

文章编号:1002-2082 (2021) 01-0194-06

高信噪比多波长 2 μm 主动锁模光纤激光器

赵 铭¹, 王天枢²

(1. 厦门大学 嘉庚学院 信息科学与技术学院, 福建 漳州 363105; 2. 长春理工大学
空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 介绍一种多波长掺铥主动锁模光纤激光器, 增益介质为长 2 m 的掺铥光纤, 主动锁模通过铌酸锂强度调制器实现。腔内加入基于双折射的光学滤波器, 利用保偏光纤双折射滤波效应在滤除腔内多余超模噪声的同时, 还可以实现多波长输出。基频下的锁模脉冲频谱信噪比可达 68.48 dB, 在稳定的锁模状态下波长信道数最大为 5。此外, 腔内偏振无关隔离器被替换为偏振相关隔离器后, 将锁模脉冲加载数字信号同步调制, 测得的眼图光信噪比提高了 8.67 dB。测试结果表明, 锁模脉冲的时间稳定性得到有效提升。

关键词: 光纤激光器; 主动锁模; 多波长; 高信噪比

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0108001](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001)

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

ZHAO Ming¹, WANG Tianshu²

(1. School of Information Science and Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A multi-wavelength thulium-doped actively mode-locked fiber laser was introduced, in which the gain medium was a 2 m thulium-doped fiber, and the active mode-locking could be realized by LiNbO₃ intensity modulator. An optical filter based on birefringence was added into cavity, the birefringence filter effect of polarization maintaining fiber was used to filter out the superfluous supermode noise in cavity, and also the multi-wavelength output could be realized. The mode-locked pulse frequency spectrum signal-to-noise ratio could reach to 68.48 dB at fundamental frequency, and the maximum number of wavelength channels was 5 in a stable mode-locked state. Furthermore, the polarization independent isolator in cavity was replaced by polarization dependent isolator, and mode-locked pulse was modulated by digital signal. The optical signal-to-noise ratio of eye diagram can be increased by 8.67 dB, which indicates that time stability of mode-locked pulse can be improved effectively.

Key words: fiber laser; active mode-locking; multi-wavelength; high signal-to-noise ratio

引言

多波长激光由于其具有输出信道数量高的特性, 在光纤传感、光学仪器、微波光子学、光信号处理等领域有着很大的应用潜力, 尤其在激光通信波分复用系统(WDM)中应用更为广泛。主动锁

模光纤激光在产生高重频窄脉宽锁模脉冲的同时可实现多波长输出, 此外, 锁模光纤激光与其他光纤器件兼容性好, 是激光通信理想的载波光源。目前, 有关多波长锁模光纤激光器的报道均集中在 1.55 μm 波段^[1-4]。然而, 2 μm 波段处于人眼安全

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61975021)

作者简介: 赵铭 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事超快光纤激光器方面的研究。E-mail: 290182477@qq.com

通信作者: 王天枢 (1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事无线光通信、光纤激光器方面的研究。E-mail: wangts@cust.edu.cn

波段并且具有较高的大气透过率, 在激光雷达和空间激光通信方面有着潜在的应用价值^[5-8]。激光在大气中传输时, 气体分子及气溶胶的吸收和散射会引起能量衰减, 根据米氏散射条件, 散射光强度与波长的平方成反比。相比于 1.55 μm 常规激光通信波段, 2 μm 波段在空间激光通信中有着更高的应用价值^[9-10]。为了提高 2 μm 波段空间激光通信的带宽, 研究多波长 2 μm 光纤激光器具有重要意义。

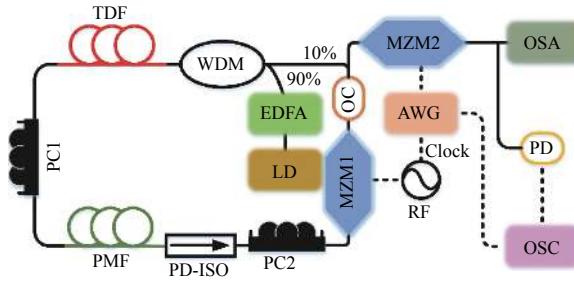
主动锁模光纤激光器可以产生高重频、窄脉宽的锁模脉冲序列, 被广泛用于激光通信和高精度探测等方面^[11-12]。通常在腔内引入周期性的强度或相位的改变, 使调制频率为谐振腔基频的整数倍, 从而产生锁模脉冲。在高阶谐波锁模工作状态下, 腔内存在多组超模, 这些模式都满足谐振腔锁模条件, 他们同时振荡且互相竞争导致了脉冲强度起伏^[1-2]。同时, 环境噪声如温度、振动导致的腔长及腔内偏振态的改变影响了锁模脉冲的时间稳定性, 当高重频锁模脉冲用于高速数据传输载波时, 环境噪声与超模噪声共同作用会导致误码率增加^[3]。通过在腔内添加 Lyot 滤波器和偏振相关隔离器 (PD-ISO), 可以在实现多波长输出的同时有效抑制两种噪声带来的扰动, 提高锁模脉冲的信噪比。近年来, 有关提高高重频锁模脉冲稳定性的报道大多集中在 1.55 μm 及 1 μm 波段^[4, 13], 2016 年, Zhou 等人^[14]报道了一种产生矢量锁模脉冲的掺铒主动锁模光纤激光器, 重频 12.06 MHz, 脉宽 2 ns。同年, Kuznetsov 等人^[13]研究了掺镱主被动混合锁模光纤激光器, 重频 395 kHz, 脉宽 50 ps。关于 2 μm 主动锁模脉冲的研究多为单波长输出, Qin 等人^[10]提出了一种重频 1 GHz~6 GHz 可调的线性腔掺铒主动锁模光纤激光器, 中心波长为 1 959 nm, 脉宽 60 ps。Wang 等人^[15]在掺铒色散管理腔内利用 NPR 被动锁模实现了重频可达 14.5 GHz 的高阶谐波锁模脉冲输出, 然而频谱信噪比仅为 19 dB, 难以应用于激光通信系统。Zeng 等人^[16]通过缩短腔长的方法将 2 μm 孤子锁模脉冲的重频提高至 1.25 GHz, 同时脉冲宽度可达 609 fs, 频谱信噪比高于 75 dB。显然, 孤子锁模脉冲的 3 dB 带宽限制了激光通信的频带利用率, 针对空间激光通信系统的高信噪比, 多波长 2 μm 锁模光源的相关研究还需完善。

本文提出了一种提高主动锁模光纤激光器稳

定性的方法, 输出的 2 μm 锁模脉冲重频可达 2.448 GHz, 通过在谐振腔内加入 Lyot 滤波器将锁模脉冲的基频频谱信噪比提高到 68.3 dB。产生的锁模脉冲经过数字信号调制后可测得调制眼图, 对比腔内添加偏振无关隔离器 (PI-ISO) 和 PD-ISO 的调制眼图光信噪比, 发现 PD-ISO 对环境噪声有着抑制作用。此外, 利用 Lyot 滤波效应可输出 2、3、4、5 个波长信道的锁模脉冲。

1 实验装置组成与原理

高信噪比掺铥主动锁模光纤激光器实验结构如图 1 所示。



LD: 激光二极管; EDFA: 掺铒光纤放大器; WDM: 波分复用器; TDF: 掺铥光纤; PC: 偏振控制器; PMF: 保偏光纤; PD-ISO: 偏振相关隔离器; MZM: 马赫-曾德尔调制器; OC: 光耦合器; AWG: 任意波形发生器; RF: 射频信号源; OSA: 光谱分析仪; PD: 光电探测器; OSC: 示波器

图 1 高信噪比掺铥主动锁模光纤激光器结构图

Fig. 1 Structure of high SNR thulium-doped actively mode-locked fiber laser

泵浦源是一个中心波长为 1 565 nm 的激光二极管 (laser diode, LD) 和一个最高输出功率 1 W 的掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA), 通过一个 1 550/1950 nm 的波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 将泵浦光耦合到谐振腔中, 增益介质为一段长度为 2 m 的掺铥光纤 (TDF, Nufern SM-TDF-9/125), Lyot 滤波器由一个偏振控制器 (polarization controller, PC1) 和一段 2 m 长的保偏光纤 (polarization maintaining fiber, PMF) 组成。腔内添加偏振相关隔离器 (polarization dependent isolator, PD-ISO) 可以在确保光单向传输的同时抑制腔内偏振态改变, 调制器为商用的 2 μm 马赫-曾德尔强度调制器 (IXblue MX2000-LN-10), 带宽 10 GHz, PC2 用来调节进入调制器的激光偏振态。微波信号源 (Hittite HMC-T2220) 的工作频率范围为 10 MHz~20 GHz, 输出功率范围为 1 nW~1 W。1×2 光耦合器 (optical coupler, OC)

将 10% 的能量输出到腔外再次经过一个马赫-曾德尔调制器调制, 其余 90% 的能量提供腔反馈。任意波形发生器(Keysight M8195A, AWG) 经过与微波信号源时钟同步后可以产生速率与锁模脉冲频率相同的数字信号, 产生的伪随机码经过放大后加载到腔外的调制器上, 经过调制的脉冲信号眼图可由宽带光示波器(Agilent 86100C)获得。输出的锁模脉冲光谱由光谱分析仪(YOKOGAWA, YQ6375)观测, 时域波形图及频谱信号经过带宽为 12 GHz 的 2 μm 光电探测器后, 分别由带宽 2.5 GHz 的示波器(Agilent, DSO 9254A)和带宽为 3 GHz 的频谱仪(Agilent, N1996A)观测获得。

2 实验结果与分析

主动锁模可以通过将驱动信号调制频率设置为谐振腔基频的整数倍, 同时调谐腔内激光偏振态来实现。实验中谐振腔总长度为 13.25 m, 对应的基频为 15.3 MHz。起初, 将泵浦功率设置为 700 mW, MZM1 射频驱动信号的频率设置为 15.3 MHz, 调制信号电压设置为 2 V。偏置电压设置为 $\frac{V_\pi}{2}$, 其中 V_π 是调制器的半波电压, 调谐腔内 PC 可获得稳定基频模式下的锁模脉冲, 如图 2 所示。

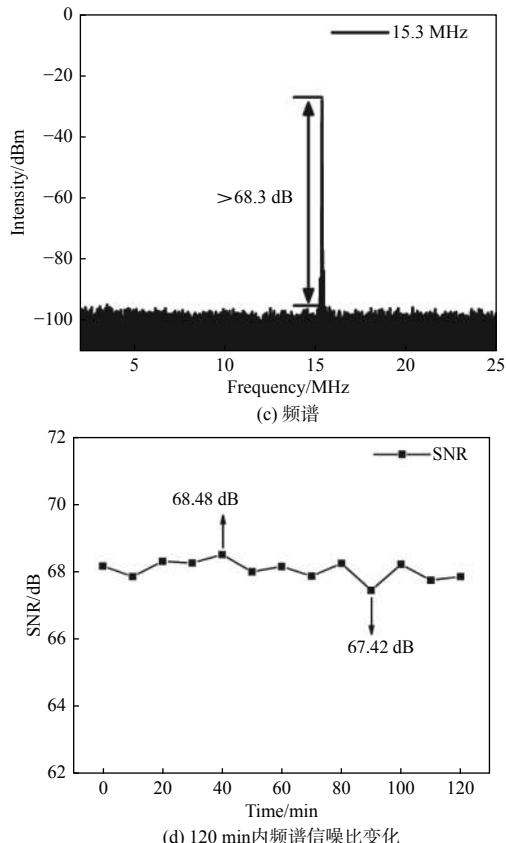
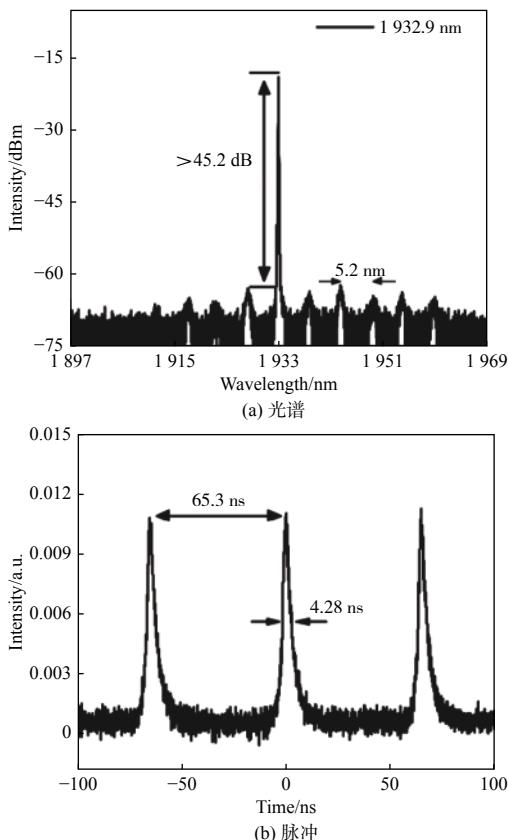


图 2 基频下的单波长锁模脉冲特性

Fig. 2 Characteristic of single-wavelength mode-locked pulse at fundamental frequency

图 2(a) 为掺铥主动锁模脉冲光谱, 中心波长为 1932.9 nm, 边模抑制比大于 45.2 dB, 3 dB 带宽为 0.08 nm。受到 Lyot 滤波器双折射效应的影响, 锁模脉冲的光谱被周期调制, 在光谱上可以观察到明显的边带。PD-ISO 产生的线偏振光经过保偏光纤时会产生一对正交的偏振分量, 2 个分量经过快慢轴传输后会产生一定的相位延迟, 从而在 PC2 处形成一个与波长相关的强度调制周期。调制周期可以通过 $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L \cdot \Delta n}$ 来表示, 其中 λ 为激光的中心波长, L 为保偏光纤的长度, Δn 是保偏光纤 2 个正交轴的折射率差。因此, Lyot 滤波器也可看作是一个波长、滤波深度和调制周期可调谐的梳状滤波器。实验中, 保偏光纤的长度为 2 m, Δn 被标定为 3.57×10^{-4} ^[17], 根据测得的中心波长可以计算出调制周期为 5.23 nm, 这与图 2(a) 光谱图的实验结果相符。图 2(b) 为基频下的锁模脉冲序列, 脉冲间隔为 65.3 ns, 脉冲宽度为 4.28 ns, 脉冲平均功率为 24 mW, 可以看出脉冲峰-峰值抖动较小。图 2(c) 反映了对应的频谱图, 频谱扫描范围为 25 MHz, 分辨率为

1 kHz, 频谱信噪比(SNR)为 68.3 dB。为了衡量系统的稳定性, 实验测量了 120 min 系统的 SNR, 如图 2(d)所示。基频锁模脉冲的频谱信噪比最高为 68.48 dB, 最低为 67.42 dB, 结合频谱上无其他超模噪声分量, 可以表明腔内噪声被有效抑制, 并且锁模脉冲工作在一个稳定的状态。

为了提高泵浦功率, 调节腔内 2 个偏振控制器的状态, 改变 Lyot 的滤波深度和腔内的损耗, 同时调节调制器的偏置电压来控制腔内锁模脉冲的能量, 通过这 3 个步骤可以输出多波长锁模脉冲, 如图 3 所示。当泵浦功率增加到 800 mW 时, 可以获得 2 个波长信道的锁模脉冲光谱, 边模抑制比都高于 45 dB, 如图 3(a)所示。随着泵浦功率增加到

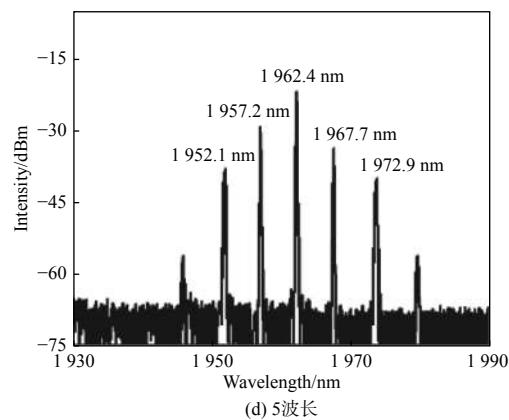
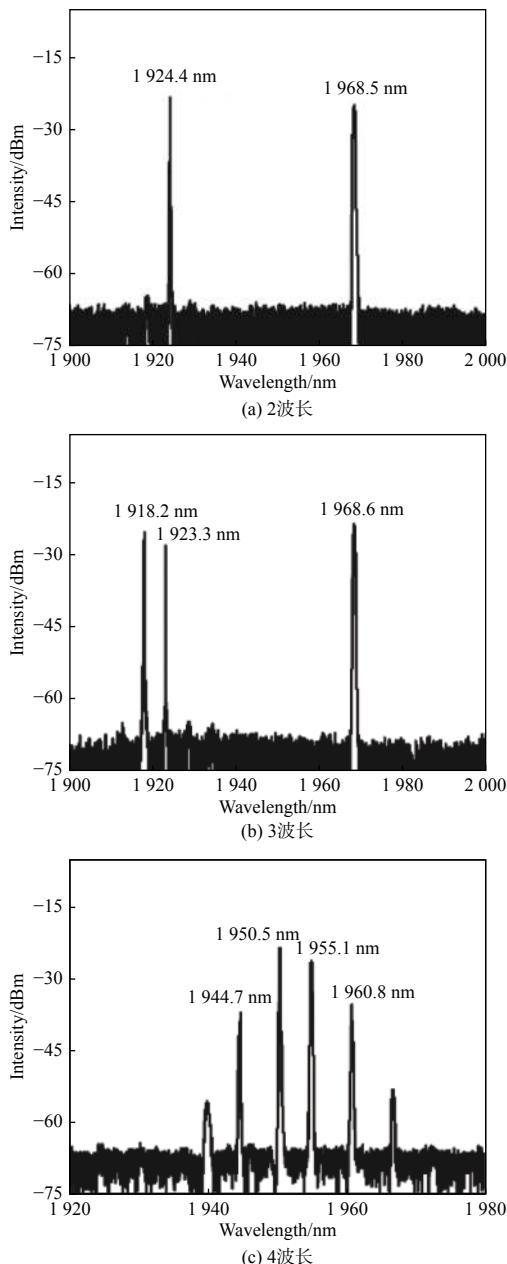


图 3 2 μm 多波长主动锁模光谱

Fig. 3 Spectra of 2 μm multi-wavelength mode-locking

850 mW, 900 mW 和 1 W, 改变腔内偏振态和调制器偏压可以获得 3, 4, 5 个波长信道的锁模脉冲光谱, 如图 3(b)~3(d)所示。其中, 边模抑制比高于 20 dB 时被认为是有效波长信道, 输出的锁模脉冲平均功率分别为 25.2 mW, 26.8 mW 和 28.9 mW。

m 阶谐波锁模脉冲的重频可表示为 $f_m = \frac{mc}{nL}$, 其中 c 为真空中光速, n 为传输介质折射率, L 为谐振腔长度。当驱动信号频率为谐振腔基频的整数倍时, 增加泵浦功率可获得高阶谐波锁模脉冲。增加驱动信号的调制频率至 260.1 MHz, 获得了 17 阶谐波锁模脉冲, 如图 4(a)所示。脉冲间隔为 3.85 ns, 脉冲宽度为 760 ps, 对应的频谱如图 4(d)所示, 频域扫描范围为 350 MHz, 分辨率为 5 kHz, 频谱信噪比为 61.6 dB, 表明锁模脉冲稳定运行。继续增加驱动信号至 673.2 MHz 和 2.448 GHz, 可获得 44 阶和 160 阶谐波锁模脉冲, 如图 4(b)和 4(c)所示。锁模脉冲间隔分别下降到 148.5 ps 和 40.8 ps, 对应的频谱如图 4(e)和 4(f)所示。频域扫描范围分别为 1 GHz 和 3.5 GHz, 分辨率为 10 kHz, 获得的频谱信噪比分别为 58.7 dB 和 54.3 dB。随着锁模脉冲重复频率的增加, 腔内的超模噪声影响了脉冲的稳定性, 导致脉冲峰-峰值抖动增加, 信噪比降低。

实验获得 2 μm 多波长锁模脉冲具有较高的稳定性, 可作为高速激光通信载波源。然而, 随着输出波长信道数的增加, 谐振腔内模式竞争更激烈, 对系统的稳定性要求更高, 此时系统易受环境噪声的影响累积相位噪声, 从而导致失锁。为了衡量锁模光源的时间稳定性, 将射频驱动信号的一部分作为任意波形发生器的时钟参考信号, 使用任意波形发生器产生速率为 2.448 Gb/s 的数字信

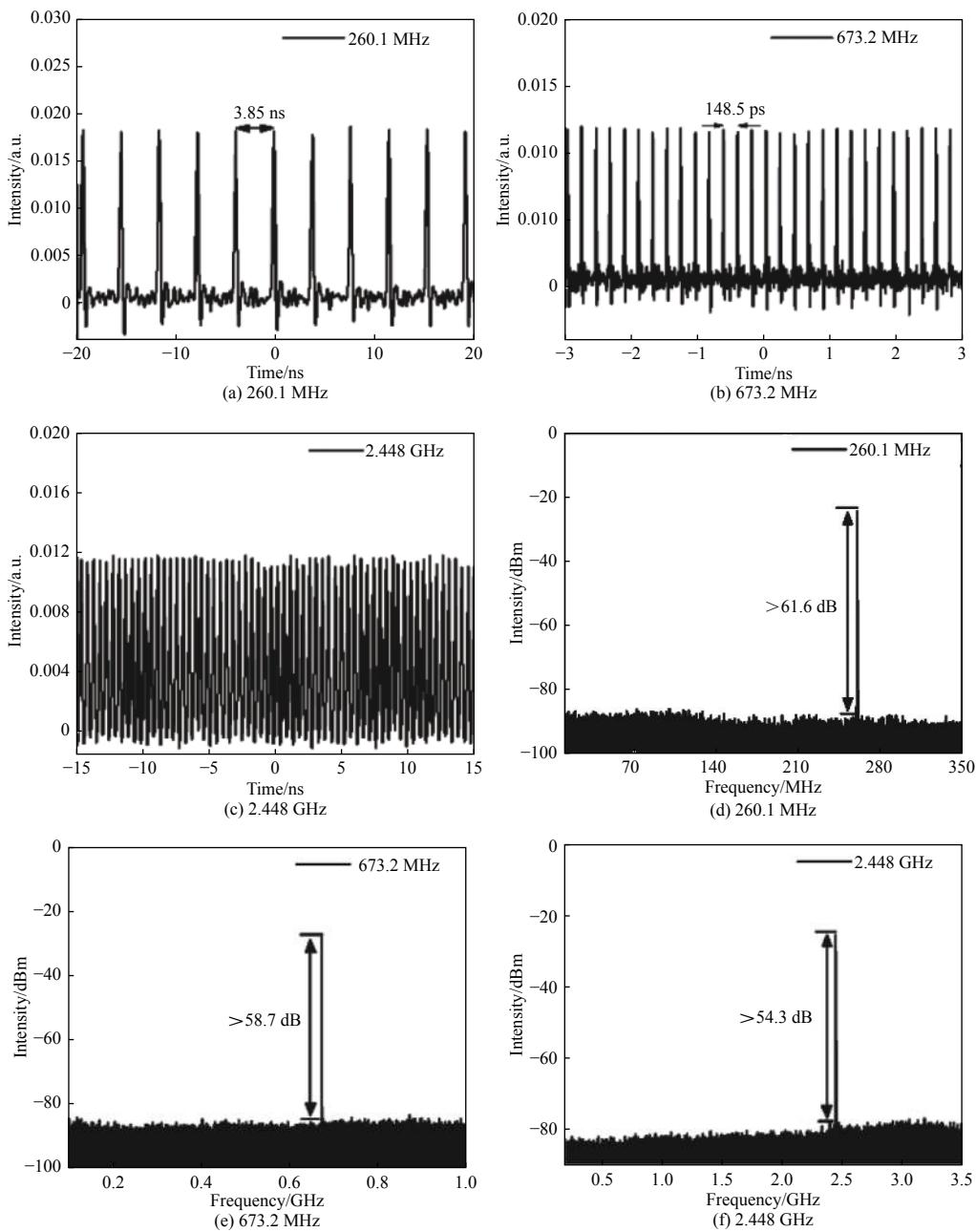
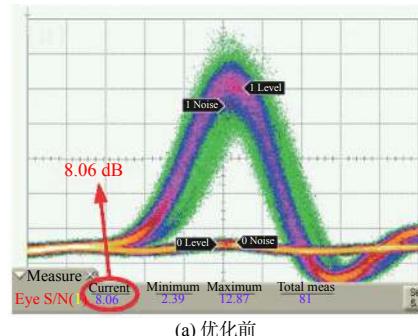


图 4 不同重频下的锁模脉冲序列与对应的频谱

Fig. 4 Mode-locked pulse sequence and corresponding frequency spectrum at different repetition rates

号, 驱动腔外的 MZM2 对输出的锁模脉冲调制加载数字信号。MZM2 的偏置电压同样固定在 $\frac{V_\pi}{2}$, 数字信号的电压设置为 2 V, 测得的锁模脉冲调整眼图如图 5 所示。优化前调制眼图如图 5(a)所示, 可以看出眼图的光信噪比为 8.06 dB, 随着时间的推移眼宽增加, 占空比下降, 表明信号具有一定的强度噪声与相位噪声。将腔内 PI-ISO 替换为 PD-ISO, 经过 PD-ISO 的线偏振光直接由偏振相关的 MZM 调制, 产生的锁模脉冲光信噪比更高, 相位噪声更低, 获得的调制眼图如图 5(b)所示。光

信噪比增加为 16.73 dB, 眼高增加表明系统噪声容限增加, 接收灵敏度增加。



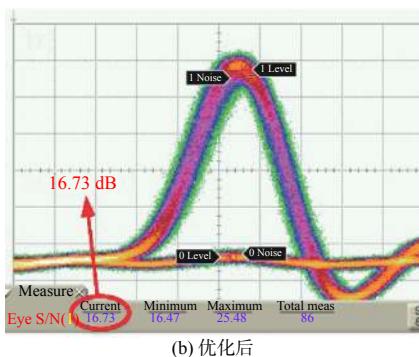


图 5 锁模脉冲优化前后调制眼图对比

Fig. 5 Comparison of modulated eye diagrams before and after mode-locked pulse optimization

3 结论

报道了一种多波长高稳定性的 2 μm 主动锁模光纤激光器, 通过在腔内加入 Lyot 滤波器使得基频锁模状态下频谱信噪比可达 68.48 dB, 表明腔内超模噪声被有效抑制。实验获得了最高 5 个波长信道的锁模脉冲输出, 锁模脉冲重频最高可达 2.448 GHz, 经过时钟同步后加载速率为 2.448 Gb/s 的数字信号获得了调制眼图。通过在腔内添加 PD-ISO 提高 MZM 对腔内激光的调制深度, 脉冲光信噪比提高了 8.67 dB, 同时锁模脉冲相位噪声减小, 系统的噪声容限明显增加。

参考文献:

- [1] O'RIORDAN C, CONNELLY M C, ANANDARAJAH P M, et al. Lyot filter based multiwavelength fiber ring laser actively mode-locked at 10 GHz using an electroabsorption modulator[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(12): 3538-3541.
- [2] HAYASHI R, YAMASHITA S, SAIDA T. 16-wavelength 10 GHz actively mode-locked fiber laser with demultiplexed outputs anchored on the ITU-T grid[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(12): 1692-1694.
- [3] TANG M, JIANG Y C, LI H S, et al. Multi-wavelength fiber laser based on dual-sagnac comb filter for LP11 modes output[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(14): 3745-3740.
- [4] YAO J, YAO J P, DENG Z C. Multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser with suppressed homogeneous line broadening and reduced super-mode noise[J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4529-4534.
- [5] LI J F, LUO H Y, WANG L L, et al. Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm[J]. *Science Reports*, 2015, 5(1): 10770.
- [6] GAO S, KUAN P W, LIU X Q, et al. Single-mode laser output in Tm³⁺-doped tellurium germanate double-cladding fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1702-1704.
- [7] MORO S, DANICIC A, ALIC N, et al. Widely-tunable parametric short-wave infrared transmitter for CO₂ trace detection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8173-8178.
- [8] DELFYETT P J, GEE S, CHOI M T, et al. Optical frequency combs from semiconductor lasers and applications in ultrawideband signal processing and communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(7): 2701-2719.
- [9] SOREF R. Group IV photonics: enabling 2 μm communications[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 358-359.
- [10] QIN J R, MENG Y F, GAO W B, et al. 2 μm repetition-rate tunable (1-6 GHz) picosecond source[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2234-2237.
- [11] POTTIEZ O, DEPAIRS O, HAELETERMAN M, et al. Experimental study of supermode noise of harmonically mode-locked erbium-doped fibre lasers with composite cavity[J]. *Optics Communications*, 2002, 202(1/2/3): 161-167.
- [12] FENG H, ZHAO W, YAN S, et al. Generation of 10 GHz ultra-short pulses with low time jitter in an actively mode-locked fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(2): 404-409.
- [13] UZNETSOV A G K, KHARENKO D S, PODIVILOV E V, et al. Fifty-ps Raman fiber laser with hybrid active-passive mode locking[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16280-16286.
- [14] ZHOU Y, WANG A T, GU C, et al. Actively mode-locked all fiber laser with cylindrical vector beam output[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 548-550.
- [15] WANG Y Z, LI J F, MO K D, et al. 14.5 GHz passive harmonic mode-locking in a dispersion compensated Tm-doped fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7779-7784.
- [16] ZENG J J, AKOSMAN A E, SANDER M Y. Scaling the repetition rate of thulium-doped ultrafast soliton fiber lasers to the GHz regime[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24687-24694.
- [17] MA W Z, WANG T S, WANG F R, et al. 2.07 μm, 10 GHz repetition rate, multi-wavelength actively mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(3): 242-245.