引用格式：DING Jianyi, LU Baole, WANG Kaile, et al. Wavelength Tunable Dissipative Soliton Mode-locked Fiber Laser Based on Nonlinear Amplifier Loop Mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0714002
丁建一,陆宝乐,王凯乐,等.基于非线性放大环形镜的波长可调谐耗散孤子锁模光纤激光器[J].光子学报,2021,50(7):0714002

基于非线性放大环形镜的波长可调谐耗散孤子锁模光纤激光器

丁建一[1,2,3],陆宝乐[1,2,3],王凯乐[1,2,3],陈浩伟[1,2,3],白晋涛[1,2,3]
(1 西北大学 光子学与光子技术研究所,省部共建西部能源光子技术国家重点实验室,西安 710069)
(2 国家级光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心,西安 710069)
(3 陕西省全固态激光及应用工程研究中心,陕西省光电子技术重点实验室,西安 710069)

摘　要:报道了一种基于非线性放大环形镜的"8"字形腔波长可调谐锁模掺镱光纤激光器。当泵浦功率为 240 mW 时,光纤激光器输出中心波长在 1 064.1 nm 处的耗散孤子,其光谱 3 dB 带宽为 7.7 nm,重复频率为 18.8 MHz,输出光信噪比高达 71.2 dB,脉冲宽度为 867 fs。分别通过调节偏振控制器和泵浦功率实现了锁模光纤激光器在 1 032.8～1 065.1 nm 以及 1 037.4～1 041.9 nm 内调谐输出。探究了不同锁模状态下的光谱与脉冲特性,获得了时间带宽积接近傅里叶变换极限的高斯型脉冲。该光纤激光器结构简单,易于调谐,稳定性好,可为实现波长调谐、耗散孤子锁模提供技术参考。

关键词:锁模;耗散孤子;非线性放大环形镜;波长调谐;光纤激光器;掺镱
中图分类号:TN248　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/gzxb20215007.0714002

Wavelength Tunable Dissipative Soliton Mode-locked Fiber Laser Based on Nonlinear Amplifier Loop Mirror

DING Jianyi[1,2,3], LU Baole[1,2,3], WANG Kaile[1,2,3], CHEN Haowei[1,2,3], BAI Jintao[1,2,3]
(1 *Institute of Photonics and Photon-technology, Northwest University; State Key Laboratory of Western Energy Photoelectric Technology, Xi'an* 710069, *China*)
(2 *National Optical Technology and Functional Nanomaterials International Science and Technology Joint Research Center, Xi'an* 710069, *China*)
(3 *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology, Xi'an* 710069, *China*)

Abstract: A figure-8 cavity wavelength-tunable mode-locked Ytterbium-doped fiber laser based on nonlinear amplification loop mirror is reported. When pump power is 240 mW, the dissipative soliton is output with a central wavelength of 1 064.1 nm, 3 dB bandwidth of 7.7 nm, repetition rate of 18.8 MHz, optical signal noise ratio of 71.2 dB and pulse duration of 867 fs, respectively. In addition, wavelength tunable of the mode-locked fiber laser at 1 032.8～1 065.1 nm and 1 037.4～1 041.9 nm can be achieved by adjusting the polarization controller and pump power respectively. The characteristics of the spectra and pulses in different mode-locked states are explored, and a Gaussian pulse whose time bandwidth product is close to the Fourier transform limit is obtained. The fiber laser is simple in structure and easy to tune, and

基金项目:陕西省教育厅重点实验室项目(No.18JS113)
第一作者:丁建一(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为脉冲光纤激光器。Email: jianyi.d@foxmail.com
导　　师:白晋涛(1959—),男,教授,博士,主要研究方向为新型激光技术与器件、非线性光学、纳米功能材料。Email: baijt@nwu.edu.cn
通讯作者:陈浩伟(1978—),男,教授,博士,主要研究方向为高功率全固态激光器及新型光纤激光器。Email: 67892020@qq.com
收稿日期:2021-02-04;**录用日期**:2021-03-16

has a stable performance, which provides technical reference for achieving wavelength tunable and dissipative soliton mode-locked.

Key words: Mode-locked; Dissipative soliton; Nonlinear amplifier loop mirror; Wavelength tunable; Fiber laser; Yb-doped

OCIS Codes: 140.4050; 140.7090; 140.3600; 140.3615

0 引言

脉冲光纤激光器由于其脉冲持续时间短、峰值功率高、光谱带宽宽、环境稳定性高以及成本低等光学特性引起了研究者们的广泛关注[1-3]。1 μm波段的脉冲光纤激光器在激光微加工、激光制导、光纤通信、生物光学、光谱成像等领域有着独特的应用前景[4-7],使其成为激光领域研究的热点。在过去的几十年里,科研工作者报道了产生超快脉冲激光的多种方法和技术,其中可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)和等效可饱和吸收体是实现被动锁模光纤激光器最常用的方法。可饱和吸收体通过自身的可饱和吸收效应窄化脉冲,实现超短脉冲输出。常用的可饱和吸收体一般包括半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)[8]、石墨烯[9]、碳纳米管[10]、黑磷[11]以及二维复合材料[12]等。SESAM是使用最广泛的可饱和吸收材料,但其低损坏阈值、较窄的波长工作范围、高成本和复杂的制作流程限制了自身发展[13]。其他可饱和吸体也都因为自身稳定性低、输出功率较低、难以商业化受到了一定的局限[14]。等效可饱和吸收体主要通过光偏振干涉引起的滤波或快速饱和吸收效应实现锁模,即非线性偏振旋转技术(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)、非线性放大环形镜(Nonlinear Amplifier Loop Mirror, NALM),非线性光纤环形镜(Nonlinear Optical Loop Mirror, NOLM)[15-18],非线性放大环形镜和非线性光纤环形镜也可称为人造可饱和吸收体。相比于其他锁模方法,非线性放大环形镜实现的锁模激光器具有全光纤易于集成、成本较低、可调节性高、耐受高能量脉冲等优势[19-20]。

为了在锁模光纤激光器中实现波长调谐和切换的锁模运行,科研人员提出了多种方法。通常需要在谐振腔内加入调谐性光学器件,如波长选择器、可调滤波器等,另外也可在腔内引入色散介质增加腔内色散来实现波长调谐[21]。2009年,李喆等在“8”字腔内加入可调谐光纤光栅滤波器,通过调节光纤光栅滤波器实现激光器输出锁模脉冲的中心波长在1 047～1 055 nm范围内连续可调[22]。但利用光纤光栅得到的波长调谐范围较小,且光纤光栅固有的带宽也限制了锁模光谱的宽度,导致锁模光谱带宽只有1 nm。2010年,FANG Q等报道了一种基于碳纳米管的波长可调谐被动锁模光纤激光器,通过改变光纤激光器中锥形光纤的长度,获得了波长调谐范围大于50 nm的锁模脉冲输出[23]。2018年,张怡静等通过热电冷却仪调节光纤激光腔中高双折射光纤的温度,锁模状态下得到了中心波长为1 952～1 967 nm的调谐范围[24]。以上研究报道虽然都实现了不同波段的波长调谐超短脉冲光纤激光器,但大都利用了特殊设备或光纤结构,激光器制造成本高、可操作性差,不利于工业化。

本文展示了“8”字形腔全光纤结构的波长可调谐锁模光纤激光器,研究了基于非线性放大环形镜的全正色散耗散孤子特性。锁模过程中,非线性放大环形镜不仅起到很好的可饱和吸收作用,还作为幅度均衡器有效削弱了增益介质均匀加宽引起的模式竞争。在锁模状态下通过两种波长调谐机制分别获得了32.3 nm、4.5 nm的调谐范围,且激光器在调谐范围内锁模稳定。此外还探究了不同锁模状态下光谱、脉宽的特性,以及输出功率和泵浦功率之间的关系。

1 实验装置及锁模机理

实验装置如图1所示。采用最大输出功率为650 mW、中心波长为980 nm的单模激光二极管(Laser Diode, LD)作为泵浦源,泵浦光通过980/1 064 nm波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)耦合入腔内,采用一段长为40 cm的掺镱光纤(Ytterbium-Doped Fiber, YDF, Yb1200-4/125)作为增益介质,分光比为50∶50的光纤耦合器(Optical Coupler, OC)连接非线性放大环形镜和单向环,在单向环中熔接一个偏振无关隔离器(Polarization Independent Isolator, PI-ISO),用来保持单向环中的光单向传播。同时在非线性放大环形镜和单向环中均加入偏振控制器(Polarization Controller, PC),用来调节光的偏振态以及改变光传输时的损耗。采用10∶90光纤耦合器(OC1)的10%端口作为激光输出端。腔内传输光纤以及各个

器件的尾纤均为单模光纤，光纤激光器总长约为10.9 m。掺镱光纤和单模光纤的群速度色散分别为24.22 $ps^2 \cdot km^{-1}$和21.91 $ps^2 \cdot km^{-1}$，从而得出腔内净色散约为0.24 ps^2。实验中使用光谱分析仪（OSA，Yokogawa，AQ6370C）、示波器（OSC，Agilent DSO9104A）、超快光电探测器（Newport，1611）、频谱分析仪（Agilent Technologies，N9000A）、自相关仪（APE，PulseCheck-50）以及功率计（MAESTRO，Gentec-EO）实时监测锁模脉冲特性。

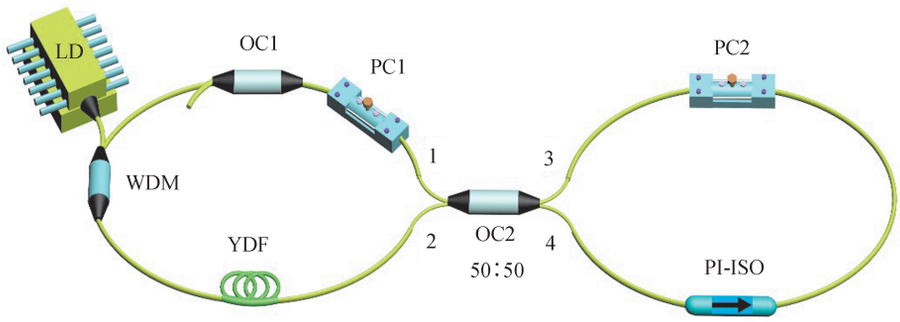

图1　锁模光纤激光器装置

Fig.1　Experimental setup of the mode-locked fiber laser

受激辐射光由OC2（50∶50）进入单向环中，分为强度相同且方向相反的两束光，其中与PI-ISO运行方向相反的光被损耗掉，与PI-ISO方向相同的光（输入光功率为P_{in}）在单向环中运行一周后由OC2的3端口进入非线性放大环形镜，再次被分为强度相同、方向相反的两束光。这两束光在NALM中沿相反的方向运行一周后引起的非线性相移不同，然后在OC2处产生干涉再次进入单向环中，此时3端口出射光为NALM的反射光，4端口出射光即为NALM的输出光P_T，输出光和输入光功率的比值即为NALM的透射率T[25-26]

$$T=\frac{P_T}{P_{in}}=G\left\{1-\rho\left\{1+\cos\left[\rho(1-G)\gamma P_{in}L+\phi\right]\right\}\right\} \tag{1}$$

式中，G为NALM的增益系数，$\rho=0.5$为OC2的分光比，$\gamma=2\pi n_2/\lambda A_{eff}\approx 0.0038$，为光纤非线性系数，$L$为NALM的长度，约为7.6 m，$\phi$是由PC1造成的不同偏振方向上的相位差。因此$T$可近似表达为

$$T\approx\frac{G}{2}\{1-\cos[\phi-0.0144(G-1)P_{in}]\} \tag{2}$$

根据式（2），在增益系数G一定的情况下，可以通过改变ϕ来改变透过率T。当$G=8$时，不同ϕ值下透射率T随输入功率的变化如图2所示，由于掺镱光纤的放大作用，模拟得到NALM的透过率大于1。对于PC1设定的某些ϕ（$\pi<\phi<2\pi$），透射率随输入功率的增加而增加，当初始光信号通过NALM时，低强度光和脉冲前后沿获得的增益比高强度脉冲中心的少，脉冲变得更窄，经过多次往返后，就形成了稳定的锁模脉冲链，所以NALM充当了可饱和吸收体。如果将ϕ调整为其他值（$0<\phi<\pi$），则NALM的透射率随输入功

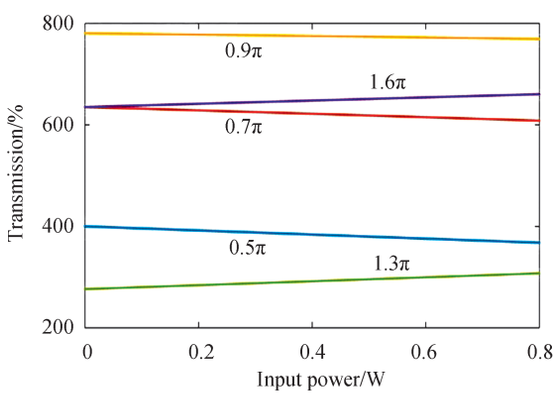

图2　不同ϕ值下NALM的传输特性

Fig.2　The transmission characteristic of NALM for different ϕ values

率的增加而降低，低强度光比高强度光获得的增益多，此时NALM充当幅度均衡器，以削弱掺镱光纤受激辐射谱中的模式竞争，使掺镱光纤变为非均匀加宽。由式(1)可以看出，如果L只有数十米或更短，则NALM通过调整PC充当幅度均衡器的作用就较弱，意味着NALM更适合于产生超短脉冲[27]。

2 实验结果与讨论

2.1 1064.1 nm锁模输出特性研究

实验过程中逐渐增加泵浦功率至150 mW时，通过调节偏振控制器，获得了稳定的锁模脉冲输出。泵浦功率在150～650 mW范围内，通过调节偏振控制器均可以保持稳定的单波长锁模状态。泵浦功率为240 mW时的输出功率为4.04 mW，对应的锁模脉冲输出特性如图3所示。其中图3(a)给出了锁模的中心波长为1 064.1 nm，3 dB带宽为7.7 nm。可以看出光谱整体为矩形状，两侧为陡峭的下降沿符合耗散孤子锁模的特性。图3(b)显示了的－290～290 ns内示波器脉冲序列，脉冲周期53.2 ns对应于光纤激光器的总长度，插图为时间跨度为10 ms的脉冲序列。将频谱仪分辨率带宽调至1 Hz得到的射频频谱如图3(c)所示，基频和光信噪比(Optical Signal Noise Ratio, OSNR)分别为18.8 MHz和71.2 dB。图3(c)中的插图给出了0～1 000 MHz扫描范围的射频频谱，表明锁模光纤激光器运行时的高稳定性。图3(d)绘制了输出脉冲相应的自相关曲线，通过假设Gauss函数对脉冲轮廓进行拟合，可以得到锁模脉冲的宽度为867 fs，从而得出时间带宽积(Time Bandwidth Product, TBP)为1.767。

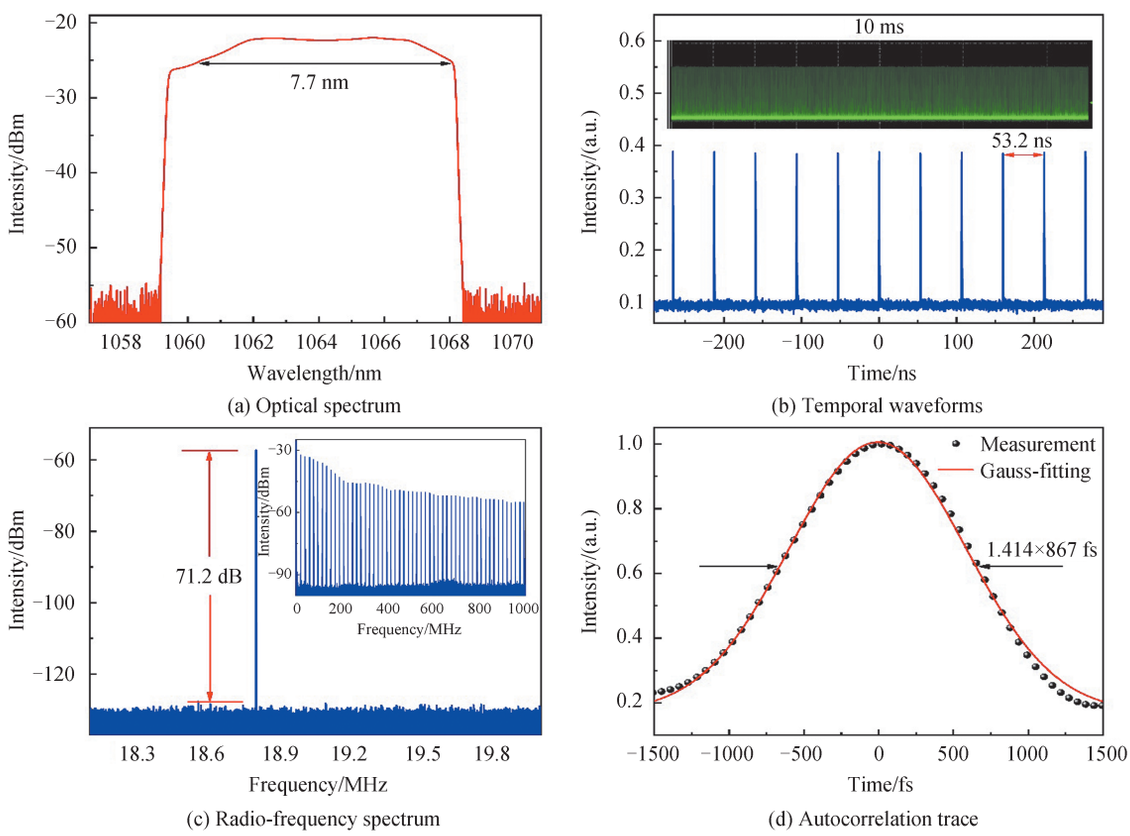

图3 锁模光纤激光器的输出特性

Fig.3 The output characteristics of mode-locked fiber laser

2.2 固定泵浦功率下1 032.8~1 065.1 nm波长可调谐锁模

当泵浦功率为240 mW时，锁模处于很稳定的状态，此时非常轻微地朝一个方向旋转PC1，锁模中心波长也会朝一个方向发生移动，如果朝与之前相反的方向将PC1旋转回来，那么锁模的中心波长也会移动到原来的位置，即这种波长调谐方式是单调可逆的过程。调节PC2对波长移动没有明显的作用，但通过PC2挤压光纤可以使锁模光谱顶部的曲线更加平滑。值得注意的是，激光腔内没有使用任何可调谐滤波器件，

实验中所用器件的中心工作波长都是1 064 nm且具有宽带的运转能力，这支持了锁模光谱可以在1 032.8～1 065.1 nm范围内可调谐。波长移动是因为，通过调节偏振控制器PC1，使NALM起到了一些幅度均衡器的作用，低强度光透过NALM时比高强度光获得的增益多，NALM削弱了掺镱光纤受激辐射谱中的模式竞争，掺镱光纤由均匀加宽变为非均匀加宽[28]，从而导致NALM光谱透射峰的移动，同时再调节PC2使锁模态更加稳定，即在1 032.8～1 065.1 nm的波段内实现了可调谐耗散孤子，光谱形状几乎没有发生变化，如图4所示。锁模光谱的3 dB带宽的变化范围为6.9～8.1 nm，其平均值约为7.6 nm。锁模光谱中心波长移动过程中，注意到在1 052～1 058 nm范围内对应光谱的3 dB带宽比调谐范围内其他光谱的略宽，这是主要由掺杂光纤的增益在该波段范围内较强造成的。

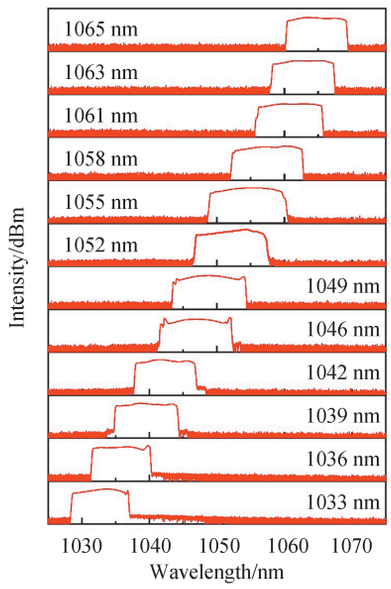

图4　240 mW泵浦功率下的波长调谐特性

Fig.4　Wavelength tuning characteristics under pump power of 240 mW

2.3　改变泵浦功率对锁模波长调谐特性的影响

将泵浦功率降至150 mW，调节偏振控制器使锁模达到稳定状态，此时锁模光谱的中心波长为1 041.9 nm。在保持偏振控制器和其他器件均不变的情况下，每隔30 mW逐渐增加泵浦功率，锁模中心波长随之发生约1.1 nm的蓝移，光谱宽度略微展宽，且光谱右侧猫耳朵变高，如图5所示。当泵浦功率增加至270 mW时，锁模中心波长移动至1 037.4 nm，锁模仍处于稳定状态，超过300 mW时锁模状态开始不稳定。因此通过改变泵浦功率获得了4.5 nm的波长调谐范围，这是由NALM具有高非线性效应，以及随着泵浦功率增加掺镱光纤的增益谱向最强增益峰（1 030 nm附近）略微偏移造成的。同样在其他稳定锁模状态下改变泵浦功率，光

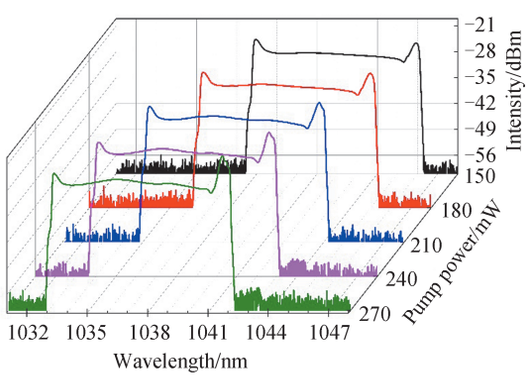

图5　仅改变泵浦功率时的锁模光谱

Fig.5　Spectra of mode-locked in different pump powers

谱的中心波长也都蓝移了约4 nm，且该过程也是单调可逆的。

2.4 锁模光纤激光器其他相关特性研究

探究了不同泵浦功率下锁模输出光谱与脉冲宽度的特性。通过调节偏振控制器使锁模在不同泵浦功率下达到稳定状态，如图6(a)、(c)、(e)分别是240 mW、270 mW、300 mW泵浦功率下获得的锁模光谱，其中心波长分别为1 064.1 nm、1 053.3 nm、1 049.7 nm，对应3 dB带宽分别为7.7 nm、8.6 nm、9.4 nm。图6(b)、(d)、(f)分别是输出脉冲相应的自相关曲线，通过Gauss函数对脉冲轮廓拟合得到的脉宽为867 fs、417 fs、238 fs，分别对应的时间带宽积为1.767、0.965、0.602。可以看到TBP的值逐渐接近高斯型脉冲傅立叶变换极限(0.441)。因为随着锁模光谱的展宽，被锁定相位的纵模数越多，对应的频域就会变宽，脉冲在时域上被压缩，进而得到更窄的傅立叶变换极限脉冲。

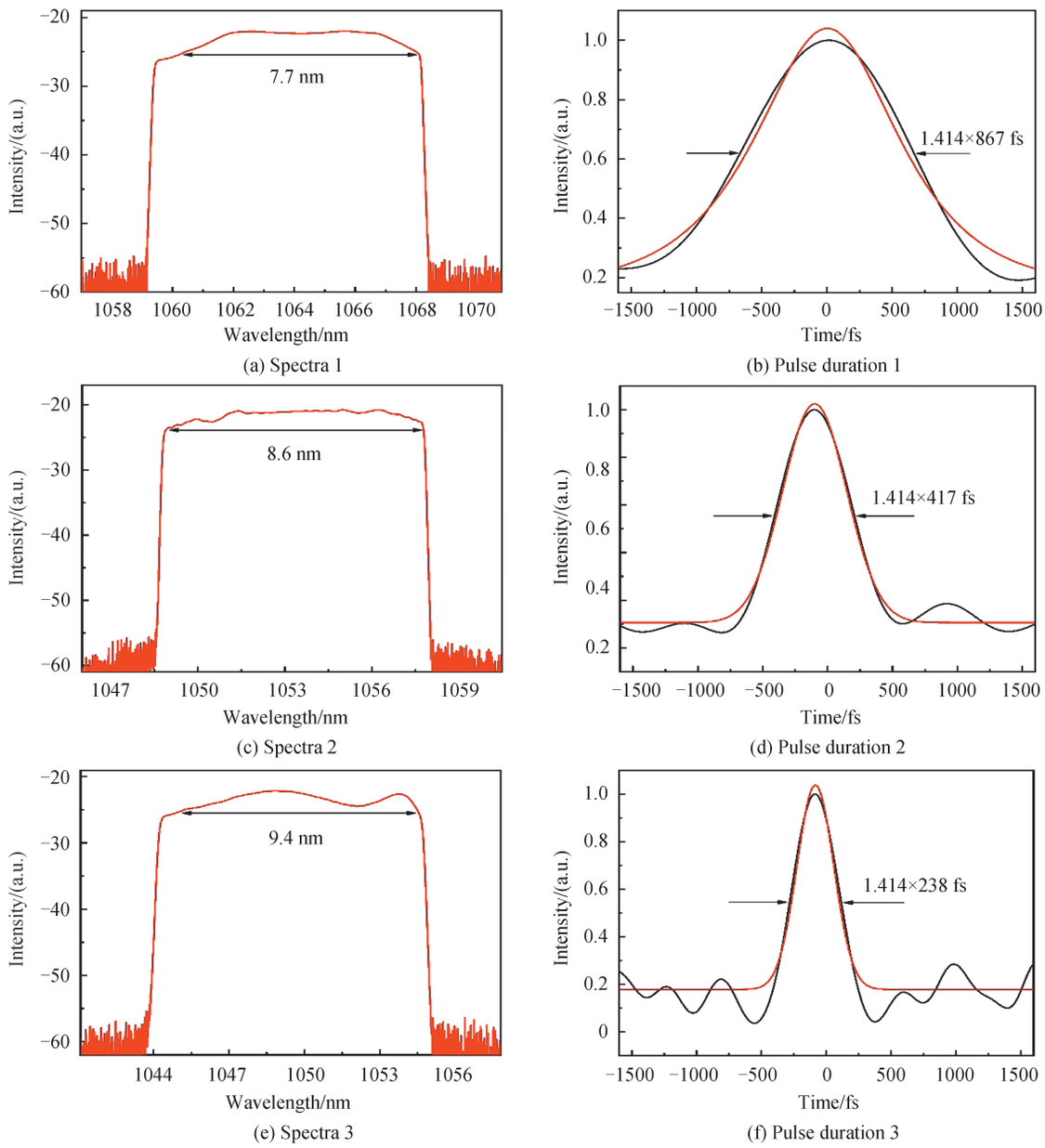

图6 不同锁模状态下的光谱和脉冲宽度

Fig.6 Spectra and pulse duration in different mode-locked state

图7给出了锁模光纤激光器输出功率与泵浦功率的关系。锁模阈值150 mW对应的输出功率为2.64 mW。输出功率随泵浦功率线性增加，但泵浦功率超过510 mW后脉冲出现分裂，导致输出功率开始下降，整体输出功率斜率为1.34%。较低的斜率效率可归因于NALM的高可饱和吸收性、单向环中隔离器对光的损耗，

以及腔中其他器件的插入损耗。

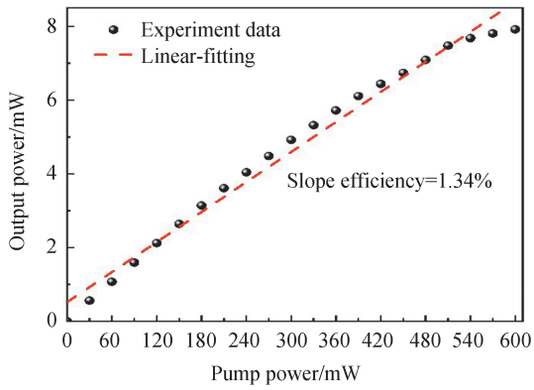

图7　输出功率与泵浦功率的关系

Fig.7　Output power versus pump power

3　结论

本文基于非线性放大环形镜的可饱和吸收效应实现了1 μm波段耗散孤子锁模光纤激光器。通过调节偏振控制器改变腔内损耗，锁模激光器获得了32.3 nm的波长调谐范围，同时在一定范围内改变泵浦功率，稳定锁模状态下实现了4.5 nm的波长调谐。锁模阈值功率为150 mW，并且在150～650 mW范围内均可获得稳定的耗散孤子锁模脉冲。当泵浦功率为240 mW时，在中心波长1 064.1 nm处，获得了光谱半高全宽为7.7 nm、重复频率为18.8 MHz、脉冲宽度为867 fs的稳定耗散孤子，71.2 dB的信噪比证明激光器在锁模状态下具有高稳定性。此外，通过不断调节锁模状态，获得了时间带宽积接近傅里叶变换极限的高斯型脉冲。该光纤激光器结构简单、可调性好、稳定性高，可用作超短脉冲种子光源。

参考文献

[1] YAN D, LI X L, ZHANG S M, et al. L-band wavelength-tunable dissipative soliton fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 739-748.

[2] LIU X M, HAN D D, SUN Z P, et al. Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2718.

[3] FERMANN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 868-874.

[4] CRUZ F C, MASER D L, JOHNSON T, et al. Mid-infrared optical frequency combs based on difference frequency generation for molecular spectroscopy[J]. Optics Express, 2015, 23(20):26814-26824.

[5] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.

[6] MILLOT G, PITOIS S, YAN M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2016, 10(1): 27-30.

[7] YU Lei, XU Mingming, CHEN Jiexiang, et al. Optical system of the hyper-spectral imager for the underwater environment and targets monitoring[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1101003.
于磊，徐明明，陈结祥，等. 水下环境与目标监测高光谱成像仪光学系统[J]. 光子学报，2018，47(11)：1101003.

[8] ZOU F, WANG Z, BAI Y, et al. Widely tunable all-fiber SESAM mode-locked ytterbium laser with a linear cavity[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 133-137.

[9] FU B, HUA Y, XIAO X, et al. Broadband graphene saturable absorber for pulsed fiber lasers at 1, 1.5, and 2 μm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 411-415.

[10] GUO H Y, HOU L, WANG Y G, et al. Tunable ytterbium-doped mode-locked fiber laser based on single-walled carbon nanotubes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2370-2374.

[11] LING Y, Black phosphorus saturable absorber for dual-wavelength polarization-locked vector soliton generation [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32380.

[12] JIANG T, YIN K, WANG C, et al. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect[J]. Photonics Research, 2020, 8(1): 78-90.

[13] HASAN T, SUN Z P, WANG F Q, et al. Nanotube - polymer composites for ultrafast photonics [J]. Advance Materials, 2009, 21(38): 3874-3899.

[14] ZHAO Xiang, LIU Yang, ZHOU Lian, et al. All-normal-dispersion polarization-maintaining Yb-doped fiber laser based

on nonlinear amplifying loop mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508025.
赵翔,刘洋,周廉. 全正色散非线性放大环形镜保偏掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508025.
[15] TANG D Y, ZHAO L M, ZHAO B, et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers[J]. Physical Review A, 2005, 72(4): 043816.
[16] ZHAO J Q, ZHOU J, JIANG Y Y, et al. Nonlinear absorbing-loop mirror in a holmium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 6069-6075.
[17] DORAN N J, WOOD D. Nonlinear-optical loop mirror[J]. Optics Letters, 1988, 13(1): 56-58.
[18] WEN Z R, WANG K L, CHEN H W, et al. Stable-, period-N- and multiple-soliton regimes in a mode-locked fiber laser with inconsistently filtered central wavelengths[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28033-28044.
[19] ZHAO J Q, LI L, ZHAO L M, et al. Cavity-birefringence-dependent h-shaped pulse generation in a thulium-holmium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(2): 247-250.
[20] WANG X F, PENG X L, ZHANG J H. Multistate passively mode-locked thulium-doped fiber laser with nonlinear amplifying loop mirror[J]. Applied Optics, 2018, 57(13): 3410-3414.
[21] SHEN P, CHAN K T. Electrical wavelength tunable and multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(16): 1954-1956.
[22] LI Zhe, ZHAO Wei, ZHANG Wei. Continuously tuning fiber lasers with wavelength of mode-locked pulses[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 7-10.
李喆,赵卫,张伟. 锁模脉冲波长连续可调谐光纤激光器[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 7-10.
[23] FANG Q, KIEU K, PEYGHAMBARIAN N. An all-fiber 2-m wavelength-tunable mode-locked laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(22): 1656-1658.
[24] ZHANG Yijing, LIU Jiang, WANG Pu. All-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001003.
张怡静,刘江,王璞. 全正色散非线性放大环形镜保偏掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001003.
[25] LIU X S, LI Z, LUO S Y, et al. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a nonlinear amplifying loop mirror assisted by un-pumped EDF[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7088-7094.
[26] WANG Xiaofa, LIU jinghui, JIN Zenggao. State-switchable multi-wavelength and dissipative soliton mode-locked Tm-doped fiber laser based on a combination of nonlinear amplifying loop mirror and Lyot filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0414001.
王小发,刘经惠,靳增高. 基于非线性放大环形镜和Lyot滤波器的多波长与耗散孤子锁模态开关型掺铥光纤激光器[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0414001.
[27] LIU X S, LI Z, LIU J M, and SHEN X H. Dual-state multiwavelength fiber laser: nanosecond pulses and tunable continuous waves[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(17): 1737-1740.
[28] JIN X X, WANG X, WANG X L, and ZHOU P. Tunable multiwavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8260-8264.

Foundation item: Key Laboratory of Photoelectron of Education Committee Shaanxi Province, China(No.18JS113)