

# 基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子带通滤波器

张丽丽 童峥嵘 曹 晔 张卫华

(天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 提出了一种基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子带通滤波器。该滤波器利用双折射光纤环镜对多波长激光器的输出信号进行整形, 整形后的信号作为滤波器的抽头, 实现滤波器的可重构性。将标准单模光纤(SSMF)和光纤延迟环级联作为延迟单元, 实现滤波器的频率选择性。通过改变波长间隔或标准单模光纤的长度, 实现滤波器的可调谐性。研究结果表明与只用 SSMF 作延迟单元相比, 该微波光子滤波器的品质因数  $Q$  提高了 182.26, 3 dB 带宽减小了 670 MHz。

**关键词** 光纤光学; 多波长激光器; 双折射光纤环镜; 色散器件; 高  $Q$  值

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0205004

## Microwave Photonic Bandpass Filter Based on Multi-Wavelength Fiber Lasers and Cascaded Dispersion Devices

Zhang Lili Tong Zhengrong Cao Ye Zhang Weihua

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** A microwave photonic band-pass filter based on multi-wavelength laser and cascaded dispersion devices is proposed. To achieve the reconfigurable of the filter, a birefringence fiber loop mirror is used to shape the output signal of multi-wavelength laser shaping. The shaped signal is selected as the filter tap. The frequency selectivity of the filter is achieved by a delay unit which is the concatenation of standard single-mode fiber (SSMF) and fiber delay loop mirror. The tunability of the filter can be realized by changing the wavelength interval of the source or the length of the standard SSMF. The results show that the quality factor of the proposed microwave photonic filter increases by 182.26 and 3 dB bandwidth decreases by 670 MHz, compared to the filter only with SSMF as delay units.

**Key words** fiber optics; multi-wavelength lasers; birefringence fiber loop mirror; dispersion devices; high  $Q$  value

**OCIS codes** 070.4560; 060.5625; 070.1170; 060.4262; 070.2615

### 1 引言

微波光子滤波器(MPF)在光域上处理微波信号,因其具有带宽大、损耗小、抗电磁干扰等优点成为了当前研究的热点<sup>[1-6]</sup>。

微波光子滤波器根据抽头个数是否有限,可分为有限冲击响应(FIR)滤波器和无限冲击响应(IIR)滤波器, FIR 滤波器通过增加抽头数目来提高品质因数  $Q$  值,但是所需元件较多,成本较高,而

IIR 滤波器大部分是基于延迟环的,它具有使用元件少和高频率选择性强的特性<sup>[7-8]</sup>。近年来,有人提出了将 IIR 滤波器和 FIR 滤波器级联来提高  $Q$  值<sup>[9-12]</sup>,这样既可以节省成本又可以大幅度提高  $Q$  值。在文献[11]中用马赫-曾德尔(MZ)干涉仪切割宽带光源得到多个光源,将 50 km 的单模光纤与光纤延迟环级联作为延迟单元,测得  $Q$  值为 95。

本文提出的基于多波长激光器和色散器件级联

收稿日期: 2013-08-19; 收到修改稿日期: 2013-10-08

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00100, 13JCQNJC01800)

作者简介: 张丽丽(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: lichun8617@163.com

导师简介: 童峥嵘(1971—),女,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: zhrong@sohu.com

的微波光子带通滤波器利用多波长激光器作为光源,采用双折射光纤环境进行整形,通过将延迟环和标准单模光纤(SSMF)级联,并将两部分独立结构的传输函数相匹配,减小了滤波器的 3 dB 带宽,提高了滤波器的 Q 值,使滤波器具有很好的频率选择性。

## 2 系统结构及原理

基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子滤波器如图 1 所示,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,此激光器 10% 端口作为输出,输出后的激光信号进入 Sagnac 干涉仪,通过调节 Sagnac 干涉仪使其梳状谱的一个干涉峰与输出的激光信号相匹配,对激光信号进行整形以实现滤波器的可重构性。经整形后的激光信号进入由射频(RF)信号驱动的相位调制器,通过相位调制器和色散器件的共同作用实现负系数,色散器件采用标准单模光纤与光纤延迟环相级联,此方法能实现高 Q 值,提高滤波器的频率选择性。

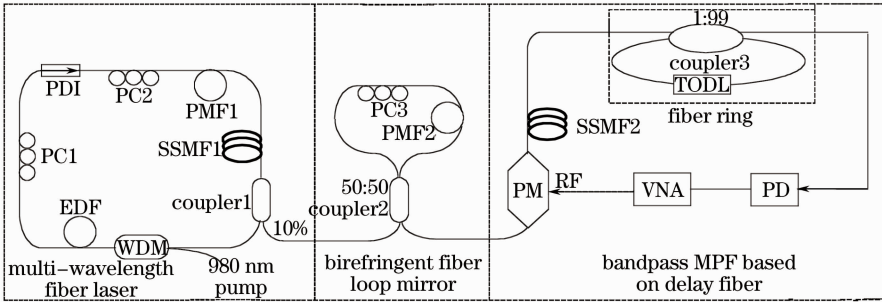


图 1 基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子滤波器

Fig. 1 Microwave photonic filter based on multi-wavelength fiber lasers and cascaded dispersion devices

该结构由三部分组成。图 1 左侧部分为基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器,用于产生稳定的等间隔多波长激光信号。包括波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、偏振控制器(PC1、PC2)、偏振相关隔离器(PDI)、保偏光纤(PMF1)、标准单模光纤(SSMF1)和耦合器(coupler1)。其中长度为 7 m、掺杂  $\text{Er}^{3+}$  为  $4 \times 10^{-4}$  的 EDF 作为增益介质,双折射系数为  $5.1 \times 10^{-4}$  的 PMF1 用来改变谐振腔内双折射强度,PDI 具有起偏器和隔离器的作用用于保证光单向运转,长度为 3 km 的 SSMF1 用于增加非线性偏振旋转效应,使此多波长激光器具有稳定的输出,PC1、PC2 和 PDI 用来改变腔内的偏振态。980 nm 的抽运光经 WDM 后进入 EDF,在环形腔内顺时针单向运转,最后经 10:90 的 coupler1 的 10% 端口输出。

图 1 中间部分为 Sagnac 干涉仪,用于控制多波长光源的抽头权重,对多波长激光信号进行整形,以实现可重构性。包括耦合器(coupler2)、偏振控制器(PC3)和双折射系数为  $5.1 \times 10^{-4}$ 、长度为 98 cm 的保偏光纤(PMF2),通过调节 PC3 使 Sagnac 干涉仪的透射谱左右移动,与多波长激光信号相匹配,从而更好地控制多波长光源的抽头权重。

根据琼斯矩阵<sup>[13]</sup>,可知 Sagnac 干涉仪的透射率为

$$T = (1 - 2k_2)^2 + 4k_2(1 - k_2)\sin^2\theta\cos^2\varphi, \quad (1)$$

式中  $k_2$  为 coupler2 的耦合系数, $\theta$  为 PC3 的偏振旋转角度, $\varphi = \pi\Delta nL_2/\lambda$  为保偏光纤快慢轴的相位差,其中  $\Delta n$  为保偏光纤快慢轴的折射率之差, $L_2$  为 PMF2 的长度。

图 1 右侧部分为基于延迟环的微波光子带通滤波器。主要包括相位调制器(PM)、标准单模光纤(SSMF2)、光纤延迟环、光电探测器(PD)、矢量网络分析仪(VNA)。其中 SSMF2 和光纤延迟环共同作为色散器件,用于实现高 Q 值,PM 用于实现相位调制到强度调制的转换,在 PM 和色散器件的共同作用下实现滤波器的负系数,PD 用于检测恢复出来的射频信号,VNA 用于观察滤波器的频率响应。光纤延迟环包括耦合器(coupler3)和可调谐光纤延迟线(TODL),通过调节 TODL 改变光纤环的环长,从而改变滤波器的频率选择性。

根据傅里叶变换和琼斯矩阵<sup>[13]</sup>,可知此光纤环的传输函数为

$$H_{\text{ring}}(f_{\text{RF}}) = \frac{k_3}{1 - (1 - k_3)\exp(j2\pi f_{\text{RF}} n_{\text{eff}} L_4 / c)}, \quad (2)$$

式中  $k_3$  为 coupler3 的耦合系数, $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率, $L_4$  为光纤环的长度, $c$  为光速, $f_{\text{RF}}$  为光纤环传输函数的频率。

该微波光子带通滤波器的传输函数为

$$H(f_{\text{RF}}) \propto \underbrace{\cos\left(\frac{\pi \bar{D}_m L_3 \bar{\lambda}_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right)}_{H_1(f)} \cdot \underbrace{\sum_{m=1}^M P_m \exp[i2\pi f_{\text{RF}}(m-1)\tau]}_{H_2(f)} \cdot \underbrace{\frac{k_3}{1 - (1 - k_3) \exp(j2\pi f_{\text{RF}} n_{\text{eff}} L_4 / c)}}_{H_3(f)}, \quad (3)$$

式中定义的  $H_1(f)$  为色散介质引入的频率响应,  $H_2(f)$  为微波光子低通滤波器的频率响应,  $H_3(f)$  为光纤环的传输函数,  $H_4(f)$  为不考虑光纤环时滤波器的频率响应.  $\bar{\lambda}_m$  和  $\bar{D}_m L_3$  分别为多波长光源的平均波长和经过 SSMF2 后的平均累积色散,  $P_m$  为多波长光源的抽头权重, 服从 Sagnac 干涉仪透射谱的分布,  $\tau = \bar{D}_m L_3 \Delta\lambda$  为由 SSMF2 引入的延迟.

要想使此滤波器的性能达到最好, 基于 SSMF2 的滤波器的自由光谱范围 (FSR1,  $R_{\text{fs1}}$ ) 和光纤环部分的自由光谱范围 (FSR2,  $R_{\text{fs2}}$ ) 应该呈  $N$  倍 ( $N = 1, 2, 3, \dots$ ), 即

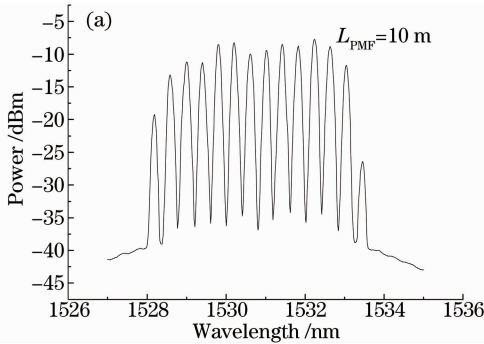
$$R_{\text{fs1}} = N \cdot R_{\text{fs2}}, \quad (4)$$

式中

$$R_{\text{fs1}} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\bar{D}_m L_3 \Delta\lambda}, R_{\text{fs2}} = \frac{c}{nL_4}. \quad (5)$$

令滤波器的自由光谱范围 (FSR) 为

$$R_{\text{fs}} = R_{\text{fs1}},$$



故

$$L_3 = \frac{1}{R_{\text{fs1}} \bar{D}_m \Delta\lambda}, \quad (6)$$

式中  $L_3$  为 SSMF2 的长度,  $\bar{D}_m$  和  $\Delta\lambda$  分别为 SSMF2 的色散系数和多波长光纤激光器的波长间隔. 当激光器的波长间隔固定时, SSMF2 的长度与 FSR 值成反比, 而带通滤波器的 FSR 等于滤波器的中心频率, 那么根据所设计的滤波器的中心频率来确定 SSMF2 的长度.

根据(4)和(5)式, 可知两部分光纤的长度关系为

$$L_4 = \frac{Nc\bar{D}_m L_3 \Delta\lambda}{n}. \quad (7)$$

### 3 实验结果及分析

当 PMF1 的长度  $L_{\text{PMF}}$  分别为 10 m 和 4 m 时, 对应的经 Sagnac 干涉仪整形后的输出信号如图 2 所示.

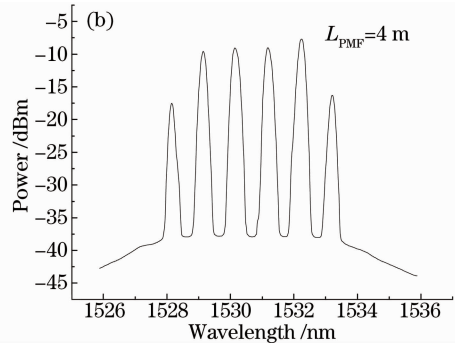


图 2 整形后的多波长激光信号

Fig. 2 Multi-wavelength laser signal after shaping

可知, 当 PMF1 长度为 10 m 时, 多波长光纤激光器输出波长间隔为 0.4 nm 的 14 个多波长激光信号, 当 PMF1 长度为 4 m 时, 多波长光纤激光器输出波长间隔为 1.06 nm 的 6 个多波长激光信号. 通过调节图 1 中的 PC1 和 PC2 来改变多波长光谱的平坦性.

当延迟单元中仅考虑 SSMF2 作用, 多波长光纤激光器的波长间隔为 1.06 nm 时, 微波光子滤波器整形前后的频率响应如图 3 所示. 图中  $H_1(f)$  为色散引起的频率响应, 影响微波光子滤波器的频率包络,  $H_2(f)$  为微波光子低通滤波器的频率响应, 不考虑光

纤延迟环时,  $H_4(f)$  为  $H_1(f)$  和  $H_2(f)$  的乘积, 是微波光子带通滤波器的频率响应. 图 3(a) 为未经 Sagnac 干涉仪的整形, 多波长激光器输出的激光信号直接进入相位调制器时对应的滤波器的响应. 此时主旁瓣抑制比 (MSR) 为 6.327 dB, 3 dB 带宽为 510 MHz, FSR 为 1.8498 GHz. 图 3(b) 为经 Sagnac 干涉仪整形, 即改变(3)式中的  $P_m$  后对应的滤波器的响应. 此时 MSR 为 12.045 dB, 3 dB 带宽为 680 MHz,  $Q$  值为 2.7203. 比较可知经整形后的滤波器的 MSR 提高了 5.718 dB. 通过调节 PC3 使 Sagnac 干涉仪的透射谱左右移动, 得到不同的  $P_m$ , 实

现滤波器的可重构性。

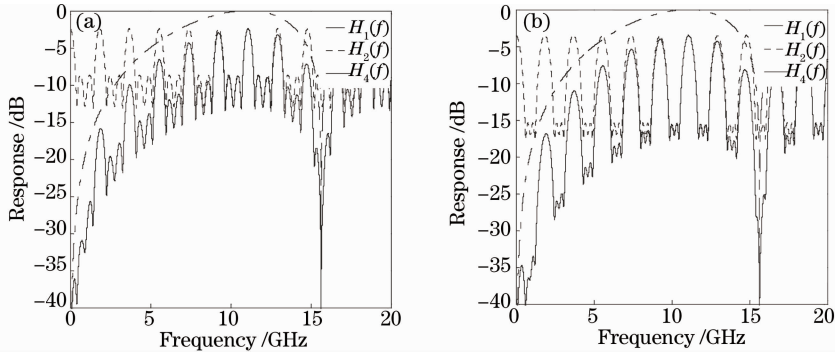


图 3 多波长光纤激光器的波长间隔为 1.06 nm 时(a)整形前和(b)整形后微波光子滤波器响应

Fig. 3 Microwave photonic filter responses (a) before shaping and (b) after shaping when wavelength interval of multi-wavelength laser is 1.06 nm

多波长光纤激光器的波长间隔为 0.4 nm 时,微波光子滤波器整形前后的频率响应如图 4 所示。

图 4(a)为未经 Sagnac 干涉仪的整形,多波长激光器输出的激光信号直接进入相位调制器时对应的滤波器的响应。此时 MSR 为 7 dB,3 dB 带宽为

446 MHz,FSR 为 4.9020 GHz;图 4(b)为经 Sagnac 干涉仪整形,即改变(3)式中的  $P_m$  后对应的滤波器的响应。此时 MSR 为 13 dB,3 dB 带宽为 713 MHz,Q 值为 6.8752。比较可知整形后滤波器的 MSR 提高了 6 dB。

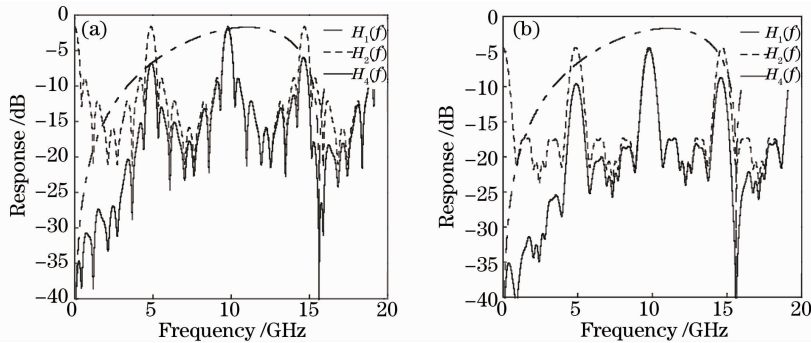


图 4 多波长光纤激光器的波长间隔为 0.4 nm 时(a)整形前和(b)整形后微波光子滤波器响应

Fig. 4 Microwave photonic filter responses (a) before shaping and (b) after shaping when wavelength interval of multi-wavelength laser is 0.4 nm

多波长光纤激光器的波长间隔分别为 0.4 nm 和 1.06 nm 时对应的滤波器的频率响应如图 5 所示。

比较可知波长间隔从 1.06 nm 减小到 0.4 nm

时,滤波器的中心频率从 1.8498 GHz 增加到 4.9020 GHz 从而可以实现滤波器的可调谐性。

当 SSMF2 与光纤延迟环相级联共同作为色散器件,在多波长光纤激光器的波长间隔为 1.06 nm,SSMF2 的长度分别为 10、30、40 km 时,级联一个光纤延迟环和两个光纤延迟环的滤波器的频率响应如图 6 所示。

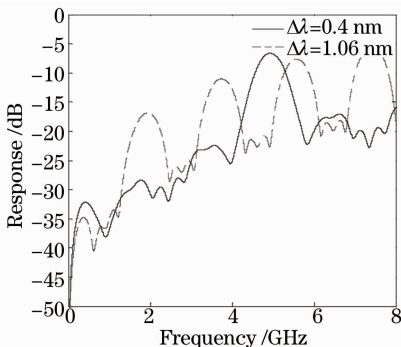


图 5 不同波长间隔时滤波器的响应

Fig. 5 Microwave photonic filter responses with different wavelength intervals

图 6(a)为 SSMF2 与一个光纤延迟环级联时的频率响应图,此时得到不同长度的 SSMF2 对应的滤波器的参数如表 1 所示。MSR 越大,滤波器的边带抑制性能越好;3 dB 带宽越小,滤出的信号越精确,Q 值越大,滤波器的频率选择性越好。从图 6 (a)和表 1 中的数据看出,SSMF2 为 30 km 时滤波器的频率选择性较好。SSMF2 由 10 km 增加到 40 km 时 FSR 从 5.5494 GHz 减小到 1.3873 GHz,

具有很好的调谐性。

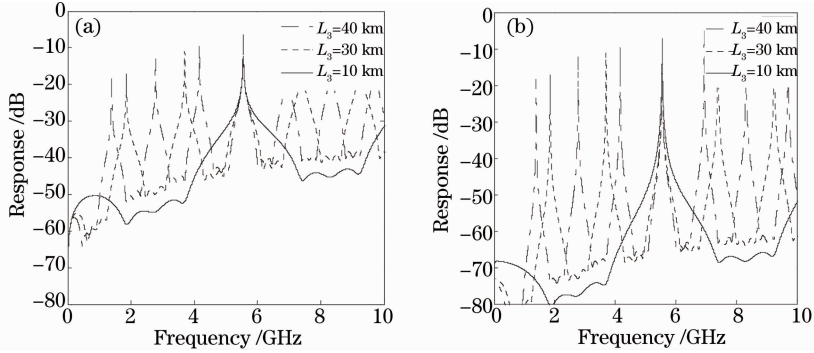


图6 单模光纤与延迟环级联时滤波器的响应图。(a) 一个光纤延迟环；(b) 两个光纤延迟环

Fig. 6 Microwave photonic filter responses with cascaded SSMF and delay loop. (a) A fiber delay ring; (b) two fiber delay rings

表1 一个光纤环级联不同长度的SSMF2对应的滤波器的参数

Table 1 Filter parameters of different lengths of SSMF2 with a ring

Length /km	10	30	40
MSR /dB	33.355	34.26	35.455
3 dB /MHz	30	10	10
Q	184.98	184.98	138.73
FSR /GHz	5.5494	1.8498	1.3873

图6(b)为SSMF2与两个光纤延迟环级联时的频率响应图,此时得到不同长度的SSMF2对应的滤波器的参数如表2所示。两个环级联时的FSR值和一个环时对应的FSR值相等。根据表2可知,当需要滤波器的3 dB带宽较窄时,选择SSMF2的长度为40 km,当要求滤波器的频率选择性较高时,选择SSMF2的长度为10 km。

表2 两个环与不同长度的SSMF2级联时对应的滤波器的参数

Table 2 Filter parameters of different lengths of SSMF2 with two rings

Length /km	10	30	40
MSR /dB	56.15	57.21	57.48
3 dB /MHz	20	8	6
Q	277.47	231.225	231.2167

SSMF2为30 km时,单独以SSMF2为延迟单元或使用SSMF2与一个或两个光纤延迟环级联时滤波器参数对比如表3所示。由表3可知,SSMF2与一个延迟环级联与单独用SSMF2相比,MSR提高了22.215 dB,3 dB带宽减小了670 MHz,Q值提高了182.26。SSMF2与两个光纤延迟环级联与一个环级联时相比较,MSR进一步提高了23 dB,3 dB带宽减小了2 dB,Q值进一步提高了46.245。

表3 不同色散器件对应的滤波器的参数

Table 3 Filter parameters with different dispersion devices

Delay part	SSMF2	SSMF2 and	SSMF2 and
		a ring	two rings
MSR /dB	12.045	34.26	57.21
3 dB /MHz	680	10	8
Q	2.7203	184.98	231.225

通过以上分析可知,采用该结构的微波光子滤波器具有很好的调谐性和频率选择性。如果在PMF1的后面再添加一个偏振控制器(PC4)和一段保偏光纤(PMF3),调节PC2和PC4可以改变PMF1和PMF3的有效长度,进而改变多波长信号的波长间隔,方便地实现了滤波器的可调谐。

标准单模光纤和一个延迟环级联作为色散器件与只用SSMF作为色散器件相比,Q值提高了182.26,3 dB带宽减小了670 MHz。

## 4 结 论

提出了一种基于多波长激光器和色散器件级联的微波光子滤波器,利用Sagnac整形后的多波长激光信号作为抽头,通过将SSMF和光纤延迟环级联使滤波器具有了IIR滤波器的窄带特性和FIR滤波器的宽频带特性,提高了滤波器的Q值,使滤波器具有很好的频率选择性。此滤波器可以更好地滤出所需要的信号,使其在通信上具有更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Javier Abreu-Afonso, Antonio Diez, Jose Luis Cruz, *et al.*. Continuously tunable microwave photonic filter using a multiwavelength fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(23): 2129-2131.
- 2 John Chang, Mable P Fok, James Meister, *et al.*. A single

- source microwave photonic filter using a novel single-mode fiber to multimode fiber coupling technique[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 5585–5593.
- 3 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong, *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multiwavelength fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206004.  
杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘, 等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206004.
- 4 Zhu Hailing, Pan Wei, Chen Jixin, *et al.*. Frequency multiplied microwave signal generation based on single passband microwave photonic filtering[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0105003.  
朱海玲, 潘炜, 陈吉欣, 等. 基于单通带微波光子滤波的多倍频微波信号产生[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0105003.
- 5 Xu Enming, Zhang Xinliang, Zhou Lina, *et al.*. All-optical SOA-based microwave filter with passband and stopband interchanged[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2534–2539.  
徐恩明, 张新亮, 周俐娜, 等. 基于半导体光放大器的通带与阻带相互切换的全光微波滤波器[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2534–2539.
- 6 Zheng Xin, Wang Yi, Lu Chunyan, *et al.*. Microwave photonic phase shifter based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator modulation sideband filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1223003.  
郑鑫, 王翌, 卢春燕, 等. 基于双通道马赫-曾德尔调制器调制边带滤波的微波光子移相器[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1223003.
- 7 Yuan Yu, Jianji Dong, Xiang Li, *et al.*. All optical microwave photonic filter with bandpass and notch filtering shapes[C]. *SPIE*, 2010, 7988: 79881Z.
- 8 L N Zhou, Y J Cheng, E M Xu. Coherence-free cascade IIR microwave photonic filter with high Q factor[J]. *Electron Lett*, 2011, 47(13): 754–755.
- 9 Enming Xu, Fei Wang, Lipei Li, *et al.*. Cascaded microwave photonic filters with multiple infinite impulse responses based on wavelength conversion[C]. *Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2011. 1–6.
- 10 Qi Chunhui, Pei Li, Ning Tigang, *et al.*. Analysis of quality factor for one-order infinite impulse response microwave photonic filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1314–1317.  
祁春慧, 裴丽, 宁提纲, 等. 一阶无限抽头响应微波光子滤波器的品质因数分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1314–1317.
- 11 Kun Zhu, Haiyan Ou, Hongyan Fu, *et al.*. A simple and tunable single-bandpass microwave photonic filter of adjustable shape[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(23): 1917–1919.
- 12 B Ortega, J Mora, D Capmany, *et al.*. Highly selective microwave photonic filters based on active optical recirculating cavity and tuned modulator hybrid structure[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(20): 1133–1135.
- 13 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.

栏目编辑: 王晓瑛