

全保偏非线性偏振环形镜锁模掺铒光纤激光器

李润敏¹, 宋有建¹, 师浩森¹, 戴雯², 李跃鹏¹, 武子铃¹, 田昊晨¹, 柴路¹, 胡明列¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072;
2. 上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘要: 研究了基于非线性偏振环形镜锁模的全保偏光纤激光器锁模机制。在非线性偏振环形镜中, 用偏振分束器取代传统的非线性放大环形镜锁模激光器中的光纤耦合器, 并辅以非互易性元件和增益光纤, 作为全保偏光纤激光器中实现稳定锁模的核心器件。构建了一台基于非线性偏振环形镜的掺铒光纤锁模激光振荡器, 实现了重复频率 75 MHz, 时域脉冲宽度 141 fs, 总输出功率约 30 mW 的稳定锁模脉冲序列输出。该激光器具有双向输出, 且通过调节腔内波片可调节输出功率。此外, 对激光器输出功率和重复频率的稳定性进行了评价, 在自由运转情况下, 1 h 内输出脉冲序列的平均功率波动小于 0.05%, 重复频率的 1 s 相对稳定度为 2.0×10^{-8} 。该结构的全保偏光纤激光器可开机自启动锁模, 且环境稳定性高、重复频率较高、脉冲宽度窄, 能满足激光测距、激光加工、激光光谱成像、航天等应用对超短脉冲光源的需求。

关键词: 非线性偏振环形镜; 全保偏; 锁模光纤激光器; 自启动

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0803006

All-polarization-maintaining erbium-doped mode-locking fiber laser based on nonlinear polarization loop mirror

Li Runmin¹, Song Youjian¹, Shi Haosen¹, Dai Wen², Li Yuepeng¹, Wu Ziling¹,
Tian Haochen¹, Chai Lu¹, Hu Minglie¹

(1. Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: The mode-locking mechanism of an all-polarization-maintaining fiber laser based on a nonlinear polarization loop mirror was demonstrated. Instead of a fiber coupler in the traditional nonlinear amplifying loop mirror based mode-locked fiber laser, a polarization beam splitter (PBS) was implied in the nonlinear polarization loop mirror. The combination of the PBS, non-reciprocal components and a piece of gain fiber acted as the core elements in nonlinear polarization loop mirror to achieve stable mode-locking in an all-polarization-maintaining fiber laser. A passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on this mode-locking mechanism was also presented. The laser directly emitted an optical pulse train of 141 fs duration (75 MHz) with 30 mW total output power. The laser had bidirectional

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61675150, 11527808, 61535009); 天津市自然科学基金(17JJCJQC43500)

作者简介: 李润敏(1994-), 女, 硕士生, 主要从事被动锁模掺铒光纤激光器方面的研究。Email: lironmin@tju.edu.cn

导师简介: 宋有建(1981-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞秒激光技术方面的研究。Email: yjsong@tju.edu.cn

outputs, and the power from two outputs was adjustable by adjusting the waveplate in the cavity. Moreover, the environment stability of the free-running laser was characterized, yielding an average output power fluctuation of $<0.05\%$ in 1 h and the relative repetition rate stability of 2.0×10^{-8} in 1 s. The configuration enables self-start mode-locking, generating optical pulse trains with high environmental stability, high repetition rate and short pulse duration and fully meets the requirements of ultra-short pulse laser sources in femtosecond based ranging, laser machining, spectroscopy and other applications in spaceflight technologies.

Key words: nonlinear polarization loop mirror; all-polarization-maintaining; mode-locked fiber laser; self-starting

0 引言

光纤飞秒激光器以其低成本、小体积、易维护和易集成等特点受到越来越多的关注。其中,被动锁模光纤激光器因其输出脉冲窄、系统简单、环境稳定性高等优势在科学研究和工业产业应用中倍受青睐^[1-4]。

被动锁模光纤激光器中实现稳定锁模的核心器件是可饱和吸收体。根据可饱和吸收体的不同,被动锁模机制可分为真实可饱和吸收体锁模和等效可饱和吸收体锁模两种。目前常用的真实可饱和吸收体主要包括半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[5]、碳纳米管(CNT)^[6]、石墨烯(Graphene)^[7-8]等。基于真实可饱和吸收体锁模的激光器具有良好的自启动特性和环境稳定性,同时可实现全保偏光纤结构。然而,真实可饱和吸收体的损伤阈值较低,并且长期使用时吸收体的性能会出现退化。锁模光纤激光器中常用的等效可饱和吸收体锁模方法主要有两种,分别是非线性偏振旋转(NPR)锁模^[9]和非线性放大环形镜(NALM)锁模^[10]。非线性偏振旋转锁模可以获得较好的激光器输出性能,但这种锁模机制依赖于脉冲偏振态在光纤内的演化,无法应用于保偏光纤激光器中。外界环境的温度、湿度变化以及光纤应力变化都会破坏锁模脉冲的稳定运转。非线性放大环形镜锁模利用光纤环路中相向传输的两束光积累的非线性相移不同,利用交汇处干涉效应引入的强度相关损耗,形成等效可饱和吸收效应实现锁模。这种锁模机制需要较长的环内光纤以提供足够的非线性相移差,因此该类锁模激光器通常工作在低重复频率下,难以满足实验及工业应用对高重复频率激光器的需求。与此同时,这种类型的激光器通常需腔内调制器、滤波

片等器件辅助锁模启动。为满足激光测距^[3]、激光加工^[11]、激光光谱成像^[1,4]、航天和地球观测^[2,12]等领域对输出高质量脉冲序列并且具有优良鲁棒性的光纤飞秒激光器的需求,国内外学者们在非线性放大环形镜锁模光纤激光器的基础上,在光纤环路内加入非互易相位偏置器^[13-15],在提高激光器锁模自启性能的同时,激光器的重复频率也由典型的 10 MHz 量级提升至几十 MHz 量级甚至百 MHz 量级。其中,Hänsel W 等^[13]在全保偏掺铒光纤激光器中实现了重复频率为 250 MHz 的锁模脉冲序列输出,并验证了这类激光器具有极低的噪声特性。Kuse N 等^[14]对掺铒光纤锁模激光器的重复频率和载波包络相位偏移进行了锁定,实现了剩余时间抖动为 40 as (积分区间:10 kHz~10 MHz)的掺铒光梳,是目前为止时间抖动最低的掺铒光梳。国内,张志刚等^[15]在全保偏掺铒光纤激光器中实现了重复频率为 31.35 MHz,平均功率 4.1 mW,去啁啾脉宽 538 fs 的锁模序列输出。

文中构建了一台基于非线性偏振环形镜锁模的全保偏光纤激光器。该激光器实现了重复频率 75 MHz,时域脉冲宽度 141 fs,可自启动的稳定锁模脉冲序列输出。通过改变腔内波片角度,实现了输出功率可调的双通道输出。此外,文中对激光器输出功率和重复频率的稳定性作出了评价,在自由运转情况下,1 h 内输出脉冲序列的平均功率波动小于 0.05%,重复频率的 1 s 相对稳定性为 2.0×10^{-8} ,具有良好的环境稳定性。

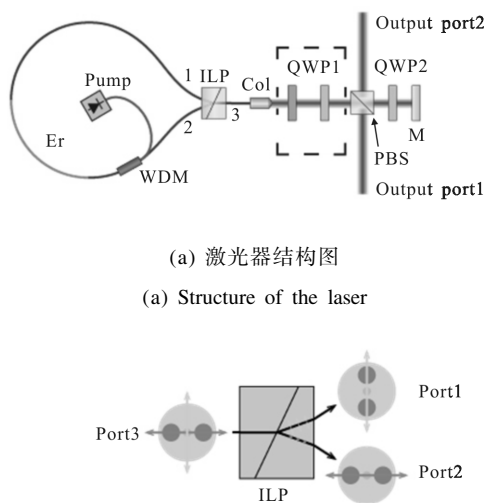
1 实验装置

基于非线性偏振环形镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器结构如图 1(a)所示,由保偏光纤部分和自由空

间光路部分构成。实验中使用波长 980 nm 的半导体二极管作为泵浦源。掺铒光纤 (EDF) 长约 0.95 m (Liekki, Er80-4/125-HD-PM), 色散值在 1 560 nm 处为 $-30 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 其余光纤均为保偏单模光纤, 总长度为 1.39 m, 1 560 nm 处色散值为 $18.5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 其中在线偏振分束器(ILP)至准直器(COL)端光纤长度为 0.3 m。自由空间光路总长约为 0.075 m, 腔内净色散为 $-0.003 5 \text{ ps}^2$ 。光纤环路由 ILP、波分复用器(WDM)和 EDF 构成。ILP 的结构如图 1(b)所示。从 ILP 的 Port3 入射光纤环路的脉冲快、慢轴分量经过 ILP 分束后将分别沿顺时针和逆时针方向传输, 且均沿环内光纤慢轴传输, 因此光纤环路内传输的脉冲仅包含慢轴分量。而脉冲在环外光纤中同时包含快、慢轴分量。空间光路由相位偏置器、偏振分束器(PBS)、四分之一波片(QWP2)和反射镜(M)组成。其中相位偏置器结构如图 1(a)虚线框所示, 是由法拉第旋光器(FR)和四分之一波片(QWP1)组成的非互易元件, 为脉冲的不同偏振成分提供不同的相移。调节 QWP2 的角度可实现输出功率可调的双通道输出。

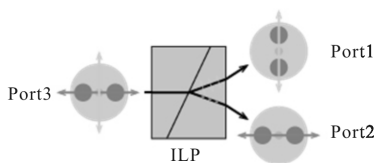
性偏振环形镜, 经过相位偏置器后耦合至环外光纤, 分解为沿保偏光纤快、慢轴传输的两个垂直偏振分量, 两分量的大小和相位与相位偏置器相关。经 ILP 分束后, 这两个偏振分量均耦合至环内光纤的慢轴方向, 并将在光纤环路内分别沿顺时针和逆时针方向传输, 发生不对称放大并积累不同的非线性相移。传输一周后在 ILP 处合束, 回到环外光纤中。环外光纤中快、慢轴上传输的光脉冲再次经相位偏置器作用后, 在 PBS 透射的水平偏振方向和反射的竖直偏振方向上的投影分别发生干涉。脉冲通过 PBS 的透过率(即水平偏振分量强度占总强度的比重)与脉冲在非线形偏振环形镜中积累的非线性相移差相关。其中 PBS 反射的竖直偏振分量作为激光器 1 端输出。而透射的水平偏振分量经过 QWP2、M 后, 再次经过 QWP2, 其偏振态发生一定角度的旋转, 部分经 PBS 透射回到非线性偏振环形镜, 完成脉冲在腔内的一次循环, 其余部分经 PBS 反射, 作为激光器 2 端输出。因此可认为激光器 1 端和激光器 2 端分别输出了腔内脉冲的不同偏振分量, 从而两端的输出脉冲特性稍有差异。

这种锁模机制依赖于脉冲快、慢轴分量在非线形偏振环形镜内积累的非线性相移差, 与脉冲在光纤环路内的不对称放大及非互易性相位偏置器提供的偏置相移紧密相关。由于脉冲中心部分较两翼能量强, 非线性效应强, 积累更多的非线性相移差, 若在 PBS 处发生干涉时脉冲中心部分透过率较高而两翼透过率较低, 则非线性偏振环形镜等效于可饱和吸收体。非线性偏振环形镜的透过率与脉冲两个垂直偏振分量间非线性相移差的关系如图 2 所示。若无相位偏置器, 在脉冲形成初始阶段, 非线性相移差为零, 透过率相对于脉冲光强的斜率始终为负值, 能量较低连续光部分透过率较高, 如图 2 虚线所示, 激光器很难摆脱这一状态实现锁模运转, 需要加入外部扰动或腔内调制器辅助锁模启动。若在非线形偏振环形镜中加入非互易性相位偏置器, 脉冲在环形镜内传输时按相反方向两次通过相位偏置器, 其快、慢轴分量在这一过程中积累不同的非线性相移, 通过调节相位偏置器, 可使透过率曲线发生平移; 例如如图 2 实线引入 $\pi/2$ 相移, 在非线形相移差接近零的脉冲形成初始阶段, 透过率与曲线斜率为正, 意味着随着脉冲峰值功率的提升, 非线性相移差增大, 透过率相应增大, 从而实现等效可饱和吸收效应, 有利于实现激光器稳定锁模运转。



(a) 激光器结构图

(a) Structure of the laser



(b) ILP 结构图

(b) Structure of ILP

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

非线形偏振环形镜锁模光纤激光器的结构^[13]类似于非线形放大环形镜锁模激光器。光纤部分及相位偏置器、PBS 构成了非线形偏振环形镜, 不同之处在于采用 PBS 取代光纤耦合器作为非线形偏振环形镜的输入及输出点。考虑脉冲从 PBS 处入射至非线

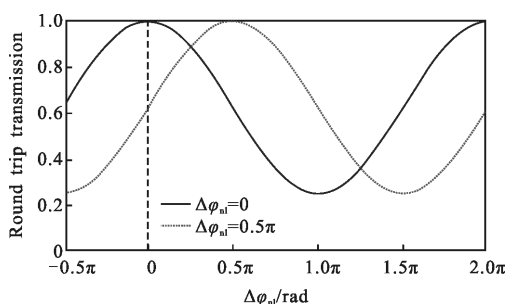


图 2 非线性偏振环形镜中,透过率随脉冲两个垂直偏振分量间非线性相移差的变化

Fig.2 Theoretical round-trip transmission versus nonlinear phase offset between the pulses' vertical polarization states in a nonlinear polarization loop mirror

2 实验结果

逐渐增加泵浦功率至高于激光器锁模阈值,在激光器 2 端输出功率最低时,通过调节非互易性相位

偏置器,可实现多脉冲状态的锁模运转,适当降低泵浦功率水平或调节激光器 2 端输出功率增大腔内损耗可获得稳定的单脉冲运转状态。此后固定相位偏置器角度,在泵浦迟滞效应的影响下,每次开机时需将泵浦功率加至高于单脉冲运转阈值的水平,待激光器多脉冲锁模状态自启动后再降低泵浦功率或增大腔内损耗至稳定的单脉冲运转状态。实验中对锁模激光器腔内光纤施加应力或弯折腔内光纤,其锁模状态不受影响且仍能开机自启动,证明该全保偏结构的光纤激光器环境稳定性高,自启动特性不受外界环境的影响。

在泵浦功率为 270 mW 时,激光器处于单脉冲运转状态,通过调节 QWP2 角度,可实现激光器 2 端输出功率在 14.5~28 mW 范围可调,激光器 1 端输出功率在 9.8~2.5 mW 范围可调。随着激光器 2 端输出功率的不断增加,激光器 1 端输出功率逐渐降低,且输出光谱随之变化。图 3 记录了激光器 1 端输出

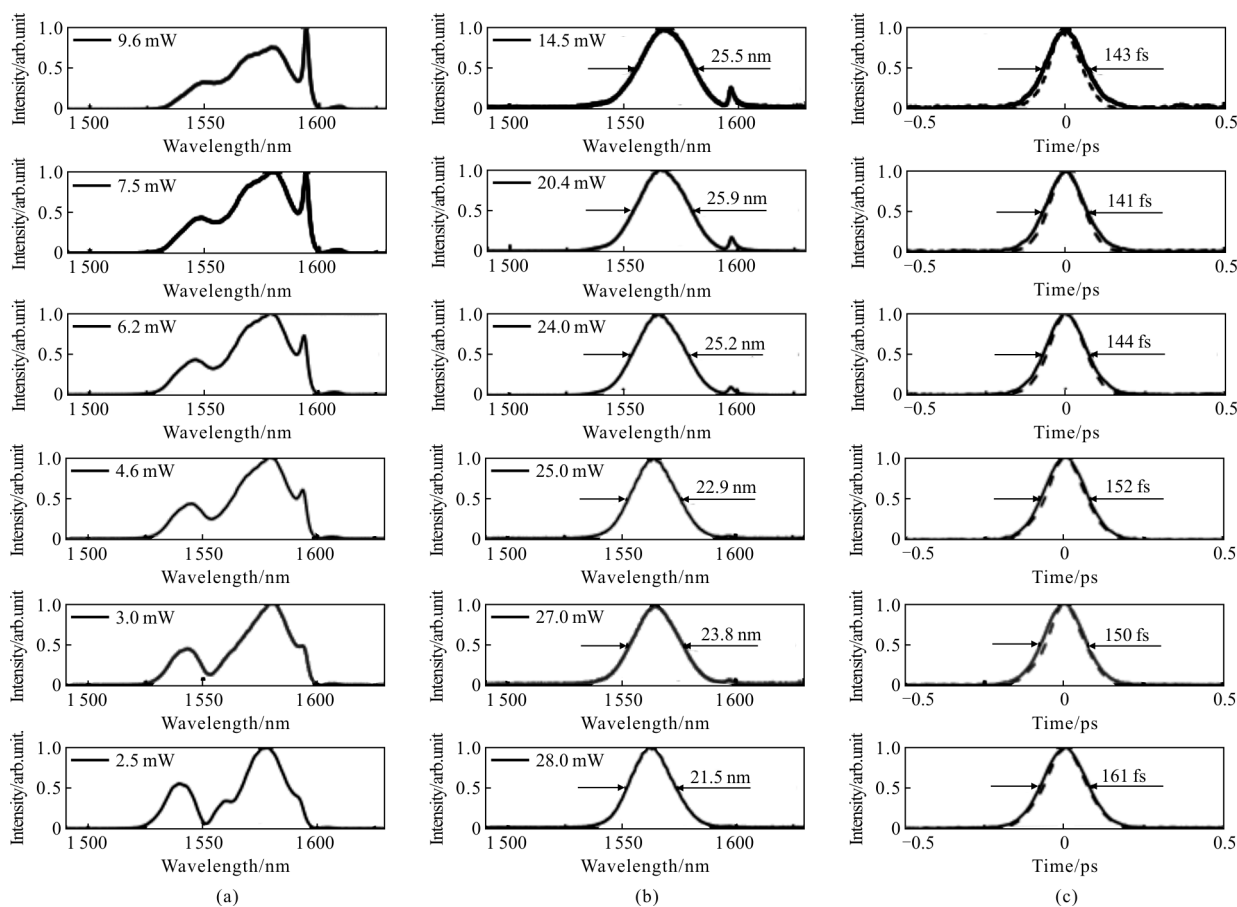


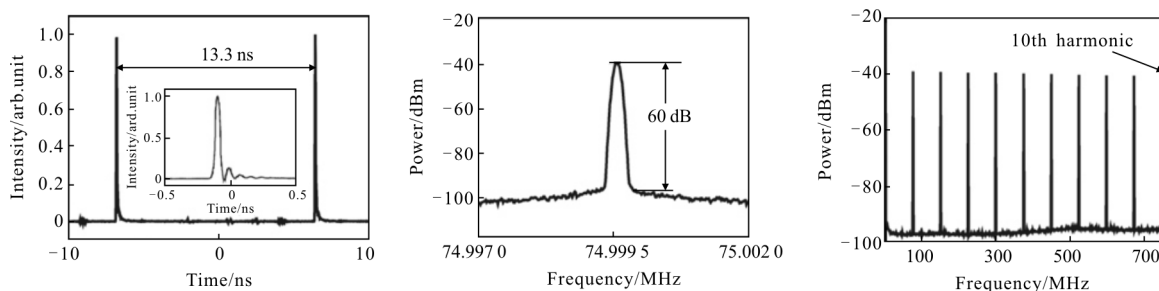
图 3 (a)激光器 1 端输出光谱,(b)激光器 2 端输出光谱,(c)激光器 2 端输出脉冲自相关曲线(实线)及对应的傅里叶变换极限脉冲曲线(虚线)

Fig.3 (a) Optical spectra from output port1, (b) optical spectra form output port2, (c) autocorrelation traces of pulses from output port2 (solid line) and the corresponding Fourier transform limit pulse traces (dashed line) in each state

功率分别为 9.6、7.5、6.2、4.6、3、2.5 mW 时对应的输出光谱(光谱仪型号:YOKOGAWA, AQ6370B),以及相应状态下激光器 2 端输出功率、输出光谱及脉冲自相关曲线。由文中实验装置部分描述可知腔内脉冲的不同偏振分量分别在激光器 1 端与激光器 2 端输出,因此两端输出光谱有较大差异,光谱覆盖范围为 1 520~1 600 nm,激光器 2 端输出光谱近似高斯型。随着激光器 2 端输出功率的不断增大,输出光谱中心波长逐渐向短波方向偏移,且半极大全宽度略有下降;这是由于腔内损耗随着激光器 2 端输出功率的增加而逐渐增加,而 EDF 增益在短波附近较大,为满足增益和损耗之间的平衡,输出光谱中心波长逐渐向短波偏移。各状态下相应的激光器 2 端锁模脉冲自相关曲线(自相关仪型号:APE-pulseCheck-50 ps)如图 3(c)实线所示,其中激光器 2

端输出功率为 20.4 mW 时,锁模脉冲最窄,对应的半极大全宽为 141 fs,时间带宽积为 0.45,表明在腔内剩余色散的影响下脉冲带有啁啾。输出光谱对应的傅里叶变换极限脉冲如虚线所示,最窄可支持 110 fs 的脉冲输出。

以激光器 2 端输出为例,在输出功率为 14.5 mW 时,用 20 GHz 高速采样示波器(Hewlett Packard 83480A)对锁模脉冲序列进行采样,如图 4(a)所示,相邻脉冲之间的时间间隔为 13.3 ns,对应于脉冲在腔内往返一周的时间。使用频谱分析仪(RIGOL DSA815)测量锁模脉冲序列的频谱,脉冲序列一次谐波的频谱如图 4(b)所示,一次谐波的中心频率为 74.999 5 MHz,与相邻脉冲的时间间隔相匹配,分辨率带宽为 100 Hz,信噪比为 60 dB。图 4(c)显示了锁模脉冲序列 1~10 次谐波的频谱,稳定的高次谐波表明



(a) 示波器测叠的锁模脉冲序列(20 ps 窗口), 插图为 1 ps 窗口下示波器迹线
 (b) 脉冲序列的一次谐波频谱
 (c) 脉冲序列的 1~10 次谐波频谱
 (a) Oscilloscope trace of the mode-locked pulses train (20 ps window), the inset shows the oscilloscope trace at 1 ps window
 (b) Radio frequency spectrum of fundamental harmonic of pulse train
 (c) Radio frequency spectrum from 1st to 10th harmonic of pulse train

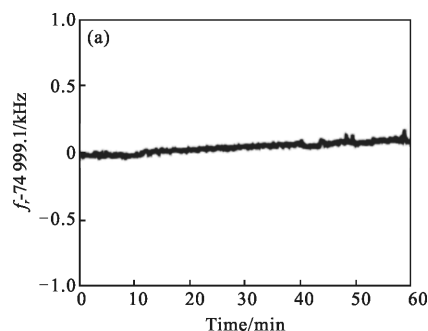
图 4 激光器 1 端输出时域脉冲序列及脉冲序列的频谱

Fig.4 Oscilloscope traces and radio frequency spectra of pulses from output port 1

激光器处于稳定的锁模状态。

随后,利用频率计数器(Agilent 53220A)采集锁模脉冲序列的重复频率,对其稳定性进行了测量。频率计数器门时间为 0.1 s。在 1 h 内,激光器重复频率随时间变化曲线如图 5(a)所示,平均值为 74.999 1 MHz。其对应的艾伦方差曲线如图 5(b)所示,在无任何外部控制的条件下,激光器重复频率在 1 s 的相对稳定性为 2.0×10^{-8} 。此外,对激光器 2 端输出功率稳定性进行了测量,如图 6 所示。在 1 h 内,激光器输出平均功率为 14.82 mW,标准差为 6.9 μ W,对应的输出

功率不稳定性小于 0.05%。



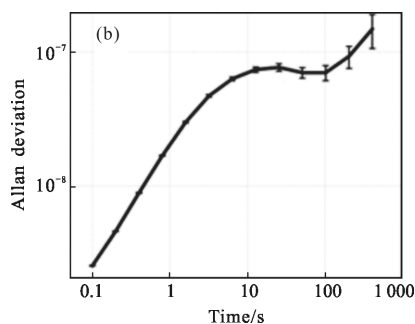


图 5 (a)1h 内激光器 1 端重复频率波动趋势;(b)艾伦方差曲线
Fig.5 (a) Fluctuations trend of repetition rate over 1 hour of output part 1; (b) Allan deviation curve

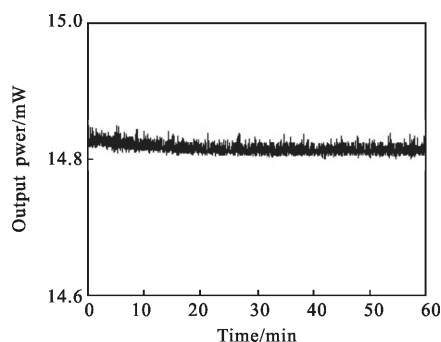


图 6 1 h 内,激光器 2 端输出功率
Fig.6 Output power of output port2 over 1 hour

3 结 论

文中研究了非线性偏振环形镜锁模激光器的锁模机制。在国内首次实现了基于非线性偏振环形镜的被动锁模掺铒光纤激光器,实现了重复频率 75 MHz,脉宽 141 fs 的锁模脉冲序列输出。通过调节腔内波片角度,激光器可实现双通道输出,且输出功率可调,在泵浦功率 270 mW 下,总输出功率约为 30 mW。在不辅以任何稳定手段的情况下,1 h 内,激光器输出平均功率的标准差为 6.9 μ W,对应功率波动小于 0.05%,重复频率 1 s 的相对稳定性为 2.0×10^{-8} 。与国际上基于同一锁模机制的其他掺铒光纤激光器相比,这一全保偏掺铒光纤激光器的输出脉冲宽度窄,输出功率高,锁模自启动,环境稳定性高,并且能够稳定工作在较高重复频率下,可以作为各种实验研究与工业应用的超短脉冲光源。

参考文献:

[1] Qiao Ziwen, Gao Bingrong, Chen Qidai, et al. Ultrafast spectroscopy techniques and their complementary usages[J].

Chinese Optics, 2014, 7(4): 588–599. (in Chinese)

[2] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1381–1387.

[3] Dong Xue, Han Xingwei, Song Qingli, et al. Research of space debris laser ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S229002. (in Chinese)

[4] Mei Fenghua, Li Chao, Zhang Yuxin, et al. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708–718. (in Chinese)

[5] Hirooka T, Tokuhira K, Yoshida M, et al. 440 fs, 9.2 GHz regeneratively mode-locked erbium fiber laser with a combination of higher-order solitons and a SESAM saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24255–24264.

[6] Yamashita S, Set S Y, Goh C S, et al. Ultrafast saturable absorbers based on carbon nanotubes and their applications to passively mode-locked fiber lasers [J]. *Electronics & Communications in Japan*, 2007, 90(2): 17–24.

[7] 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)

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

[9] Salhi M, Leblond H, Sanchez F. Theoretical study of the erbium-doped fiber laser passively mode-locked by nonlinear polarization rotation [J]. *Physical Review A*, 2003, 67 (1): 5149–5153.

[10] Nicholson J W, Andrejco M. A polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight fiber laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8160–8167.

[11] Su Yahui, Fan Zhenzhu, Wang Chaowei, et al. Fabrication of anisotropic and hierarchical structures using femtosecond laser printing capillary force assisted self-assembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2057–2063. (in Chinese)

[12] Lee J, Lee K, Jang Y, et al. Testing of a femtosecond pulse laser in outer space[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(6187): 5134.

[13] Hänsel W, Hoogland H, Giunta M, et al. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(1): 41.

[14] 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): 3095–3102.

[15] Jiang T, Cui Y, Lu P, et al. All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1786–1789.