

doi:10.3788/gzxb20164512.1206002

基于高双折射光子晶体光纤与光纤环的超宽带可调谐微波光子滤波器

曹晔^{1,2}, 杨菁芃¹, 童峥嵘¹, 许东¹

(1 天津理工大学 计算机与通信工程学院;教育部通信器件与技术工程研究中心,天津 300384)

(2 青岛大学 电子信息学院,山东 青岛 266071)

摘 要:提出一种基于高双折射光子晶体光纤与光纤环的超宽带可调谐微波光子滤波器.以多波长光纤激光器作为光源,向高双折射光子晶体光纤内填充温敏液体,通过改变填充温敏液体的温度,高双折射光子晶体光纤可具有不同的双折射,得到不同波长间隔的激光,从而使微波光子滤波器具有不同的自由频谱范围.当温度的变化范围为 20~80℃时,仿真测得微波光子滤波器自由频谱的变化范围为 2.49~39.9 GHz.引入光纤环构建级联型微波光子滤波器,滤波器的主旁瓣抑制比可提高到 33.6 dB, Q 值可达到 499,提高了滤波器的频率选择性.

关键词:微波光子滤波器;可调谐;相位调制;高双折射光子晶体光纤;波长间隔

中图分类号:TN713.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1206002-5

Ultra Wideband Tunable Microwave Photonic Filter Based on HB-PCF and Fiber Ring

CAO Ye^{1,2}, YANG Jing-peng¹, TONG Zheng-rong¹, XU Dong¹

(1 *Communication Devices and Technology Engineering Research Center, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*)

(2 *School of Electronic and Information Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China*)

Abstract: An ultra wideband tunable microwave photonic filter based on high birefringence photonic crystal fiber and fiber ring was proposed. The multi-wavelength fiber laser was used as the light source, and the high birefringence photonic crystal fiber was filled with temperature-sensitive liquid. The high birefringence photonic crystal fiber could own different birefringence by varying the temperature of temperature-sensitive liquid, and the laser output with different wavelengths was obtained, making the microwave photonic filter have different free spectral range. The simulating results show that when the temperature is changing from 20℃ to 80℃, the free spectral range of filter has the range of 2.49 GHz to 39.9 GHz. By introducing the fiber ring cascade in the microwave photonic filter, the main sidelobe suppression ratio of the filter can be raised to 33.6dB and the maximum Q-value of 499 can be obtained, which improve its frequency selectivity effectively.

Key words: Microwave photonic filter; Tunable; Phase modulation; High birefringence photonic crystal fiber; Wavelength spacing

OCIS Codes: 060.2630; 230.4110; 230.5750

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2013AA014200)、国家自然科学基金应急管理项目(No. 11444001)和天津市自然科学基金(No. 14JCYBJC16500)资助

第一作者:曹晔(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤通信技术. Email: cynever@163.com

通讯作者:杨菁芃(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为微波光子滤波器. Email: han82peng@sina.com

收稿日期:2016-06-06; **录用日期:**2016-08-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

微波光子学将微波技术和光子学相结合,融合了两大学科优势,具有广阔的应用前景^[1-2].微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)可将输入的微波信号通过调制器加载到光信号上,使得微波信号的处理在光域进行,最后通过光电探测器输出^[3-4].微波光子滤波器克服了传统电子滤波器在电域中处理射频信号存在的瓶颈问题^[5-6],具有高带宽、低损耗、体积小和抗电磁干扰等优点,被广泛的应用于通信领域^[7-8].

微波光子滤波器的可调谐特性^[9-10]一直是人们研究的重点.2008年北京邮电大学林金桐课题组提出了一种实现全光微波带通滤波的方案^[11];2012年瓦伦西亚理工大学的 Javier Abreu-Afonso 等利用多波长光纤激光器提出了一种连续可调谐的微波光子滤波器^[12];2014年,渥太华大学的 Jiejun Zhang 课题组提出了一种宽带可调谐的微波光子滤波器^[13].

本文使用波长间隔可变的长多波长光纤激光器作为微波光子滤波器的光源,通过调节温度改变温敏液体填充后高双折射光子晶体光纤(High Birefringence Photonic Crystal Fiber, HB-PCF)的双折射系数,使激光器可以输出不同波长间隔的激光,从而使滤波器的自由频谱范围(Free Spectral Range, FSR)连续可调.通过将单模光纤和光纤环进行级联作为延迟单元,提高了主旁瓣抑制比和 Q 值,很大程度上改善了微波光

子滤波器的频率选择性.

1 结构与原理

1.1 结构模型

微波光子滤波器结构如图 1.利用基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器作为光源;980 nm 泵浦光源通过波分复用器泵浦一段 4 m 长的掺铒光纤,掺杂浓度为 400 ppm;偏振隔离器(Polarization Dependent Isolator, PDI)能够改变光波的偏振态,并保证激光在光纤环形腔中单向传输;三个偏振控制器(Polarization Controller, PC)用来控制激光的偏振态;5 km 单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)可以抑制腔内模式竞争并提高输出激光的稳定性.最终产生的多波长激光由 10:90 耦合器的 10% 端口输出.输出后的激光信号进入到由射频(Radio Frequency, RF)信号驱动的相位调制器(Phase Modulator, PM)中,经过 5 km SMF 和光纤环延时后,被光电探测器(Photodetector, PD)探测,实现光电转换,产生的电信号最终进入矢量网络分析仪进行分析.其中 5 km SMF 与光纤环级联作为色散器件,通过相位调制和色散器件的共同作用实现负系数,有效地改善了 MPF 的主旁瓣抑制比和 Q 值.光纤环包括耦合器和可调谐光纤延迟线(Tunable Optical Delay Line, TODL),通过调节 TODL 改变光纤环的环长,从而更方便地提高滤波器的频率选择性.

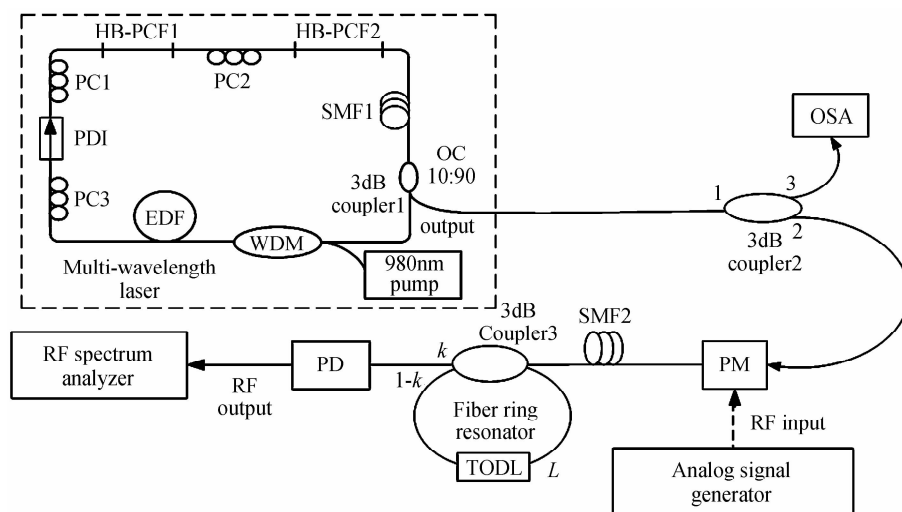


图 1 微波光子滤波器结构图

Fig. 1 The structure of microwave photonic filter

一种新型的微结构纤芯的高双折射光子晶体光纤^[14]的端面如图 2,该光纤包层由四层空气孔组成,中心消去一个空气孔形成纤芯,在纤芯引入 10 个呈矩形排列的小圆孔结构,其基质为石英,折射率为 1.45.包层空气孔间距 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$,外两层空气孔半径为

$1.05 \mu\text{m}$,内两层空气孔半径为 $0.86 \mu\text{m}$,纤芯处小圆直径为 $d_1 = 0.45 \mu\text{m}$,小圆沿 X 轴的间距为 $\Lambda_2 = 1.24 \mu\text{m}$,沿 Y 轴的间距为 $\Lambda_1 = 0.45 \mu\text{m}$.向沿 X 轴中心的 8 个空气孔填充温敏液体.

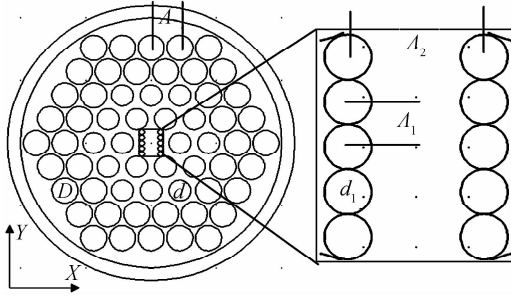


图2 HB-PCF 端面图

Fig. 2 The end view drawing of HB-PCF

1.2 工作原理

多波长激光器产生激光的波长间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n \cdot l} \quad (1)$$

式中, λ 为传输光的中心波长, Δn 为高双折射光子晶体光纤的双折射, l 为高双折射光子晶体光纤的有效长度. 假设 θ_1 为 HB-PCF1 的快轴与偏振轴的夹角, θ_2 为 HB-PCF2 的快轴与偏振轴的夹角. 通过调整激光器中的偏振控制器, 当 $\theta_1 = \theta_2 = +45^\circ$ 时, 有效长度为 $l_1 + l_2$; 当 $\theta_1 = +45^\circ, \theta_2 = 0^\circ$ 时, 有效长度为 l_1 ; 当 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = +45^\circ$ 时, 有效长度为 l_2 ; 当 $\theta_1 = +45^\circ, \theta_2 = -45^\circ$ 时, 有效长度为 $l_1 - l_2$ ^[15]. 当高双折射光子晶体光纤的有效长度 l 固定时, 只要使其双折射发生变化, 激光器输出激光的波长间隔 $\Delta\lambda$ 就可以改变.

基于相位调制器的传统微波光子滤波器的自由频谱范围为

$$\text{FSR}_{\text{PM-SMF}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{D \cdot L_2 \cdot \Delta\lambda} \quad (2)$$

式中, T 是由单模光纤的色散引入的时延, 其与自由频谱范围成倒数关系, D 是单模光纤的色散系数, L_2 是 SMF2 的长度, $\Delta\lambda$ 是激光器输出激光的波长间隔. 可见, $\Delta\lambda$ 的变化会引起 FSR 的变化. 因此, 通过简单地调节 HB-PCF 周围的温度, 就能够实现滤波器 FSR 的连续调谐.

未引入光纤环时, 微波光子滤波器的传输函数为

$$H(f_{\text{RF}}) \propto \cos\left(\frac{\pi \bar{D}_m L_2 \bar{\lambda}_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sum_{m=1}^M P_m \exp[j2\pi f_{\text{RF}}(m-1)T] \quad (3)$$

式中, $\bar{D}_m L_2$ 为第 m 路光载波经过色散器件后的平均累积色散, $\bar{\lambda}_m$ 为 m 路光载波的平均波长, L_2 为 SMF2 的光纤长度, P_m 为其功率, f_{RF} 为所加射频信号的频率, $T = \bar{D}_m L_2 \Delta\lambda$, 为相邻两个光载波之间的基本延迟时间.

根据傅里叶变换和琼斯矩阵可知光纤环的传输函数为

$$H_{\text{ring}}(f_{\text{RF}}) = \frac{k}{1 - (1-k)\exp(j2\pi f_{\text{RF}} nL/c)} \quad (4)$$

式中, k 为 Coupler3 的耦合系数, n 为 SMF2 的有效折射率, c 为光速, L 为光纤环的长度.

根据式(3)和(4)可知, 该级联型微波光子滤波器的传输函数为

$$H(f_{\text{RF}}) \propto \cos\left(\frac{\pi \bar{D}_m L_2 \bar{\lambda}_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sum_{m=1}^M P_m \exp[j2\pi f_{\text{RF}}(m-1)T] \cdot \frac{k}{1 - (1-k)\exp(j2\pi f_{\text{RF}} nL/c)} \quad (5)$$

为了获得具有较高主旁瓣抑制比 (Main Sidelobe Suppression Ratio, MSSR) 和高 Q 值的微波光子滤波器, 基于相位调制器的传统微波光子滤波器的 FSR 应当与光纤环型谐振器的谐振频率相等或者呈整数 q 倍的关系, 即

$$\text{FSR}_{\text{PM-SMF}} = q \cdot \text{FSR}_{\text{ring}} \quad (q=1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中, $\text{FSR}_{\text{ring}} = \frac{c}{nL}$, 光纤环型谐振器中的光纤环长 L 应满足

$$L = \frac{q \cdot c \cdot D \cdot L_2 \cdot \Delta\lambda}{n} \quad (7)$$

微波光子滤波器的频率选择性通常用品质因数 Q 来表示, 用 $\omega_{3\text{dB}}$ 表示滤波器的 3dB 带宽, 则微波光子滤波器的品质因数为

$$Q = \frac{\text{FSR}}{\omega_{3\text{dB}}} = \frac{1}{D \cdot \Delta\lambda \cdot L_2 \cdot \omega_{3\text{dB}}} \quad (8)$$

2 仿真结果及分析

在多波长激光器中, 分别向两段 HB-PCF 的 8 个空气孔中填充温敏液体, 选用的温敏液体是 Cargille 实验室生产的型号为 Cat. 19340 的折射率匹配液, 室温下的折射率为 1.514 3, 温度系数为 $-0.000 393^\circ\text{C}^{-1}$. 通过调节温度使激光器输出不同波长间隔的激光. 当温度从 20°C 升高到 80°C 时, 用 COMSOL 软件对 HB-PCF 的填充过程进行仿真分析, 可知 HB-PCF 的双折射率相应的变化范围为 $1.34 \times 10^{-2} \sim 5.35 \times 10^{-2}$, 如图 3.

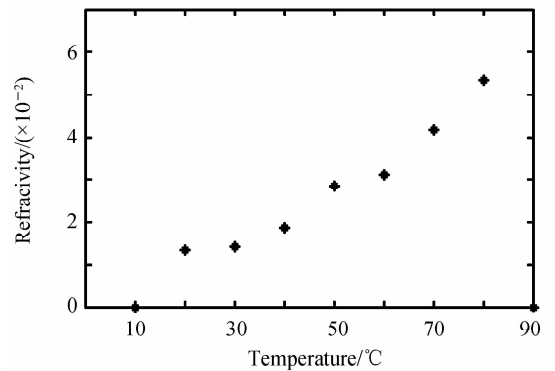


图3 HB-PCF 双折射与温度的关系

Fig. 3 The relation between the birefringence of HB-PCF and temperature

选用的 HB-PCF1 长度为 $l_1 = 0.1$ m, HB-PCF2 长度为 $l_2 = 0.06$ m, 当环内 HB-PCF 的有效长度 $l = l_1 - l_2 = 0.04$ m 时, 结合式(1)可知, 波长间隔相应地从 4.48 nm 变化到 1.12 nm. 将 5 km 的 SMF2 用作延时器件, 其色散系数 D 为 17.9 ps/(nm · km), 结合式(3)可得到不同波长间隔时的滤波器频率响应, 如图 4. 当波长间隔从 4.48 nm 减小到 1.12 nm 时, 滤波器的中心频率从 2.49 GHz 变为 9.98 GHz, 主旁瓣抑制比约为 8.5 dB, Q 值约为 8.83.

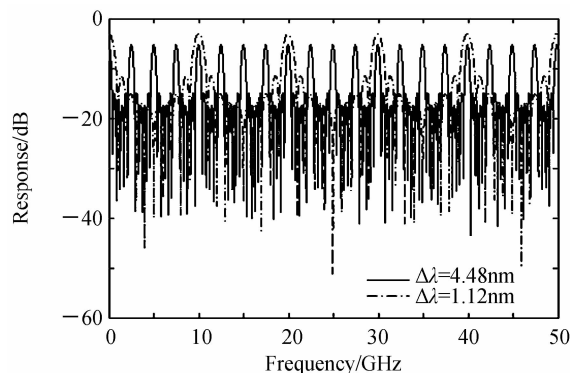


图 4 有效长度为 0.04 m 时的频率响应谱
Fig. 4 The frequency response spectrum with the effective length of 0.04 m

当环内 HB-PCF 的有效长度 $l = l_2 = 0.06$ m 时, 结合式(1)可知, 波长间隔相应地从 2.99 nm 变化到 0.75 nm. 选用相同的 SMF2 用作延时器件, 得到不同波长间隔时的滤波器频率响应如图 5. 当波长间隔从 2.99 nm 减小到 0.75 nm 时, 滤波器的中心频率从 3.74 GHz 变为 14.9 GHz, 主旁瓣抑制比约为 8.5 dB, Q 值约为 8.87.

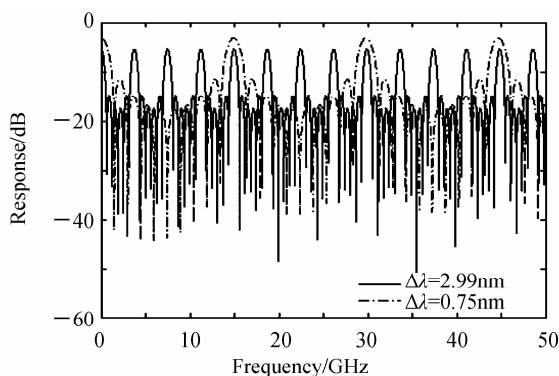


图 5 有效长度为 0.06 m 时的频率响应谱
Fig. 5 The frequency response spectrum with the effective length of 0.06 m

当环内 HB-PCF 的有效长度 $l = l_1 = 0.1$ m 时, 结合式(1)可知, 波长间隔相应地从 1.79 nm 变化到 0.45 nm. 选用相同的 SMF2 用作延时器件, 得到不同波长间隔时的滤波器频率响应如图 6. 当波长间隔从 1.79 nm 减小到 0.45 nm 时, 滤波器的中心频率从

6.24 GHz 变为 24.83 GHz, 主旁瓣抑制比约为 8.5 dB, Q 值约为 8.87.

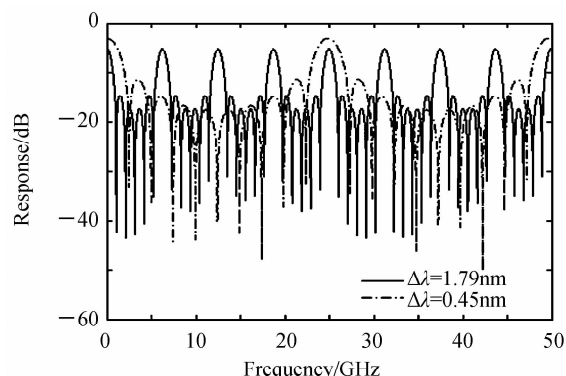


图 6 有效长度为 0.1 m 时的频率响应谱
Fig. 6 The frequency response spectrum with the effective length of 0.1 m

当环内 HB-PCF 的有效长度 $l = l_1 + l_2 = 0.16$ m 时, 结合式(1)可知, 波长间隔相应的从 1.12 nm 变化到 0.28 nm. 选用相同的 SMF2 用作延时器件, 得到不同波长间隔时的滤波器频率响应如图 7. 当波长间隔从 1.12 nm 减小到 0.28 nm 时, 滤波器的中心频率从 9.98 GHz 变为 39.9 GHz, 主旁瓣抑制比约为 8.5 dB, Q 值约为 8.89.

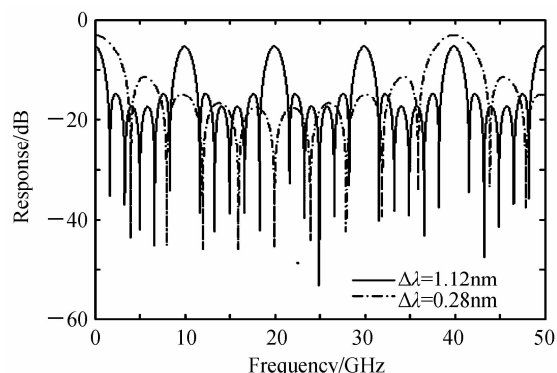


图 7 有效长度为 0.16 m 时的频率响应谱
Fig. 7 The frequency response spectrum with the effective length of 0.16 m

因此, 当温度在 20~80℃ 之间变化时, 通过调节环内的偏振控制器, 多波长光源可在 4.48~0.28 nm 范围内连续可调, 进而可实现滤波器通带中心频率在 2.49~39.9 GHz 大范围内连续可调.

将 SMF2 与光纤环级联作为色散器件, 构建级联型微波光子滤波器, 以达到提高滤波器的主旁瓣抑制比和 Q 值的目的, 进一步改善滤波器的性能, 提高频率选择性, 如图 8. 激光器的波长间隔为 1.12 nm, H 为引入光纤环之后的滤波器响应, H_1 为未引入光纤环的滤波器响应, 从图中可看出, 在 20℃、环内 HB-PCF 的有效长度为 0.16 m 时, 引入光纤环之后主旁瓣抑制比约为 33.6 dB, Q 值为 499, 相比于未引入光纤环时, 主旁瓣

抑制比提高了 25.1 dB, Q 值增大了 56.51 倍。

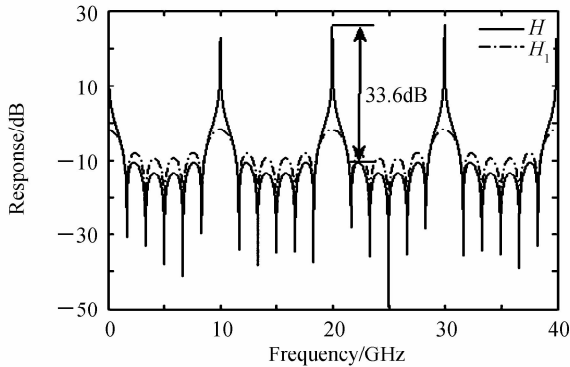


图 8 微波光子滤波器的频率响应谱

Fig. 8 The response spectrum of the microwave photonic filter

3 结论

本文提出并通过仿真验证了基于高双折射光子晶体光纤与光纤环的超宽带可调谐微波光子滤波器。以多波长光纤激光器作为光源,通过改变填充了温敏液体的 HB-PCF 周围的温度,使 HB-PCF 具有不同的双折射。随着 HB-PCF 双折射的连续变化,激光器输出了不同波长间隔的激光,使微波光子滤波器具有不同的自由频谱范围,实现了滤波器通带中心频率在 2.49~39.9GHz 大范围内连续可调谐。通过引入单模光纤与光纤环级联,滤波器的主旁瓣抑制比提高到 33.6dB, Q 值可达到 499,有效地提高了滤波器的频率选择性。

参考文献

- [1] DANIEL P, JOSÉ C, BEATRIZ O. Broad-band tunable microwave transversal notch filter based on tunable uniform fiber Bragg gratings as slicing filters[J]. *Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(7): 726-728.
- [2] LI Zhen, CHEN Zhe, HSIAO V K S, *et al.* Optically tunable chirped fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 10827-10832.
- [3] XU En-ming, WANG Fei, LI Pei-li. Switchable and tunable microwave photonic filter based on reflective semiconductor optic amplifier [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(1): 198-201.
- [4] ZOU Dan, ZHENG Xiao-ping, LI Shang-yuan, *et al.* Tunable single bandpass microwave photonic filter using polarization-orthogonal optical carrier time shift [J]. *Optics Communications*, 2014, **326**(1): 150 - 154.
- [5] CAO Ye, CHEN Lei, TONG Zheng-rong. A tunable microwave photonic filter based on phase modulation and photonic crystal fiber Sagnac loop[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0923001.
- [6] LI Li-wei, YI Xiao-ke, HUANG T X H, *et al.* High-resolution single bandpass microwave photonic filter with shape-invariant tunability[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(1): 82 - 85.
- [7] HAN Xiu-you, XU En-ming, LIU Wei-lin, *et al.* Tunable dual-passband microwave photonic filter using orthogonal polarization modulation [J]. *Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(20): 2209-2212.
- [8] ZHANG D, FENG X, LI X, *et al.* Tunable and reconfigurable bandstop microwave photonic filter based on integrated microrings and Mach - Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(23): 3668-3675.
- [9] XIAO Yong-chuan, WANG Xin, ZHANG You-di, *et al.* Bandwidth reconfigurable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, **21**: 187-192.
- [10] DING Lu, LUO Feng-guang, PAN Xiao-xing. Flat-top fiber comb filter based on Lyot-type HiBi fiber Sagnac loops[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0123002.
- [11] LI Jian-qiang, XU Kun, HUANG Hao, *et al.* Simultaneous implementation of all-optical microwave bandpass filtering and up-conversion for radio-over-fiber applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(14): 2202-2210.
- [12] JAVIER A, ANTONIO D, JOSE L C, *et al.* Continuously tunable microwave photonic filter using a multiwavelength fiber laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(23): 2129-2131.
- [13] ZHANG Jie-jun, GAO Liang, YAO Jian-ping. Tunable optoelectronic oscillator incorporating a single passband microwave photonic filter[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(4): 326-329.
- [14] CAO Ye, WANG Jiang-yun, TONG Zheng-rong. Investigation of high birefringence and low confinement loss photonic crystal fiber with multiple zero dispersion points based on micro-structured core [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(9): 0905005.
- [15] SOVA R M, KIM C S, KANG J U. Tunable dual-wavelength All-PM fiber ring laser[J]. *Photonic Technology Letters*, 2002, **14**(3): 287-289.