

doi:10.3788/gzxb20154408.0806006

基于光纤环形滤波器的双波长掺铒光纤激光器

何巍, 祝连庆, 董明利, 骆飞

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100192)

摘要:提出并设计了一种基于光纤环形滤波器的环形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器, 实现了稳定的单波长和双波长激光输出. 采用保偏光纤布喇格光栅作为选频器件; 两支分光比为 20 : 80 的 1×2 耦合器结合 2 m 保偏光纤构成环形滤波器, 抑制模式跳变, 提高激光输出稳定性, 通过调节滤波器内偏振控制器实现波长选择性输出; 采用长度为 1 m 的饱和吸收体起到稳频作用. 实验结果表明: 该激光器工作阈值为 71 mW, 在熔接滤波器后, 光谱特性得到改善; 调节偏振控制器可实现单波长激光可切换输出或双波长激光同时输出, 双波长间隔 0.88 nm, 1 535.5 nm 和 1 534.7 nm 单波长切换输出时最大功率分别为 0.078 dBm 和 -2.585 dBm, 激光 3 dB 线宽为 0.16 nm 和 0.15 nm; 在室温 20 min 内, 输出激光波长漂移小于 0.06 nm, 功率变化小于 1.3 dB.

关键词: 双波长; 掺铒光纤; 环形滤波器; 保偏光纤布喇格光栅; 保偏光纤; 光纤激光器; 线宽

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)08-0806006-6

Dual-wavelength Erbium-doped Fiber Laser Based on Fiber Ring Filter

HE Wei, ZHU Lian-qing, DONG Ming-li, LUO Fei

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to realize a dual-wavelength laser output, a ring cavity erbium-doped fiber laser based on fiber ring filter was proposed. In designed system configuration, one polarization maintaining-fiber Bragg grating was adopted as wavelength selector. The fiber ring filter was fabricated by two couplers with 20 : 80 splitting ratio and 2 m polarization maintaining fiber to constrain the mode hopping and improve the working stability, and the polarization controller inserted into the filter can be used to switch laser wavelengths. In order to guarantee the system stability, a saturable absorber of 1 m long was spliced between circulator and polarization maintaining-fiber Bragg grating. In the experiment, the working threshold is 71 mW, and the spectrum character of two lasers are improved after filter is used. The switchable single wavelength and two simultaneous wavelengths can be realized by adjusting the polarization controller, the wavelength space is 0.88 nm, and the maximum output power of single laser 1 535.5 nm and 1 534.7 nm is 0.078 dBm and -2.585 dBm, and 3 dB linewidth are 0.16 nm and 0.15 nm respectively. At room temperature, over 20 min scan time, the wavelength shifts are less than 0.06 nm, the power fluctuation are less than 1.3 dB.

Key words: Dual-wavelength; Erbium-doped fiber; Fiber ring filter; Polarization maintaining fiber Bragg grating; Polarization maintaining fiber; Fiber laser; Linewidth

OCIS Codes: 060.2310; 060.2410; 060.2420; 060.3738; 140.3500

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(No. IRT1212, 光电信息与仪器)、北京市重大科技计划项目(Nos. PXM2013_014224_000077, PXM2012_014224_000019)和光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题(No. GD20130006)资助

第一作者: 何巍(1986—), 男, 博士, 主要研究方向为光纤激光器及光纤光栅传感. Email: gregg1986@sina.com

导师(通讯作者): 祝连庆(1963—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感和光纤激光器、光电检测技术. Email: zhulianqing@sina.com

收稿日期: 2014-11-06; **录用日期:** 2015-01-06

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

0 引言

与传统固态激光器相比,光纤激光器具有结构紧凑、信噪比高、散热性好、窄线宽等优势,在光纤传感、高精度光谱分析、激光雷达探测、生物医疗等领域具有广泛的应用^[1-3]. 其中,双波长窄线宽光纤激光器由于输出稳定、低损耗、波长灵活可调谐等特点,可应用于密集波分复用、微波发射、激光通信等方面. 目前,研究具有高稳定性的双波长可调谐光纤激光输出已经成为本领域的热点^[4-6].

2009年,华中科技大学陈国杰等人在环形腔光纤激光器中将带通滤波器与带阻滤波器级联,并结合饱和吸收体(Saturable Absorber, SA),获得了边模抑制比大于49 dB,波长间隔0.4 nm的双波长激光输出^[7]; 2009年, Tseng Chih-lung 等人在线形腔结构中实现了基于6支光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的多波长激光输出^[8]; 2010年 Han Jae-Ho 等人采用级联两支具有不同反射波长的FBG并结合偏振控制器(Polarization Controller, PC),实现了基于环形腔结构的双波长可调谐激光输出^[9]; 2011年, Wang Fei 等人在环形腔结构中采用可调谐滤波器并结合马赫-曾德滤波器,实现了间隔0.08 nm,边模抑制比大于50 dB的双波长激光输出^[10]; 同年, Sun Guo-yong 等人在 Sagnac 环形滤波器中熔接一段高双折射率光纤,应用于多波长可调谐环形腔掺铒光纤激光器^[11]; 2012年,匡芬等人报道了一种采用级联三支FBG的环形光纤激光器,通过调制由保偏光纤构成的 Sagnac 环形滤波器实现3波长激光切换输出^[12]; 2013年,方秀丽等人采用两支30:70耦合器和一段掺铒光纤构成F-P滤波器,并应用于环形腔光纤激光器,获得线宽小于0.07 nm的双波长激光输出^[13]; 2013年, Sierra-Hernandez J M 等人在环形腔中熔接一段光子晶体光纤获得双波长激光输出,功率漂移小于1 dB^[14]; 2014年, Cheng Jian-qun 等人在光纤环形镜中熔接多模光纤,将其作为谐振腔的一个反射端,获得了波长间隔2 nm、功率变化小于1.5 dB、信噪比大于45 dB的可调谐双波长激光输出^[15]. 综上所述,双波长光纤激光输出技术往往需要通过在谐振腔内插入特殊的光纤器件,或是需要级联多支FBG实现,增加了系统的复杂程度,限制了波长调谐的灵活性.

本文设计了一种基于保偏光纤的环形滤波结构的掺铒光纤激光器,对系统工作原理进行了分析和实验,结合保偏光纤光栅及饱和吸收体,实现了稳定的双波长激光可切换输出.

1 系统设计及原理

光纤激光器系统设计结构如图1. 系统由工作波

长976 nm泵浦源(Laser Diode, LD)、掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)、976/1550 nm波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、两支分光比为20:80的耦合器(Coupler)OC₁以及OC₂、分光比为10:90的耦合器OC₃、保偏光纤布喇格光栅(Polarization Maintaining-Fiber Bragg Grating, PM-FBG)、光纤环形器(Circulator)以及偏振控制器(Polarization Controller, PC)构成,其中EDF₂和EDF₁为同一种规格的掺铒光纤,EDF₂作为饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)抑制模式跳变,起到稳频效果.

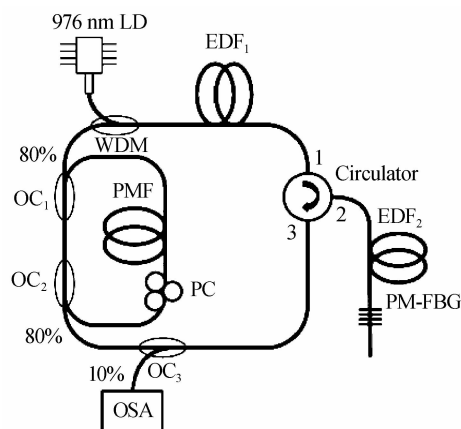


图1 双波长光纤激光器系统

Fig. 1 Diagram of dual wavelength fiber laser

976 nm泵浦光由WDM耦合进入增益光纤EDF₁,经过环形器1端口后由其2端口输出,耦合进入PM-FBG进行选频,反射光由环形器3端口输出进入OC₃后被分为两束,其中占90%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,并在环形器与PM-FBG之间熔接EDF₂作为SA起到稳频效果,上述连接方式构成环形谐振腔的基本结构.为了抑制模式跳变,提高激光输出的稳定性,在环形谐振腔内熔接FRF进行滤波.如图1所示,FRF由两支分光比20:80的耦合器OC₁和OC₂结合保偏光纤(PMF)构成,两支耦合器的20%端口分别与PMF两端熔接,其中OC₂的80%端与OC₃的90%端相连作为FRF的注入端,OC₁的80%端口作为FRF的输出端与WDM相连.

激光器自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR)可表示为

$$\text{FSR} = \frac{C}{nL} \quad (1)$$

式中, C 为真空中的光速, n 为纤芯有效折射率($n=1.446$), L 为谐振腔长度.当不熔接FRF时,激光器自由光谱范围为 FSR_1 ;在熔接FRF后,FRF构成具有独立谐振频率的子环形腔结构,子腔的自由光谱范围为

FSR₂,此时,激光器的有效自由光谱范围为 FSR₁ 和 FSR₂ 的最小公倍数^[16],随着有效自由光谱范围的提高,输出激光纵模间隔增大,起到抑制模式跳变的效果。

通过调节 PC 控制滤波器内的增益与损耗^[17],从而实现单个波长切换输出和双波长同时输出。

2 实验结果及分析

实验中,泵浦源(S30-HVM71, JDSU)工作波长为 976 nm,以单模形式输出,工作阈值为 45 mA;增益光纤 EDF₁ 和饱和吸收体 EDF₂ 为同样规格的低掺杂掺铒光纤,在 976 nm 和 1530 nm 波长处的吸收系数为 2 dB/m,其中 EDF₁ 长度为 3 m, EDF₂ 长度为 1 m; WDM 以及 Coupler 均为 Lightcomm 公司生产;PMF 为长度为 2 m 的熊猫型保偏光纤;PM-FBG(Technica SA)反射中心波长为 1535 ± 1 nm,反射率 > 99%,其透射谱如图 2。

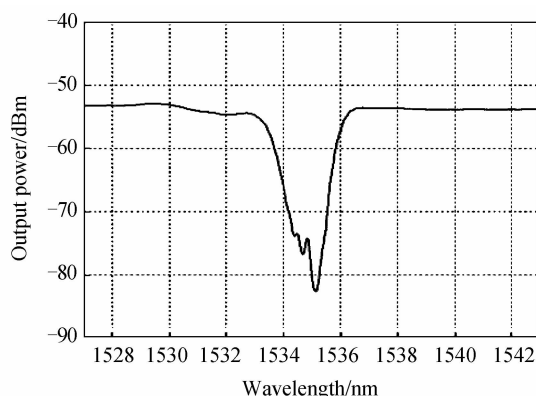
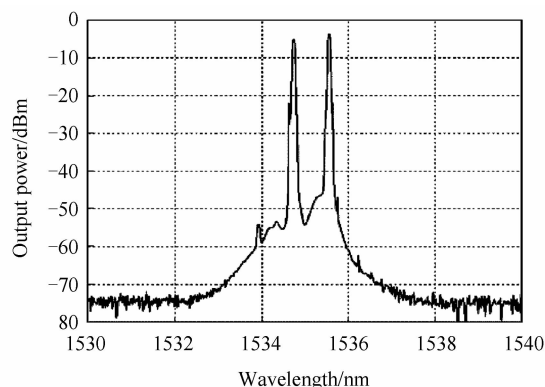


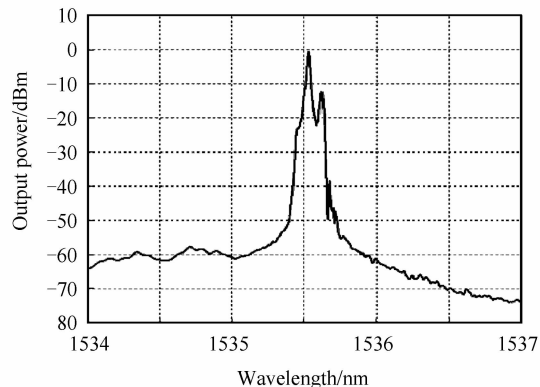
图 2 保偏光纤布喇格光栅透射谱

Fig. 2 Transmission spectra for PM-FBG

首先,对熔接 FRF 前后激光光谱曲线进行对比。在不接入 FRF 时,激光器的谐振腔总长度为 6 m,FSR 为 34.578 MHz。激光器工作阈值为 68 mW,当泵浦功率为 120 mW 时,在 1530~1540 nm 范围内,光谱仪分辨率为 0.1 nm 时,光谱仪所采集到的激光光谱曲线如图 3(a)所示,对应的双波长激光分别为 1534.7 nm 和 1535.5 nm,所对应输出功率为 -5.147 dBm 和 -3.764 dBm,在双峰周围存在明显的边模;改变光谱仪的扫描范围和分辨率对波长为 1535.5 nm 的输出激光光谱细节进行采集,选取的光谱仪分辨率为 0.02 nm,如图 3(b)所示,在 1535.5 nm 激光周围可以观察到有明显的边模存在。实验中,由 FRF 所构成子腔的总长度为 3 m,其 FSR 为 69.156 MHz,在熔接 FRF 后,所设计激光器的有效自由光谱范围增大。此时,激光器工作阈值为 71 mW,边模抑制效果明显,如图 4(a)所示,输出激光波长未发生漂移,所对应双波长激光输出功率分别为 -4.693 dBm 和 -4.11 dBm,实验中光谱仪所采用的分辨率为 0.1 nm;当改变光谱仪



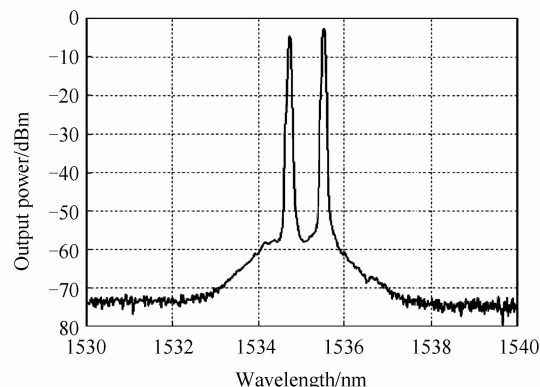
(a) Spectrum of the fiber laser in the scope of 1530~1540nm



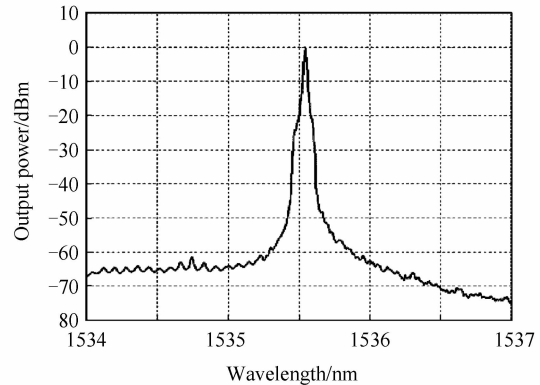
(b) Spectrum of the fiber laser in the scope of 1534~1537nm

图 3 滤波前激光光谱

Fig. 3 The laser spectrum without FRF



(a) Spectrum of the fiber laser in the scope of 1530~1540nm



(b) Spectrum of the fiber laser in the scope of 1534~1537nm

图 4 滤波后激光光谱

Fig. 4 The laser spectrum with FRF

分辨率为0.02 nm时,在1534~1537 nm范围内对1535.5 nm激光进行扫描,如图4(b)所示,激光边模抑制效果良好,而且能够观察到FRF所产生的梳状滤波效果.因此,在熔接滤波器后,双波长激光光谱特性得到改善,边模抑制效果得到提升,未造成输出激光波长发生漂移.

接下来,通过调制FRF中的PC调节腔内的偏振态,实现激光调谐输出.当泵浦功率为120 mW,光谱仪采集分辨率为0.02 nm时,实现波长为1535.52 nm的单波长激光输出,如图5(a)所示,单波长输出功率为0.078 dBm,3 dB线宽为0.16 nm;此时,通过调节PC可实现波长1534.71 nm的单波长激光输出,输出功率

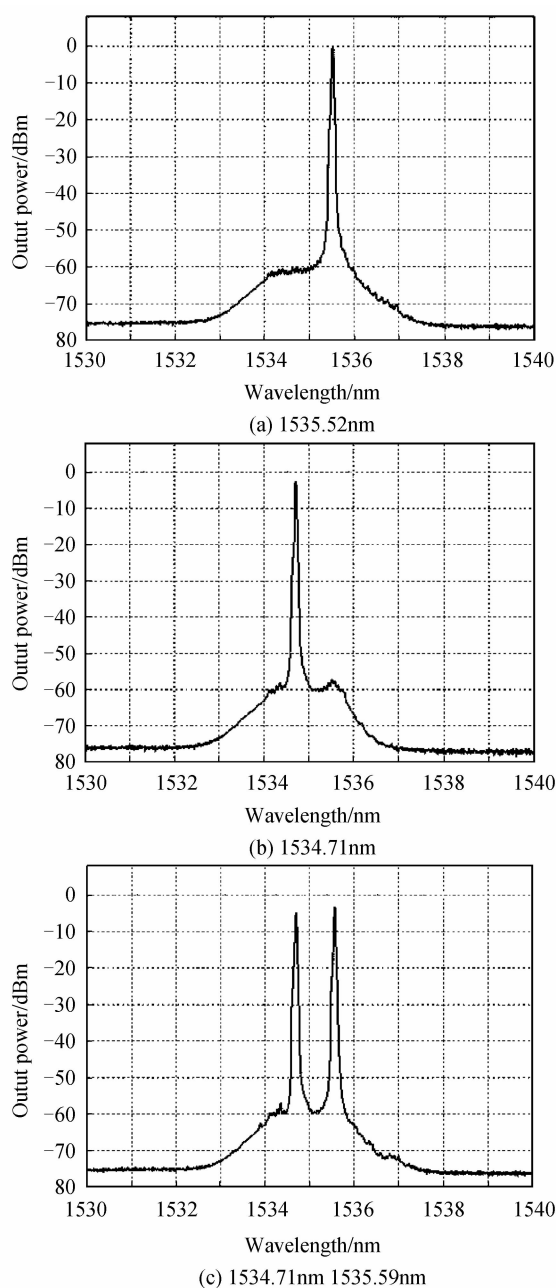


图5 激光调制输出

Fig. 5 Spectrum of lasers by adjusting PC

为-2.585 dBm,3 dB线宽为0.15 nm,如图5(b)所示;最终,通过调节PC可实现双波长激光同时输出,如图5(c)所示,实现了波长为1534.71 nm和1535.59 nm双波长激光的同时输出,所对应输出功率分别为-4.788 dBm和-3.396 dBm,双波长激光间隔为0.88 nm.在图5中均可以观察到梳状滤波效果.

最后,对激光输出波长及功率的稳定性进行测试,光谱仪采集分辨率为0.05 nm.在室温条件下每隔2 min进行一次采集,在20 min的采集时间内,单波长1535.5 nm以及1534.7 nm的激光光谱稳定性如图6(a)和6(b)所示,双波长光谱稳定性如图6(c)所示,在扫描时间内,光谱稳定性良好,没有明显的跳模出现.

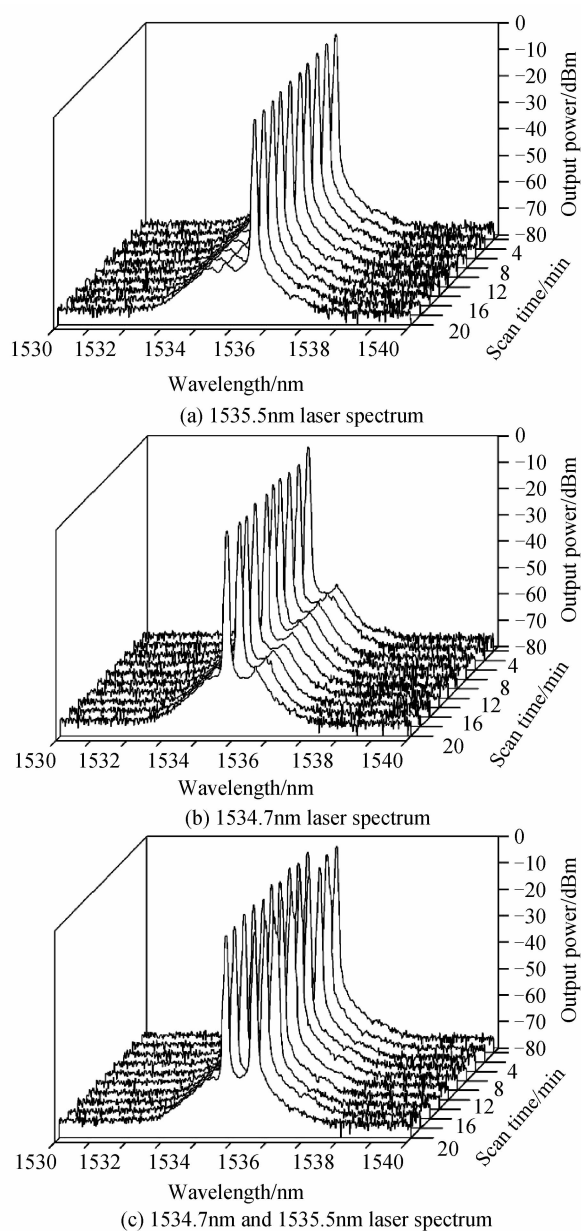


图6 输出激光光谱稳定性

Fig. 6 Spectrum stability of output lasers

实验中分别对单波长和双波长的波长漂移量和功率变化量进行测试.如图7(a)所示,单波长1535.5 nm

激光输出时,在室温 20 min 监测时间内,波长漂移量 <0.04 nm,功率变化量 <0.09 dB;在同样测试条件下,如图 7(b)所示,单波长 1 534.7 nm 激光输出时,波长漂移量 <0.06 nm,功率变化量 <1.3 dB.

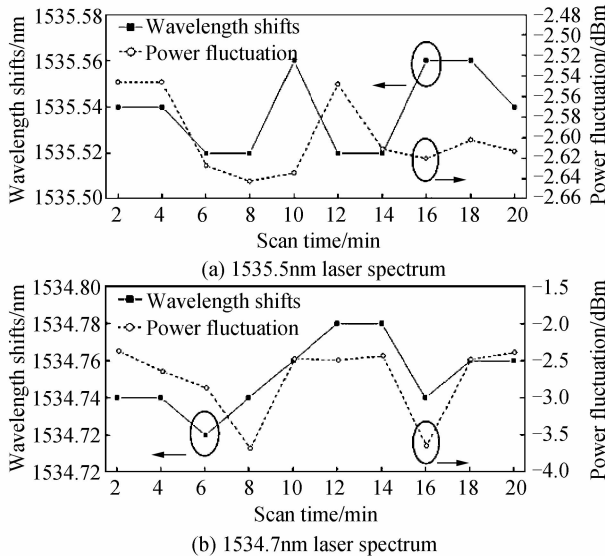


图 7 单波长激光波长漂移量和功率变化量

Fig. 7 Wavelength shifts and power fluctuation when single-wavelength laser output

调节 PC 使双波长激光同时输出,在同样测试条件下,1 535.5 nm 波长激光的波长漂移量 <0.06 nm,功率变化量 <1 dB,如图 8(a)所示;1 534.7 nm 波长激光所对应的波长漂移和功率变化分别 <0.04 nm 和 <1 dB,如图 8(b)所示.

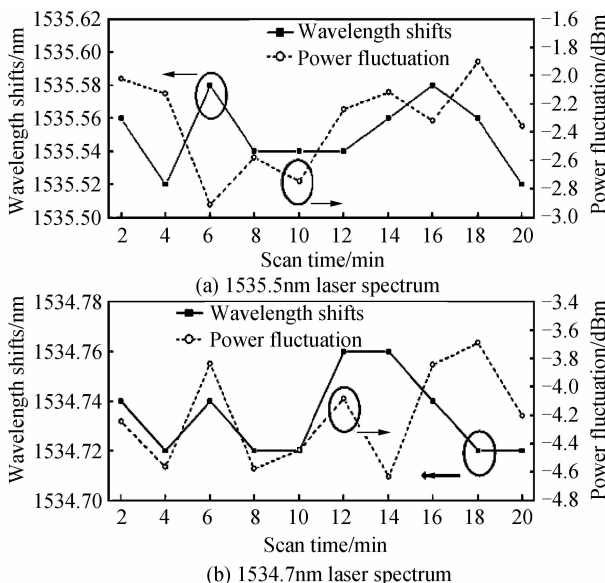


图 8 双波长激光波长漂移量和功率变化量

Fig. 8 Wavelength shifts and power fluctuation when dual-wavelength laser output

实验中通过对所设计激光器的激光光谱特性、可切换性能、波长稳定性和功率波动量进行分析和测试,验证了设计系统的有效性,实现了稳定的单波长和双

波长激光输出.

3 结论

提出并设计了采用光纤环形滤波器的双波长掺铒光纤激光器,实现了双波长激光同时输出以及单波长激光切换输出,双波长激光输出间隔 0.88 nm,1 535.5 nm 和 1 534.7 nm 单波长激光切换输出时,最大功率分别为 0.078 dBm 和 -2.585 dBm,所对应 3 dB 线宽分别为 0.16 nm 和 0.15 nm;在室温 20 min 监测时间内,输出激光波长漂移均 <0.06 nm,功率变化量均 <1.3 dB.该激光器基于一支 PM-FBG 实现了双波长激光输出和单波长激光可切换输出,具有结构简单、稳定性高、输出激光线宽窄的特点,在光纤传感、光谱分析等领域具有巨大的应用前景.

参考文献

- [1] DING Ya-qian, QI Yun-feng, LIU Yuan, *et al.* Study on polarization maintaining fiber power amplification characteristics of dual-wavelength fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(3):12-17.
丁亚茜,漆云凤,刘源,等.双波长光纤激光器的保偏光纤功率放大特性研究[J].中国激光,2014, **41**(3):12-17.
- [2] SAIDIN N, ZEN D I M, DAMANHURI S S A, *et al.* All-fiber dual-wavelength thulium-bismuth codoped fiber laser[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(10):2324-2326.
- [3] HAO Yan-ping, ZHANG Shu-min, WANG Xin-zhan, *et al.* Tunable erbium-doped fiber laser based on multi-mode fiber filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8):213-218.
郝艳萍,张书敏,王新占,等.基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器[J].光学学报,2011, **31**(8):213-218.
- [4] TANG J G, SUN J Q. Stable and widely tunable wavelength-spacing single longitudinal mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, **16**(5):299-303.
- [5] ZHOU Ying-wu, LUO Zhi-zao. Thermally expanded core fiber based M-Z filter and its application in widely tunable erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12):1482-1485.
周赢武,罗志灶.基于热扩芯光纤的 M-Z 滤波器及其在宽带可调谐光纤激光器中的应用[J].光子学报,2013, **42**(12):1482-1485.
- [6] YIN B, FENG S C, BAI Y L, *et al.* Switchable single-polarization dual-wavelength ring laser based on structured PM-CFBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(12):1227-1230.
- [7] CHEN Guo-jie, HUANG De-xiu, ZHANG Xin-liang, *et al.* Single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber ring laser by cascading two filters and using a saturable absorber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3):499-502.
陈国杰,黄德修,张新亮,等.基于两滤波器级联和饱和吸收体的单纵模双波长光纤激光器[J].光子学报,2009, **38**(3):499-502.
- [8] TSENG C L, JOU J J, LIU C K, *et al.* A multiwavelength erbium-doped fiber MOPA laser with partial overlapping linear cavities[J]. *Optica Applicata*, 2009, **39**(3):579-585.
- [9] HAN J H. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with cascaded fiber Bragg gratings[J]. *Optik*, 2010, **121**(24):2266-2268.

- [10] WANG F, XU E M, DONG J J, *et al.* A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser incorporating a reconfigurable dual-pass Mach-Zehnder interferometer and its application in microwave generation [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(9): 2337-2340.
- [11] SUN G Y, ZHOU Y W, HU Y H, *et al.* Switchable erbium-doped fiber ring laser based on Sagnac loop mirror incorporating few-mode high birefringence fiber [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(6): 1608-1611.
- [12] KUANG Fen, YE Zhi-qing. Self-seeded multi-wavelength switchable erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1460-1463.
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.
- [13] FANG Xiu-li, TONG Zheng-rong, 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.
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.
- [14] SIERRA-HERNANDEZ J M, ROJIAS-LAGUNA R, VARGAS-RODRIGUEZ E, *et al.* A tunable multi-wavelength laser based on a Mach-Zehnder interferometer with photonic crystal fiber [J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(5): 055105(5pp).
- [15] CHENG J Q, ZHANG L L, SHARAFUDEEN K, *et al.* Room-temperature switchable triple-wavelength operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2014, **24**(1): 015102(4pp).
- [16] ZHANG Xin, CHEN Wei, LIU Yu, *et al.* Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(1): 48-52.
张欣, 陈伟, 刘宇, 等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 48-52.
- [17] YANG Xiu-feng, WEI Fang-fang, TONG Zheng-rong, *et al.* Dual wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(4): 56-60.
杨秀峰, 魏芳芳, 童峥嵘, 等. 基于高精度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 56-60.