

# 改变光栅折射率实现双波长采样光栅的方法

孙帼丹<sup>1</sup> 王 荣<sup>2</sup> 蒲 涛<sup>1</sup> 魏志虎<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)  
(<sup>2</sup>解放军理工大学第 63 研究所, 江苏 南京 210007)

**摘要** 提出了一种新的基于采样光纤布拉格光栅(FBG)的双峰(DW)滤波器实现方法。通过改变采样之间的直流折射率,在 FBG 中引入相移;利用占空比为 1 的余弦函数采样,抑制除 $\pm 1$ 级以外的所有波长通道。该设计制作方法具有波长设计灵活、制作精度要求低与成本低的优点。对均匀直流相移光栅、采样直流相移光栅与传统离散相移光栅进行了比较与实验制作,结果与理论相吻合。实现了波长间隔为 0.08 nm 的 DW 滤波器,证明了该方法的可行性。

**关键词** 光纤光学;光纤布拉格光栅;直流折射率调制;相移;双峰

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0405001

## Dual-Wavelength Sampled Fiber Bragg Grating by Changing Refractive Index of Fiber

Sun Guodan<sup>1</sup> Wang Rong<sup>2</sup> Pu Tao<sup>1</sup> Wei Zhihu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*

<sup>2</sup>*The 63rd Research Institute of the PLA General Staff Headquarters, Nanjing, Jiangsu 210007, China*

**Abstract** A novel dual-wavelength (DW) sampled fiber Bragg grating (FBG) is proposed. Phase shift between two adjacent FBG units is achieved by increasing direct current (DC) refractive index of FBG. The FBG with only identical  $\pm 1$  order reflective spectrum is optimized with cosine sampling function. This method has the advantages of flexible wavelength design, low fabrication precision and low cost. Comparison between uniform DC phase shift FBG, sample DC phase shift FBG and traditional discrete phase shift FBG is made. Uniform DC phase shift FBG and sample DC phase shift FBG are fabricated, which show a good agreement with theory. DW filter with channel spacing 0.08 nm is fabricated, and the experiment results verify the feasibility of this proposed method.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; direct current refractive index modulation; phase shift; dual-wavelength

**OCIS codes** 060.3735; 230.7408; 050.5080

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)具有全光纤结构、低插入损耗、偏振不敏感、易于集成和潜在的低成本等诸多优点,在现代光纤通信系统中占有非常重要的地位<sup>[1~3]</sup>。光纤光栅设计的灵活性使其在波长选择滤

波方面的应用尤为突出,采样光栅可以制作多信道滤波,且信道间隔和波长灵活可控,具有不受模板周期限制、制作精度要求低的优点。但是传统的矩形取样光栅具有多级反射峰特性,并且反射峰包络呈 sinc 函数形状,这导致了各个波长通道反射率的不

**收稿日期**: 2011-11-07; **收到修改稿日期**: 2011-12-16

**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—),男,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

均衡。双峰(DW)滤波器在微波信号产生、密集波分复用、光纤无线通信(ROF)和布里渊光时域反射中都具有非常好的应用前景<sup>[4~11]</sup>,利用采样光栅制作DW滤波器是近年研究的热点。等效相移法虽然可以实现极窄带宽的DW滤波,但是其需要级联另一带通滤波器滤除其他波长分量,增加了系统复杂度<sup>[12,13]</sup>。利用sinc采样函数来制作光栅可以实现反射峰的均衡性,但是这种方法在一个采样周期内需要精确地控制幅度和相位,实现难度高<sup>[14]</sup>。通过改变矩形采样的占空比,可以实现反射率相同的±1级滤波器,但是该滤波器有更高级的反射峰分量,而且各采样之间需要离散的π相移,制作时需要纳米级的位移台或特殊的相移模板<sup>[15,16]</sup>。

本文提出了一种新的基于采样光栅的DW滤波器实现方法。通过改变采样光栅之间的直流(DC)折射率,在光纤光栅中引入相移;利用余弦函数采样,抑制除±1级以外的所有反射峰分量。对均匀直流相移光栅、采样直流相移光栅与传统离散相移光栅进行了实验制作与比较,结果表明,当直流相移光栅长度远小于光栅总长时,直流相移可以替代离散相移。实现了基于直流相移的DW滤波器,证明了该方法的可行性。该设计制作方法具有波长设计灵活、制作精度要求低与成本低的优点。

## 2 原 理

光栅的折射率调制可以表示为

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

式中  $n_0$  为有效折射率,  $\Delta n_{AC}(z)$  和  $\Delta n_{DC}(z)$  分别为交流和直流折射率调制,  $\Lambda$  为光栅周期, 采样光栅的交流折射率调制可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\Delta n_{AC}(z) = \left\{ f(z) * \left[ \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(z - iL_s) g(z) \right] \right\} \times \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda}\right), \quad (2)$$

式中  $f(z)$  为采样函数,  $L_s$  为采样周期长度,  $g(z)$  为光栅切趾函数,  $*$  为卷积运算符。对  $\Delta n_{AC}(z)$  进行傅里叶变换,可以得到光纤布拉格光栅的反射谱为

$$K(\beta) = F(\beta) \left[ G(\beta) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\beta - \beta_0 - n \frac{2\pi}{L_s}\right) \right], \quad (3)$$

式中  $\beta_0 = \pi/\Lambda$ ,  $F(\beta)$  与  $G(\beta)$  为  $f(z)$  与  $g(z)$  的傅里叶变换。如果每个采样之间加入相移  $\alpha$ , 光栅的反射谱为

$$K(\beta) = F(\beta) \left[ G(\beta) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\beta - n \frac{2\pi}{L_s} - \frac{\alpha}{L_s}\right) \right]. \quad (4)$$

当  $\alpha = \pi$  时, 采样光栅的各级反射谱相对布拉格波长对称。图1为采样光栅的采样结构与对应的反射谱示意图。

Liu等<sup>[15,16]</sup>提出当采样函数为矩形, 占空比为2/3, 且每个采样之间加入相移为π时, 光栅的±2, ±5, ±8, …级反射谱的幅度为0。但是该方法光栅反射谱的±3, ±4, ±6, ±7, …级有反射分量, 这对滤波器的DW滤波性能造成影响, 如图2(a)与(c)所示。根据信号处理理论, 当光栅的采样函数为余弦, 占空比为1, 且每个采样之间加入相移为π时, 可以得到真正的DW滤波器, 如图2(b)与(d)所示。这是因为当余弦采样的占空比为1时, 其反射谱带宽为波长间隔的3倍, 而反射谱其他相邻零点的带宽等于波长间隔。通过相移使多波长反射谱对称时, 除±1级外, 其他反射峰正好被反射谱包络抑制。余弦采样函数与其相应的傅里叶变换为

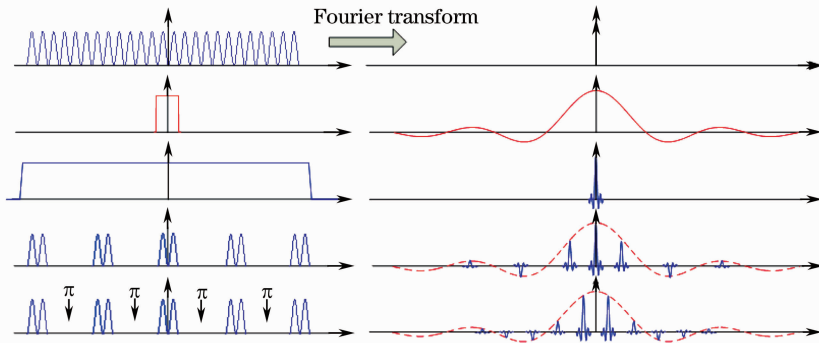


图1 采样光栅的采样结构与对应的反射谱示意图

Fig. 1 Sampled gratings in real space and corresponding spatial Fourier spectra

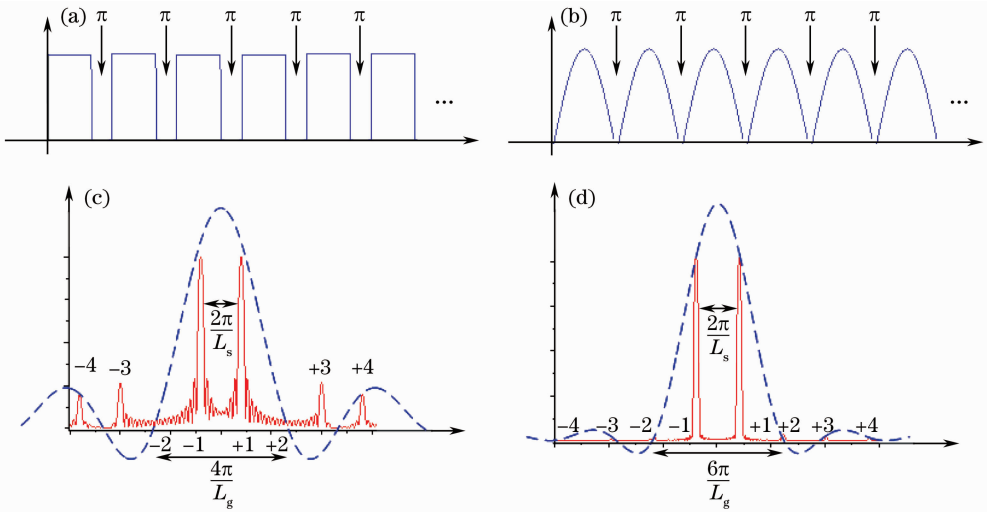


图 2 矩形采样结构(a)与相应反射谱(c);余弦采样结构(b)与相应反射谱(d)

Fig. 2 Rectangular sampled grating (a) and its reflective spectrum (c); cosine sampled grating (b) and its reflective spectrum (d)

$$f_{\cos}(z) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi z}{L_g}\right), & -L_g/2 \leq z \leq L_g/2, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

$$F_{\cos}(\beta) = \cos\left(\frac{\beta L_g}{2}\right) / \left[1 - \left(\frac{2\beta L_g}{\pi}\right)^2\right], \quad (6)$$

式中  $L_g$  为每个采样周期中的采样长度。

下面的问题就是如何加入相移,根据(1)式,如果  $\Delta n_{dc}(z)$  改变,光在相同长度的光纤中传输的时间就会改变,就会引起相移。如果反射光的相移量为  $\Delta\phi_{\text{shift}}$ ,  $\Delta n_{dc}$  的改变量可以表示为

$$\Delta n_{dc} = \frac{\Delta\phi_{\text{shift}}\lambda}{4\pi L_{dc}}. \quad (7)$$

式中  $L_{dc}$  为直流折射率调制长度,  $\lambda$  为光的波长。通过直流折射率调制引入相移(直流相移),只需要亚微米量级精度的位移台就可以实现任意相移。相移的引入有两种情况,一种是在交流折射率调制的基础上进行直流折射率调制(均匀直流光栅),另一种是交流折射率调制与直流折射率调制在光栅的不同区域进行(采样直流光栅),如图 3 所示。下面分别分析这两种情况下直流  $\pi$  相移与离散  $\pi$  相移的区别。

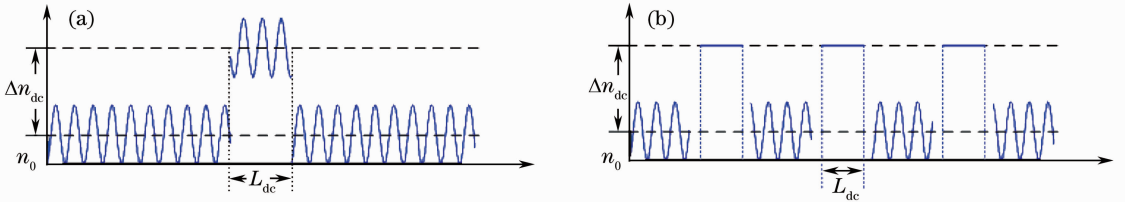


图 3 直流相移光栅原理图。(a)均匀直流相移;(b)采样直流相移

Fig. 3 Principle diagrams of two different DC phases shifted FBG. (a) Uniform DC phase shift; (b) sampled DC phase shift

图 4(a)与(b)为均匀直流相移光栅与传统离散相移光栅反射谱的仿真对比。光栅长度分别为 2 mm 与 30 mm,产生直流相移的长度为 0.5 mm,位于光栅中间位置。对于均匀直流相移光栅,直流相移光栅长度在整个光栅长度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。这是因为直流相移长度比例增大,直流分量不平衡的影响就会严重,从而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,使反射谱的对称性受到一定

程度的影响。直流相移长度比例越小,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。研究发现,如果直流相移长度比例超过 10%,光栅反射谱会有明显的不对称<sup>[18]</sup>。虽然直流长度的比例会使得反射谱的形状改变,但是其对光相位的改变量是不变的,若需要得到对称的反射谱,就要尽量减小直流长度的比例。但是直流长度不能无限的缩短,其受限于制作设备的精度以及光纤光栅的最大折射率调制量。图 4(c)与(d)为采样直流相移光栅与传统离散相移光栅反射谱的对比。

光栅长度分别为2 mm与 60 mm,采样周期为1 mm,采样函数为高斯型,其半峰全宽(FWHM)约为100  $\mu\text{m}$ 。两采样点之间引入  $0, \pi$  交替的直流相移,直流相移的长度为 0.5 mm,位于相邻交流采样的中间位置。对于采样直流光栅,不同的直流相移长度在整个光栅长度所占的比例不会对光栅的反射谱

形状产生显著的影响。这是因为采样直流光栅的交流折射率调制与直流折射率调制分别处于不同区域,直流分量没有引起交流分量切趾的改变。以上仿真分析表明当直流相移光栅长度远小于光栅总长度时,直流相移可以替代离散相移。

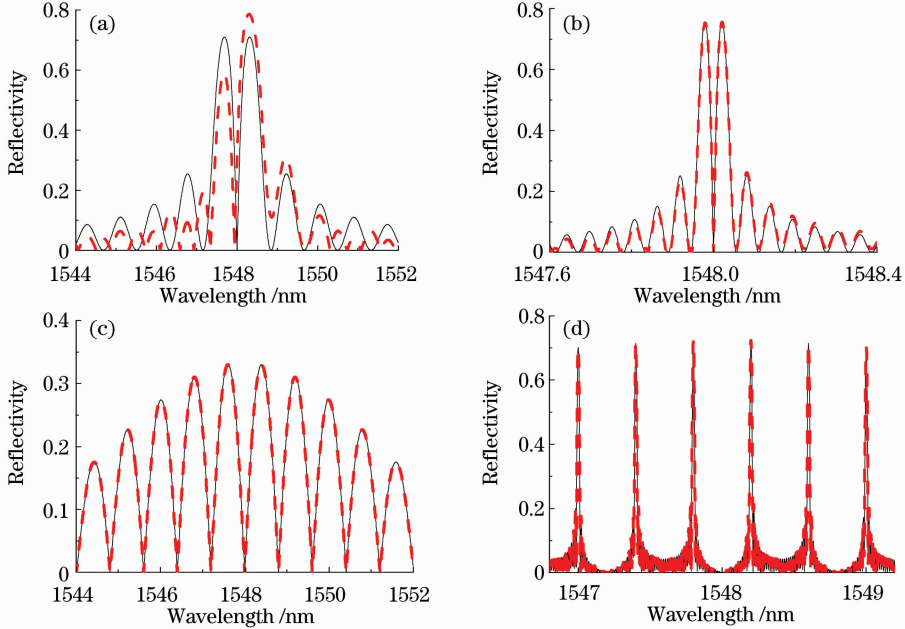


图 4 均匀直流相移光栅(a)  $L=2$  mm, (b)  $L=30$  mm,采样直流相移光栅(c)  $L=2$  mm, (d)  $L=60$  mm 与传统离散相移光栅反射谱对比。实线:离散相移,虚线:直流相移

Fig. 4 Comparison reflective spectra of uniform DC phase shift FBG (a)  $L=2$  mm, (b)  $L=30$  mm, sampled DC phase shift FBG (c)  $L=2$  mm, (d)  $L=60$  mm and discrete phase shift FBG. Solid line; discrete phase shift, dashed line; DC phase shift

### 3 实 验

基于前面的理论分析,制作了均匀直流  $\pi$  相移光栅与采样直流  $\pi$  相移光栅。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 Instrument 的亚微米精度

位移台,使用了掺铈光敏载氢光纤光栅以增加其最大折射率调制强度。制作的均匀直流相移光栅的长度为 30 mm,实现直流相移的长度为 0.5 mm,位于光栅的中间位置。图 5(a)为实做均匀直流相移光栅用 Luna 公司光矢量分析仪所测得的反射谱与其

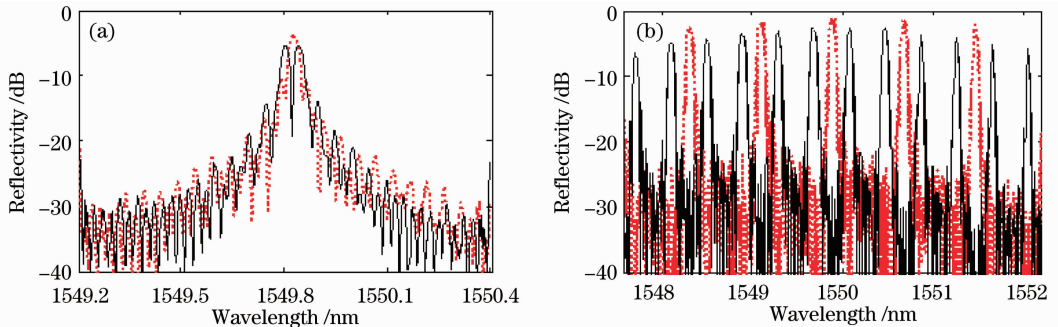


图 5 直流  $\pi$  相移光栅的反射谱。(a)均匀直流;(b)采样直流。实线:相移之后,点线:相移之前

Fig. 5 Reflective spectra of  $\pi$  DC phase shift FBG. (a) Uniform; (b) sampled. Solid line; after DC phase shift, dotted line; before DC phase shift

相移前反射谱的对比。由于 $\pi$ 相移的引入,透射谱分裂为对称的两瓣。制作的采样直流相移光栅的长度为60 mm,采样周期为1 mm,采样函数为高斯型,其FWHM约为0.1 mm(光斑大小)。两采样点之间引入 $0, \pi$ 交替的直流相移,实现直流相移的光栅长度为0.5 mm,位于两采样点的中间位置。图5(b)为实做采样直流相移光栅测得的反射谱与其相移前反射谱的对比。 $0, \pi$ 交替的直流相移使光栅波长间隔减少了1/2,并且 $\pm 1$ 级反射谱对称,这与理论是一致的。在每次制作后,仔细比较相移前后的差别,用来判断曝光时间是过多还是过少,然后改变参数后进行下一次制作。这样经过多次实验后,可以找出产生该 $\pi$ 相移时精确的曝光时间和激

光器功率等参数。

实验证明了直流相移光栅替代离散相移光栅的可行性,接下来利用实验所得曝光时间和激光器功率等参数制作了基于直流相移的DW滤波器。图6(a)与(b)为波长间隔0.08 nm的DW滤波器的反射谱、群时延与透射谱,其光栅参数为:采样周期 $P=10.35$  mm,每个采样周期中采用占空比为1的余弦函数,无切趾,采样点数为8,光栅长度为8.28 cm。图6表明该方法实现的滤波器 $\pm 1$ 级反射特性近似相同,其他级的反射峰被很好地抑制,实验结果与理论分析很好地吻合。该方法不需要复杂的相移模板、在制作过程中所需控制精度较低(亚微米级)、波长设计灵活,具有实际应用价值。

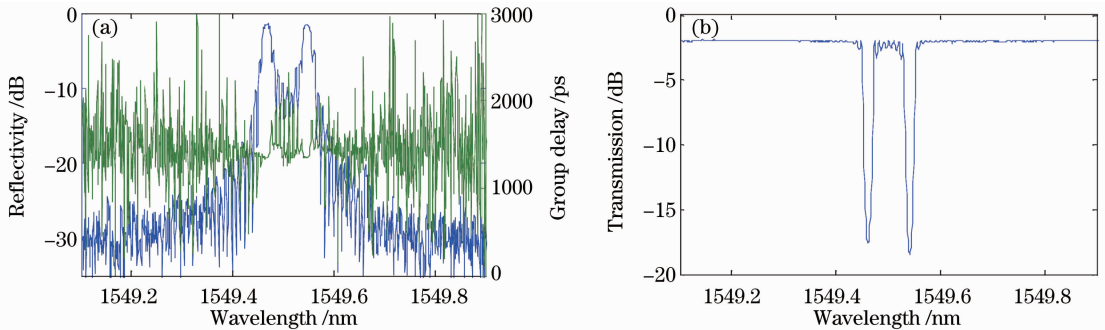


图6 制作的0.08 nm波长间隔的双波长滤波器的特性。(a)反射谱、群时延;(b)透射谱

Fig. 6 Characteristics of fabricated dual-wavelength FBG with 0.08 nm channel spacing. (a) Reflection and group delay (b) transmission

## 4 结 论

提出了一种新的基于采样光栅的双峰滤波器实现方法,通过改变光栅采样之间的直流折射率,在光纤光栅中引入相移;利用占空比为1的余弦函数采样,抑制除 $\pm 1$ 级以外的所有波长通道。对均匀直流相移光栅、采样直流相移光栅与传统离散相移光栅进行了比较与实验制作。结果表明,当直流相移光栅长度远小于光栅总长度时,直流相移可以替代离散相移。实现了基于直流相移的DW滤波器,滤波器的 $\pm 1$ 级反射特性近似相同,其他级的反射峰被很好地抑制,证明了该方法的可行性。该设计制作方法具有波长设计灵活、制作精度要求低与成本低的优点。

## 参 考 文 献

- 1 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 2 Liu Zhuolin, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Configuration and development of fiber optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 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

- 3 M. Attygalle, C. Lim, G. J. Pendock *et al.*. Transmission improvement in fiber wireless links using fiber Bragg gratings[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 190~192
- 4 Alejandro Carballar, Miguel A. Muriel, José Azaña. Fiber grating filter for WDM system: an improved design[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 694~696
- 5 Sebastien Blais, Jian Yao. Optical single sideband modulation using an ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2230~2232
- 6 Tian Li, Zhang Ailing. Dual wavelength filtering properties of phase-shifted fiber Bragg grating and sampled fiber bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2896~2900
- 田 力, 张爱玲. 相移光栅及取样光栅的双峰滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2896~2900
- 7 Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zhengrong *et al.*. Dual-wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402010
- 杨秀峰, 魏芳芳, 童峥嵘 等. 基于高精度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402010
- 8 Zhang Yongzhi, Wang Rong, Xu Zhiyong. Designing and realization of spontaneous Brillouin scattering detecting system based on super structure fiber Bragg grating[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **11**(3): 238~242
- 张永智, 王 荣, 徐智勇. 基于超结构光纤光栅的自发布里渊散

- 射检测系统设计与实现[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, **11**(3): 238~242
- 9 Shilpa Pradhan, Graham E. Town, Ken J. Grant. Dual-wavelength DBR fiber laser[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(16): 1741~1743
- 10 Yunqi Liu, Kin Seng Chiang, Pak Lim Chu. Multiplexing of temperature-compensated fiber-Bragg-grating magnetostrictive Sensors with a dual-wavelength pulse laser[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 572~574
- 11 J. Capmany, B. Ortega, A. Martinez *et al.*. Multiwavelength single sideband modulation for WDM radio-over-fiber systems using a fiber grating array tandem device[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 471~473
- 12 Yu Yao, Xiangfei Chen, Yitang Dai *et al.*. Dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a simple linear cavity and its application in microwave generation[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 187~189
- 13 Jie Sun, Yitang Dai, Xiangfei Chen *et al.*. Stable dual-wavelength DFB fiber laser with separate resonant cavities and its application in tunable microwave generation [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2587~2589
- 14 M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 842~844
- 15 X. M. Liu. Tunable ultranarrow dual-channel filter based on sampled FBGs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1885~1890
- 16 Xueming Liu, Yongkang Gong, Leiran Wang *et al.*. Identical dual-wavelength fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2706~2710
- 17 Xiaoying He, Yonglin Yu, Dexiu Huang *et al.*. Analysis and applications of reflection-spectrum envelopes for sampled gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(6): 720~728
- 18 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): 0606005
- 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): 0606005

栏目编辑: 谢 婧