

可饱和吸收环镜滤波器的环形腔双波长激光器

夏志鸿, 果鑫, 张振鹤, 赖榕, 陈涛, 张威
(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:设计了一种基于可饱和吸收环镜滤波器的环形腔双波长激光器,在3 dB 光纤环镜中插入未受泵浦的掺铒光纤(EDF)做可饱和吸收体,构成可饱和吸收环镜滤波器,将此滤波器插入环形腔激光器中,通过调节偏振控制器来实现双波长的稳定输出。经过计算选择6.4 m的EDF作为增益介质,使用一段2 m未泵浦的EDF与2×2的3 dB耦合器结合形成可饱和吸收环镜滤波器来抑制超模。为抑制常温下EDF的均匀展宽导致模式竞争,选择1554 nm的光纤布拉格光栅(FBG)和1562 nm的FBG进行双波长激光,在Optisystem平台上进行仿真并搭建实验来测试输出激光的输出功率斜率效率、光信噪比、稳定性等。实验中得出了在室温下稳定输出的双波长激光,两波长各自的光信噪比为54.7 dB和57.5 dB;中心波长变化分别小于0.04 nm和0.55 nm;3 dB带宽均为~0.126 nm。

关键词:环形腔激光器;双波长;可饱和吸收环镜滤波器;偏振控制器;信噪比

中图分类号:O436;TN242 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.004

Annular cavity dual wavelength laser with saturated absorption ring mirror filter

XIA Zhi-hong, GUO Xin, ZHANG Zhen-he, LAI Rong, CHEN Tao, ZHANG Wei
(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A saturable dual-wavelength laser based on a saturable absorption ring filter is designed. An unpumped erbium-doped fiber is inserted into a 3 dB ring mirror to form a saturable absorption ring mirror filter, which is inserted into a ring laser to achieve a stable dual-wavelength output by adjusting the polarization controller. After calculation, 6.4 m erbium-doped fiber is selected as the gain medium, and a section of 2 m unpumped EDF is used to form a saturable absorption loop mirror filter in combination with a 2×2 3 dB coupler to suppress the supermode. In order to suppress the mode competition caused by the uniform widening of erbium-doped fiber at room temperature, 1554 nm fiber Bragg grating (FBG) and 1562 nm FBG are selected for dual-wavelength lasing. Simulation is conducted on the Optisystem platform and experiments are set up to test the output laser power, signal-to-noise ratio, stability, etc. The output signal is observed and analyzed with a Optical Spectrum Analyzer. In the experiment, the stable output of dual-wavelength laser at room temperature is obtained, and the signal-to-noise ratio of the two wavelengths is 54.70 dB and 57.50 dB respectively. The 3 dB bandwidth is about 0.13 nm.

Keywords: ring cavity laser; dual wavelength; saturable absorbing ring mirror filter; polarization controller; signal to noise ratio

基金项目:湖南省自然科学基金(省市联合)项目(No. 2022JJ50067);湖南省学位与研究生教学改革研究项目(No. 2022JGYB182);湖南省教育厅科学研究重点项目(No. 23A0446);湖南工业大学研究生科研创新项目(No. CX2314)资助。

作者简介:夏志鸿(2002-),女,本科,研究方向为激光器技术。E-mail:2080559672@qq.com

通讯作者:果鑫(1974-),男,本科,讲师,研究方向为光子技术与现代光通信技术。E-mail:578713735@qq.com

收稿日期:2024-03-04

1 引言

光纤激光器自诞生以来便凭借其特有的窄线宽、高信噪比等优点受到市场的关注^[1],而双波长激光器由于输出光束质量高、散热性能好、转换效率高、结构紧凑等特点^[2],在光纤传感^[3]、激光雷达^[4]、精密计量^[5]、激光干涉^[6]等领域得到了广泛的运用。在常温下,由于掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)所固有的均匀增益展宽效应的存在,极易引起模式竞争和模式跳变,在室温下难以获得稳定的双波长,目前解决该问题常用的方法是在谐振腔中加入滤波器件。常见的滤波器件有基于光纤光栅滤波器^[7]、基于保偏光纤光栅滤波器^[8]、啁啾光纤光栅 Sagnac 环境滤波器^[9]、马赫泽德干涉仪^[10]、Sagnac 干涉仪^[11]、新型滤波器等^[12]。

目前,Liu X 等人设计了以光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)和高非线性光子晶体光纤为主要器件的四波混频,产生了在室温下稳定输出、信号均匀的双波长激光^[13]。姚晓琼等人通过在激光器中加入环形滤波器来抑制不需要的振荡模式,输出激光的功率波动为 0.6 dB^[14]。Feifei Yin 等人研究出一种宽带可调谐单纵模无泵浦掺铒 Sagnac 环的掺铒光纤激光器,激光器的输出功率约为 3 dBm,光信噪比(Optical Signal to Noise Ratio, OSNR)均高于 50 dB^[15]。但此类研究大多都采用昂贵的光纤器件和材料,实验成本高,或者采用结构复杂的方案,引入较大的插入损耗,这使得激光器的运用受到了限制。EDF 能均匀加宽激光的带宽,采用环形腔结构可以消除增益介质带来的空间烧孔效应,有利于输出稳定双波长^[16-17],可饱和吸收环境滤波器能够压窄线宽,在常温下实现双波长的稳定输出。

本文设计了一种基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器设计方案,选择 EDF 为增益介质,并与基于反馈光纤环(Feedback Fiber Optic Ring, FFR)的环形双波长激光器进行性能对比。该方案结构简单,易于实现,输出功率稳定,采用全光纤设计,实现在常温下输出稳定的双波长激光,无需调节温度、压力等特性。通过控制偏振控制器来调节输出激光的 OSNR,得出 OSNR 分别为 54.70 dB 和 57.50 dB 且 3 dB 带宽均为 ~0.126 nm 的双波长激光。

2 基本原理分析

2.1 可饱和吸收环境滤波器的工作原理

可饱和吸收环境滤波器是高精度环形滤波器的

一种,它可以有效地抑制边模,实现单纵模激光的输出。可饱和吸收环境滤波器是由一个 2×2 且耦合比为 50 : 50 的 3 dB 光耦合器(Optocoupler, OC)和 2 m 的 EDF 组成,端口 2 和 3 通过光纤熔接在一起,形成一个环形,如图 1 所示。矢量光场为 E_1 的激光通过端口 1 进入滤波器,分别从端口 3、4 输出两束光,其光场用 E_3 、 E_4 表示^[18]:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-r} & i\sqrt{r} \\ i\sqrt{r} & \sqrt{1-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, r 为耦合系数,根据公式(1)可以得出输出光场 E_3 和 E_4 的表达式:

$$E_3 = E_1 \sqrt{1-r} + E_2 i\sqrt{r} \quad (2)$$

$$E_4 = E_1 i\sqrt{r} + E_2 \sqrt{1-r} \quad (3)$$

光场 E_3 经过可饱和吸收环境滤波器中的 EDF,其掺铒光纤增益系数为 g ,传播时间为 $\tau(\tau = \frac{2\pi}{FSR})$,而后再次通过 2×2 的 3 dB 光耦合器进入循环,过程用公式表示为:

$$E_2 = g e^{j\omega\tau} E_3 \quad (4)$$

ω :光场角频率。结合公式(2)和(4)得出:

$$E_2 = \frac{i g e^{j\omega\tau} \sqrt{r}}{1 - g e^{j\omega\tau} \sqrt{1-r}} E_1 \quad (5)$$

联立公式(5)和(2)得出输出光场 E_3 和 E_4 与输入光场 E_1 的关系:

$$E_3 = \frac{i\sqrt{r}}{1 - g e^{j\omega\tau} \sqrt{1-r}} E_1 \quad (6)$$

$$E_4 = \frac{\sqrt{1-r} - g e^{j\omega\tau}}{1 - g e^{j\omega\tau} \sqrt{1-r}} E_1 \quad (7)$$

通过以上推导,得出可吸收环境滤波器的透过率 T 为:

$$T = \left(\frac{E_4}{E_1} \right)^2 = \frac{1-r+g^2-2\sqrt{1-r}\cos(\tau\omega)}{1+g^2(1-r)-2g\sqrt{1-r}\cos(\tau\omega)} \quad (8)$$

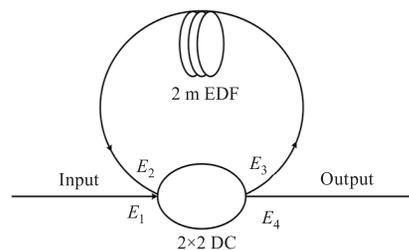


图 1 可饱和吸收环境滤波器示意图

Fig.1 Schematic diagram of saturable absorption environmental filter

2.2 可饱和吸收体选模原理

入射环形滤波器的光被 50 : 50 的光耦合器分成两路相同的波,随后这两路波在未抽运泵浦 EDF 处反向传播,形成驻波,如图 2 所示。选择 2 m 未泵浦的 EDF 作为可饱和吸收体 (Saturable Absorber, SA),由于 EDF 的吸收系数与光纤激光器中光的强度成反比,驻波在 EDF 传播时,其光功率成周期变化,因而有了沿 SA 周期变化的吸收系数^[19]。未泵浦 EDF 在驻波的波节处的光吸收强,在波腹处的光吸收弱,因而未泵浦 EDF 对驻波为部分吸收。未泵浦 EDF 对非驻波全部吸收,非驻波的损耗大,不易起振,驻波起振从而进行模式选择^[20]。根据 Karmers-Kroming 关系,得出 EDF 的折射率与光功率一致成周期变化,相当于在饱和吸收体中形成了超窄带宽的自诱导光纤光栅,实现双波长的稳定输出^[21]。

自诱导光纤光栅的传播表示为^[22]:

$$T = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_g)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_g) - \frac{\sigma^2}{\kappa^2}} \quad (9)$$

3 dB 带宽可表示为:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa_g \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (10)$$

其中, κ_g 是动态光栅的耦合系数:

$$\kappa_g = \frac{2\Delta n}{n_{\text{eff}}\lambda} \quad (11)$$

式中, κ 为自诱导光纤光栅在一个周期的平均有效折射率的变化、 L_g 为自诱导光纤光栅的长度、 σ 为相位失谐量, $\sigma = \frac{\pi - \lambda}{\beta}$, 而 β 为模式传播常数, λ

为波长, N 为光栅周期总数 ($N = \frac{L_{\text{SA}}}{\Lambda}$)、 $\Lambda = \frac{\lambda_D}{2n_{\text{eff}}}$ 为周期、 L_{SA} 可饱和吸收体的长度、 λ_D 是反射率最大处的中心波长、 Δn 为诱导折射率的变化、 n_{eff} 是掺铒光纤的有效折射率。

EDF 在 1554 nm 左右的吸收系数为 6.5 dB/m, 腔内的功率在 280 mW 下, 计算 Δn 约为 3×10^{-7} ^[23]。未泵浦的增益光纤长 2 m, n_{eff} 约为 1.44, 根据公式(10)和(11)计算出它的 3 dB 带宽为 4.76 MHz。主腔长约为 15 m, 经计算其自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 为 13.793 MHz, 满足单纵模选频条件, 由于实验器材的有限, 实验未检验单纵模的存在。

3 实验方案设计及理论分析

本文采用两组对照组, 研究不同高精度滤波器对双波长输出的影响。图 2(a) 为基于可饱和吸收环镜滤波器的环形腔双波长激光器的结构。由 974 nm 泵浦光源 (974 nm Pump)、6.4 m 的 EDF、波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM)、光隔离器 (Isolator, ISO)、OC、FBG、偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 和可饱和吸收环镜滤波器组成。本实验所使用的掺铒光纤吸收系数为 6.5 dB/m, 计算得出其最佳增益长度为 6.4 m。

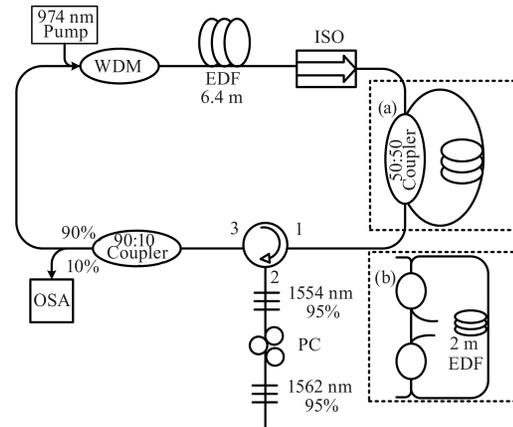


图 2 基于可饱和吸收环镜滤波器的环形腔双波长激光器的结构
Fig. 2 Structure of a ring-cavity dual-wavelength laser based on a saturable absorbing ring mirror filter

974 nm 的泵浦光通过 WDM 进入腔内, 经过 6.4 m 的 EDF 增益放大, ISO 确保腔内的光单向运转。光通过 50:50 的 3 dB 光耦合器进入可饱和吸收环镜滤波器, 在辅腔内来回干涉, 进行选模并抑制边模。将两个中心波长间隔为 8 nm 的 FBG 结合在一起, 得到在偏振方向上相互垂直的两个波长的反射峰。

偏振控制器的琼斯矩阵 G 可表示为:^[23]

$$G = \begin{bmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi \\ \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\frac{iw'}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(-\frac{iw'}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi \\ \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, ϕ 为 PC 波片的应力诱导双折射轴与水平参考方向之间的夹角; w' 为偏振控制器挤压光纤而产生的相对相位延迟量。输入激光的光琼斯矩阵为 E , 经过偏振控制器的偏振态琼斯矢量 E' 为:

$$E' = E \cdot G_1 \cdot G_2 \cdots G_3 \quad (13)$$

由公式(13)可知 PC 可以调节通过它的激光的参数, 在本实验中, PC 放置在两个光栅之间调节通

过 1562 nm 光栅的激光的参数,进而改变波峰的反射率,使两个波长的峰值功率相近,从而改变两个波长的输出功率^[24]。两个 FBG 和偏振控制器连接环形器(Circulator, CIR)的端口 2,激光通过该部件进行选频。最后 10 % 的光通过 90:10 的光耦合器输出。

图 2(b) 为基于 FFR 的环形双波长激光器结构,与图 2(a) 的不同点为 FFR 的运用。FFR 的结构如图 3 所示。

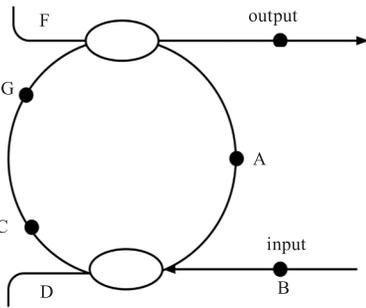


图 3 FFR 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FFR

FFR 是由两对 2 × 2 OC 连接而来,加入 EDF 作为饱和吸收体,形成一个闭合的腔体,图 3 中的 A ~ G 表示所处位置的光强。光场 D 和光场 E 的表达式为^[25-26]:

$$D = -\sqrt{1-\kappa} \cdot \frac{1 - r \exp[-j(\phi + \psi)]}{1 - (1-\kappa)r \exp[-j(\phi + \psi)]} \quad (14)$$

$$E = \frac{\kappa r \exp[-j(\phi + \psi)]}{1 - (1-\kappa)r \exp[-j(\phi + \psi)]} \quad (15)$$

其中, κ 为光场从腔外向腔内耦合的功率耦合系数(0 ~ 1); r 为光在腔内传播一圈的传递系数(0 ~ 1); ψ 为额外相移; $\phi = \frac{2\pi n L f}{c}$ 为光在腔内循环一周随频率 f 所加的相移; n 为折射率; L 为腔长; c 为真空中光速。

通过 D 和 E 的互补性推导出 FFR 结构的透过率和延时特性为:

$$|H_R(f)|_{dB}^2 = 20 \lg |H_R(f)| \quad (16)$$

$$\tau_R(f) = -\frac{d}{2\pi df} \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H_R(f)]}{\text{Re}[H_R(f)]} \right\} \quad (17)$$

4 仿真及实验的结果分析

4.1 仿真结果分析

对图 2(a) 所示的基于可饱和吸收环境滤波器的

的环形腔双波长激光器结构和图 2(b) 所示的基于 FFR 环形双波长激光器结构进行仿真,得出的仿真结果分别为图 4 的(a)、(c) 图。图(a) 中于 1554 nm 处的输出 OSNR 为 51.00 dB、于 1562 nm 处的输出 OSNR 为 50.00 dB;图(c) 中于 1554 nm 处的输出 OSNR 为 53.00 dB、于 1562 nm 处的输出 OSNR 为 47.00 dB;通过比较得出基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器结果更佳。查阅资料后得出在 FFR 结构中光纤耦合器的耦合比越大,输出信号的效果更佳,在仿真平台 Optisystem 上改变耦合器的耦合比(50 : 50、60 : 40、70 : 30、80 : 20、90 : 10)进行仿真,其仿真结果与此结论符合。取耦合器的耦合比为 99 : 1 且辅腔中的占光比为 1 % ,对图 2 中的(a)、(b) 结构进行仿真,结果为图 4 的(b)、(d)。经对比耦合比 99 : 1 的 FFR 结构比耦合比 50 : 50 的 FFR 结构更为优越,但因实验器材有限,本次实验选择耦合比 50 : 50 的耦合器进行实验,在后续过程中会完善其结果。

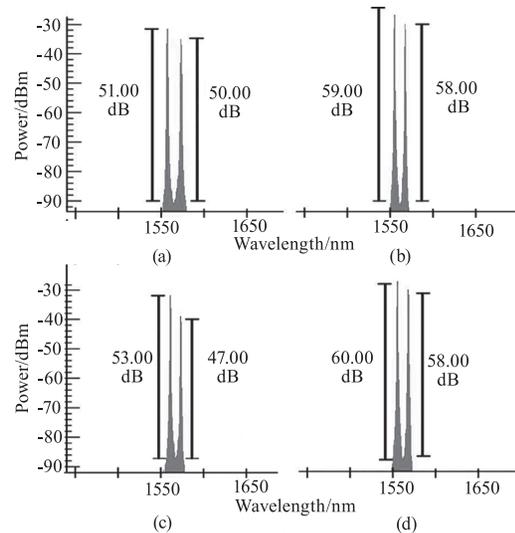


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

4.2 实验结果与讨论

4.2.1 单波长实验

对图 2 中的(a) 组在不加选频器件(由两个 FBG 和 PC 组成的结构)下,进行滤波分析,图 5 为其结果。图 5 中(a) 组表示在滤波结构中不加 EDF 下的滤波情况,图 5 中(b) 组表示在加 EDF 下的滤波情况;由图 5 可知,加上 EDF 后,滤波器的抑制超模能力增强,但由于 EDF 在腔内的插入损耗,输出功率有所下降。

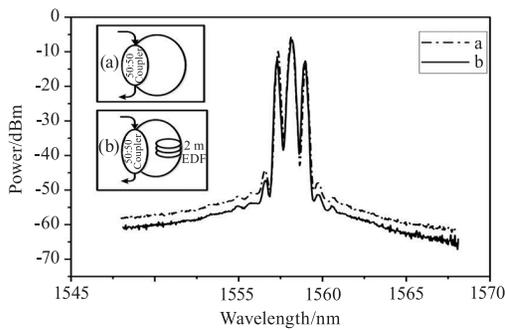


图 5 滤波结果

Fig. 5 Filtering results

通过环形器加入 1554 nm 反射率为 95 % 的 FBG, 得出的光谱图为图 6 所示, OC 曲线表示加入未泵浦掺铒光纤 3 dB 滤波器得到的中心波长为 1554 nm 的光谱图, OSNR 为 60.46 dB, 3 dB 带宽为 0.130 nm, 泵浦斜率效率为 1.48 %; FFR 曲线表示加入 FFR 结构的输出光谱图, 其 OSNR 为 59.78 dB, 3 dB 带宽为 0.129 nm, 泵浦输出功率斜率为 0.37 %。根据数据可得出可饱和吸收环境滤波器的滤波特性和抑制边模能力比 FFR 结构更优秀。

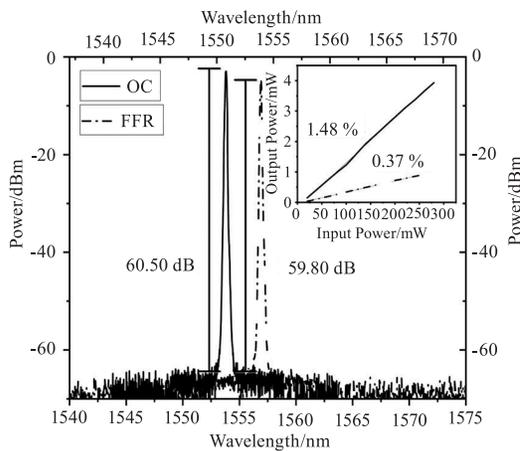


图 6 FBG 为 1554 nm 的波形图

Fig. 6 FBG is the waveform of 1554 nm

4. 2. 2 双波长实验

中心波长间隔越大输出越稳定, OSNR 越大但激光器的输出斜率效率会降低^[27], 折中选择中心波长间隔为 8 nm 的 1554 nm 和 1562 nm、反射率均为 95 % 的 FBG 进行选频, 将 PC 置于 FBG 之间, 调节 1562 nm 波长的损耗与增益, 使两个波长的输出功率相近。图 7 中的 OC 曲线表示加入未泵浦掺铒光纤 3 dB 滤波器的光谱图, 频率为 1554 nm 时的 OSNR 为 54.70 dB, 频率为 1562 nm 时的 OSNR

为 57.50 dB; 图 7 中的 FFR 曲线表示加入 FFR 结构的输出光谱图, 频率为 1554 nm 时的 OSNR 为 54.00 dB, 频率为 1562 nm 的 OSNR 为 57.00 dB, 由数据可得在耦合比为 50 : 50 下, 基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器的信噪比性能更好。由于 FFR 结构中光能量的损失, 其斜率效率(0.59 %) 小于基于可饱和吸收环境滤波器环形腔双波长结构的斜率效率(1.51 %)。

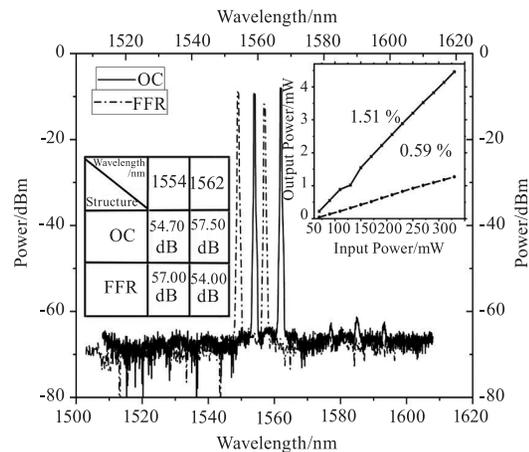
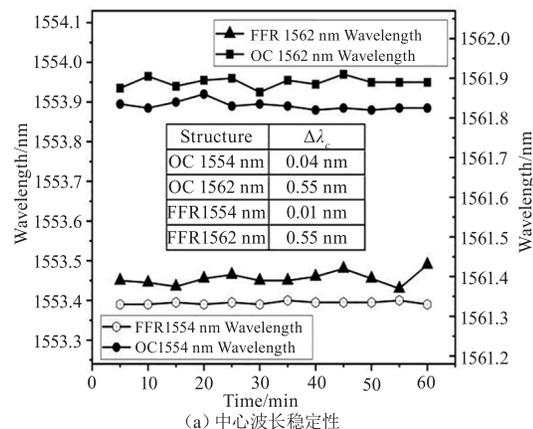


图 7 FBG 分别 1554 nm 和 1562 nm 的波形图

Fig. 7 Waveforms of FBG at 1554 nm and 1562 nm respectively

对两种结构的输出波形稳定性进行分析, 每隔 5 min 进行一次光谱测量, 一共 12 组。图 8(a) 表示中心波长变化情况, 图 8(b) 显示 3 dB 带宽变化。根据图 8(a) 得知两种结构的中心波长都很稳定, $\Delta\lambda_c < 0.06$ nm; 由图 8(b) 可得基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器结构的输出波长的 3 dB 带宽稳定性较好, 1554 nm 处的输出激光的 3 dB 带宽变化范围为 0.006 nm, 而 1562 nm 处为 0.014 nm, 两者的 3 dB 带宽均为 ~ 0.126 nm。图 9 为其输出光谱图。



(a) 中心波长稳定性

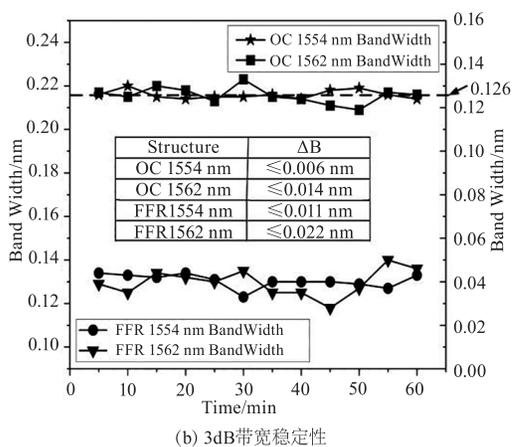


图8 双波长激光的稳定性

Fig. 8 Stability of dual-wavelength laser

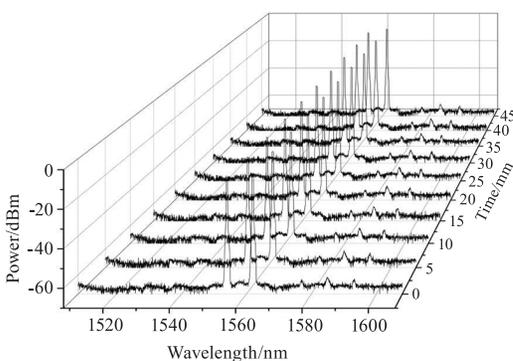


图9 基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器的输出波形图

Fig. 9 Output waveform of a ring-cavity dual-wavelength laser based on a saturable absorbing ring mirror filter

5 结论

本文选择中心波长分别为 1554 nm 和 1562 nm 且反射率均为 95 % 的 FBG 为选频器件,采用 2 m 的未泵浦 EDF 为饱和吸收体进行选模,设计了一种基于可饱和吸收环境滤波器的环形腔双波长激光器。使用 974 nm 泵浦光源产生激光,激光通过 6.4 m 的 EDF 达到增益效果,在实验中调节 PC 来改变其中一个波长的损耗与增益来实现双波长的输出,其双峰的光信噪比分别为 54.7 dB 和 57.5 dB,中心波长变化分别小于 0.040 nm 和 0.550 nm;3 dB 带宽均为 ~ 0.126 nm,3 dB 带宽变化量均小于 0.015 nm,在常温下稳定输出。该结构相比于其他结构更简单、易于实现,可广泛应用于光纤通信、光测量、激光雷达、精密计量、激光干涉等领域。

参考文献:

[1] Peng Wanjing, Liu Peng. Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polari-

zation-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68 (15):246-253. (in Chinese)

彭万敬,刘鹏. 基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器[J]. 物理学报,2019,68(15):246-253.

- [2] Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, et al. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11):1102004. (in Chinese)
- 白扬博,向望华,祖鹏,等. 基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11):1102004-1.
- [3] Bi M, Zhang H, Zhao Y, et al. Theoretical and experimental investigation of intracavity displacement-sensor based on all-single-mode fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 40(8):2585-2593.
- [4] Wang F, Kang W. Investigation of optical short pulse generation using intensity modulation for LiDAR and free-space communications [J]. Optica Applicata, 2021, 51(1):97-107.
- [5] Dai S B, Tu Z H, Zhu S Q, et al. Frequency expansion of orthogonally polarized dual-wavelength laser by cascaded stimulated Raman scattering [J]. Optics Letters, 2019, 44(15):3705-3708.
- [6] Fei L, Zhang S. The discovery of nanometer fringes in laser self-mixing interference [J]. Optics Communications, 2007, 273(1):226-230.
- [7] Liu Yan, Ning Tigang, Tan Zhongwei, et al. Fiber gratings comb filter and its applications in novel wavelength selectable fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2004, (6):763-766. (in Chinese)
- 刘艳,宁提纲,谭中伟,等. 光纤光栅梳状滤波器及其在新型可选波长激光器中的应用 [J]. 光学学报, 2004, (6):763-766.
- [8] Liu D, Ngo N Q, Dong X Y, et al. A stable dual-wavelength fiber laser with tunable wavelength spacing using a polarization-maintaining linear cavity [J]. Applied Physics B, 2005, 81:807-811.
- [9] He X, Wang D N, Liao C R. Tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(6):842-849.
- [10] Ali M I M, Ibrahim A S, Bakar A H M, et al. Tapered-EDF-based mach-zehnder interferometer for dual-wavelength fiber laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5):1-9.

- [11] Li R, Shi H, Tian H, et al. All-polarization-maintaining dual-wavelength mode-locked fiber laser based on Sagnac loop filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28302 – 28311.
- [12] Zou H, Lou S, Yin G, et al. Switchable dual-wavelength PM-EDF ring laser based on a novel filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(11): 1003 – 1006.
- [13] Liu X, Yang X, Lu F, et al. Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 142 – 147.
- [14] Yao Xiaoqiong, Sun Wei, Wang Xibin. Dual-wavelength single frequency fiber laser based on ring filter[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(1): 98 – 100. (in Chinese)
姚晓琼, 孙薇, 王喜斌. 基于环形滤波器的双波长单频光纤激光器[J]. *激光技术*, 2017, 41(1): 98 – 100.
- [15] Cao Z, Zhang Z, Shui T, et al. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with tunable wavelength spacing based on a compact fiber filter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 137 – 141.
- [16] Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, et al. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 602013. (in Chinese)
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 602013.
- [17] Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zengrong, et al. Dual-wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 402010. (in Chinese)
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): 402010.
- [18] He X, Fang X, Liao C, et al. A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser with a simple linear cavity[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21773 – 21781.
- [19] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173 – 14179.
- [20] Yin F, Yang S, Chen H, et al. Tunable single-longitudinal-mode ytterbium all fiber laser with saturable-absorber-based auto-tracking filter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10 – 11): 2702 – 2706.
- [21] Bai Yan, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2 μm band using saturable absorber based on PM-TDF[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 101003. (in Chinese)
白燕, 延凤平, 冯亭, 等. 基于保偏掺铒光纤饱和吸收体的 2 μm 波段超窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 101003.
- [22] Cao Ye, Jia Guoqiang, Zhao Junfa, et al. Dual-wavelength single longitudinal-mode erbium-doped fiber lasers based on feedback fiber ring[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(5): 833 – 837. (in Chinese)
曹晔, 贾国强, 赵军发, 等. 基于反馈光纤环的双波长单纵模光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(5): 833 – 837.
- [23] Zhang Yingqiang, Cheng Zhiyu, Li Haizhen, et al. Polarization state preparation and control integration of a quantum communication system based on a field-programmable gate array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 252 – 257. (in Chinese)
张英强, 程子毓, 李海珍, 等. 基于 FPGA 的量子通信系统偏振态制备及控制集成化[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 252 – 257.
- [24] Park H G, Lim K A, Chin Y J, et al. Feedback effects in erbium-doped fiber amplifier/source for open-loop fiber-optic gyroscope [J]. *Journal of lightwave technology*, 1997, 15(8): 1587 – 1593.
- [25] Zhang Xinping, Niu Xiaochen, Huang Jie, et al. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106001. (in Chinese)
张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2106001.
- [26] Yin F, Yang S, Chen H, et al. Tunable single-longitudinal-mode ytterbium all fiber laser with saturable-absorber-based auto-tracking filter [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10 – 11): 2702 – 2706.
- [27] Zhang Zhenhe, Liu Fengnian, Guo Xin, et al. Design and optimization of dual-wavelength linear cavity erbium doped fiber laser based on double fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(23): 70 – 79. (in Chinese)
张振鹤, 刘丰年, 果鑫, 等. 基于光纤布拉格光栅对的双波长线形腔掺铒光纤激光器设计与优化[J]. *光学学报*, 2023, 43(23): 70 – 79.