

引用格式: JI Yancheng, CHEN Yupei, LIU Wen, et al. Switchable Multi-wavelength Erbium-doped Fiber Laser Based on a Microfiber Sagnac Loop[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0514002

季彦呈, 陈育培, 刘文, 等. 基于微光纤 Sagnac 环的可切换多波长掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0514002

基于微光纤 Sagnac 环的可切换多波长掺铒光纤激光器

季彦呈¹, 陈育培¹, 刘文¹, 孙丹¹, 李帅¹, 章国安¹, 朱晓军^{1,2}

(1 南通大学 信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

(2 苏州大学 江苏省先进光学制造技术重点实验室、教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要:提出了一种基于微光纤 Sagnac 环的可切换多波长掺铒光纤激光器。微光纤 Sagnac 环梳状滤波器是由一个腰区直径为 5.68 μm 的微光纤耦合器熔接一段 5.5 cm 的保偏光纤而成。将该滤波器熔接到光纤环形腔中, 通过调节偏振控制器, 实现了四波长激光输出。此外还分别实现了稳定可切换的单、双、三波长激光输出, 且双波长和三波长激光的输出间隔可调谐。实验结果表明, 所有输出激光光谱的 3 dB 线宽均小于 0.027 nm, 边模抑制比均大于 40 dB, 最大可达到 58 dB。对输出三波长的激光进行稳定性测试, 其在 1 h 内波长偏移量小于 0.028 nm, 峰值功率波动量小于 0.9 dB。该激光器单色性好、稳定性好, 可应用于波分复用及全光通信系统等领域。

关键词:微光纤; Sagnac 环; 多波长; 可切换; 保偏光纤; 光纤激光器

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0514002

Switchable Multi-wavelength Erbium-doped Fiber Laser Based on a Microfiber Sagnac Loop

JI Yancheng¹, CHEN Yupei¹, LIU Wen¹, SUN dan¹, LI Shuai¹, ZHANG Guoan¹,
ZHU Xiaojun^{1,2}

(1 School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

(2 Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: A switchable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber Sagnac loop is proposed and experimentally demonstrated. The microfiber Sagnac loop comb filter is fabricated by inserting a 5.5 cm polarization maintaining fiber between two outputs of an optical microfiber coupler with a waist diameter of 5.68 μm . The filter is fused into the fiber ring cavity and the four-wavelength output laser is realized by adjusting the polarization controller. In addition, the output of single-, dual-, triple-wavelength laser can be switched, and the outputs interval of dual-, triple-wavelength are tunable. The experimental results show that the 3 dB linewidths of laser output spectra are less than 0.027 nm and the side-mode suppression ratio are more than 40 dB, up to 58 dB. When the fiber laser operates at triple-wavelength, the wavelength shift and peak power fluctuation are within 0.028 nm and 0.9 dB in one hour.

基金项目:国家自然科学基金(No.61971245), 苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部现代光学技术重点实验室开放课题(Nos.KJS1858, KJS1204), 江苏省“六大人才高峰”(No.KTHY-052), 江苏省大学生创新创业训练计划(No.202010304055Z), 南通市科技计划(No.JC2020139)

第一作者:季彦呈(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光通信网络及信息与通信系统。Email: jiyancheng@ntu.edu.cn

通讯作者:朱晓军(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学传感及非线性光学。Email: zhuxj0122@ntu.edu.cn

收稿日期:2020-11-09; **录用日期:**2021-02-23

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

The laser has stable output and good monochromaticity, which can be applied in fields of wavelength division multiplexing and all-optical communication systems.

Key words: Microfiber; Sagnac loop filter; Multi-wavelength; Switchable; Polarization maintaining fiber; Fiber laser

OCIS Codes: 140.3500; 060.3510; 140.3460; 230.7408

0 引言

多波长掺铒光纤激光器(Erbium-doped Fiber Laser, EDFL)由于其结构简单、低阈值、高输出功率、高光信噪比、高稳定性和低制造成本的优点,在光学传感^[1,2]、光纤通信^[3]、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)^[4-5]和微波光子学^[6]等领域中有着重要应用。掺铒光纤激光器的均匀增益展宽导致了模式竞争,使得EDFL在室温下难以实现稳定的多波长激光输出。

目前,有多种方法可以实现多波长EDFL。例如利用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBGs)^[7]、马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometers, MZIs)^[8]、Sagnac环等作为波长选择滤波器或者利用非线性效应^[9]等相关强度的损耗机制抑制模式竞争。FENG S等^[10]采用一种啁啾莫尔FBG作为滤波器,实现了可调谐的单纵模掺铒光纤激光器。然而,由于FBG结构特性,其输出激光可调谐范围较小仅0.7 nm。JASIM A A等^[11]提出了一种高稳定的可切换的双波长EDFL,利用可重构的微光纤MZI作为梳状滤波器。此滤波器由两根微光纤在范德瓦耳斯力和静电力的作用下形成半环而成,需要精细控制MZI的光程和相位。ZHANG Zuxing等^[12]提出了一个基于自激发受激布里渊散射的波长间隔可变的的多波长光纤激光器,其激光腔长达到4 km以上。利用非线性效应的光纤激光器一般需要较长的激光腔长,不利于光纤激光器的小型化。Sagnac环滤波器由于具有成本低、损耗小、结构简单等特性是良好的滤波器件,广泛应用于多波长激光器、光纤传感、生物探测等领域。

DING Z等^[13]将两段相同的保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)经过45°偏移进行拼接,并放置在一个Sagnac环中。该激光器实现了稳定的单波长激光输出,边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)大于53 dB。CAO Y等^[14]研究了一种基于Sagnac环的双波长可切换掺铒光纤激光器。其Sagnac波长滤波器是由两个FBGs、一个偏振控制器(Polarization Controller, PC)和一个3 dB耦合器组成。SMSR大于40 dB。FENG S等^[15]采用结合PMF的Sagnac环作为波长选择滤波器,实现了具有正交偏振的双波长激光器, SMSR大于42 dB。2019年, HE W等^[16]采用3×3耦合器和PMF制作的Sagnac环作为梳状滤波器,实现了可切换的单、双、三波长激光输出, SMSR大于23 dB。采用单Sagnac环结构的激光器,输出激光的波长数量较少。2020年, ZHU Ke等^[17]提出了一种基于PMF和少模光纤的双Sagnac环的多波长可切换激光器,实现了稳定可切换的单、双、三波长激光输出,最多可输出六波长数量的激光, SMSR小于38 dB。虽然双Sagnac结构提高了多波长调节的灵活性,但也增加了滤波系统的制备难度。由此可见,通过改变Sagnac结构以及在腔体内熔接不同元件以增强其滤波特性,不仅增加了Sagnac环滤波系统的复杂性,也使得滤波器腔体内的损耗增加,不利于高功率激光输出。2020年, ZHAO L等^[18]报道了一种基于微光纤Sagnac环(Microfiber Sagnac Loop, MSL)结构的传感器,这种传感器具有结构简单、损耗低等特点。但是其仅仅实现了温度和折射率的传感测量,并未对其滤波特性进行相关研究。

本文基于MSL滤波器,提出了一种可切换的多波长掺铒光纤激光器。将腰区直径为微米量级的微光纤耦合器(Microfiber Coupler, MC)的两个输出端熔接一段PMF,形成MSL滤波器。仿真和实验结果表明,MSL具有良好的梳状滤波特性。通过将滤波器接入到掺铒光纤激光系统中,在室温下,调节PC,在实现四波长的激光输出的同时,分别实现了稳定可切换的单、双、三波长激光输出。当激光输出分别为双波长和三波长时,通过调节PC可实现波长间隔的可调谐。该激光系统的所有输出激光的3 dB线宽均小于0.027 nm, SMSR均大于40 dB。当输出单波长激光时,最大的SMSR可达到58 dB,最大波长可调谐范围为15.62 nm。在1 h内,三波长激光的波长漂移量小于0.028 nm,峰值功率波动量小于0.9 dB。该激光器具有结构简单、低成本、易于制作、小型化、单色性好且稳定性好等优点,在波分复用、光纤传感和光学测量等领域有广阔的应用前景。

1 MSL 结构及原理

MSL 滤波器的结构如图 1 所示。MSL 包括三个部分:耦合区、两个锥形过渡区、两个输入/输出端口。当功率为 P_0 的光从端口 1 入射到 MSL 中时,耦合区将同时激发两个最低阶模式。当这两个模沿着 MSL 的耦合区域传播时,会发生功率振荡。两个模式间的耦合系数 C 和耦合比 K 可以表示为^[19]

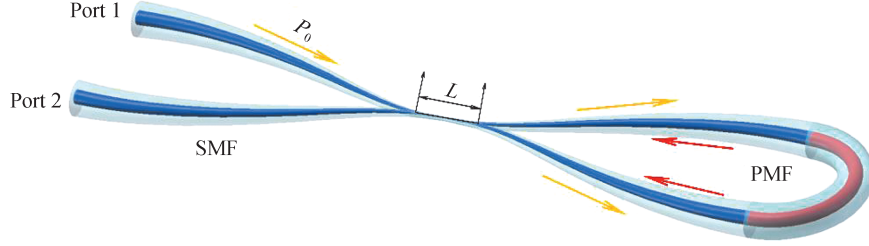


图 1 MSL 滤波器原理

Fig.1 Schematic of MSL filter

$$C = \frac{3\pi\lambda}{32n_2d^2} \times \frac{1}{(1 + 1/V)^2} \quad (1)$$

$$K = \sin^2(CL) \quad (2)$$

式中, λ 为入射光的波长, d 是一根微光纤的直径(即腰区直径的一半), V 是归一化频率, $V = \left[(2\pi d/\lambda)(n_2^2 - n_1^2) \right]^{1/2}$, n_1 是周围介质的折射率, n_2 是光纤的折射率。 L 为耦合长度, CL 为两个模式沿着耦合长度传播时产生的累积相位差。

光在微光纤环内进行正反两个方向传播。光在微光纤环内的反向传播时,在耦合区再次进行干涉。由于 PMF 的双折射特性,环路中反向传播的光束在 PMF 截面上会出现相位差,具有相位差的两个正交偏振模会产生干涉条纹。这与高双折射光纤环形镜的工作机制相似。其透射谱可以表示为^[20]

$$T = (1 - 2k)^2 + 4k(1 - k) \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \cos^2(-2\pi lB/\lambda) \quad (3)$$

式中, k 为光纤耦合器的耦合比, β_1 和 β_2 为光在 PMF 两端的偏振旋转角, l 为 PMF 的长度, B 表示 PMF 的双折射。用 K 替代式(3)中的 k , 可以得到 MSL 的透射谱表达式为

$$T = \left[(1 - 2K)^2 + 4K(1 - K) \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \cos^2(-2\pi lB/\lambda) \right] \cdot \cos^2(CL) \quad (4)$$

由式(4)可知,滤波器的梳状谱与 PMF 和耦合区长度以及腰区半径有关。耦合区长度和腰区半径随着拉锥长度的变化而变化。当 PMF 为 5.5 cm, 拉锥长度为 12.255 cm, 腰区直径为 $5.68\mu\text{m}$ 时, 实验和仿真得到的滤波器透射光谱如图 2 所示。通过比较两个透射谱, 可以发现两者的梳状特性基本吻合, 自由光谱范围

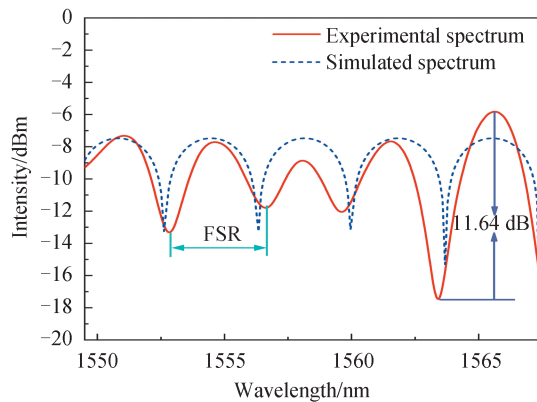


图 2 仿真和实验得到的 MSL 滤波器的透射谱

Fig.2 Transmission spectrum of MSL filter obtained by simulation and experiment

(Free Spectral Range, FSR)都为 3.8 nm。

2 实验结果及分析

2.1 滤波器制作

MSL 滤波器是将一段 PMF 熔接在传统光纤耦合器的两个输出端口,通过氢氧焰熔融拉锥的方法^[21-23]将其耦合区进行拉锥而成。将传统耦合器的两个输出端口熔接一段 5.5 cm 的 PMF,将耦合区固定在氢氧火焰拉锥机的移动台上,设置氢气流量为 110.1 sccm(sccm 即气压为 1 Pa、温度为 25°C 条件下 1 mL/min 的流量),氧气流量为 8.0 sccm,火焰扫描宽度为 2 mm,扫描速度为 0.09 m/s。将氢氧焰喷头移至耦合区,使得耦合区位于温度最高的火焰外焰中。利用控制软件控制两个相反移动平台向两侧移动,中间的火焰喷头来回重复运动实现微光纤耦合器的拉锥。利用宽带光源(Amplified Spontaneous Emission, ASE)作为检测光源,拉锥过程中通过光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzers, OSA)对 MSL 的输出光谱进行实时监测,氢氧焰熔融拉锥实验装置如图 3 所示。当拉锥长度为 12.255 cm 时,实验得到的 MSL 透射谱如图 2 所示,其 FSR 为 3.8 nm,透射通道最大隔离度为 11.64 dB。

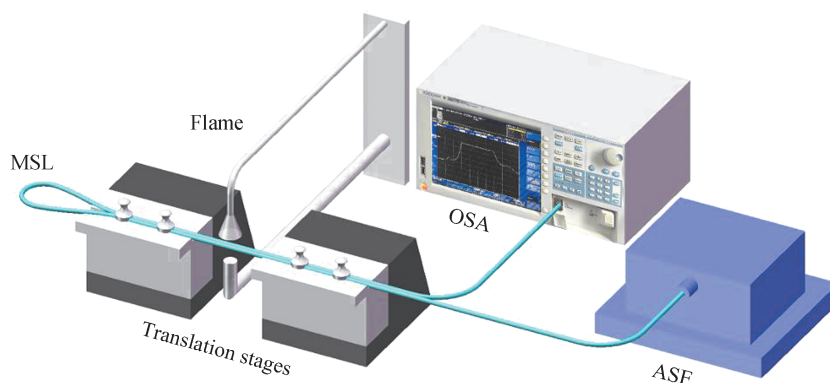


图 3 氢氧焰熔融拉锥实验装置原理

Fig.3 Schematic of experimental setup for fused tapering by oxyhydrogen flame

2.2 激光系统的实验装置

图 4 为采用 MSL 滤波器的光纤环形激光器的结构图。最大输出光功率为 355 mW 的 980 nm 光源作为泵浦源,其输出端口通过一个 980/1 550 nm WDM 连接一段长度为 5 m 的掺铒光纤(EDF-L 1500)实现激光泵浦增益。一个 PC 和一个偏振相关隔离器(Polarization Dependent Isolator, PDI)依次连接在 EDF 和 MSL 滤波器之间。PC 实现调节光纤环形腔内偏振状态连续调节。PDI 实现光的单向导通特性。10/90 的光纤耦合器将 90% 的腔内激光功率反馈到光纤环形腔中,10% 的输出激光分别通过光谱分析仪(YOKOGAWA

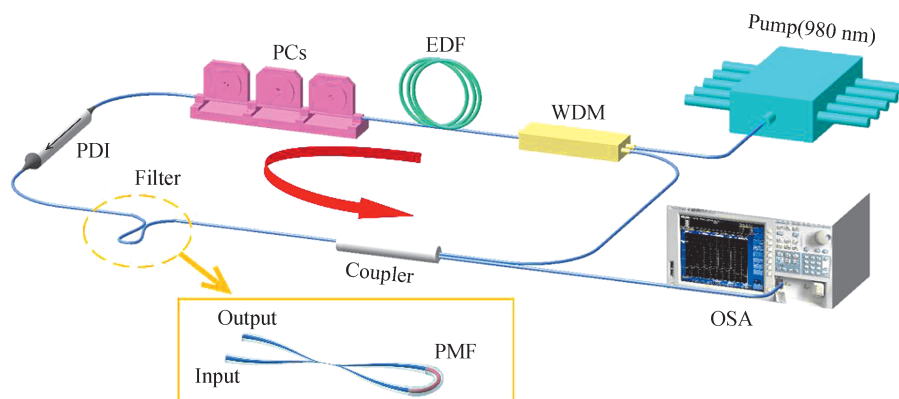


图 4 可切换掺铒光纤激光器的实验装置

Fig.4 The experimental setup of switchable erbium-doped fiber laser

AQ6370D,OSA)测量激光光谱,通过功率计(Newport)测量激光功率。

此激光器利用PDI控制光纤环形腔的偏振相关损耗,结合MSL滤波器实现多波长可切换输出。通过调节PC,实现激光腔内偏振状态和波长的调节。光纤环形腔内的偏振烧孔效应(Polarization Hole Burning, PHB)^[24]增强了不同激光模式的增益和损耗的差异,抑制了光纤环形腔内模式竞争。此外,PMF的高双折射效应增强了模式选择效应。因此,激光波长输出性能是由MSL、PDI和PC三种器件共同决定。

2.3 结果与分析

采用MSL作为腔内滤波器,实现激光器输出波长的可调性。通过增大电流,增大泵浦功率,实现激光输出。激光阈值为20 mW。当泵浦功率大于20 mW时,可得到单波长激光输出。继续增加功率,当泵浦功率为355 mW时,通过调节PC实现了可调谐单波长激光输出。图5为可调谐单波长激光输出光谱,中心波长分别为1550.15 nm、1557.75 nm、1561.49 nm和1565.77 nm。单波长激光光谱的SMSR大于45 dB,最大达到58 dB,3 dB线宽小于0.027 nm,可调谐范围约为15.62 nm。如图6所示,所有单波长激光光谱都与MSL的梳状峰相对应。因此,该MSL结构具有良好的滤波特性,可用于多波长的滤波。

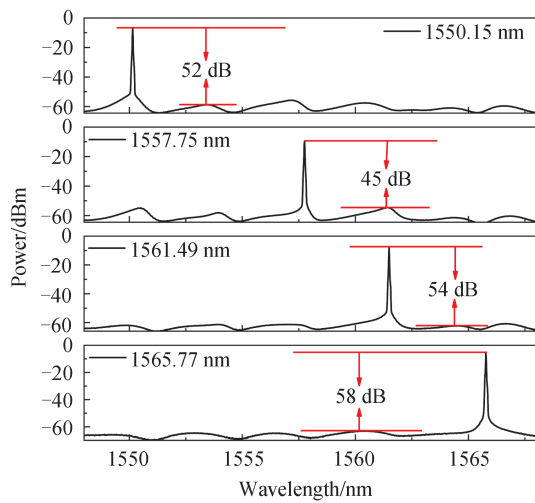


图5 单波长激光输出光谱

Fig. 5 Output spectra of single wavelength

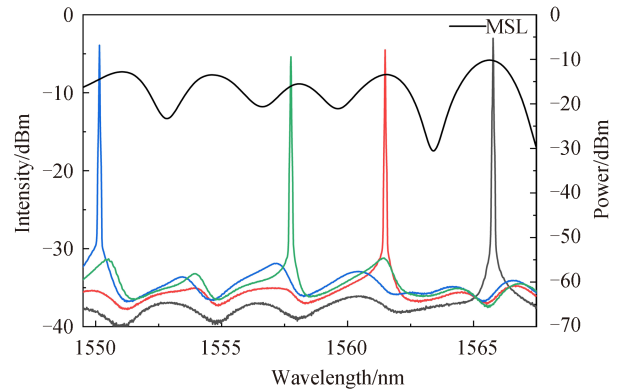
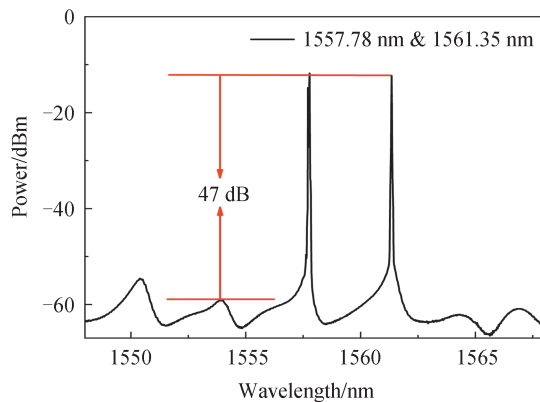


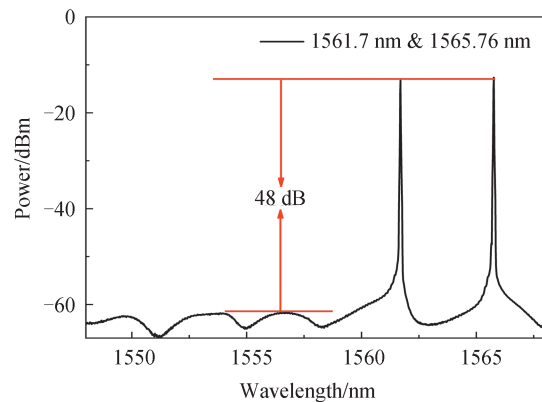
图6 单波长输出光谱和MSL透射光谱匹配

Fig. 6 Output spectra of single wavelength matched with MSL spectrum

在相同的泵浦功率下,通过调节PC可以得到双波长激光输出。图7为双波长激光输出光谱,其中,图7(a)和图7(b)为间隔约4 nm的可切换双波长激光光谱,波长分别为1557.78 nm和1561.35 nm、1561.7 nm和1565.76 nm, SMSR大于47 dB,图7(c)和图7(d)为间隔约7 nm的可切换双波长激光光谱,波长分别



(a) The wavelengths are 1557.78 nm and 1561.35 nm



(b) The wavelengths are 1561.7 nm and 1565.76 nm

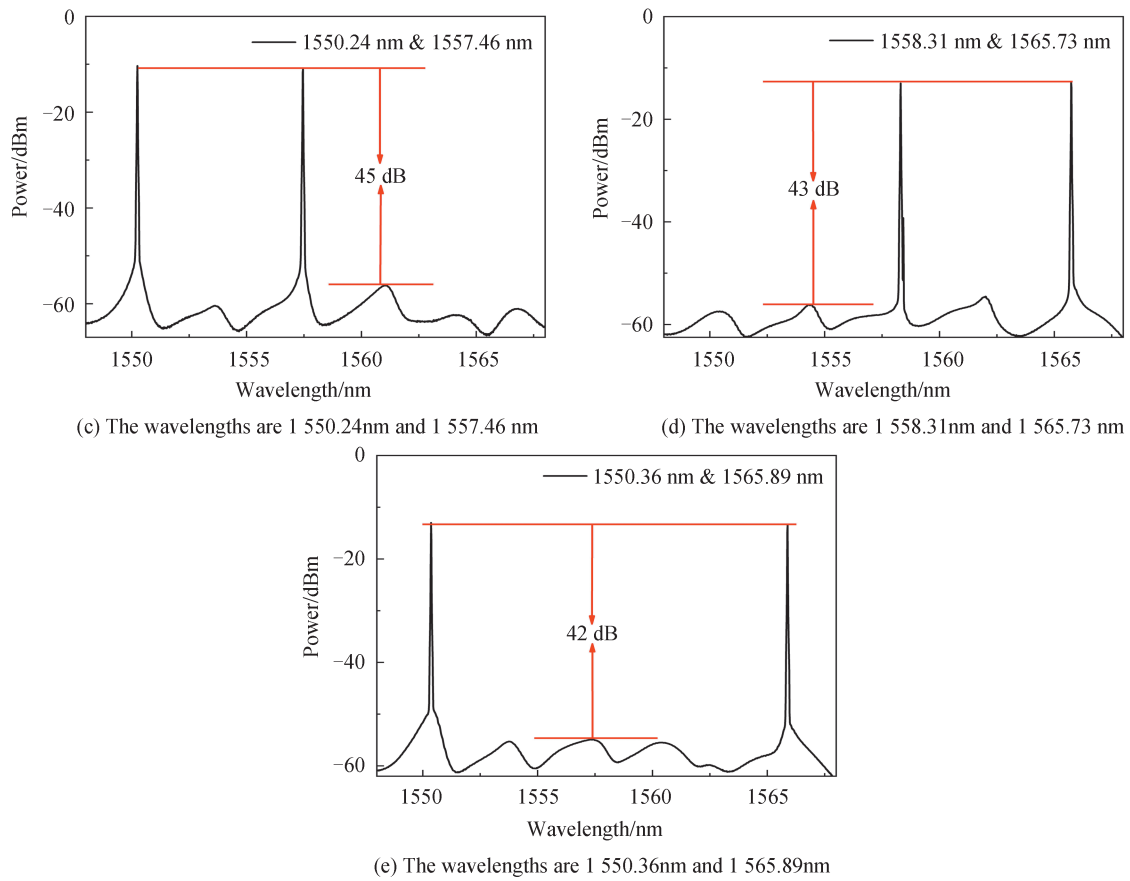
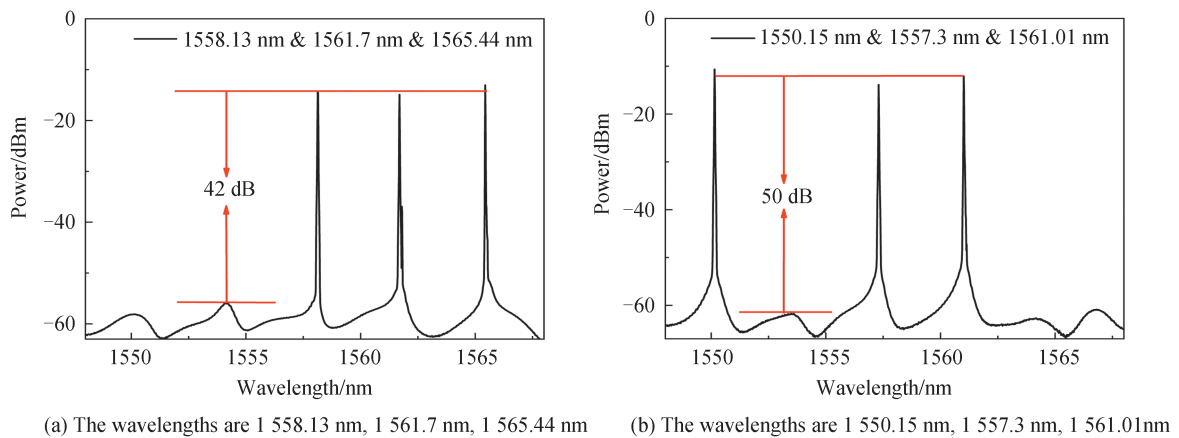


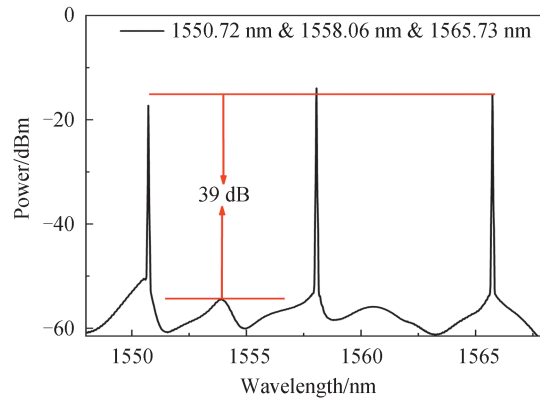
图7 双波长激光输出光谱

Fig. 7 Output spectra of double wavelength

为 1 550.24 nm 和 1 557.46 nm、1 558.31 nm 和 1 565.73 nm, SMSR 大于 43 dB, 图 7(e) 为双波长激光最大间隔约 15 nm 的激光输出, 输出波长分别为 1 550.36 nm 和 1 565.89 nm, SMSR 为 42 dB。双波长激光光谱的 3 dB 线宽均小于 0.023 nm。

图 8 为三波长激光输出光谱。图 8(a) 中输出激光波长分别为 1 558.13 nm, 1 561.7 nm 和 1 565.44 nm, 3 dB 带宽小于 0.027 nm, SMSR 为 42 dB。保持泵浦功率不变, 进一步调节 PC, 腔体内偏振状态发生改变, 由于 PHB 效应的影响, 不同波长位置的激光获得的增益也会改变, 可获得不同波长间隔的三波长激光输出光谱, 如图 8(b) 和图 8(c) 所示。三波长分别为 1 550.15 nm, 1 557.3 nm 和 1 561.01 nm, 1 550.72 nm, 1 558.06 nm 和 1 565.73 nm, 3 dB 线宽小于 0.019 nm, SMSR 为 50 dB 和 40 dB。





(c) The wavelengths are 1 550.72 nm, 1 558.06 nm, 1 565.73nm

图 8 三波长激光输出光谱

Fig. 8 Output spectra of triple wavelength

进一步调节 PC,得到四波长激光输出光谱,如图 9 所示。激光输出波长分别为 1 550.16 nm, 1 557.05 nm, 1 560.94 nm 和 1 566.59 nm。3 dB 线宽小于 0.019 nm, SMSR 为 45 dB。

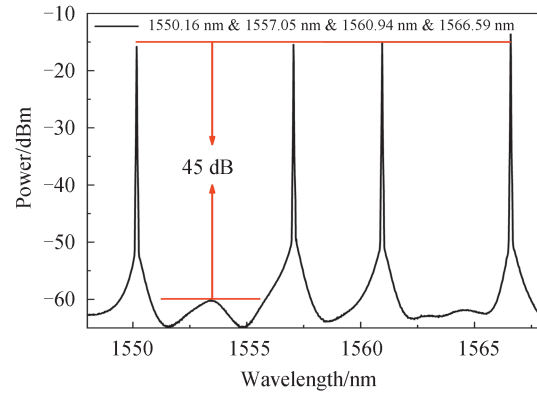
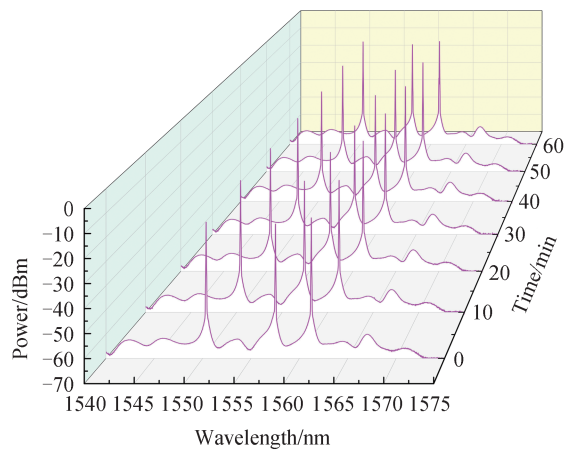


图 9 四波长激光输出光谱

Fig. 9 Output spectra of quadruple wavelength

为进一步研究采用 MSL 滤波器光纤激光器在室温条件下的稳定性,在 1 h 内对三波长为 1 550.388 nm、1 557.388 nm、1 561.244 nm 的激光输出光谱进行重复扫描,扫描间隔 10 min,如图 10(a)所示。分别测量了



(a) Triple-wavelength oscillation in 1 hour

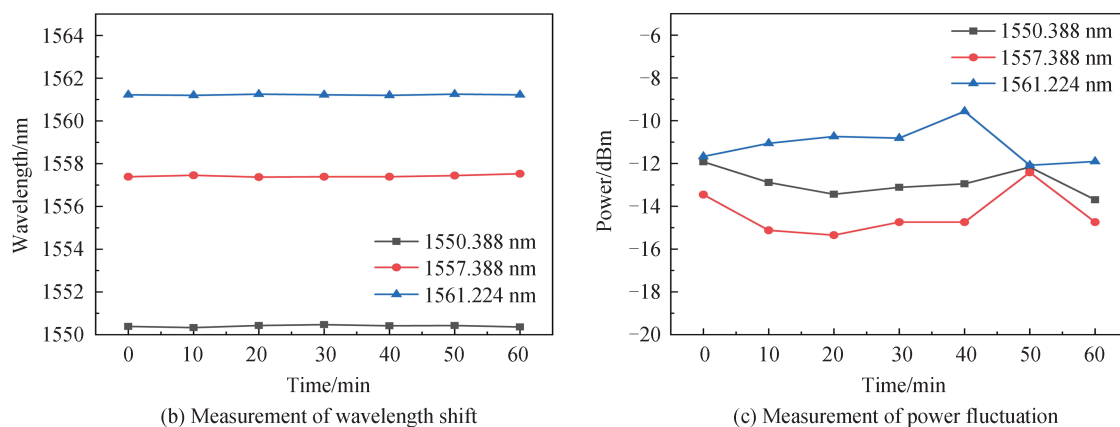


图 10 激光器稳定性测试
Fig. 10 Measurement of laser stability

波长和峰值功率随时间变化的稳定性,如图 10(b)和 10(c)所示。由图可见,在 1 h 内,最大波长漂移量为 0.154 nm,最大峰值功率波动量为 2.934 dB。由于掺铒光纤的均匀展宽,三波长激光输出时存在模式竞争和模式跳变,任何波长相关的损耗的微扰变化都会导致激光器的输出功率不稳定。在激光腔中增加一个隔离器,用于消除腔内器件产生的反向光的损耗,改进多波长激光的稳定性。如图 11 所示,在 1 h 内对三波长为 1 549.184 nm、1 559.208 nm、1 570.212 nm 的激光输出光谱进行重复扫描,扫描间隔 10 min。分别测量了波长和峰值功率随时间变化的稳定性,如图 11(b)和 11(c)所示。在 1 h 内,最大波长漂移量为 0.028 nm,最大峰值功率波动量为 0.9 dB。实验结果表明,使用两个隔离器可以改进多波长激光的稳定性。图 12 为光纤环

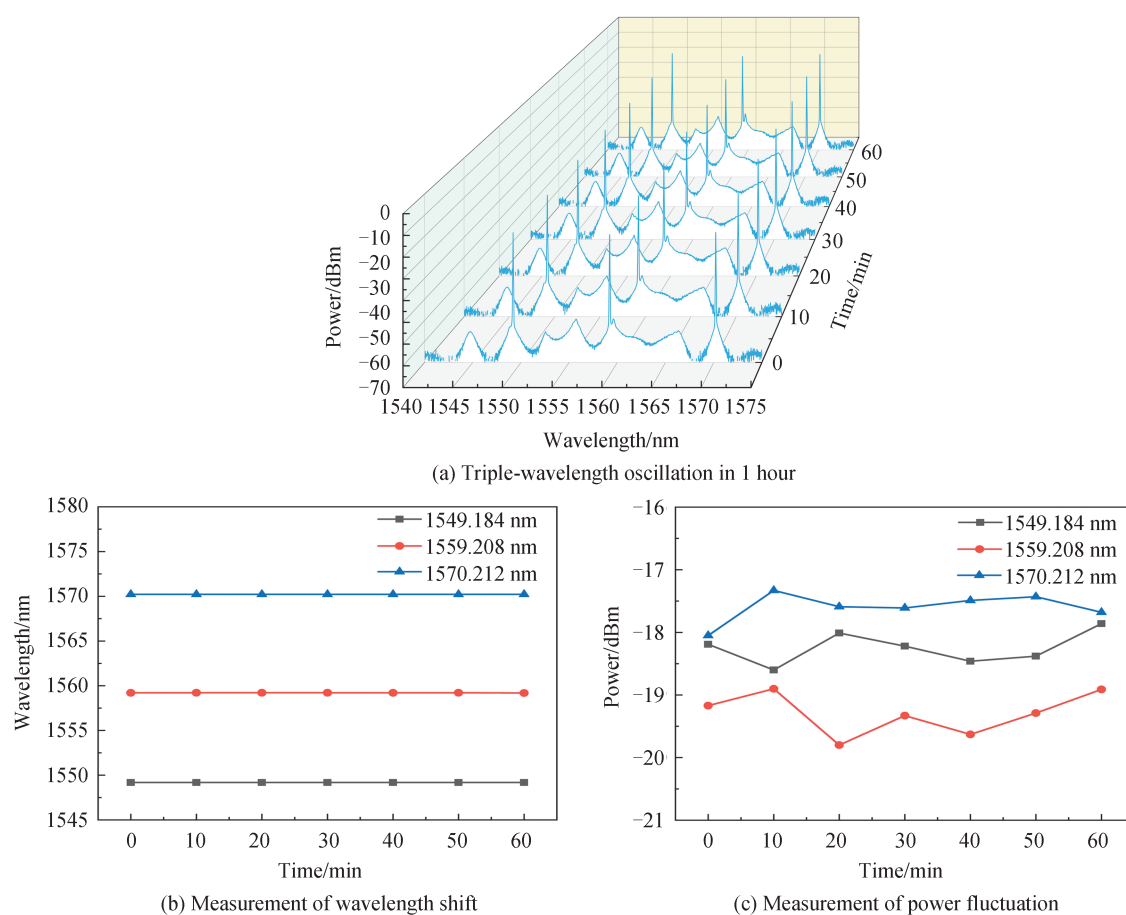


图 11 增加一个隔离器后的激光器稳定性测试
Fig. 11 Measurement of laser stability after adding an isolator

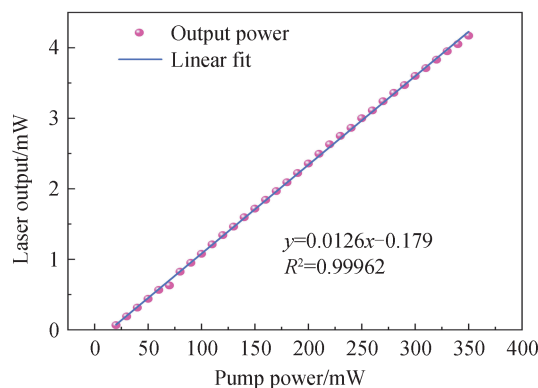


图12 泵浦功率和激光器输出功率的关系

Fig.12 Measured laser output versus pump power

形腔的激光输出功率和泵浦功率关系图。观察图12可知,激光输出功率和泵浦功率呈现良好的线性关系。激光腔的激光效率斜率为1.26%,激光阈值为20 mW。

综上所述,提出的基于MSL滤波器的多波长掺铒光纤激光器能够产生稳定可切换的单、双、三波长激光输出,当输出激光分别为双波长和三波长时,波长间隔可调谐,最多输出波长数为四波长。因此,此结构的MSL滤波器具有良好的滤波效果。

3 结论

本文提出了一种基于MSL滤波器的可切换多波长的掺铒光纤激光器。该滤波器是由腰区直径为微米量级的MC和一段PMF组成。在室温下,通过调节PC,调节腔内偏振相关损耗,实现稳定可切换的单、双、三波长激光输出,最多可以得到四波长的激光输出光谱。当输出激光为双波长和三波长时,调节PC可调谐输出激光间隔。实验结果表明,所有输出激光SMSR均大于40 dB,最大SMSR可达58 dB,3 dB线宽均小于0.027 nm,单波长激光可调谐范围为1 550.15~1 565.77 nm。在1 h内对三波长激光进行稳定性测试,其波长偏移量为0.154 nm,峰值功率波动量为2.934 dB。在激光腔中使用两个隔离器用于消除腔内器件产生的反向光可改进多波长激光的稳定性,使得最大波长漂移量为0.028 nm,最大峰值功率波动量为0.9 dB。该激光器具有结构简单,成本低,易调节,单色性好,稳定性好等优点,在高容量光通信、光学传感、波分复用等领域中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] LI Y, TIAN J, QUAN M, et al. Tunable multiwavelength er-doped fiber laser with a two-stage Lyot filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3): 287-290.
- [2] LU Huanlin, LIANG Yuxin, HAN Xiuyou, et al. Simulation and fabrication of polymeric slot waveguide for refractive index sensing[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 7-14.
吕桓林, 梁宇鑫, 韩秀友, 等. 用于折射率传感的聚合物基狭缝波导的模拟与制备[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 7-14.
- [3] AL-TAIY H, WENZEL N, PREUBLER S, et al. Ultra-narrow linewidth, stable and tunable laser source for optical communication systems and spectroscopy[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5826-5829.
- [4] OEHLER A E H, ZELLER S C, WEINGARTEN K J, et al. Broad multiwavelength source with 50 GHz channel spacing for wavelength division multiplexing applications in the telecom C band[J]. Optics Letters, 2008, 33(18): 2158-2160.
- [5] HUANG P, SHU X, ZHANG Z. Multi-wavelength random fiber laser with switchable wavelength interval[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28686-28695.
- [6] WANG T, SANG X Z, YAN B B, et al. Tunable microwave signal generation based on an Opto-DMD processor and a photonic crystal fiber[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(6): 64217.
- [7] SUN T, GUO Y, WANG T, et al. Widely tunable wavelength spacing dual-wavelength single longitudinal mode erbium doped fiber laser[J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(3): 235-238.
- [8] AHMAD H, JASIM A A. Stable C-band fiber laser with switchable multi-wavelength output using coupled microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36: 105-114.
- [9] DUCLOY M. Non linear effects in a multimode gas laser: Saturation of $AJ=1 \leftrightarrow J=0$ transition in presence of magnetic field [J]. Optics Communications, 1971, 3(4): 205-208.

- [10] FENG S, LU S, PENG W, et al. Tunable single-polarization single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser employing a CMFBG filter and saturable absorber[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 47: 102-106.
- [11] JASIM A A, AHAMD H. A highly stable and switchable dual-wavelength laser using coupled microfiber Mach-Zehnder interferometer as an optical filter[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 97: 12-19.
- [12] ZHANG Zuxing, DAI Guoxing, KUANG Qingqiang, et al. Spacing-adjustable multiwavelength fiber laser based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 815-819.
张祖兴, 戴国星, 况庆强, 等. 基于受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2010, 39(5): 815-819.
- [13] DING Z, WANG Z, ZHAO C, et al. Tunable erbium-doped fiber laser based on optical fiber Sagnac interference loop with angle shift spliced polarization maintaining fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 1-5.
- [14] CAO Y, LU N, TONG Z. A switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on Sagnac loop inserted with two FBGs[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(6): 434-437.
- [15] FENG S, XU O, LU S, et al. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber-ring laser based on one polarization maintaining fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(3): 264-267.
- [16] HE W, ZHU L, MENG F, et al. Selectable and stable C-band multi-wavelength ring cavity erbium-doped fiber laser employing Sagnac loop and tunable filter[J]. *Optik*, 2019, 176: 528 - 534.
- [17] ZHU Ke, PEI Li, ZHAO Qi, et al. Switchable multi-wavelength fiber laser utilizing double Sagnac filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 1-7.
朱可, 裴丽, 赵琦, 等. 采用双 Sagnac 环滤波器的可切换多波长光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(11): 1-7.
- [18] ZHAO L, ZHANG Y, CHEN Y, et al. Simultaneous measurement of temperature and RI based on an optical microfiber coupler assembled by a polarization maintaining fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(15): 151903.
- [19] PAUNE F P, HUSSEY C D, YATAKI M S. Modelling fused single-mode-fibre couplers [J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(11): 461-462.
- [20] LIU Y, LIU B, FENG X, et al. High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2382-2390.
- [21] TOKUNAGA D, SATO S, HIDAI H, et al. A novel method of triggering fiber fuse inside glass by optical breakdown and glass drilling as its application[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(6): 400.
- [22] KASHYAP R. The fiber fuse—from a curious effect to a critical issue: A 25 th year retrospective [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6422-6441.
- [23] KAWASAKI B S, HILL K O, JOHNSON D C. Low loss access coupler for multimode optical fiber distribution systems [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(7): 1794-1795.
- [24] SUN J, QIU J, HUANG D. Multiwavelength erbium-doped fiber lasers exploiting polarization hole burning [J]. *Optics Communications*, 2000, 182(1): 193-197.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.61971245), The Open Project of Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University (Nos. KJS1858, KJS1204), The Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (No. KTHY-052), The Innovative Entrepreneurship Training Program for College students in Jiangsu Province (No. 202010304055Z), The Science and Technology Program of Nantong (No.JC2020139)