

# 全正色散非线性放大环形镜保偏掺镱光纤激光器

赵翔, 刘洋, 周廉, 欧阳诚, 谢戈辉, 罗大平, 朱志伟, 顾澄琳, 李文雪\*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 基于非线性放大环形镜,设计了一种全正色散掺镱光纤锁模激光器。在抽运功率为 80 mW 的情况下,该掺镱光纤锁模激光器可以实现平均功率为 7.8 mW 的稳定输出。输出激光脉冲的重复频率为 9.9 MHz,中心波长为 1064 nm,脉冲宽度约为 18 ps,相应的光谱宽度为 0.18 nm。该激光器具有结构简单、自启动、稳定性高的优点。

**关键词** 激光器; 锁模激光器; 光纤激光; 掺镱激光; 非线性光纤光学

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508025

## All-Normal-Dispersion Polarization-Maintaining Yb-Doped Fiber Laser Based on Nonlinear Amplifying Loop Mirror

Zhao Xiang, Liu Yang, Zhou Lian, Ouyang Cheng, Xie Gehui, Luo Daping,  
Zhu Zhiwei, Gu Chenglin, Li Wenxue\*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** This study presents the design of a normal-dispersion polarization-maintaining Yb-doped fiber laser based on nonlinear amplification loop mirror. Stable output of a picosecond pulse train with an average power of 7.8 mW is realized from the Yb-doped mode-locked laser at a pump power of 80 mW. The output pulse train has a repetition rate of 9.9 MHz, a central wavelength of 1064 nm, a pulse duration of  $\sim 18$  ps, and the corresponding spectral width of 0.18 nm. The designed laser has the advantages of a simple structure, self-starting operation, and high stability.

**Key words** lasers; mode-locked laser; fiber laser; Yb-doped laser; nonlinear fiber optics

**OCIS codes** 140.4050; 140.3510; 140.3615; 140.4050; 190.4370

## 1 引言

近年来,由于光纤锁模激光器同时具备光束质量好、转换效率高、易集成、质量体积小以及稳定性好等多种优点,其在工业生产、生物医学诊断、物质形貌测量以及物质结构分析等诸多领域受到越来越多的关注。特别地,随着对光纤锁模动力学的深入研究,高功率、窄脉冲宽度的光纤锁模激光器更是成为科学研究和工业生产等领域的重要工具之一<sup>[1-2]</sup>。超快锁模光纤激光器通常采用被动锁模方式,主要包括可饱和吸收体锁模<sup>[3-5]</sup>、非线性偏振演化锁模<sup>[6]</sup>和非线性环形镜或非线性放大环形镜锁模<sup>[7-10]</sup>。可饱和吸收体锁模是一种采用实体的可饱

和吸收体,利用其可饱和吸收效应窄化脉冲,实现超短脉冲产生的锁模技术。但是可饱和吸收体的损伤阈值较低,普遍问题是输出功率较低、易损坏,难以获得高峰值功率的超短脉冲<sup>[11-12]</sup>。非线性偏振演化和非线性环形镜是利用光纤本身的非线性效应获得超短脉冲的被动锁模技术。其中,非线性偏振演化锁模激光器需要利用非保偏光纤的非线性偏振旋转效应实现,虽然结构简单,损伤阈值高,但是受单模光纤偏振特性对环境敏感的限制,在外界温度波动和振动的影响下,振荡器内脉冲的偏振态易受到扰动,影响激光器的锁模状态,抗环境干扰能力较差<sup>[13]</sup>;非线性环形镜锁模是利用基于非线性干涉原理的叠加脉冲实现锁模<sup>[14]</sup>,无需保持偏振态和较高

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11874153,11804096)、中国博士后科学基金面上资助(2017M621405)

\* E-mail: wxli@phy.ecnu.cn

的抽运功率,可以采用全保偏光纤结构,具有结构紧凑、集成化程度高、抗干扰性强等优点,可作为光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)、高分辨成像、激光雷达<sup>[15-17]</sup>等激光系统可选择的种子源之一。基于非线性放大环形镜原理,本文组建了一种全正色散掺镱光纤锁模激光器。激光谐振腔采用“9”字型全保偏光纤结构,同时腔内插入透射式法拉第相位延迟器,降低了脉冲锁模阈值,实现了自启动功能。在80 mW的976 nm半导体激光器抽运下,该掺镱光纤锁模激光器可以实现平均功率达7.8 mW的稳定输出,输出激光脉冲的重复频率为9.9 MHz,中心波长为1064 nm,脉冲宽度约为18 ps,相应的光谱宽度为0.18 nm。

## 2 实验原理及装置

基于 Sagnac 环原理<sup>[18]</sup>的“9”字腔非线性环形镜示意图如图 1 所示。入射光( $E_1$ )进入5:5分束器后被分为两束传播方向相反、强度相近的光( $E_3$ 和 $E_4$ ),两路光在环内经过相等的路程,在分束器输出端发生干涉。在输出端无入射光强( $E_2$ )的情况下,通常把输入端的输出光强与输入光强( $E_1$ )之比定义为反射率 $R$ <sup>[19-20]</sup>:

$$R = 2\eta(1 - \eta)\{1 + \cos[(1 - 2\eta)(\phi + \Delta\phi)]\}, \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_2 IL}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为分束器的分束比; $\phi$ 为引入的相移; $\Delta\phi$ 为两束光返回分束器时的非线性效应造成的相移差; $I$ 为入射光在某传播方向上的峰值功率; $L$ 为环路长度; $n_2$ 为光纤的非线性折射率; $A_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯的有效截面面积。

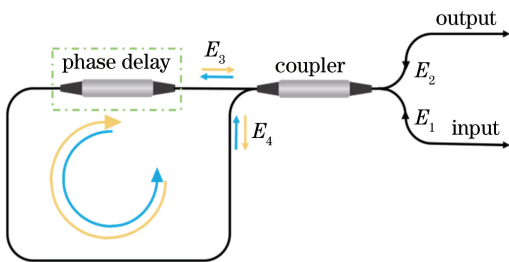


图 1 非线性环形镜原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of nonlinear loop mirror

非线性放大环形镜相当于一个快饱和吸收体<sup>[20]</sup>。由(2)式可知,非线性相移差 $\Delta\phi$ 是一个与光强有关的量,如果脉冲的强度接近反射率的最大值,脉冲的前后沿会更多地被透射,而脉冲的尖峰部

分更多地被反射回输入端,从而有窄化脉冲的效果,有利于非线性环形镜结构的激光器腔内脉冲振荡和锁模的启动,因此需要考虑所搭建的激光器结构中环形镜的反射率。由于分束器不可能分出两路光强完全相等的光,当分束器分出的两路光的光强不完全相等时,沿一个方向传播的光会比沿相反方向传播的光经历更大的非线性相移,这些非线性相移是由自相位调制<sup>[21-22]</sup>和交叉相位调制<sup>[23]</sup>产生的,造成两路光在返回分束器时积累了非线性相移差。利用(1)式进行数值模拟,得到图 2。图 2(a)是对不同分光比 $\eta$ 下的反射率 $R$ 进行数值模拟的结果,可以看出,分束器的分束比越接近5:5,非线性光纤环形镜的反射率调制深度越大。同时,要达到反射率最大值,所需要的非线性相移差 $\Delta\phi$ 也越大。在输入脉冲光强度和调制深度一定的情况下,在非线性环中不对称地放置一段增益光纤,沿两个方向传播且功率相等的两路输入光经放大后积累的非线性相移差更大,一定程度上降低了锁模阈值,这就是非线性放大环形镜。但是仅仅依靠光纤自身的非线性效应来积累非线性相移并实现稳定锁模(至少积累一个反射率周期对应的非线性相移量),需要很高的抽运功率以增加脉冲峰值功率。由图 2(b)的仿真结果可以看出,如果在非线性放大环形镜中能够人为地引入合适的相移(本实验引入的相移为 $-\pi/2$ ),可以使反射率曲线和反射率最大值点整体右移,这样反射率在引入的线性相移量的范围内就随非线性相移差增大,只需要光纤的非线性效应造成的非线性相移差达到相移器引入的线性相移量就能够获得最大反射率,从而降低锁模阈值。

根据数值模拟的结果,搭建了基于非线性放大环形镜的带有相移器的激光器系统,如图 3 所示,其中 SMF 为单模 980 nm 保偏光纤(PM980),WDM 为波分复用器,LD 为半导体激光二极管,YDF 为单包层保偏掺镱光纤,FBG 为光纤布拉格光栅。分束器的分束比为 5:5;增益介质为 0.4 m 长的 YDF(YB401-PM),纤芯在 915 nm 处的吸收系数为 140 dB/m,在 976 nm 处的吸收系数为 420 dB/m;非线性环形镜中加入的相移器采用透射式法拉第相位延迟器(提供 $\pi/2$ 的相位延迟);通过 WDM 将中心波长为 976 nm、最大功率为 200 mW 的单模 LD 的光耦合进非线性环形镜;FBG 的中心波长为 1064 nm,带宽为 0.2 nm<sup>[24]</sup>。该激光系统中所用光纤器件均为保偏光纤器件,并且所有光纤和光纤元件均为正色散。

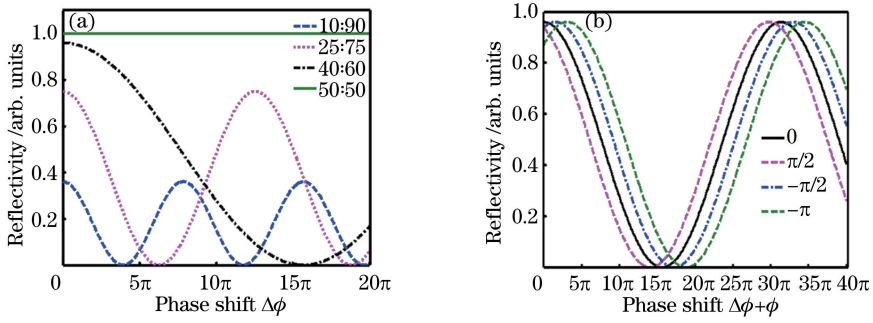


图 2 反射率随相移变化的仿真结果。(a)分束器不同分束比下反射率随相移差的变化；  
(b)腔中加入的不同线性相移与反射率的关系

Fig. 2 Simulation results of reflectivity versus phase shift. (a) Reflectivity versus phase shift for couplers with different splitting ratios; (b) relationship between reflectivity and different linear phase shifts added to cavity

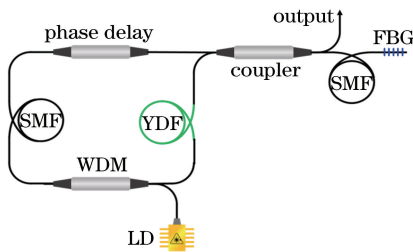


图 3 激光器系统结构图

Fig. 3 Structural diagram of laser system

### 3 实验结果与分析

在实验中,首先确定了激光器能够稳定在锁模状态的抽运区间。当 LD 的抽运功率由 0 慢慢增加至 60 mW 时,激光器开始出现不稳定的调 Q 锁模

现象;逐渐增加抽运功率至 200 mW 时,激光器产生多脉冲,此现象是由于抽运功率过高;降低抽运功率至 80 mW 时,形成稳定的单脉冲锁模现象,完成激光器锁模的自启动过程。随后观察到在 63 ~ 123 mW 的抽运功率范围内,激光器可保持锁模状态。由功率计测得如图 4(a)所示的结果,可以看出激光器锁模脉冲的最低抽运阈值为 63 mW;当 LD 抽运功率为 80 mW 时,输出端的输出激光功率为 7.8 mW。图 4(b)是基础重复频率频谱,其中 RBW 为分辨率带宽,频率中心为 9.9 MHz。使用光谱仪 (AQ6370, YOKOGAWA, 日本) 测量的光谱宽度  $\Delta\lambda$  为 0.18 nm,如图 4(c)所示。图 4(d)为通过自主搭建的自相关仪测得的脉冲自相关强度图,并对其

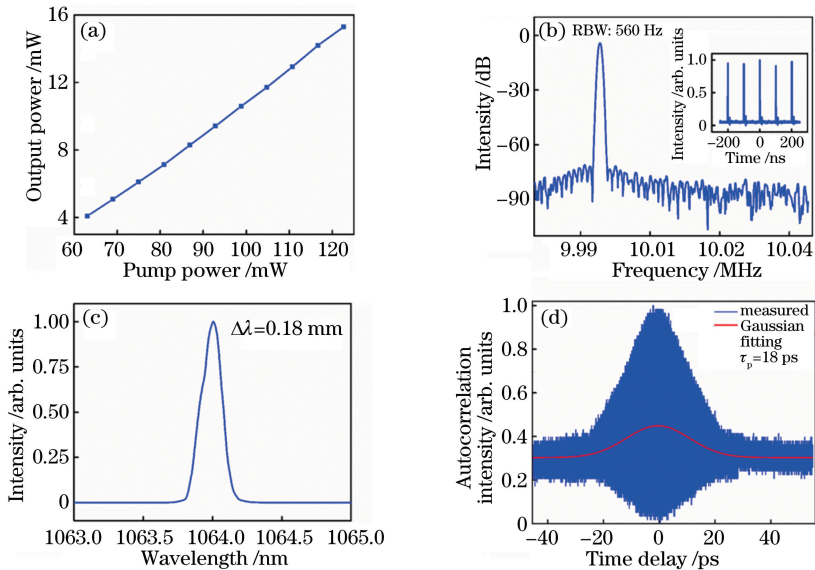


图 4 主要实验结果。(a)激光输出功率随抽运功率的变化曲线;(b)激光脉冲的频谱图,插图为脉冲波形图;  
(c)光谱图;(d)输出脉冲的自相关曲线

Fig. 4 Main experimental results. (a) Laser output power versus pump power; (b) spectrogram of laser pulse and pulse waveform shown in inset; (c) laser spectrum; (d) autocorrelation curve of output pulse

进行高斯拟合得到脉冲自相关曲线,计算得到激光脉冲宽度  $\tau_p$  为 18 ps,对应的时带积为 0.8。

由相噪分析仪测得激光器的相位噪声和相位噪声积分以及相对强度噪声和相对强度噪声积分,如图 5 所示。可以看出,在 10~100 Hz 处,相位噪声和相对强度噪声起伏较大,这主要是受激光器的白噪声和散粒噪声的影响;在 1~100 kHz 范围,技术噪声占主要部分,由激光器本身的色散和非线性产生,还有一部分环境噪声耦合在其中;在 1 kHz~1 MHz 范围积分后的相位噪声在 0.076 mrad 附近,相对强度噪声为 0.012%;大于 1 MHz 范围内相位噪声趋于平滑,这一部分的噪声幅度主要受探测器散粒噪声极限的限制,相位噪声的起伏大多是由相对强度噪声耦合而来<sup>[25]</sup>。

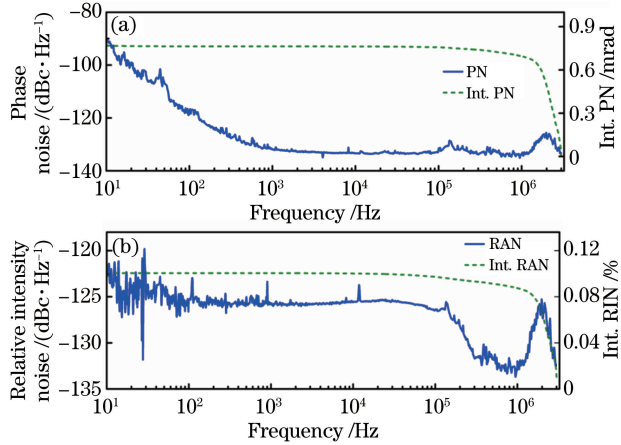


图 5 噪声随频率的变化。(a)相位噪声及相位噪声积分(Int. PN);(b)相对强度噪声及相对强度噪声积分(Int. RIN)

Fig. 5 Noise versus frequency. (a) Phase noise and integrated phase noise (Int. PN); (b) relative intensity noise and integrated relative intensity noise (Int. RIN)

## 4 结 论

基于非线性放大环形镜原理,构建了全正色散掺镱光纤锁模激光器。激光谐振腔采用“9”字型全保偏光纤结构,同时腔内插入透射式法拉第相位延迟器,降低了脉冲锁模阈值,实现了激光脉冲自启动锁模。在 80 mW 的 976 nm 半导体激光器抽运下,该掺镱光纤锁模激光器可以实现平均功率 7.8 mW 的稳定输出,输出激光脉冲的重复频率为 9.9 MHz,中心波长为 1064 nm。输出脉冲的脉冲宽度约为 18 ps,相应的光谱宽度为 0.18 nm。该激光器采用全保偏光纤结构,便于集成,环境稳定性强;同时具有结构简单、自启动、稳定性好以及时频域噪声低等

优点,可作为 OPCPA、高分辨成像、激光雷达等激光系统可选择的种子源之一。

## 参 考 文 献

- [1] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [2] Popa D, Sun Z, Torrisi F, et al. Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(20): 203106.
- [3] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 505.
- [4] Michailovas K, Baltuska A, Pugzlys A, et al. Combined Yb/Nd driver for optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. Optics Express, 2016, 24(19): 22261.
- [5] He G L, Xu L, Ma X H, et al. Passively mode-locked fiber laser based on transmission/reflection composite double saturable absorber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111405. 何广龙, 徐莉, 马晓辉, 等. 透/反复合双饱和吸收体被动锁模光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111405.
- [6] Zhang W C, Liu Y, Wang C, et al. Ultrafast PM fiber ring laser mode-locked by nonlinear polarization evolution with short NPE section segments[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7934.
- [7] Ma H Q, Liu C, Zhao W, et al. Figure-of-eight cavity Yb<sup>3+</sup>-doped fiber mode-locked lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(9): 1173-1177. 马海全, 刘畅, 赵卫, 等. 8 字形腔锁模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1173-1177.
- [8] Aguergaray C, Broderick N G R, Erkintalo M, et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10545.
- [9] Avdokhin A, Popov S, Taylor J. Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065 nm[J]. Optics Express, 2003, 11(3): 265.
- [10] Zou F, Yang X Z, Pan W W, et al. 1015-1080 nm tunable polarization-maintaining dissipative soliton mode-locked fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901005. 邹峰, 杨学宗, 潘伟巍, 等. 1015~1080 nm 可调谐保偏光纤耗散孤子锁模激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0901005.

- [11] Saraceno C J, Schriber C, Mangold M, *et al.* SESAMs for high-power oscillators: design guidelines and damage thresholds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(1): 29-41.
- [12] Kieu K, Wise F W. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11453.
- [13] Nielsen C K, Keiding S R. All-fiber mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1474.
- [14] Yariv A. Operator algebra for propagation problems involving phase conjugation and nonreciprocalelements[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4538.
- [15] Danilevičius R, Zaukevičius A, Budriūnas R, *et al.* Femtosecond wavelength-tunable OPCPA system based on picosecond fiber laser seed and picosecond DPSS laser pump [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17532.
- [16] Bourquin S, Hartl I, Aguirre A D, *et al.* Portable broadband light sources using a femtosecond Nd:Glass laser and nonlinear fiber for ultrahigh-resolution OCT imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4956: 4-9.
- [17] Kaldvee B, Ehn A, Bood J, *et al.* Development of a picosecond lidar system for large-scale combustion diagnostics[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B65.
- [18] Arditty H J, Lefèvre H C. Sagnac effect in fiber gyroscopes[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(8): 401.
- [19] Fermann M E. Nonlinear polarization evolution in passively modelocked fiber lasers [M] // Duling I N III. eds. *Compact sources of ultrashort pulses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 179-207.
- [20] Zhang Z G. *Femtosecond laser technology*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 186-194. 张志刚. *飞秒激光技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 186-194.
- [21] Stolen R H, Lin C. Self-phase-modulation in silica opticalfibers[J]. *Physical Review A*, 1978, 17(4): 1448.
- [22] Hofer M, Fermann M E, Haberl F, *et al.* Mode locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(7): 502.
- [23] Islam M N, Simpson J R, Shang H T, *et al.* Cross-phase modulation in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(8): 625.
- [24] Othonos A. Fiber bragg gratings [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [25] Kuse N, Jiang J, Lee C C, *et al.* All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3095.