在光通信和传感领域发挥更大的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Yage Zhan, Shaolin Xue, Qinyu Yang. Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 135~137
- 2 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Research on bandwidth-modulated and temperature-independent single fiber Bragg grating displacement sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 15~20
- 郭 团,赵启大,刘丽辉等. 带宽调制型单光纤光栅温变无补偿位移传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 15~20
- 3 Li Ruoming, Yu Youlong, Dai Wenjian *et al.*. Active time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor array

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1950~1954  
 李若明,余有龙,代文江等. 光纤光栅传感器阵列有源时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1950~1954
- 4 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber Bragg grating based time phase en-decoder with multiple wavelength channels[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1522~1526  
 朱英勋,王 荣,蒲 涛. 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1522~1526
- 5 Wang Li, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Fabrication of Yb-doped phase-shifted fiber grating laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1617~1620  
 王 利,陈 柏,陈嘉琳等. 一种制作掺 Yb 相移光纤光栅激光器的实验方案[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1617~1620
- 6 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Liu Zhiguo *et al.*. Analyses for characteristics of the phase-shifted fibre grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(3): 177~180  
 赵东晖,扬秀峰,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
- 7 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Effects of grating substructures on the spectral characteristics of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5): 567~572  
 瞿荣辉,丁 浩,赵 浩等. 光栅子结构对光纤光栅特性的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(5): 567~572
- 8 Wang Yan, Ye Zhiqing. Reflective spectral character of a multiple quarter-wave phase-shifts UV-written fiber Bragg grating and its applications[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(7): 679~681  
 王 燕,叶志清. 多个  $a/4$  相移紫外写入光栅的反射谱特性及应用[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(7): 679~681
- 9 Remigius Zengerle, Ottokar Leminger. Phase-shifted Bragg-grating filters with improved transmission characteristics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(12): 2354~2358
- 10 Govind P. Agrawal, Stojan Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 995~997
- 11 Fan Wei, Chen Bo, Li Xuechun *et al.*. Single-frequency Yb<sup>3+</sup> doped fiber ring lasers operated at 1053 nm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(4): 304~306  
 范 薇,陈 柏,李学春等. 1053 nm 掺 Yb<sup>3+</sup> 全光纤单频环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2002, **29**(4): 304~306
- 12 A. Asseh, H. Storoy, J. T. Kringlebotn *et al.*. 10 cm Yb<sup>3+</sup> DFB fibre laser with permanent phase shifted grating [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12): 969~970
- 13 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
- 14 Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(4): 577~581  
 鲁韶华,许 鸥,董小伟等. 啁啾相移光纤光栅反射谱特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 577~581
- 15 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 16 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488  
 方祖捷,叶 青,刘 峰等. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- 17 Li Bin, Fu Yongjun, Wei Huai *et al.*. Long-term stabilization of fiber gratings by high-temperature packaging [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(7): 798~802  
 李 彬,傅永军,魏 淮等. 高温封装实现光纤光栅的长期稳定[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(7): 798~802