

文章编号: 1005-5630(2022)03-0031-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.03.005

163 MHz/786 fs 高基础重复频率 掺镜飞秒光纤激光振荡器

沈嘉伟, 王 勇, 司 璐, 陈嘉宁, 周 丽, 袁 帅
(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 高重复频率光纤激光器因其光斑质量好、集成化程度高、光光转化率高等优势在光学频率梳、工业加工、超高速光学采样等领域有着举足轻重的作用。利用非线性偏振旋转(NPR)的锁模机理, 设计并搭建了一款基础重复频率为 163 MHz 的“十字腔”型孤子锁模光纤飞秒激光器。该激光器锁模后在 450 mW 的泵浦功率下可以输出 200 mW 的最大功率, 光谱半高宽为 30 nm, 输出脉宽为 786 fs。通过进一步分析激光器泵浦功率与输出功率之间的关系, 得到泵浦功率处于 400~500 mW 时, 激光器处于最佳锁模状态, 并且可以实现自启动锁模。所设计的激光器由于其更加紧密的光学频率梳齿、更好的成像质量和更快的成像速度, 在精密光谱、天文探测等领域具有应用意义。

关键词: 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 高重复频率

中图分类号: TN 242 **文献标志码:** A

163 MHz/786 fs high repetition rate Yb-doped femtosecond fiber laser oscillator

SHEN Jiawei, WANG Yong, SI Lu, CHEN Jianing, ZHOU Li, YUAN Shuai
(School of Optical-Electronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China)

Abstract: High repetition frequency fiber laser plays an important role in the optical frequency comb, industrial processing, ultra-high speed optical sampling and other fields due to its advantages of good beam quality, low power consumption, and high integration. A 163 MHz fundamental repetition rate soliton mode-locked fiber femtosecond laser oscillator is designed and constructed based on nonlinear polarization rotation (NPR) technique. The laser can produce a maximum power of 200 mW at a pump power of 450 mW, with a 30 nm bandwidth and a 786 fs output pulse width duration. By further analyzing the relationship between the pumping power and the output power, it is found that the best operation condition for the laser is at 400~450 mW for the pump power. At the same times, the laser can realize self-starting mode-locking. The proposed laser is of great

收稿日期: 2022-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)

作者简介: 沈嘉伟(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为重重复频率光纤激光器。E-mail: 648234532@qq.com

通信作者: 袁 帅(1985—), 男, 副教授, 研究方向为超快激光。E-mail: ye_zoom@126.com

potential in the application fields like precision spectroscopy and astronomical exploration because of its compact optical frequency comb, high image quality and high imaging speed.

Keywords: fiber laser; nonlinear polarization rotation; high repetition frequency

引 言

光纤飞秒激光器凭借其光斑质量好、集成度高、工作稳定等优势在工业加工、光学测量、光学频率梳、医疗设备等众多领域逐渐占据越来越重要的地位^[1-3]。另外与传统固体激光器中有着大量空间光学元件不同, 光纤激光器以掺杂光纤为增益介质, 通过光纤熔接使其稳定性和操作性得到很大的提升, 使其可以在复杂环境下的稳定运行。其中, 高重复频率光纤飞秒激光器由于拥有较小的脉冲间隔, 是该领域研究热点之一, 在天文光梳、光纤通讯、激光成丝、材料加工等方向有着非常重要的应用^[4-5]。

目前, 光纤激光器实现高重复频率锁模大多采用主动锁模或者被动锁模技术。光纤激光器主动锁模技术采用电光调制器或声光调制器等^[6], 在外加信号的驱动下实现锁模脉冲。虽然主动锁模技术有着中心波长及重复频率可调等优点, 但是其受到电光及声光调制器工作带宽影响, 难以同时实现宽光谱、窄脉宽输出^[7]。被动锁模光纤激光器无需在谐振腔中加入调制器便可实现稳定的超短脉冲输出。被动锁模技术通常被分为以半导体可饱和吸收镜锁模 (SESAM) 为主体的慢饱和吸收体锁模和以非线性光纤环形镜锁模 (NOLM)、非线性放大环形镜锁模 (NALM)、非线性偏振旋转 (NPR) 为主体的快饱和吸收机制锁模。其中慢饱和吸收体类锁模光纤激光器易实现激光器自启动, 并且能实现稳定的锁模脉冲输出, 但是此类激光器受到自身材料特性的影响, 光谱宽度一般在几个纳左右, 因此无法支持飞秒脉冲宽度输出。NOLM 锁模和 NALM 锁模一般为全光纤结构, 这两类锁模方式搭建的光纤激光器需要较长的光纤来保持激光器的非线性效应, 所以 NOLM 锁模和 NALM 锁模所实现的基本重复频率较低, 通常在 50 MHz 以下。而基于 NPR 锁模原理的光纤激光器能够对激光产生

瞬间吸收的作用, 具有调制深度大、响应时间短、光谱宽、脉宽窄的优势, 相比于其他的锁模方式, NPR 锁模技术更适合作为宽光谱窄带宽的高重复频率光纤飞秒振荡器。

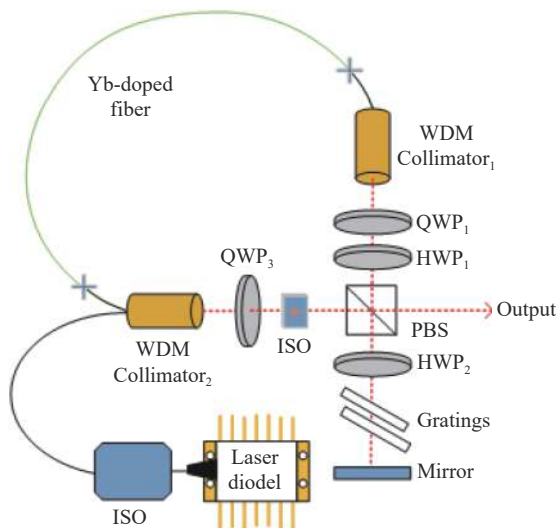
2009 年, Zhou 等利用 NPR 锁模技术并优化腔内色散补偿的基础上实现了中心波长 1570 nm, 最高重复频率 99.91 MHz, 光谱带宽为 25 nm 的掺铒光纤激光飞秒振荡器^[8]。2015 年, Liu 等利用 NPR 原理技术在低增益系数的掺铒光纤激光器中获得了中心波长 1550 nm, 重复频率 303 MHz、脉宽为 90 fs 的脉冲输出^[9]。2018 年, Liu 等通过非线性放大环形镜 (NALM), 实现脉宽 152 fs 的高功率脉冲输出, 重复频率为 72 MHz^[10]。中国科学院团队利用混合锁模的原理, 在掺铒光纤飞秒激光器中实现了重复频率为 97.6 MHz, 光谱半高宽为 21 nm, 且脉宽达到 168 fs 的脉冲输出^[11]。Sun 等利用谐波锁模方式实现了中心波长为 1936 nm、690 MHz 的皮秒脉冲输出^[12]。在该领域上, 日本 UEC 大学、莫斯科大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、湖南大学、华南理工大学等研究单位都为高重复频率光纤激光器的进步做出重大成果^[13-17]。另外, Cheng 等利用 SESAM 锁模原理, 在高浓度掺铒光纤中实现了中心波长 1058 nm, 重复频率近 5 GHz, 脉冲宽度 2.6 ps。这是当时 1 μm 附近锁模激光器中达到的最高基础重复频率^[18], 然而其脉冲输出宽度在皮秒量级。

由于传统的 NPR 系统是基于孤子锁模实现的, 因此其一般工作在 1550 nm 及附近波段。而在 1030 nm 波段的激光则由于光纤本身在 1030 nm 波段作为正色散介质, 因此工作在 1030 nm 的高重复频率孤子锁模激光器往往损耗很大。所以, 要实现 1030 nm 波段、100 MHz 以上, 并同时具有宽光谱、窄脉宽的激光振荡器往往需要 1 W 以上的泵浦功率支持耗散孤子在传输过程中的能量损失。针对上述问题, 本文提出了一种全新的“十字腔”结构, 利用光栅对将激光器的腔内色散调整至负色散区, 通过非线性偏振旋转锁模,

在“十字腔”掺镱光纤激光器中输出了基础重复频率为 163 MHz 的孤子锁模脉冲激光。上述激光只需要较低的泵浦功率, 便可稳定运行。在 400 mW 的泵浦功率下, 可实现脉冲宽度 786 fs、光谱宽度 30 nm、平均输出功率 200 mW 的激光输出。

1 实验装置

高重复频率“十字腔”掺镱光纤飞秒激光器通过旋转偏振波片的形式来实现锁模, 其光路结构如图 1 所示。其中, 激光二极管(LD)发射出 976 nm 的泵浦光通过波分复用准直器(WDM Collimator₂)反射到掺镱光纤中。掺镱光纤激发出椭圆偏振的 1030 nm 激光经过波分复用准直器(WDM Collimator₁)入射到 1/4 波片(QWP₁)。QWP₁ 将椭圆偏振的激光转化为线偏振光, 然后, 线偏振光经过 1/2 波片(HWP₁)调整偏振方向后, 再经过 PBS 分束为两束光, 其中竖直偏振成分(约占总能量的 5%)作为光纤激光器的输出; 而水平偏振(约占总能量的 95%)经过 1/2 波片(HWP₂)。HWP₂ 将激光的偏振再次转为水平方向后经过光栅对来获得负色散补偿, 通过改变光栅对的间距和角度可调节脉冲的波长与色散。



LD: 激光二极管; QWP: 1/4 波片; HWP: 1/2 波片; Mirror: 零度反射镜; WDM Collimator: 波分复用准直器; Gratings: 透射式光栅; PBS: 偏振分光片。

图 1 “十字”形腔光纤飞秒激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of "cross" cavity fiber femtosecond laser structure.

随后水平偏振的激光被平面镜反射, 回到 PBS 处, 再经 PBS 反射后通过隔离器 (ISO) 以及 QWP₂。通过调节 WDM Collimator₂ 的方向及角度将光耦合到掺镱光纤中, 最终形成闭合的“十字”型腔结构。

本文采用的泵浦源 LD 作为常见的商用光学器件, 其最大输出功率可达 750 mW, 通过非保偏单模光纤将泵浦能量抽运进“十字腔”内, 从而形成激光。掺镱光纤在 976 nm 处的吸收系数达到 2500 dB/m。波分复用准直器(WDM Collimator)自带无源尾纤, 其端口集成了滤光片可以将 976 nm 的泵浦光反射到谐振腔中, 同时可以对信号光起到准直作用。光纤准直头之间的自由空间光路主要由两个 1/4 波片、两个 1/2 波片、一个光学隔离器 ISO、一个偏振分光片 PBS、一对 1250 l/mm 的透射式光栅以及一个零度反射镜组成。其中, 1/4 波片和 1/2 波片是用来调节激光腔内激光的偏振方向, 以此在光纤中实现非线性旋转偏振锁模。采用半英寸(1 inch = 2.54 cm)的分束器(PBS)以控制激光脉冲运转方向。空间型隔离器(ISO)长度仅为 2 cm, 大大降低了激光器自由空间的长度。1030 nm 激光在单模光纤传输时受到正色散影响(23 fs²/mm)不断展宽。为启动孤子锁模, 腔内采用一对 1250 l/mm 的透射光栅对(Gratings), 使激光器工作在负色散状态。

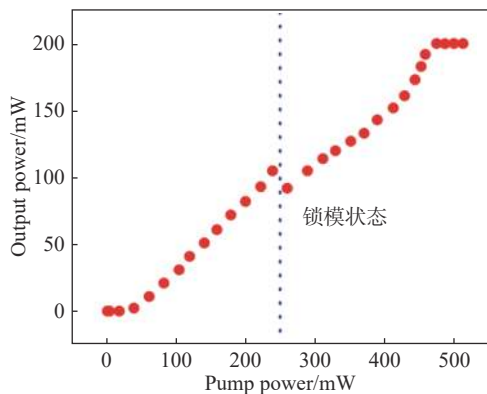
2 实验结果

激光脉冲在通过非保偏增益光纤时, 其椭圆偏振光可以分解为两个相互垂直的线偏振光分量, 不同分量的线偏振光受到自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)的作用下, 产生不同的非线性相移。而脉冲在时域中心部分(强度较高)比边缘部分(强度较低)产生更多的非线性相移。我们通过旋转波片光轴产生适当的损耗, 使得脉冲边缘部分的损耗远大于脉冲中心部分的损耗, 从而模拟一个类似快饱和和吸收体结构, 实现锁模。

由于激光脉冲在光纤传播过程中, 谐振腔内色散导致脉冲时域波形展宽, 而 SPM 和 XPM

等非线性效应导致脉冲时域波形压缩。当腔内负色散与非线性效应的相互作用达到平衡时, 脉冲光谱和时域宽度保持相对不变, 激光器实现孤子锁模。实验中引入一对 1250 lines/mm 光栅, 通过调节光栅对间距将腔内净色散保持在近零色散区间。脉冲被光栅压缩后受负色散影响保持着稳定的孤子传输; 同时在光纤正负色散共同作用下脉冲光谱发生展宽, 非线性积累释放, 此时激光器输出脉冲宽度最窄而光谱最宽。

在实验中, 我们将振荡器输出端连接到示波器 (RIGOL DS4032)、高分辨率频谱仪 (CXA Signal Analyzer 9 kHz~7.5 GHz) 及光谱仪 (Thorlabs, OSA202C) 上, 观察其输出波形及频谱变化。当泵浦功率处于 400~500 mW 时, 激光器每次开机均可以实现锁模的自启动运转。当泵浦功率处于 250~400 mW 时激光器每次开机都需要轻微调整腔内 HWP₁ 的旋转角度来启动锁模, 锁模完成后, 可以将 HWP₁ 旋转回原位保持激光器锁模运转。



(a) 163 MHz 光纤激光器输出功率与泵浦功率关系



(b) 163 MHz 时域脉冲序列

图 2 激光器输出功率曲线与时域脉冲序列图

Fig. 2 Output power of the laser versus pumping power and the time domain pulse train diagram

NPR 锁模需要非线性相移在 π 以上。由于非线性相移量与腔长成正比, 在腔长不变的情况下为了更加容易的实现 NPR 锁模, 需要更强的光场强度来提供足够的非线性相移^[19]。因此, 如图 2(a) 所示, 本实验中测试了激光器输出功率与泵浦功率之间的关系。当激光器处于 240 mW 以下时, 腔内非线性相移不足, 无法通过旋转波片调节偏振状态实现锁模, 此时光纤激光器仍然是连续光输出。当泵浦功率逐步提升到 250 mW 时, 激光器达到锁模阈值。此时示波器检测出现如图 2(b) 所示的时域序列间隔相等脉冲信号。由于快饱和和吸收锁模机制中脉冲时域上升及下降沿被吸收, 此时激光器输出功率从 110 mW 突然跳变到 89 mW。随着泵浦功率进一步提升, 输出功率也随之升高, 在此过程中激光器一直处于稳定锁模状态。当泵浦功率从 400 mW 增大到 500 mW 时, 激光器输出功率一直保持在 200 mW, 此时光纤激光器已经处于增益饱和状态。再增加泵浦功率不仅不能带来输出功率的提升, 而且容易出现调 Q 状态, 腔内的脉冲序列开始变得不稳定。腔内光信号的峰值功率达到一些光学器件的损伤阈值, 造成光学器件损坏。为了降低激光器内的热效应以及避免光学器件损坏, 将泵浦功率降低至 450 mW, 此时激光器可以保持长时间稳定锁模状态和稳定脉冲输出。

实验中, 我们将高速光电探测器连接到频谱仪, 测得激光输出的频谱如图 3(a) 所示, 锁模后激光器的重复频率为 163 MHz, 一阶频谱分量的信噪比为 30 dB, 其频率间隔稳定, 说明锁模状态良好。激光器锁模后的光谱图如图 3(b) 所示。其中心波长为 1020 nm, 光谱的半高全宽 FWHM (full width at half maximum, FWHM) 为 30 nm。使用自相关仪 (PulseCheck50 NIR, APE) 测得激光脉冲的自相关曲线半高宽为 1.1 ps, 通过高斯拟合可得实际脉冲宽度为 786 fs, 如图 3(c) 所示。

3 结 论

由于高重复频率孤子锁模激光器中光纤对 1030 nm 光为正色散介质, 导致激光器功率损耗过大, 无法同时实现宽光谱、窄脉宽。针对这一问题, 本文设计并搭建了“十字腔”型光纤激光

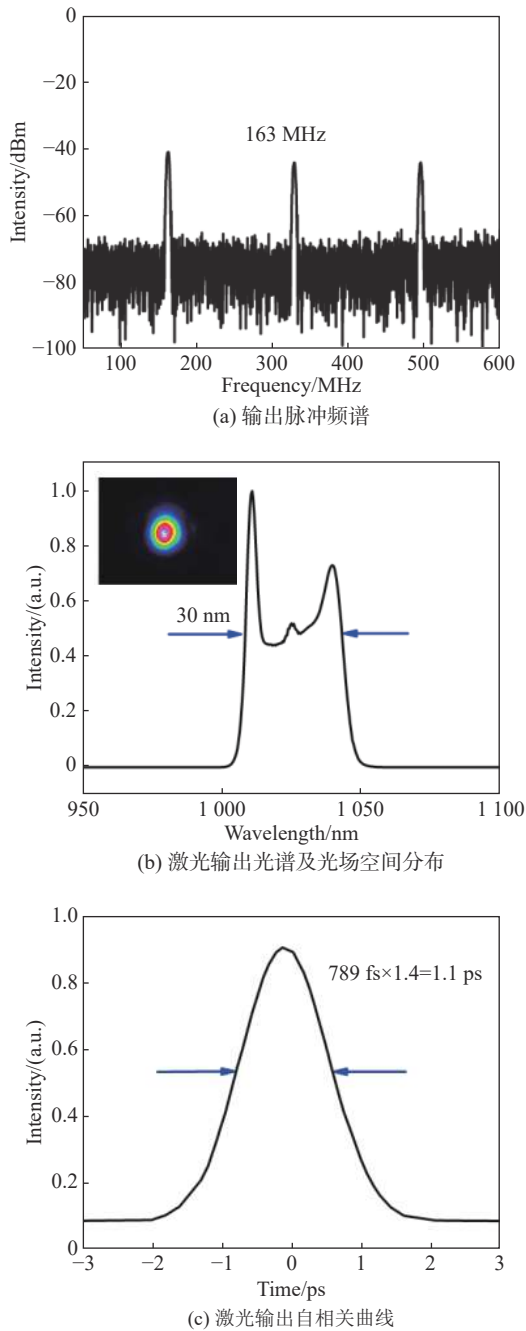


图3 重复频率为 163 MHz 脉冲输出指标

Fig. 3 The output pulse with the repetition rate of 163 MHz 振荡器, 利用光栅对将激光器腔内色散调至负色散区, 并通过 NPR 锁模原理实现孤子锁模。通过分析激光器输出功率与泵浦功率之间的关系, 当泵浦功率在 400~500 mW 之间时, 激光器处于最佳工作区间, 此时可以实现激光器自启动锁模。最终我们实现了重复频率为 163 MHz, 光谱宽度 30 nm, 脉宽为 786 fs 的高重复频率光纤激光器, 该激光器在泵浦功率 450 mW 下可以得

到最大 200 mW 的脉冲输出。由于高重复频率对应其相邻纵模之间频率间隔较小, 该激光器可以实现更加紧密的光学频率梳齿、更好的成像质量和更快的成像速度, 在精密光谱、天文探测、生物医学等领域有着非常广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] WASHBURN B R, SWANN W C, NEWBURY N R. Response dynamics of the frequency comb output from a femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10622 – 10633.
- [2] RUPPE J, CHEN S Y, ZHOU T, et al. Coherent pulse stacking extension of CPA to 9ns effectively-long stretched pulse duration[C]//Proceedings of 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose: IEEE, 2016: 1 – 2.
- [3] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84 – 88.
- [4] CAMPIONE S, LIU S, BASILIO L I, et al. Broken symmetry dielectric resonators for high quality factor Fano metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(12): 2362 – 2367.
- [5] ZHAO J Y, LIU W W, LI S C, et al. Clue to a thorough understanding of terahertz pulse generation by femtosecond laser filamentation[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 296 – 306.
- [6] RENO C. Laser diode pumped Nd³⁺: YAG laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(9): 838.
- [7] LI Y H, LOU C Y, WU J, et al. Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(9): 1250 – 1252.
- [8] 李力舟, 白晶, 张伟, 等. 高重复率全光纤被动锁模飞秒激光产生研究 [J]. *量子电子学报*, 2009, 26(4): 413 – 416.
- [9] 刘欢, 巩马理, 曹士英, 等. 303 MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器 [J]. *物理学报*, 2015, 64(11): 114210.
- [10] LIU W, SHI H S, CUI J H, et al. Single-polarization large-mode-area fiber laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2848 – 2851.

- [11] 王璐丁, 张颜艳, 饶冰洁, 等. 基于混合锁模的掺铒光纤飞秒激光器研究 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(1): 1 – 6.
- [12] SUN Y S, DUANMU Q D, WANG T S, et al. Actively mode-locked fiber laser at 2- μm for free-space data transmission with tunable repetition rate[J]. *Optik*, 2021, 236: 166427.
- [13] XU B, YASUI H, NAKAJIMA Y, et al. Fully stabilized 750-MHz Yb: fiber frequency comb[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11910 – 11918.
- [14] SMIRNOV A M, BUTOV O V. All-fiber heavily ytterbium-doped, passively mode-locked laser with the 456 MHz repetition rate[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5065 – 5068.
- [15] 张攀政, 范薇, 汪小超, 等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出 [J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302001.
- [16] 徐慧文, 杨华, 文双春, 等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2272 – 2276.
- [17] 谷庆元, 侯静, 程湘爱, 等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器 [J]. 中国激光, 2008, 35(5): 655 – 659.
- [18] CHENG H H, WANG W L, ZHOU Y, et al. 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27646 – 27651.
- [19] FERMAN M E, HARTL I. Ultrafast fiber laser technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 191 – 206.

(编辑: 钱紫衡)