

文章编号 1672-6634(2024)03-0001-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024010003

300 MHz、139 fs 全光纤超短脉冲激光器

黄玺玮, 李晓辉, 郭潇潇, 唐旭, 张锐

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062)

摘要 高重复频率超短脉冲光纤激光器在高效加工、生物光学成像等方面具有广泛的应用价值。报道了基于非线性偏振演化效应的高重复频率、百飞秒、集成化光纤激光源。通过集成结构实现重频 300.25 MHz、脉冲宽度 139 fs 的脉冲激光。在 384.2 mW 的平均泵浦功率下, 该激光器连续工作 12 h, 光谱输出形状未发生变化。其中在 6 h 内, 重复频率漂移量约为 25 Hz。此外, 该激光器在泵浦功率为 512.8 mW 时, 可以实现自启动, 因此, 这种结构简单, 高重复频率的超短脉冲锁模光纤激光器是一种具有广泛应用潜力的激光源。

关键词 高重复频率; 超短脉冲; 光学混合器; 时间带宽积; 自启动

中图分类号 O437

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



300 MHz, 139 fs All-fiber Ultra-short Pulse Laser

HUANG Xiwei, LI Xiaohui, GUO Xiaoxiao, TANG Xu, ZHANG Rui

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract Ultra-short pulse fiber lasers with high repetition rate have been widely used in high efficiency processing and bio-optical imaging. In this paper, a high repetition rate, hundred-femtosecond, integrated fiber laser source based on nonlinear polarization evolution is reported. The integrated structure realizes the pulse laser with a repetition rate of 300.25 MHz and pulse duration of 139 fs. At an average pump power of 384.2 mW, the laser operated continuously for 12 hours, and the spectral output shape did not change. Within 6 hours, the repetition rate drift is about 25 Hz. In addition, the laser can be self-started when the pump power is 512.8 mW, so this kind of ultra-short pulse mode-locked fiber laser with simple structure and high repetition rate is a laser source with wide application potential.

Key words high repetition rate; ultra-short pulse; optical mixer; time bandwidth product; self-starting

近些年来, 光纤激光器以传输光束的质量高、传输效率高、散热性好、结构紧凑、可靠性高等优点成为大

收稿日期: 2024-01-06

基金项目: 陕西国际合作项目(2023-GHZD-46); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2022YW06); 咸阳市重点研发计划(L2022-ZDYF-GY-028); 陕西师范大学启动基金(1112010209, 1110010717); 陕西师范大学青年学术骨干项目(18QNGG006)资助

通信作者: 李晓辉, 男, 汉族, 博士, 研究员, 研究方向: 超快激光, E-mail: lixiaohui0523@163.com。

家关注的热点^[1-3]。高重复频率是超快脉冲激光器输出性能的一个关键指标,它在光学频率梳及光通信、非线性生物成像以及在寻找类地系外行星中天文光谱的精确校准等方面具有广泛的应用^[4-6]。例如使用高重复频率超快激光器,可以提高信号速率和成像速度来减少荧光蛋白的光漂白和光损伤,这样可以显著提高生物成像质量等^[7]。在早期,高重复频率脉冲激光源的实现是通过被动锁模钛蓝宝石激光器所产生的^[8],但是与固体激光器相比,光纤激光器具有体积小、增益效率高、散热好、无需对准等优点而备受关注,因此光纤激光器是一个实现高重复频率超短脉冲输出的良好的平台。无源谐波锁模(HML)是提高脉冲重复频率的一种良好的方法。然而,在实际应用中,HML 脉冲的时序抖动通常大于基频锁模脉冲的时序抖动^[9,10]。除此之外,利用可饱和吸收镜的直线腔也可将脉冲的重复频率提升至千兆赫兹量级^[11]。但其输出脉冲宽度往往是大于皮秒量级,并且由于腔内脉冲整形机制的限制,难以压缩^[12];当然,基于材料所制成的可饱和吸收器的损伤阈值往往较低,这就导致其平均输出功率相对较低。目前,利用碳纳米管、石墨炔、少层过渡金属硫化物、可饱和吸收镜(SESAM)等技术已成功实现脉冲激光器锁模脉冲的输出^[13-16]。

而非线性偏振旋转(NPR)技术以其具有高损伤阈值、设计灵活性和超短响应时间等优点而被广泛应用于光纤环形激光器,以实现高重复频率锁模脉冲。其基本原理是,当脉冲的两个正交偏振分量在光纤中传输时,由于自相位调制效应(SPM)和交叉相位调制效应(XPM)引起强度依赖的偏振状态变化。通过调节偏振控制器,使其产生一个具有自振幅调制作用的被动锁模机制,类似于快速可饱和吸收体的作用,最终实现脉冲的窄化。相关研究中,Zhao 等人于 2009 年成功实现了基频重复频率为 234 MHz、正色散区域工作的掺铒环形激光器^[17];同年,麻省理工学院 Morse 等人报告了重复频率达 301 MHz 的掺铒环形激光器^[18]。2015 年,窦志远、宋晏蓉等人报道了一种高重复频率的全光纤非线性偏振旋转锁模掺铒光纤激光器,实现了重复频率 217 MHz 的锁模脉冲输出^[19]。2013 年,Wei 和 Xu 等人利用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤,成功构建了长度仅为 5.0 cm 的 312 fs 全光纤环形激光器,基本重复频率为 409 MHz^[20]。2020 年,Zhang Jian 等人实现了重复频率为 464 MHz 的掺铒环形激光器^[21],几年后,他们将重复频率进一步提升至 517 MHz,成为目前已知在环形腔内重复频率最高的装置^[22]。2020 年,Lai 等人展示了一种基于非线性偏振演化(NPE)的紧凑、自启动锁模掺铒光纤激光器,其基本重复率为 344 MHz,脉冲持续时间为 160 fs^[23]。2021 年,Liu 等人报道了一种基于非线性极化演化(NPE)的人工饱和吸收器(SA)锁模光纤激光器,最终实现了脉冲重复频率为 115 MHz 的输出^[24]。在 2023 年,Jang 等人展示了一个全 C 波段波长可调谐的锁模光纤激光器,其重复频率为 250 MHz^[25]。值得注意的是,上述实验中几乎都采用了半空间半光纤的方法来实现高重复频率输出,这些空腔的设置涉及多个自由空间模块组件,增加了对准的难度,降低了系统的紧凑性和适应性。在全光纤激光器产生高重复频率脉冲的相关研究中,很少有人对不同功率下的光谱和脉冲演化进行了详细的比较分析。

本研究呈现了一种基于非线性偏振旋转(NPR)的掺铒环型全光纤激光器,具备结构简单紧凑和高输出效率的特点。该光纤激光器能够稳定产生锁模孤子脉冲,其输出基本重复频率为 300.25 MHz,直接输出的脉冲宽度为 473 fs。为了观测 68 cm 长谐振腔内的锁模状态,我们仅通过改变泵浦输入功率的大小,观察到光谱宽度与脉冲宽度的演化过程,其光谱宽度最宽可达 66.2 nm。为了获得更短的脉冲,我们在腔外引入一段单模光纤,对脉冲进行压缩,成功获得脉冲宽度为 139 fs 的超短脉冲输出。此时光谱宽度为 20.8 nm,时间带宽积为 0.358 2,同时输出存在较小的啁啾。最后,在 384.2 mW 的平均泵浦功率下,该激光器连续工作 12 h,光谱输出形状未发生变化。在此期间,激光器的重复频率漂移量在 6 h 内仅为 25 Hz。

1 实验装置

本实验展示的紧凑型光纤激光器实验装置如图 1 所示。该激光器由全光纤结构组成,谐振腔包括一根高浓度铒掺杂光纤(EDF)和两段单模光纤(SMF-28e)。在腔内,通过偏振相关集成元件(PD-ISO)构建谐振腔,该集成元件集成了波分复用器(WDM)、隔离器(ISO)以及耦合器(OC)的混合功能,其输出比为 10 : 90。腔内使用该集成元件有效减少了分立元件的熔接损耗和总体腔长。对于采用空间结构的光学谐振腔,该实验装置通过光学集成器件显著降低了腔体的损耗,同时利用高重复频率基频降低了对泵浦功率的需求。腔

外输入泵浦为中心波长为 980 nm 的连续光激光器,最高输出功率为 630.1 mW。输出光谱通过光谱分析仪(Anritsu MS9710C)测量,输出的脉冲序列通过 1 GHz 的数字示波器(Rigol DS6104)测量,其中包括一个 2 GHz 的光电探测器(Thorlabs DET01 CFC)。锁模稳定性的测量通过一个 6 GHz 的射频频谱分析仪(Rohde & Schwarz FSC6)完成,而脉冲宽度则由自相关仪(FR-103XL)测量。

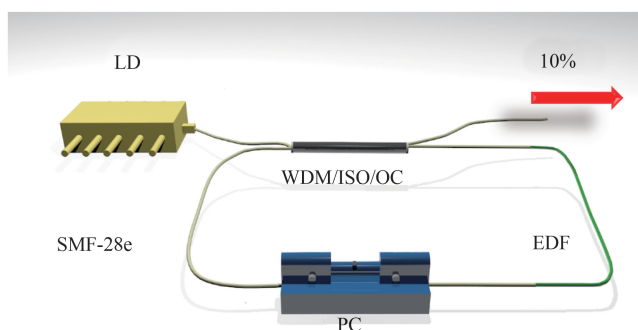


图1 实验装置:EDF为掺铒增益光纤,PC为偏振控制器,LD为泵浦源,SMF-28e为单模光纤,WDM/ISO/OC为光学混合器

Fig. 1 Experimental setup: EDF is erbium-doped gain fiber, PC is polarization controller, LD is pump source, SMF-28e is single-mode fiber, and WDM/ISO/OC is optical mixer

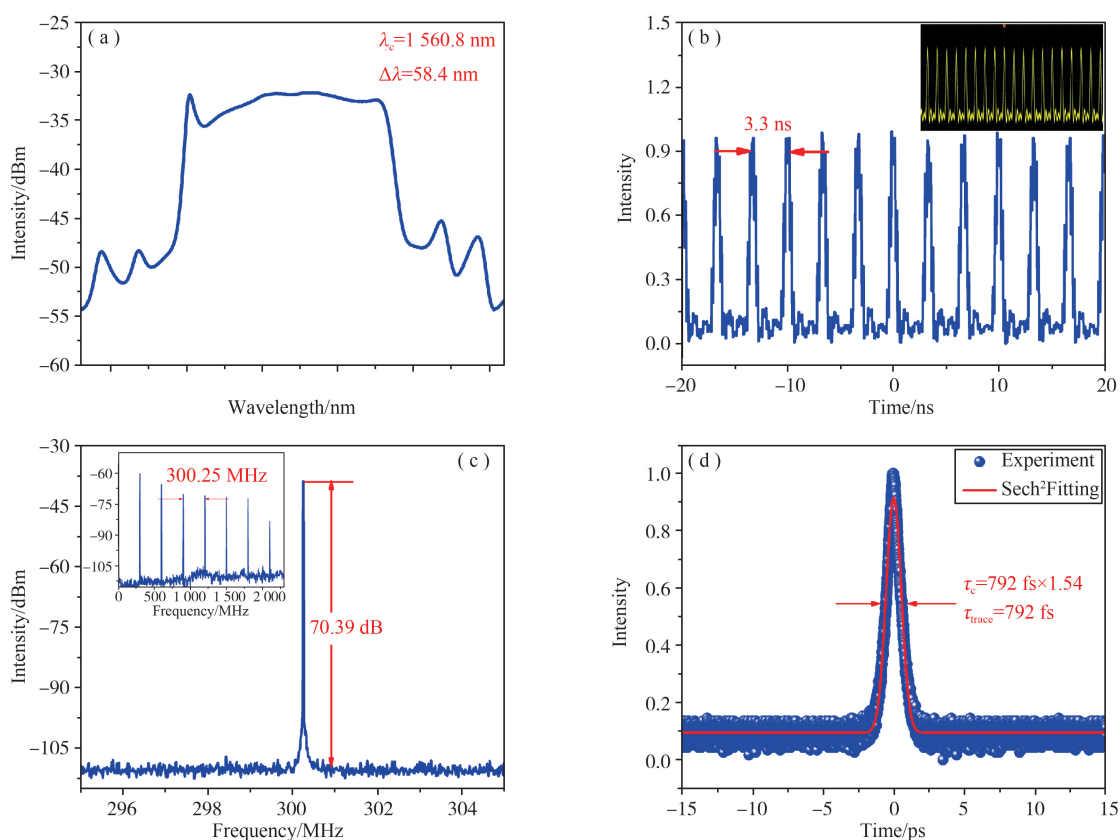


图2 泵浦功率为 521.8 mW 的锁模脉冲的典型特性

Fig. 2 Typical characteristics of a mode-locked pulse with a pumping power of 521.8 mW

2 实验结果以及分析

在实验中,通过将泵浦功率提升至 521.8 mW,并同时精确控制偏振控制器,我们观察到光纤激光器出现锁模现象,如图 2(a)所示。在此功率下,光谱的 3-dB 带宽为 58.4 nm,中心波长为 1556 nm。与传统孤子锁模状态相比,光谱形状明显不同,呈现较为平坦的光谱中心。这是由于腔长较短,腔内的净色散量更接近于近零大小,导致脉冲形状展宽,孤子的边带逐渐减小,带宽更加展宽。图 2(b)展示了光纤激光器的锁模

脉冲序列图。此时示波器中的脉冲序列的幅度调制非常小,表明脉冲能量具有良好的稳定性。测量得到的脉冲时间间隔为 3.3 ns,与频谱中的频率相符,频率为 300.25 MHz,信噪比为 70.39 dB。图 2(c)的插图显示了 2.5 GHz 范围内的频谱,频谱间隔为 300.25 MHz。为了更全面地了解锁模脉冲,我们使用自相关仪对脉冲信息进行测量,结果显示脉冲宽度约为 792 fs,如图 2(d)所示。根据测量得到的脉冲宽度,计算得到的时间带宽积约为 5.7,表明脉冲内含有啁啾。这一现象的原因在于,一方面,腔外连接有一根长 1 m 的单模光纤(SMF-28e)尾纤,另一方面,腔内功率较高导致腔内非线性效应增大。

根据上述脉冲展宽的原因,在实验中我们将泵浦功率调整至 384.2 mW,使光纤激光器的锁模状态接近失锁阈值。通过观测光谱分析仪,得到如图 3(a)所示的光谱形状。与泵浦功率为 521.8 mW 时的光谱相比,此时光谱带宽约为 19.2 nm,中心波长为 1 553.2 nm,光谱顶部呈现相对尖锐特点。这一变化主要是由于减小泵浦功率,腔内的非线性效应减弱,导致光谱展宽能力下降,进而使光谱带宽减小。示波器脉冲序列间隔维持在 3.3 ns,对应于频谱的 300.25 MHz,如图 3(c)所示。脉冲宽度的测量仍采用自相关仪,测量结果显示此时的脉冲宽度为 473 fs,如图 3(d)所示。由于已接近失锁阈值,无法再降低泵浦功率,因此在此功率下的脉冲是光纤激光器直接输出的最短脉冲。考虑到脉冲变换的极限,此时的脉冲仍然存在一定的啁啾。

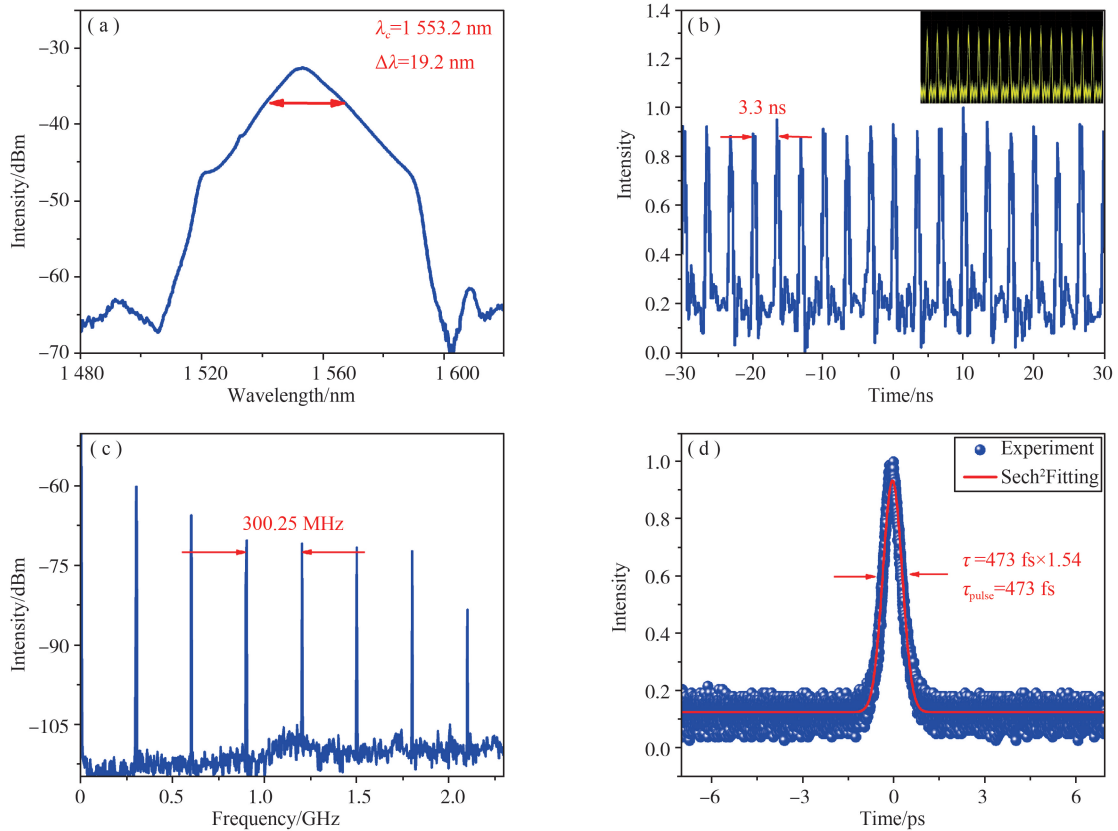


图3 泵浦功率为 384.2 mW 下锁模脉冲特性

Fig. 3 Mode-locked pulse characteristics at a pump power of 384.2 mW

为了更清晰地观察泵浦输入功率对锁模脉冲特性的影响,我们进一步在实验中观察了泵浦功率从 384.2 mW 到 630.1 mW 范围内的脉冲输出特性以及相应的斜率效应,如图 4 所示。从图 4(a)中我们可以看到脉冲随着泵浦功率的演化图。在这一过程中,泵浦功率从 384.2 mW 逐渐增加至 630.1 mW,脉冲宽度逐渐变宽,腔内啁啾逐渐增大,表明泵浦功率对腔内非线性效应产生显著影响。而图 4(b)展示了泵浦功率与输出功率之间的线性关系。这一实验结果清晰地展示了泵浦功率变化对锁模脉冲特性的调制效应,呈现了脉冲宽度和腔内啁啾随功率变化而演化的趋势。图 4(b)中的线性关系揭示了泵浦功率与输出功率之间存在着稳定的线性关联,为进一步优化和控制光纤激光器的性能提供了重要参考。

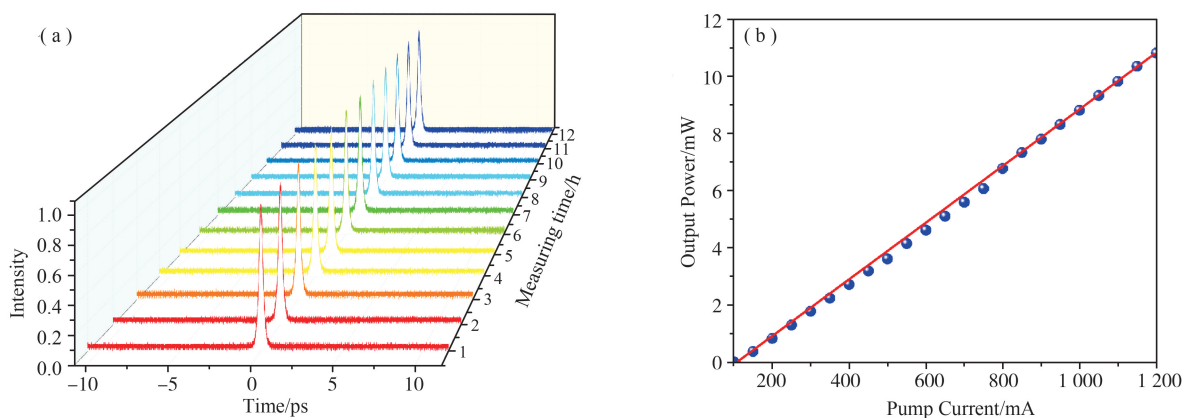


图4 384.2~630.1 mW 脉冲演化图与斜率效应

Fig. 4 Pulse evolution and slope effect of 384.2~630.1 mW

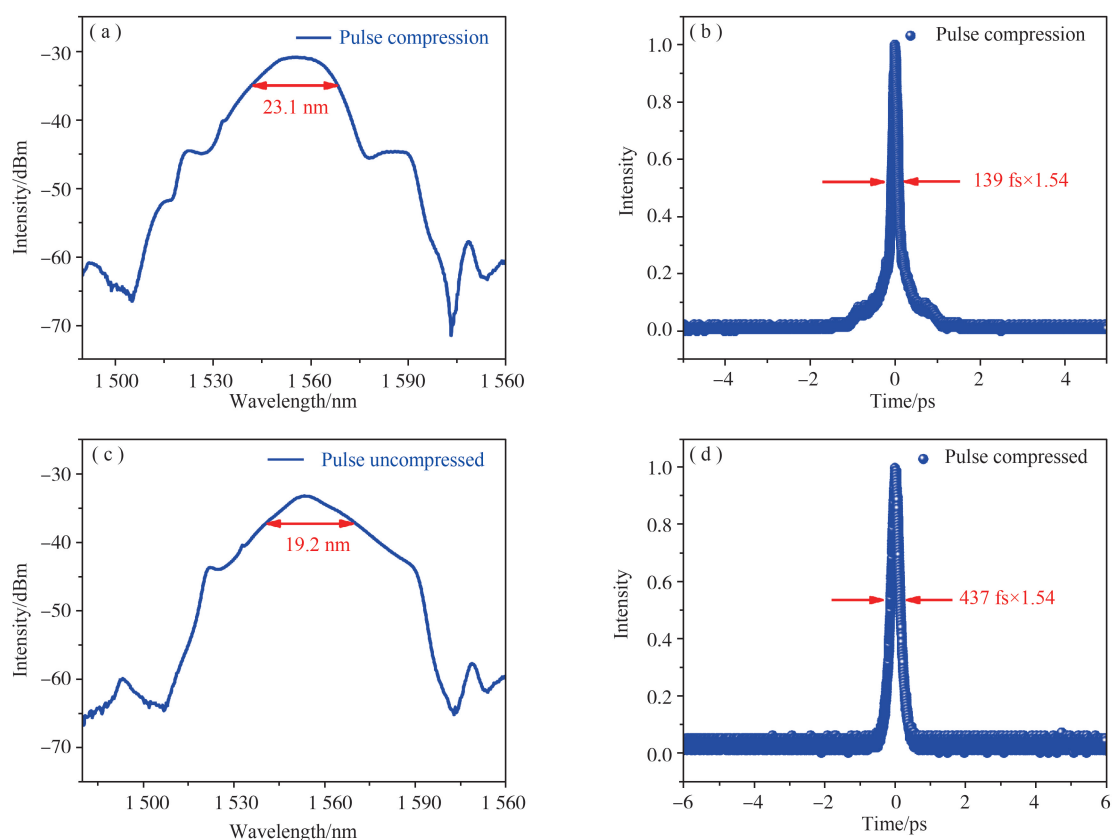


图5 泵浦功率 384.2 mW, 加入腔外压缩装置得到的锁模输出特性

Fig. 5 Mode-locking output characteristics obtained by adding an external compression device at a pump power of 384.2 mW

由于在失锁阈值处,腔内仍存在一定的啁啾,如图5(d)所示。为了获得更短的输出脉冲宽度,我们在谐振腔外加入一段色散补偿光纤。利用色散补偿原理,对现有脉冲宽度进行压缩,其对比结果如图5所示。将泵浦功率调节至失锁阈值处,光脉冲通过色散补偿光纤端输出。此时光谱的形状发生了变化,光谱宽度略微展宽,经测量光谱带宽约为23.1 nm,中心波长为1555.5 nm,如图5(a)所示。与未加色散补偿光纤前的光谱[图5(c)]相比,光谱带宽从19.2 nm增加到了23.1 nm。随后,利用自相关仪对压缩后的脉冲进行测量,测得脉冲宽度为139 fs,根据变化极限计算其相应的时间带宽积约为0.36。尽管时间带宽积仍大于傅里叶变化极限,说明该脉冲内仍存在少量的啁啾,但已经实现了脉冲宽度的显著压缩。在多次对腔外的色散补偿光纤进行详细调节和实现的实验中,无法将脉冲宽度进一步压缩。从图5(b)的压缩脉冲可以看到脉冲底部存在无法消除的底座,这是因为腔内含有更高阶的色散和非线性效应,导致脉冲难以进一步压缩。对加入脉

冲压缩装置后的输出功率进行测量,其斜率效应与直接输出脉冲斜率效应相对应,说明脉冲压缩并没有改变其输出功率大小,但峰值功率却有所提高,达到 245 W。这一结果进一步验证了脉冲压缩的有效性。

最后,在实验中,我们将泵浦功率调整至 384.2 mW,并固定偏振控制器以保持腔内偏振状态不变。在光纤激光器尾纤后加入色散补偿光纤跳线后,将输出接入测试仪器,观测 12 h 内脉冲基本重复频率是否发生跳变以及锁模状态是否稳定,如图 6 所示。图 6(a)为 12 h 内光谱的演化图,连续 12 h 内光纤激光器未发生失锁状态。图 6(b)为 12 h 内脉冲序列的演化图,脉冲序列排列较为整齐,表明光纤激光器的输出能量稳定性良好。图 6(c)为 12 h 内射频的演化图,未发现明显的重复频率跳变现象,并且相应时刻的脉冲序列与频谱是相互对应的。在 6 h 内,重复频率漂移量约为 25 Hz。图 6(d)为 12 h 内脉冲的演化图,经测量脉冲宽度在 12 h 内未发生明显变化,输出较为稳定。这一系列实验结果清晰地展示了光纤激光器在长时间运行过程中的锁模状态维持、脉冲基本重复频率漂移及脉冲稳定性的表现。

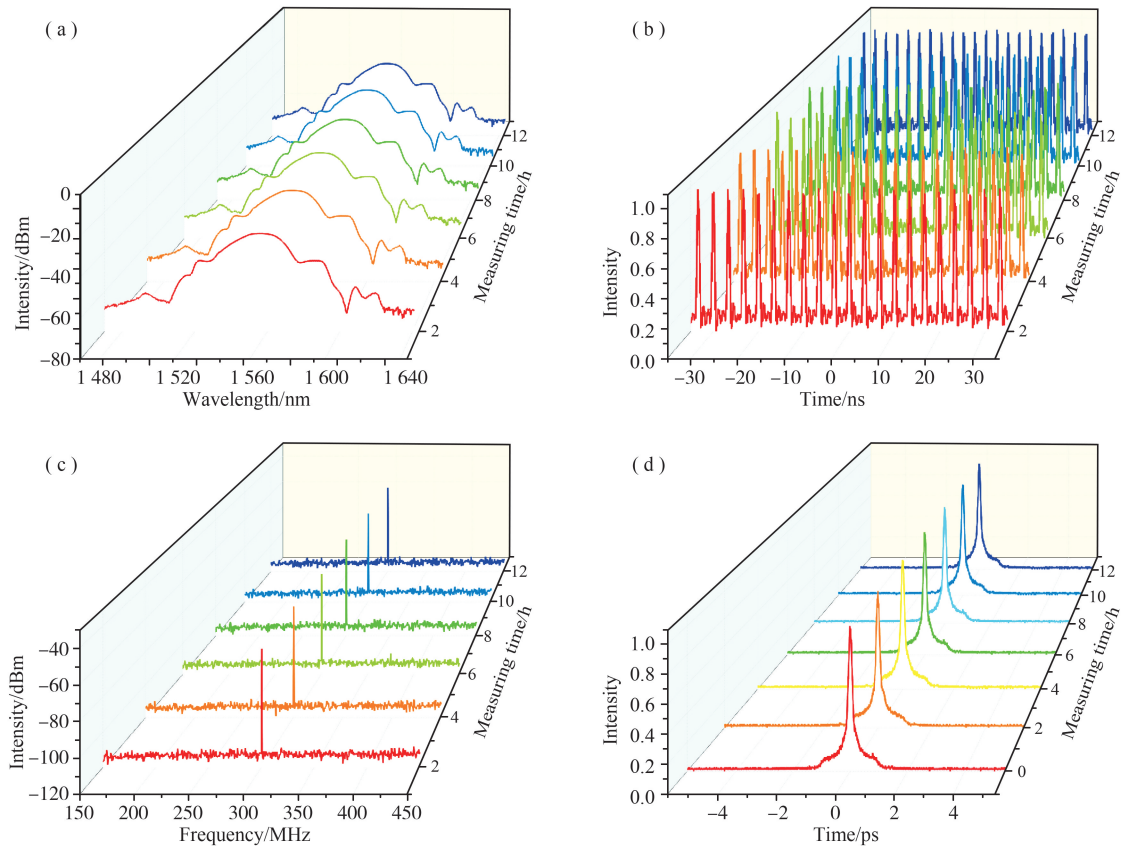


图 6 在 384.2 mW 平均泵浦功率下,12 h 内观测锁模脉冲特性

Fig. 6 Mode-locked pulse characteristics observed within 12 hours at 384.2 mW average pump power

3 结论

实验基于非线性偏振旋转技术成功实现了一种基频为 300.25 MHz、压缩后脉冲宽度为 139 fs 的全光纤孤子脉冲激光器,其输出脉冲宽度接近脉冲变换极限。光纤激光器内采用混合器(PD-OIC)有效优化了整体结构,缩短了腔长并降低了腔内损耗。该激光器的输出脉冲基本重复频率为 300.25 MHz,直接输出脉冲宽度为 473 fs。为了进一步缩小脉冲宽度,在腔外加入一段单模光纤,最终实现了脉冲宽度为 139 fs,该输出的时间带宽积为 0.36。随后,在不同功率下观察脉冲与光谱之间的变化,随着泵浦功率的减小,腔内啁啾也呈减小趋势。此外,对于输出脉冲的稳定性进行了观测,锁模脉冲在泵浦功率为 521.8 mW 时实现自启动。在泵浦功率为 384.2 mW 时,激光器连续工作 12 h,输出光谱形状未发生失锁或其他变化,脉冲重复频率也未出现跳变现象。在 6 h 内,重复频率漂移量约为 25 Hz。实验结果表明,所构建的光纤激光器具有高基本重复频率、超短脉冲输出以及稳定性等优越性能。这种高重复频率、超短脉冲光纤激光器在提高扫描生物成

像质量以及医学医疗方面具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] JAUREGU C, LIMOERT J, TUNNERMANN A. High-power fiber lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 861-867.
- [2] MENG F C, DUDLRY J M. Toward a self-driving ultrafast fiber laser[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 26-31.
- [3] 丁建一, 陆宝乐, 王凯乐, 等. 基于非线性放大环形镜的波长可调谐耗散孤子锁模光纤激光器[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0714002.
- [4] FORTIER T, BAUMANN E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. *Communications Physics*, 2019, 2: 153-159.
- [5] LIANG Y S, ZHU Z M, QIAO S Q, et al. Migrating photon avalanche in different emitters at the nanoscale enables 46th-order optical nonlinearity[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17: 524-530.
- [6] MARIA H, JASPER P, MARIUS P, et al. Focusing properties of high-order harmonics[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9797453.
- [7] CHEN J, LIU W J, XU Z C. Comparison and progress review of various super-resolution fluorescence imaging techniques[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2021, 39(10): 1055-1064.
- [8] 于晨, 田文龙, 朱江峰, 等. 高功率掺镱全固态飞秒激光器[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1105001.
- [9] LI X H, JIN L, SUI Y, et al. 2.11 GHz all-fiber harmonic mode-locked laser based on highly nonlinear hybrid multimode interference saturable absorber[J]. *Optics Communications*, 2023, 545: 129632.
- [10] KOROBKO D A, STOLIAROV D A, ITRIN P A, et al. Harmonic mode-locking fiber ring laser with a pulse repetition rate up to 12 GHz[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106526.
- [11] 韦小乐, 魏淮, 盛泉, 等. 重复频率 1.2 GHz 皮秒脉冲全光纤掺镱激光器[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148015.
- [12] GAO X B, ZHAO Z G, CONG Z H, et al. Stable 5-GHz fundamental repetition rate passively SESAM mode-locked Er-doped silica fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29: 9021-9029.
- [13] ZHANG D, ZHANG C X, LI X H, et al. Layered iron pyrite for ultrafast photonics application[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2515-2522.
- [14] ZHAO Y, WANG W, LI X H, et al. Functional porous MOF-Derived CuO octahedra for harmonic soliton molecule pulses generation[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(9): 2440-2447.
- [15] LI X H, FENG J J, MAO W J, et al. Emerging uniform Cu₂O nanocubes for 251st harmonic ultrashort pulse generation[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(41): 14386-14392.
- [16] 田小青, 李晓辉. 光纤激光器中高斯脉冲输出特性影响因素的探究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(1): 36-42.
- [17] ZHAO L M, LU C, TAM, et al. High fundamental repetition rate fiber lasers operated in strong normal dispersion regime[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(11): 724-726.
- [18] MORSE J L. In high repetition rate, high average power, femtosecond erbium fiber ring laser[C]. // 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, August 28, 2009, San Jose, California United States, 2009.
- [19] 窦志远, 田金荣, 李克轩, 等. 高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(6): 06420.
- [20] WEI X M, XU S H, HUANG H C, et al. A femtosecond hybrid mode-locking fiber ring laser at 409 MHz[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085104.
- [21] ZHANG J. In 464 MHz repetition rate erbium doped soliton fiber laser[C]. // 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications, 18 December 2014, San Jose, California United States, 2014.
- [22] ZHANG J, KONG Z Y, LIU Y ZH, et al. Compact 517 MHz soliton mode-locked Er-doped fiber ring laser[J]. *Photonics Research* 2016, 4(1): 27-29.
- [23] LAI W Y, ZHANG H, ZHU Z X, et al. Sub-200 fs, 344 MHz mode-locked Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45: 5492-5495.
- [24] LIU X, ZHOU R, PAN D, et al. 115-MHz linear NPE fiber laser using all polarization-maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(2): 81-84.
- [25] JANG Y S, PARK, JIN J. Full C-band wavelength-tunable, 250 MHz repetition rate mode-locked polarization maintaining fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 3623.

(责任编辑:赵海军)