

# 1015~1080 nm 可调谐保偏光纤耗散孤子锁模激光器

邹峰<sup>1,2</sup>, 杨学宗<sup>1,2</sup>, 潘伟巍<sup>1,2</sup>, 白洋<sup>1,2</sup>, 李秋瑞<sup>1</sup>, 何兵<sup>1,3</sup>, 周军<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

<sup>4</sup>南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

**摘要** 实验研究了基于非线性放大环形镜锁模的全正色散可调谐锁模光纤激光器, 激光器采用由主环路和非线性放大环路构成的“8”字腔全保偏结构。通过调节两环路的抽运功率, 在 1030 nm 处获得了脉宽为 17.61 ps, 重复频率为 4.133 MHz, 平均功率为 2.151 mW 的稳定锁模激光输出。通过调节可调谐滤波器, 在控制激光器工作波长的同时滤波形成全正色散耗散孤子, 实现了 1015~1080 nm 可调谐稳定锁模激光输出, 脉冲宽度变化范围为 7.86~17.80 ps。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 锁模激光器; 非线性放大环形镜; “8”字腔; 可调谐激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901005

## 1015-1080 nm Tunable Polarization-Maintaining Dissipative Soliton Mode-Locked Fiber Laser

Zou Feng<sup>1,2</sup>, Yang Xuezhong<sup>1,2</sup>, Pan Weiwei<sup>1,2</sup>, Bai Yang<sup>1,2</sup>,

Li Qiurui<sup>1</sup>, He Bing<sup>1,3</sup>, Zhou Jun<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

<sup>4</sup>Nanjing Zhongke Shengguang Science & Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

**Abstract** An all-normal dispersion tunable mode-locked fiber laser with a nonlinear amplifying loop mirror is experimentally investigated. The laser employs an all-polarization-maintaining figure-8 cavity consisted of main loop and nonlinear amplifying loop mirror. At 1030 nm, the stable mode-locked laser is initiated by adjusting two loops' pump power, which delivers pulse width of 17.61 ps, repetition frequency of 4.133 MHz, and average power of 2.151 mW. A tunable filter is employed in the cavity to select the laser wavelength as well as force the laser operating in all-normal dispersion dissipative regime. The wavelength tuning range is 1015-1080 nm while the pulse duration ranges from 7.86 ps to 17.80 ps.

**Key words** lasers; fiber lasers; mode-locked laser; nonlinear amplifying loop mirror; figure-8 cavity; tunable laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.4050; 140.7090; 140.3600

收稿日期: 2017-04-12; 收到修改稿日期: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134, 61405202)、科技部重点研发计划(2016YFB0402201)、江苏省重点研发计划(BE2014001, BE2016005-4)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才杨帆计划(17YF1421200)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)

作者简介: 邹峰(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲光纤激光技术方面的研究。E-mail: fengzou@siom.ac.cn

导师简介: 周军(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

相比于固体锁模激光器,全光纤锁模激光器凭借结构紧凑、免维护和低生产成本等优势,在医疗、微加工和成像等领域<sup>[1-2]</sup>获得了广泛的应用,并引发了科研人员的持续研究。由于主动光纤锁模激光器需要外部调制,会增加系统复杂度<sup>[3]</sup>,因此研究主要围绕被动光纤锁模激光器展开。根据可饱和吸收体的工作机制不同,被动光纤锁模激光器分为两大类:1)一类被动光纤锁模激光器是利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)<sup>[4]</sup>、碳纳米管<sup>[5]</sup>和新型二维材料<sup>[6-9]</sup>等真实可饱和吸收体。这类材料的优点是在生长时可精确控制其锁模参数,采用透射式和反射式等形式封装的可饱和吸收体可以满足多种腔型设计。但是这类材料的普遍缺点是生长技术复杂,破坏阈值较低。2)另一类被动光纤锁模激光器是利用光纤克尔效应的等效可饱和吸收体,比如非线性偏振旋转(NPR)。但是这种锁模方式极易受环境影响,且锁模运转的可重复性较差。与 NPR 类似,非线性环形镜(NOLM)<sup>[10]</sup>是另一种基于克尔效应的等效锁模机制,它利用两束相反方向传播的光在中央干涉耦合器中的相干叠加来实现锁模。NOLM 在初始阶段时难以积累足够的非线性相移来启动锁模,通常需要加入偏振控制器来调节损耗以启动锁模<sup>[11-13]</sup>,这就破坏了全保偏结构。在传统的 NOLM 环内加入放大级构成非线性放大环形镜(NALM)锁模激光器,与 NOLM 相比,NALM 多增加了一个调节自由度,可以通过调节增益来启动锁模并获得了稳定的锁模脉冲输出<sup>[14]</sup>。

波长可调谐的锁模激光器在光纤传感、光纤器件测试和光谱学等领域有着重要的应用。国内外报道了很多可调谐被动锁模激光器。基于空间结构的外腔光栅调谐的 SESAM 锁模光纤激光器获得了 1015~1085 nm<sup>[15]</sup>和 980~1070 nm<sup>[16]</sup>的可调谐输出;本课题组利用可调谐滤波器实现了 1023~1060 nm 范围内可调谐的锁模激光器<sup>[17]</sup>,但需要辅以偏振控制器;Lin 等<sup>[18]</sup>调节偏振控制器也获得了近 40 nm 的调谐范围。上述可调谐锁模光纤激光器由于调谐过程复杂,稳定性不佳,抑或调谐范围较小,都限制其应用范围。2008 年,Wise 课题组首次提出全正色散耗散孤子锁模光纤激光器<sup>[19-20]</sup>,光纤色散、非线性、增益以及光谱滤波效应的共同作用可以不断提高输出脉冲能量<sup>[21-24]</sup>,并且腔内无负色散元器件,输出脉冲带有线性啁啾且可以被压缩至百飞秒量级。Zhang 等<sup>[25]</sup>对多模干涉滤波器施加应力获得了 12 nm 可调谐耗散孤子输出。Zhang 等<sup>[7]</sup>以石墨烯为锁模器件,搭建的可调谐耗散孤子锁模光纤激光器的调谐范围达 30 nm;张丽强等<sup>[26]</sup>以双包层掺镱光纤为增益介质,以双折射滤光片为波长选择器件,搭建了 30 nm 范围可调谐耗散孤子锁模光纤激光器。报道的可调谐耗散孤子激光器的调谐范围有限且稳定性不足,而全保偏光纤的宽调谐耗散孤子激光器未见报道。

本文报道了基于全保偏“8”字腔 NALM 锁模的全正色散可调谐锁模激光器,可调谐滤波器在控制激光器工作波长的同时可滤波形成全正色散耗散孤子。在 1030 nm 处,通过调节抽运功率获得脉宽为 17.61 ps,重复频率为 4.133 MHz,平均功率为 2.151 mW 的稳定锁模激光输出。保持抽运功率不变,调节可调谐滤波器,可从 1022.5 nm 连续调谐至 1037.5 nm。调节可调谐滤波器并配合调节抽运功率可以获得最大范围为 1015~1080 nm 的锁模。激光器全波段范围内的锁模稳定,输出脉冲宽度变化范围为 7.86~17.80 ps,其峰值功率钳制在 50 W 以内。实验还研究了激光器在不同波长处锁模启动与输出特性的变化情况。

## 2 实验装置与锁模机制

1015~1080 nm 可调谐非线性放大环形镜锁模激光器采用全保偏光纤构成的“8”字腔结构,其实验装置如图 1 所示。激光器由两个环路组成:左侧主环路和右侧 NALM 环路。主环路是一个标准的全正色散(ANDi)环形腔,它包括一个 980/1030 nm 波分复用器(WDM1)、一段长 70 cm 的保偏掺镱光纤(Nufern,吸收系数为 250 dB/m)、一个保偏隔离器(ISO)、一个 1:1 耦合器(OC1)和一个可调谐滤波器(TF)。TF 的参数与文献<sup>[17]</sup>所述相同,其波长调谐范围为 1020~1090 nm,调谐精度为 0.1 nm,透射谱的半峰全宽(FWHM)小于 1 nm。调节可调谐滤波器一方面可控制激光器工作波长,另一方面可在全正色散耗散孤子的形成中起到关键的滤波作用<sup>[14]</sup>。主环路本身可产生窄带宽的连续激光,而 ISO 限制激光在主环路内只能顺时针单向运行。次环路为可双向传输激光的 NALM,相当于一个等效可饱和吸收体并且通过一个分光比为 60:40 的耦合器 OC2 连接进入主环路。次环路包括一段长 33 m 的保偏无源光纤(PM 980)和 60 cm 长

的掺镱保偏光纤,PM 980 光纤位于增益纤和 OC2 的 40% 输出臂之间,而增益光纤则靠近 OC2 的 60% 端。腔内所有器件之间通过保偏光纤连接,整个腔长为 49.9 m 且在 1 μm 波段为正色散,对应的正色散量大约为 1.19 ps<sup>2</sup>。

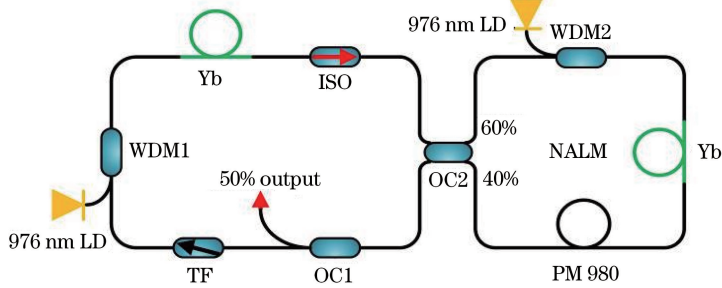


图 1 可调谐全保偏非线性放大环形镜锁模激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of tunable all-PM mode-locked laser with a nonlinear amplifying loop mirror

装置图中右侧带增益介质的 NALM 环路本质是一个萨尼亚克环,输入光经过环路后在耦合器处干涉输出,输出光功率和输入光功率  $P$  的比值即为透过率  $T$ ,即<sup>[10]</sup>

$$T = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)\{1 + \cos[(1 - \alpha - g\alpha)\gamma PL]\}, \quad (1)$$

式中 OC2 的耦合比  $\alpha = 0.6$ ,  $g$  为 NALM 环内的增益,  $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}} = 0.0035$ , 为光纤非线性参量;  $L$  为 NALM 环路长度,在此结构中取  $L = 37$  m。图 2 为 NALM 透射率随输入光功率的变化曲线,曲线呈周期余弦型。在锁模建立过程中,脉冲的中央部分强度强,最先达到透射阈值被透射;脉冲的边缘部分强度弱而被反射。因此 NALM 等效于一个可饱和吸收体,透射率峰值处对应的功率即为饱和功率。图 2 中增益  $g$  的大小主要影响透射率曲线的周期,当  $g$  增大时  $T$  的周期越来越短,相当于减小饱和吸收效应的饱和功率。 $g = 1$  时也即 NOLM 情形时饱和功率较大,并且初始的激光器中无脉冲形成机制,环路结构难以提供饱和和吸收作用使之进入锁模状态。 $g$  增大时降低饱和功率,放大腔内噪声脉冲,易于在初始阶段塑造脉冲形状达到锁模。图 1 结构中两支波长为 976 nm,输出功率为 600 mW 的单模半导体激光器分别抽运主环路与 NALM 环路内的增益介质。与通常的非线性环形镜锁模激光器需要调节偏振控制器相比<sup>[11-13]</sup>,实验中仅调节两个抽运源功率即可启动锁模并调节输出脉冲特性。

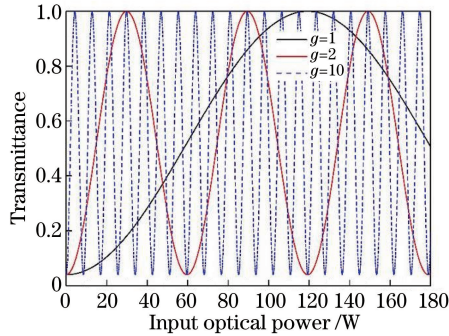


图 2 NALM 透射率随输入光功率的变化

Fig. 2 NALM transmittance versus the input optical power

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 1030 nm 锁模输出特性研究

固定 TF 的透射波长在 1030 nm 附近,来研究此锁模光纤激光器的输出特性。激光器获得单脉冲锁模时,耦合进入主环路的抽运功率  $P_m = 76$  mW,耦合进入 NALM 环路的抽运功率  $P_n = 33$  mW。但是在锁模启动过程中,需要不断增加  $P_m$  和  $P_n$  并超过上述值,直到在腔内同时建立起多脉冲锁模。根据图 2,在足够强的  $P_n$  抽运下可以降低 NALM 的饱和功率,从而启动锁模。而刚启动锁模时过高增益导致腔内脉冲功率

远超饱和功率值,峰值功率钳制效应引起脉冲分裂<sup>[14]</sup>。此时逐渐降低  $P_m$  和  $P_n$  分别至 76 mW 和 33 mW,可以建立稳定的单脉冲锁模。由于振荡器倾向于最小化腔内损耗,并且从随机的多脉冲降低到单脉冲,因此振荡器将工作在该增益下的第一透射峰处<sup>[27]</sup>。单脉冲锁模实验结果如图 3 所示。图 3(a)为对数坐标输出光谱,边沿陡峭,呈现典型的全正色散耗散孤子的输出特点,其信噪比超过 30 dB。光谱 FWHM 为 3.859 nm,明显大于滤波器的 1 nm 带宽,这是由于脉冲在增益、正色散和自相位调制的作用下频域上急剧展宽,导致滤波器前输出光谱较宽,而经过滤波器之后光谱宽度急剧减小,脉冲宽度也急剧减小,从而实现脉冲腔内自再现<sup>[14]</sup>。图 3(b)为采用自相关仪(pulseCheck 150, APE 公司,德国)测得的自相关迹,高斯拟合情形下对应的脉宽为 17.61 ps。1 GHz 带宽的光电探头配合 2.5 GHz 带宽示波器(DSO-S254A, Keysight 公司,美国)与频谱仪(N9020A, Keysight 公司,美国)分别测得脉冲序列与频谱,如图 3(c)、(d)所示,脉冲重复频率为 4.133 MHz,对应的脉冲间隔为 241.9 ns。输出平均功率为 2.151 mW,单脉冲能量为 0.52 nJ,对应的峰值功率为 29.6 W。频谱信噪比超过 80 dB,没有底座噪声,脉冲序列也未见明显起伏,说明激光器稳定运行在单脉冲锁模区域。

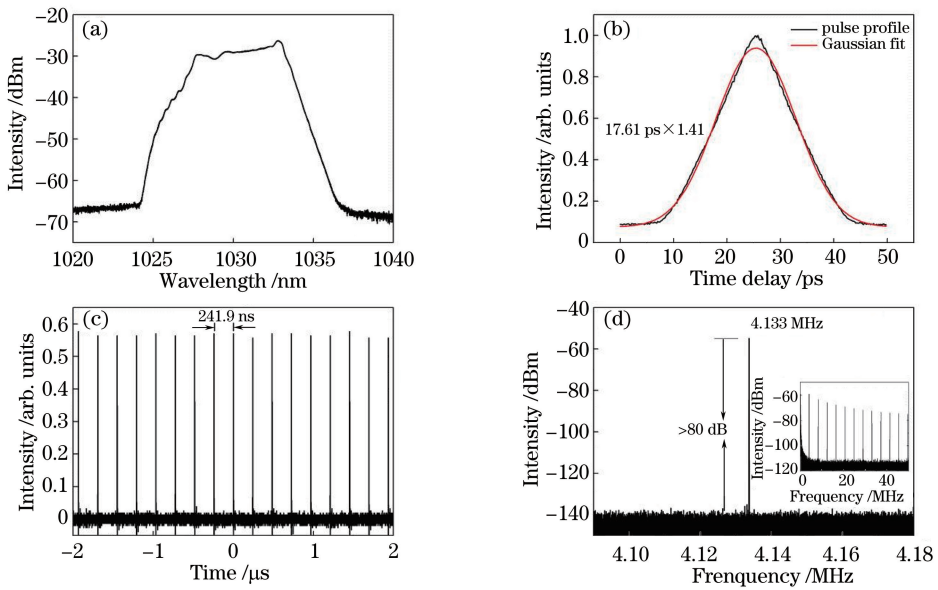


图 3 1030 nm 处单脉冲锁模结果。(a)输出光谱 FWHM 为 3.859 nm;(b)自相关迹;  
(c) 4.133 MHz 脉冲序列;(d)基频频谱图,插图为谐波频谱图

Fig. 3 Results of single-pulse mode-locked at 1030 nm. (a) FWHM of the output spectra is 3.859 nm; (b) autocorrelation trace; (c) pulse sequence of 4.133 MHz; (d) spectrum of fundamental frequency, and the inset is harmonic spectrum

### 3.2 固定抽运功率下 1022.5~1037.5 nm 的连续可调谐锁模特性研究

波长连续调谐性能在实际应用中具有重要意义。实验中固定抽运功率,仅调节滤波器来研究工作波长对锁模输出特性的影响。当固定  $P_m=76$  mW,  $P_n=33$  mW 时,仅调节 TF 实现了波长 1022.5~1037.5 nm 的连续调谐,并且在调谐过程中维持单脉冲锁模。其实验结果如图 4 所示。每间隔 2.5 nm 测量波长,波形特征与 1030 nm 单脉冲锁模时相似,并且信噪比始终保持 30 dB 以上,如图 4(a)所示。当调谐至 1025~1028 nm 之间时,锁模激光器出现连续分量,在光谱中出现尖峰。由于 NALM 环路并不是采用 1:1 的耦合器,图 2 中透过率最低值不为零,因此当腔内波长变化导致锁模的增益下降时,多余的抽运光就容易激发出连续分量<sup>[28]</sup>。图 4(a)中蓝色圆点是不同波长时的输出功率,功率随波长的增加先升高后降低,在 1035 nm 处输出功率最高为 2.36 mW。图 4(b)为对应的输出光谱 FWHM 与时间带宽积(TBP)随波长变化的情况,其变化趋势基本跟随输出功率的变化。图 4(c)为不同波长下的高斯拟合脉冲波形,黑色实线是实测值,红色实线为拟合曲线,两者相匹配,证明单脉冲锁模状态正常。脉宽先增大后减小,最大值在 1030 nm 处,脉宽变化范围大约为 2.50 ps。值得注意的是,输出功率增加时相应的脉冲宽度也会增加,调谐过程中脉冲峰值功率始终保持在 30 W 附近。这是因为稳定运转的 NALM 锁模是在图 2 某一增益  $g$  对应的第一峰值处,

为了保持锁模,腔内功率只能在饱和功率附近微小的范围内变化,否则透射率急剧改变将导致锁模状态改变。在调谐过程中锁模状态稳定,并且可以长时间运转,抗外界干扰能力强。

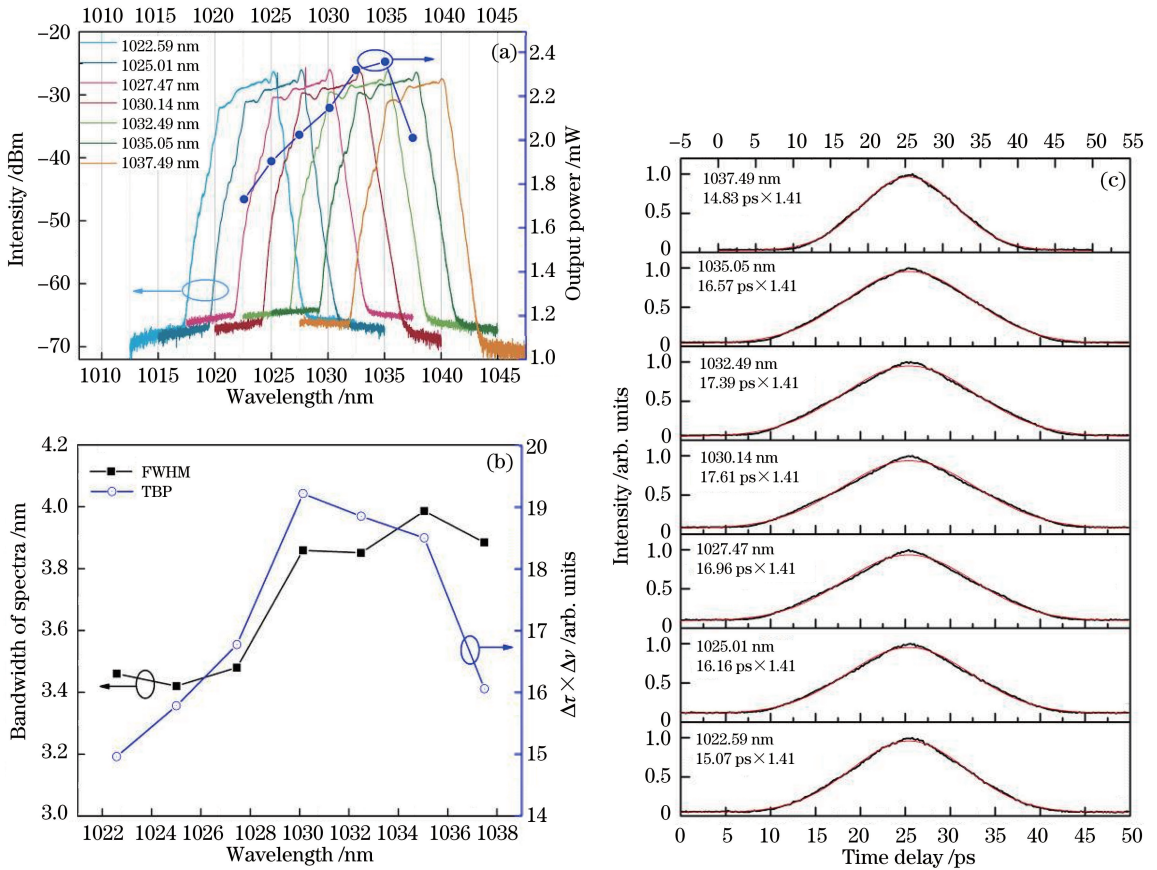


图 4 在  $P_m = 76 \text{ mW}$ 、 $P_n = 33 \text{ mW}$  下,1022.5~1037.5 nm 范围内仅调谐波长时的输出结果。

(a)输出光谱;(b)光谱 FWHM 和 TBP;(c)自相关迹

Fig. 4 Output results when the mode-locked laser is tuned from 1022.5 nm to 1037.5 nm under  $P_m = 76 \text{ mW}$  and  $P_n = 33 \text{ mW}$ . (a) Output spectra; (b) FWHM of spectra and TBPs; (c) autocorrelation traces

### 3.3 1015~1080 nm 宽带连续可调谐锁模输出特性研究

在实验研究中发现,可以采用 2 种方法来实现单脉冲锁模波长的调谐:1)在脉冲启动后获得多脉冲锁模时,不断调谐 TF 透过波长,达到所需波长范围之后,继而降低  $P_m$  和  $P_n$  到合适的值,可以获得该波长对应的单脉冲锁模;2)在某一波长处首先获得单脉冲锁模,继而在单脉冲锁模情形下,调节 TF 锁模波长的同时仔细调节  $P_m$  和  $P_n$  值,值得注意的是在这过程中波长调谐的步长不能超过 5 nm,否则腔内增益与损耗的急剧变化可能使 NALM 进入反饱和吸收区而失锁,与此同时调谐过程中用示波器观察锁模脉冲序列,调节  $P_m$  和  $P_n$  使得单脉冲锁模达到最稳定的状态。两种策略都要求在启动锁模时,将 TF 透过波长设置在 1020~1050 nm 的范围内,否则无法启动锁模。实验中采用第二种调谐策略,获得的结果如图 5 所示。图 5 (a)为间隔 5 nm 采集的单脉冲锁模光谱,光谱都具有正色散耗散孤子锁模陡峭边沿的特点,且在波长向长波移动过程中,1030 nm 波段放大自发辐射(ASE)增加,光谱信噪比逐渐从 35 dB 下降到不足 20 dB。这是因为长波方向腔内器件损耗开始加大,并且掺镱光纤在长波处增益减小,为了维持腔内足够的峰值功率,保持 NALM 较高的透过率,必须加大 NALM 环路与主环路内的抽运功率,随着锁模脉冲增益进一步减小和腔内抽运持续加强,掺镱光纤在 1030 nm 处出现较明显的 ASE,导致在 1080 nm 处输出功率突然上升到 6.1 mW。图 5(b)为不同波长下获得稳定单脉冲锁模所需的抽运功率,红色点与黑色点分别代表主环路抽运功率  $P_m$  和 NALM 环路抽运功率  $P_n$ 。随着波长偏移至 1030 nm,  $P_m$  呈增长趋势而  $P_n$  则需要通过调节使得 NALM 内增益合适,输出稳定的脉冲序列。随着工作波长远离 1030 nm,两个环路所需的抽运功率总

体增加,这主要有两方面的原因:首先是腔内所有器件都设计工作于 1030 nm 波长处,波长漂移损耗会增加;其次,较短的掺镱光纤在 1030 nm 附近的增益最大<sup>[29]</sup>,而向两边逐渐减小。值得注意,在每一波长处,稳定单脉冲锁模对应的  $P_n$  调节范围都在 10 mW 以内,而  $P_m$  的调节范围则稍大一些,这是因为 NALM 环路的峰值功率钳制效应不允许腔内脉冲峰值功率出现剧烈变化。

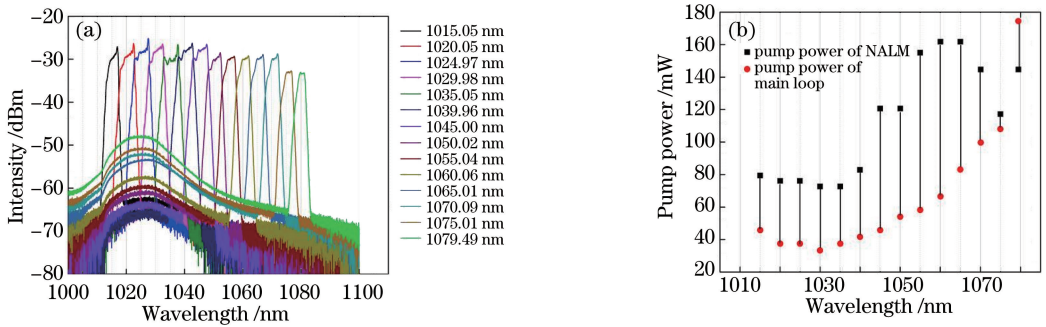


图 5 (a) 1015~1080 nm 波长可调谐锁模输出光谱;(b)不同波长单脉冲锁模所需的抽运功率  
Fig. 5 (a) Output spectrum of 1015-1080 nm tunable mode-locked laser; (b) needed pump powers of single-pulse mode-locked at different wavelength

在调谐的过程中分别测量各个波长处的输出脉冲特性随波长的变化情况如图 6 所示。图 6(a)中黑色曲线代表脉冲宽度。在 1030~1040 nm 内 FWHM 比较大且均超过 3.5 nm,随着波长超出此范围,波长带宽逐渐减小。脉宽  $\tau$  与 TBP 都同步发生变化,如图 6(a)中黑色与红色曲线所示,在 1080 nm 处脉宽最短为 7.86 ps,TBP 值的减小也说明输出脉冲的啁啾在减小。激光器在自相位调制、正常色散和光谱滤波的平衡作用下产生耗散孤子输出,随着腔内工作波长与抽运的变化,上述三者在不断建立新的平衡,因此脉宽随着工作波长而变化。图 6(b)为输出峰值功率变化情况,1080 nm 锁模输出携带过多 ASE 成分属于异常数据点,除此之外的其他波长输出脉冲的峰值功率都钳制在 50 W 以内。输出平均功率与脉宽的变化同步,从而保证峰值功率基本不变。采用频谱仪测量调谐过程中脉冲中心频率的变化,发现它随波长从 4.1325 MHz 线性变化到 4.1346 MHz,这是由于在 1  $\mu$ m 附近石英光纤的折射率  $n = n(\omega)$  与波长基本呈线性变化,波长增加折射率减小。根据重复频率  $f = c/nL$  ( $L$  为腔长),波长增加会导致重复频率上升。在调谐过程中,始终可以调节两个抽运源而获得稳定的单脉冲锁模,锁模可以在 1015~1080 nm 内任何值处稳定长时间运行。另外值得注意的是,在上述两种调谐方法下,获得的最大调谐范围都为 1015~1080 nm,且在不同波长下稳定单脉冲锁模时输出的参数没有明显变化。

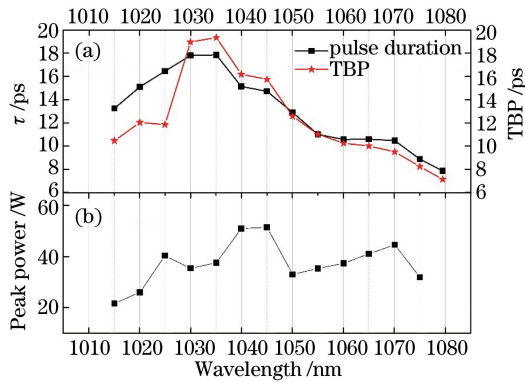


图 6 1015~1080 nm 波长可调谐锁模时对应的输出结果随波长的变化。

(a) 脉冲宽度和时间带宽积随波长的变化;(b)输出峰值功率随波长的变化

Fig. 6 Output results of 1015-1080 nm tunable mode-locked laser versus operating wavelength.

(a) Pulse durations and TBP's versus wavelength; (b) output peak powers versus wavelength

该激光器在 1015~1080 nm 范围内均具有良好的环境稳定性,可以维持数周锁模,外界环境温度  $\pm 5$   $^{\circ}$ C 内的变化不影响激光器的输出性能,而且该锁模激光器可以抵御,外界振动乃至挤压光纤。在 1030 nm 处

测试单脉冲输出功率的稳定性,结果如图 7 所示。测得平均输出功率为 2.151 mW,功率抖动性为 1.89%,功率变化标准差(STD)为 0.12 mW。结合图 3(d)良好的频谱图可以进一步说明该激光器的稳定性良好。

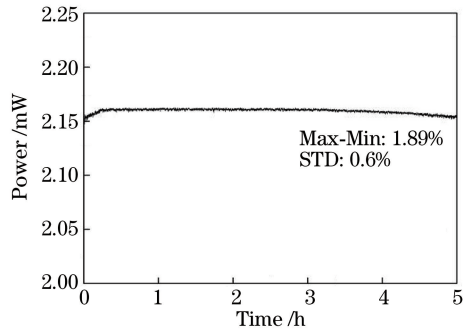


图 7 5 h 输出功率的稳定性测试

Fig. 7 Output power stability test for a duration of 5 h

## 4 结 论

报道了最大范围为 1015~1080 nm 的可调谐非线性放大环形镜锁模激光器,激光器采用全保偏光纤“8”字腔结构,仅通过调节抽运功率可自启动 NALM 耗散孤子锁模。在 1030 nm 处,输出脉冲重复频率为 4.133 MHz,脉冲宽度为 17.61 ps,且波长可从 1022.5 nm 连续调谐至 1037.5 nm。锁模波长在 1015~1080 nm 内调谐时,输出脉冲宽度在 7.86~17.80 ps 范围内变化,输出功率、光谱宽度和 TBP 也相应变化,但是激光器输出脉冲峰值功率钳制在 50 W 以内。该锁模激光器内无可饱和吸收材料,锁模运行时可免于激光损伤且运行状态不易受外部环境的影响,是长效稳定种子源的理想选择。

## 参 考 文 献

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [2] Xu C, Wise F W. Recent advances in fiber lasers for nonlinear microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 875-882.
- [3] Yang X Z, Zhang L, Jiang H W, *et al.* Actively mode-locked Raman fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19831-19836.
- [4] Tsuda S, Knox W H, Cundiff S T, *et al.* Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 454-464.
- [5] Martinez A, Sun Z P. Nanotube and graphene saturable absorbers for fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 842-845.
- [6] Sun Z P, Popa D, Hasan T, *et al.* A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser[J]. *Nano Research*, 2010, 3(9): 653-660.
- [7] Zhang H, Tang D Y, Knize R J, *et al.* Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 111112.
- [8] Luo Z C, Liu M, Liu H, *et al.* 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5212-5215.
- [9] Mao D, Zhang S L, Wang Y D, *et al.* WS<sub>2</sub> saturable absorber for dissipative soliton mode locking at 1.06 and 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27509-27519.
- [10] Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(1): 56-58.
- [11] Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei, *et al.* Figure-of-eight cavity Yb<sup>3+</sup>-doped fiber mode locked lasers[J]. *Chinese J 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.
- [12] Guo Xiongying, Yang Lingzhen, He Hucheng, *et al.* Wavelength tunable mode-locked pulse fiber laser based on figure-of-eight cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 212-215  
郭雄英, 杨玲珍, 贺虎成, 等. 8 字形腔波长可调谐锁模脉冲光纤激光器[J]. *光子学报*, 2008, 37(2): 212-215.
- [13] Zhao L M, Bartnik A C, Tai Q Q, *et al.* Generation of 8 nJ pulses from a dissipative-soliton fiber laser with a nonlinear

- optical loop mirror[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1942-1944.
- [14] 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): 10545-10551.
- [15] Agnesi A, Carra L, Di Marco C, *et al.* Fourier-limited 19-ps Yb-fiber seeder stabilized by spectral filtering and tunable between 1015 and 1085 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(11): 927-929.
- [16] Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, *et al.* Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070 nm spectral range[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1522-1524.
- [17] Zou F, Wang Z K, Wang Z W, *et al.* Widely tunable all-fiber SESAM mode-locked Ytterbium laser with a linear cavity [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92:133-137.
- [18] Lin H Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion Yb-doped figure-eight fibre laser with tunable output[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(8): 085102.
- [19] Chong A, Renninger W H, Wise F W. Environmentally-stable all-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1071-1073.
- [20] Wise F W, Chong A, Renninger W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1/2): 58-73.
- [21] Wang Leiran, Liu Xueming, Gong Yongkang, *et al.* Experimental research and theoretical study based on gain-guided soliton pulse fiber laser[J]. *Acta Physics Sinica*, 2009, 58(7): 4664-4668.  
王擂然, 刘雪明, 宫永康, 等. 基于增益诱导光纤激光器的实验研究及理论分析[J]. *物理学报*, 2009, 58(7): 4664-4668.
- [22] Tang Y X, Chong A, Wise F W. Generation of 8 nJ pulses from a normal-dispersion thulium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2361-2364.
- [23] Zhou J Q, Gu X J. 32 nJ 615 fs stable dissipative soliton ring cavity fiber laser with Raman scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 453-456.
- [24] Aguergaray C, Hawker R, Runge A F J, *et al.* 120 fs, 4.2 nJ pulses from an all-normal-dispersion, polarization-maintaining, fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(12): 121111.
- [25] Zhang L, Hu J M, Wang J H, *et al.* Tunable all-fiber dissipative-soliton laser with a multimode interference filter[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3828-3830.
- [26] Zhang Liqiang, Zhuo Zhuang, Pan Zhiyong, *et al.* Wavelength tunable Yb-doped double-clad dissipative soliton fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1202007.  
张丽强, 卓 壮, 潘志勇, 等. 可调谐掺 Yb 双包层光纤耗散孤子锁模激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1202007.
- [27] Duling I N, Chen C J, Wai P K A, *et al.* Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(1): 194-199.
- [28] Rudy C W, Urbanek K E, Digonnet M J F, *et al.* Amplified 2  $\mu\text{m}$  Thulium-doped all-fiber mode-locked figure-eight laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(11): 1809-1812.
- [29] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.