

文章编号: 1005-5630(2026)02-0043-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202412120107

基于 Lyot 滤波器的可调谐双波长锁模 光纤激光器

李从辉¹, 白松涛¹, 刘峥煜¹, 彭思齐¹, 夏 宇², 李 敏¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 本研究成功搭建了一种基于半导体可饱和吸收体的可调谐双波长锁模光纤激光器。通过波分复用器和保偏光纤之间的角度拼接, 在腔体内产生了临界周期性 Lyot 滤波效应。实验表明, 通过调节泵浦功率及偏振控制器, 该激光器实现了连续可调谐单波长和异步双波长两种模式的切换输出。在单波长工作模式下, 输出波长可在 1556~1570 nm 范围内连续调谐; 在异步双波长工作模式下, 受到腔体色散的影响, 腔体内异步脉冲序列之间的重复频率差可在 152~425 Hz 范围内进行调节。该系统具有较好的稳定性, 结构紧凑且配置操作简单、稳固, 为双光梳光谱学提供了更多的实际应用。

关键词: Lyot 滤波器; 可调谐激光器; 单波长模式; 异步双波长模式

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A

Tunable dual-wavelength mode locked fiber laser based on Lyot filter

LI Conghui¹, BAI Songtao¹, LIU Zhengyu¹, PENG Siqi¹, XIA Yu², LI Min¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: This study demonstrates a tunable dual-wavelength mode-locked fiber laser based on a semiconductor saturable absorber. By employing angular splicing between a wavelength division multiplexer and polarization-maintaining fiber, a critical periodic Lyot filtering effect is generated within the cavity. Experimental results indicate that by adjusting the pump power and polarization controllers, the laser achieves switchable output between continuously tunable single-wavelength and asynchronous dual-wavelength operation modes. In the single-wavelength mode, the output wavelength can be continuously tuned from 1556 nm to 1570 nm. In the asynchronous dual-

收稿日期: 2024-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62375173, 61927813)

第一作者: 李从辉(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为二维材料的太赫兹电场及其波谱特性研究。E-mail: conghui0826@163.com

通信作者: 李 敏(1986—), 女, 副教授, 研究方向为太赫兹光梳光谱。E-mail: minli_1220@163.com

wavelength mode, influenced by the cavity dispersion, the repetition frequency difference between the asynchronous pulse trains can be adjusted within the range of 152 Hz to 425 Hz. The system exhibits good stability, compact structure, and simple, robust configuration, offering enhanced practical applicability for dual-comb spectroscopy.

Keywords: Lyot filter; tunable laser; single-wavelength mode; asynchronous dual-wavelength mode

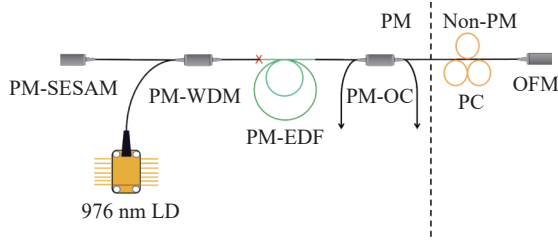
被动锁模激光器作为一种广泛应用的超短激光源,通过锁定工作中振荡的所有纵向模式的相位形成周期性脉冲^[1]。鉴于其在计量学^[2]、生物医学成像^[3-4]、测距和通信^[5-6]等方面的重要应用,锁模激光器的动态过程和特性已通过理论与实验得到广泛研究^[7-8]。光频梳作为一种新的技术,通过对脉冲周期的精确控制提高了时间及频率精度,在激光频率测量、光子钟、精密光谱等领域展现出巨大优势和应用前景^[9-12]。近年来,双梳激光器因其在宽带光谱测量和测距中具有超高分辨率、高灵敏度和高采样率而备受关注^[13-14]。在传统的双梳系统中^[15],光梳源通常由两个重复频率略有不同的高度相干的锁模光纤激光器组成。两个独立锁模激光器的高相干性需要通过复杂的电子反馈系统实现相位锁定来维持^[16-17],这导致系统体积庞大、技术实现复杂且成本高昂。而采用单谐振腔直接产生重复频率略有差异的双光梳脉冲,具有优异的共模噪声抑制能力和紧凑的系统结构,是一个更具吸引力和前景的方案^[18-19]。在单谐振腔双波长运行中,锁模过程和多通道光谱滤波通过协同作用,共同实现稳定的双波长输出。一般来说,光谱滤波是通过腔内双折射引起的周期性滤波效应来实现的。该滤波器在工作波段上具有可调谐切换能力,同时可以通过真正的可饱和吸收体来实现锁模,包括半导体可饱和吸收镜^[20]、碳纳米管^[21]等材料,以及类可饱和吸收体,如非线性偏振演化^[22]、非线性光学环境、非线性放大环境^[23]等。利用脉冲在不同尺寸光纤中传播的不同特性,可以在光纤锁模激光器中产生不同重复频率的脉冲序列。2019年,Luo等^[24]报道了一种全光纤双波长双梳锁模激光器,并演示了具有不同光谱形状和中心波长的单波长锁模。通过调节偏振控制器(polarization controller, PC)在激光腔中的状态,获得了稳定可控的双波长锁模。由于激光腔

的色散,不同波长的锁模脉冲具有不同的群速,形成重频差为 239 Hz 的双频梳。2020年,Zhu等^[25]报道了一种设计简单且光谱宽度为 30 nm,基于 Lyot 滤波器的波长可调谐双波长锁模激光器。在双波长范围内,激光器输出的中心波长为 1 535 nm 和 1 564 nm。此外,还能获得可调谐为 1 532~1 562 nm 的单波长锁模激光器。与传统的双波长锁模系统相比,采用 Lyot 滤波器的系统具有更好的波长可调谐性,能够动态调节激光器的输出波长范围。

本研究主要利用波长复用技术设计并搭建了可调谐双波长锁模光纤激光器,结合偏振控制器和 Lyot 滤波器,在同一个激光腔内实现了单、双波长的可调谐锁模输出。通过 Lyot 滤波效应调整偏振状态,可以在 14 nm 的调谐范围内实现单波长模式输出。异步双波长模式下脉冲偏移重复频率调谐范围为 152~425 Hz。通过半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)的应用,系统实现了更高的集成度和可控性。该系统结构简单且支持重频差调节,可作为双光梳光谱研究中的稳定光源。

1 实验装置

双波长锁模光纤激光器的结构如图 1 所示。一根长约 0.8 m 的掺铒光纤(erbium-doped fiber, EDF)通过波分复用器,用 976 nm 的二极管激光器进行泵浦,最大输出功率为 600 mW。两者熔接(断面倾斜角为 5°)后产生波长相关的相位差,从而导致周期性 Lyot 滤波效应的产生。在线性腔中,用一个弛豫时间为 4 ps 的商用 SESAM 作为端镜,另一端用光纤镜。一个 10/90 光耦合器(optical coupler, OC)用于连接掺铒光纤和偏振控制器,以闭合腔体并输出激光。



LD. 激光二极管; PM. 保偏光纤; EDF. 掺铒单模光纤; WDM. 波分复用器; OC. 10/90 分光比的光纤耦合器; OFM. 光纤镜; SESAM. 半导体饱和吸收镜; PC. 偏振控制器; 红色×. 光纤熔接(断面倾斜角 5°)。

图1 双波长光纤激光器实验装置

Fig. 1 Diagram of the dual-wavelength fiber laser experimental setup

线性腔的长度为 17.5 m, 对应重复频率约为 11.8 MHz。PM-EDF 和波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)的群速度色散(group velocity dispersion, GVD)分别为 $-22 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 和 $5.6 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 左右, 其他光纤的 GVD 为 $18 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。SESAM 带来的色散约为 1000 fs^2 。因此, 净腔色散约为 -0.156 ps^2 , 表明激光腔在负色散区域工作。输出脉冲序列由一个 2 GHz 的光电探测器检测, 并通过带宽为 4 GHz 的数字示波器(RIGOL, DS4032)、光谱分析仪(OSA, Thorlabs, 207C)和射频分析仪(Agilent Technologies N9000A)进行监测。

2 实验结果与分析

一般来说, 双波长的产生需要腔体具有特定的滤波功能。为此, 在腔体中插入了一小段角度拼接的 PM 光纤。当光沿着保偏光纤的不同轴轴向传输时, 会因为错位角的拼接而产生相位差。这种偏移会产生随波长变化的损耗, 从而形成随波长变化的周期性滤波效应。同时, 输入光的偏振状态可以通过 PC 进行调节, 以此实现对透射峰间距和透射光谱深度的调控。透射峰的周期为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2BL} \quad (1)$$

式中: λ 为中心波长(1560 nm); B 为保偏光纤的平均双折射系数, PM-EDF 和 WDM 尾纤的双折射系数分别约为 3.5×10^{-4} 和 4.1×10^{-4} ; L 为有效长度。因此, 激光在腔体中经两次传输后的通带间距 $\Delta\lambda$ 约为 4.0 nm。在本实验, 可以通过

改变 PC 对滤波器的传输函数进行相位调制, 以实现光谱调谐。为了确认实际的通带间距, 使用光谱分析仪来记录放大自发辐射的光谱。如图 2 所示, 黑色为计算得到的 Lyot 滤波器透射曲线, 红色为实际测得的滤波曲线, 其结果与计算所得的 Lyot 滤波器的滤波周期间隔基本一致。两者存在的细小差异可能是缘于对双折射的估计不够准确。

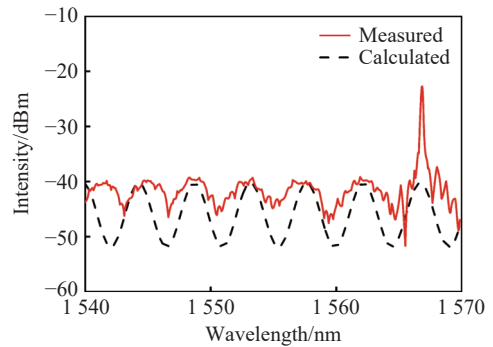


图2 Lyot滤波器的滤波间隔实验及计算结果

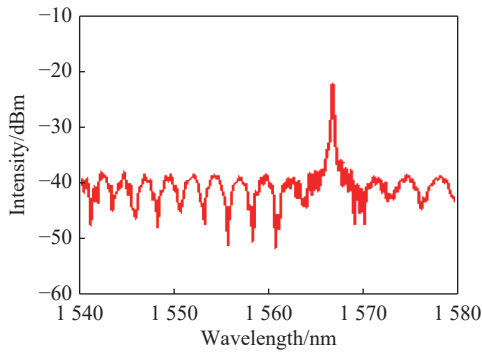
Fig. 2 Lyot filtering interval experiment and calculation results

如图 3 所示, 在 1540 ~ 1580 nm 波段, 可以观察到明显的周期性传输峰, 腔内传输光的不同极化状态会导致透射峰的波长间距和透射光谱的调制深度发生变化。由图 3(a)~(c)可知, 透射峰的形状均为 n 型, 且其波长间距会随腔内偏振态的改变而改变。图 3(c)中的波长间距约为 6.8 nm, 是图 3(a)中波长间距的 3 倍左右。需要指出的是, 透射峰曲线的调制深度也会随腔内偏振态的改变而改变, 在中心波长 1560 nm 附近, 透射曲线的调制深度最大, 在短波和长波区域, 透射曲线的调制深度逐渐减弱。这是由于振荡器内光学元件工作的中心波长都在 1550 nm 附近, 当这些光学元件远离其工作的中心波长时, 所传输的能量会随之减弱。

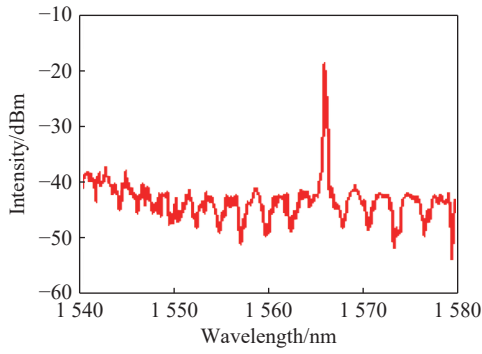
2.1 连续可调谐单波长输出模式

在 106 mW 的泵浦功率下, 通过调节 PC 实现了连续可调谐单波长输出, 且输出脉冲功率为 1 mW。图 4(a)为输出脉冲光谱图, 位于光谱两侧的 Kelly 边带表明, 该激光器为传统孤子锁模。使用自相关仪测得输出脉冲宽度为 797 fs。图 4(b)所示射频光谱图显示, 脉冲信噪比为 58 dB。

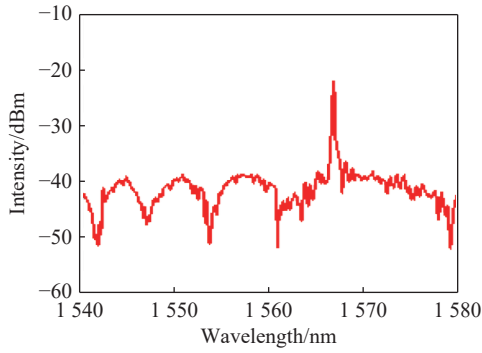
单波长模式的中心波长可以通过调节 PC,



(a) 偏振态1



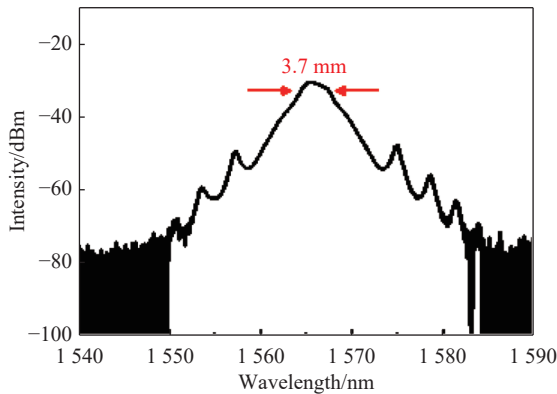
(b) 偏振态2



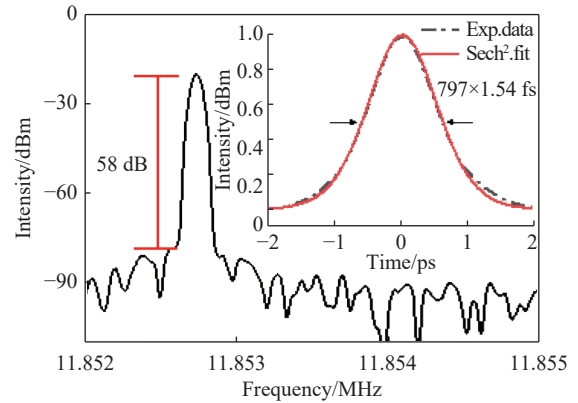
(c) 偏振态3

图 3 不同偏振状态下的 Lyot 滤波器传输光谱

Fig. 3 Transmission spectrum of Lyot filter under different polarization states

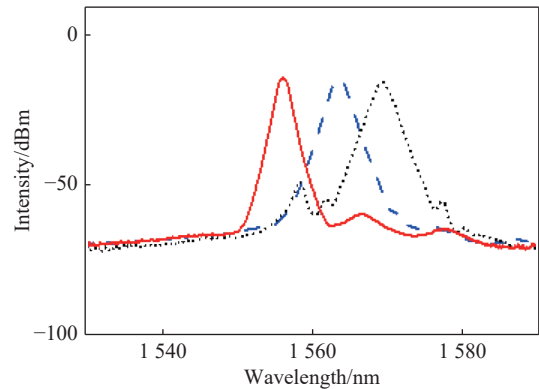


(a) 带有Kelly边带的光谱

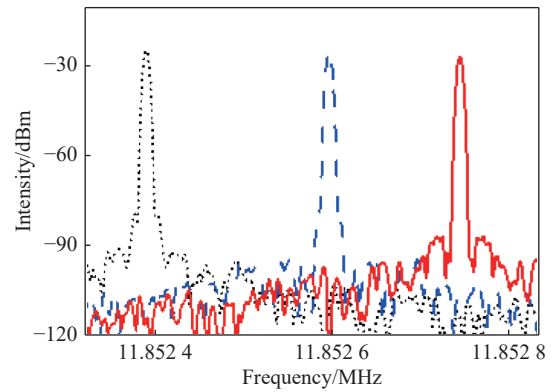


插图中黑色虚线 (Exp.data) 表示由自相关仪测得的脉冲序列自相关轨迹的数据; 红色实线 (Sech2.fit) 表示在双曲正割曲线 (Sech2) 拟合下的自相关轨迹拟合结果。

(b) 射频光谱; 插图为自相关曲线



(c) 以孤子模式运行的激光输出光谱图



(d) 可调谐射频频谱图

图(c)中3个颜色的激光输出光谱信号分别对应图(d)中相同颜色的频谱信号。

图 4 单波长锁模激光器输出特性图

Fig. 4 Output characteristics of the single-wavelength mode-locked laser

在 1556 nm 至 1570 nm 之间实现连续调谐, 如图 4 所示。一般来说, 激光输出光谱的带宽较宽, 因为其在传统孤子状态下的调制深度较弱并

伴有 Kelly 边带。如图 4(c)所示, 光谱形状最初伴有明显的 ± 2 Kelly 边带, 随后过渡到强度较弱的 ± 1 Kelly 边带, 再逐渐演变为无 Kelly 边带的平滑光谱。这一变化与调节偏振控制器改变腔内偏振状态, 进而使调制深度逐渐增大相一致。图 4(d)中的射频光谱信息表明, 单波长锁模操作的波长调谐范围为 1 556~1 570 nm。

2.2 异步双波长输出模式

在具有 PM 光纤的 Lyot 滤波器的线性腔中, Lyot 滤波器产生的双通道滤波效应与腔内增益协同作用, 实现了双波长锁模。当两个信号以不同群速度传播时, 二者在双通道中充分走离, 表现为不同的频率特征和异步脉冲序列, 最终形成拍频现象。将泵浦功率阈值提升至 176 mW 时, 适当调节 PC, 激光器可从单波长工作模式切换到异步双波长工作模式。异步双波长锁模脉冲的光谱如图 5(a)所示, 其光谱峰值位于 1 560.8 nm 和 1 570.2 nm, 波长间隔为 9.4 nm, 两者的 3 dB 带宽分别约为 0.9 nm 和 1.8 nm。所测得的射频信号如图 5(b)所示, 两个主峰分别位于 11.852 645 MHz 和 11.852 949 MHz, 重复频率差(Δf)为 304 Hz。两个主峰的信噪比分别约为 49 dB 和 48 dB。

考虑到腔内色散, 锁模双波长在不同波长上的重复频率略有不同。通过计算群速度的色散, 两个波长的重复频率差可以表示为

$$\Delta f = \frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T} \approx \frac{\Delta T}{T^2} = \frac{\Delta \lambda L D}{T^2} \quad (2)$$

式中, ΔT 为腔内两个不同中心波长的锁模脉冲序列间时间间隔的变化, 可以表示为

$$\Delta T = \Delta \lambda L D \quad (3)$$

式中, T 为脉冲周期, 且

$$T = \frac{nL}{c} \quad (4)$$

式中: n 为光纤的有效折射率; L 为腔长; c 为真空中光速。在本研究中, 腔长 L 约为 17.5 m, 平均色散 D 约为 12.5 ps/(nm·km), 脉冲周期 T 约为 84.3 ns, 中心波长差约为 9.4 nm, 计算得出的重复频率差为 289 Hz, 与上述实验测得的重复频率差(304 Hz)基本一致。其中的微小差异可能是由色散估计偏差, 以及光纤弯曲等环境因

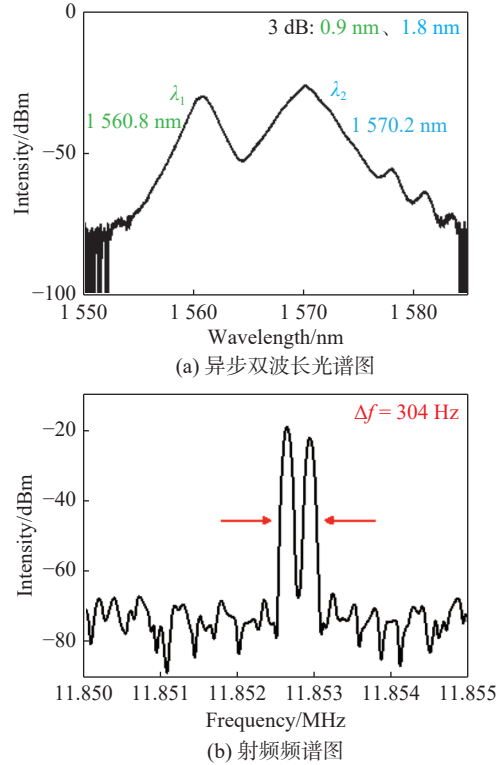
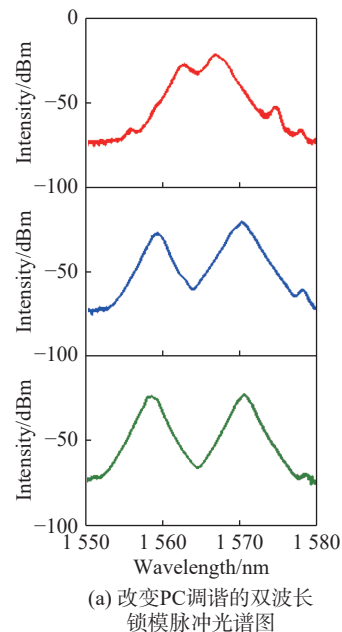


图 5 异步双波长锁模脉冲输出特性

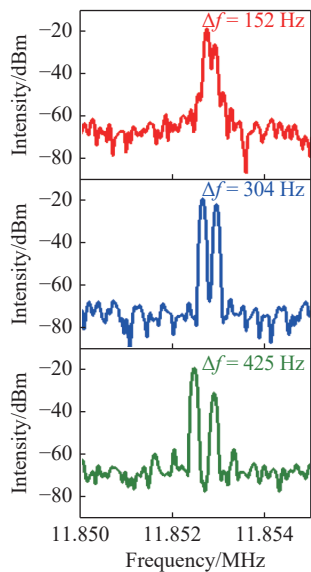
Fig. 5 Characteristics of asynchronous dual-wavelength mode-locked pulse output

素引起的色散变化所造成的。

通过调节 PC, 腔内的双折射和偏振状态会发生变化, 额外相位将导致光谱峰的波长发生偏移。图 6(a)所示为测得的 3 种典型光谱, 验证



(a) 改变 PC 调谐的双波长锁模脉冲光谱图



(b) 对应的射频频谱图

图 6 可调谐输出特性

Fig. 6 Tunable output characteristics

了双波长与单波长一样具有可调性，中心波长差可以从约 4 nm 调整至最大约 11 nm。图 6(b)所示为对应双波长脉冲序列测得的射频光谱信息。结果表明，双波长锁模的中心波长在一定范围内可调。随着双波长锁模中心波长的变化，两个异步脉冲序列的重复频率也会随之变化。两个锁模脉冲之间的重复频率差持续变小，直至恢复到单

脉冲输出模式。

使用 2 GHz 的光电探测器和 4 GHz 的示波器来测量时域波形。图 7(a)~(e) 所示为 400 ns 内 5 个不同时间段的波形曲线。因为腔内色散，可以看到两个具有不同群速度的异步脉冲序列会在不同时间段内周期性地相遇和分离，当它们相遇时，将产生新的拍频信号。在某些时刻，当这两个脉冲列过于接近时，示波器无法区分它们的时间分离，波形在时域内完全重叠。图 7(f) 所示为示波器的拍频信号图，其时域宽度为 20 ms，可以观察到两个拍频信号之间的间隔为 2.35 ms，对应的重复频率差为 425 Hz。

在未采取温控措施的实验室室温条件下，对激光器产生的双波长异步信号进行了持续 60 min 的光谱稳定性测试，数据采集间隔为 6 min。测试结果如图 8 所示，光谱的中心波长、轮廓以及峰值强度在整个测试过程中几乎保持不变。在测试初期，光谱存在轻微的抖动变化，这可能是由于激光器刚进入锁模状态，还不够稳定。除此之外，由于光路中存在一段非保偏光纤，光纤的弯曲度与实验平台的晃动也可能会引起光谱的强度波动，以及中心波长的轻微偏移。这些因素在一定程度上对光谱的稳定性产生了影响，但系统整体上保持了较好的稳定性。

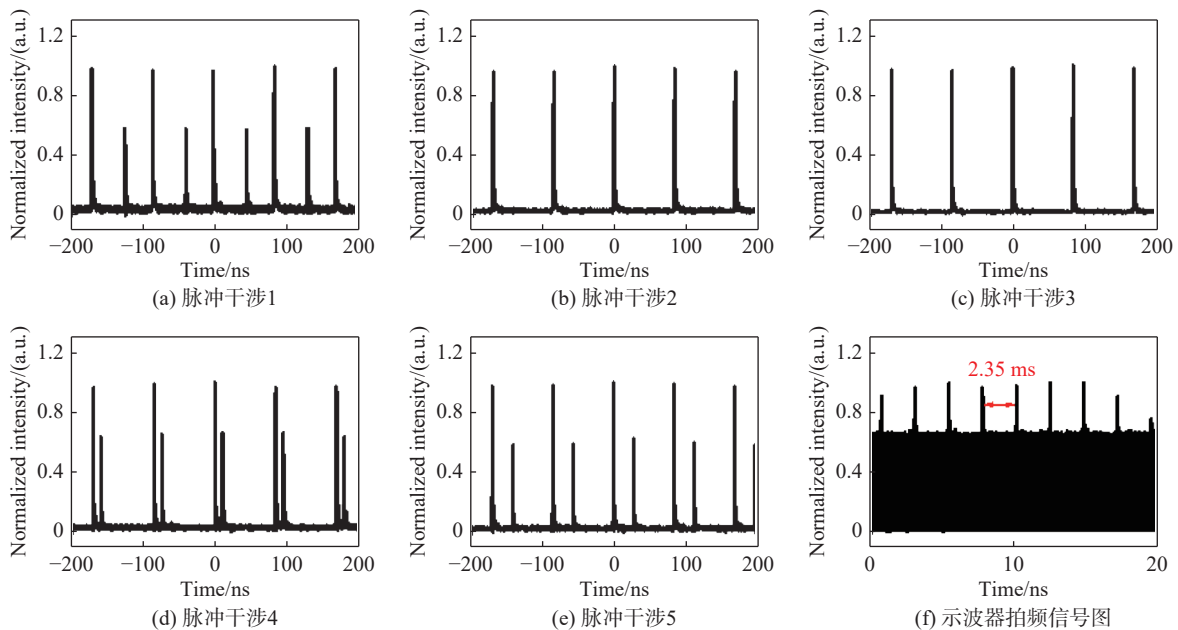


图 7 不同时间段双波长脉冲序列的时间干涉图

Fig. 7 The time interference pattern of dual-wavelength pulse sequences at different time intervals

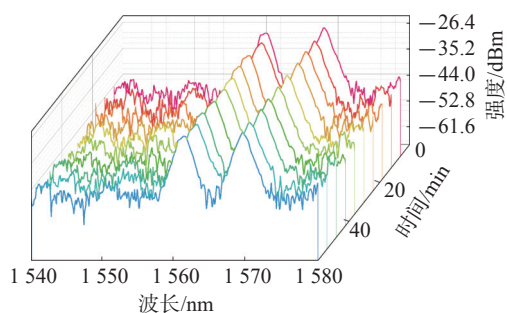


图 8 输出光谱稳定性

Fig. 8 Output spectrum stability

3 结 论

本文介绍了一种基于半导体可饱和吸收体的全光纤锁模激光器。通过将 WDM 与腔内 PM 光纤错角角熔接, 产生周期性的 Lyot 滤波效应。适当调整泵浦功率及腔内偏振态, 可实现可调谐单波长和异步双波长两种输出模式。单波长模式的中心波长调谐范围为 1556~1570 nm。异步双波长的中心波长差在 11 nm 范围内可调, 对应的重复频率差约从 152 Hz 变化到 425 Hz。该系统具有结构紧凑、调谐范围宽的特点, 实现了全光纤、可调谐和可重复的双波长锁模激光输出, 为双光梳光谱学的实际应用提供了新方案。

参考文献:

- [1] NEW G H C. The generation of ultrashort laser pulses[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1983, 46(8): 877 – 971.
- [2] HAO T F, TANG J, SHI N N, et al. Multiple-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator operating around oscillation threshold[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 3062 – 3065.
- [3] YANG K W, SHEN Y, AO J P, et al. Passively synchronized mode-locked fiber lasers for coherent anti-Stokes Raman imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13721 – 13730.
- [4] KROLOPP Á, CSÁKÁNYI A, HALUSZKA D, et al. Handheld nonlinear microscope system comprising a 2 MHz repetition rate, mode-locked Yb-fiber laser for *in vivo* biomedical imaging[J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7(9): 3531 – 3542.
- [5] LI M, LIU Z, XIA Y, et al. Terahertz time-of-flight ranging with adaptive clock asynchronous optical sampling[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 715.
- [6] XU S F, ZOU W W, YANG G, et al. Ultra-high range resolution demonstration of a photonics-based microwave radar using a high-repetition-rate mode-locked fiber laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(6): 062801.
- [7] 刘聪聪, 何江勇, 李晋, 等. 被动锁模光纤激光器中孤子束缚态动力学特征提取与预测 [J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101016.
- [8] FENG N, ZHOU R L, WANG S, et al. Progressive pulse dynamics in a mode-locked fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109827.
- [9] GUO Y Q, CHEN J, YANG L Z, et al. Real-time transition dynamics of harmonic mode-locking states with spectral filtering effect in a hybrid mode-locked fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2023, 545: 129477.
- [10] MA X X, LV J L, LUO J, et al. Pulse convergence analysis and pulse information calculation of NOLM fiber mode-locked lasers based on machine learning method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109390.
- [11] QIU H X, SUN M H, YAO Y, et al. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on CNT-film sandwiched between the multimode fiber connectors[J]. *Optik*, 2023, 281: 170791.
- [12] XU N N, SHANG X X, YANG F H, et al. Nonlinear photoresponse of PdSe₂ nanosheets for soliton operations in passive mode-locked Er-doped fiber lasers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104626.
- [13] CHEN J, NITTA K, ZHAO X, et al. Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036004.
- [14] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414 – 426.
- [15] OKANO M, WATANABE S. Triggerless data acquisition in asynchronous optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy based on a dual-comb system[J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 39613 – 39623.
- [16] ZHOU W F, HAO S J, CHEN X, et al. Long-term ultra-precision phase synchronization technique for locking the repetition rate of OFCs based on FLOM-PD[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(12): 712 –

- 716.
- [17] CI C, ZHANG X S, LI X R, et al. Long-term phase-locking technique for locking the repetition rate of an optical frequency comb laser with 1.67×10^{-19} precision[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6747 – 6751.
- [18] ARMAS-RIVERA I, RODRIGUEZ-MORALES L A, DURÁN-SÁNCHEZ M, et al. Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser in a spectral filter free cavity[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107222.
- [19] PU G Q, LIU R M, LUO C, et al. Intelligent single-cavity dual-comb source with fast locking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(2): 593 – 598.
- [20] SUN X L, HE J L, JIA Z T, et al. Dual-wavelength synchronously mode-locked Nd: LaGGG laser operating at $1.3 \mu\text{m}$ with a SESAM[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(51): 32044 – 32048.
- [21] JIANG K, WU Z C, FU S N, et al. Switchable dual-wavelength mode-locking of thulium-doped fiber laser based on SWNTs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(19): 2019 – 2022.
- [22] JAN S, M T K, CZESŁAW R, et al. Nonlinear polarization evolution of ultrashort pulses in polarization maintaining fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13590 – 13604.
- [23] GUO Z R, LIU T T, PENG J S, et al. Self-started dual-wavelength mode-locking with well-controlled repetition rate difference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(11): 3575 – 3581.
- [24] LUO X, TUAN T H, SAINI T S, et al. Tunable and switchable all-fiber dual-wavelength mode locked laser based on Lyot filtering effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14635 – 14647.
- [25] ZHU Y J, CUI Z K, SUN X N, et al. Fiber-based dynamically tunable Lyot filter for dual-wavelength and tunable single-wavelength mode-locking of fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27250 – 27257.
- (编辑: 李晓莉)

(上接第 42 页)

- [20] GEBINOVA M, KATZMANN J, FERNEKORN U, et al. Multi-photon structuring of native polymers: a case study for structuring natural proteins[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2013, 13(4): 368 – 375.
- [21] BELL A, KOFRON M, NISTOR V. Multiphoton crosslinking for biocompatible 3D printing of type I collagen[J]. *Biofabrication*, 2015, 7(3): 035007.
- [22] CANTONI F, BARBE L, ROY A, et al. On-chip fabrication of tailored 3D hydrogel scaffolds to model cancer cell invasion and interaction with endothelial cells[J]. *APL Bioengineering*, 2024, 8(4): 046113.
- [23] 张佳茹, 管迎春. 超快激光制备生物医用材料表面功能微结构的现状及研究进展 [J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 199 – 213.
- [24] DENG B C, HUANG Z W, ZHANG X L, et al. Durotaxis and topotaxis orchestrated guidance on cell migration in 3D printed scaffold/hydrogel composite [J]. *Additive Manufacturing Frontiers*, 2024, 3(2): 200134.
- (编辑: 张 磊)