

# 双向运转混合锁模掺铒光纤激光器

黎尧 纪荣祎 石俊凯\* 张滋黎 董登峰 劳达宝 周维虎

中国科学院光电研究院光电工程部激光测量技术研究室, 北京 100094

**摘要** 构建了基于混合锁模机制的双向运转掺铒光纤激光器。激光器采用  $\sigma$  型腔, 腔内无隔离装置, 以反射式半导体可饱和吸收镜和非线性偏振旋转效应为混合锁模机制, 通过精细调节聚焦到半导体可饱和吸收镜上的激光光斑大小和腔内波片的角度, 实现了稳定的自启动双向锁模运转。激光器运转在孤子锁模状态, 腔内双向运转的 2 个脉冲分别由 2 个偏振分束器耦合输出。输出的 2 个脉冲序列重复频率相同, 为 60.72 MHz; 逆时针、顺时针方向输出功率分别为 23.7 mW 和 1.3 mW, 信噪比分别为 67.5 dB 和 66.5 dB。逆时针、顺时针方向输出功率相差较大, 这是由采用的锁模机制造成的。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 双向锁模运转; 混合锁模; 非线性偏振旋转

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1201002

## Bidirectional Hybrid Mode-Locking Erbium-Doped Fiber Laser

Li Yao Ji Rongyi Shi Junkai Zhang Zili Dong Dengfeng Lao Dabao Zhou Weihu

Laboratory of Laser Measurement Technology, Photoelectric Systems Engineering Department,

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** A bidirectional hybrid mode-locking erbium-doped fiber laser is constructed. The reflective semiconductor saturable absorber mirror and the nonlinear polarization rotation effect are employed as hybrid mode-locking mechanism in the  $\sigma$ -shaped cavity without isolation device. The stable self-starting bidirectional mode-locking operation is achieved by finely adjusting the laser spot size focused on the semiconductor saturable absorber mirror and the angle of intracavity wave plates. The laser operates in soliton mode-locking state, and the two counter circulating pulses are output by two polarization beam splitters, respectively. The repetition rates of two pulse trains are both 60.72 MHz. The output powers of counter clockwise light and clockwise light are 23.7 mW and 1.3 mW, and their signal to noise ratios are 67.5 dB and 66.5 dB, respectively. The difference between counter clockwise and clockwise output powers is large, which is caused by the mode-locking mechanism.

**Key words** lasers; fiber lasers; bidirectional mode-locking operation; hybrid mode-locking; nonlinear polarization rotation

**OCIS codes** 140.4050; 140.3510; 140.3500

## 1 引言

腔内相位干涉法<sup>[1-2]</sup>是目前灵敏度最高的相位探测技术, 广泛应用于探测磁场<sup>[3-4]</sup>、惯性运动<sup>[5-6]</sup>、非线性系数<sup>[7]</sup>和电光系数<sup>[8]</sup>等。超敏感相位测量的核心是腔内双向运转的 2 个光脉冲在腔外发生干涉<sup>[2,9]</sup>, 由此得到相位信息。因此需要双向运转的锁模激光器作为测量光源, 目前主要以双向锁模固体激光器作为光源进

收稿日期: 2016-08-17; 收到修改稿日期: 2016-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475162, 61377103, 61307095, 11404334)、国家重大科学仪器设备专项(2011YQ120022, 2014YQ090709)

作者简介: 黎尧(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事飞秒激光测距方面的研究。E-mail: hustliyao@qq.com

导师简介: 周维虎(1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事精密仪器与光电测量方面的研究。

E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: shijunkai@aoe.ac.cn

行腔内相位干涉测量的实验研究<sup>[3-8]</sup>,而光纤锁模激光器具有结构简单、环境稳定性高、可实现长腔运转等优点,更适合作为腔内相位干涉测量的光源<sup>[10-12]</sup>。

相对于染料锁模激光器和固体锁模激光器,光纤锁模激光器的研究起步较晚。直到低损耗增益光纤的出现<sup>[13]</sup>,光纤锁模激光器才逐渐发展起来,并在最近十几年取得了飞速发展<sup>[14-15]</sup>。2008年 Kieu 等<sup>[10]</sup>实现了双向被动锁模光纤环形激光器,采用环形腔结构,在腔内引入碳纳米管/高分子复合材料饱和吸收体,通过调节腔内偏振控制器,激光器实现了自启动双向锁模运转,重复频率为 15 MHz,顺时针(CW)、逆时针(CCW)方向的输出功率分别为 1.3 mW 和 1 mW。2010年 Braga 等<sup>[11]</sup>利用 2 个腔内振幅调制器,结合非线性偏振旋转(NPR)机制实现了双向锁模运转的掺铒光纤环形激光器,重复频率为 5.1 MHz,并实验研究了光纤锁模激光器腔内相位干涉的测量。2013年 Zeng 等<sup>[16]</sup>报道了基于单壁碳纳米管被动锁模的双向运转光纤激光器,实验结果表明腔结构不对称和光纤双折射效应会使腔内双向传输的 2 个脉冲序列具有不同的中心波长、脉冲宽度和重复频率。2014年 Zhao 等<sup>[17]</sup>采用单壁碳纳米管被动锁模机制,利用腔内增益谱的双峰结构,实现了双波长双向锁模运转的环形腔光纤激光器。

本文研究了新型双向运转混合锁模掺铒光纤激光器,采用反射式半导体可饱和吸收镜(SESAM)和腔内 NPR 效应作为锁模机制,实现了自启动双向锁模运转;以 2 个偏振分束器(PBS)分别作为腔内双向运转的 2 个脉冲的耦合输出元件,输出的 2 个脉冲的重复频率为 60.72 MHz,CCW、CW 方向的输出功率分别为 23.7 mW 和 1.3 mW。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源采用单模激光二极管(LD),中心波长为 976 nm,最大输出功率为 400 mW。抽运光通过波分复用器(WDM1)耦合进掺铒光纤(EDF),经过增益光纤吸收后,残余抽运光(RP)由 WDM2 导出腔外。增益光纤采用 Nufern 公司生产的 SM-ESF-7/125 型号光纤,长度为 1 m;腔内光纤器件的尾纤为 Corning 公司生产的 EMF-28E 型号光纤。实验中采用的 SESAM(Batop,德国)吸收率为 37%,调制深度为 22%,弛豫时间为 2 ps。

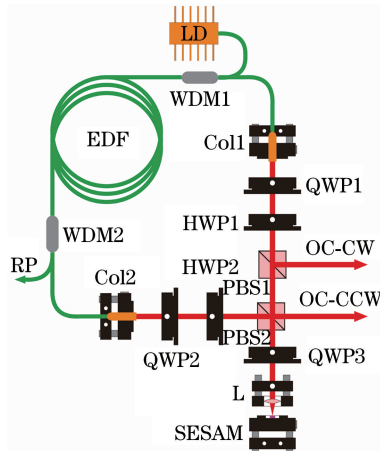


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

激光器采用  $\sigma$  型腔,腔内 CW 方向运转的激光经准直器(Col1)准直后耦合出光纤,先通过 1/4 波片(QWP1)将偏振态转换为线偏光,再由半波片(HWP1)调节偏振方向。到达 PBS1 时,激光的竖直偏振分量由 PBS1 反射出腔外,作为 CW 方向耦合输出(OC-CW);水平偏振分量依次通过 PBS1、PBS2 后,由透镜 L 聚焦到 SESAM 上。由于 2 次经过 QWP3,SESAM 反射的激光到达 PBS2 时为竖直偏振。由 PBS2 反射后,线偏光通过 HWP2 调节偏振方向,再通过 QWP2 转换为圆偏光,最后由准直器(Col2)耦合进光纤光路。

CCW 方向运转的激光由准直器(Col2)准直后,通过 QWP2 转换为线偏光,再通过 HWP2 调节偏振方向。到达 PBS2 时,激光的水平偏振分量通过 PBS2 作为 CCW 方向耦合输出(OC-CCW);竖直偏振分量被

PBS2 反射后,由透镜聚焦到 SESAM 上。由于 2 次经过 QWP3,SESAM 反射的激光到达 PBS2 时为水平偏振。线偏光依次经过 PBS2、PBS1 后,通过 HWP1 调节偏振方向,再通过 QWP1 转换为圆偏光,最后由准直器(Col1)耦合进光纤光路。

实验中采用功率计(Thorlabs,PM100D)测量激光功率,由光谱仪(YOKOGAWA,AQ6370D)记录光谱;脉冲宽度由 APE 公司的自相关仪(Pulse Check)测得;锁模脉冲序列、稳定性和重复频率由光电二极管(Newport,1801-FS)、数字示波器(KEYSIGHT,DSO9254A)、频谱分析仪(KEYSIGHT,N9010A)和频率计数器(KEYSIGHT,53230A)的组合进行监测。

### 3 实验结果及分析

腔内双向运转的 2 束激光受到 SESAM 和 NPR 效应的共同调制,通过优化聚焦到 SESAM 上的激光光斑大小和波片角度,激光器实现了自启动双向锁模运转。实验结果如图 2~5 所示。

图 2 为激光器双向锁模运转时 CCW、CW 方向的输出功率随抽运功率的变化。激光器锁模阈值约为 70 mW。当抽运功率低于锁模阈值时,激光器工作在连续运转状态;增加抽运功率至 70 mW,激光器进入双向锁模运转状态,CCW、CW 方向输出功率分别为 3.3 mW 和 0.2 mW;继续增加抽运功率,2 个方向的输出功率均随之线性上升;当抽运功率增加到 300 mW 时,CCW、CW 方向输出功率分别为 23.7 mW 和 1.3 mW。为保护腔内光纤器件,未继续增加抽运功率。此时 CCW 方向输出脉冲的自相关曲线如图 3 所示,其光谱的半峰全宽(FWHM)为 835 fs,形状与双曲正割曲线相符合,对应脉冲的 FWHM 为 542 fs。由于 CW 方向输出功率较低,自相关仪无法测到该方向的输出脉冲信号。

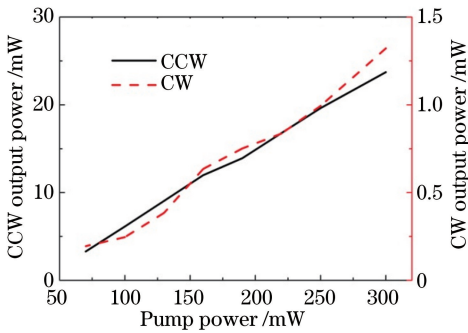


图 2 激光器输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Output power as a function of pump power

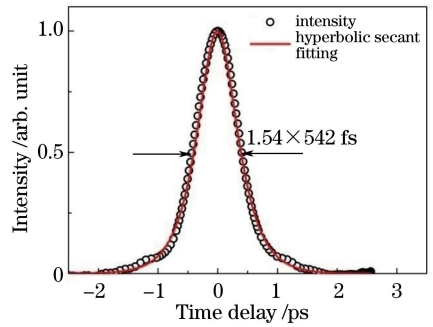


图 3 CCW 方向输出最高功率时的自相关曲线  
Fig. 3 Counter clockwise autocorrelation trace of the maximum output power

图 4 为不同抽运功率下激光器 CCW、CW 方向输出的光谱。可以看到,CCW 和 CW 方向输出的光谱都带有成对出现的 Kelly 边带<sup>[18]</sup>,这是锁模激光器周期性输出对孤子的调制作用引起的,是孤子锁模输出的典型特征。结合脉冲的双曲正割形状,可以判断出激光器运转在孤子锁模状态。CCW、CW 方向输出的中心波长分别为 1562.6 nm 和 1564.5 nm,光谱的 FWHM 分别为 14.6 nm 和 21.9 nm。随着抽运功率的变化,

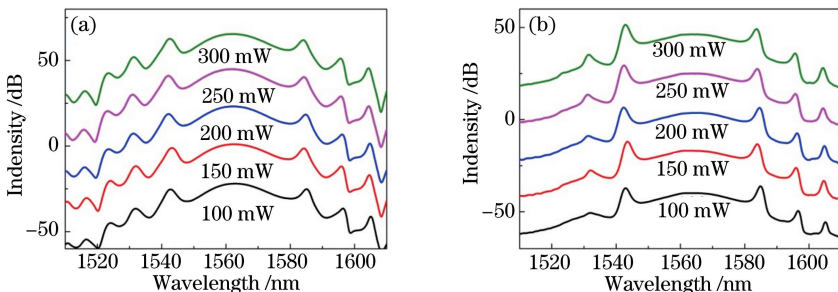


图 4 不同抽运功率下(a)逆时针和(b)顺时针方向输出的光谱

Fig. 4 (a) Counter clockwise and (b) clockwise output spectra at different pump powers

2 个方向输出的光谱基本不变。图 5 为激光器 CCW、CW 方向输出的脉冲序列和一次谐波射频谱。2 个脉冲的重复频率基本相同,为 60.72 MHz,对应脉冲间隔 16.47 ns。频率计数器的监测结果显示 2 个脉冲的重复频率差在毫赫兹量级。激光器 CCW、CW 方向输出的 2 个脉冲的信噪比分别为 67.5 dB 和 66.5 dB,基本一致。

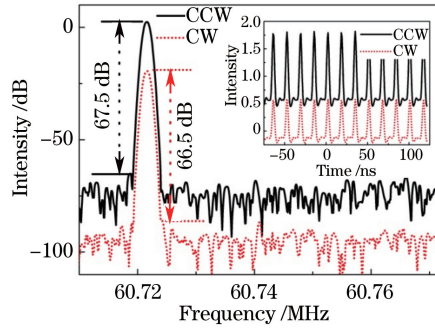


图 5 最高输出功率下 CCW、CW 方向输出的脉冲序列(插图)和一次谐波射频谱

Fig. 5 Pulse trains (insert) and first harmonic radio frequency spectra of CCW and CW output at maximum output power

激光器 2 个方向的输出功率相差较大,这是由 NPR 锁模机制造成的<sup>[19]</sup>。激光腔结构的不对称导致 2 个方向积累的非线性相移不同。在 NPR 锁模激光器中非线性相移越大,锁模阈值越低。本实验中,CCW 方向锁模阈值更低,随着抽运功率的提升,CCW 方向在 NPR 和 SESAM 的共同作用下率先实现锁模运转,腔内能量集中在该方向的脉冲上;同时,腔内波片方向的设置也更符合 CCW 方向锁模运转对偏振控制的要求。因此,CW 方向微弱的自发辐射荧光无法积累足够的非线性相移来启动 NPR 锁模机制,只能依靠 SESAM 的饱和吸收作用启动锁模运转。实验结果表明激光器 2 个方向输出的脉冲序列重复频率基本相同,可以推断腔内双向运转的 2 个脉冲最有可能在 SESAM 处相遇<sup>[10]</sup>。当 CCW 方向运转的脉冲到达 SESAM 处时,较强的脉冲能量将 SASAM 漂白,此时 CW 方向运转的微弱激光可以在 SESAM 处获得较高的反射率,实现较大的调制深度以启动锁模运转。

## 4 结 论

构建了新型双向运转混合锁模掺铒光纤激光器。结合腔内的 SESAM 和 NPR 效应,实现了自启动双向锁模运转。以 2 个 PBS 分别作为 CCW、CW 方向的耦合输出元件,实现了重复频率为 60.72 MHz 的 2 个脉冲序列输出,CCW、CW 方向输出功率分别为 23.7 mW 和 1.3 mW,信噪比分别为 67.5 dB 和 66.5 dB。该激光器可以作为腔内相位干涉测量的理想光源。

## 参 考 文 献

- 1 Arissian L, Diels J C. Investigation of carrier to envelope phase and repetition rate: Fingerprints of mode-locked laser cavities[J]. Journal of Physics B: Atomic Molecular & Optical Physics, 2009, 42(18): 183001-183025.
- 2 Arissian L, Diels J C. Intracavity phase interferometry: Frequency combs sensor inside a laser cavity[J]. Laser & Photonics Review, 2014, 8(6): 799-826.
- 3 Diddams S, Diels J C, Atherton B. Differential intracavity phase spectroscopy and its application to a three-level system in samarium[J]. Physical Review A, 1998, 58(3): 2252-2263.
- 4 Schmitt-Sody A, Velten A, Masuda K, et al. Intracavity mode locked laser magnetometer[J]. Optics Communications, 2010, 283(17): 3339-3341.
- 5 Dennis M L, Diels J C M, Lai M. Femtosecond ring dye laser: A potential new laser gyro[J]. Optics Letters, 1991, 16(7): 529-531.
- 6 Liu Y, Sun L, Qiu H, et al. Bidirectional operation and gyroscopic properties of passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(3): 187-190.
- 7 Meng X, Diels J C, Kuehlke D, et al. Ultra-short pulse OPO ring laser[C]. Conference of Lasers & Electro-Optics, 2000: 122.

- 8 Bohn M J, Diels J C, Jain R K. Measuring intracavity phase changes using double pulses in a linear cavity[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(9): 642-644.
- 9 de Pinho e Braga, Alexandre Bittencourt. Bidirectional mode-locked fiber ring laser[D]. Albuquerque: The University of New Mexico, 2010: 1-2.
- 10 Kieu K, Mansuripur M. All-fiber bidirectional passively mode-locked ring laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 64-66.
- 11 Braga A, Diels J C, Jain R, *et al.* Bidirectional mode-locked fiber ring laser using passively controlled threshold gating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2648-2650.
- 12 Krylov A, Chernykh D. Gyroscopic effect in the bidirectional femtosecond erbium-doped fiber ring laser [C]. 16<sup>th</sup> International Conference Laser Optics, 2014.
- 13 Poole S B, Payne D N, Mears R J, *et al.* Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(7): 870-876.
- 14 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.* Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.  
柴 路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 15 Fermann M E, Hart I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- 16 Zeng C, Liu X M, Yun L. Bidirectional fiber soliton laser mode-locked by single-wall carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18937-18942.
- 17 Zhao X, Zheng Z, Liu Y, *et al.* Dual-wavelength, bidirectional single-wall carbon nanotube mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1722-1725.
- 18 Kelly S M J. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(8): 806-807.
- 19 Li D J, Shen D Y, Li L, *et al.* Unidirectional dissipative soliton operation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser without an isolator[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(26): 7912-7916.