

任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现

孙帼丹 王 荣 蒲 涛 魏志虎 王宏博

(解放军理工大学通信工程学院 江苏, 南京 210007)

摘要 采样啁啾光纤光栅理论是实现超高信道数梳状滤波器的理想方案, 但是一个啁啾模板只能实现特定波长间隔的光梳状滤波器。提出一种利用光纤布拉格光栅(FBG)直流相移实现任意波长间隔梳状滤波器方法。该方法只需一个啁啾模板与亚微米精度的位移台, 在灵活性、简单性和制作成本方面有明显优势。仿真和实验表明 FBG 直流折射率调制可以引入任意的相位偏移。利用该方法实现了波长间隔为 100, 50, 40 GHz 的梳状滤波器。最后分析了直流相移光栅长度与相位误差对滤波器边带抑制度的影响。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光梳状滤波器; 直流折射率调制; 相移

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305007

Design and Implementation of Comb Filter with Arbitrary Channel Spacing Based on Fiber Bragg Gratings

Sun Guodan Wang Rong Pu Tao Wei Zhihu Wang Hongbo

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract For a given chirp phase mask, only comb filter with special channel spacing can be fabricated. A novel approach to implement arbitrary channel-spacing comb filters based on direct current (DC) phase shift in fiber Bragg grating (FBG) is proposed. Arbitrary channel-spacing comb filter can be achieved by a single chirped phase mask and a submicrometer-precision translation stage. The proposed method is cost-effective, flexible and simple compared to traditional ways. Simulation and experiment show that arbitrary phase shifts introduced by DC refractive index modulation can be achieved. Multichannel comb filter with channel spacing of 100, 50, 40 GHz are implemented with a same phase mask. The impact of DC phase shift length and phase errors on side band suppression ratio are also analyzed.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; optical comb filter; direct current refractive index modulation; phase shift

OCIS codes 050.5080; 230.7408; 060.3735

1 引 言

随着光通信网络的飞速发展, 对高性能的密集梳状滤波器有迫切的需求, 而多信道光纤布拉格光栅(MCFBG)滤波器因其体积小、插入损耗低、与光纤兼容和波长选择性好等特点而受到人们的普遍重视^[1~4]。人们对其展开了大量的研究, 也提出了许多方法来实现 MCFBG。

在均匀采样光纤布拉格光栅(USFBG)中应用多相位偏移技术可以实现反射谱密集化^[5]。但是该方法由于波长信道间相移的相互影响, 边带抑制比(SBSR)较低, 限制了该方法的应用。虽然相位波动能够通过级联相反相移的光栅加以减小^[6], 但是只能提升 3 dB。Zhou 等^[7]提出周期啁啾光纤布拉格光栅(FBG)实现光梳状滤波器的方法, 但是该方法

收稿日期: 2011-09-14; 收到修改稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61032005)资助课题。

作者简介: 孙帼丹(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤光栅与光任意波发生等方面的研究。

E-mail: chinacard4@163.com

导师简介: 王 荣(1962—), 教授, 博士生导师, 主要从事集成光电子学和光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

需要周期啾啾的相位模板,不具有普遍应用性。线性啾啾采样光纤布拉格光栅(LCSFBG)是实现梳状滤波器最普遍的方法,但是对于一个啾啾模板,只能制作特定信道间隔的梳状滤波器^[8,9]。Wang等^[10]提出当光栅周期与采样周期满足特定关系时,信道间隔可以减少为传统方法的整数倍。该方法由Dai等^[11]进行了进一步发展,通过位移台精确控制位移量引入离散相移,一个啾啾模板可以实现任意信道间隔的滤波器,但该方法需要纳米级精度的位移台,而这种位移台成本高昂且实现复杂度高。

本文提出了利用直流折射率调制引入相移实现梳状滤波器的方法。该方法使用一个啾啾模板与亚微米精度的位移台即可实现任意信道间隔的滤波器。实验制作了具有不同相移量的光栅,表明直流折射率调制可以实现任意相移。利用同一个啾啾模板实现了100,50和40 GHz间隔的梳状滤波器。对比了直流相移方法与传统的离散相移方法,二者能很好的吻合。直流相移方法具有制作成本低、设计灵活、制作精度要求低等优点。

2 原 理

LCSFBG的折射率调制 $\Delta n(z)$ 可以表示为

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{ac}(z) \frac{1}{2} s(z) \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda}\right) + \Delta n_{dc}(z), \quad (1)$$

式中 n_0 为纤芯折射率, $\Delta n_{ac}(z)$ 和 $\Delta n_{dc}(z)$ 为交流(AC)和直流(DC)折射率调制。采样函数 $s(z)$ 可以表示为

$$s(z) = \sum_k f(z - kP) \exp\left(-j \frac{\pi C}{\Lambda_0^2} z^2\right) \times$$

$$\exp\left[-j \sum_{l=1}^{k-1} (2k-1)\alpha\right], \quad (2)$$

$f(z)$ 为每个采样的幅度调制函数, P 为采样周期, $(2k-1)\alpha$ 为第 k 个采样之后引入的相移, Λ_0 为CFBG中心的光栅周期, C 为光栅啾啾。当 C 和 α 满足

$$\frac{CP^2}{\Lambda_0^2} \pi + \alpha = \frac{\pi}{T} \quad (3)$$

时,信道间隔 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{2n\Lambda_0^2}{TP}. \quad (4)$$

式中 T 为正整数。

可以看到,当 $\alpha=0$ 时,LCSFBG即为文献[8]($T=1$)与[10]($T\geq 1$)提出的方法。然而,通过引入 α ,同一啾啾模板可以实现不同信道间隔的滤波器。根据(1)式,如果 $\Delta n_{dc}(z)$ 改变,光在相同长度中所经过的时间变化,相位就会改变。通过直流折射率调制产生相移(直流相移),亚微米级精确的位移台可以替代纳米级精确的位移台实现光梳状滤波器。对于直流相移光栅,直流相移长度在整个光栅中所占的比例会对光栅的反射谱的形状产生显著的影响。随着比例的增大,反射谱中的两个峰会变得不对称。这是因为直流长度越短,光完成一个附加相移所需的长度就越短,该相移就越接近于一个离散相移,反射谱就越和离散相移光栅接近。直流长度比例增大,直流分量不平衡的影响严重,会引起布拉格反射波长附近短波长方向的法布里-珀罗共振效应。研究发现,如果直流相移长度比例超过光栅的10%,光栅反射谱会有明显的不对称^[12]。图1(a)为啾啾光栅中直流与交流折射率的调制分布图。图1(b)为有无直流折射率调制情况下的光栅反射谱。可见,直流相移的引入可以实现光栅梳滤波器。

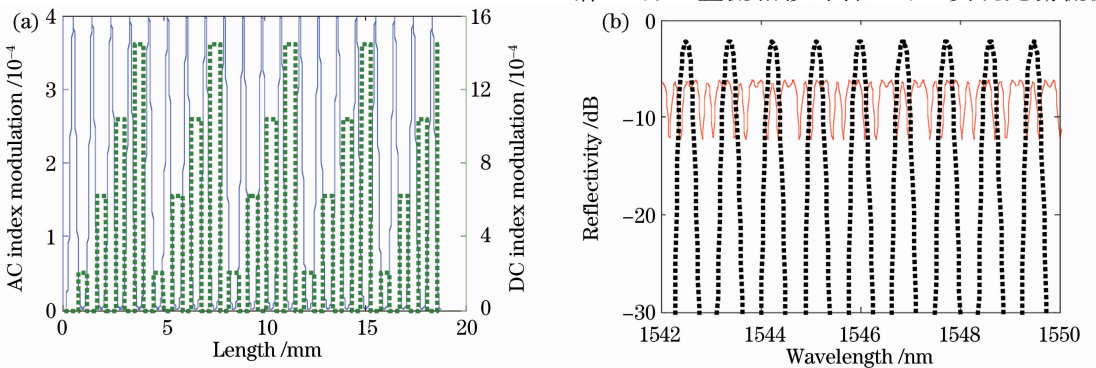


图1 光梳状滤波器仿真结果。(a)直流(点线)与交流(实线)折射率调制分布;(b)有(点线)与无(实线)直流折射率调制的反射谱

Fig. 1 Simulation example of comb filter. (a) DC refractive index modulation (dotted line) and AC refractive index modulation (solid line) distribution; (b) reflectivity with (dotted line) and without (solid line) DC phase shift

仿真参数为： $n = 1.4775$, $\Lambda_0 = 534.16 \text{ nm}$, $C = 2.4 \text{ nm/cm}$, $T = 1$, $P = 1.086 \text{ mm}$, 由(3)式得 $\alpha = 0.25\pi$ 。每个采样的切趾包络为高斯函数形状,其半峰全宽(FWHM)为 0.3 mm 。

3 直流相移光栅的制作

为了实现提出的光梳状滤波器,精确的控制直流相移是非常重要的,因此有必要测定折射率调制量的大小与相关因素的关系。实验使用了紫外光写入的方式,光源为相干公司的 244 nm 倍频氩离子激光器,位移台为 Physik Instrumente 的亚微米精度位移台,使用了掺锗光敏载氢光纤以增加其最大折射率调制强度。由于在光纤载氢过程中的载氢压力与载氢时间对光敏性有很重要的影响,所以实际应用的载氢光敏光纤的光敏性需要通过实际的测量才能得到准确数据。利用最大反射率测算法与反射谱零点带宽测算法来确定光栅折射率的改变^[13~15]。光栅的频谱特性通过光矢量分析仪(OVA)来测量,测量精度可达 1 pm ,图2为实验所测结果。相关参数为:长度为 1 cm 的均匀光栅(载氢光敏光纤),照射功率为 12 mW ,实验温度在 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。照射时间为在 1 cm 长度上匀速扫过所需的时间。Quintela 等^[16]通过二次照射测量光谱波长偏移,得到照射时间相同时光栅直流折射率改变量与交流折射率改变量近似相同的结果。基于图2可以精确控

制光栅的直流相移。本实验具有短时间内非常稳定的工作环境,在测定光栅直流折射率改变量与曝光时间关系后,可以在相同的条件下制作所需的光栅。

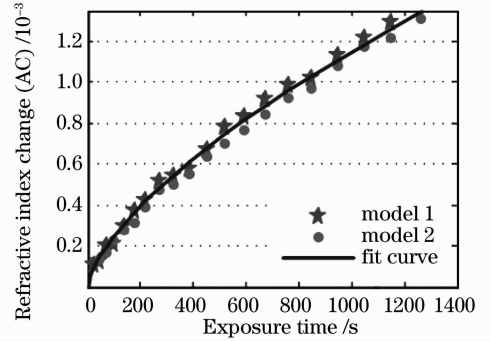


图2 折射率改变量随曝光时间的变化趋势
Fig. 2 Refractive index increment changes with different dose based on experimental data

图3为实测相移光栅的反射谱和相同参数下仿真反射谱的对比,二者能较好地匹配,证明了直流相移的实际可行性。制作时,首先在有模板(均匀相位掩模板的周期为 1070 nm)的情况下用紫外激光扫过,形成一个均匀光栅,而后进行直流相移的写入。制作的光纤光栅的长度为 3 cm ,实现直流相移的光栅长度为 $500 \mu\text{m}$,位于均与光栅的中间位置。实现 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 与 2π 相移增加的直流折射率分别为 3.8700×10^{-4} , 7.7400×10^{-4} , 1.161×10^{-3} 和 1.548×10^{-3} 。

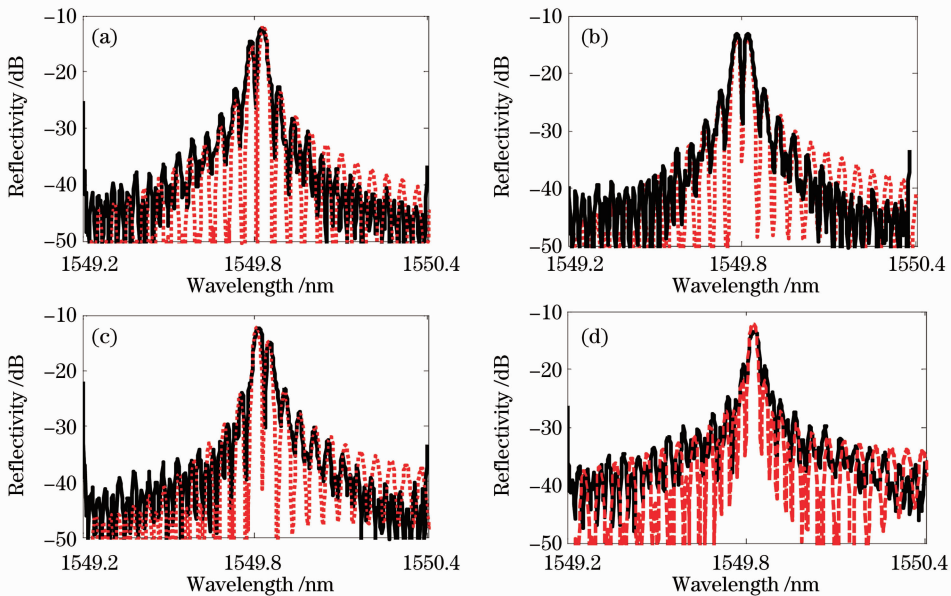


图3 实验(实线)与仿真(虚线)的直流相移光栅的反射谱对比。(a) 0.5π 相移;(b) π 相移;(c) 1.5π 相移;(d) 2π 相移
Fig. 3 Comparison of experiment (solid line) and simulation (dotted line) reflective spectrum with DC phase shifted.
(a) 0.5π phase shift; (b) π phase shift; (c) 1.5π phase shift; (d) 2π phase shift

4 结果与讨论

基于直流相移理论与实验基础,得到不同谱间隔梳状滤波器的反射谱如图 4 所示。光栅参数为: $\Lambda_0=530.65\text{ nm}$, $C=0.6\text{ nm/cm}$ 。每个采样的切趾函数为高斯型,FWHM 为 0.3 mm 。每个采样周期

中直流相移光栅的长度为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。三个光栅的最大直流折射率调制量改变分别为 1.425×10^{-3} , 1.466×10^{-3} 与 1.198×10^{-3} 。三个梳状滤波器在有效带宽内的幅度差分别为 $0.10, 0.23, 0.25\text{ dB}$, 可以看到随着 T 的增大,幅度误差会明显地增加。

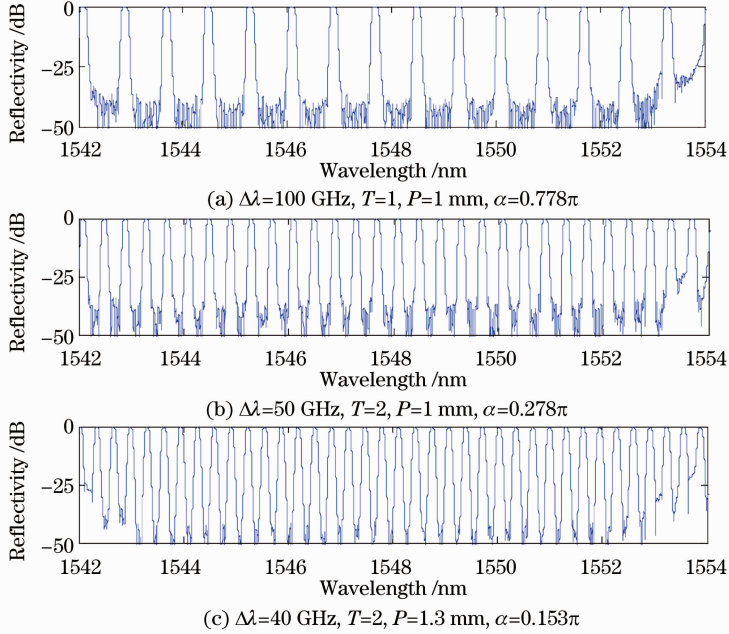


图 4 基于直流相移的光梳状滤波器反射谱($C=0.6\text{ nm/cm}$)

Fig. 4 Reflective spectrum of comb filter with DC phase shift ($C=0.6\text{ nm/cm}$)

4.1 直流相移光栅长度对 SBSR 的影响

图 5 为直接相移与直流相移法光栅反射谱的对比。光栅参数为: $\Lambda_0=530.65\text{ nm}$, $C=0.6\text{ nm/cm}$, $P=1\text{ mm}$, $\alpha=0.778\pi$,采样的切趾函数为高斯型,FWHM 为 0.3 mm 。可以看到,随着直流相移光栅在采样周期中长度的增加,SBSR 下降。当采样周期内直流相移光栅长度为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时,SBSR 为 35 dB ,当采样周期内直流相移光栅长度为 $700\text{ }\mu\text{m}$ 时,SBSR 在 15 dB 左右。这是因为直流相移长度越小就越接近直接相移,直流相移长度越大,信道间相位波动就越大,所以 SBSR 降低。然而,直流相移长度受限于光栅的最大折射率调制改变量。所以,存在直流相移的最大折射率调制量与 SBSR 的折中选择。

4.2 直流相移误差对 SBSR 的影响

实际制作相移光栅时,直流折射率调制改变量很难与理想值保持一致。图 6 为在一定的相移误差内得到的光栅反射谱。光栅参数为: $\Lambda_0=530.65\text{ nm}$, $C=0.6\text{ nm/cm}$, $P=1\text{ mm}$,直流相移光栅长度为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。采样的切趾函数为高斯型,FWHM 为 0.3 mm 。可以看到随着随机相移的范围增大,旁瓣

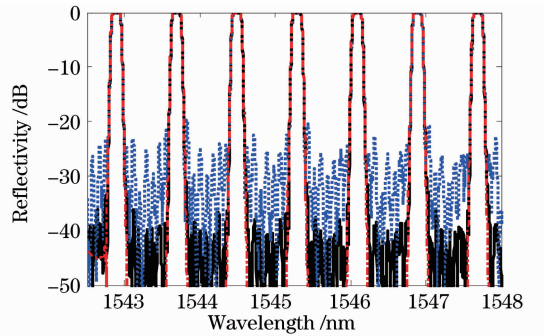


图 5 直流相移与直接相移的仿真比较(点划线-直接相移,实线-采样周期内直流相移光栅长度为 $500\text{ }\mu\text{m}$,点线-采样周期内直流相移光栅长度为 $700\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 5 Comparison of direct phase shift and DC phase shifted method. (dashed line-direct phase shift solid line-DC phase shift with length $500\text{ }\mu\text{m}$, dotted line-DC phase shift with length $700\text{ }\mu\text{m}$)

增加,光谱滤波效果变差,但仍表现出梳状滤波特性。当相位误差在 $\pm 0.1\pi$ 范围内时,SBSR 近似为 25 dB ,当相位误差在 $\pm 0.2\pi$ 范围内时,SBSR 接近 20 dB 。因此,在实际制作中,应尽量精确控制直流折射率改变量,使相位误差控制在 $\pm 0.2\pi$ 以内为好。

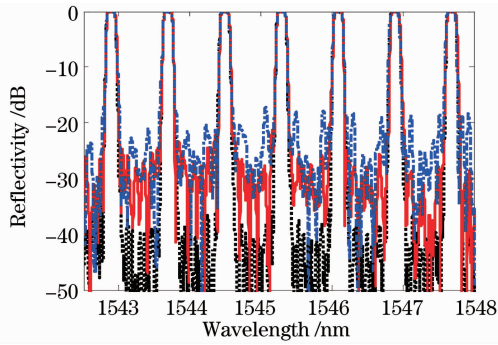


图6 直流相移误差的仿真比较(500 μm 直流相移光栅长度)。(点线-无误差,实线-误差在 $\pm 0.1\pi$ 范围内,点划线-误差在 $\pm 0.2\pi$ 范围内)

Fig. 6 Comparison of DC phase error (dotted line-without error, solid line- $\pm 0.1\pi$, dashed line- $\pm 0.2\pi$)

4.3 直流相移光栅长度与相移误差对 SBSR 的影响

图7为直流相移误差和直流相移光栅长度共同影响下的光栅反射谱,光栅参数与图5和图6相同。可以看到直流相移长度为700 μm ,相移误差在 $\pm 0.1\pi$ 范围内反射谱的 SBSR 与直流相移长度为500 μm ,相移误差在 $\pm 0.2\pi$ 范围内反射谱的 SBSR 相似,均近似为20 dB。因此在制作条件允许的情况下应尽量减少直流相移光栅的长度与直流相移的误差。

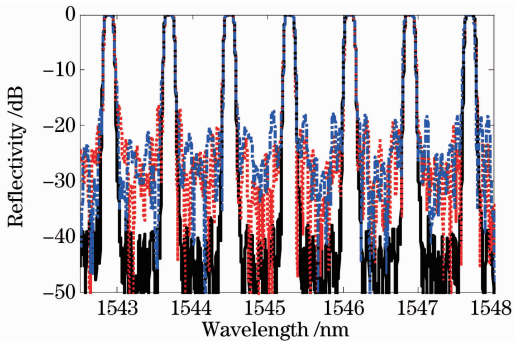


图7 直流相移误差和直流相移光栅长度共同影响下的仿真比较(实线-500 μm ,无误差,点线-700 μm ,误差在 $\pm 0.1\pi$ 范围内,点划线-500 μm ,误差在 $\pm 0.2\pi$ 范围内)

Fig. 7 Comparison under DC phase shifted error and DC phase shift grating length. (solid line-500 μm and without error, dootted line-700 μm and $\pm 0.1\pi$ phase error, dashed line-500 μm and $\pm 0.2\pi$ phase error)

5 结 论

本文提出了基于光栅直流相移的梳状滤波器制

作方法。该方法仅需一个啁啾模板与亚微米量级的位移台即可实现任意波长间隔的梳状滤波器,具有制作成本低、设计灵活、制作精度要求低的优点。实验制作了具有不同相移量的光栅,证明直流折射率调制可以实现任意相移。利用同一个啁啾模板实现了100,50,40 GHz 间隔的梳状滤波器。讨论了直流相移光栅长度和直流相移误差对光栅反射谱 SBSR 的影响,通过减小直流相移光栅长度和减小直流相移误差可以制作高 SBSR 的光纤光栅梳状滤波器。

参 考 文 献

- Hongpu Li, Ming Li, Yunlong Sheng *et al.*. Advances in the design and fabrication of high-channel-count fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2739~2750
- X. M. Liu. Tunable ultranarrow dual-channel filter based on sampled FBGs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1885~1890
- A. V. Buryak, K. Y. Kolossovski, D. Yu. Stepanov. Optimization of refractive index sampling for multichannel fiber Bragg gratings [J]. *J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(1): 91~98
- Liu Zhuolin, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Configuration and development of fiber optical filter [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(3): 540~546
刘卓琳, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤滤波器的原理、结构设计及其进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 540~546
- Yusuke Nasu, Shinji Yamashita. Densification of sampled fiber Bragg gratings using multiple-phase-shift (MPS) technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1808~1817
- Julien Magné, José Azaña, Sophie LaRochelle *et al.*. Simple technique for eliminating the interchannel phase fluctuations in spectral talbot-based periodic comb filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(18): 1958~1960
- X. H. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Periodically chirped sampled fiber Bragg gratings for multichannel comb filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12): 1371~1373
- Xiangfei Chen, Chongcheng Fan, Y. Luo *et al.*. Novel flat multichannel filter based on strongly chirped sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1501~1503
- Xiangfei Chen, Jin Mao, Xuhui Li *et al.*. High-channel-count comb filter with a simple structure [C]. *IEEE Optical Fiber Communication Conferenc*, 2004. 370
- Chinhua Wang, José Azaña, Lawrence R. Chen. Efficient technique for increasing the channel density in multiwavelength sampled fiber Bragg grating filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1867~1869
- Yitang Dai, Xiangfei Chen, Ximing Xu *et al.*. High channel-count comb filter based on chirped sampled fiber Bragg grating and phase shift [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5): 1040~1042
- Wang Hongbo, Pu Tao, Lu Lin *et al.*. Research on achieving arbitrary phase shifts in fiber Bragg grating by changing refractive index of fiber directly [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 32~36
王宏博, 蒲 涛, 卢 麟 等. 直接改变光纤折射率实现任意相移光栅的方法研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 32~36
- Li Jianzhi, Jiang Desheng. Hydrogen loading and photolytic index changes in germanosilicate fiber [J]. *Journal of Inorganic*

- Materials, 2006, **21**(2): 345~350
- 李剑芝, 姜德生. 载氢与掺锗石英光纤的光致折射率改变[J]. 无机材料学报, 2006, **21**(2): 345~350
- 14 P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi *et al.*. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1191~1193
- 15 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Fiber grating filter based on one channel DC-free design of apodized sampling grating filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2071~2076
- 陈鹏, 王荣, 蒲涛等. 基于切趾取样光栅单信道直流平衡技术的光栅滤波器[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2071~2076
- 16 Antonio Quintela, Jose Miguel Lázaro, M. Angeles Quintela *et al.*. Fabrication of FBGs with an arbitrary spectrum[J]. *IEEE Sens. J.*, 2008, **8**(7): 1287~1290

栏目编辑: 谢 婧