

# 基于高双折射光子晶体光纤的 Sagnac 环级联滤波器

吉正继 武向农 殷业 张静 郭维 郑振东

上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234

**摘要** 为了获得对温度变化不敏感和信道隔离度好的光滤波器,提出了一种基于高双折射光子晶体光纤的 Sagnac 环级联滤波器。运用 Jones 矩阵理论对二阶级联 Sagnac 环滤波器进行了理论分析和数值仿真,可得级联滤波器中两段高双折射光子晶体光纤长度之比为 2:1 时,透射谱的半峰全宽为 0.4 nm,仅为单个 Sagnac 环滤波器的 1/3,有效提高了滤波器的信道隔离度。结果表明,该级联滤波器有着良好的滤波效果,且对温度变化不敏感,可应用于 50 GHz 的密集波分复用系统。

**关键词** 光纤光学;级联滤波器;琼斯矩阵;高双折射光子晶体光纤;Sagnac 环

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.040603

## Sagnac Loop Cascaded Filter Based on Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber

Ji Zhengji Wu Xiangnong Yin Ye Zhang Jing Guo Wei Zheng Zhendong

College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University,  
Shanghai 200234, China

**Abstract** In order to acquire temperature-insensitive optical filter which also has good channel isolation, a novel Sagnac loop cascaded filter based on highly birefringent photonic crystal fiber (HiBi-PCF) is proposed. Theoretical analysis and numerical simulation are conducted to the two-order cascaded Sagnac loop filter with Jones matrix theory. When the length ratio of the two segments of HiBi-PCFs in cascaded filter is 2:1, the full-width at half-maximum (FWHM) of transmission spectrum is 0.4 nm, which is only 1/3 of that of the single Sagnac loop filter, so as to effectively improve the filter channel isolation degree. The results show that this kind of filter possesses a good filtering effect and is also insensitive to the temperature change, which can be applied to 50 GHz dense wavelength division multiplexing (DWDM) system.

**Key words** fiber optics; cascaded filter; Jones matrix; highly birefringent photonic crystal fiber; Sagnac loop

**OCIS codes** 060.2310; 060.5295; 230.5298; 230.7408

## 1 引言

随着信息技术传输速度日益加快,光纤通信在高速、大容量、高带宽信息传输方面展现出巨大的优势和潜力,得到广泛的重视和应用。在光纤通信领域,波分复用(WDM)和密集波分复用(DWDM)技术充分利用了光纤的带宽资源,

极大地提高了通信系统的容量,满足了人们对高速大容量通信的需求<sup>[1]</sup>。在 DWDM 系统中,用于对系统不同通道进行调谐和滤波的梳状滤波器成为当前研究的重点。其中,基于 Sagnac 环的梳状滤波器具有结构简单、插入损耗低、通带间隔易于调谐等特点,受到人们的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。国内对于 Sagnac 环结构滤波器的研究主要有:采用对称光纤光栅的 Sagnac 环滤波器,实现了通带间隔相等、工作带宽大的光滤波器<sup>[5]</sup>;基

收稿日期: 2013-11-05; 收到修改稿日期: 2013-12-04; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61101209)、上海市自然科学基金(11ZR1426600, 13ZR1430400)、上海市教委科研创新项目(14YZ070)、上海师范大学一般科研项目(SK201223)

作者简介: 吉正继(1988—),男,硕士研究生,主要从事微波光子滤波器、光纤环结构等方面的研究。

E-mail: jizhengji@163.com

导师简介: 武向农(1970—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、光载无线等方面的研究。

E-mail: xnwu@shnu.edu.cn(通信联系人)

于 Sagnac 干涉仪的级联型梳状滤波器,实现了滤波器中心波长的调谐<sup>[6]</sup>。为了减小滤波器的通带带宽,提高滤波器的信道隔离度,一种由多个 Sagnac 环级联构成的滤波器被提出<sup>[7]</sup>,当 Sagnac 环级联个数分为 2、3、10 时,级联滤波器透射谱的半峰全宽(FWHM)较单环滤波器分别减小了 23%、38%、64%。然而,3 个以上 Sagnac 环级联实际实现起来很困难。

光子晶体光纤(PCF)是近几年提出的一种新型光纤,它的横截面上有较复杂的折射率分布,通常含有不同排列形式的气孔,这些气孔的尺度与光波波长大致在同一数量级且贯穿器件的整个长度,光波可以被限制在光纤芯区传播,排列不对称的气孔还可以产生很高的双折射效应,其双折射率可以达到  $10^{-3}$  级别,较传统的高双折射光纤(HBF)提高了一个数量级<sup>[8]</sup>。同时,传统保偏光纤中不同材料成分有着不同的热膨胀系数,会引起传播光波的偏振随温度改变而发生变化,导致传统 HBF Sagnac 环滤波器的性能对温度变化较为敏感。而光子晶体光纤不同于传统保偏光纤,它由一种材料制成,所以其双折射率对于温度变化非常不敏感,利用 PCF 可以实现对温度变化不敏感的 Sagnac 环滤波器。

本文提出了一种基于高双折射光子晶体光纤(HiBi-PCF)的 Sagnac 环级联滤波器。运用 Jones 矩阵对该级联滤波器进行了理论研究,分析比较不同 HiBi-PCF 参数下滤波器的滤波效果,实现了信道隔离度高、对温度变化不敏感且有着良好滤波效果的光滤波器。所设计滤波器可制作为多波长激光器,用于输出 DWDM 系统中的频道复用信号。

## 2 原理与理论分析

所提出的级联滤波器中的 PCF 采用一种通用设计<sup>[9]</sup>。PCF 中内部的气孔按六格方点排列,图 1 为 PCF 的横截面图,图中  $d$  为气孔的直径,  $\Lambda$  为水平方向气孔间距,  $\sqrt{3}\Lambda$  为垂直方向气孔间距。PCF 纤芯两侧的气孔中填充着低折射率材料,这样气孔的折射率就比纯二氧化硅低,PCF 的对称性被破坏,从而在两个正交极化模式之间产生了有效的折射率差,达到了增强 PCF 双折射率的目的。这样,该 PCF 利用不对称结构,被设计为高双折射率,所以可称为 HiBi-PCF。HiBi-PCF 的双折射率由气孔中所掺杂材料的折射率决定。

基于 HiBi-PCF 的 Sagnac 环级联滤波器由 3dB 耦合器、偏振控制器(PC)、HiBi-PCF 以及隔离器组成,其原理图如图 2 所示。光场矢量  $E_1$  从端口 1 进入第一个 Sagnac 环的耦合器中,经耦合器耦合后从端口 3 和端口 4 输出的相干光场在环内分别沿逆时针和顺时针方向向前传输再次到达耦合器。光场经耦合器耦合后,从端口 5 输出透射光,透射光经过隔离器到达端口 6,从而入射到第二个 Sagnac 环中。光场在第二个 Sagnac 环中的传输过程与第一个 Sagnac 环相同,最后从端口 2 透射输出光场  $E_2$ 。

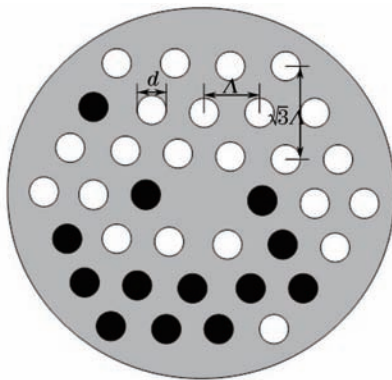


图 1 PCF 横截面图

Fig.1 Cross section of PCF

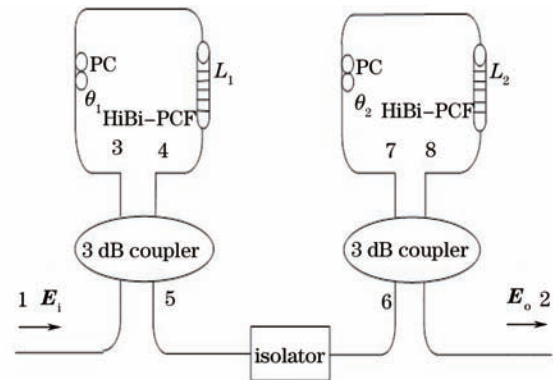


图 2 HiBi-PCF 级联滤波器原理图

Fig.2 Schematic of HiBi-PCF cascaded filter

图 2 中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为偏振光通过滤波器中偏振控制器后旋转的角度,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为两段 HiBi-PCF 的长度。

由 Jones 矩阵理论<sup>[10]</sup>可得, PC、耦合器以及 HiBi-PCF 的 Jones 矩阵分别为  $R(\theta)$ 、 $J_c$ 、 $J_p$  :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$J_c = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$J_p = \begin{bmatrix} e^{-j\phi} & 0 \\ 0 & e^{j\phi} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

经矩阵推导,可得单个 HiBi-PCF Sagnac 环滤波器的透射率  $T$  为<sup>[10]</sup>

$$T = E_o/E_i = (1 - 2k)^2 + 4k(1 - k)\sin^2\theta \cos^2\phi, \quad (4)$$

式中  $\theta$  为偏振光通过偏振控制器后旋转的角度;  $\phi$  为偏振光在 HiBi-PCF 快慢轴上传输时产生的相位差,且  $\phi = \pi BL/\lambda$ ,  $B = |n_f - n_s|$  为 HiBi-PCF 快慢轴之间的等效折射率差,  $L$  为 HiBi-PCF 的长度;  $k$  为耦合器的耦合率,3 dB 耦合时  $k = 0.5$ ,则(4)式可以化简为

$$T = E_o/E_i = \sin^2\theta \cos^2\phi. \quad (5)$$

由(5)式可得,在此级联滤波器中,第一级 Sagnac 环的透射率  $T_1$  为

$$T_1 = \sin^2\theta_1 \cos^2\phi_1, \quad (6)$$

第二级 Sagnac 环的透射率  $T_2$  为

$$T_2 = \sin^2\theta_2 \cos^2\phi_2, \quad (7)$$

则该级联滤波器的透射率  $T$  为

$$T = T_1 T_2 = \sin^2\theta_1 \cos^2\phi_1 \sin^2\theta_2 \cos^2\phi_2, \quad (8)$$

$\phi_1$ 、 $\phi_2$  为偏振光分别在两段 HiBi-PCF 快慢轴上传输时产生的相位差。

### 3 数值仿真与讨论

所设计的 HiBi-PCF 级联 Sagnac 环滤波器中,两段 HiBi-PCF 的结构参数设置为  $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$ ,  $d = 1.4 \mu\text{m}$ 。为了获得高的双折射率,改变 HiBi-PCF 气孔中掺杂材料的折射系数,使得两段 HiBi-PCF 的折射率差都为  $\Delta n = 0.004$ 。偏振控制器的偏转角设置为  $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ ,调节级联滤波器两个 Sagnac 环中 HiBi-PCF 的长度,在 5 种不同 HiBi-PCF 参数下分析比较该滤波器的透射谱:(a) 单环  $L = 0.25 \text{ m}$ ; (b) 级联  $L_1 = L_2 = 0.25 \text{ m}$ ; (c) 级联  $L_1 = 0.25 \text{ m}, L_2 = 0.5 \text{ m}$ ; (d) 级联  $L_1 = 0.25 \text{ m}, L_2 = 1 \text{ m}$ ; (e) 级联  $L_1 = 0.25 \text{ m}, L_2 = 2 \text{ m}$ 。

运用 Matlab 对滤波器透射光谱进行数值仿真,可得 5 种 HiBi-PCF 参数下滤波器的透射谱,如图 3 和图 4 所示。图 3 中,单环结构的 HiBi-PCF 滤波器透射谱的 FWHM 为 1.2 nm。而级联两个 Sagnac 环,可使得滤波器透射谱的 FWHM 减小。且级联滤波器中两段 HiBi-PCF 长度之比为 2:1 时透射谱的 FWHM 比两段 HiBi-PCF 长度相等时的更小,为 0.4 nm,仅为单环结构滤波器的 1/3。在图 4 中,当级联滤波器中两段 HiBi-PCF 长度分为  $L_1 = 2L_2$ 、 $L_1 = 3L_2$ 、 $L_1 = 4L_2$  时,滤波器透射谱的 FWHM 越来越小。可见,增大级联滤波器中两段 HiBi-PCF 的长度比,可减小滤波器透射谱的 FWHM,提高滤波器的信道隔离度。但是,由于级联时两个 Sagnac 环间存在相位差,且随着 HiBi-PCF 长度比的增加,相位差变大,使得滤波器透射谱边模的幅度越来越大。图中三种参数下的滤波器透射谱的边模幅度分约为 0.05、0.25、0.45。所以 HiBi-PCF 长度比的增加会引起滤波器透射谱边模抑制比的急剧减小,影响滤波器的滤波效果。

综合图 3 和图 4 可得,两段 HiBi-PCF 长度成两倍关系时级联滤波器的滤波性能是最好的。此参数条件

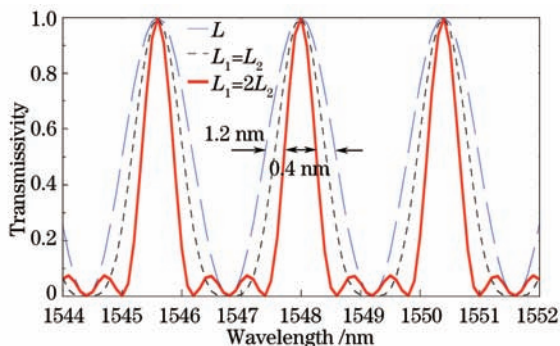


图3 滤波器透射谱,单环  $L$ ,级联  $L_1=L_2$ ,级联  $L_1=2L_2$   
Fig.3 Transmission spectra of the filter, single loop  $L$ ,  
cascaded  $L_1=L_2$ , cascaded  $L_1=2L_2$

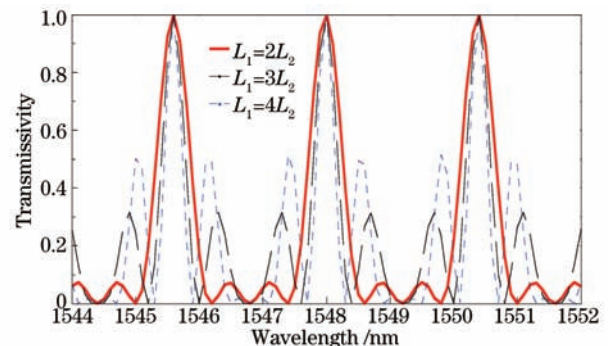


图4 滤波器透射谱,级联  $L_1=2L_2$ ,级联  $L_1=3L_2$ ,级联  $L_1=4L_2$   
Fig.4 Transmission spectra of the filter, cascaded  $L_1=2L_2$ ,  
cascaded  $L_1=3L_2$ , cascaded  $L_1=4L_2$

下的级联滤波器,在保持良好边模抑制比的同时,还具有很好的波长选择性和信道隔离度。

此外,对于传统 HBF Sagnac 环滤波器,温度变化时会引起滤波器透射光谱发生相移<sup>[11]</sup>,导致滤波效果恶化。为比较 HiBi-PCF 和传统 HBF 级联滤波器对温度变化的敏感特性,我们设置滤波器组成部件参数相同,比较两种双折射光纤在温度变化时对透射光谱的影响。图 5 为 HiBi-PCF 和 HBF 级联滤波器透射谱中心波长随双折射光纤温度的变化图。图 5 中,在双折射光纤温度发生变化时,传统 HBF 级联滤波器的透射谱受影响较大,透射谱中心波长发生了较大的偏移,此级联滤波器对温度变化较为敏感。而对于 HiBi-PCF 级联滤波器,当 HiBi-PCF 温度发生变化时,滤波器透射谱中心波长偏移非常小,其对温度变化很不敏感。所以,HiBi-PCF 级联滤波器较传统 HBF 滤波器对温度变化不敏感,性能更加稳定。

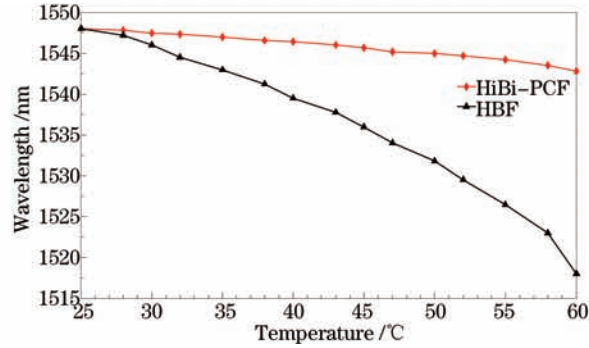


图 5 HiBi-PCF 和 HBF 级联滤波器透射谱中心波长随温度的变化图

Fig.5 Transmission central wavelength of HiBi-PCF and HBF cascaded filters versus temperature

最后,对于基于 HiBi-PCF 的级联滤波器,在两段 HiBi-PCF 长度成两倍关系的情况下,按照之前的参数设置( $L_1=0.25$  m,  $L_2=0.5$  m),得到 HiBi-PCF 级联滤波器在单个频道周期内的透射谱如图 6 所示。该滤波器透射谱虽然具有边模,但边模在  $-20$  dB 以下,边模抑制比达到 35 dB。按照国际电信联盟(ITU)传输标准,在一个 WDM 系统中,任一个低于  $-20$  dB 水平的信号都可以看作噪声,所以该滤波器满足 WDM 系统的性能要求<sup>[12]</sup>。同时滤波器透射谱的 FWHM 为 0.4 nm,正好是 50 GHz DWDM 系统的一个频道,可制作多波长激光器,用于实现 50 GHz DWDM 系统中频道信号的产生,且信道隔离度高,各性能指标也符合传输标准。

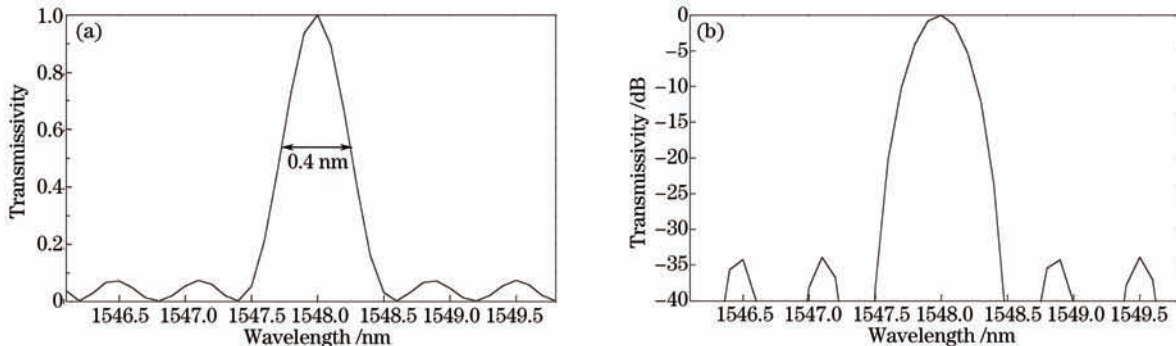


图 6 HiBi-PCF 级联滤波器透射谱

Fig.6 Transmission spectra of HiBi-PCF cascaded filter

当改变级联滤波器中两段 HiBi-PCF 的参数时,会引起级联滤波器透射谱 FWHM 的改变。图 7 表示不同 HiBi-PCF 长度时,级联滤波器在单个频道周期内的透射谱。在图 7 中,不同 HiBi-PCF 长度时级联滤波器的 FWHM 分为 1.2、0.6、0.4 nm,可见随着级联滤波器中 HiBi-PCF 长度参数的改变,会导致滤波器透射谱的 FWHM 不同,使得滤波器通带宽度发生变化,最终可应用于不同频道间隔和频道数的 DWDM 系统中,实现不同复用频道信号的滤波输出。

## 4 结 论

提出了一种由两个 HiBi-PCF Sagnac 环级联构成的滤波器,对该滤波器进行了理论研究和数值仿真。仿真结果表明,当级联滤波器中两段 HiBi-PCF 长度成两倍关系时,滤波器有着良好的滤波效果,且透射谱

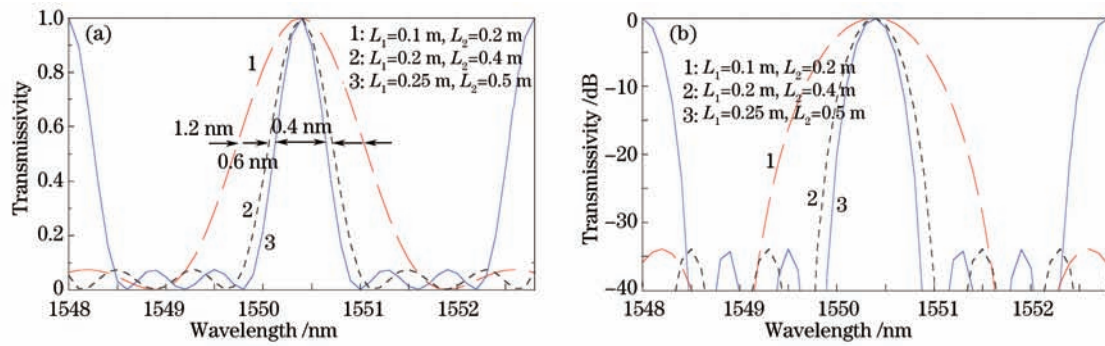


图7 不同HiBi-PCF长度时级联滤波器的透射谱

Fig.7 Transmission spectra of the cascaded filter with different lengths of HiBi-PCFs

FWHM 只有单环结构滤波器的 1/3,大大减小了滤波器的通带带宽,实现了滤波器良好的波长选择性和信道隔离度。同时,该级联滤波器对温度变化非常不敏感,具有良好的环境稳定性。此外,滤波器透射谱 FWHM 可达到 0.4 nm,刚好为 50 GHz DWDM 系统的一个频道,可应用于 50 GHz DWDM 系统中频道信号的产生,且满足系统性能要求。当调节 HiBi-PCF 参数时,还可以应用于不同频道间隔和频道数的 DWDM 系统,所以该滤波器在光纤通信系统尤其是 WDM 方面具有十分好的应用前景。

### 参考文献

- 1 Charles A B. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications[J]. IEEE J Sel Areas Communications, 1996, 28(2): 948-964.
- 2 Zhao Yong, Song Tingting, Huo Zhuwei. Tunable optical fiber filter based on a fiber Bragg grating loop mirror[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(24): 3672-3675.
- 3 Ning G, Aditya S, Shum P, *et al.*. Tunable photonic microwave bandpass filter using phase modulation and a chirped fiber grating in a Sagnac loop[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 17(9): 1935-1937.
- 4 Ouyang Chunmei, Shum P, Wang Honghai, *et al.*. Wavelength-tunable high-energy all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked all-fiber laser with a HiBi fiber Sagnac loop filter[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(2): 198-203.
- 5 Zeng Chunhong, Kong Mei, Zhang Jian. Fiber Sagnac loop filter with a symmetrical chirped fiber Bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(4): 652-656.  
曾春红, 孔梅, 张健. 带有对称啁啾光纤光栅的 Sagnac 环滤波器[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 652-656.
- 6 Ma Hongyu, Chen Genxiang, Feng Caixia. A cascaded comb filter based on Sagnac interferometer[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2011, 18(1): 28-32.  
马红玉, 陈根祥, 冯彩霞. 基于 Sagnac 干涉仪的级联型梳状滤波器[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011, 18(1): 28-32.
- 7 Cuatrecatl I H, Pérez G B, Mixcóatl J C, *et al.*. Fiber laser thermally tunable by a filter composed of two Sagnac interferometers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2008, 44(1): 49-55.
- 8 Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing, *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010005.  
陈益新, 赵春柳, 刘星, 等. 基于光子晶体光纤环境的光纤传感器的研究及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010005.
- 9 Liu S, Liu Y G, Liu R Y, *et al.*. All fibre flat-top comb filter based on high-birefringence photonic crystal fibre loop mirror[J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2010, 3(1): 64-69.
- 10 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhou Guang, *et al.*. Study on characteristics of two high-birefringence fiber loops mirror filter[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1185-1188.  
刘丽辉, 赵启大, 周广, 等. 双折射光纤环形镜滤波器特性研究[J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1185-1188.
- 11 Alberto V F, Georgina B P, Severino M A, *et al.*. Thermally tunable all-fiber filter based on two series connected Sagnac interferometers with different loop lengths[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(23): 5365-5369.
- 12 Qiu W, Wang J X. Demonstration of narrow passband optical filter for DWDM system with modified Rowland grating structure[J]. Electron Lett, 2011, 47(21): 1190-1191.