

## 可调谐窄带宽的负系数微波光子滤波器

贺超<sup>1</sup>, 廖同庆<sup>1</sup>, 吴昇<sup>2</sup>, 魏小龙<sup>3</sup>

(1. 安徽大学 电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥师范学院 计算机系, 安徽 合肥 230601;  
3. 安徽庆宇光电科技有限公司, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 针对负系数微波光子滤波器很难用正系数的光学抽头来实现, 提出了一款基于色散器件级联的可调谐、窄带宽、负系数微波光子滤波器。利用整形后的多波长光纤激光器的输出信号作为滤波器的抽头光源, 将单模光纤与 F-P 光纤环级联作为延迟单元, 实现滤波器的频率选择性。利用相位调制器和级联的色散器件共同作用, 实现负系数的微波光子滤波器。实验得到了波长间隔为 0.34 nm 的多达 37 个激光信号的稳定输出, 进而基于此实验结果仿真研究了 F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数  $r$ 、不同长度的可调谐光纤延迟线(TODL)和延迟单元中不同长度的单模光纤等参数对微波光子滤波器性能的影响。

**关键词:** 微波光子滤波器; 多波长光纤激光器; F-P 光纤环; 负系数; 窄带宽

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0920003

## Tunable narrow bandwidth negative coefficient microwave photonic filter

He Chao<sup>1</sup>, Liao Tongqing<sup>1</sup>, Wu Sheng<sup>2</sup>, Wei Xiaolong<sup>3</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Hefei Normal University, Hefei 230601, China;

3. Anhui Qingyu Photoelectric Technology Co., Ltd, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A tunable, narrow bandwidth, negative coefficient microwave photonic filter based on cascaded dispersion devices was proposed, because the negative coefficient microwave photonic filter was very difficult to realize by the way of positive coefficient optical taps. The reshaped output signals of the multi-wavelength fiber laser were used as the tap of the filter. SMF and the F-P fiber ring were cascaded as a delay unit to realize the frequency selectivity of the filter. The negative coefficient was realized by a mixture of phase modulator and cascaded dispersion devices. As many as 37 stable laser signals with 0.34 nm wavelength interval were obtained by the experiment. And then based on the experiment results, the effects of coupling coefficient  $r$  of  $C_2$ ,  $C_3$  in the F-P fiber ring, different length TODL, and different length SMF in the delay unit etc. on the microwave photonic filters performance were simulated and studied.

**Key words:** microwave photonic filter; multi-wavelength fiber laser; F-P fiber ring; negative coefficient; narrow bandwidth

收稿日期: 2017-01-06; 修订日期: 2017-02-05

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2015ZD04)

作者简介: 贺超(1989-), 男, 硕士生, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: hotelgao@163.com

导师简介: 廖同庆(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: t.liao@ahu.edu.cn

## 0 引言

微波光子滤波器是在光域上处理微波信号,它利用了光学器件带宽大、损耗小、体积小、抗电磁干扰的优势,可以克服传统滤波器中存在的“电子瓶颈”,并且微波光子滤波器的可调性与可重构性要远优于传统的电子微波滤波器。微波光子滤波器因其优越的特性,在微波光子链路、高速光纤无线接入网、阵列天线、光学传感和雷达系统等领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。

利用相干方式实现微波光子滤波器的方案具有很大的局限性,因此目前微波光子滤波器普遍采用非相干方式来实现<sup>[2]</sup>。采用独立激光器阵列<sup>[3]</sup>作为微波光子滤波器抽头光源导致系统复杂、成本高、调谐性差;光谱分割梳状多波长光源<sup>[4]</sup>作为微波光子滤波器抽头光源会引入较大强度噪声,重构性差。而且,非相干滤波系统是信号的光强叠加,导致了滤波器的抽头系数为正,只能实现低通滤波,这就限制了滤波器的使用范围。而带通和高通滤波器都很难用正系数的光学抽头来实现,要想实现带通滤波就必须使抽头系数中含有负系数或复系数<sup>[5-6]</sup>。目前实现负系数微波光子滤波器的主流方式是利用相位调制器及色散器件本身的负系数特性共同作用而成,但滤波器的频率选择性与可调谐性不够<sup>[7-8]</sup>。

文中利用可调谐的多波长光纤激光器作为抽头

光源,通过调节波长间隔来实现微波光子带通滤波器自由频谱范围(FSR)的调谐,采用 Sagnac 干涉仪对多波长激光信号进行整形从而有效提高微波光子带通滤波器的主旁瓣抑制比(MSSR)。通过将单模光纤和 F-P 光纤环级联形成延迟单元,用于提高负系数微波光子滤波器的  $Q$  值,进而获得很好的频率选择性。相比于激光器阵列,可调谐多波长光纤激光器作为系统光源,降低了系统的成本,提高了灵活性。相比于宽带光谱切割光源,提高了光源质量,降低了系统噪声。

## 1 实验结构与原理分析

基于色散器件级联的负系数微波光子滤波器结构如图 1 所示,该滤波器由三部分组成。图 1(a)为多波长掺铒光纤激光器<sup>[9-12]</sup>,此激光器输出的激光信号进入图 1(b)所示的 Sagnac 干涉仪,调节 Sagnac 干涉仪对激光信号进行整形。整形后的激光信号进入图 1(c)所示的延迟单元,该延迟单元中的相位调制器和级联的色散器件共同作用实现负系数,经过光电探测器得到该滤波器的输出信号。

如图 1(a)所示激光器主要包括波分复用器(WDM)、高掺杂掺铒光纤(EDF)、偏振相关隔离器(PD-ISO)、偏振控制器(PC<sub>1</sub>)、保偏光纤(PMF<sub>1</sub>)和耦合器(C<sub>1</sub>)等。其中,长度为 46 cm 的高掺杂掺铒光纤作为增益介质,在 1530 nm 处吸收系数为 110~120 dB/m,

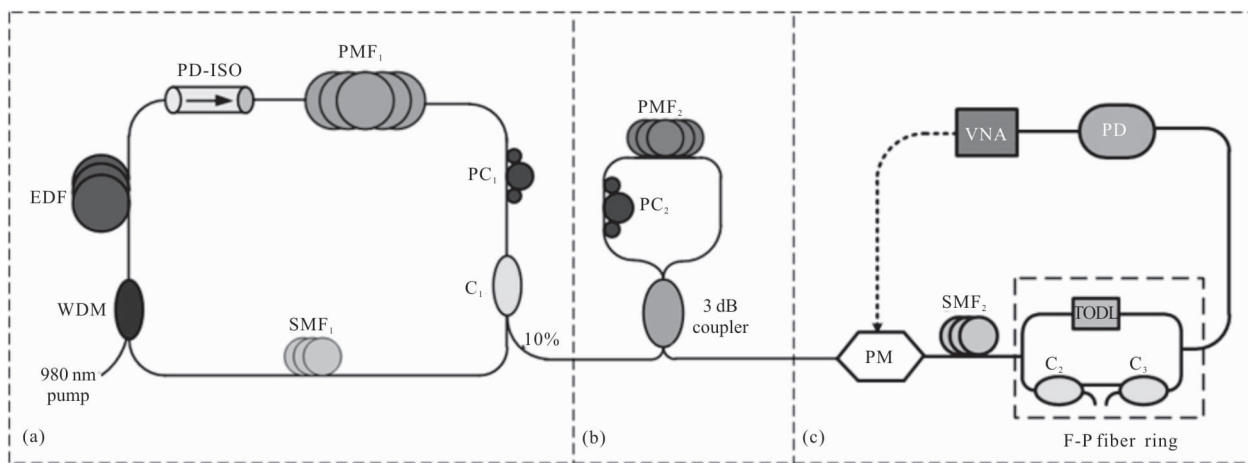


图 1 可调谐、窄带宽、负系数微波光子滤波器结构示意图

Fig.1 Structure of tunable, narrow bandwidth, negative coefficient microwave photonic filter

11 m 长的双折射系数为  $5.16 \times 10^{-4}$  的保偏光纤用以改变谐振腔内双折射强度,长度为 10 km 的 SMF<sub>1</sub> 用

来增加四波混频效应。通过调节 PC<sub>1</sub> 来改变谐振腔内的偏振态,使光纤激光器输出不同的多波长激光

信号。

图 1(b)所示的 Sagnac 干涉仪主要由偏振控制器(PC<sub>2</sub>)和 3 dB 耦合器,以及合适长度的保偏光纤(PMF<sub>2</sub>)构成。通过调节 PC<sub>2</sub> 使 Sagnac 干涉仪的透射谱与多波长激光器的输出相匹配,从而更好地控制多波长光源的抽头权重。

经过 Sagnac 干涉仪整形后的激光信号进入图 1(c)所示的延迟单元,该部分由相位调制器(PM)、单模光纤(SMF<sub>2</sub>)、F-P 光纤环、光电探测器(PD)和矢量网络分析仪(VNA)组成。激光信号进入 PM 实现相位调制到强度调制的转换,并且与 SMF<sub>2</sub> 和 F-P 光纤环级联构成的色散器件共同作用实现滤波器的负系数。PD 用于检测恢复出来的射频信号,从 PD 出来的射频信号接入 VNA,从而观察滤波器的频率响应。

F-P 光纤环包括耦合器(C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>)与可调谐光纤延迟线(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特性。

由参考文献[7]可知 F-P 光纤环中 TODL 的长度应为:

$$L_4 = \frac{c}{n_{\text{eff}} \times \text{FSR}_{\text{F-P}}} = \frac{c}{n_{\text{eff}} \times \frac{\text{FSR}_{\text{SMF2}}}{q}} = \frac{q \times c \times \overline{D_m} \times L_3 \times \Delta\lambda}{n_{\text{eff}}} \quad (q=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff}}$  为 TODL 的有效折射率; $\text{FSR}_{\text{F-P}} = \frac{1}{\tau_2} = \frac{c}{L_4 n_{\text{eff}}}$ ,

$\text{FSR}_{\text{SMF2}} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\overline{D_m} \times L_3 \times \Delta\lambda}$ ,  $\text{FSR}_{\text{SMF2}} = q \cdot \text{FSR}_{\text{F-P}}$  ( $q=1, 2, 3, \dots$ )。

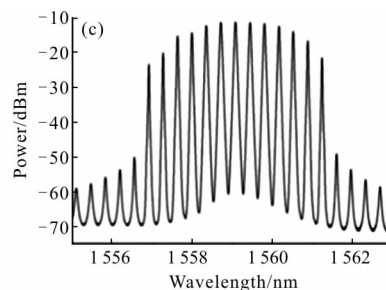
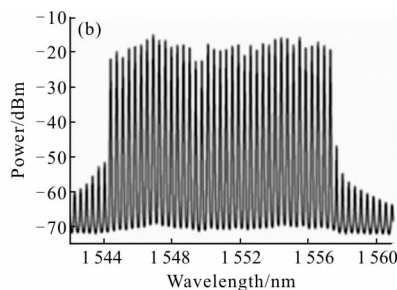
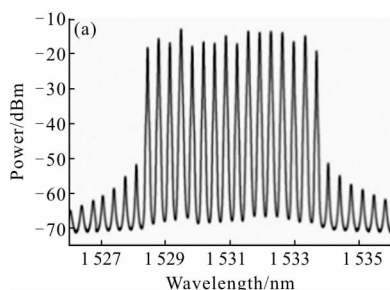


图 2 多波长激光信号

Fig.2 Multi-wavelength laser signal

0.352 nm 的 16 个多波长激光信号;图 2(b)为中心波长位于 1551 nm, 波长间隔为 0.34 nm 的 37 个多波

根据琼斯矩阵可知 F-P 光纤环的传输函数为<sup>[13]</sup>:

$$H_{\text{F-P}}(f) = \frac{r^2}{1 + (1-r)^2 - 2(1-r)\cos(\omega\tau_2)} \quad (2)$$

式中: $r$  为 F-P 光纤环中耦合器 C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 的耦合系数; $\omega$  为角频率; $\tau_2$  是经过如公式(1)所示的长度为  $L_4$  的 F-P 光纤环时所产生的时延。进而可得该微波光子滤波器的传输函数为<sup>[8,13]</sup>:

$$H(f) = \underbrace{\cos\left(\frac{\pi \overline{D_m} L_3 \lambda_m^2 f^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right)}_{H_1(f)} \cdot \underbrace{\sum_{m=1}^N P_m \exp[i2\pi f(m-1)\tau_1]}_{H_2(f)} \cdot \underbrace{\frac{r^2}{1 + (1-r)^2 - 2(1-r)\cos(\omega\tau_2)}}_{H_3(f)} \quad (3)$$

式中: $H_1(f)$  为单模光纤的传输函数; $H_2(f)$  为典型的横向低通微波光子滤波器的频率响应; $H_3(f)$  为 F-P 光纤环的传输函数; $H_4(f)$  为该系统不考虑 F-P 光纤环时的频率响应; $\overline{\lambda_m}$  和  $\overline{D_m}$  分别为多波长光源的平均波长和经过 SMF<sub>2</sub> 后的平均累积色散; $L_3$  为 SMF<sub>2</sub> 的长度; $N$  为多波长光纤激光器的波长数; $P_m$  为多波长光源各波长的归一化功率值; $\tau_1 = \overline{D_m} L_3 \Delta\lambda$  为 SMF<sub>2</sub> 引入的延迟, $\Delta\lambda$  为多波长光源各波长之间的间隔。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 抽头光源的产生

对于图 1(a)所示的多波长光纤激光器,通过调节 PC<sub>1</sub> 来改变谐振腔内激光的偏振态,进而得到如图 2 所示的三种稳定的激光输出。

图 2(a)为中心波长位于 1531 nm, 波长间隔为

长激光信号;图 2(c)为中心波长位于 1559 nm, 波长间隔为 0.375 nm 的 13 个波长激光信号。分析图 2 可

知, 输出激光的中心波长从 1531 nm 调谐到 1559 nm 覆盖了整个 C 波段。

其中, 图 2(b) 所示的输出激光信号多达 37 个, 且性能很稳定, 在接下来的滤波器性能的仿真研究

中将以此激光信号为例进行研究。

如图 2 所示的多波长激光信号经过如图 1(b) 所示的 Sagnac 干涉仪整形后的归一化输出信号如图 3 所示。

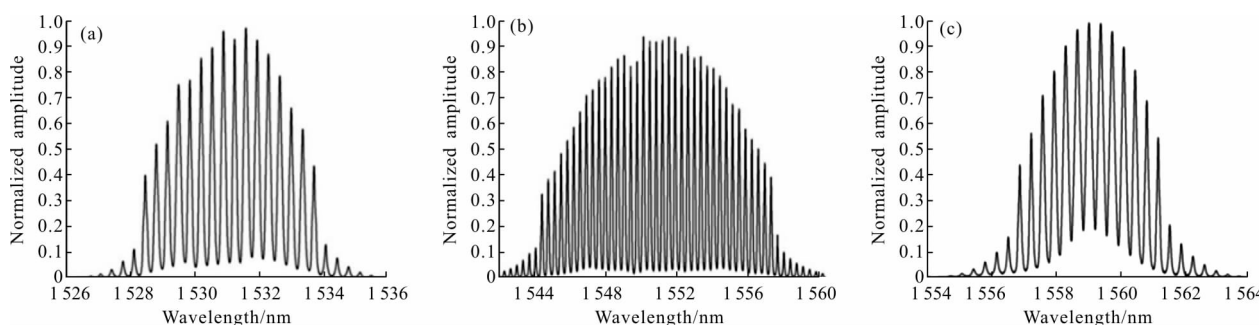


图 3 整形后的归一化多波长激光信号

Fig.3 Normalized multi-wavelength laser signal after shaping

## 2.2 不同耦合系数时微波光子滤波器的响应

当如图 3(b) 所示的信号源输入到如图 1(c) 所示的延迟单元, SMF2 的长度为 30 km, TODL 中的  $q$  为 1, 此时 FSR 为 5.446 GHz, F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数为  $r$ 。在不同耦合系数下, 微波光子滤波器的频率响应如图 4 所示, 具体参数如表 1 所示。

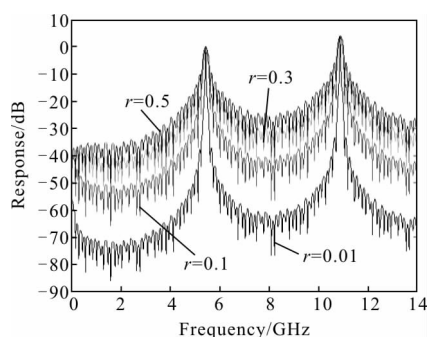


图 4 不同耦合系数时微波光子滤波器的响应

Fig.4 Response of microwave photonic filters with different coupling coefficients

表 1 不同耦合系数时微波光子滤波器的响应

Tab.1 Response of microwave photonic filters corresponding to different coupling coefficients

$r$	0.01	0.1	0.3	0.5
MSSR/dB	36.73	17.59	10.93	9.58
3 dB band-broad/MHz	19.5	132.3	189	200.6
$Q$	279.28	41.16	28.81	27.15

从表 1 中的数据看出, F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数为 0.01 时, 滤波器的频率选择性好。当  $r$  由 0.01 增加到 0.5 时, MSSR 从 36.73 dB 减小到 9.58 dB,  $Q$  值从 279.28 减小到 27.15。从而可以得到: 随着  $r$  逐渐增大, 滤波器的整体性能逐渐下降, 因此选择 F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数为 0.01。

## 2.3 不同长度单模光纤时微波光子滤波器响应

当 F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数为 0.01、TODL 中的  $q$  为 1, 不同长度的 SMF<sub>2</sub> 所对应滤波器响应如图 5 所示, 具体参数如表 2 所示。

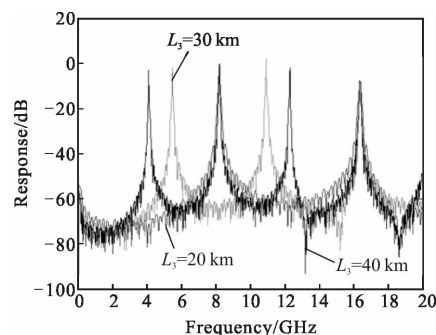


图 5 不同长度单模光纤时微波光子滤波器的响应

Fig.5 Response of microwave photonic filters with different length of SMF

从表 2 中的数据看出, SMF<sub>2</sub> 的长度从 20 km 增加到 40 km 时, MSSR、3 dB 带宽、FSR 的性能逐渐增强。SMF<sub>2</sub> 的长度是 20 km 时  $Q$  值为 210.54, 长度是 30 km 时  $Q$  值最小为 193.81, 长度是 40 km 时  $Q$  值最大为 270.53, 随着 SMF<sub>2</sub> 的长度增加  $Q$  值略微减



小再增大。综合分析可知,当  $SMF_2$  的长度为 40 km 时滤波器的频率选择性和对边带抑制性能最好。

表 2 不同长度单模光纤所对应的微波光子滤波器的响应

Tab.2 Response of microwave photonic filters corresponding to different length of single mode fiber

Length/km	20	30	40
MSSR/dB	35.35	35.45	35.52
3 dB band-broad/MHz	38.8	28.1	15.1
FSR/GHz	8.169	5.446	4.085
$Q$	210.54	193.81	270.53

## 2.4 不同长度 TODL 时微波光子滤波器的响应

当  $SMF_2$  长度为 40 km, F-P 光纤环中耦合器的耦合系数  $r$  为 0.01, 不同长度的 TODL 所对应的滤波器响应如图 6 所示, 具体参数如表 3 所示。

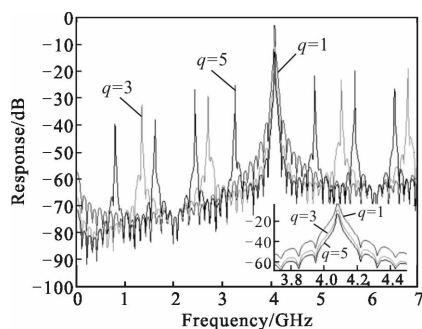


图 6 不同长度 TODL 时微波光子滤波器响应

Fig.6 Response of microwave photonic filters with different length of TODL

表 3 不同长度 TODL 所对应的微波光子滤波器的响应

Tab.3 Response of microwave photonic filters corresponding to different length of TODL

$q$	1	3	5
MSSR/dB	35.52	38.9	38.9
3 dB band-broad/MHz	15.1	11	8
$Q$	270.53	371.36	510.63

从表 3 中的数据看出, TODL 的长度从 5.06 cm

( $q=1$ )增加到 25.32 cm( $q=5$ )时, MSSR 增加了 3.28 dB, 3 dB 带宽减小了 7.1 MHz,  $Q$  值提高了 240.095。

## 3 结 论

利用高掺杂掺铒光纤作为增益介质, 实验得到输出激光的中心波长位于 1 551 nm, 波长间隔为 0.34 nm, 输出波长数多达 37 个的多波长激光信号。使用整形后的多波长光纤激光器的输出信号作为滤波器的抽头光源, 有效提高了微波光子带通滤波器的主旁瓣抑制比, 并通过调节波长间隔来实现微波光子带通滤波器自由频谱范围的调谐。通过将单模光纤和 F-P 光纤环级联形成延迟单元, 用于提高负系数微波光子滤波器的  $Q$  值, 进而获得很好的频率选择性。研究结果表明:  $SMF_2$  长度为 40 km、F-P 光纤环中  $C_2$ 、 $C_3$  的耦合系数为 0.01、TODL 为 25.32 cm 时微波光子滤波器的性能最好, 其主旁瓣抑制比为 38.9 dB, 3 dB 带宽为 8 MHz,  $Q$  值为 510.63。

## 参考文献:

- [1] Preussler S, Zadok A, Stern Y, et al. Microwave-photonic filters[C]//German Microwave Conference, 2016.
  - [2] Xu E, Pan S, Li P. Reconfigurable microwave photonic filter based on polarization modulation [J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(3): 0311201-0311205.
  - [3] Mora J, Ortega B, Andres M V, et al. Dynamic opticaltransversal filters based on a tunable dispersionfiber Bragg grating [C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics. IEEE, 2002: 203-206.
  - [4] Huang L, Chen D, Zhang F, et al. Microwave photonicfilter with multiple independently tunable passbands based on a broadband optical source [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25539-25552.
  - [5] Jin Yanbing, Erwin H W Chan, Feng Xinhuan, et al. Tunable negative coefficient microwave photonic filter based on a polarization modulator and a polarization beam interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(5): 14-16.
  - [6] Long Jie, Li Zhengyong, Ye Zhuxiong, et al. Frequency multiplication of microwave photonic signal based on biased Mach-Zehnder modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4078-4081. (in Chinese)
- 龙洁, 李政勇, 叶祝雄, 等. 基于偏置马赫-曾德调制器的微波光子信号倍频 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12):

- 4078–4081.
- [7] Zhang Ailing, Huang Cong, Wu Xiaojun. A band-pass microwave photonic filter based on Lyot-Sagnac filter and cascaded optical structures [J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 10(1): 5–8.
- [8] Zhang Lili, Tong Zhengrong, Cao Ye, et al. Microwave photonic bandpass filter based on multi-wavelength fiber lasers and cascaded dispersion devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0205004. (in Chinese)  
张丽丽, 童峥嵘, 曹晔, 等. 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 [J]. 中国激光, 2014, 41 (2): 0205004.
- [9] Feng Dejun, Huang Wenyu, Ji Pengyu, et al. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1097–1101. (in Chinese)  
冯德军, 黄文育, 纪鹏宇, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器[J]. 光学 精密工程, 2013, 21 (5): 1097–1101.
- [10] Jiang Mingshun, Feng Dejun, Sui Qingmei. Tunablering fiber laser using mechanical-inducedlong-period fiber grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (2): 311–316. (in Chinese)  
姜明顺, 冯德军, 隋青美. 机械感生长周期光纤光栅的可调谐环形光纤激光器 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 311–316.
- [11] Pan Honggang, Tong Zhengrong, Zhang Ailing, et al. Switchable narrow line-width dual-wavelength erbium-doped fiber laser using cascaded multi-mode Bragg gratings and high fineness filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3912–3917. (in Chinese)  
潘洪刚, 童峥嵘, 张爱玲, 等. 基于级联多模布拉格光栅和高精细度滤波器的可调谐双波长窄线宽掺铒光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3912–3917.
- [12] Shahabuddin M Z, Yusoff Z, Ahmad H, et al. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using four-wave mixing effect in doped fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 80–81.
- [13] Fang Xiuli, Tong Zhengrong, Cao Ye, et al. Narrow linewidth ring-cavity fiber laser using F–P fiber ring filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 329–333. (in Chinese)  
方秀丽, 童峥嵘, 曹晔, 等. 采用 F–P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 329–333.