

基于 45° 倾斜光栅的重复频率可切换被动谐波锁模光纤激光器

凌远达¹, 黄千千¹, 邹传杭¹, 闫志君², 牟成博¹

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室 上海先进通信与数据科学研究院

上海大学特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;

2. 华中科技大学 光学与电子信息学院 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于非线性偏振旋转(NPR)技术, 搭建了一台重复频率可切换的被动谐波锁模掺铒光纤激光器。腔内 45° 倾斜光纤光栅(45° TFG)作为一种理想的光纤型起偏器, 与两侧偏振控制器(PC)一起实现非线性偏振旋转效应, 实现激光器的稳定锁模输出。在 673 mW 恒定泵浦功率下, 通过调节腔内的 PC, 观测到了从基频到 37 阶谐波等多种锁模状态。该激光器可产生稳定的最高重复频率脉冲为 783 MHz, 对应的谐波阶数是 37 阶, 且具有 41 dB 的边模抑制比(SSR)。高重复频率且稳定性好的脉冲可用于特定的应用中, 如现代光通信系统、光学传感等。

关键词: 光纤激光器; 谐波锁模; 倾斜光纤光栅

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803007

Passively harmonic mode-locked fiber laser with switchable repetition rate based on a 45° tilted fiber grating

Ling Yuanda¹, Huang Qianqian¹, Zhou Chuanhang¹, Yan Zhijun², Mou Chengbo¹

(1. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A passively harmonic mode-locked erbium-doped fiber laser was built up based on nonlinear polarization rotation(NPR) technique with switchable repetition rates. A 45° tilted fiber grating(45° TFG) integrated in the cavity was considered as an ideal polarizer, which was combined with two polarization controllers to realize NPR mechanism. Under fixed pump power of 673 mW, a group of harmonic mode-locked pulses from 1st to 37th could be obtained only through adjusting the two polarization controllers carefully. The laser can produce stable pulses with the maximum repetition rate of 783 MHz which corresponds to 37th harmonic order, and the sidemode suppression ratio (SSR) of 37th harmonic mode is 41 dB. High repetition rate and stable pulses can be used in applications, such as modern optical communication system and optical sensors.

Key words: fiber laser; harmonic mode-locking; tilted fiber gratings

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-05-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605107, 61505244); 上海市青年东方学者项目(QD2015027); 国家青年千人项目

作者简介: 凌远达(1995-), 男, 硕士生, 主要从事超快光纤激光器等方面的研究。Email: lyd8890@i.shu.edu.cn

导师简介: 牟成博(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事超短脉冲的偏振动力学、新型超快光纤激光器、纳米光子学、新型光纤器件等方面的研究。Email: mouc1@shu.edu.cn

0 引言

被动锁模光纤激光器由于其结构简单、稳定性好、体积小、成本低、免维护等优点而受到广泛的关注^[1-3]。基于输出光脉冲的高峰值功率、超短脉宽、高重复频率等特点,被动锁模光纤激光器受到了不同领域的关注。其中,高重复频率这一特性在高速光通信系统、光谱学研究、高速光学采样等领域具有广泛的应用。因此,如何在被动锁模光纤激光器中实现高重复频率输出成为了许多科研工作者的研究重点。目前为止,实现高重复频率锁模脉冲输出的方式主要有三种。第一种是采用短腔激光器。众所周知,激光器的腔长与激光器输出脉冲的重复频率成反比。因此,可通过减小腔长的方法有效提高输出脉冲的重复频率,这一点在许多研究中得以体现^[4]。然而,腔长最终受限于构成激光谐振腔器件的大小和有限的泵浦强度。因此,利用超短环形腔产生的最高重频只能达到几百兆赫兹。第二种方法是加入附加腔结构^[5]。该方法通过控制附加腔的长度,在一定程度上实现频率可调谐。但是存在的附加腔长必须要与谐振腔的腔长严格匹配,并且腔内光场稳定性较差。第三种方法是谐波锁模。在腔内非线性较高时,由于孤子峰值功率受限效应及孤子能量量子化效应,单脉冲无法承受高能量而分裂,形成量子化的多脉冲,并且随着泵浦功率的增加,脉冲分裂个数增大^[6]。在一般情况下,这些多脉冲在腔内随机分布,但在一定条件下,分裂的多脉冲等间隔分布,此时谐波锁模实现,且脉冲重复频率成倍增加。到目前为止,已有研究者利用谐波锁模达到几 GHz 到数十 GHz 的高重复频率锁模脉冲输出^[7]。

常见被动谐波锁模的方式大致可分为两种,即利用物理式可饱和吸收体和人造式可饱和吸收体。物理式可饱和吸收体包括半导体可饱和吸收镜、石墨烯、碳纳米管等。半导体可饱和吸收镜具有造价昂贵、工作带宽窄等缺点;而石墨烯、碳纳米管这一类材料具有制作工艺复杂、热损伤阈值低等特点,不利于实现高重复频率的脉冲。而 NPR 作为一种常见的人造式可饱和吸收体,具有调制深度高、恢复时间快、热损伤阈值高等优点,因此被广泛应用。

45°倾斜光线光栅(TFG)可以看成以布儒斯特角

排列在纤芯的一组波片。它可以让 p 光几乎无损耗地通过,而 s 光却有相当大的损耗。因此,45°TFG 可以作为一种光纤型的起偏器^[8]。此外,45°TFG 相比于其他起偏器具有鲁棒性强、成本低廉、全光纤结构等优点。选用 45°TFG 作为起偏器来实现 NPR 锁模,已经在很多研究中得以实现^[9-10]。

在此次实验中,首次搭建了一台基于 45°TFG 的重复频率可切换的被动谐波锁模掺铒光纤激光器。在 637 mW 泵浦功率下,通过改变腔内双折射,得到了最高重复频率为 783 MHz 的稳定谐波锁模脉冲,该频率对应的谐波阶数是 37 阶。值得一提的是其边模抑制比为 41 dB,这比之前的报道^[11-12]要高得多。同时,搭建的这台激光器也证明了在恒定泵浦功率下,仅改变腔内双折射可以产生稳定的频率可切换的谐波锁模脉冲。

1 实验装置

基于 45°TFG 频率可切换被动谐波锁模掺铒光纤激光器的实验结构如图 1 所示。该激光器由泵浦源、980/1 550 nm 波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、80:20 的光纤输出耦合器、两个偏振控制器(PC-1 和 PC-2)、45°TFG 和一个偏振无关隔离器(PI-ISO)组成。其中作为增益介质的掺铒光纤(Er110-4/125)在 1 530 nm 处的信号增益为 110 dB/m,其二阶色散在 1 550 nm 处为+12 ps²/km,长度为 0.89 m。腔内各器件尾纤为标准单模光纤(SMF-28e),其二阶色散在 1 550 nm 处为-22.8 ps²/km。总腔长为 9.8 m,净腔色散约为-0.19 ps²,激光器工作在反常色散区,锁模激光器的基础重复频率为 21.2 MHz,这与腔的物理长度基本吻合。

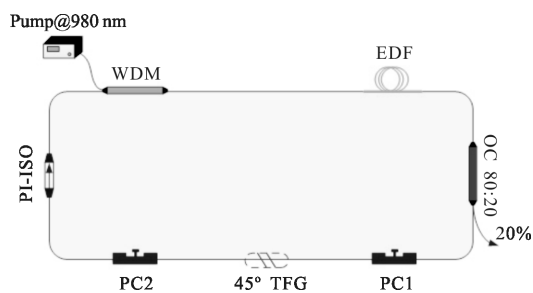


图 1 45°倾斜光线光栅频率可控被动谐波锁模光纤激光器示意图
Fig.1 Experimental setup of the passively harmonic mode-locked fiber laser based on 45° TFG

此次实验中,所选用的 45° TFG 在 1 550 nm 处具有 16 dB 的 PDL,其主要光谱特性如图 2 所示。图中波纹状的抖动是因为当光通过 45° TFG 时,被耦合出纤芯的 s 光在包层和空气的边界处被部分反射回纤芯和包层的边界,因此产生振荡现象^[10]。消除这一现象的方法有两种,一种是将 45° TFG 封装到折射率与包层匹配的热塑管中;一种是将 45° TFG 浸入折射率凝胶中^[10,13]。

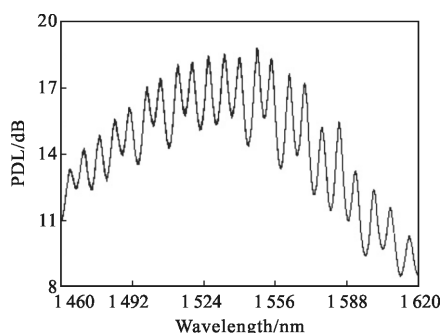


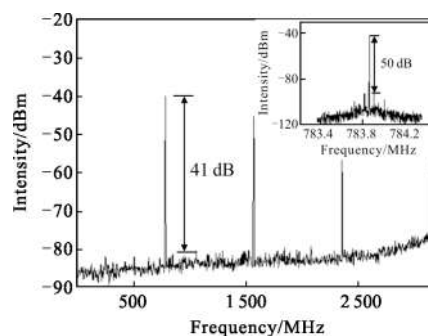
图 2 偏振相关损耗特性曲线
Fig.2 PDL response of 45° TFG

输入泵浦光由 980 nm 的台式激光器(OVLINK, Wuhan, China)泵出,经 980/1 550 WDM 进入激光腔内,EDF 作为腔内增益介质提供增益,之后经过 20:80 的光纤输出耦合器,其中 80%留在腔内循环,20%作为输出端通过 50:50 的耦合器分为两路,一路连接光谱分析仪(OSA, Yokogawa AQ6370C)用来光谱监测,一路经过光电探测器(PD, Newport818-BB-51F)分别连接带宽为 1 GHz,采样率为 5 GS/s 的示波器(OSC, Tektronix MSO4104)、频谱分析仪(SSA, Siglent SSA 3032X)和自相关仪(FEMTOCHROME, FR-103WS)。PC-1、PC-2 用来调节腔内的偏振态,同时和 45° TFG 一起作为等效可饱和吸收体来实现锁模。一个偏振无关隔离器用来确保腔内光信号的单向传输。输出功率由数字光功率计(PM, Yokogawa AQ2160-02)读取。

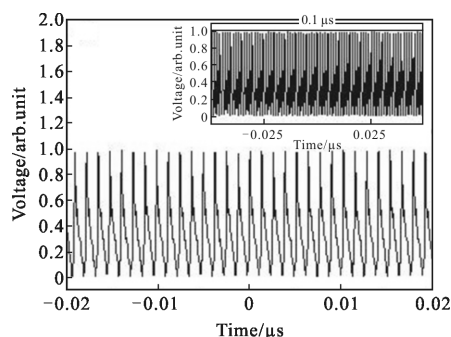
2 实验结果与讨论

在此次实验中,作为起偏器的 45° TFG 其偏振相关损耗在 1 550 nm 处为 16 dB,由于其较大的偏振相关损耗,使得激光器较容易工作在孤子锁模状态^[13]。在 210 mW 泵浦功率下,通过精细调节 PC,得到稳定的单孤子锁模脉冲,其输出功率为 2.38 mW,这一

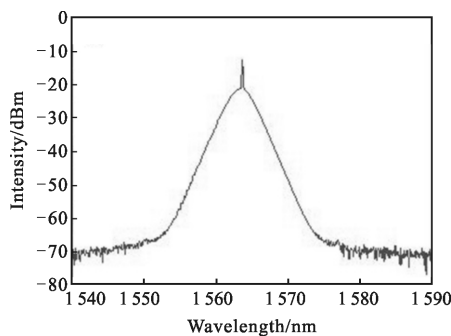
泵浦功率也是该激光器的锁模阈值功率。与此同时,增大泵浦功率到该泵浦源的最大值 673 mW,得到了重复频率为 783 MHz 的谐波锁模输出,如图 3 所示。图 3(a)为 RF 谱,图中可以看出该谐波锁模输出具有高达 41 dB 的边模抑制比(SSR),图中插图显示其信号噪声比(SNR)为 50 dB,这也说明该锁模脉冲工作在稳定状态。值得注意的是,实验中的 SSR 是在 3.2 GHz 扫描范围、10 kHz 扫描分辨率下测得的,而 SNR 是在 1 MHz 扫描范围、1 kHz 扫描分辨率下测



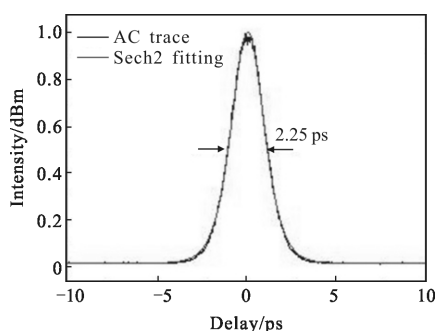
(a) 射频谱
(a) RF spectrum



(b) 脉冲序列
(b) Oscilloscope trace



(c) 光谱图
(c) Optical spectrum



(d) 自相关曲线

(d) Autocorrelation trace

图 3 泵浦功率 673 mW 下 37 阶谐波锁模脉冲输出特性

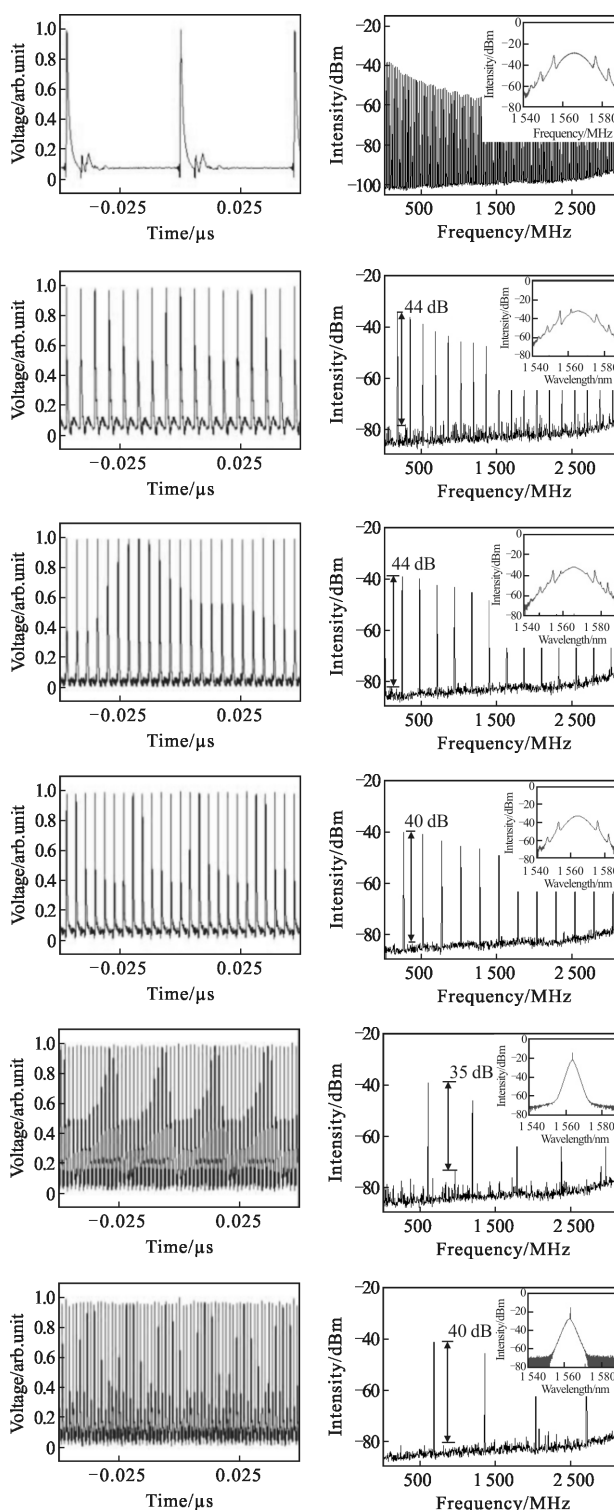
Fig.3 Characteristics of 37th order harmonic mode-locked pulses under 673 mW pump power

得的。图 3(b)、(c)和(d)分别是时域脉冲、光谱图和自相关曲线。图 3(b)中可看出相邻脉冲等间距均匀分布,测得脉冲间隔为 1.28 ns 这也与 783 MHz 重复频率很好的吻合。图 3(c)可知,该光谱的中心波长在 1 563.2 nm 处,其 3 dB 带宽为 3.35 nm,脉冲与双曲正割曲线拟合时得到脉宽为 2.25 ps,估算的时间带宽积(TBP)约为 0.92,表明该脉冲存在啁啾。

在保持泵浦功率为 673 mW 不变条件下,通过调节 PC 观察到了 21~783 MHz 对应基频到 37 阶谐波的锁模脉冲。图 4 包含所观测到的基频、8 阶、11 阶、12 阶、28 阶、32 阶、37 阶谐波对应的时域脉冲和射频频谱,其中射频频谱中的插图为光谱图。图中示波器曲线观测范围皆为 0.1 s,可以看出,通过调节腔内偏振态,脉冲数出现了明显的改变,这也表明输出脉冲的重复频率发生了明显变化。在达到稳定的谐波锁模状态之前,示波器显示的脉冲一直处在不稳定的状态,这可能是由于环境扰动、孤子间相互作用、色散波存在引起的^[14]。由于这些因素的存在,使得孤子脉冲间的相位一直在变化,导致激光器中无法生成稳定的谐波锁模脉冲。在实验中,调节 PC 至稳定的谐波锁模状态,观察光谱图发现存在连续激光(CW)成分。这是因为当 CW 成分存在时,孤子和 CW 成分之间会存在一个恒定的相位差,此时孤子之间相当于以 CW 为媒介,产生恒定的相位差,从而达到稳定的谐波锁模状态。

由图 4 可观察到,多组谐波的边模抑制比皆大于 35 dB,这表明通过改变 PC 获得的谐波具有很好

的稳定性。观察图 4 中光谱图发现,高阶谐波的克利边带消失。笔者推测这是由于此时色散波与孤子的相位不匹配或者是色散波转换为了孤子^[15],从而使使得克利边带消失。此外,相信通过进一步管理腔内色散或者更换高功率泵浦源,可以得到更高重复频率的可切换的谐波锁模脉冲^[14]。



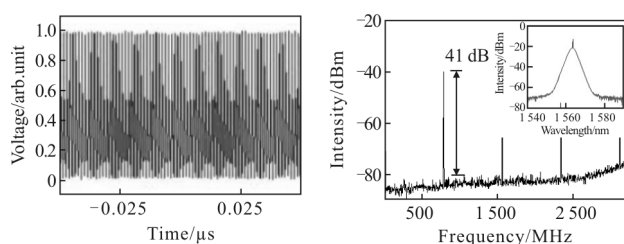


图 4 673 mW 泵浦功率下调节 PC 出现的示波器曲线、RF 谱，RF 谱中插图为对应的光谱图

Fig.4 Oscilloscope trace and optical spectra and RF spectra under 673 mW pump power

3 结 论

搭建了一台基于 45° 倾斜光栅重复频率可切换的被动谐波锁模掺铒光纤激光器。该激光器的锁模阈值为 210 mW, 对应激光器输出为 2.38 mW。随后增加泵浦功率至该泵浦源的最大值 673 mW, 保持该功率不变条件下, 仅通过调节 PC 观察到了 21~783 MHz 对应基频到 37 阶谐波的多组锁模脉冲。其中 37 阶谐波是该激光器稳定谐波锁模输出的最高阶谐波, 该脉冲的中心波长为 1563.2 nm, 其 3 dB 带宽为 3.35 nm, 双曲正割曲线拟合得到脉宽为 2.25 ps, 时间带宽积为 0.92, 边模抑制比为 41 dB, 这比许多同类型激光器的边模抑制比要高。同时, 搭建的这台激光器也证明了在恒定泵浦功率下, 仅改变腔内双折射可以实现锁模脉冲在多个重复频率之间的切换, 并且依然具有很好的稳定性。这一优点使得该激光器在光通信、传感等很多领域都有着潜在的应用。

参考文献:

[1] Chen Kai, Zhu Lianqing, Lou Xiaoping, et al. All-polarization-maintaining fiber laser mode-locked by graphene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (10): 1005004. (in Chinese)

[2] Chen Jiao, Tong Zhengrong, Zhang Weihua, et al. Temperature tunable multiwavelength fiber laser by using compounded filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0105001. (in Chinese)

[3] Feng Dejun, Huang Wenyu, Ji Pengyu, et al. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (5): 1097–1101. (in Chinese)

[4] Yang T, Huang H, Yuan X, et al. A compact 500 MHz

femtosecond all-fiber ring laser [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(5): 680–686.

[5] Kuang Qingqiang, Sang Minghuang, Nie Yiyu, et al. Research on rational harmonic mode-locked phenomenon of passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (11): 2719–2723. (in Chinese)

[6] Pang M, He W, Russell P St.J. Gigahertz-repetition-rate Tm-doped fiber laser passively mode-locked by optoacoustic effects in nanobore photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4601–4604.

[7] Tao Sha, Xu Lixin, Chen Guoliang, et al. Ultra-high repetition rate harmonic mode-locking generated in a dispersion and nonlinearity managed fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2353–2356.

[8] Mou Chengbo, Zhou Kaiming, Zhang Lin, et al. Characterization of 45° -tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1905–1911.

[9] Mou Chengbo, Wang Hua, Zhang Lin, et al. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45° -tilted fiber grating polarization element [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18906–18911.

[10] Yan Zhijun, Zhou Kaiming, Zhang Lin. n-fiber linear polarizer based on UV-inscribed 45° tilted grating in polarization maintaining fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37 (18): 3819–3821.

[11] Wang Yazhou, Li Jianfeng, Mo Kundong, et al. 14.5 GHz passive harmonic mode-locking in a dispersion compensated Tm-doped fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7779.

[12] Song Y W, Morimune K, Set S Y, et al. Single-walled carbon nanotubes for high-energy optical pulse formation [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 021101.

[13] Wang Tianxing, Yan Zhijun, Huang Qianqian, et al. Mode-locked Erbium-doped fiber lasers using 45° tilted fiber grating [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1101506.

[14] Li H F, Zhang S M, Du J, et al. Passively harmonic mode-locked fiber laser with controllable repetition rate based on a carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 1347–1351.

[15] Man W S, Tam H Y, Demokan M S, et al. Soliton shaping of dispersive waves in a passively mode-locked fibre soliton ring laser [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, 33: 1139–1147.