

## 采用可调 Mach-Zehnder 滤波的波长可切换掺铒光纤激光器

丁香栋<sup>1</sup>, 何巍<sup>1</sup>, 姚齐峰<sup>1</sup>, 骆飞<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016; 2. 北京信息科技大学 生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100192)

**摘要:** 为了实现高稳定性的可调谐激光输出, 提出并设计了一种基于马赫-曾德(M-Z)结构和光纤光栅串结合的掺铒光纤激光器, 在 M-Z 干涉结构的一个干涉臂中加入光学延迟线(ODL), 实现对干涉间隔的灵活可调。系统结构设计采用 976 nm 波长的 LD 作为泵浦源, 长度为 6 m 的掺铒光纤作为增益介质; 采用光栅串将特定波长的光反射回环形腔形成振荡; 采用 M-Z 结构产生梳状滤波用来对光栅串反射回的光进行选择; 通过调节 ODL 来改变腔内损耗, 进而实现激光的可调谐输出, 并通过在系统中加入可饱和吸收体(SA)和子腔结构来抑制波长的跳变。实验中, 在泵浦功率为 100 mW 时, 实现了单波长双波长和三波长的稳定的激光输出。单波长共输出 13 个, 调谐范围为 1 570~1 596 nm, 调谐间隔为 2 nm, 边模抑制比均大于 50 dB。

**关键词:** 可调谐掺铒光纤激光器; M-Z 滤波结构; 光学延迟线; 光纤光栅串

**中图分类号:** TN2481 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1005006

## Switchable erbium-doped fiber laser utilizing tunable Mach-Zehnder filter

Ding Xiangdong<sup>1</sup>, He Wei<sup>1</sup>, Yao Qifeng<sup>1</sup>, Luo Fei<sup>1</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to realize a highly stable and tunable laser output, an Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on Mach-Zehnder filter structure and grating array made by femtosecond laser was proposed, and an optical delay line (ODL) was set into one interference arm to tune the interference interval flexibly. In the designed configuration, one 976 nm laser diode (LD) was used for pumping; an Er<sup>3+</sup>-doped fiber (EDF) of 6 m length was selected as the gain medium; The grating array will select the femtosecond light reflection loop cavity specific wavelength oscillation form; the M-Z structure, which was used as comb filter, was adopted to select the wavelength reflected by the grating array; Tuning laser output can be

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1212); 北京市重大科技计划项目(PXM2013-014224-000077, PXM2012-014224-000019); 光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题(GD20150005)

作者简介: 丁香栋(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光纤激光器与传感器方面的研究。Email: 946323580@qq.com

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

realized by adjusting the ODL. In the experiment, when the pump power was 100 mW, a stable and tunable single, dual and triple wavelength output laser was observed. The single wavelength tunable interval was 2 nm within 1 570–1 596 nm, and the side-mode suppression ratios (SMSRs) of all were more than 50 dB.

**Key words:** tunable Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser; M-Z filter structure; ODL; fiber grating array

## 0 引言

随着现代社会通信容量需求急剧增加, 现代光纤波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 通信系统正朝着信道越来越多的方向发展。采用多个单波长激光器是最直接提供多路信号的方法, 但是单纯地增加光源的数量势必会增加成本, 因此性能稳定的多波长可调谐光纤激光器越来越受到人们的青睐。不仅如此, 其在光纤传感以及光谱分析上都得到了较大应用<sup>[1-2]</sup>。更使得多波长可调谐激光器成为研究的热点。掺铒光纤在 1 520~1 600 nm 拥有较强的吸收谱线, 而该波段基本是 C 和 L 波段的范围, 这就使得掺铒光纤激光器(Erbium Doped Fiber Laser, EDFL)成为多波长光纤激光器的热点<sup>[3-5]</sup>。

目前, 用于实现多波长可调谐输出的机理多种多样, 利用马赫-曾德(Mach-Zehnder, M-Z)结构、塞格纳克(Sagnac)结构、光子晶体光纤、级联光纤光栅串、光纤的非线性效应等技术手段均能够实现波长的可调谐输出<sup>[6-10]</sup>。基于光纤的 M-Z 结构、Sagnac 结构由于其独特的性能被广泛地用作梳状滤波器, 是实现多波长重要手段。2012 年, 匡芬等人<sup>[11]</sup>利用 Sagnac 结构与 3 个光纤光栅构成环形腔, 实现了 3 个波长的可切换输出。同年, H. Ahmad 等人<sup>[12]</sup>将微观的 M-Z 干涉仪加入线性腔中, 通过改变两个干涉臂的长度进而影响到简谐振动的波长, 从而实现从 1 496~1 507 nm 共 10 个波长的可调谐激光的输出。同年, Azlan Sulaiman 等<sup>[13]</sup>利用微型光纤 M-Z 结构在 1 530.2~1 532.7 nm 可调谐激光输出, 边模抑制比可达 30 dB 以上。2015 年, 钟敬武等人<sup>[14]</sup>设计了一种基于 M-Z 光纤干涉滤波器的可调谐多波长掺铒环形光纤激光器, 利用 Sagnac 光纤反射镜实现反射式滤波, 通过调整偏振控制器实现了 2 μm 波段可调谐多波长输出, 观测到了 3 个波长的可调谐激光。同年, 曹晔等人<sup>[15]</sup>设计出了一种基于 Sagnac 环和

M-Z 级联滤波的可调谐掺铒光纤激光器, 通过电路驱动偏振控制器, 实现了 6 个波长激光在 2.2 nm 范围内整体连续可调谐。

文中研究设计了一种 M-Z 结构, 并在其一个干涉臂加入光学延迟线 (Optical Delay Line, ODL) 来改变谱线间距, 并结合飞秒刻写的光纤光栅串构成多波长可调谐光纤激光器, 并且在腔中加入稳频器件来抑制跳摸, 通过改变 ODL 来实现不同波长的输出。对激光器的产生原理和设计结构进行了分析实验, 实验现象良好。

## 1 实验装置及原理

激光器系统设计结构如图 1 所示。系统由中心波长为 976 nm 的泵浦源 (Laser Diode, LD)、掺铒光纤 (Erbium Doped Fiber, EDF)、976/1 550 nm 波分复用器、偏振控制器 (Polarization Controller, PC)、光学延迟线 (ODL)、4 支 3 dB 耦合器 (Optical Coupler, OC), 光纤环形器 (Circulator), 飞秒激光刻写的光纤光栅串 (grating array) 以及 1 支分光比为 10:90 的耦合器构成。其中, 同一规格的 EDF 分为两段, 一段作为激光器增益介质; 另一段为未泵浦的掺铒光纤作为可饱和吸收体 (Saturable Absorber, SA) 抑制模式跳变, 起到稳频效果; 光栅串内含 13 个栅区, 中心波长为 1 571、1 573、1 575、…、1 596 nm, 相邻两个波长间隔为 2 nm, 栅区长度为 3.5 mm, 整个光栅串的长度仅为 18 cm。

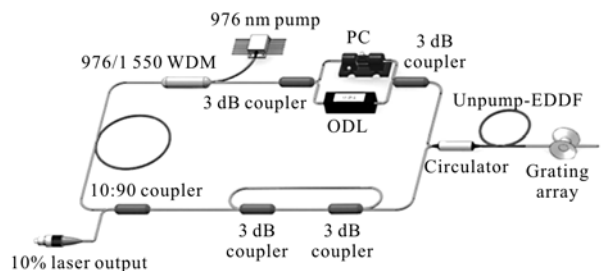


图 1 波长可调谐光纤激光器系统图

Fig.1 Diagram of wavelength tunable fiber laser

为防止泵浦源进入未泵浦掺铒光纤, 976 nm 的泵浦光通过 WDM 后向进入增益介质即掺铒光纤, 产生的后向自发辐射的光经过两个由 3 dB 耦合器构成的 M-Z 干涉结构形成梳状滤波谱, 经过环形器 1 端口后由 2 端口输出, 经过光纤光栅串后没有被梳状滤波谱抑制的波长反射回腔内继续振荡, 两个 3 dB 耦合器构成的光纤子腔结构用来稳频, 当反射光经过 10:90 耦合器后被分为两束, 其中占 90% 的一路光由 WDM 重新注入谐振腔进行放大, 占 10% 的另一路光作为输出与光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzers, OSA) 连接用于观测。一段与增益介质同规格的未泵浦掺铒光纤熔于环形器和光栅串之间用于可饱和吸收体稳频。

M-Z 干涉的基本关系如下:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda/n\Delta L \quad (1)$$

式中:  $\Delta\lambda$  为干涉谱线间隔即两个相邻的最高峰的距离;  $\lambda$  为入射光的波长;  $n$  为纤芯的有效折射率; 为两个干涉臂的臂长差。因此可以用 ODL 来改变两个干涉臂的臂长差, 通过调节 ODL 的延时时间即可以实现 M-Z 干涉谱间隔的改变。不同的延迟时间对应不同的梳状滤波谱线从而改变光栅串不同反射波长的损耗, 进而实现波长的可调谐输出。

## 2 实验结果及分析

实验中, 采用 JDSU 公司生产的中心波长为 976 nm 的 LD 进行泵浦, 其工作阈值电流为 26 mA; 增益光纤和作为可饱和吸收体的未泵浦的掺铒光纤为同规格, 长度分别为 6 m 和 1.5 m, 在 976 nm 和 1 530 nm 处的吸收系数为 3 dB/m; 采用四川超光公司生产的 ODL, 其延迟范围为 0~330 ps, 最小步进为 0.05 ps; 采用日本横河公司生产的 AQ6370 光谱仪进行数据采集, 分辨力为 0.02 nm; 飞秒激光刻写的光栅串为 femto fiber tec 公司生产, 光栅的反射率在 55%~65% 之间, 3 dB 线宽范围为 0.45~0.6 nm, 边模抑制比均大于 18 dB, 显现出良好的性能参数, 透射谱和反射谱如图 2 所示。

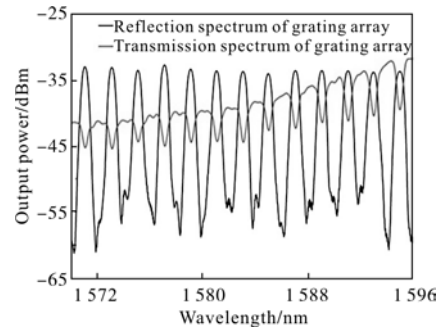


图 2 光栅串的反射谱和透射谱

Fig.2 Reflection and transmission spectra of grating array

首先, 对 M-Z 干涉的谱线进行测试, 通过调整偏振控制器使干涉的消光比达到最高后固定 PC, 固定光谱仪的分辨力为 0.02 nm, 当泵浦光为 100 mW 时, 分别测得 ODL 延迟时间为 210、211、212、213 ps 时的透射谱如图 3(a)~(d) 所示。从图中可以看出 M-Z 干涉的消光比大于 35 dB, 且随着延迟时间的增大, 两干涉臂的臂长差越来越大, 进而干涉间隔逐渐变小, 这符合公式(1)的反比例关系。

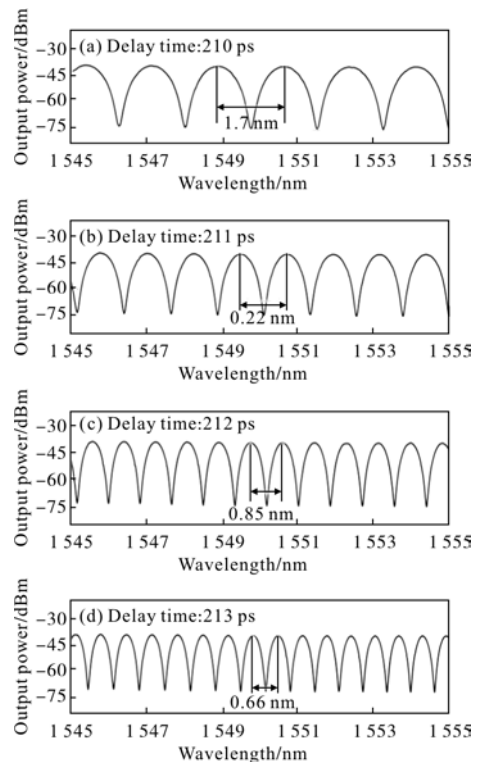


图 3 当延迟时间分别为 210、211、212、213 ps 时可调马赫-曾德尔结构的透射谱

Fig.3 Transmission spectrum of tunable M-Z structure when delay time is 210, 211, 212 and 213 ps respectively

将装置熔接成环形腔后，通过调节 ODL 可以实现激光的可调谐输出，在 APC 和光栅串的透射方向可以观测到激光输出，如图 4 所示，不同颜色的光谱分别为 1 571 nm 在输出端和透射端的输出激光，输出功率分别为-13.53 dB 和-7.91 dB，这是由于光栅的反射率不高导致的。从图中可以看出 M-Z 梳状滤波谱对光栅反射光的作用。图 4 中位置 1 处于波峰附近而被抑制弱；位置 2 刚好处于干涉谱的波谷处，因此完全被抑制。只有最接近波峰的反射光在腔内的损耗才最小最有可能起振形成激光输出。

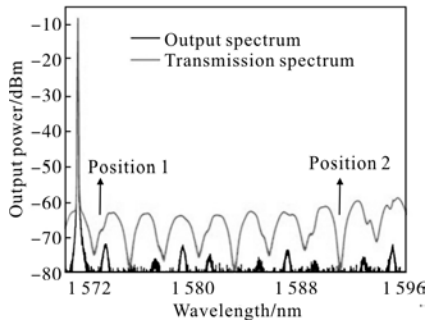


图 4 1 571 nm 处的输出光谱和透射光谱

Fig.4 Output and transmission spectra at 1 571 nm

如图 5(a)所示，通过调节 ODL 可以得到全部

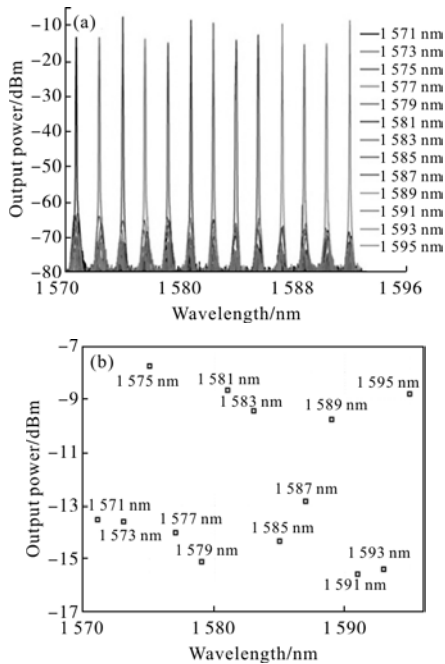
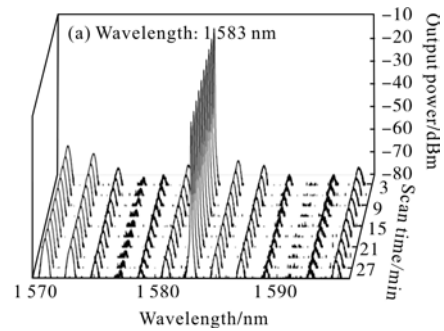


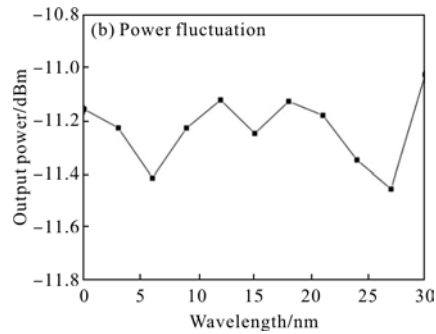
图 5 (a)单波长调谐输出；(b)每个波长的峰值功率  
Fig.5 (a)Single-wavelength tuning output;  
(b)peak power of each wavelength

13 个波长的激光输出，每个波长的边模抑制比均大于 50 dB，激光输出比较稳定，由于每个光栅的反射率不同，各波长的峰值功率如图 5(b)所示。

对单个激光输出波长进行监测，在波长 1 583 nm 处的输出稳定性如图 6 所示。实验中，测得了 30 min 内的激光输出光谱，每 3 min 测得一组，从图 6(a)中可以看出在 30 min 内激光输出比较稳定，没有明显的跳模现象，波长波动范围为 0.05 nm；功率波动为 0.428 dB。实验系统中采用了 SA 和子腔的双稳频结构，因此激光输出具有良好的稳定性。



(a) 光谱稳定性  
(a) Spectral stability



(b) 功率波动  
(b) Power fluctuation

图 6 1 583 nm 单波长输出激光稳定性测试

Fig.6 Stability measurement of 1 583 nm single-wavelength output laser

调节 ODL 使两个光栅的反射光在梳状滤波谱的波峰出时，当两个波长的振荡光在腔内达到平衡时就有可能实现多波长输出。图 7 为不同组合的双波长激光输出，边模抑制比均达到 40 dB 以上。从图 7(a)~(f)双波长的功率差分别为：2.925、4.927、2.877、5.545、0.027、0.269 dB。图 8 为波长分别为 1 573 nm 和 1 583 nm 双波长输出的光谱稳定性和

功率稳定性,在观测的 30 min 内两个波长没有发生明显的跳模现象,1 573 nm 和 1 583 nm 输出的功率漂移分别为 2.56 dB 和 2.88 dB,激光输出比较稳定。

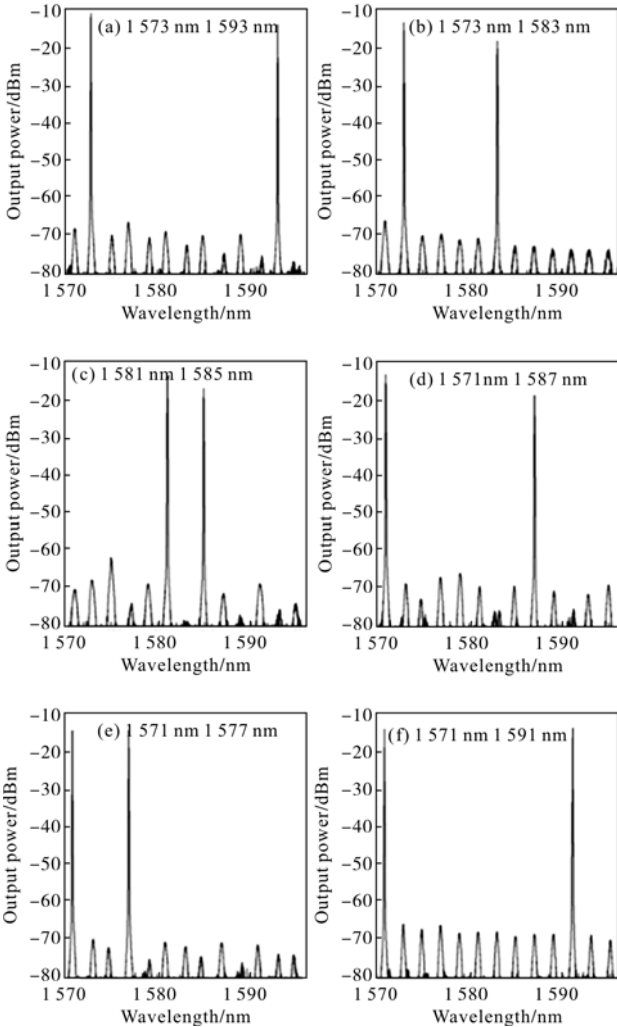
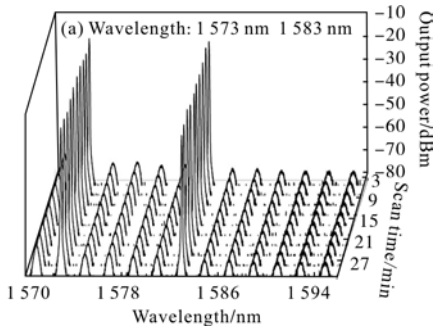
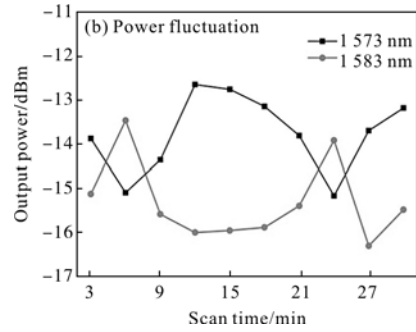


图 7 双波长激光输出

Fig.7 Dual-wavelength laser output



(a) 光谱稳定性  
(a) Spectral stability



(b) 功率波动

(b) Power fluctuation

图 8 双波长 1 573 nm 和 1 583 nm 激光输出的稳定性测试  
Fig.8 Stability measurement of dual-wavelength laser output at 1 573 nm and 1 583 nm

在实验中还观测到了 3 个波长的激光输出,如图 9 所示,3 个波长分别为 1 571、1 573、1 583 nm,对应的功率分别为 -16.246、-17.911、-12.585 dBm,最大最小功率差值为 3.661 dBm。理论上,还会输出更多的波长,但是随着输出波长的增加腔内的模式竞争更加激烈而复杂,实验中最多观测到五波长同时输出,但是各输出波长的功率差值较大且不稳定。

综上所述,文中设计的多波长掺铒光纤激光器可以产生稳定的可调谐的单波长双波长的激光输出,同时还可以产生较为稳定的三波长输出,实验现象良好。

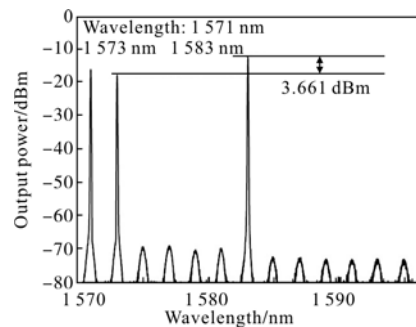


图 9 三波长激光输出的光谱

Fig.9 Spectra of triple-wavelength laser output

### 3 结论

文中设计研究了一种基于 M-Z 干涉结构和光栅串结合的可调谐掺铒光纤激光器。在 M-Z 结构中加入 ODL,通过调整 ODL 来改变 M-Z 干涉滤波谱线的间距,使光栅的反射光刚好处于梳状滤波谱的

波峰处,实现了波长的可调谐输出。单波长激光输出的可调谐范围从 1 570~1 596 nm,共输出 13 个波长,边模抑制比均大于 50 dB,激光输出稳定。该实验也可以实现多波长同时输出,双波长的输出组合多,输出稳定,三波长输出的功率差为 3.661 dBm。文中提出的掺铒光纤激光器具有结构简单、输出灵活可调和稳定性高等特点,因此可以被广泛地应用在光学传感、光纤通讯和光谱分析上,具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] Lopez Amo M, Fernandez Vallejo M, Leandro D. Bidirectional dual-wavelength Raman fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 399-401.
- [2] Bai Y. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 1102004.
- [3] He X, Wang D N, Liao C. A stable tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber linear-cavity laser[C]//Optical Communication Systems (OPTICS), 2011 Proceedings of the International Conference on. IEEE, 2011: 1-5.
- [4] Liu Y, Xing J, Jiao M, et al. Design and experimental study of two-wavelength erbium-doped fiber laser using a pair of fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, 28(3): 303-307.
- [5] He Wei, Zhu Liangqing, Lou Xiaoping, et al. A tunable dual-wavelength Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on self-feedback light injection [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 5(6): 1080-1085. (in Chinese)  
何巍, 祝连庆, 娄小平, 等. 基于自反馈光注入结构的双波长可调谐掺 Er<sup>3+</sup>光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2014, 5(6): 1080-1085.
- [6] Yang Xiufeng, Dong Fengjuan, Tong Zhengrong, et al. Tunable multi-wavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 53-57. (in Chinese)  
杨秀峰, 董凤娟, 童峥嵘, 等. 利用非线性偏振旋转效应的可调谐多波长光纤激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 53-57.
- [7] Chen Yuce, Wang Yong. Ultralow-noise tunable single-frequency fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1110-1115. (in Chinese)  
陈月娥, 王勇. 超低噪声单频可调谐光纤激光器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1110-1115.
- [8] Du Yong, Dong Xiaopeng, Chen Minxiu, et al. Tunable narrow linewidth fiber laser with two FBG-FPs [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 159-162. (in Chinese)  
杜勇, 董小鹏, 陈敏秀, 等. 双光纤光栅法-珀腔可调谐窄线宽激光器[J]. *激光与红外*, 2013, 43(2): 159-162.
- [9] Yang W, Lu P, Wang S, et al. A novel switchable and tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser at 2[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(11): 1161-1164.
- [10] He Wei, Zhu Lianqing, Dong Mingli, et al. Tunable and switchable thulium-doped fiber laser utilizing Sagnac loops incorporating two-stage polarization maintaining fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 29: 65-69.
- [11] Kuang Fen, Ye Zhiqing. Self-seeded multi-wavelength switchable erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1460-1463. (in Chinese)  
匡芬, 叶志清. 自激发多波长可开关掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2012, 41(12): 1460-1463.
- [12] Ahmad H, Zulkifli M Z, Latif A A, et al. Tunable single longitudinal mode S-band fiber laser using a 3 μm length of erbium-doped fiber[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(3): 268-273.
- [13] Azlan Sulaiman, Harun S W, Arof H, et al. Compact and tunable erbium-doped fiber laser with microfiber mach-zehnder interferometer [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9): 1165-1168.
- [14] Zhong Jingwu, Ma Wanzhuo, Zhang Peng, et al. Multi-wavelength tunable fiber laser operating at 2 μm band [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 44(3): 262-265. (in Chinese)  
钟敬武, 马万卓, 张鹏, 等. 2 μm 波段多波长可调谐光纤激光器研究[J]. *激光与红外*, 2015, 44(3): 262-265.
- [15] Cao Ye, Chen Lei, Lu Nan, et al. A tunable Erbium-doped fiber laser based on cascaded filtering of Sagnac loop and M-Z filter [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(1): 9-14. (in Chinese)  
曹晔, 陈磊, 鹿楠, 等. 基于 Sagnac 环和 M-Z 级联的可调谐掺铒光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(1): 9-14.