

文章编号: 1005-5630(2023)01-0001-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.001.001

基于非线性偏振旋转锁模技术的光纤飞秒激光振荡器

陈嘉宁, 于涵, 司璐, 陈俊宇, 简韬, 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: 基于非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 锁模机制的光纤激光器因其结构紧凑、可靠性高而备受关注。基于这一锁模原理设计并搭建了掺镱光纤飞秒激光器。当双向泵浦功率为 380 mW, 在 1030 nm 波段获得了基频重复率为 22.8 MHz 的锁模脉冲。脉冲宽度为 224 fs, 平均功率 180 mW, 单脉冲能量 8 nJ, 10 dB 带宽约为 40 nm, 信噪比大于 50 dB。该激光器采用环形腔结构产生稳定的锁模飞秒脉冲输出, 可实现自启动锁模。泵浦功率增加到 1.6 W 可观察到最高三阶被动谐波锁模, 三次谐波对应 68.5 MHz 重复频率。该激光器由于在线宽、脉宽、脉冲能量上的优势, 在光谱测量、拉曼成像等领域具有应用意义。

关键词: 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 孤子; 超短激光脉冲
中图分类号: TN 248 **文献标志码:** A

Femtosecond fiber laser oscillator by nonlinear polarization rotation mode locking technique

CHEN Jianing, YU Han, SI Lu, CHEN Junyu, JIAN Tao, YUAN Shuai
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Nonlinear polarization rotation (NPR) mode-locked lasers have attracted numerous attention due to their compact structure and high reliability. Based on this mode locking principle, an ytterbium-doped fiber femtosecond laser was designed and built. When the bidirectional pumping power reached 380 mW, the laser was mode-locked with a fundamental frequency repetition rate of 22.8 MHz. The output pulse was centered at 1030 nm with 224 fs for the pulse duration, 180 mW for the average power, 8 nJ for pulse energy, and 40 nm for the bandwidth at 10 dB. The beam had a good quality with signal-to-noise ratio greater than 50 dB. The laser can realize self-start mode locking with a ring laser structure. Besides, the third order passive harmonic mode locking with 68.5 MHz for the repeat frequency was observed by increasing the pump power to 1.6 W.

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)

第一作者: 陈嘉宁(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高重复频率光纤激光器。
E-mail: 3226643331@qq.com

通信作者: 袁帅(1985—), 男, 副教授, 研究方向为光纤激光器、超快激光成丝。E-mail: ye_zoom@126.com

Due to the advantages of line width, pulse width and pulse energy, the laser has application significance in spectral measurement, Raman imaging and other fields.

Keywords: fiber laser; nonlinear polarization rotation; soliton; ultra-short laser pulse

引 言

光纤激光器由于具有受环境影响小, 可采用全光纤结构, 光束质量高, 效率高等优点, 被广泛应用于光通信、光传感、激光探测等领域。其中掺铒光纤与其他掺杂相比, 有着更高的量子转换效率、宽发射和吸收光谱、无激发态吸收等优点。因此, 掺铒光纤激光器广泛应用于光纤激光振荡器与放大系统^[1-3]。非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 锁模^[4-8]是一种在光纤激光器中产生被动锁模脉冲的技术。它是利用脉冲在光纤内的自相位调制和交叉相位调制, 使脉冲不同强度部分累计不同的非线性相移, 从而对椭圆偏振光两正交分量造成不同程度的偏振旋转。偏振相关隔离器与偏振控制器相结合, 构建一种等效的可饱和吸收体, 通过快饱和和吸收机制 (弛豫时间约为 10 fs) 不断窄化脉冲来获得超短脉冲。该锁模技术可实现高重复频率、宽光谱输出, 且损伤阈值高, 响应时间短, 可应用于光通信、生物医学、光谱探测、高重复频率种子源的搭建等方面^[9-10]。

1992 年, 英国的 Matsas 等^[11]首次将 NPR 技术运用到可自启动的锁模光纤环形激光腔内, 得到了稳定的纳秒量级孤子脉冲输出。2007 年, Tang 等^[12]利用 NPR 锁模的掺铒光纤激光器, 通过对腔内非线性的有效控制, 获得了 47 fs 的窄脉冲输出, 输出谱宽为 61.3 nm。2012 年, Peng 等^[13]搭建了全光纤结构的 NPR 锁模激光器, 输出 693 fs, 20 nm 带宽的自相似孤子脉冲。2019 年, Shang 等^[14]在全光纤环腔中实现了 174 mW 传统孤子输出, 重复频率为 21.65 MHz, 脉宽 1.257 ns。这是目前基于 NPR 锁模在全光纤下的最大平均功率。2022 年, 李晓辉等^[15]利用 NPR 锁模掺铒光纤激光器获得了 675 fs, 10 nm 带宽的锁模脉冲输出, 基频为 27.8 MHz, 增加泵浦功率可获得 139 MHz 的五次谐波锁模。

与上述 NPR 锁模光纤激光器相比, 本文利用光栅对进行腔内压缩, 输出 224 fs 超短脉冲; 采用铒离子作为掺杂, 在更高的能量转换效率下, 双向 380 mW 泵浦功率时, 输出 180 mW 平均功率、对应 8 nJ 单脉冲能量; 增加泵浦功率到 680 mW, 可实现最高 350 mW、对应 15 nJ 的单脉冲能量输出; 利用掺铒光纤为增益介质, 产生了 40 nm 的宽谱; 采用非全光纤结构, 拥有了更大的自由空间, 增加了腔长的灵活度, 可在此基础上灵活地减小腔长以增加重复频率。

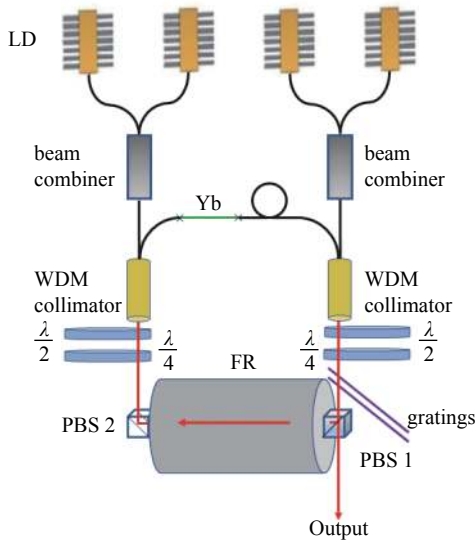
2010 年, 王播然等^[16]在腔内引入正色散光纤, 使单脉冲能量达到了 34.4 nJ。2012 年, 张大鹏等^[17]利用掺铒大模场面积光子晶体光纤实现了单脉冲能量高达 202 nJ 的激光输出。2017 年, Tan 等^[18]利用高非线性光纤, 在掺铒光纤激光器中获得可调谐、可切换多波长锁模, 重复频率高达 100 GHz。此外, 研究发现, 通过调节腔内偏振相关损耗能产生如孤子分子、耗散孤子等各类孤子的动力学现象^[19-22]。近年来 NPR 锁模光纤激光器的研究追求更窄脉宽、更高重复频率、更宽光谱和更高功率的目标。宽光谱以其较宽的光谱覆盖范围可以应用于成像学中。超短脉冲因为更短的持续时间, 应用于探测和通信中。高能量脉冲在获得更高重复频率的同时也降低了单脉冲能量, 可以应用于加工中。采用掺铒光纤作为增益介质, 光纤在 1030 nm 处产生正色散。上述大多数工作也是在正色散情况下实现的, 但产生的耗散孤子带有较大的正啁啾, 同时锁模损耗较大, 系统稳定性差。而负色散区的传统孤子时间带宽积较小, 几乎无啁啾, 同时也能得到高能量脉冲。因此, 需要在腔内加入色散补偿器对正色散进行补偿, 在 1030 nm 处实现传统孤子锁模。本文利用光栅对产生的负色散来补偿腔内光纤中的正色散, 最终在近乎零色散附近实现了稳定锁模。

本文搭建了 NPR 锁模掺铒光纤激光器, 实现了中心波长为 1030.3 nm、脉宽为 224 fs, 10 dB

光谱带宽为 40 nm, 重复频率为 22.8 MHz 的负色散孤子脉冲输出。随着泵浦功率增加, 得到了最高重复频率为 68.5 MHz 的三次谐波锁模脉冲输出。224 fs 的脉冲宽度与 40 nm 的光谱宽度表明, 上述激光器是一款优秀的光纤飞秒振荡器, 可用于拉曼光谱成像、光梳光谱灵敏检测。同时, 这款光纤飞秒振荡器负载对应的超短脉冲放大系统有望实现更高功率光纤飞秒光源。

1 结构与原理

该光纤激光器基于非线性偏振旋转原理搭建, 实验光路如图 1 所示。实验中, 利用 4 个波长为 976 nm 的半导体激光器 (laser diode, LD) 作为泵浦源。4 个 LD 通过光合束器两两耦合后, 采用双向泵浦方式, 通过波分复用准直器 (col-WDM) 注入腔内运转, 并在增益光纤中制造粒子数反转。耦合后每个泵浦模块输出最大功率为 0.9 W。光在耦合后需要通过一个光隔离器保护泵浦源。腔内的增益介质为一段 20 cm 长的掺镱光纤 (Liekki, Yb1200-4/125)。该光纤群的速度色散为 23 fs²/mm, 在 976 nm 处的吸收系数



$\lambda/4$: 四分之一波片; $\lambda/2$: 半波片; FR: 法拉第旋转器; PBS: 偏振分光棱镜; LD: 激光二极管; WDM collimator: 波分复用准直器; beam combiner: 合束器; Yb: 掺镱光纤; gratings: 光栅对

图 1 掺镱光纤飞秒激光器

Fig. 1 Ytterbium-doped femtosecond fiber laser

为 1200 dB/m, 其余光纤部分加入了 7 m 的标准单模光纤来提供足够大的非线性相移。如图 1 所示, 激光器两侧空间部分通过四分之一波片和半波片的组合调节腔内的偏振, 水平线偏光从偏振分光棱镜 (polarizing beam splitter, PBS) 直接输出, 竖直线偏光返回腔内形成回路。PBS1 和 PBS2 间放置一个法拉第旋转器提供额外的相位偏置, 使传输相反的两路水平线偏光旋转 45° 成正交。在腔内加入 1250 lines/mm 的透射式光栅对提供负色散, 补偿腔内器件和单模光纤带来的正色散, 使锁模激光器处于零色散值附近。激光腔总长为 8.5 m。经过计算, 腔内净色散约为 -600 fs²: 掺杂光纤和其他无源器件提供约 10400 fs² 正色散, 其中增益提供 4600 fs² 正色散, 830 fs²/m 的 7 m 单模光纤提供约 5800 fs² 的正色散。群延迟色散公式为

$$D_g(\lambda) = -\frac{\lambda^3 d}{\pi c^2 \Lambda_g^2} \left(1 - \left(\frac{\lambda}{\Lambda_g} - \sin \alpha \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: D_g 为光栅对提供的色散量; c 为真空中光速; d 为光栅对间距; α 为入射角角度; $\Lambda_g = 1 \mu\text{m}$ 为光栅周期, 当光栅对间隔为 1.5 mm 时, 算得光栅对提供了 -11 000 fs² 色散量。锁模稳定时, 激光器输出 22.8 MHz 近零负色散孤子脉冲。

实验中采用 300 MHz 带宽的数字示波器 (RIGOL, MSO2302A) 和 2 GHz 的光电探测器测量输出激光的脉冲序列, 用光谱分析仪 (Koyogawa, AQ6370C) 来观察输出脉冲的光谱特性, 用 7.5 GHz 的频谱仪 (Agilent, N9000A) 对锁模脉冲的射频进行探测, 用自相关仪测量输出脉冲的宽度。

2 结果与分析

实验中, 当单侧泵浦功率为 30 mW 时, 可观察到激光器开始输出连续光。在此基础上继续增加泵浦功率, 当两侧泵浦功率增加到 280 mW 时, 调节波片至合适的角度, 可得到重复频率为 22.8 MHz 的锁模脉冲输出。输出脉冲的光谱如图 2(a) 所示, 中心波长为 1030.3 nm, 该光谱的 10 dB 带宽为 40 nm。在线性光谱中心波长处

可看到有毛刺样小峰，这是由谐振腔内存在微弱孤子干涉造成的，可通过降低泵浦功率或在一定范围内调节波片与光路角度以减小干涉影响。脉冲持续时间由自相关仪测得，自相关轨迹如图 2(b)所示。采用高斯拟合得到 317 fs 的半高全宽，对应 224 fs 的实际脉冲持续时间。由于自相关仪灵敏度高，可看到在测得曲线旁伴有连续噪声。图 2(c)为输出激光的脉冲序列，可以

从时间尺度和强度看出激光腔内的孤子脉冲是均匀分布且脉冲强度基本相等，相邻脉冲的时间间隔为 44 ns，与 8.5 m 腔长对应的 22.8 MHz 锁模重复频率相匹配。同时，在脉冲序列中未看到其他拍频分量，表明该脉冲序列为传统孤子脉冲。该脉冲序列可以用狄拉克梳状函数来表示

$$\delta_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2)$$

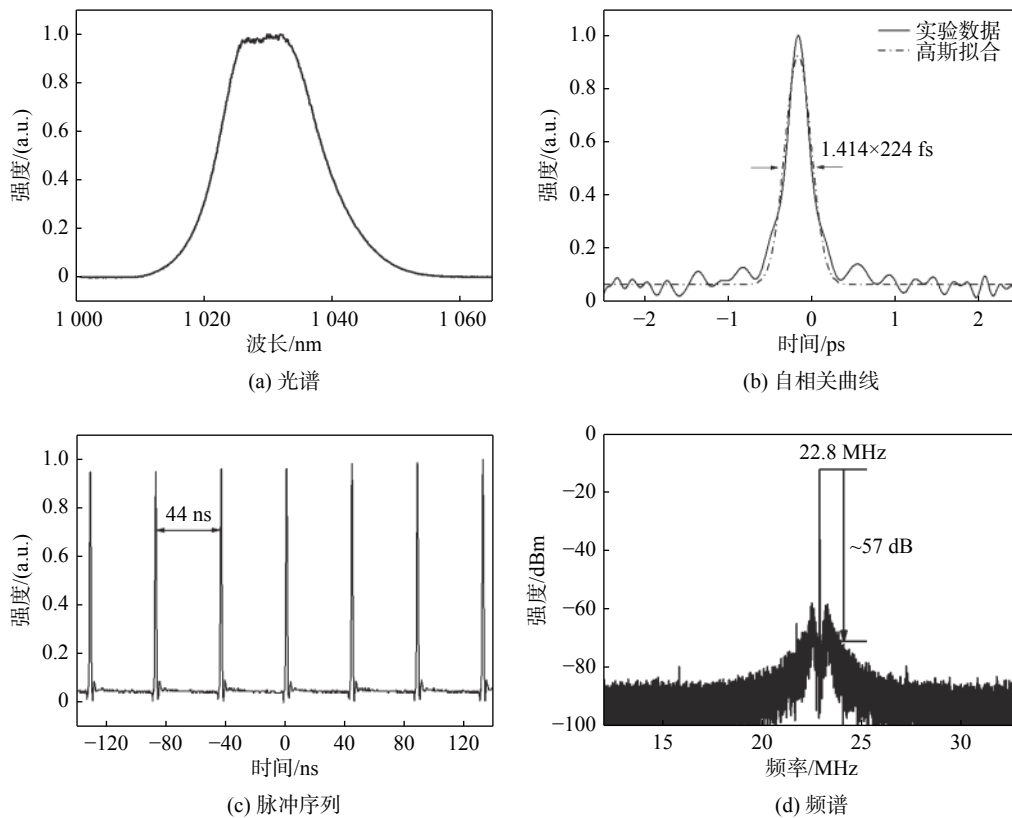


图 2 激光器输出特性

Fig. 2 Output characteristic of the laser

式中： δ 为狄拉克函数； t 为时间； n 为第 n 个脉冲； T_s 为周期，也就是脉冲序列上两脉冲的时间间隔，在此为 44 ns。

同一锁模状态下的射频谱见图 2(d)。频谱仪扫宽范围为 24 MHz，分辨带宽为 2.7 kHz，且激光输出信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)约为 57 dB。较高的 SNR 说明腔内传输的自发辐射很小，受激辐射占主导地位，脉冲质量很高。基频峰值位于 22.8 MHz。

在此锁模状态下，采用系统封装可提升激光器的稳定性。同时，可将增益光纤置于温度控制

器上，温度控制在室温，减小环境对激光器的影响。接入一个频率计数器(Tektronix, FCA3103)以监测频率稳定情况。检测结果如图 3 所示，频率在某一时刻会有下降，在图上显示为小的凹陷。这是由于测试中仍然存在机械振动、光纤抖动等因素，对腔的稳定性造成影响。将凹陷处图像放大，观察到波动处的频率为 Hz 量级(最大处约 23 Hz，如图 3 圆圈标记所示)。从整体上看，频率处于稳定的状态。

实验中增加泵浦功率，激光器仍能保持锁模状态。当双向泵浦总注入功率为 1.6 W 时，光谱

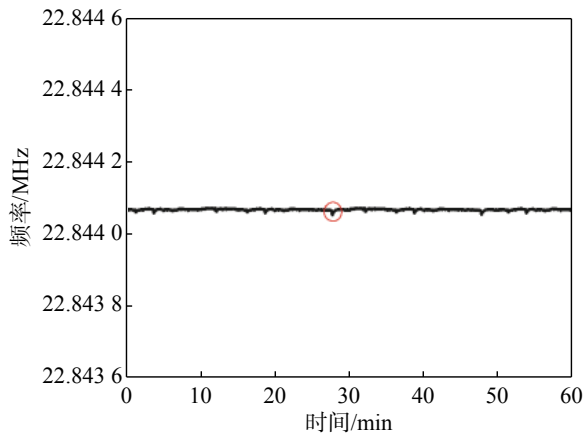
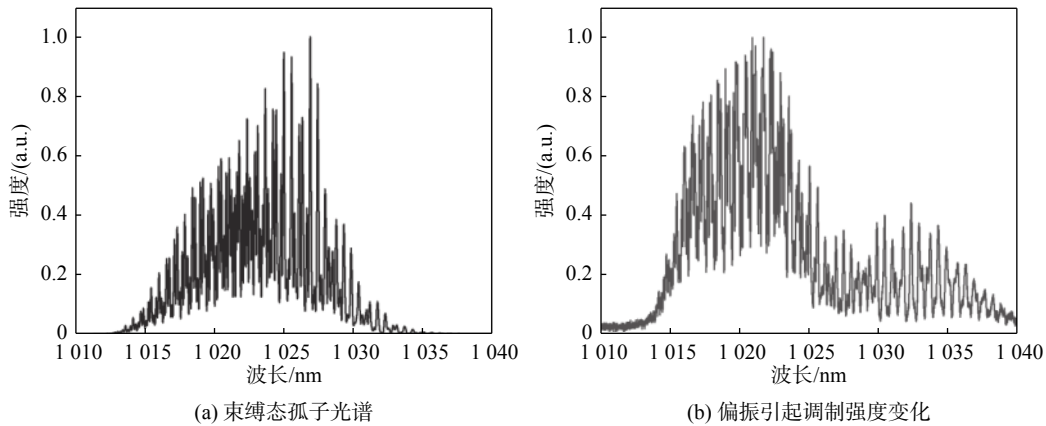


图 3 频率随时间变化图

Fig. 3 Frequency over time

上出现明显的毛刺及齿状的调制峰, 如图 4(a) 所示。毛刺特征的出现可能是由模式振荡和腔扰动引起的。通过观察数次扫描后的光谱图像, 看到调制峰出现的位置固定, 并不随时间变化, 调



(a) 束缚态光子光谱

(b) 偏振引起调制强度变化

图 4 高功率下的束缚态光谱及其调制强度变化

Fig. 4 The bound state spectrum and its modulation intensity change at high power

在此泵浦功率下, 旋转波片引起腔内偏振变化。在调整过程中, 能观察到的最大时间间隔为 14.9 ns, 对应重复频率为 68.5 MHz 的三次谐波锁模(如图 5 所示)。可以看到在高泵浦功率下出现了谐波锁模, 此时腔净色散为负, 在反常色散区的传统孤子由于能量较小, 在高泵浦功率下能够累积更多的非线性, 更容易形成多脉冲谐波锁模。同时, 振荡器的长腔降低了锁模的基频, 使孤子在较低的泵浦功率下实现高峰值功率输出, 相比短腔在相同的泵浦功率下得到更高的谐波阶数。因此, 在低重复频率的长腔内更容易出现高次谐波锁模现象^[26-27]。此外, 脉冲序列强度

制周期基本为 0.2 nm 且具有很高的调制深度。由此说明, 调制光谱的出现是由于腔内存在干涉。这是由于随着泵浦功率的增加, 腔内的高功率使孤子脉冲受到的非线性效应和腔内的负色散效应之间无法保持动态平衡, 容易引起孤子脉冲分裂。分裂的脉冲在腔内发生干涉, 转换到频域上显现出能量强弱分明的齿状谱线, 表现出典型的束缚态锁模光谱特征。而束缚态孤子的产生就是通过孤子和共振色散波相互作用后, 分裂而来的多个脉冲作为一个整体进行传输得到的^[23-25]。从图 4 中可以看到, 谱线调制峰的强度并不均匀, 同时单个调制峰上也出现了多个分裂, 说明腔内的调制并不稳定。转动波片可以看到调制光谱的强度变化, 这是因为转动波片改变了腔内偏振相关损耗, 通过调节功率耦合比使输出强度发生变化。如图 4(b) 所示, 转动波片后可以改变调制峰的强度。

并不相同, 存在着规律。这可以解释为谐波锁模形成过程中, 不同偏振和能量变化产生相应的色散和增益损耗以及恢复作用, 引发不同的脉冲长程相互作用, 使高次谐波展现出不同的表现形式。除实验中展现的幅值不均匀但存在规律外, 还存在等时间间隔且幅值均匀和在一个周期内有多个脉冲的团簇型谐波锁模等现象。在本研究中, 三次谐波锁模状态并不能够在长时间下保持稳定, 在外部震动影响下可能会跳变回基频锁模或二次谐波锁模, 在未来还需要对其进行稳定性研究。

谐波锁模的阶数越高, 脉冲的重复频率也就

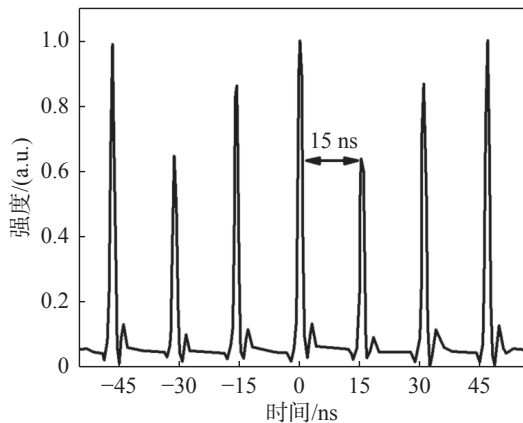


图 5 三次谐波锁模脉冲序列

Fig. 5 Third-harmonic mode-locked pulse sequence

越高。泵浦功率的增加改变了腔内的非线性相移，腔长的改变引起色散的变化，更大的非线性相移使脉冲展宽并分裂为多个脉冲。多个脉冲在色散和非线性相移共同作用下保持稳定且时间间隔较小，孤子在传播过程中发生相互作用，相互纠缠形成束缚态，最终形成时间间隔相同的被动谐波锁模。在时域上观察到脉冲序列的小间隔意味着频域上更大的频率产生，因此可以通过谐波锁模调制激光重复频率。在多波长锁模光纤激光器中，可以通过非线性作用的差异获得不同波长的锁模脉冲，调谐不同波长脉冲的频率分离度将其应用于光学异步采样等光学测量中。同时，可以借助本研究中谐波锁模获得的高重复频率，提高测量的分辨率和速度，将其应用于生物探测、光学相干等领域^[28]。

3 结 论

基于非线性偏振旋转技术，在非线形偏振旋转锁模掺铽光纤激光器中获得了中心波长位于 1030.3 nm，脉冲持续时间为 224 fs，重复频率为 22.8 MHz 的孤子脉冲输出；通过增加泵浦功率和改变偏振获得了最高重复频率为 68.5 MHz 的谐波锁模输出。该振荡器仍然存在一些不足：由于机械振动等原因，频率存在波动，导致谐波锁模不稳定，重复频率不够高。在后续工作中，可以继续利用 NPR 锁模技术，缩短腔长以获得高重复频率。按需将单模光纤换为保偏光纤，调整增益光纤长度获得更宽光谱、更加稳定和更高

频率的谐波锁模输出。利用压电陶瓷稳频，放弃金属支架，选择高度集成硅玻璃砖以减小机械干扰，使上述飞秒光纤振荡器更好地应用于拉曼光谱成像仪、光学频率梳、光学相干断层扫描系统等科研仪器设备。由于采用了 NPR 技术，该激光器能够稳定自启动锁模，输出的负色散孤子脉冲具有高能量、宽光谱、超短脉冲等优势。其宽光谱使探测物质的范围更广，飞秒量级的超短脉冲又提高了探测速度和分辨率。针对高能量应用，在此振荡器的基础上可接入非线性放大系统，实现更高功率飞秒输出。因此，这款 8 nJ，224 fs，40 nm 光纤飞秒激光振荡器能为生物探测、传感、激光通信等系统提供有效光源。

参考文献：

- [1] WANG Y S, KE W W, SUN Y H, et al. Research of high brightness 1018 nm ytterbium doped fiber laser[C]//Proceedings of SPIE 9255, XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014. Chengdu: SPIE, 2015: 92550K.
- [2] WANG J L, BU X B, WANG R, et al. All-normal-dispersion passive harmonic mode-locking 220 fs ytterbium fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5088 – 5091.
- [3] CHEN H, CHEN S P, JIANG Z F, et al. All fiber actively mode-locked ytterbium-doped laser with large range temporal tunability[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1786 – 1789.
- [4] 刘鹏, 王天枢, 张鹏, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铽锁模光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 18 – 22.
- [5] GAO C X, WANG Z Q, LUO H, et al. High energy all-fiber Tm-doped femtosecond soliton laser mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 2988 – 2993.
- [6] SZCZEPANEK J, KARDAŚ T M, RADZEWICZ C, et al. Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 575 – 578.
- [7] WU Z C, LIU D M, FU S N, et al. Scalar-vector soliton fiber laser mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18764 – 18771.
- [8] 陈恺, 祝连庆, 姚齐峰, 等. 基于石墨烯可饱和吸收的

- 锁模光纤激光器研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 291 – 295.
- [9] 夏汉定. 新型锁模光纤激光器及其动力学特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] WANG T S, MA W Z, JIA Q S, et al. Passively mode-locked fiber lasers based on nonlinearity at 2 μm band[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1102011.
- [11] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J, et al. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation[J]. Electronics Letters, 1992, 28(15): 1391 – 1393.
- [12] TANG D Y, ZHAO L M. Generation of 47-fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(1): 41 – 43.
- [13] PENG J S, ZHAN L, CHEN T Y, et al. All-fiber ultrashort similariton generation, amplification, and compression at telecommunication band[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(9): 2270 – 2274.
- [14] SHANG X X, GUO L G, GAO J J, et al. 170 mW-level mode-locked Er-doped fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation[J]. Applied Physics B, 2019, 125(10): 193.
- [15] 李晓辉, 杨昌兴, 赵阳, 等. 基于锁模技术的光纤脉冲激光研究 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 86 – 90.
- [16] 王擂然, 刘雪明, 宫永康. 基于高能量耗散型脉冲掺铒光纤激光器的实验研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6200 – 6204.
- [17] 张大鹏, 胡明列, 谢辰, 等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器 [J]. 物理学报, 2012, 61(4): 044206.
- [18] TAN X M, CHEN H J, CUI H, et al. Tunable and switchable dual-waveband ultrafast fiber laser with 100 GHz repetition-rate[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16291 – 16299.
- [19] WANG P, BAO C Y, FU B, et al. Generation of wavelength-tunable soliton molecules in a 2 μm ultrafast all-fiber laser based on nonlinear polarization evolution[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2254 – 2257.
- [20] LUO Z C, CAO W J, LIN Z B, et al. Pulse dynamics of dissipative soliton resonance with large duration-tuning range in a fiber ring laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4777 – 4779.
- [21] KOMAROV A, LEBLOND H, SANCHEZ F. Passive harmonic mode-locking in a fiber laser with nonlinear polarization rotation[J]. Optics Communications, 2006, 267(1): 162 – 169.
- [22] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers[J]. Physical Review A, 2008, 77(2): 023814.
- [23] ZENG Z, ZHANG Z Y, ZHANG L J, et al. Harmonically mode-locked optoelectronic oscillator with ultra-low supermode noise[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 151: 108036.
- [24] ZHAO Z H, JIN L, SET S Y, et al. 2.5 GHz harmonic mode locking from a femtosecond Yb-doped fiber laser with high fundamental repetition rate[J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3621 – 3624.
- [25] 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.
- [26] 贾东方, 谈斌, 王肇颖, 等. 谐波锁模掺铒光纤激光器的稳定性研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(3): 391 – 395.
- [27] 王光斗, 杨光, 刘艳格, 等. 掺铒光纤激光器中的孤子束和高阶谐波锁模 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801011.
- [28] 林宏奂, 隋展, 王建军, 等. 被动谐波锁模掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(11): 1813 – 1817.

(编辑: 李晓莉)