

采用双 Sagnac 环滤波器的可切换多波长光纤激光器

朱 可, 裴 丽, 赵 琦, 解宇恒, 常彦彪

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 提出了一种基于双 Sagnac 环滤波器的可切换多波长掺铒光纤激光器, 该滤波器由基于保偏光纤和少模光纤的 Sagnac 环并联构成, 结构简单, 利用其梳状滤波特性, 实现了掺铒光纤激光器的多波长输出。采用传输矩阵法详细分析了双 Sagnac 环的传输特性, 进一步搭建了线性腔掺铒光纤激光器, 实验中通过调节偏振控制器, 改变腔内偏振态, 在室温下得到稳定可切换的单、双、三波长激光输出, 且激光器输出波长的位置可调。研究表明, 输出激光波长的边模抑制比大于 34 dB, 稳定性测量中波长漂移量小于 0.05 nm, 具有良好的稳定性, 可应用于波分复用及全光通信系统等领域。

关键词: 光纤激光器; 可切换多波长; 双 Sagnac 环; 保偏光纤; 少模光纤
中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200047

Switchable multi-wavelength fiber laser utilizing double Sagnac loop filter

Zhu Ke, Pei Li, Zhao Qi, Xie Yuheng, Chang Yanbiao

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A switchable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on double Sagnac loop filter was proposed. The parallel double Sagnac loop filter was consisted of polarization-maintaining fiber and few-mode fiber. Its structure was simple. And the multi-wavelength output of erbium-doped fiber laser was realized by the comb filter property. Adopting transmission matrix method, the characteristics of double Sagnac loop were analyzed in detail. When using the double Sagnac comb filter in linear cavity laser system, a switchable multi-wavelength fiber laser with stable single-, dual-, and triple-wavelength outputs can be obtained at room temperature by adjusting the polarization controllers and changing the polarization state in the cavity. At the same time the lasing wavelength locations also can be switched. The results show that the side mode suppression ratio (SMSR) of the output wavelength is more than 34 dB. In the test of the stability, the maximum wavelength shift of output wavelength is less than 0.05 nm, which has stable output and can be applied in fields such as wavelength division multiplexing and all-optical communication systems.

Key words: fiber laser; switchable multi-wavelength; double Sagnac loop;
polarization-maintaining fiber; few-mode fiber

收稿日期: 2020-02-02; 修订日期: 2020-04-27

作者简介: 朱可 (1993-), 女, 硕士生, 主要从事光纤激光器等方面的研究。Email: 17120182@bjtu.edu.cn

导师简介: 裴丽 (1970-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤激光器、光纤传感等方面的研究。Email: lipei@bjtu.edu.cn

0 引言

多波长掺铒光纤激光器广泛应用于波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 通信系统、光纤光学传感、光学信号处理和微波信号产生等领域^[1]。目前,已报道了多种实现多波长的方法:利用受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 或四波混频 (Four-wave Mixing, FWM)^[2] 等非线性效应、利用非线性光纤环形镜 (Nonlinear Optical Loop Mirror, NOLM) 或非线性偏振旋转 (Nonlinear Polarization Rotation, NPR)^[3] 等强度相关的损耗机制、利用光纤布拉格光栅选频的方法,虽然这些方法可以获得稳定的多波长激光输出,但是谐振腔的结构往往比较复杂,插入损耗也比较大,难以同时满足结构简单、成本低等要求;还有利用偏振烧孔效应 (Polarization Hole Burning, PHB)^[4-5],通过调整偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 改变谐振腔内偏振态而适当选择腔内损耗,从而实现多波长输出或者波长之间切换。

由于掺铒光纤所固有的均匀展宽特性极易导致模式竞争,因此获得室温下稳定的多波长输出比较困难^[6],其关键是抑制模式竞争。

一般来说,稳定的多波长输出是通过抑制模式竞争机制和梳状滤波器相结合来实现的。常用的梳状滤波器包括马赫-曾德尔干涉滤波器,法布里-珀罗滤波器,双折射光纤 (Lyot) 滤波器, Sagnac 环滤波器^[7-9] 等不同类型。Sagnac 环滤波器由于具有低成本、低损耗、结构简单等优势,在多波长光纤激光器的设计中被广泛应用。

近年来,许多学者提出了 Sagnac 环滤波器与抑制波长竞争机制结合的多波长掺铒光纤激光器。Cheng 等将基于保偏光纤的 Sagnac 环滤波器加入环形腔中,实现了双波长的可切换输出,光信噪比大于 28 dB^[10]; Ding 等利用两段相同长度的保偏光纤以 45° 偏接构成 Sagnac 环滤波器,室温下通过调节偏振控制器可实现单波长输出^[11]; Sun 等设计了一种基于高双折射少模光纤的 Sagnac 环滤波器,其传输特性依赖 PC 的状态,将此滤波器加入环形腔中,通过调整 PC 可以实现双波长激光输出^[12];上述可切换多波长激光器均为单 Sagnac 环结构,而且可切换的波长数比较少。He 等设计了一种基于级联双 Sagnac 环

可切换多波长掺铒光纤激光器,利用两段不同长度的保偏光纤构成级联双 Sagnac 环梳状滤波器,通过调节 PC,可以得到五波长激光输出^[13]; He 等设计了一种基于并联双 Sagnac 环的可切换多波长掺铒光纤激光器,利用两段不同长度的保偏光纤组成并联双 Sagnac 环作为梳状滤波器,通过调节 PC,该激光器最多可得到四波长激光输出^[14]。上述基于双 Sagnac 环的光纤激光器仍存在一定的不足,输出波长数量依然较少,且稳定性不高,限制了多波长掺铒光纤激光器的应用领域及应用范围。

文中提出了一种具有多波长可切换特性的掺铒光纤激光器,基于多模干涉原理,利用保偏光纤和少模光纤组成双 Sagnac 环结构,该结构在 C 波段范围内具有梳状滤波特性。对其进行实验验证,通过调节双 Sagnac 环中的 PC,可得到稳定可切换的单、双、三多波长激光输出,同时激光输出波长位置可调,该激光器输出波长最大数目为六波长。实验得到的 SMSR 大于 34 dB, 27 min 内波长漂移量小于 0.05 nm。与现有滤波器相比,该滤波器易于制作,具有结构简单、稳定性良好等优点,应用前景广泛。

1 基于 PMF 和 FMF 的双 Sagnac 环滤波器结构及原理

双 Sagnac 环滤波器结构如图 1 所示,由三个 3 dB 耦合器 (OC),两个偏振控制器 (PC),两段长度不同的保偏光纤 (PMF) 和少模光纤 (FMF) 组成。对于单个 Sagnac 环路,当入射光从 1 端口进入 OC1 后被分为两束光,一束光经过 3 端口沿顺时针 (正向) 传输,另一束光经过 4 端口沿逆时针 (逆向) 传输,然后分别通过 PC 和 PMF (或 FMF),最后回到耦合器相干输出。

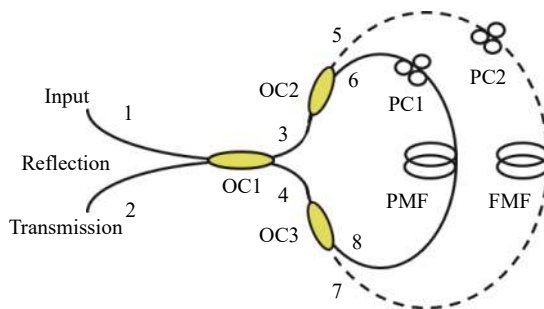


图 1 双 Sagnac 环滤波器示意图

Fig.1 Setup of double Sagnac loop filter

当入射光经过 3 dB 耦合器 OC 时,根据光波导理论,OC1, OC2, OC3 的传输矩阵为:

$$T_{OC} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

当正向传输光经过 PMF 时,由于其应力双折射效应,PMF 传输矩阵为:

$$T_{PMF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\frac{2\pi L\Delta n}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Delta n = |n_f - n_s|$ 为 PMF 快慢轴的有效折射率差; L 为 PMF 的长度; λ 为入射光的波长。

FMF 的模式在 FMF 中的传播速度不同,产生的相位延迟不同,故其传输矩阵^[15]可以由相位延迟器表示:

$$T_{FMF} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi n_{1eff}L_F/\lambda} & 0 \\ 0 & e^{j2\pi n_{2eff}L_F/\lambda} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: n_{1eff} 和 n_{2eff} 分别为少模光纤中两个模式的等效折射率差; L_F 为 FMF 的长度; λ 为入射光的波长。

当入射光经过 PC1 后,光的偏振方向会旋转 θ 角度,故正向传输光经过 PC 时,其传输矩阵为:

$$T_{PC} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

光波在 Sagnac 环传输一周后,反向经过 OC1 的传输矩阵为其逆矩阵,即:

$$T_{OC1}^B = (T_{OC1})^{-1} \quad (5)$$

同理 PMF、FMF、PC 的反向传输矩阵为其逆矩阵 T_{PMF}^B 、 T_{FMF}^B 、 T_{PC}^B 。

对于图 1 所示双 Sagnac 环路,1 端口光场为 E_1 , 3、4 端口光场为 E_3 和 E_4 ,可描述为:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = T_{OC1} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

而 E_3 和 E_4 被 3 dB 耦合器 OC2 和 OC3 分成相等的两束光,即当光正向从 OC2 和 OC3 传输时,有 $E_5 = E_6 = \frac{E_3}{2}$, $E_7 = E_8 = \frac{E_4}{2}$ 。光在双环内顺时针和逆时针传输一周后,端口 5、6、7、8 的光场为:

$$E_5' = T_{PC2}^B T_{FMF}^B E_7 \quad (7)$$

$$E_6' = T_{PC1}^B T_{PMF}^B E_8 \quad (8)$$

$$E_7' = T_{FMF} T_{PC2} E_5 \quad (9)$$

$$E_8' = T_{PMF} T_{PC1} E_6 \quad (10)$$

光在双 Sagnac 环传输一周后,在耦合器 OC2 和 OC3 处相干输出的透射光场和反射光场分别为:

$$\begin{bmatrix} E_{TOC2} \\ E_{ROC2} \end{bmatrix} = T_{OC2}^B \begin{bmatrix} E_5' \\ E_6' \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} E_{TOC3} \\ E_{ROC3} \end{bmatrix} = T_{OC3}^B \begin{bmatrix} E_7' \\ E_8' \end{bmatrix} \quad (12)$$

因耦合器 OC2 和 OC3 的入射端均只使用一个端口,故对于 OC1 的端口 3、4 的逆向光场为:

$$E_3'' = E_{ROC2} \quad (13)$$

$$E_4'' = E_{ROC3} \quad (14)$$

最后,滤波器透射光场和反射光场可以由下式表示:

$$\begin{bmatrix} E_T'' \\ E_R'' \end{bmatrix} = T_{OC1}^B \begin{bmatrix} E_3'' \\ E_4'' \end{bmatrix} \quad (15)$$

其主要是 PMF、FMF、PC 和 OC 组合结果。

2 实验装置及结果

2.1 实验装置及原理

基于双 Sagnac 环滤波器的可切换多波长掺铒光纤激光器的实验装置如图 2 所示。

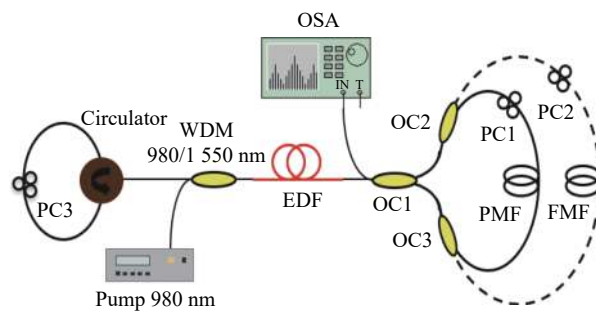


图 2 基于双 Sagnac 环多波长光纤激光器原理图

Fig.2 Setup of the multi-wavelength fiber laser based on the double Sagnac loop

多波长光纤激光器为线性腔结构,主要由 980 nm 泵浦激光器,980/1550 nm 波分复用器(WDM),一段 4.8 m 掺铒光纤(Nufern, EDFC-980-HP),双 Sagnac 环滤波器,一个环形器组成。双 Sagnac 环滤波器中的 PMF 长度为 45 cm, FMF 长度为 4 m。WDM 用于将泵浦光耦合到 EDF 中,EDF 用于提供激光的线性增益,双 Sagnac 环和环形器构成该激光器的谐振腔。双 Sagnac 环梳状滤波器抑制由于掺铒光纤的均匀展

宽效应引起的模式竞争,从而避免了在室温下不稳定的波长激光,实现多波长掺铒光纤激光器的稳定输出。通过调节 PC 可以改变 EDF 中不同波长的偏振状态^[16],从而产生偏振相关损耗,引起偏振烧孔效应,PHB 效应会平衡激光腔内的增益和损耗,影响波长输出。3 dB 耦合器 OC1 的一个端口用作光纤激光器的输出。激光的输出波长由光谱分析仪 (YOGAWA AQ6375, OSA) 测量,分辨率为 0.05 nm。

2.2 实验结果及分析

实验中设置泵浦功率为 300 mW,在室温条件下,通过控制三个 PC 的状态,可得到单波长激光输出。图 3 为单波长激光输出光谱,其中心波长为 1 532.45 nm, SMSR 为 37.84 dB。在相同的泵浦功率下,通过调节双 Sagnac 环梳状滤波器中的 PC 可以得到双波长激光输出。

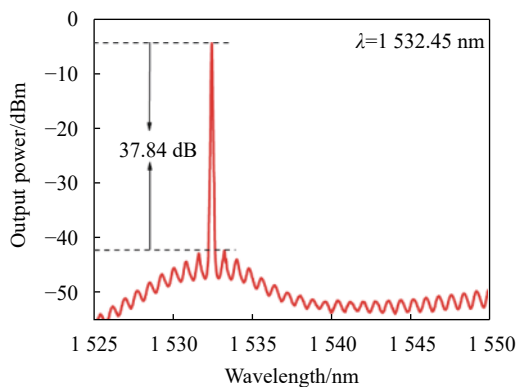


图 3 单波长输出光谱图

Fig.3 Output spectra of single wavelength

图 4 为双波长激光输出光谱,图 4(a) 中的输出激光波长为 1 531.55 nm 和 1 532.36 nm,图 4(b) 中的输出激光波长为 1 532.44 nm 和 1 533.25 nm, SMSR 大于 35 dB,最大峰值功率差为 2.27 dB。

为研究该激光器在室温下的稳定性,在泵浦功率 300 mW 时,调整 PC 状态,出现中心波长为 1 532.44 nm 和 1 533.25 nm 的双波长,对双波长输出光谱进行重复扫描测量,监测双波长的稳定性。扫描间隔 3 min,扫描 9 次,如图 5 所示。可以看出,在 27 min 内波长漂移和输出激光功率波动都没有明显的变化,输出波长相对稳定。

测量了波长漂移和功率波动的具体变化,如图 6 所示。由图 6(a) 可知,1 532.44 nm 和 1 533.25 nm

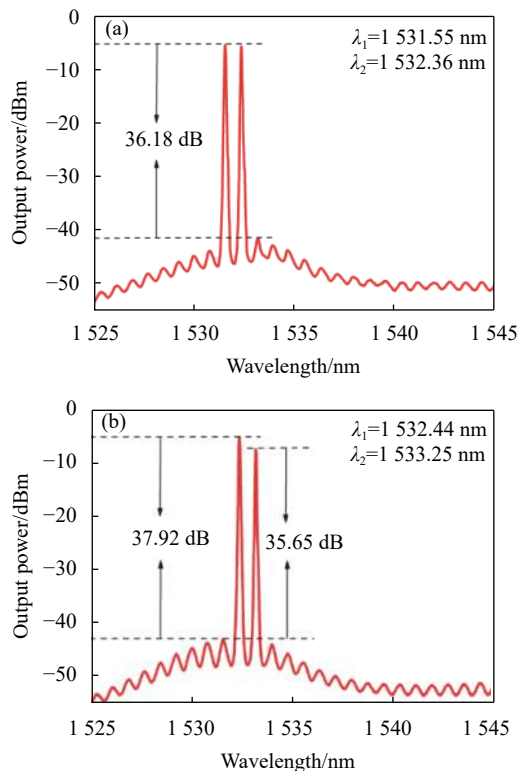


图 4 双波长输出光谱图

Fig.4 Output spectra of dual-wavelength

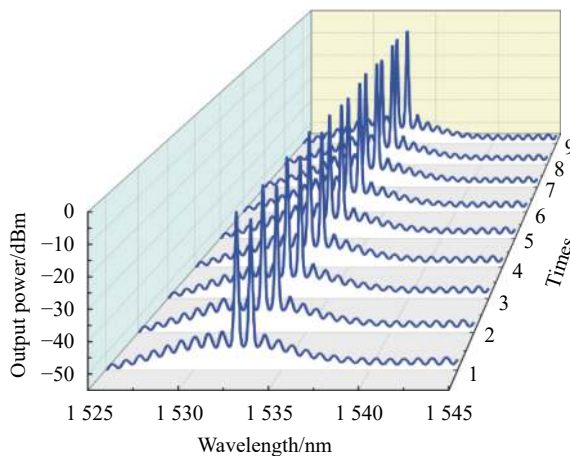


图 5 双波长状态稳定性测量

Fig.5 Stability measurements of dual-wavelength

处波长漂移分别 0.03 nm 和 0.02 nm;由图 6(b) 可知,1 532.44 nm 和 1 533.25 nm 处功率波动分别为 5.85 dB 和 2.67 dB。

保持泵浦功率不变,通过调节三个 PC 的偏振态,可以产生三波长的激光输出,如图 7 所示。其中心波长分别为 1 531.64 nm、1 532.45 nm 和 1 533.24 nm,边模抑制比 SMSR 大于 37 dB,最大峰值功率差为

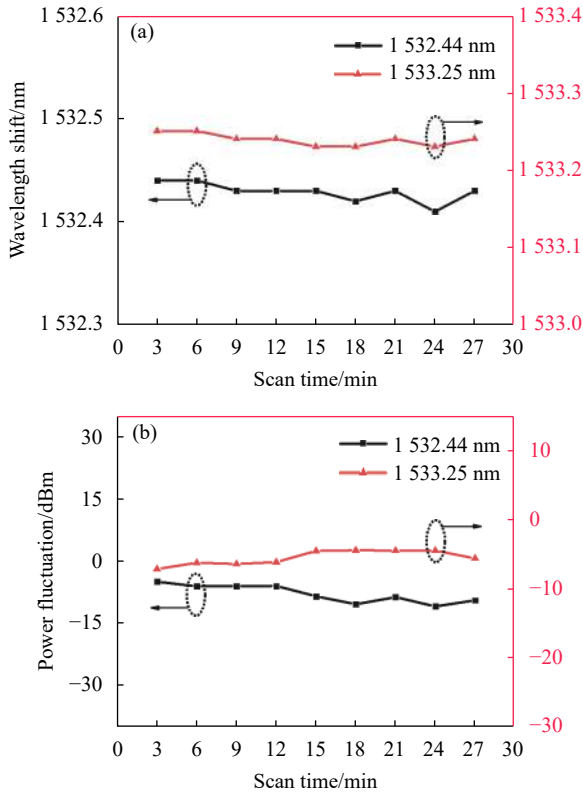


图 6 双波长在 27 min 内 (a) 波长漂移, (b) 功率波动测量
Fig.6 Measurements of (a) wavelength shift, (b) power fluctuation of double-wavelength in 27 min

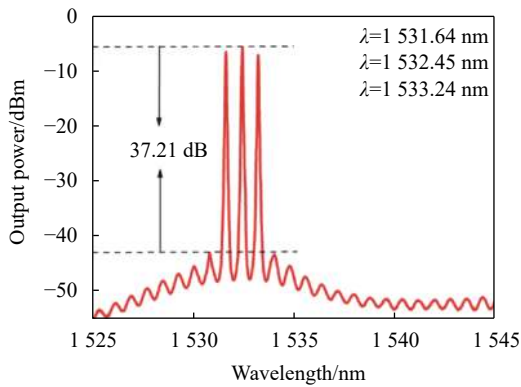


图 7 三波长输出光谱图
Fig.7 Output spectra of triple-wavelength

1.44 dB。为进一步测量该可切换多波长光纤激光器的稳定性,在 27 min 内对三波长输出光谱重复扫描,扫描间隔 3 min,如图 8 所示。

分别测量了三波长波长漂移和峰值功率随时间变化的稳定性,结果如图 9(a) 和 (b) 所示。实验结果表明,三波长输出相对稳定,在 27 min 内没有明显的波长偏移,由图 9(a) 和图 9(b) 可知,1531.64 nm,

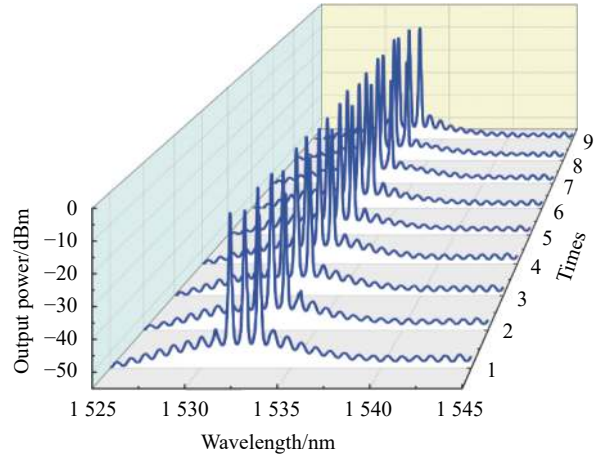


图 8 三波长稳定性测量
Fig.8 Stability measurements of triple-wavelength

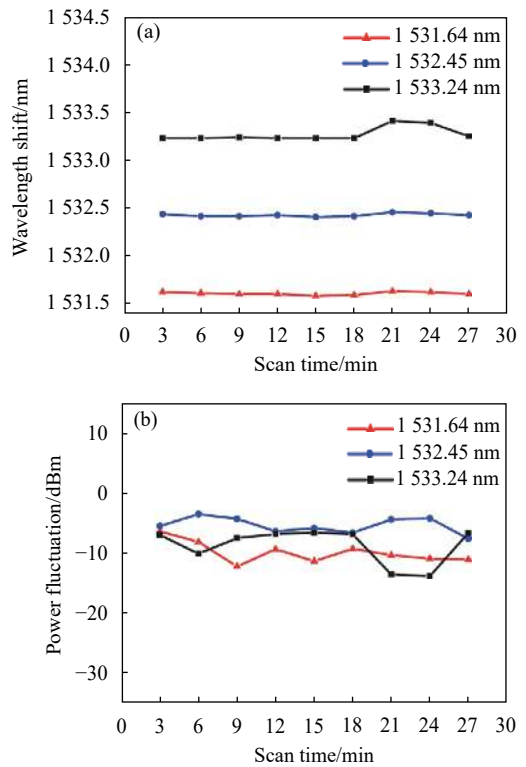


图 9 三波长在 27 min 内 (a) 波长漂移, (b) 功率波动测量
Fig.9 Measurements of (a) wavelength shift, (b) power fluctuation of triple-wavelength in 27 min

1532.45 nm 和 1533.24 nm 处波长漂移分别 0.05 nm, 0.05nm 和 0.18nm; 1531.64nm, 1532.45nm 和 1533.24nm 处功率波动分别为 5.73 dB, 3.98 dB 和 7.09 dB。

可以看出,输出激光的数量越多,功率波动越明显,这主要是由于激光增益在不同波长上的竞争造成的,泵浦功率不稳定和外部环境对它也有一定的影

响。需要注意的是,整个实验是在室温下进行的,虽然室温是浮动的,但由于实验结构中没有温敏器件和光纤,因此室温下的实验结果忽略了温度波动。

最后,通过调整泵浦功率为 300 mW 时的三个 PC,实现了具有四波长、五波长、六波长的可切换多波长掺铒光纤激光器,如图 10 所示。这三种输出波长的 SMSR 均大于 34 dB,由图 10(a)可以看出四波长的最大峰值功率差为 2.62 dB,说明激光的四波长激光具有比较好的功率均匀性,由图 10(b)和 10(c)可知五波长和六波长最大峰值功率差分别为 7.63 dB 和 4.70 dB。

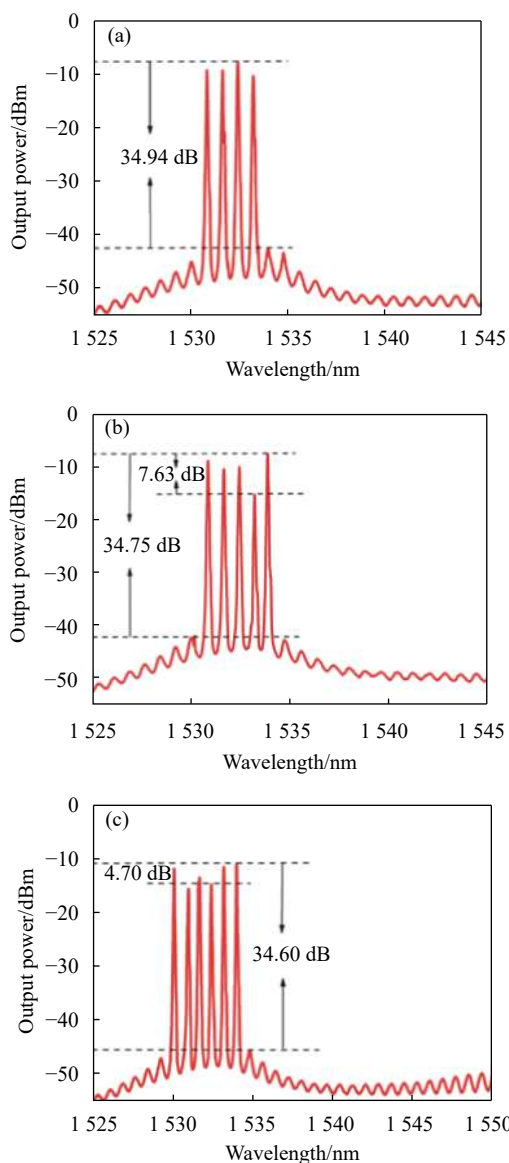


图 10 可切换 (a) 四波长, (b) 五波长, (c) 六波长输出光谱

Fig.10 Output spectra of switchable (a) quadruple-wavelength, (b) five-wavelength, (c) six-wavelength

实验中发现,该激光器所能实现的波长数主要是由滤波器的 EDF 的增益范围和自由光谱范围 (FSR) 决定。EDF 的增益范围增大,输出激光数量也会相对增加。而 FSR 越小,激光数量就越多,但过小的 FSR 会引起激光输出的不稳定。

当输出波长为三波长或四波长时,进一步调整 PC2 和 PC3,透射光的偏振状态发生改变,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。研究发现,该激光器三波长和四波长分别有不同的输出间隔,如图 11(a)~11(c) 和图 12(a)~12(e) 所示,三波长有三种不同的输出模式,四波长有五种不同的输出模式。

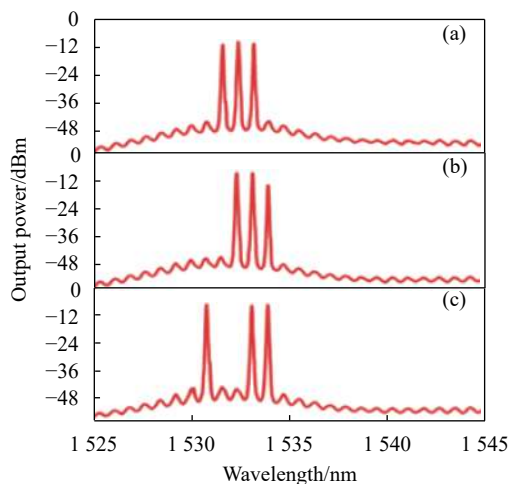


图 11 可切换三波长输出光谱

Fig.11 Output spectra of switchable triple-wavelength

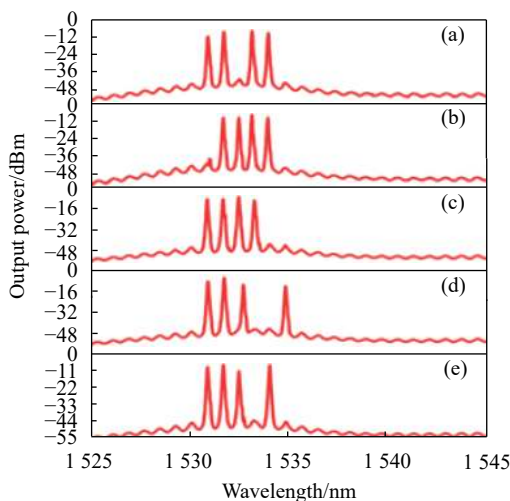


图 12 可切换四波长输出光谱

Fig.12 Output spectra of switchable quadruple-wavelength

综上所述,提出的基于双 Sagnac 环滤波器的多波长掺铒光纤激光器能够产生可切换的、稳定的单、双、三波长激光输出,最多输出波长数为六波长,同时三波长和四波长有不同的输出间隔,实验现象良好。

3 结 论

文中设计研究了一种可用于实现可切换多波长掺铒光纤激光器的梳状滤波结构。双 Sagnac 环滤波器主要由 PMF、FMF 和 PC 组成,将该滤波器应用于激光系统,基于 PHB 效应,通过调节三个 PC,在室温下可以得到稳定单、双、三波长输出的可切换多波长光纤激光器,最多输出波长数为六波长,同时还可以切换输出波长的位置。实验中,所获得输出激光的 SMSR 大于 34 dB,在稳定性测试中,测得最大波长漂移量小于 0.05 nm,输出激光较为稳定,且三波长和四波长有不同的输出间隔。该激光器具有结构简单,较高 SMSR,稳定性良好等优点,在光谱分析、光纤传感器和光通信等领域有潜在应用。

参考文献:

- [1] Shi Junkai, Wang Guoming, Ji Rongyi, et al. Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 810-819.
- [2] Qian Lifeng, Fen Dangqi, Xie Heng, et al. A novel tunable multi-wavelength Brillouin fiberlaser with switchable frequency spacing [J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 74-79.
- [3] Lin Zhen, Ren Guobin, Zheng Siwen, et al. Switchable multi-wavelength fiber laser based on cascade fiber tapers and phase modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3262-3268.
- [4] Zhao Xiaoli, Zhang Yumin, Song Yanming, et al. Switchable multi-wavelength fiber laser based on non-core fiber combing with polarization maintaining fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0201005.
- [5] Zhang Chenfeng, Sun Jiang, Jian Shuisheng. A new mechanism to suppress the homogeneous gain broadening for stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2013, 288: 97-100.
- [6] Peng Wanjiang, Liu Peng. Tunable dual-wavelength erbium-doped fiber lasers based on polarization-dependent MSM fiber filters [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(15): 240-247.
- [7] Liu Z Y, Liu Y G, Du J B, et al. Tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser with a polarization-maintaining photonic crystal fiber Sagnac loop filter [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 5(6): 446-448.
- [8] Zhou Ming, Luo Zhengqian, Cai Zhiping, et al. Switchable and tunable multiple-channel erbium-doped fiber laser using graphene-polymer nanocomposite and asymmetric two-stage fiber Sagnac loop filter [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2940-2948.
- [9] Bian Siyuan, Ren Meiqi, Wei Li. A wavelength spacing switchable and tunable high-birefringence fiber loop mirror filter [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(7): 1666-1670.
- [10] Cheng Jianjun, Zhang Liaolin, Ma Zhijun, et al. Tunable and switchable dual-wavelength Er-doped fiber ring laser using ASEs [J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 202-204.
- [11] Ding Zhenming, Wang Zhaokun, Zhao Chunliu, 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.
- [12] Sun G, Tang H, Zhou Y, et al. Dual-wavelength switchable erbium-doped fiber ring laser based on merged Sagnac and intermodal interferences in Sagnac loop mirror [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(1): 194-197.
- [13] He Wei, Zhou Kangpeng, Zhang Wen, et al. Stable and tunable multi-wavelength erbium-doped fibre laser with cascaded Sagnac loops incorporating polarization-maintaining fibres [J]. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 2018, 12(1-2): 1-7.
- [14] He Wei, Shangguan Chunmei, Zhu Lianqing, et al. Tunable and stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a double Sagnac comb filter with polarization-maintaining fibers [J]. *Optik*, 2017, 137: 254-261.
- [15] Chen Jing. Research of curvature and low-frequency acoustic wave sensor based on few-mode fiber and long-period fiber grating[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 22-23. (in Chinese)
- [16] Zhang Xin. Study on fiber laser and fiber sensor based on tunable Sagnac loop[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2016: 16-20. (in Chinese)