

波长可切换可调谐耗散孤子锁模掺镱光纤激光器

杨思敏, 汪徐德*, 孙梦秋, 梁勤妹

(淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000)

摘要: 采用非线性偏振旋转 (NPR) 锁模技术, 在全正色散掺镱光纤激光器中研究了波长可调谐可切换耗散孤子锁模现象。由于 NPR 所诱导的腔内梳状滤波效应, 光纤激光器在中心波长 1 042.8~1 050.2 nm 以及 1 040.9~1 048.1 nm 处实现了波长可切换运作, 可切换波长间隔分别为 7.4 nm 和 7.2 nm, 光谱宽度约为 5.5 nm 和 2.7 nm。同时在 1 042.77~1 045.33 nm 之间观察到波长可调谐运作, 调谐范围 2.7 nm。另外在光纤激光器中还获得了稳定的双波长锁模和二阶谐波锁模。该实验的研究有利于加深人们对掺镱光纤激光器中锁模动力学行为的理解, 并为多功能激光光源的设计提供了借鉴。

关键词: 可切换和可调谐; 非线性偏振旋转; 掺镱光纤激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200026

Wavelength switchable and tunable dissipative soliton mode-locking Yb-doped fiber laser

Yang Simin, Wang Xude*, Sun Mengqiu, Liang Qinmei

(School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: Wavelength switchable and tunable dissipative soliton mode-locking Yb-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation was studied. Due to the in-cavity comb filtering effect induced by NPR, the central wavelength of laser spectrum could switch between 1 042.8-1 050.2 nm, and 1 040.9-1 048.1 nm. The switchable wavelength intervals were 7.4 nm and 7.2 nm, respectively, and the spectral widths were about 5.5 nm and 2.7 nm. At the same time, the wavelength tunable operation was observed from 1 042.77 nm to 1 045.33 nm with the tuning range of 2.7 nm. In addition, stable dual wavelength mode locking and second harmonic mode locking were obtained in the fiber laser. The research of this experiment is helpful to deepen people's understanding of mode-locking dynamics in Yb-doped fiber laser and provide reference for the design of multi-function laser light source.

Key words: switchable and tunable; nonlinear polarization rotation; Yb-doped fiber laser

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (11504121); 安徽省自然科学基金面上项目 (2008085MF211); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2019034); 安徽省教学研究项目 (2019jyxm0213); 淮北师范大学教学研究项目 (JY18023); 淮北师范大学研究生教育实践基地项目 (2019jdxm06)

作者简介: 杨思敏 (1999-), 女, 硕士生, 主要从事锁模光纤激光器方面的研究。Email: ynpc369@126.com

导师简介: 汪徐德 (1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事超快激光及非线性孤子动力学方面的研究。Email: wangxude@chnu.edu.cn

0 引言

被动锁模光纤激光器具有结构紧凑,操作方便,光束质量高,峰值功率强等优点,在光通信、传感测量、生物医学成像,材料加工等领域有着广泛的应用前景^[1]。到目前为止,根据增益光纤的不同,各种波长的锁模光纤激光器,如 1.0 μm、1.5 μm、2.0 μm 光纤激光器已经被大量研究。其中 1.0 μm 波段的掺镱光纤激光器,因其工作在全正色散域,能够有效产生高能量耗散孤子,受到了人们的广泛关注^[2-3]。

另一方面,随着高速大容量光纤通信系统的发展,波长可切换可调谐光纤激光器已成为人们的研究热点。波长可切换可调谐锁模脉冲激光器可以在不同中心波长处产生超短脉冲,相对于单一波长激光器,其具有成本低、使用方便等优点^[4-5]。到目前为止为了在光纤激光器中实现波长可调谐和可切换的锁模运作,人们提出了很多种方法,如在腔内引入滤波器、保偏光纤、光纤光栅等,2013 年, H. Ahmad 等报道并设计了一种基于马赫-曾德 (M-Z) 结构的可调谐光纤激光器,锁模波长可调谐范围达 19 nm^[6]; 2012 年, Z. X. Zhang 等人在掺镱光纤激光器中插入了保偏光纤,不仅实现了中心波长 1 048.7~1 064.9 nm 的可切换运作,而且研究了双波长的可调谐运作^[7]; 2019 年 D. Wang 等利用光纤布拉格光栅作为波长选择元件,在波长 1 063.8 nm 和 1 064.1 nm 间实现波长可切换锁模^[8]。借助于这些附加的滤波器件,光纤激光器实现了波长可切换可调谐功能,但是同时也增加了光纤激光器系统的复杂性。因此,为了保持激光器结构的紧凑性,可采用腔内双折射诱导的滤波效应来实现可切换可调谐锁模。2014 年 S. Huang 等在基于氧化石墨烯的全光纤锁模掺镱光纤激光器中,实现了波长 1 060.7 nm 和 1 066.7 nm 的双波长可切换可调谐锁模,并且还观察到三波长耗散孤子锁模现象^[9]; 2013 年 H. Lin 在掺镱光纤激光器中实现了双波长可切换可调谐锁模,中心波长分别位于 1 038 nm 和 1 057 nm,波长间隔达 19 nm^[10]。尽管多波长锁模光纤激光器已有不少相关报道,但是在掺镱光纤激光器中,对波长可切换可调谐特性研究仍具有一定的探索意义。

文中报道了基于非线性偏振旋转 (NPR) 锁模的

波长可切换可调谐掺镱光纤激光器。在腔内, NPR 结构等效为一个 Lyot 滤波器^[11], 通过调节偏振控制器和增加泵浦功率, 在强度和波长相关损耗机制的作用下, 激光器实现了在中心波长 1 042.8~1 050.2 nm 和 1 040.9~1 048.1 nm 的可切换锁模运作, 两组可切换锁模的波长间隔分别为 7.4 nm 和 7.2 nm, 同时还在 1 042.77~1 045.33 nm 范围获得可调谐运作。另外在掺镱光纤激光器中, 还观察到了双波长锁模和二阶谐波产生等现象。

1 实验装置图

基于 NPR 锁模的掺镱光纤激光器原理图如图 1 所示, 腔内的增益介质是 0.65 m 长的掺镱光纤 (YDF, Nufern SM-YSF-HI), 其在 975 nm 波长处纤芯吸收率为 250 dB/m。波长为 980 nm 的台式泵浦激光器, 通过 980/1 060 nm 波分复用器 (WDM) 对掺镱光纤进行泵浦。两个偏振控制器 (PC) 与一个偏振相关隔离器 (PD-ISO) 组合构成锁模器件, 实现非线性偏振旋转技术锁模。其中偏振控制器可调节腔内循环光的偏振状态, 偏振相关隔离器用来确保光的单向传播方向。为了增加腔的克尔非线性和调节正色散值, 腔内还接入了一段 100 m 长的 1 060 nm 单模光纤 (HI1060)。整个环形腔的长度为 115 m。最后谐振腔通过一个 20/80 的光纤耦合器 (OC) 将激光输出到腔外用于探测。示波器 (Agilent, MSO6104A)、光谱分析仪 (OSA, Anritsu MS9740A) 以及射频频谱仪 (UNI-T UTS2020) 分

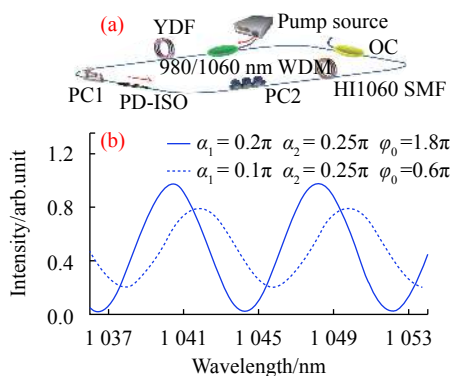


图 1 (a) NPR 锁模掺镱光纤激光器示意图, (b) NPR 诱导的梳状透射谱仿真图

Fig.1 (a) Schematic of Yb-doped fiber laser mode locked by NPR, (b) comb transmission spectra induced by NPR

别用来记录输出激光的脉冲序列、光谱和射频谱。

腔内 NPR 结构等效为一个 Lyot 滤波器, 其透射函数由下式来表述^[12]:

$$|T|^2 = \sin^2(\alpha_1)\sin^2(\alpha_2) + \cos^2(\alpha_1)\cos^2(\alpha_2) + 0.5\sin(2\alpha_1)\sin(2\alpha_2)\cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL})$$

式中: α_1 和 α_2 分别为起偏器、检偏器与光纤快轴之间的夹角; $\Delta\varphi_L = \varphi_0 + 2\pi L(n_y - n_x) / \lambda$ 为线性相移, $\Delta\varphi_{NL} = 2\pi n_2 P L \cos(2\alpha_1) / (\lambda A_{\text{eff}})$ 为非线性相移, φ_0 为光进入 PC 的初相位, n_y 和 n_x 为光纤快轴和慢轴的折射率, L 为腔长, λ 为工作波长, n_2 为非线性折射率系数, P 为瞬时光功率, λA_{eff} 为有效纤芯截面。上述公式的透射谱依赖于波长变化, 其通道的间隔与双折射大小有关, 因此通过调节 PC, 可以改变 α_1 和 α_2 的角度, PC 挤压光纤会引起双折射大小的变化, 使得腔内 NPR 诱导的梳状滤波透射谱的峰值位置和间隔随之发生相应的变化, 从而在光纤激光器中实现可切换以及可调谐

锁模^[13-14]。

2 实验现象和结果

2.1 可切换锁模

调节 PC 和泵浦功率, 激光器在 150 mW 左右就能实现锁模。为了优化锁模状态, 将泵浦功率提高到 375 mW, 同时在光谱仪和示波器中观察光谱和时域特性。如图 2(a) 所示为锁模光谱, 可以看到光谱两沿陡峭且呈方形, 这一特点恰是正色散腔耗散孤子锁模的典型特征^[15]。光谱没有显著的波动, 其中心波长为 1 042.8 nm, 3 dB 带宽约为 5.7 nm, 图 2(c) 为对应的输出脉冲序列, 脉冲重复率为 1.78 MHz, 是激光器的基频脉冲。输出脉冲整齐划一强度一致, 印证了光纤激光器的稳定锁模。图 2(e) 为放大的单脉冲, 蓝色线条是实际测得的单脉冲示波器迹, 红色线条则是用高斯函数拟合得到的曲线, 可以看到两条曲线的轮廓大致

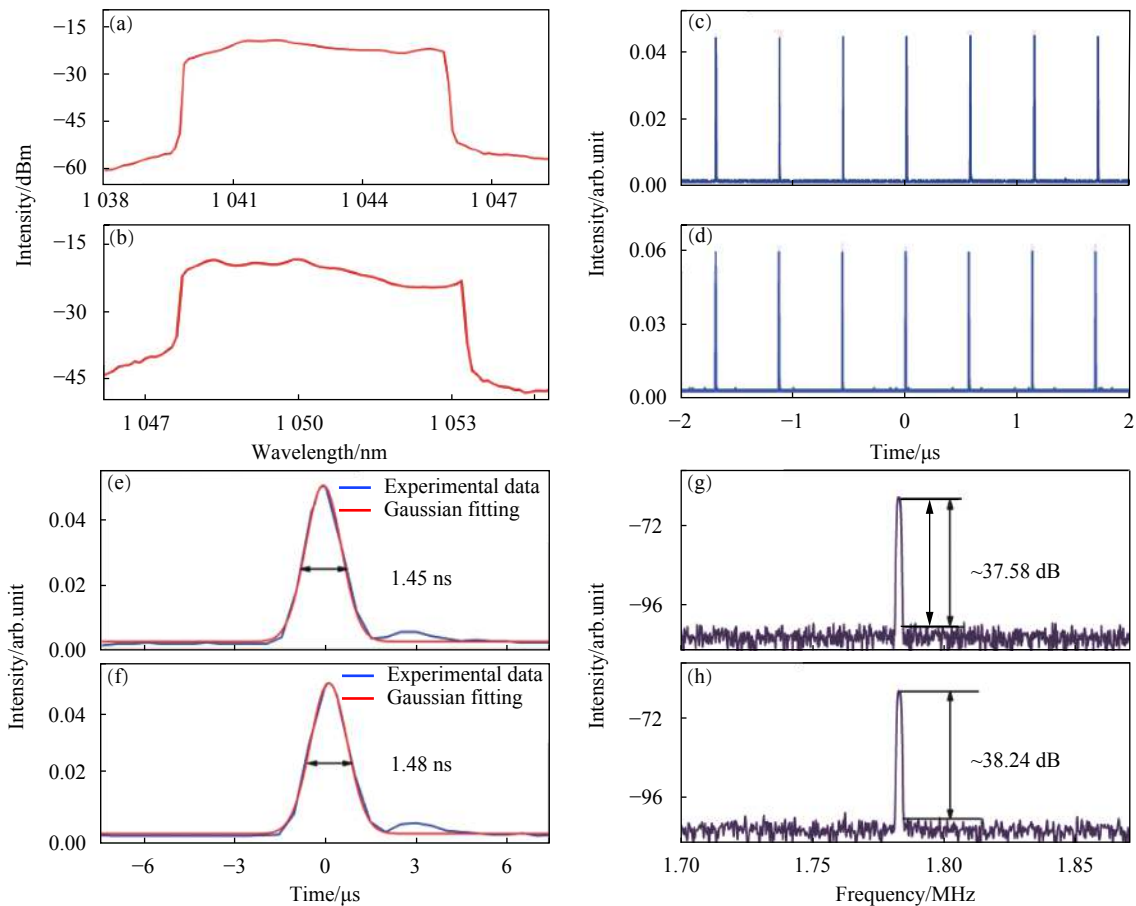


图 2 1 042.8 nm 和 1 050.2 nm 处的可切换锁模。(a), (b) 锁模光谱; (c), (d) 脉冲序列; (e), (f) 单脉冲; (g), (h) 射频谱

Fig.2 Switchable mode-locking at 1 042.8 nm and 1 050.2 nm. (a), (b) Mode-locking spectrum; (c), (d) Pulse train; (e), (f) Single pulse; (g), (h) RF spectrum

吻合,即单个耗散孤子可近似为高斯型,相应的脉冲宽测得为 1.45 ns。图 2(g) 是锁模脉冲测得的射频频谱图,峰值位于 1.78 MHz 对应于腔的基频重复率,其信噪比为 37.58 dB,此时输出端光功率为 3.8 mW。保持泵功率不变,调整 PC 的方向,光谱发生了切换,在另外的波长位置实现锁模,图 2(b) 为此时的锁模光谱,其中心波长为 1 050.2 nm,3 dB 带宽为 5.5 nm,图 2(d) 为测得的稳定的输出光脉冲,其中放大的单脉冲如图 2(f) 所示,通过高斯拟合,得到的脉宽为 1.48 ns,图 2(h) 为相应的射频频谱,信噪比为 38.24 dB,说明激光器工作稳定。在该状态下,输出光功率为 3.6 mW。实验结果表明在固定泵浦源功率 375 mW 状态下,调节 PC 时,依赖腔内 NPR 诱导的梳状滤波效应,光纤激光器的锁模状态可以实现在中心波长 1 042.8~1 050.2 nm 之间切换,波长切换的间隔为 7.4 nm。

将泵浦功率降低至 324 mW,调节 PC,激光器还可在波长 1 040.9 nm 和 1 048.1 nm 之间实现可切换锁模运作,光谱如图 3(a) 和 3(b) 所示,光谱轮廓近似为矩形,3 dB 带宽分别为 2.8 nm 和 2.7 nm,两种锁模状态下重复率为 1.78 MHz,对应脉冲间隔为 561.8 ns。输出光功率分别为 3.3 mW 和 3.2 mW。测量相应的

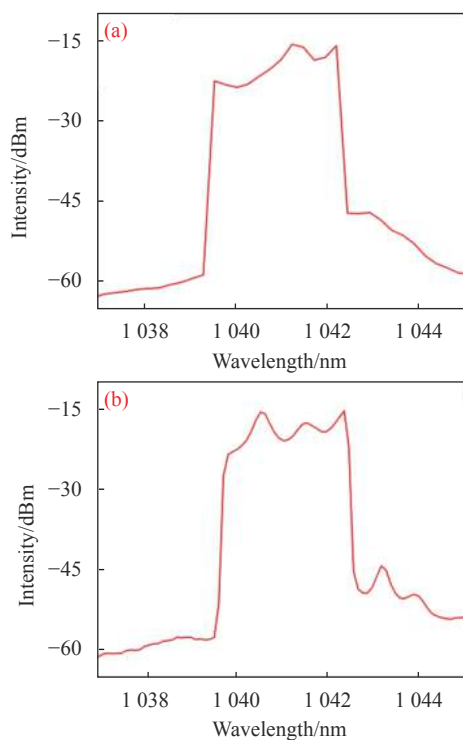


图 3 1 040.9 nm 和 1 048.1 nm 处的可切换锁模光谱

Fig.3 Switchable mode-locked spectra at 1 040.9 nm and 1 048.1 nm

射频频谱,信噪比分别为 37.33 dB 和 37.63 dB,表明了激光器输出较为稳定的耗散孤子。在实验中,激光器实现波长切换的间距为 7.2 nm,且可切换过程可逆。

综上可得出,通过调整腔内参数,如泵浦功率、偏振控制器的角度以及腔内双折射的大小等,可适当地控制由 NPR 引起的滤波效应,激光可以在中心波长 1 042.8 nm、1 050.2 nm 和 1 040.9 nm、1 048.1 nm 两组波段之间实现切换。其可切换间隔可做如下解释:腔内 NPR 结构既起到类快可饱和吸收体的作用,在腔中它又可等效为一个双折射滤波器,其中心透射波长间隔可由公式 $\Delta\lambda = \lambda^2 / (LB)$ 给出,其中 λ 是中心波长, L 为腔长, B 为腔内双折射大小。调节 PC 改变双折射大小和波长相关强度损耗,相当于改变透射波长间隔和透射位置,因此调节 PC,可以在两个波长之间进行可切换操作^[16]。

2.2 可调谐锁模

保持泵浦源的固定输入功率 395 mW 不变,谨慎地调整 PC 的方向,观察到了光谱中心波长随 PC 转动而缓缓移动的现象,掺镱激光腔内在没有借助任何调谐滤波器的情况下,实现了 2.7 nm 范围的连续可调谐锁模现象。如图 4 所示,光谱为典型的耗散孤子方谱,谱宽约为 5.9 nm,文中记录了 5 组光谱,可以看出,中心波长可以在 1 042.72~1 045.34 nm 范围进行调谐,光谱形状几乎没有发生变化,谱宽的变化范围为 5.91~5.96 nm。

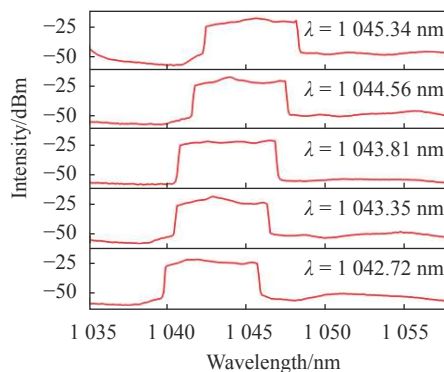


图 4 在固定的泵浦功率 395 mW 下 1 042.72~1 045.34 nm 范围内的可调谐光谱

Fig.4 Tunable wavelength from 1 042.72 nm to 1 045.34 nm under pump power of 395 mW

2.3 双波长锁模

增大泵浦功率至 476 mW,双波长锁模同样能够

在此激光腔内获得。图 5(a) 中,与常规的矩形耗散孤子锁模光谱不同,光谱出现明显的类似驼峰的双峰结构,是较为典型的双波长锁模现象,其中心波长分别为 1 039.5 nm 和 1 088.9 nm,因为工作在全正色散区,峰的两侧同样也有陡峭的边沿。双波长锁模形成的原因为长腔和高泵浦条件下,腔内能量达到受激拉曼散射(SRS)产生的阈值条件,在 SRS 作用下,能量从 1 039.5 nm 转移到 1 088.9 nm,从而在 1 088.9 nm 处又产生一个新的增益峰,形成了如图 5(a) 所示的双波长锁模光谱。图 5(b) 为脉冲序列,其脉冲重复率为 1.78 MHz,信噪比为 38.07 dB,表明光纤激光器是在基频下稳定工作。此外,通过 20% 耦合器,输出端测得的谐振腔输出光功率为 4.5 mW。

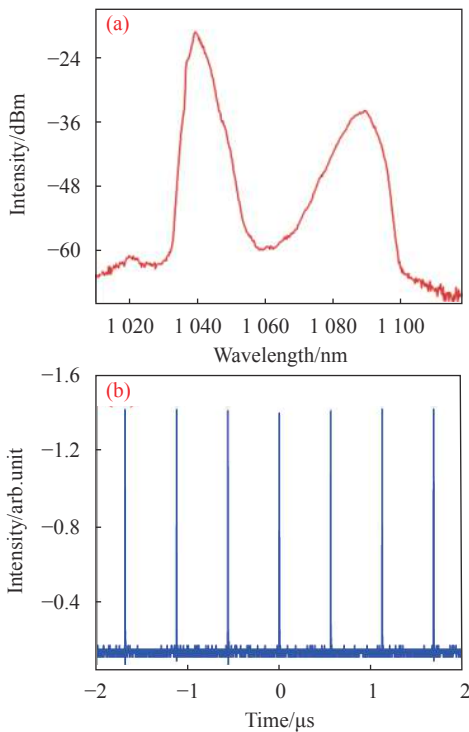


图 5 双波长锁模。(a) 双波长光谱;(b) 脉冲序列

Fig.5 Dual-wavelength mode locking. (a) Dual-wavelength spectrum; (b) Pulse train

2.4 谐波锁模

继续增大泵浦功率,调节 PC,在实验中还可以观察到二阶谐波锁模现象。谐波的产生主要是孤子能量量化效应的结果^[17],在孤子量化效应的作用下,孤子峰值能量受到钳制,腔内高能量孤子脉冲发生分裂成了两个独立的脉冲,而分裂的脉冲在腔内均匀分布,使得谐振腔的重复率增加,等于基频状态下的整

数倍关系。图 6(a) 为二阶谐波的输出特性光谱图,是典型的耗散孤子特征,方形光谱的中心波长为 1 056.22 nm,图 6(b) 下方为实验测得基频锁模的脉冲,可知孤子之间的间距为 561.8 ns,上方为谐波锁模的脉冲,其间距为 280.9 ns,正好是基频状态下的一半,明显可以看出二阶谐波的孤子数量比基频状态增多一倍。图 6(c) 为测得的谐波状态的射频频谱,腔的重复率为 3.5 MHz,再次证实了二阶谐波在腔内形成。

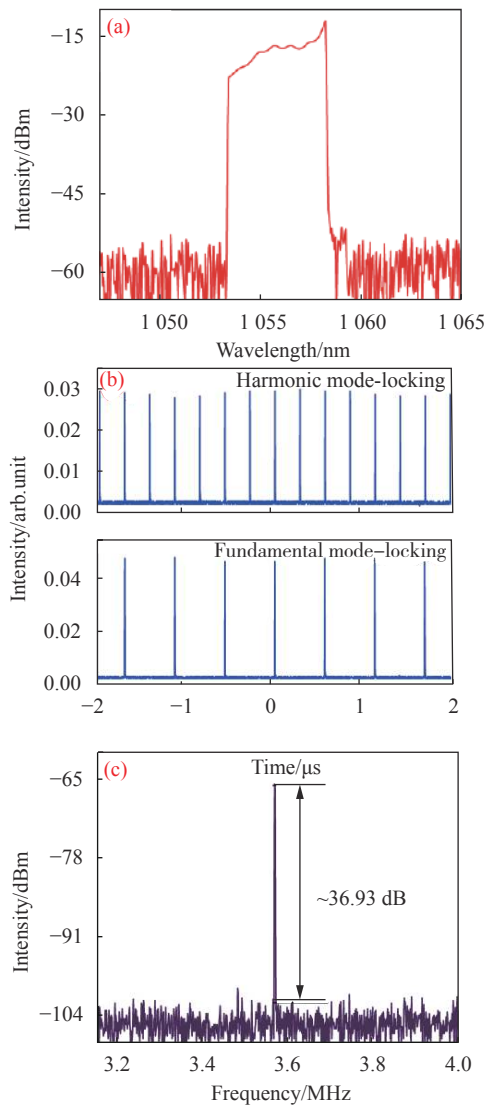


图 6 谐波锁模脉冲。(a) 光谱图;(b) 脉冲序列;(c) 射频频谱

Fig.6 Harmonic mode-locking. (a) Optical spectrum; (b) Pulse train; (c) RF spectrum

3 结 论

文中对基于 NPR 锁模全正色散掺镱光纤激光器

中波长可切换可调谐特性进行了探究,通过调节腔内的偏振态和增大泵浦功率,在腔内滤波效应作用下,激光器可以在 1 042.8 nm 和 1 050.2 nm 之间以及 1 040.9 nm 和 1 048.1 nm 之间实现可切换运作,可切换波长间隔分别为 7.4 nm 和 7.2 nm。在 1 042.77~1 045.33 nm 之间实现可调谐运作,调谐范围 2.7 nm。并且还观察到了稳定的双波长锁模以及重复率为 3.5 MHz 的二阶谐波的现象。该结果有利于人们能够深入地探究掺镱光纤激光器中复杂孤子锁模动力学特性和物理机制。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Optical Physics*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Gao Jing. Tunable mode-locked fiber laser pumped super-continuum source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 25-30. (in Chinese)
- [3] Yu Jialan, Liu Meng, Li Xiangyue, et al. Picosecond pulse Yb-doped fiber laser based on pulse compressor of microfiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803005. (in Chinese)
- [4] Liu Huanhuan, Jiang Qiao, Song Wei, et al. L-band switched dual wavelength passive mode-locked fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701007. (in Chinese)
- [5] Guo Bo. Recent advances in multi-wavelength ultrafast lasers based on nonlinear effects of 2D materials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0103002. (in Chinese)
- [6] Ahmad H, Muhammad F D, Zulkifli M Z, et al. Graphene-based mode-locked spectrum-tunable fiber laser using Mach-Zehnder filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501709.
- [7] Zhang Z X, Xu Z W, Zhang L. Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton generation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with birefringence fiber filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26736-26742.
- [8] Wang D, Song H, Long X, et al. Switchable and tunable multi-wavelength emissions in pulsed ytterbium fiber lasers with black phosphorus saturable absorbers and polarization-maintaining fiber Bragg gratings [J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 373-379.
- [9] Huang S, Wang Y, Yan P, et al. Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [10] Lin H, Guo C, Ruan S, et al. Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak-birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501807.
- [11] 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.
- [12] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B, et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043816.
- [13] Man W S, Tam H Y, Demokan M S, et al. Mechanism of intrinsic wavelength tuning and sideband asymmetry in a passively mode-locked soliton fiber ring laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(1): 28-33.
- [14] Yan Z, Li X, Tang Y, et al. Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear Polarization evolution [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4369-4376.
- [15] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [16] Liang P S, Zhang Z X, Kuang Q Q, et al. All-fiber birefringent filter with fine tunability and changeable spacing [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(11): 2124.
- [17] Li H, Wang Y, Yan P, et al. Passively harmonic mode locking ytterbium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(12): 126102.