

窄谱被动锁模光纤激光中心波长高速调谐及其脉冲重建过程

朱喆^{1,2}, 王麓屹¹, 陈学文^{1,2}, 林巍^{1,2}, 杨洋^{1,2}, 张静^{1,2,3*}, 刘涛¹, 韦小明^{1,2,4**}, 杨中民^{1,2,4,5,6}¹华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640;²华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;³浙江机电职业技术学院国际教育学院, 浙江 杭州 310051;⁴华南理工大学广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心, 广东 广州 510640;⁵华南理工大学广东省光纤激光材料及应用技术重点实验室, 广东 广州 510640;⁶华南师范大学未来技术研究院, 广东 广州 510006

摘要 报道基于快速声光滤波技术的窄谱被动锁模掺镱光纤激光中心波长快速调谐研究。窄谱锁模光纤激光器系统的输出功率可达200 mW, 脉冲宽度为5.87 ps, 重复频率为40.874 MHz, 光谱带宽为0.15 nm。通过编程声光可调谐滤波器的射频信号, 可以获得中心波长在1016~1042 nm范围内可调谐的稳定锁模脉冲。为了掌握腔内滤波时激光脉冲的重建过程, 利用色散傅里叶变换技术观测波长调谐时激光脉冲的实时重建过程, 并确定激光器的最高中心波长调谐频率约为5 kHz。

关键词 激光器; 光纤激光器; 波长可调谐; 色散傅里叶变换; 脉冲重建

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231583

1 引言

光纤激光器在许多研究领域已有广泛的应用。通过使用不同稀土元素掺杂的增益光纤, 可以获得不同波长的激光输出^[1]。经过几十年来的技术发展, 激光器已经可以实现模式锁定, 获得高相干性、高单脉冲能量以及脉冲宽度和重复频率可控的锁模脉冲激光^[2-3]。锁模脉冲激光器在一些特定的研究领域可以起到关键性作用, 例如在生物医学方面, 利用激光器作为光源对样品进行相干层析成像, 可以同时测试样品中物质的信息进行采集记录^[4-6]。但在此过程中, 一些激发波长相近的物质的信号会相互干扰, 从而影响测量结果。因此, 发展波长可调谐锁模激光器, 进而提升光谱分辨率, 对该领域的研究具有重要意义。

目前实现光纤激光器输出波长可调谐的方法有很多, 总体来说可以分为腔外滤波和腔内滤波两类。腔内滤波方面, 在腔内引入可调谐的光纤光栅、带通滤波器和声光滤波器等器件或者在腔内构造干涉仪结构如Sagnac干涉环、Mach-Zehnder干涉仪结构和光纤法布里-珀罗(F-P)腔^[7-11], 通过改变相位利用干涉滤波的原

理可以实现输出激光波长的改变。基于声光晶体的声光可调谐滤波器可以通过改变施加在叉指换能器上的射频信号的频率和强度快速改变滤波波长以及目标波长强度, 实现0.2 nm带宽的多通道滤波。这些优点使得其在需要高速波长调谐以及高光谱分辨率的应用和研究上有广泛的应用^[12-14]。目前声光可调谐滤波器大多作为腔外滤波器件使用, 可对输出到自由空间中的激光进行滤波, 但滤波后的光束存在光束质量劣化、脉冲能量下降等问题, 会影响其进一步的应用。

目前研究人员对于波长可调谐激光器的性能研究主要集中在其频率稳定性、功率稳定性以及可调谐波长范围等可以直接通过仪器标定的参数。对于腔内滤波方案, 波长调谐过程中腔内情况表征的相关研究较少。Cui等^[15]利用色散傅里叶变换(DFT)技术, 对使用单壁碳纳米管作为可饱和吸收体的锁模光纤激光器的传统孤子、拉伸脉冲以及耗散孤子的产生以及猝灭过程进行表征。Li等^[16]研究了其构建的色散可控波长变换激光器在不同腔内色散时输出脉冲的光谱与锁模脉冲重建过程。研究结果表明, 在达到腔内稳定工作状态前, 存在0.7 ms的弛豫振荡过程。

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-12-29; 录用日期: 2024-01-05; 网络首发日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(62375087, 12374304, 62235014, 61927816)、广东省珠江人才引进创新团队项目(2021ZT09Z109)、广东省自然科学基金(2021B1515020074)、广东省科技计划项目(2020B1212060002)、中德交流项目(M-0296)

通信作者: *xxjingzhang@163.com; **xmwei@scut.edu.cn

在高速波长调谐的过程中,由于脉冲建立与稳定过程的光谱变化无法被光谱仪采集,激光器输出脉冲的中心波长无法得到确认,可能存在中心波长偏移、输出脉冲不稳定的情况。色散傅里叶变换技术借助色散完成对脉冲光谱的时域成像,从而在高速示波器上实现对光谱的实时测量,表征锁模光纤激光器中的动态演化^[17]。该技术可以用于研究激光动力学演化及其内在机理,验证理论模型的可靠性,对锁模建立、呼吸孤子爆炸等现象的研究起到了关键的作用。目前已有较多关于该技术应用于传统孤子、耗散孤子、被动锁模机理等的动力学过程研究方面的报道。该技术具有实现方式简单、测量速度快的优势,可以应用于高速波长调谐过程中锁模光纤激光器脉冲的动态演化特性表征。

本文结合了声光可调谐滤波和基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动锁模技术,搭建了高速波长可调谐的锁模光纤激光器,通过快速编程声光可调谐滤波器的驱动信号实现高速波长调谐功能^[18-21]。为了表征快速波长切换时脉冲的光谱动态演化过程,利用色散傅里叶变换实时光谱分析技术^[22],表征波长调谐过程中的脉冲建立过程,明确了高速波长可调谐光纤激光器的最高调谐速率约为 5 kHz。

2 实验装置

图 1 为高速波长可调谐的被动锁模光纤激光器的装置图。如图 1 所示,激光器由激光腔以及两级放大

光路组成。光纤腔由 SESAM、波分复用器(WDM)、40 cm 的掺镱光纤(YDF, Yb406, CorActive)、分束比为 90:10 的光纤耦合器(OC)、准直器、 $\lambda/2$ 波片(HWP)、声光可调谐滤波器(AOTF)、反射镜和压电陶瓷驱动器(PZT)组成。激光腔内掺镱光纤在 980 nm 的吸收系数约为 124 dB/m。采用的 SESAM 为 BATOP SAM-1064-21-3ps-1, 0b-0, 调制深度为 14%, 腔内净色散约为 0.11 ps²。激光半导体(LD)输出的泵浦光通过波分复用器输入激光腔,经作为增益介质的掺镱光纤后通过准直器输出到空间,通过 $\lambda/2$ 波片调整入射偏振态后,输入声光可调谐滤波器。压电陶瓷驱动器与反射镜组合,通过由光电探测器(PD)、射频(RF)信号放大器、带通滤波器、混频器、参考源、低通滤波器以及比例积分微分器(PID)组成的锁相环路反馈调节腔长,实现输出激光重复频率的锁定及稳定。第一级放大光路由波分复用器、20 cm 掺镱光纤、隔离器和分束比为 90:10 的光纤耦合器组成。分束比为 90:10 的光纤耦合器的 10% 输出端与分束比为 50:50 的光纤耦合器相连,分束比为 50:50 的耦合器的一端输出至光电探测器,为锁相环路提供待测信号,另一端输出至 DFT 装置,用于对光谱进行实时测量。分束比为 90:10 的光纤耦合器的 90% 端输入第二级放大光路。第二级放大光路由波分复用器、50 cm 掺镱光纤以及用于空间输出的带有准直功能的端帽组成。

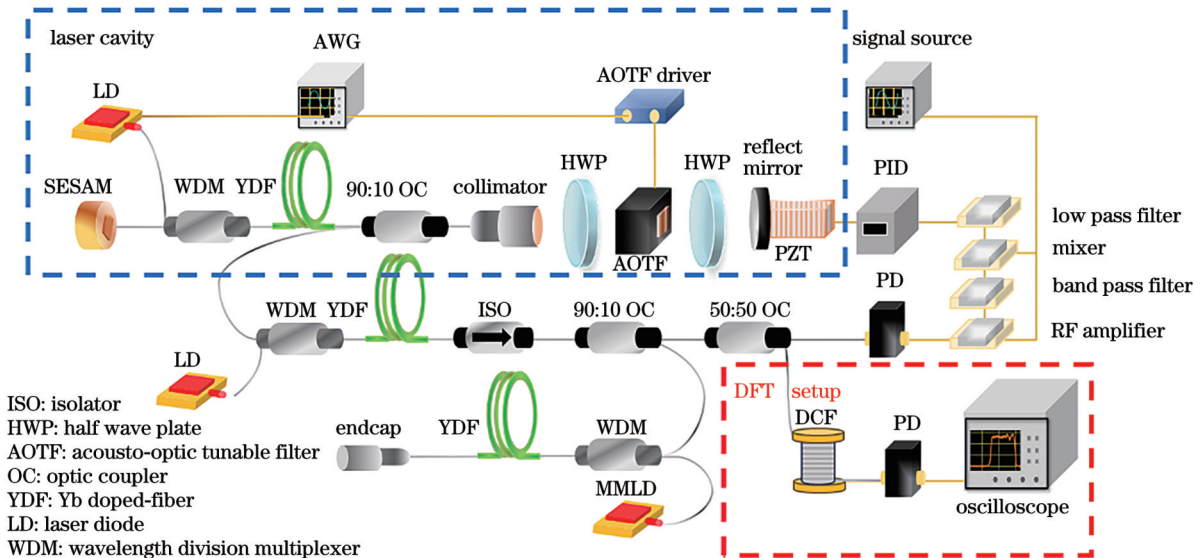


图 1 基于声光可调谐滤波器的高速波长可调谐光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of high-speed wavelength tunable fiber laser based on acousto-optic tunable filter

当使用的 LD 驱动(Thorlabs CLD1015)接收到外部调制信号时,其外部调制电压与驱动激光器的电流之间有 150 mA/V 的对应关系。因此,可以通过外部调制信号的电压强度改变激光器的工作状态。对于激光腔中所用的声光可调谐滤波器(G & H TF950-500-1-2-GH96),其驱动可以通过识别外部调制信号的上

升沿或下降沿切换滤波器滤波波长,实验中设置为识别上升沿。通过任意波形发生器用编辑后的调制信号驱动声光可调谐滤波器以及激光半导体,使得激光器的中心波长在高速调谐的同时锁模状态不受影响。

为了探究波长切换过程中腔内脉冲的变换过程,将第一级放大后的部分激光输入色散补偿光纤

(5.8 km 的 Corning Hi1060 光纤, 其在 1060 nm 处的色散系数为 -38 ps/nm/km , 总色散值约为 129 ps^2), 通过光电探测器将经过拉伸的光信号转换为电信号, 并将其传输到高速示波器 (Oscilloscope, LECROY WaveMaster 820Zi-B) 上。通过外接的任意信号发生器 (AWG) 产生信号, 同时进行腔的泵浦工作电流的调制和声光可调谐滤波器的波长切换, 实现对激光器脉冲重建过程的实时观测。实验中光纤激光器的其他各项参数由光谱仪 (YOKOGAWA AQ6370D)、频谱分析仪 (Agilent N9020A)、频率计数器 (Keysight 53230A) 以及自相关仪 (FEMTOCHROME FR-103XL) 测得。

3 分析与讨论

3.1 激光器基本性能

在激光器中, 脉冲为窄带滤波效应主导的耗散孤子^[23]; 在此类耗散孤子形成机制作用下, 可以认为脉冲近似满足双曲正割线形^[24], 在后续自相关测量时以

此为依据进行拟合。激光器的中心波长可调谐光谱范围以及对应的激光腔输出脉冲的线性坐标光谱如图 2(a) 所示。从图中结果可以看出, 锁模光纤激光器可以实现从 1016.12 nm 至 1042.28 nm 的光谱调谐, 在调谐范围内 3 dB 光谱带宽小于 0.2 nm, 在中心波长为 1035 nm 时对应的 3 dB 光谱带宽为 0.18 nm, 波长调谐精度达到 0.1 nm。图 2(b) 中给出了调谐间隔为 1 nm 时对数坐标下的脉冲光谱。由光谱可知, 放大自发辐射 (ASE) 抑制比为 21.87 dB; 从转换成线性坐标的图 2(a) 中的光谱可知, 第一级放大输出光中连续波基底能量在光谱中的能量占比较小, 约为 3% (输出波长不同时 ASE 抑制比具有 $\pm 0.03\%$ 的差异)。图 2(c) 和 2(d) 分别为激光器在设置滤波波长为 1041.36 nm 时, 第一级和第二级放大输出在对数和线性坐标下的光谱。由图 2(d) 可知, 第一级和第二级放大输出的 ASE 抑制比分别为 21.07 dB 和 17.15 dB。将其转换为线性坐标后, 通过曲线积分确认第二级放大输出光中的脉冲能量占比约为 95.6%。

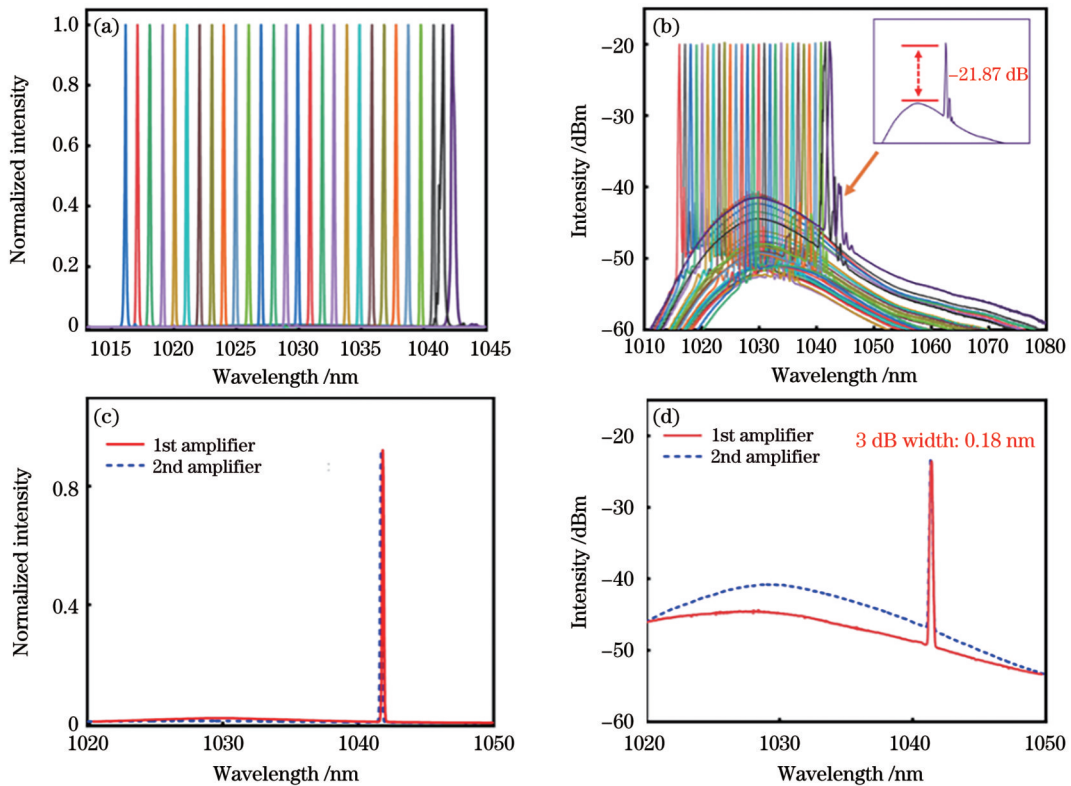


图 2 激光器的输出光谱测试结果。(a) 线性坐标激光器的输出光谱; (b) 对数坐标激光器的输出光谱; (c) 线性坐标与 (d) 对数坐标下中心波长为 1041.36 nm 时第一级与第二级的放大输出光谱

Fig. 2 Optical spectrum measurement results of laser. (a) Output spectrum of linear scale laser; (b) output spectrum of logarithmic scale laser; optical spectra of the first and second stage amplifiers at central wavelength of 1041.36 nm in (c) linear and (d) logarithmic scales, respectively

输出脉冲的重复频率随滤波波长的变化情况如图 3(a) 所示。为了保证激光器的输出参数稳定, 通过腔内附加 PZT 的特殊腔镜结构以及锁相环路调整输出激光器的腔长, 将重复频率锁定在 40.874 MHz。第

二级放大输出脉冲的脉宽如图 3(b) 所示, 自相关曲线的半峰全宽为 9.06 ps, 在假设双曲正割线形下对应的脉冲宽度约为 5.87 ps。第二级放大端帽处的最高输出功率约为 200 mW, 图 2(d) 中的第二级放大光谱就

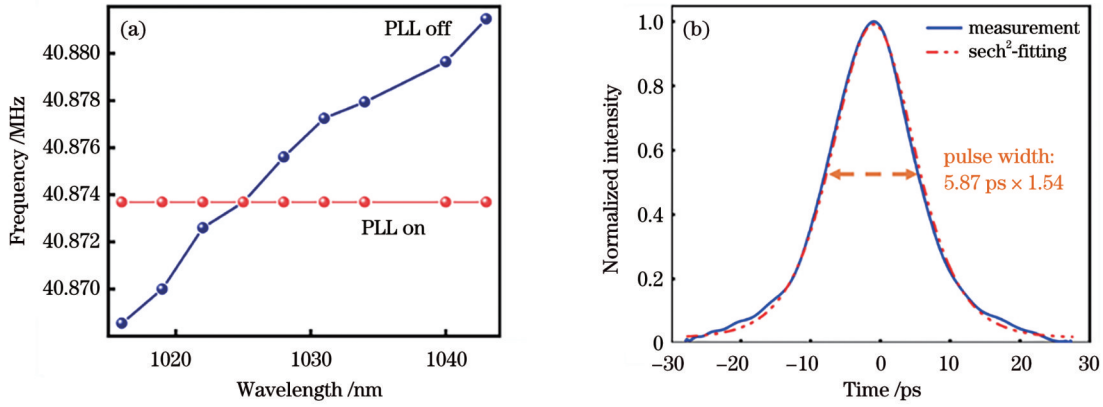


图 3 激光器的重复频率与脉宽。(a)不同中心波长的输出脉冲重复频率;(b)输出脉冲宽度

Fig. 3 Repetition rate and pulse width of laser. (a) Repetition rates of output pulse at different center wavelengths; (b) output pulse width 是在输出功率为 201.3 mW 时通过 20 dB 衰减后测得的结果。

频率锁定后的输出脉冲的频谱信息如图 4(a)所示,其频率主峰与噪声峰之间有约 32 dB 的差异,具有较高的信噪比。频率稳定性的测试结果如图 4(b)所示,当中心频率锁定在 40.873690 MHz 时,在 2.5 h 的

测试时间中,最大频率偏移量约为 830 mHz,频率偏移量平均值约为 370 mHz。频率锁定前后的相位噪声和时间抖动比较如图 4(c)及(d)所示,锁定后脉冲的相位噪声及时间抖动都有明显的提升,锁定后激光器的时间抖动量为 9.58 ps, 10 Hz 处的相位噪声为 -72 dBc/Hz。

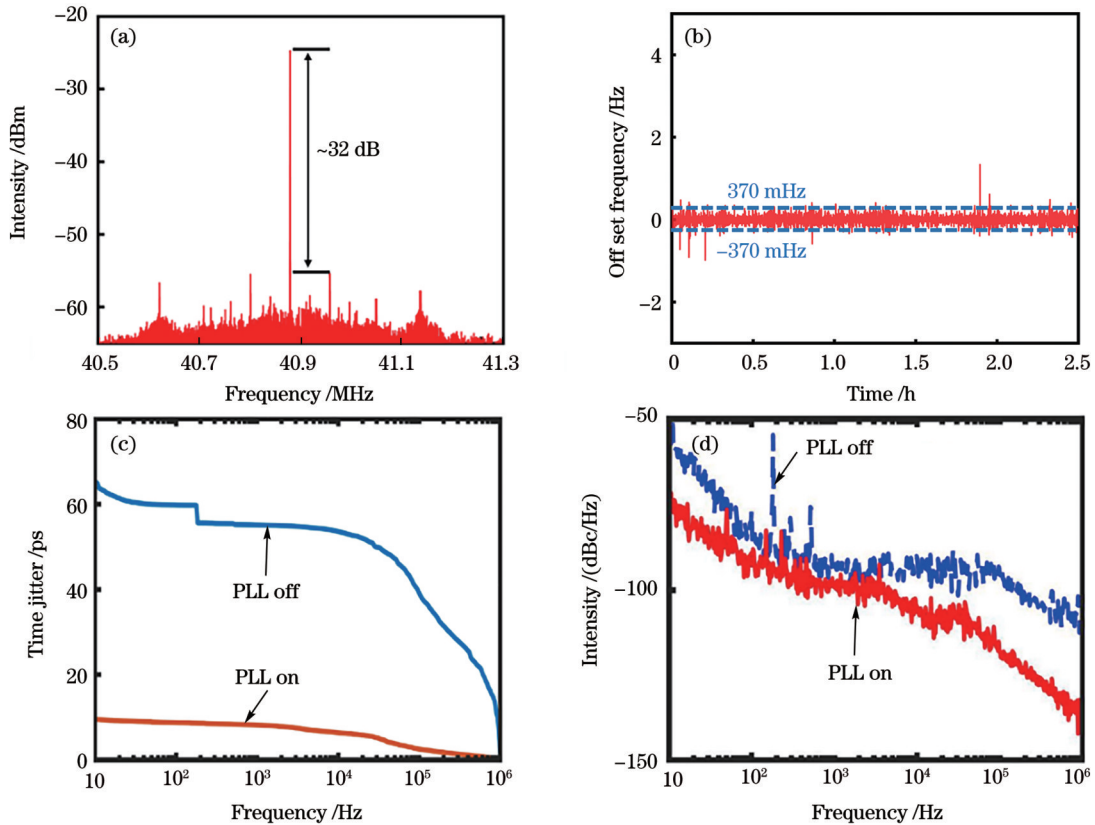


图 4 激光器的频率稳定性。(a)射频谱;(b)频率稳定性;(c)时间抖动;(d)相位噪声

Fig. 4 Frequency stabilization of laser. (a) Frequency spectrum; (b) frequency stabilization; (c) timing jitter; (d) phase noise

3.2 高速调谐脉冲重建过程测量

实验中采用的光电探测器和示波器带宽分别为 12.5 GHz 和 20 GHz, DFT 测量的分辨率约为 0.12 nm^[25-26]。波长调谐方式采用间隔为 5 nm、1020~

1040 nm 波长范围内 5 个波长的离散调谐,且为从 1020 nm 扫描至 1040 nm 后跃变回 1020 nm 的扫描方式。为方便进行对比,后续给出的结果都为波长调谐过程中扫描至 1035 nm 的结果。图 5 记录了高速波长

可调谐激光器的高泵浦功率状态的输出脉冲序列和锁模建立后滤波波长设置为 1035 nm 时的 DFT 结果。在测试中,每 0.2 ms 进行一次中心波长的切换。由图 5(a)可知,这种情况下腔内泵浦功率过高导致激光器在每个波长切换周期重建后处于多脉冲锁模状态,在相同的重复频率周期中有多个脉冲存在,在波长调谐后脉冲重建时间约为 0.15 ms。测试发现激光器在波长调谐范围设置不同中心波长时的脉冲重建时间不同,在 0.113 ms 到 0.187 ms 之间,越靠近调谐范围,边

缘波长切换时的脉冲重建时间越长。为了保证在连续波长扫描过程中激光器可以实现锁模脉冲输出,在实际连续调谐过程,将脉冲重建时间设置为 0.2 ms,由此可知两个设定的波长值之间的最高扫描频率应为 5 kHz。由图 5(c)中该过程脉冲重建后的 DFT 结果可知,在基频对应的时间周期(即约 24.5 ns)内存在 5 个脉冲。将其中一个脉冲的细节进行放大,其结果如图 5(c)所示,结果表明在多脉冲状态下,每个脉冲光谱处于稳定状态。

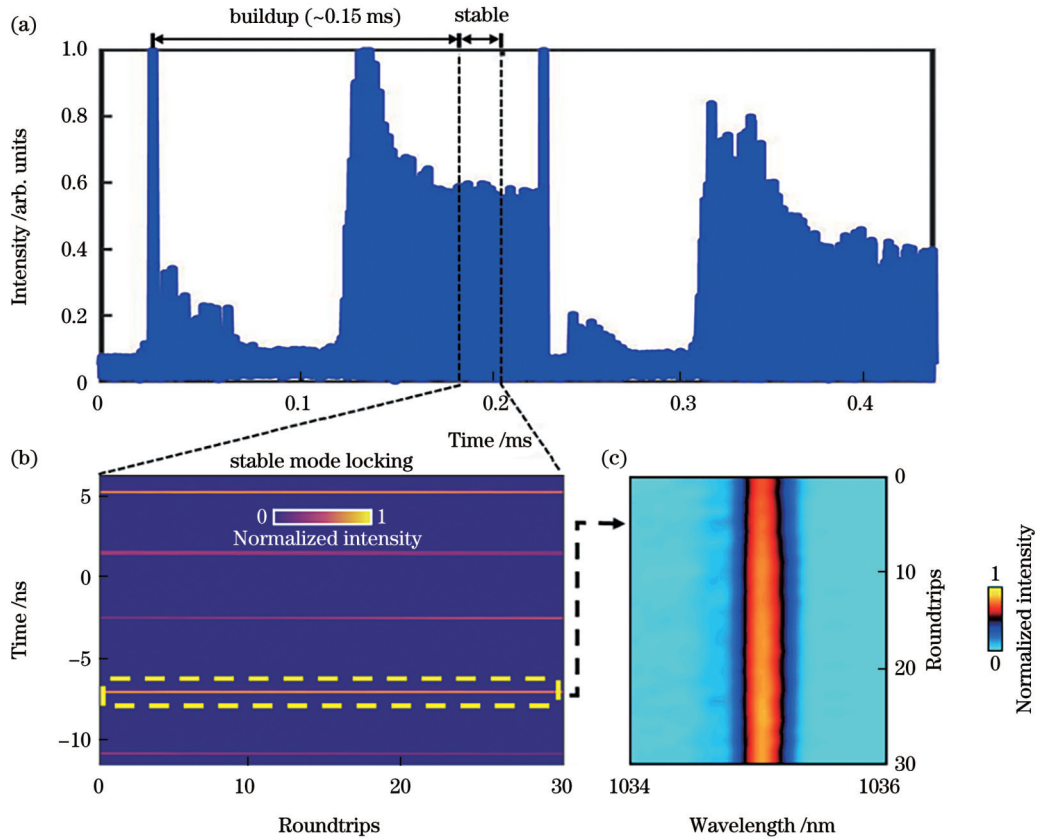


图 5 多脉冲锁模状态的脉冲序列及 DFT 结果。(a)时域脉冲序列;(b)腔周期内脉冲序列;(c)图 5(b)标记的脉冲序列的实时光谱
Fig. 5 Pulse sequence and DFT results at multi-pulse mode-locked state. (a) Time-domain pulse sequence; (b) pulse sequence within roundtrip; (c) real-time spectrum of pulse sequence as marked in Fig. 5(b)

为了使得激光器在单脉冲锁模状态工作,在激光器波长建立以后,需要降低调制信号的强度和腔内能量,使得激光器从多脉冲运行状态转变为单脉冲运行状态。调整后的调制信号如图 6(a)上图所示,使用该调制信号可以同时改变激光器的腔内泵浦功率和声光可调谐滤波器的波长切换,在波长调谐过程中实现单脉冲锁模状态。调制信号的上升沿会触发声光可调谐滤波器的滤波波长切换;调制信号作为腔内泵浦激光半导体的驱动,会使得腔内泵浦功率随信号强度的变化发生变化,其对应关系在图 6(a)中有体现。为了方便记录激光器的单脉冲锁模状态的更多信息,将波长切换的周期由 0.2 ms 增加到 0.8 ms。同时为了保证脉冲重建,将高泵浦功率的时间设置为 0.2 ms。在每个

调制周期中,先使得激光器处于 0.2 ms 的高泵浦功率状态,再调节腔内泵浦功率至 87.5 mW。脉冲序列及滤波波长为 1035 nm 时的 DFT 结果如图 6 所示。激光器输出脉冲的实时光谱在处于稳定的单脉冲状态时中心波长稳定,与设定波长 1035 nm 相匹配。从图 6(a)中的脉冲序列可以发现,当锁模建立后,输出脉冲的幅度有一定的抖动。从图 6(b)中可以发现,输出光谱宽度随时间也有一定的变化,这可能是腔内泵浦功率过低导致的脉动,可以通过调节激光器的腔内泵浦功率进行改善。从图 6 可知:当设置腔内泵浦功率持续时间为 0.2 ms 并在之后降低腔内泵浦功率,可以使激光器在波长切换后实现脉冲重建并获得稳定的单脉冲输出状态。

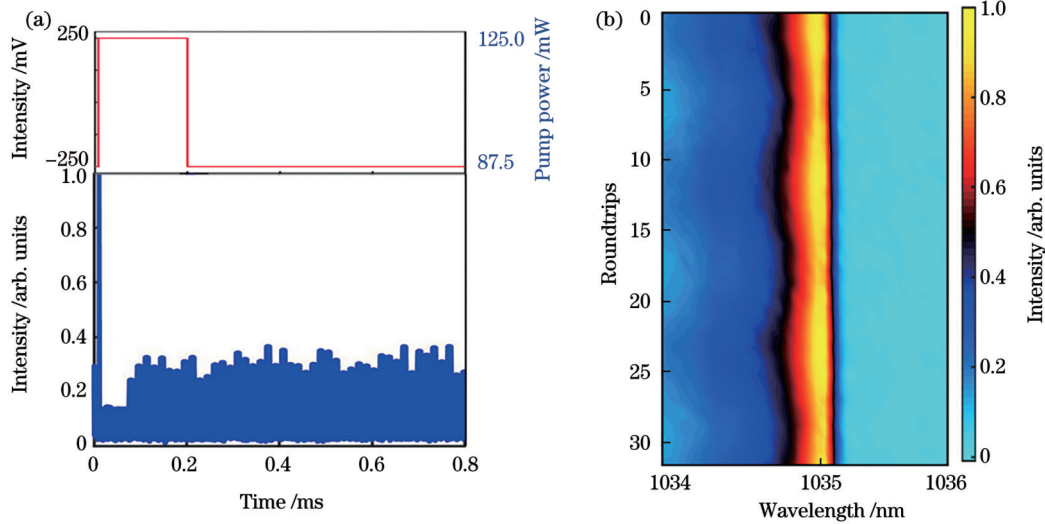


图 6 单脉冲锁模状态的脉冲序列及 DFT 结果。(a) 调制信号、腔内泵浦功率和时域脉冲序列; (b) 实时光谱

Fig. 6 Pulse sequence and DFT result at single-pulse mode-locked state. (a) Modulation signal, pump power in cavity, and time-domain pulse sequence; (b) real-time spectrum

4 结 论

研究了一种窄谱被动锁模掺铒光纤的激光中心波长快速调谐方案。利用声光可调谐滤波器,在具备快速调谐性能的同时,在 1016 nm 至 1043 nm 的波长调谐范围内获得 0.1 nm 的调谐精度以及小于 0.2 nm 的 3 dB 光谱带宽的锁模脉冲。通过色散傅里叶变换技术对波长切换及脉冲建立过程进行表征,确定了激光器的最高波长调谐速度,同时验证了可调谐脉冲的光谱稳定性。该研究为一些需要高光谱分辨、高调谐速率的脉冲激光的应用提供基础。

参 考 文 献

- [1] Wang W C, Zhou B, Xu S H, et al. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 101: 90-171.
- [2] Haus H A. Theory of mode locking with a fast saturable absorber [J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(7): 3049-3058.
- [3] Haus H. Theory of mode locking with a slow saturable absorber [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(9): 736-746.
- [4] 敖建鹏, 黄静, 季敏标. 受激拉曼散射显微技术及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0400001.
- [5] He H S, Tang H J, Zhou M, et al. Deep-tissue two-photon microscopy with a frequency-doubled all-fiber mode-locked laser at 937 nm[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 1(2): 026001.
- [6] Tong Y T, Guo X D, Li M S, et al. Ultrafast optical phase-sensitive ultrasonic detection via dual-comb multiheterodyne interferometry[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 2(1): 016002.
- [7] Yang Z W, Wu X, Pei J H, et al. Improvement of bandwidth in a 100 kHz swept laser source with phase controllable signal driving[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(1): 011407.
- [8] Wang X Z, Li Y, Bao X Y. C- and L-band tunable fiber ring laser using a two-taper Mach-Zehnder interferometer filter[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3354-3356.
- [9] Chen C L, Pu Y R, Shi W S. Low-cost spectrometer design for ultra-high resolution spectral domain optical coherence tomography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(10): 101101.
- [10] 党文佳, 高奇, 李哲, 等. 近 1 μm 波段可调谐光纤光源的研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1120-1132.
- [11] Dang W J, Gao Q, Li Z, et al. Research progress of tunable fiber light sources with wavelength near 1 μm [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1120-1132.
- [12] Yin G L, Jiang R, Zhu T. In-fiber auxiliary interferometer to compensate laser nonlinear tuning in simplified OFDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(3): 837-843.
- [13] Han G H, Cho S W, Park N, et al. Electro-optic swept source based on AOTF for wavenumber-linear interferometric sensing and imaging[J]. *Fibers*, 2016, 4(4): 14.
- [14] Ltd H. Instructions for the set-up and use of a four channel AOTF driver[EB/OL]. [2023-09-20]. <https://gandh.com/products/acousto-optics/tunable-filters>.
- [15] Hashimoto M, Iwatsuka J, Niioka H, et al. High-speed spectral tuning CARS microscopy using AOTF laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8226: 82261N.
- [16] Cui Y D, Liu X M. Revelation of the birth and extinction dynamics of solitons in SWNT-mode-locked fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(4): 423-430.
- [17] Li H, Ouzounov D G, Wise F W. Starting dynamics of dissipative-soliton fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2403-2405.
- [18] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 102-112.
- [19] Aporta I, Quintela M Á, López-Higuera J M. Broadband continuously tunable all-fiber laser based on OPG for CARS imaging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(8): 2489-2496.
- [20] Lu B B, Zou C H, Huang Q Q, et al. Widely tunable passively mode-locked fiber laser based on 45° tilted fiber grating with strong polarization dependent loss[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [21] Chen M H, Fan Y P, Zhang H, et al. Wavelength-swept fiber laser based on acousto-optic tuning method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10024: 100241Y.

- [21] Chen M H, Li H, Chen R. Swept laser source based on acousto-optic tunable filter[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 92970Q.
- [22] Godin T, Sader L, Khodadad Kashi A, et al. Recent advances on time-stretch dispersive Fourier transform and its applications [J]. Advances in Physics X, 2022, 7(1): 2067487.
- [23] Ha C K, Lee K S, Kwon D, et al. Widely tunable ultra-narrow-linewidth dissipative soliton generation at the telecom band[J]. Photonics Research, 2020, 8(7): 1100-1109.
- [24] Renninger W H, Chong A, Wise F W. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers[J]. Physical Review A, 2008, 77(2): 023814.
- [25] Tsia K K, Goda K, Capewell D, et al. Performance of serial time-encoded amplified micro-scope[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10016-10028.
- [26] Salem R, Foster M A, Gaeta A L. Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(3): 274-317.

High-Speed Center Wavelength Tuning of Narrow-Spectrum Passively Mode-Locked Fiber Laser and Its Pulse Reconstruction Process

Zhu Zhe^{1,2}, Wang Luyi¹, Chen Xuwen^{1,2}, Lin Wei^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Zhang Jing^{1,2,3*}, Liu Tao¹, Wei Xiaoming^{1,2,4**}, Yang Zhongmin^{1,2,4,5,6}

¹School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

²State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

³School of International Education, Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310051, Zhejiang, China;

⁴Guangdong Engineering Technology Research and Development Center of Special Optical Fiber Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

⁶Research Institute of Future Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract

Objective After decades of development, mode-locked fiber lasers can provide laser pulses with high coherence, high pulse energy, and controllable pulse width and repetition rate. Mode-locked pulsed lasers can play a key role in some specific research areas. For instance, in biomedicine, lasers are used as light sources to perform coherent tomography imaging and the information of the samples under test can be collected and recorded at the same time. However, in the process, the signals of some substances with similar excitation wavelengths can interfere with each other, thus affecting the measurement results. Therefore, the development of wavelength tunable mode-locked lasers to improve spectral resolution is of great significance to the research in this field. We study the rapid tuning of the center wavelength of a narrow-spectrum passive mode-locked ytterbium fiber laser based on fast acousto-optic filtering technology. Combining fast acousto-optic filtering technology, we obtain a stable mode-locked pulse with a center wavelength tuning function. To investigate the reconstruction process of laser pulses during intracavity filtering and confirm the reliability of this technology, we record the real-time reconstruction process of laser pulses during the tuning of the center wavelength. We hope that our research can provide a reliable solution for applications requiring high spectral resolution.

Methods The laser consists of a laser cavity and a two-stage amplifier. The fiber cavity consists of a semiconductor saturable absorption mirror (SESAM), a wavelength division multiplexer (WDM), a 40 cm long ytterbium-doped fiber (CorActive Yb406, YDF), a 90:10 fiber coupler (90:10 OC), a collimator, and a $\lambda/2$ waveplate (HWP). It is composed of acousto-optic tunable filter, reflect mirror, and piezoelectric ceramic transducer (PZT). The piezoelectric ceramic is combined with a mirror to lock and stabilize the output laser repetition rate by adjusting the length of the phase-locked loop feedback. The phase-locked loop is composed of a photodetector (PD), an RF amplifier, a bandpass filter, a mixer, a signal source, a low pass filter, and a proportional integral derivative (PID). The voltage intensity of the externally modulated signal can alter the intracavity pumping energy. The rising edge of the modulated signal can be recognized by the acousto-optic tunable filter driver and used to switch the filter wavelength. The arbitrary waveform generator drives the acousto-optic tunable filter and laser semiconductor with the edited modulation signal, such that the center wavelength of the laser can be tuned at high speed while maintaining the mode-locked state. To explore the pulse conversion process in

the cavity during wavelength switching, a part of the laser after the first stage amplification is fed into the dispersion compensation fiber, and the stretched optical signal is converted into an electrical signal through a photodetector and transmitted to a high-speed oscilloscope. The real-time observation of the laser pulse reconstruction process can be realized by generating signals through the external arbitrary signal generator, and simultaneously modulating the pump working current of the cavity and the wavelength switching of the acousto-optic tunable filter.

Results and Discussions The parameters of the laser are tested (Figs. 2 and 3), and the wavelength tuning ability and frequency stability of the laser are verified (Fig. 4). The phase noise and time jitter of the locked pulse are significantly improved. The time jitter of the locked laser is 9.58 ps, and the phase noise at 10 Hz is -72 dBc/Hz. The information on the pulse reconstruction process of the laser in the state of high pump power and the operation of the single pulse after adjusting the external modulation signal is recorded (Figs. 5 and 6). The information shows the pulse reconstruction time and spectrum of the wavelength tuning process. The spectral stability and the highest wavelength tuning speed can be defined. Also, the result of the dispersive Fourier transform test proves that by editing the external modulation signal to change the internal pump energy of the laser cavity and the filtering band of the acousto-optic tunable filter, a reliable mode-locked fiber laser with high-speed tuning of the center wavelength can be obtained.

Conclusions We study the rapid tuning of the center wavelength of a narrow-spectrum passive mode-locked ytterbium fiber laser based on fast acousto-optic filtering technology. The narrow-spectrum mode-locked fiber laser system has an output power of 200 mW, a pulse width of 5.87 ps, a repetition rate of 40.874 MHz, and a spectral bandwidth of 0.15 nm. By programming the RF signal to drive the acousto-optic tunable filter, a stable mode-locked pulse with a center wavelength tunable in the range of 1016–1042 nm can be obtained. To investigate the reconstruction process of laser pulses during intracavity filtering, we employ the dispersive Fourier transform technology to visualize the real-time reconstruction process of laser pulses during the tuning of the center wavelength, and the results confirm that the highest central wavelength tuning frequency of the laser is about 5 kHz.

Key words lasers; fiber laser; wavelength tunability; dispersive Fourier transform; pulse reconstruction