

文章编号: 1000-7032(2025)09-1722-07

基于NALM被动锁模的超短脉冲掺铒光纤激光器

叶海钦, 王 蓓*, 王国政, 赵 辉, 刘诗涵, 薛明昆, 贾惟元

(长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 报道了一种基于非线性放大环形镜(NALM)的“8”字形腔锁模掺铒光纤激光器, 利用非线性放大环形镜作为等效可饱和吸收体, 在1.55 μm 波段实现了锁模超短脉冲激光输出。在泵浦功率为245 mW时, 激光器实现自启动锁模工作, 输出功率为1.58 mW, 重复频率为12.75 MHz, 光谱中心波长为1 564.62 nm, 3 dB带宽为5.08 nm, 脉冲宽度为590 fs。当泵浦功率以等量增加时, 锁模脉冲的光谱宽度增加、脉冲宽度减小, 在泵浦功率400 mW时, 得到最大的3 dB光谱宽度为5.92 nm, 此时对应双曲正割拟合最小脉冲宽度为488 fs。

关键词: 光纤激光器; 被动锁模; 超短脉冲; 非线性放大环形镜; 掺铒光纤

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250101

CSTR: 32170.14.CJL.20250101

NALM-based Passively Mode-locked Ultrashort Pulse
Erbium-doped Fiber Laser

YE Haiqin, WANG Ji*, WANG Guozheng, ZHAO Hui, LIU Shihan, XUE Mingkun, JIA Weiyuan

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: jiji_w@163.com

Abstract: This paper reports a figure-8 cavity mode-locked erbium-doped fiber laser based on a nonlinear amplifying loop mirror (NALM). By utilizing the NALM as an equivalent saturable absorber, mode-locked ultrashort pulse laser output in the 1.55 μm band was achieved. At a pump power of 245 mW, the laser achieved self-starting mode-locking with an output power of 1.58 mW, a repetition rate of 12.75 MHz, a central wavelength of 1 564.62 nm, a 3 dB spectral bandwidth of 5.08 nm, and a sech^2 -fitted pulse width of 590 fs. When the pump power was increased in equal increments, the spectral width of the mode-locked pulses broadened, while the pulse width shortened. At the maximum pump power of 400 mW, the maximum 3 dB spectral width of 5.92 nm was obtained, corresponding to the minimum sech^2 -fitted pulse width of 488 fs.

Key words: fiber laser; passive mode-locking; ultrashort pulse; nonlinear amplifying loop mirror; erbium-doped

1 引 言

超短脉冲激光具有皮秒至飞秒量级的脉冲持续时间、极高的峰值功率, 在工业与科学研究领域均展现出广阔的应用前景。超短脉冲激光能够对热效应敏感^[1]或需极端光强条件^[2]的对象实施精密加工, 在超快强场物理与阿秒科学^[3]、精密微纳

制造^[4]、先进光谱技术^[5]以及生物医学^[6]等多个尖端科技领域展现出应用潜力。锁模技术作为实现超短脉冲激光的重要手段, 受到各界广泛的关注。

迄今为止, 人们已提出了多种不同结构的被动锁模光纤激光器。近年来, 基于各类可饱和吸收体(Saturable absorber, SA)材料的锁模激光器被广泛研究, SA材料包括石墨烯^[7]、碳纳米管^[8]、拓扑绝

收稿日期: 2025-04-17; 修订日期: 2025-05-08

基金项目: 吉林省科技厅资助项目(20220402021GH)

Supported by Science and Technology Department of Jilin Province (20220402021GH)

缘体^[9]、过渡金属硫化物^[10]、黑磷^[11]以及技术最为成熟的半导体可饱和吸收镜(Semiconductor saturable absorber mirrors, SESAM)^[12]等。然而,这类可饱和吸收材料通常存在损伤阈值较低、光学特性随时间退化等问题,且基于这些材料的光纤激光器对于机械振动和热扰动较为敏感。因此,采用等效SA实现全光纤锁模的超短脉冲产生方案备受关注。目前,等效SA主要通过以下技术实现:非线性偏振旋转(Nonlinear polarization rotation, NPR)^[13-14]、非线性光学环形镜(Nonlinear optical loop mirror, NOLM)^[15]和非线性放大环形镜(Nonlinear amplifying loop mirror, NALM)^[16]。这些技术主要依赖于非线性克尔效应,通过激光腔内的非线性损耗调制实现脉冲整形。相较于NPR技术易受温度波动和机械振动等环境因素干扰的局限性,NOLM和NALM展现出显著优势,具有更快的响应时间、更高的抗环境干扰能力^[17-18],同时与NOLM相比,NALM具备更强的自启动锁模能力、更稳定的超短脉冲输出以及更强的环境稳定性,在工业级超快激光器中获得更广泛的应用。

2013年,Aguergaray等通过引入双增益介质结构,首次实现了“8”字形NALM光纤激光器的自启动,中心波长为1 027 nm、脉冲能量为0.3 nJ、脉冲宽度为344 fs^[19]。一年后,他们将相同结构激光器的脉冲能量提升到4.20 nJ^[20],自此NALM锁模光纤激光器不断发展。2021年,Ma等^[21]报道了一种基于NALM的色散补偿锁模掺铒光纤振荡器,在54 MHz重复频率和51 mW输出功率下,实现了压缩后脉冲持续时间88 fs和亚飞秒定时抖动。2022年,Han等^[22]报道了一种稳定的全保偏NALM被动锁模掺铒光纤激光器,使用 $\pi/2$ 非互易自由空间相移器,在孤子运行状态下实现了中心波长1 565.70 nm、3 dB光谱带宽24.60 nm的稳定脉冲锁模,脉冲序列的重复率为98.13 MHz,直接输出脉冲宽度为109 fs。然而这并非全光纤结构,系统结构复杂、操作繁琐,需要精细计算相移器位置和角度。

NALM锁模技术作为被动锁模的重要手段,在1 μm 、2 μm 波段光纤激光器中的应用已经十分成熟,然而,关于在1.5 μm 波段全光纤结构的NALM锁模激光器研究报道比较匮乏。2018年,Sun等展示了一种全保偏NALM的锁模掺铒光纤激光器,在1.5 μm 波段输出了2.5 ps的超短脉冲,压缩后为660 fs^[23];2023年,Stoliarov等报道了一款基于

NALM的全保偏色散管理掺铒光纤激光器,最短脉宽为0.78 ps^[24];2023年,Lang等报道了一种基于NALM的全光纤激光器,最短脉宽为549 fs,在1 556.53 nm处,脉冲能量达到0.34 nJ^[25]。

本文报道了一种工作在1.5 μm 波段的“8”字形腔超短脉冲掺铒光纤激光器,采用NALM作为等效可饱和吸收体,该激光器在泵浦功率为245 mW时,实现了飞秒级锁模脉冲序列的自启动,根据光谱波形判断为传统孤子锁模,其中心波长为1 564.62 nm,3 dB带宽为5.92 nm,脉冲宽度为590 fs,脉冲重复频率为12.75 MHz。当泵浦功率为400 mW时,达到傅里叶变换极限的最短脉冲宽度为488 fs,脉冲能量为0.236 nJ。本文系统性研究NALM锁模机制在1.5 μm 波段的脉冲动力学特性,为高性能通信波段超短脉冲种子源的研究提供了重要实验依据。

2 实 验

2.1 NALM被动锁模掺铒光纤激光器实验结构

实验装置如图1所示,由两个环形腔构成典型的“8”字形腔,包括一个NALM和一个单向环,NALM和单向环通过40:60的光耦合器(OC1)连接。980/1 550 nm的波分复用器(WDM)、0.8 m长的掺铒光纤(EDF,型号为Er80-8/125,其在1 530 nm的峰值吸收为80 dB/m)、偏振控制器(PC1)组成了NALM,其中的EDF由最大输出功率为600 mW的980 nm半导体激光器(LD)泵浦。隔离器(ISO)、偏振控制器(PC2)以及一个分光比为10:90的光耦合器(OC2)组成了单向环,OC2的10%端口用作激光输出测量,90%端口输出的光脉冲继续在腔内循环。ISO保持单向环中光束的逆时针单向传输,两个偏振控制器PC1和PC2用来调节腔内偏振态以及光束传输时的损耗。所有器件的尾纤均采用标准的SMF-28e光纤,总腔长为16.07 m。OC1分光

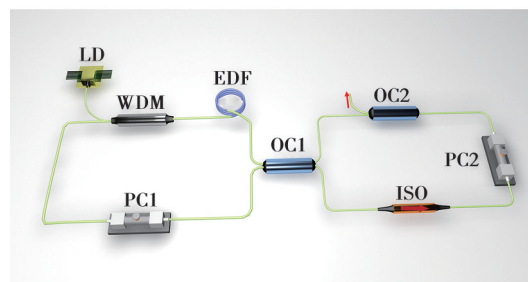


图1 NALM被动锁模掺铒光纤激光器装置图

Fig.1 Schematic diagram of the NALM-based passively mode-locked erbium-doped fiber laser

比的选择对于NALM至关重要,因此在研究中进行了OC1分光比为30:70的对比实验,最终结果表明,高分光比的耦合器会导致腔内损耗显著增加,降低净增益。一方面会使激光器的锁模阈值增加,并影响响应时间和自启动速度;另一方面会引发多脉冲竞争或脉冲能量不稳定,不利于获得脉冲宽度更小的孤子脉冲。

实验中使用以下仪器对激光器的输出信号进行测量:光谱仪(YOKOGAWA, AQ6375)、频谱分析仪(Agilent, E4407B)、APE自相关仪(APE, PulseCheck 150)、示波器(TeKtronix, MDO3054)、功率计(Thorlabs, PM100D)。

2.2 NALM锁模机理

980 nm的泵浦光在EDF中被吸收后,产生1550 nm附近的受激辐射光,受激辐射光经40:60的OC1进入单向环结构时,首先被分为两束相反传输、强度不同的激光,分别为顺时针分量与逆时针分量。其中顺时针分量的光束被ISO阻隔抑制并损耗掉,而逆时针分量的光束在完成单向环一周传输后经OC1回到NALM腔内,即为NALM的输入光,功率表征为 P_{in} 。在NALM内部,激光再次被分束为强度不同的两束反向传输光,各自经历环形腔循环后,由于介质的非线性作用会累积各自不同的相位偏移。当这两束携带非对称相位差的光返回OC1时,发生干涉叠加并再次进入单向环中。此时,在ISO作用下顺时针分量的光束

依旧被阻隔,而逆时针分量的光束即为NALM的透射光,功率表征为 P_{tr} ,最终NALM系统的透射特性通过透射率 $T=P_{tr}/P_{in}$ 表征,公式如下^[26]:

$$T = \frac{P_{tr}}{P_{in}} = 1 - 2\alpha(1 - \alpha) \{1 + \cos[(1 - \alpha - g\alpha)\gamma P_{in}L + \varphi]\}, \quad (1)$$

其中, g 为NALM的增益系数; α 为OC1的分光比,本装置中 $\alpha=0.6$; γ 为光纤非线性系数; L 是NALM环路长度,为16.07 m; φ 为腔内不同偏振态造成的相位差。

当脉冲在腔内传输时,由于NALM透射特性对于强度的依赖,脉冲中心能量较强部分会获得更多的非线性相移,因此具有更高的透射率;反观脉冲两翼部分能量较低,非线性相移积累较少,因此更多地被反射。当脉冲通过2×2耦合器OC1时,能量较高部分被透过,能量较低部分被削弱,起到等效可饱和吸收体的作用,实现光纤激光器的锁模工作。

基于上述理论基础,利用Matlab对NALM的透射函数进行模拟仿真,结果如图2所示。NALM的透射率 T 随入射光功率 P_{in} 的增加呈现周期变化,在实际操作中我们通过调节PC1和PC2的偏转角度控制 P_{in} 的大小,以此控制NALM的透射率。在其他条件不变的情况下,将分光比 α 分别设置为0.6, 0.7, 0.9,对应变化趋势如图2(a)所示。可以看到,随着OC1分光比的增加,透射率的周期变短,调制深度也随之减小,而较大的调制深度可以获得更大脉冲能量、更短脉冲宽度的锁模激光,因此研究过

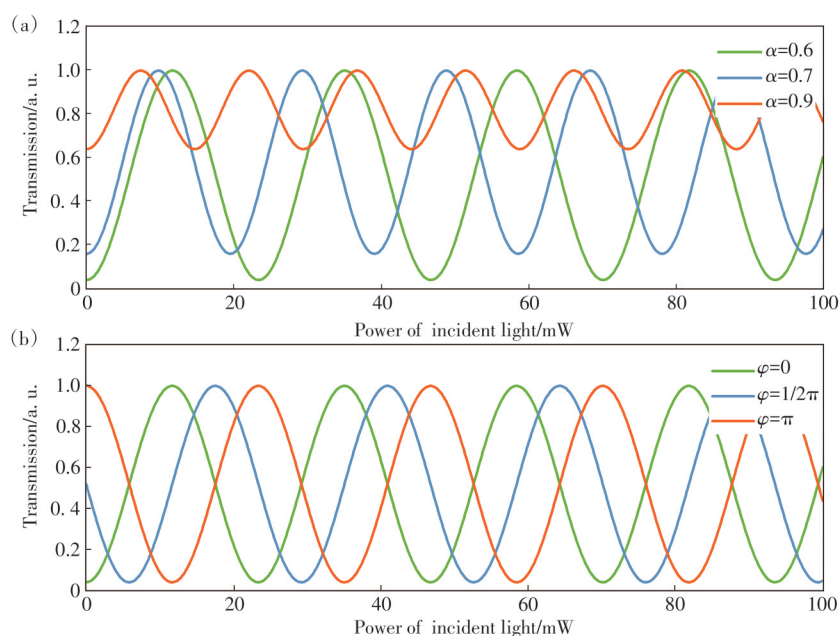


图2 NALM透射率模拟曲线。(a) $\alpha=0.6, 0.7, 0.9$ 时的透射率;(b) $\varphi=0, 1/2\pi, \pi$ 时的透射率

Fig.2 NALM transmittance simulation curves. (a) $\alpha=0.6, 0.7, 0.9$. (b) $\varphi=0, 1/2\pi, \pi$

程中我们选择OC1的分光比为40:60。将相位差 φ 分别设置为0、 $1/2\pi$ 、 π ,对应的变化趋势如图2(b)所示。可见,其对NALM透射率的影响主要表现在相移上,不会对周期与调制深度产生影响。

3 结果与讨论

3.1 NALM锁模脉冲输出特性结果与分析

当LD输出的泵浦功率为245 mW时,通过调节PC1和PC2后可以获得稳定的锁模脉冲激光输出,输出功率为1.58 mW。此外,后续多次实验结果表明,该状态下的激光器,每次启动无需重新调

整PC即可进入锁模状态,锁模阈值为245 mW,因此该激光器拥有自启动能力。

图3(a)为NALM锁模光纤激光器的脉冲序列图,此时的脉冲时间间隔为78.43 ns,重复频率为12.75 MHz,其中插图为4 μ s长时域范围内的脉冲序列,可以看出脉冲振幅波动不大,说明锁模激光器的输出脉冲稳定。测得此时的脉冲光谱如图3(b)所示,可以观察到脉冲光谱中心波长为1564.62 nm,3 dB带宽为5.08 nm。该光谱以中心波长为中轴线,两侧带有近乎对称的Kelly边带,是典型的传统孤子标志,同时又有两段陡峭的下降边沿。

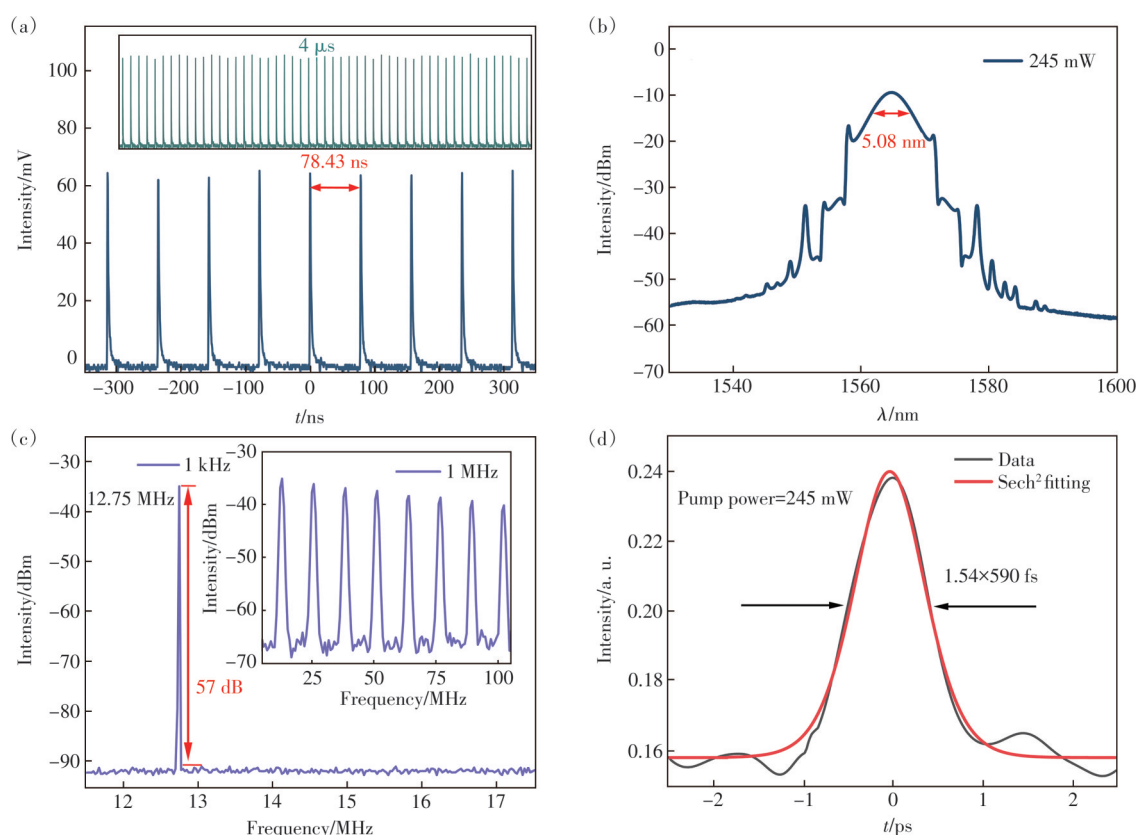


图3 NALM锁模脉冲的输出特性。(a)脉冲序列图;(b)光谱;(c)频谱;(d)自相关曲线

Fig.3 Output characteristics of NALM mode-locked pulses. (a) Pulse train. (b) Optical spectrum. (c) RF spectrum. (d) Auto-correlation trace

计算腔内净色散为 -0.38 ps^2 ,处于接近零色散的反常色散区,腔内自相位调制(Self-phase modulation, SPM)与群速度色散(Group velocity dispersion, GVD)相互抵消,实现对波形的整形,并保持脉冲形状和频谱的稳定。泵浦功率245 mW时,锁模脉冲频谱如图3(c)所示,频谱仪分辨率为1 kHz时的噪声抑制比为57 dB,图3(c)的插图为100 MHz长范围的频谱图。图3(d)所示为锁模脉冲的自相关曲线,采用双曲正割函数对自相关轨迹进行拟合,得到此时的自相关轨迹的脉宽为590 fs。

NALM锁模掺铒光纤激光器的输出功率随泵浦功率的变化如图4所示,泵浦功率由245 mW增大到435 mW时,输出功率从1.580 mW增加到3.015 mW,激光器的输出功率呈线性增长。实验表明,泵浦功率未达到245 mW时,激光器输出为连续光。当泵浦功率超过435 mW,激光器的状态不再稳定,出现不等间隔的脉冲分裂、随机相位扰动等现象,因此该激光器的稳定工作区间在泵浦功率为245~435 mW之间。NALM的斜率效率较低,这与谐振腔采用10%输出端口、NALM

的高可饱和吸收性、单向隔离器的使用以及腔内器件的插入损耗有关。对此可以有针对性地采取以下措施:(1)优化光纤熔接方式;(2)完善器件与光纤的适配;(3)增加增益光纤长度,实现腔内损耗减低,提高激光器的斜率效率。

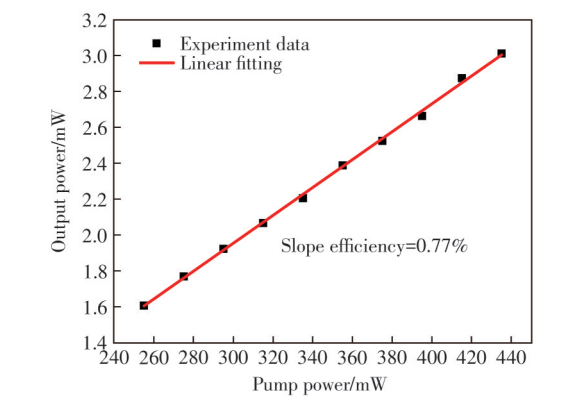


图 4 输出功率随泵浦功率变化
Fig.4 Output power *versus* pump power

为了进一步测试激光器输出脉冲的稳定性,实验中每隔 40 min 采集一次光谱。图 5 所示为光谱随时间变化,可以看出随着时间变化,脉冲光谱峰值和边带并未发生明显改变。表明该激光器具有优秀的稳定性,能够稳定工作超 4 h。

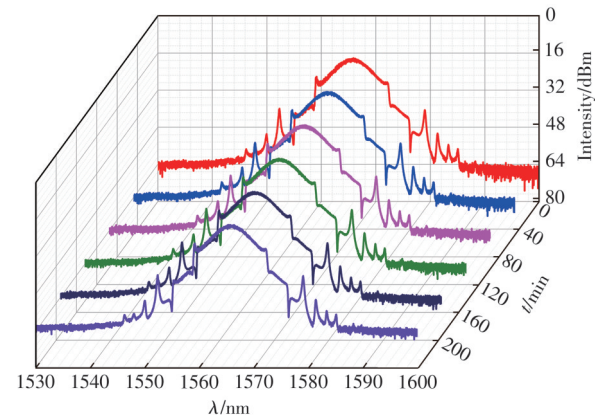


图 5 光谱随时间变化
Fig.5 Optical spectra *versus* time

3.2 不同泵浦功率下脉冲光谱与自相关仪曲线

为了进一步探究激光器输出锁模脉冲的光谱特性与脉冲宽度随泵浦功率的变化趋势,将泵浦功率依次调至 300 mW、350 mW 和 400 mW,测得光谱及自相关仪曲线如图 6 所示。图 6(a)、(c)、(e)分别为不同泵浦功率下的光谱,对应的 3 dB 光谱带宽为 5.68 nm、5.72 nm 和 5.92 nm,中心波长分别为 1 566.44 nm、1 566.54 nm 和 1 566.80 nm。光谱在泵浦功率等量增加的情况下保持稳定,3 dB 带宽略有展宽,中心波长轻微红移。

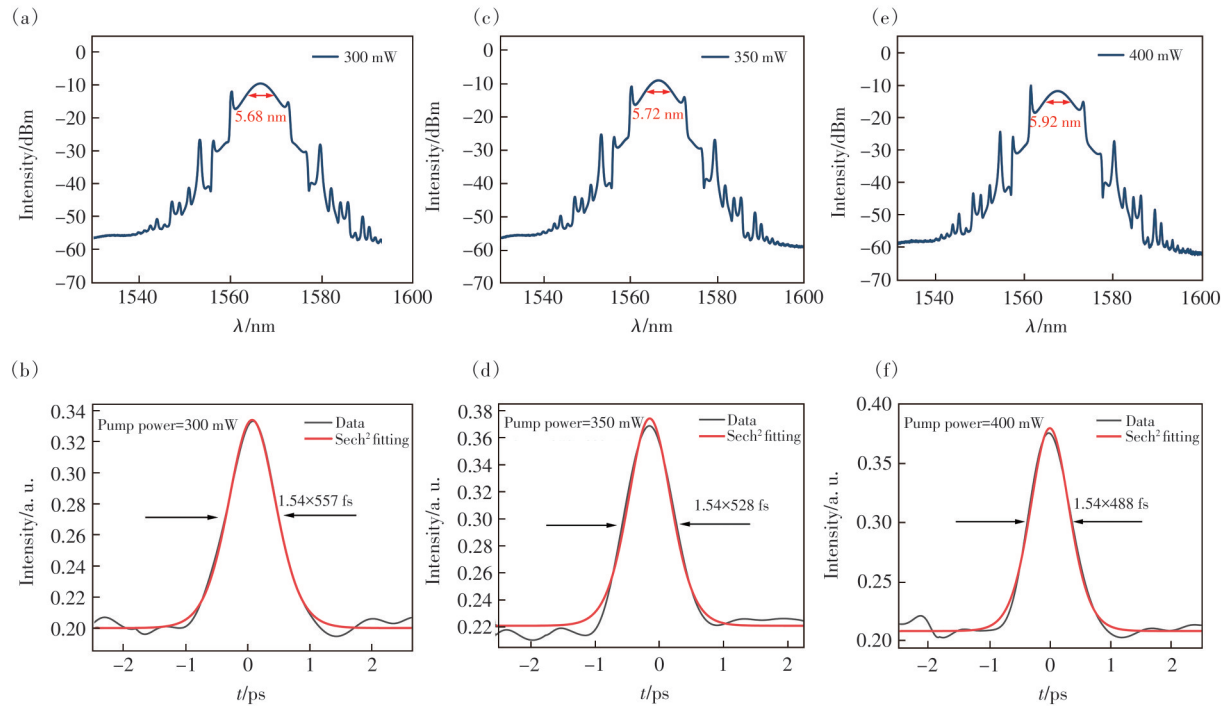


图 6 不同泵浦功率下的光谱和自相关仪曲线。(a)300 mW 光谱;(b)300 mW 自相关曲线;(c)350 mW 光谱;(d)350 mW 自相关曲线;(e)400 mW 光谱;(f)400 mW 自相关曲线
Fig.6 Spectra and autocorrelator curves under different pump powers. (a) 300 mW spectral diagram. (b) 300 mW autocorrelator. (c) 350 mW spectral diagram. (d) 350 mW autocorrelator. (e) 400 mW spectral diagram. (f) 400 mW autocorrelator

图6(b)、(d)、(f)为不同泵浦功率下的脉冲自相关仪曲线,通过双曲正割函数对脉冲轮廓进行拟合得到脉宽分别为557 fs、528 fs和488 fs,脉宽逐渐缩短,趋近于傅里叶变换极限。根据400 mW时的脉宽与带宽,计算出最小时间带宽积为0.353,而双曲正割型脉冲的极限理论值为0.315,说明激光腔内存在一定的啁啾影响。泵浦功率为400 mW时输出功率为2.734 mW,计算得到单脉冲能量为0.214 nJ,峰值功率为439.3 W。

结合上述现象,随着泵浦功率不断增加,脉冲能量不断增加,峰值功率不断增大,引发腔内SPM效应增加,导致非线性相移增大,在光谱上表现为光谱带宽不断增加。同时脉宽逐渐减小时,非线性相移与色散效应之间的平衡被打破,Kelly边带能量明显增加,进而加剧Kelly边带分裂。当泵浦功率从400 mW继续增加时,脉冲宽度不减反增,光谱顶峰处平滑的曲线逐渐波动,脉冲激荡增加剧烈,激光器的稳定性下降;在泵浦功率435 mW时,锁模脉冲达到极限,脉冲序列激荡不再稳定。

4 结 论

本文搭建了基于NALM锁模的掺铒光纤激光器,采用分光比为40:60的耦合器连接NALM环与

单向环,泵浦功率在245~435 mW区间,实现了锁模脉冲输出。泵浦功率为245 mW时,通过调节两个PC,实现了1.5 μm 波段传统孤子锁模脉冲输出,光谱中心波长为1 564.62 nm,3 dB带宽为5.08 nm。此时的输出功率为1.580 mW、重复频率为12.75 MHz、脉冲持续时间为78.43 ns以及脉冲宽度为590 fs。此外,为了进一步研究不同泵浦功率下锁模激光器的光谱与脉宽变化,将泵浦功率依次设置为300 mW、350 mW及400 mW,测得光谱逐渐展宽,3 dB带宽分别为5.68 nm、5.72 nm和5.92 nm。采用双曲正割函数对脉冲进行拟合,测得脉宽分别为557 fs、528 fs和488 fs,脉宽逐渐缩短,趋近于傅里叶变化极限。泵浦功率400 mW时,输出功率为2.734 mW,计算可得最大单脉冲能量为0.214 nJ、峰值功率为439.3 W。此外,57 dB的噪声抑制和超4 h的稳定工作,均证明了该激光器具有良好稳定性。综上所述,该激光器结构简单、稳定性好,能输出飞秒量级的超短脉冲且具有较高的单脉冲能量,可作为超短脉冲种子源投入应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250101>

参 考 文 献:

- [1] LIU Y W, WU C, GU X W, *et al.* High-spectral-purity photon generation from a dual-interferometer-coupled silicon microring [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(1): 73-76.
- [2] GU Y Y, CHEN C Y, MAO Z M, *et al.* Acoustofluidic centrifuge for nanoparticle enrichment and separation [J]. *Sci. Adv.*, 2021, 7(1): eabc0467.
- [3] 夏宇峰, 黄沛, 付玉喜. 基于固体介质的高次谐波和阿秒脉冲产生及应用 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(1): 214203.
XIA Y F, HUANG P, FU Y X. Generation and applications of high-order harmonics and attosecond pulses in solids [J]. *Sci. Sinica Phys. Mech. Astron.*, 2025, 55(1): 214203. (in Chinese)
- [4] 易子焱, 汪子劭, 张翔宇, 等. 石墨烯/氮化硼平面异质结中的高次谐波产生 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(1): 214207.
YI Z H, WANG Z S, ZHANG X Y, *et al.* High harmonic generation in graphene/boron nitride lateral heterostructures [J]. *Sci. Sinica Phys. Mech. Astron.*, 2025, 55(1): 214207. (in Chinese)
- [5] 王彦超, 任新国, 高鹏越, 等. 我国计算物理软件研发的现状及展望 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(4): 247110.
WANG Y C, REN X G, GAO P Y, *et al.* The development and perspective of computational physics software in China [J]. *Sci. Sinica: Phys. Mech. Astron.*, 2024, 54(4): 247110. (in Chinese)
- [6] 周亚梅, 关梦雪. 部分典型量子材料中准粒子超快动力学的第一性原理研究 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(1): 214204.
ZHOU Y M, GUAN M X. First-principles study of ultrafast quasiparticle dynamics in typical quantum materials [J].

- Sci. Sinica: Phys. Mech. Astron.*, 2025, 55(1): 214204. (in Chinese)
- [7] RICCARDI E, PISTORE V, KANG S, *et al.* Short pulse generation from a graphene-coupled passively mode-locked terahertz laser [J]. *Nat. Photon.*, 2023, 17(7): 607-614.
 - [8] KIM J W, CHOI S Y, KIM W T, *et al.* 550 MHz carbon nanotube mode-locked femtosecond Cr: YAG laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2018, 16(6): 061404.
 - [9] MONDAL S, GANGULY R, MONDAL K. Topological insulators: an in-depth review of their use in modelocked fiber lasers [J]. *Ann. Phys.*, 2021, 533(6): 2000564.
 - [10] CHATZIDIMITRIOU D, NOUSIOS G, CHRISTOPOULOS T, *et al.* Theoretical study of a passively mode-locked integrated laser based on transition-metal dichalcogenides and graphene [J]. *Phys. Rev. A*, 2024, 109(4): 043522.
 - [11] ZHENG J H, MENG Y F, KE Y, *et al.* Effect of beam oscillating amplitude on formation characteristics and mechanical properties of laser-arc hybrid welded 8-mm-thick aluminum alloy T-joints [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2025, 186: 112676.
 - [12] STOLIAROV D A, ITRIN P A, RIBENEK V A, *et al.* Linear cavity fiber laser harmonically mode-locked with SESAM [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2020, 17(10): 105102.
 - [13] ZHOU Y Z, SUN Y Q, HOU Y Z, *et al.* Generation and modulation of soliton molecules in an all-polarization-maintaining fiber laser mode-locked by NPE [J]. *Opt. Commun.*, 2025, 574: 131093.
 - [14] PENG S W, LIU X Y, FU H Y, *et al.* Intracavity filtering effect in a dual-output linear-cavity all-PM fiber laser mode-locked by NPE [J]. *Appl. Opt.*, 2023, 62(24): 6323-6332.
 - [15] LIANG X, WU G, WANG Q, *et al.* Dynamics of solitons in NOLM based all-normal dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2023, 81: 103507.
 - [16] CHEN F H, HAO Q, ZENG H P. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er: fiber laser system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017, 29(23): 2119-2122.
 - [17] WANG M, LIU M Q, CHEN Y W, *et al.* Stable noise-like pulse generation in all-PM mode-locked Tm-doped fiber laser based on NOLM [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2021, 19(9): 091402.
 - [18] TAO J N, SONG Y Q, LI Y Y, *et al.* Pulse type switchable, spectral bandwidth dynamically adjustable all-fiber laser mode-locked by NALM [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2023, 157: 108682.
 - [19] 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]. *Opt. Express*, 2012, 20(10): 10545-10551.
 - [20] 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]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(12): 121111.
 - [21] MA Y X, SALMAN S H, LI C, *et al.* Compact, all-PM fiber integrated and alignment-free ultrafast Yb: fiber NALM laser with sub-femtosecond timing jitter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021, 39(3): 4431-4438.
 - [22] HAN Y, TIAN H C, MENG F, *et al.* Environment-stable sub-100 fs Er: fiber laser with a 3 dB bandwidth of 78 nm [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(26): 48021-48029.
 - [23] SUN J, ZHOU Y, GE Z Y, *et al.* Low-repetition-rate, high pulse energy all-polarization-maintaining Er-doped fiber laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2019, 16(4): 045104.
 - [24] STOLIAROV D, KUDELIN I, KOVIAROV A, *et al.* Transient dynamics in mode-locked all-PM Er-doped fiber laser with NALM [J]. *Opt. Commun.*, 2023, 547: 129852.
 - [25] LANG J J, CHEN C, ZHANG P, *et al.* C- and L-bands wavelength-tunable mode-locked fiber laser [J]. *Photonics*, 2023, 10(12): 1379.
 - [26] BINH L N, NGO N Q. *Ultra-Fast Fiber Lasers: Principles and Applications with MATLAB® Models* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.



叶海钦(1998-),男,浙江温州人,硕士研究生,2021年于长春电子科技学院获得学士学位,主要从事光纤激光器方面的研究。
E-mail: 1427042021@qq.com



王蓓(1978-),女,山东青岛人,博士,教授,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光纤激光器及放大器方面的研究。
E-mail: jijie_w@163.com