

时空锁模激光器脉冲特性随芯径变化的研究

丁耀文 龙钰 李岗 周毅 杨康文

Variation of pulse characteristics with core diameter in spatiotemporal mode-locked lasers

DING Yaowen, LONG Yu, LI Gang, ZHOU Yi, YANG Kangwen

引用本文:

丁耀文, 龙钰, 李岗, 等. 时空锁模激光器脉冲特性随芯径变化的研究[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1480–1486. DOI: 10.5768/JAO202546.0608003

DING Yaowen, LONG Yu, LI Gang, et al. Variation of pulse characteristics with core diameter in spatiotemporal mode-locked lasers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1480–1486. DOI: 10.5768/JAO202546.0608003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0608003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于半导体可饱和吸收镜的全光纤掺镱锁模皮秒激光器

All-fiber ytterbium-doped mode-locked picosecond laser based on semiconductor saturable absorber mirror

应用光学. 2025, 46(1): 217–223 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0108001>

被动锁模光纤激光器中高阶色散对输出脉冲特性影响

Influence of high-order dispersion on output pulse characteristics in passively mode-locked fiber laser

应用光学. 2023, 44(5): 1102–1108 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0507001>

位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

应用光学. 2021, 42(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>

多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器

Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission

应用光学. 2025, 46(2): 458–464 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0208001>

高信噪比多波长2 μm主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1480-07

引用格式: 丁耀文, 龙钰, 李岗, 等. 时空锁模激光器脉冲特性随芯径变化的研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1480-1486.

DING Yaowen, LONG Yu, LI Gang, et al. Variation of pulse characteristics with core diameter in spatiotemporal mode-locked lasers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1480-1486.



在线阅读

时空锁模激光器脉冲特性随芯径变化的研究

丁耀文¹, 龙钰¹, 李岗¹, 周毅², 杨康文^{1,2}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 香港大学 电气与电子工程系, 中国香港 999077)

摘要: 基于非线性偏振旋转锁模技术, 搭建了中心波长为 1065 nm, 脉冲重复频率为 25.8 MHz 的时空锁模激光器。为研究脉冲特性随纤芯直径的变化, 在增益光纤后分别熔接纤芯直径为 50 μm 和 62.5 μm 的无源多模光纤搭建激光器。在两种情况下, 光纤激光器均能实现时空锁模, 对不同功率下激光器的输出功率、空间光斑以及光谱特性进行测量, 对比结果显示: 时空锁模脉冲的空间模式复杂度与光纤纤芯直径成正比。在纤芯直径为 62.5 μm 的情况下, 通过优化空间滤波效应, 发现类似自相似的时空锁模脉冲输出, 其空间光斑由杂散的多模状态转变为接近基模的高斯输出, 对应脉冲能量也随之显著提高。研究结果可为高性能、高功率的时空锁模光纤激光器的研制提供参考。

关键词: 激光器; 多模光纤; 时空锁模; 非线性偏振旋转

中图分类号: TN242; O437

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0608003

Variation of pulse characteristics with core diameter in spatiotemporal mode-locked lasers

DING Yaowen¹, LONG Yu¹, LI Gang¹, ZHOU Yi², YANG Kangwen^{1,2}

(1. School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: A spatiotemporal mode-locked laser with a central wavelength of 1065 nm and a pulse repetition frequency of 25.8 MHz is experimentally built based on the nonlinear polarisation rotational mode-locking technique. And a passive multi-mode fiber with core diameters of 50 μm and 62.5 μm is fused to the gain fiber to construct a laser to study the variation of the pulse characteristics with the core diameter, respectively. In both cases, the fiber laser is mode-locked, and the output power, state evolution, beam profile and spectral characteristics of the pulses are measured and compared, and the comparison results show that the spatial mode complexity of the mode-locked pulses is proportional to the core diameter of the fiber. With a core diameter of 62.5 μm , a similar self-similar spatiotemporal mode-locked pulse output is found by optimizing the spatial filtering effect, and the spatial spot is transformed from a spurious multi-mode state to a Gaussian output close to the fundamental mode, corresponding to a significant increase in the pulse energy, which provides a new platform for the construction of high-performance and high-power mode-locked fiber lasers.

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-03-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12374402); 上海市浦江人才计划资助

第一作者: 丁耀文, E-mail: 223330651@st.usst.edu.cn

通信作者: 杨康文, E-mail: kangwenyang@usst.edu.cn

Key words: lasers; multi-mode fibers; spatiotemporal mode-locking; nonlinear polarization rotation

引言

随着激光技术的不断发展,激光器的种类也变得越来越丰富,如:固体激光器、气体激光器、半导体激光器和光纤激光器^[1-2]等。光纤锁模激光器可输出皮秒或飞秒量级的超短脉冲,且具备波长范围宽、散热性能良好、稳定性高及体积小等优势,被广泛应用于通信、医疗等工业领域,以及精密测量、显微成像等前沿科学领域^[3-7]。尽管如此,如何获得更高能量、更高峰值功率输出的锁模脉冲依旧是光纤激光器的一个重要研究方向,在这一方向上研究人员提出了类噪声脉冲^[8]、自相似子^[9]、耗散孤子^[10]等多种解决方案。但由于传统的单模光纤受限于纤芯直径尺寸,非线性系数较大等特性的束缚^[11],导致其能输出的脉冲能量始终被限制在纳焦耳量级。相比较而言,多模光纤的模场面积更大,能承受的功率更高,因此基于多模光纤搭建的锁模激光器一直是研究人员探索的热点方向。

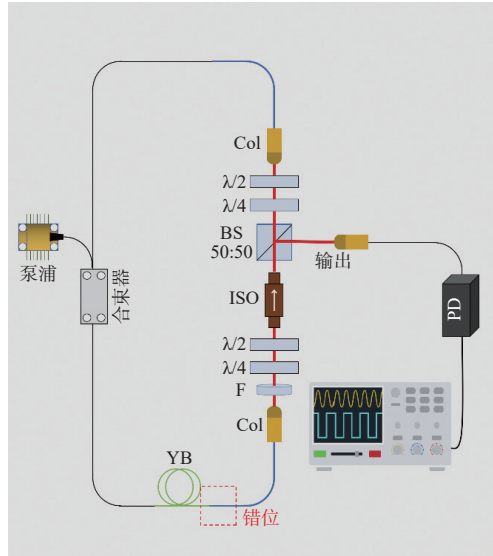
近年来,多模光纤锁模激光器的研究取得了重大进展。2017年,美国康奈尔大学的 WRIGHT L G 等人采用纤芯直径为 10 μm 的少模增益光纤与纤芯直径为 50 μm 的渐变折射率多模光纤错位熔接,基于非线性偏振旋转的锁模方式,结合空间滤波和光谱滤波技术实现了一种全新的锁模状态,并称这种新的锁模状态为时空锁模(spatiotemporal mode-locking, STML),输出脉冲的单脉冲能量约为 5 nJ~40 nJ^[12]。随后,清华大学的杨昌喜课题组在 2018 年采用类似的方案,首次观测到了时空锁模的孤子分子^[13]并对此进行了初步的研究^[14-16],因此推动了科研人员对时空锁模孤子动力学的研究^[17-18]。之后,为了获得更高质量的光斑以及更高能量的脉冲输出,在 2019 年,瑞士洛桑联邦理工学院的 TEĞİN U 等人对时空锁模的腔型结构进行了优化,使用了带宽为 3.8 nm 的窄带滤波片进行光谱滤波,首次验证并报道了时空锁模激光器中的自相似子,并由此改善了激光器输出的光束质量,输出的单脉冲能量约为 2.4 nJ^[19]。为了进一步提升光束质量,提高输出功率,2020 年,TEĞİN U 等人在先前的实验装置上添加了色散管理组件,并在腔内增加了一个针孔进行空间滤波,通过光束的自清洁效应获得了更高质量的光束,输出单脉冲能量约为 24 nJ,比之前的工作提高了接近 10 倍^[20],为搭建高质量、高功率输出的时空锁模激光器提

供了新的思路,该课题组在同年利用非线性偏振演化的锁模方式首次搭建了全光纤式的时空锁模激光器^[21]。自此之后,研究人员们还利用半导体可饱和吸收体(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)等不同的锁模方式搭建了多种全光纤型的时空锁模激光器,丰富了时空锁模激光器的研究^[22-25]。综上所述,基于多模光纤搭建的时空锁模激光器不仅在输出高能量短脉冲方面有着巨大的潜力,而且为传统的孤子动力学的研究^[26-27]增加了新的空间维度。随着科研人员们对时空锁模激光器研究的不断深入,不同多模光纤纤芯直径的时空锁模激光器也不断被实现,但目前为止,还未有课题组专门针对不同多模光纤纤芯对时空锁模激光器的输出特性进行对比研究,而这对选取合适的多模光纤参数,实现高能量、高稳定时空锁模脉冲具有重要意义。

本文主要以少模掺镱光纤作为增益介质,分别与不同纤芯直径的多模光纤错位熔接,基于非线性偏振旋转锁模方式搭建了重复频率为 25.8 MHz 的时空锁模激光器,并就其锁模输出特性进行分析与对比,并通过优化空间滤波的方法,产生了类似自相似子的脉冲输出,有效地提升了输出脉冲能量和光束质量。

1 实验装置和原理

图 1(a)为搭建的时空锁模激光器的装置示意图。本实验基于非线性偏振旋转(nonlinear polarization rotation, NPR)的锁模技术进行锁模,采用中心波长为 976 nm,最高输出功率为 27 W 的多模激光二极管(laser diode, LD)作为泵浦源;激光器的谐振腔由光纤和空间两个部分构成,谐振腔光纤部分由合束器(combiner)、少模增益光纤以及多模光纤组成,泵浦源通过合束器将泵浦光注入激光器中,合束器两个信号端的尾纤均为纤芯直径 15 μm ,长度 1 m 的少模无源光纤;利用长度为 3 m 的少模掺镱光纤(LAM-YDF-15/130-VIII)作为增益光纤;分别使用了纤芯直径为 50 μm 和 62.5 μm ,长度为 2.5 m 的渐变折射率多模光纤(graded index multimode fiber, GIMF)进行锁模,以观测不同纤芯直径锁模状态及模式的变化,采用 GIMF 可以有效地减小模式色散,更有利于实现稳定的时空锁模。为了激发多种模式,需要将少模增益光纤与 GIMF



YB-掺镱光纤; Col-准直器; F-带通滤波片; $\lambda/4$ -四分之一波片; $\lambda/2$ -半波片; ISO-偏振相关隔离器; BS-分束镜; PD-光电二极管
(a) 实验装置图

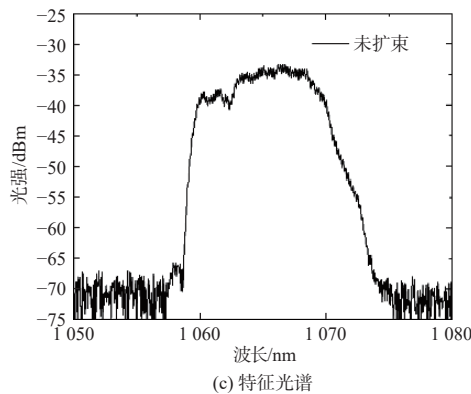
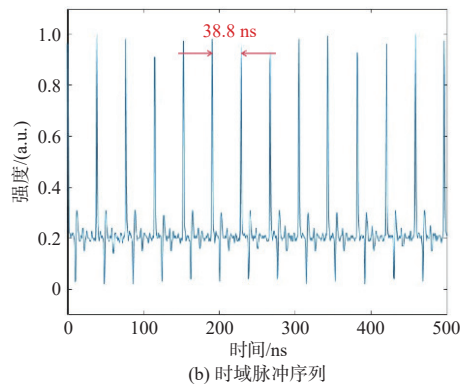


图 1 STML 多模光纤激光器实验装置及输出

Fig. 1 STML multi-mode fiber laser experimental setup and output

进行错位熔接,为了最大限度地减少该熔接点的反射以及损耗,在错位熔接的过程中,电弧熔接机需要经过多次放电,直至光纤包层高度重叠。除此之外,通过使用折射率匹配的凝胶滴在熔点处进行保护,确保光从增益光纤到多模光纤的低损

耗传输,防止光从包层泄露出去。随后,两个准直器(collimator, Col)将从多模光纤输出的激光发射到自由空间(长度约为 0.5 m),激光经过自由空间回到光纤中后,通过合束器另一个信号端形成回路,值得注意的是,为了减小空间光路的耦合损耗,实验在接收端熔接了一个与发射端相同纤芯直径的跳线。空间光路部分包括一个窄带通滤波器(Filter),两个半波片($\lambda/2$),两个四分之一波片($\lambda/4$),一个偏振相关隔离器(isolator, ISO)和一个 50:50 分束器(beam splitter, BS)。波片用来调节腔内激光的偏振态,隔离器用来保证光在谐振腔内定向传输,分束器用来实现谐振腔的输出。该时空锁模多模光纤激光器的腔长为 8 m。采用 200 MHz 数字示波器(LeCroy waveJet 324)和 5 GHz 的光电探测器(Thorlabs DET08CFC/M),测得激光器稳定锁模状态下的重复频率为 25.8 MHz。光谱特性曲线采用光谱仪(Agilent 86142B)进行测量,并利用相机(FLIR BFS-U3-04S2M-CS)监测输出信号光斑的变化。

2 实验结果分析

实验中分别使用了纤芯直径为 50 μm , 数值孔径 $N_A=0.193$ 和纤芯直径为 62.5 μm , 数值孔径 $N_A=0.265$ 的 GIMF 搭建激光器,根据式(1)可以估算出这两种光纤的模式数量^[28]。

$$M \approx \frac{v^2}{4} = \frac{1}{4} \times \left(\frac{2\pi\alpha}{\lambda} N_A \right)^2 \quad (1)$$

式中: α 为纤芯半径; λ 为光的波长。由此可以推算出纤芯直径为 50 μm 的多模光纤所能激发的模式数量约为 202 个,纤芯直径为 62.5 μm 的多模光纤激发的模式数量约为 597 个。从理论计算上可以得到纤芯直径为 62.5 μm 的多模光纤所能激发的模式数量是纤芯直径 50 μm 的 3 倍。模式数量的增加会导致模式间的相互作用变得更加复杂,模式间的相互作用表现在多个模式之间发生耦合和竞争。模式耦合主要是由光纤的非线性效应引起的,其动力学可以通过耦合模理论来描述^[29]:

$$\frac{dA_i}{dz} = j\beta_i A_i + j \sum_{j \neq i} C_{ij} A_j \quad (2)$$

式中: A_i 为第 i 个模式的复振幅; β_i 为第 i 个模式的传播常数; C_{ij} 为模式 i 和模式 j 之间的耦合系数。光在纤芯较大的光纤中传播,模式间的耦合系数较

大,且较大纤芯直径的光纤模场分布会更加分散,模式间的重叠也会随之增加,从而增强模式耦合的概率,模式之间的能量交换也会更加频繁。模式竞争是指不同模式之间由于增益和损耗的差异而导致的能量争夺行为,当模式数量较多时,模式竞争越激烈,能量分布更均匀。当模式数量较少时,模式竞争也越弱,少数模式可能主导能量分布^[30]。因此结合模式间的相互作用可以发现,纤芯直径的大小对时空锁模激光器脉冲的输出功率以及稳定性都有着一定的影响,表现为纤芯直径较大的光纤输出的脉冲峰值功率越低,稳定性越高,能量越均衡。

实验首先采用纤芯直径为 50 μm 的多模光纤对激光器进行搭建,如图 1(a)所示搭建完成后,缓慢增加泵浦功率,同时调节波片的位置促使激光器锁模。实验测得在泵浦功率到达 1.5 W 且波片旋转到合适位置时,可以得到重复频率为 25.8 MHz 的稳定的单脉冲锁模,其输出激光的时间脉冲序列如图 1(b)所示,相邻脉冲的时间间隔约为 38.8 ns,图 1(b)中相邻脉冲之间存在着一个正脉冲和一个负脉冲,导致这一现象的原因是探测器的输出阻抗与示波器的输入阻抗不匹配,此时信号会在探头与示波器的接口上产生反射,从而形成这样的波形。输出脉冲的光谱如图 1(c)所示,中心波长约为 1065 nm,3 dB 带宽约为 8 nm,可以看到光谱顶部存在调制的精细结构,是由模式间的干涉导致的。经过多次重复实验,确定在泵浦功率为 1.5 W 时,激光器可以实现自启动锁模。

实验测量了激光器输出状态及功率、光斑和光谱随着泵浦功率的变化。图 2(a)为激光器输出的功率变化曲线,将泵浦功率增加到 0.5 W,可以观察到连续光输出,通过调节波片使其产生振荡,继续加大泵浦功率到 1.3 W 时,通过调节波片,可以观察到不稳定的调 Q 锁模脉冲,调 Q 包络的周期约为 29.6 μs ,对应的重复频率为 33.7 kHz,此时的输出功率约为 108.8 mW。保持波片的位置不变,随着功率的增加,调 Q 的重复频率也在逐渐增加。在泵浦功率增加到 1.4 W 时,其重复频率增加到 38.4 kHz。继续增加泵浦功率到 1.5 W 时,激光器实现稳定的单脉冲锁模,此时的输出功率约为 136.6 mW,单脉冲能量为 5.3 nJ,增大泵浦功率到 2 W 的过程中,激光器可以维持稳定的单脉冲输出且输出功率逐渐上升,继续增加泵浦功率,激光器输出脉冲开始分裂。在泵浦功率为 2 W 时,激光

器在稳定的单脉冲锁模状态下最高的输出功率约为 209.6 mW,单脉冲能量为 8.12 nJ。图 2(b)~(d)分别展示了激光器在不同状态下的光斑模式,图 2(b)是在连续光状态下测得的光斑,此时的光斑形状已经呈现出多模状态。当泵浦功率达到 1.3 W 时,激光器输出状态发生改变,调 Q 锁模状态下的光斑如图 2(c)所示,其模式与连续光所输出的模式明显不同。随后继续增加泵浦功率至 1.5 W,锁模状态下的输出光斑如图 2(d)所示,光斑更加偏离基模,从接近圆形变为条形,模式明显不同于调 Q 锁模状态下的模式。为了进一步验证脉冲时空锁模特性,在输出端后增加一个 5 倍的扩束器(LBTEK FBE-5X-B),对光斑进行扩束,再用光阑对扩束后光斑的不同位置处进行空间采样,采样的位置在图 2(d)的 1、2 位置,随后我们在选取的光斑位置处进行光谱测量与分析,图 2(e)中的蓝色光谱曲线对应着位置 1 处的光谱,红色曲线对应着位置 2 处的光谱。从两个不同位置对应的光谱曲线可以看出,在不同位置处测量得到的光谱明显不同,因此可以证明激光器实现了时空锁模。

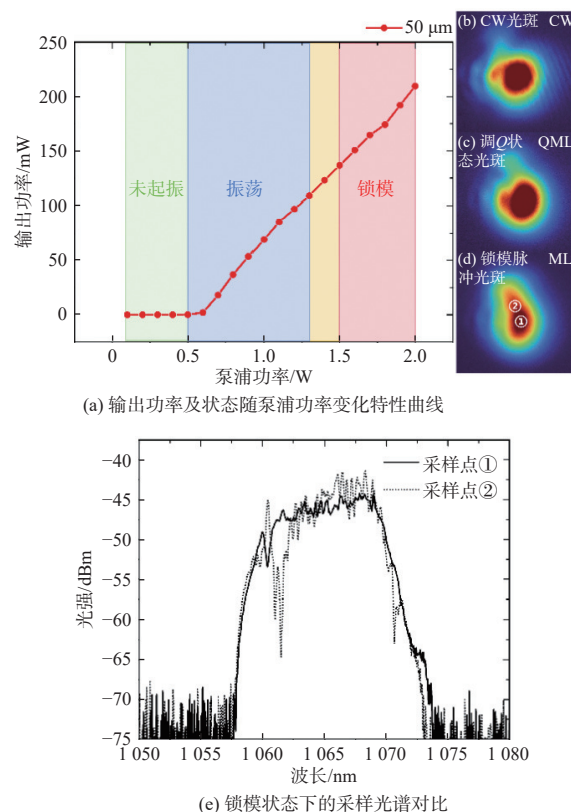


图2 50 μm 纤芯 STML 输出随着泵浦功率的变化

Fig.2 Output of 50 μm fiber core STML varies with changes in pump power

为了进一步对比不同纤芯直径多模光纤的锁模特性,将实验装置中纤芯直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤替换成纤芯直径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤(光纤长度均为 2.5 m ,且错位熔接的偏置均为 $10\text{ }\mu\text{m}$),因为错位熔接过程中的损耗存在着不确定性,实验中通过多次测量 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 纤芯的无源光纤与少模增益错位熔接的损耗进行误差分析,相比 $50\text{ }\mu\text{m}$ 纤芯错位熔接时的损耗,误差约在 5.7% 以内。随后采用同样的方法对激光器重新进行锁模,随着泵浦功率的增加,实验测量了激光器输出功率及状态的变化,实验结果如图3所示。图3(a)展示了纤芯直径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤实现时空锁模时,输出功率随泵浦功率的变化特性曲线。当泵浦功率为 0.7 W 时,腔内开始出现连续光谐振。泵浦功率在 $1.1\text{ W}\sim 1.3\text{ W}$ 之间时,激光器处于调Q状态。进一步增加泵浦功率到 1.3 W ,激光器实现稳定锁模,此时激光器的输出功率约为 79.68 mW ,输出的单脉冲能量约为 3.2 nJ 。当泵浦功率增加到 2 W 时,激光器在此状态下输出的最高功率约为 173.4 mW ,单脉冲能量为 6.7 nJ 。与纤芯直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤激光器相比,激光器连续光运转阈值有所提高,并且在相同功率的泵浦功率下,输出功率略有降低,其原因为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤在错位熔接中引入更大的腔内损耗,从常规经验来看,腔内更大的损耗也会导致锁模阈值的升高,然而在纤芯直径 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下锁模阈值却降低了 200 mW ,其主要原因是因为实验中利用的锁模方式是 NPR 锁模,通过调节波片来控制偏振,可以产生一个具有自幅度调制作用的等效快速可饱和吸收体的被动锁模机制,不同的偏振态等效的可饱和吸收体的锁模状态也会有所不同,所以在这两种纤芯直径的情况下,激光器锁模阈值的大小并没有较强的可比性。图3(b)~图3(d)展示了激光器在不同状态时输出的光斑。从光斑上看,采用纤芯直径 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤实现锁模时,输出模式相比采用更窄的 $50\text{ }\mu\text{m}$ 光纤时,明显变得更加复杂,高阶模愈发明显,在锁模状态下,输出光斑呈现高度多模的散斑状态。此时,同样对光斑进行扩束采样,测量了两个采样点处的光谱,如图3(e)所示,经过比较,光谱有明显的区别,符合时空锁模激光器的特性。因为在实验过程中需要对激光器采集大量的功率特性数据,为了提高数据的可靠性,实验最后还针对功率测量进行了误差分析,功率测量误差约在 0.04% 以内,可以忽略不计。

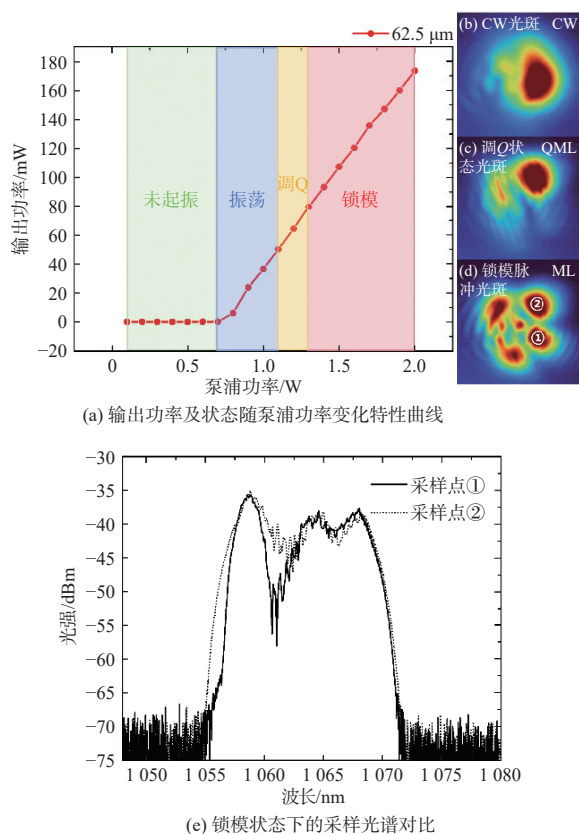


图3 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 纤芯 STML 输出随着泵浦功率的变化

Fig.3 Output of $62.5\text{ }\mu\text{m}$ fiber core STML varies with changes in pump power

实验中还发现了一类特殊的锁模状态,类似于单模激光器中的自相似孤子。自相似孤子的产生主要依赖于维持色散效应和非线性效应之间的动态平衡,然而对高阶效应的抑制也是形成自相似孤子的必要条件^[19-20]。在采用纤芯直径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤实现激光器锁模时,通过调节空间光路中两个准直器的耦合,等效于优化了空间滤波效应。空间滤波不仅可以有效地抑制脉冲传播过程中产生的噪声和高阶模式,从而提升脉冲的稳定性,而且可以通过时空耦合效应优化脉冲的光谱和啁啾分布,使腔内演化脉冲光谱更接近抛物线形,从而产生了类似自相似孤子的脉冲输出,其光谱特性和输出光斑如图4所示。由光斑的图像可以看出,模式由之前散斑状的高阶模转变为由基模主导的模式输出,对应的泵浦功率为 1.4 W ,激光器输出的平均功率约为 130 mW ,单脉冲能量为 5 nJ 。在相同的泵浦功率下,此状态下的平均功率相比图3(约 93.44 mW)有小幅提升。值得注意的是,图3中 100 mW 的平均功率在空间中分散到4个光斑,而图4中 130 mW 的平均功率集中在一

个光斑。因此,在类自相似情况下,激光器输出脉冲的强度(单位面积的光功率)有显著提升。

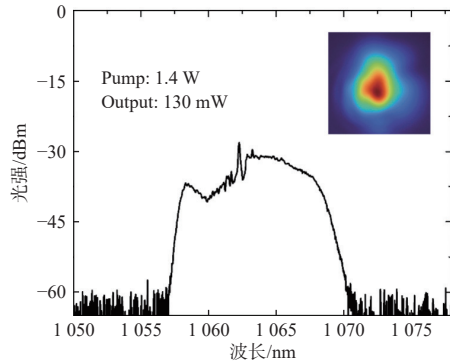


图4 优化空间滤波效应后脉冲输出光谱特性及光斑

Fig. 4 Spectral characteristics of pulse output and spot after optimising spatial filtering effect

3 结论

通过对时空锁模激光器腔型结构进行优化调整,使其能在较低的锁模阈值下形成锁模脉冲。对时空锁模激光器的脉冲输出特性进行了实验探索,分别采用不同纤芯直径的多模光纤结合错位熔接技术搭建谐振腔,并对比研究锁模后的脉冲输出特性。实验发现:增大多模无源光纤纤芯直径会显著增加输出模式复杂度,激光器中这种更加复杂的模式相互作用进一步反映了(3+1)维超短脉冲的物理复杂度,为研究更复杂的时空多维非线性问题奠定了基础,也为研究更大纤芯直径的时空锁模光纤激光器提供了前期支撑,例如实验采用100/125的多模无源光纤。后续拟通过定量分析不同带宽的光谱滤波器和不同尺寸的空间滤波器等对时空锁模激光器输出特性的影响,以此研究横模间的耦合作用。在研究基于62.5 μm 纤芯直径的多模光纤激光器输出特性过程中,通过优化腔内空间滤波效应,获得了类自相似子的脉冲输出特性,使输出脉冲的光束质量和强度显著提高。在此基础上,有望通过优化腔型结构,或者增加新的控制手段,持续提升时空锁模激光器的强度,发挥多模光纤激光器高输出功率、高脉冲能量优势的同时,有效提升光斑质量,对时空锁模光纤激光器的应用推广具有积极的促进作用。

参考文献:

[1] AFZAL R, YU A, ZAYHOWSKI T, et al. Single-mode

high-peak-power passively *Q*-switched diode-pumped Nd: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1314-1316.

[2] SONG Q H, XIAO S M, XU Z B, et al. Random laser spectroscopy for nanoscale perturbation sensing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2624-2626.

[3] KILLINGER D. Free space optics for laser communication through the air[J]. *Optics and Photonics News*, 2002, 13(10): 36-42.

[4] TACCHEO S. Fiber lasers for medical diagnostics and treatments: state of the art, challenges and future perspectives[J]. *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVII*, 2017, 10058: 37-42.

[5] LETOKHOV V S. Laser biology and medicine[J]. *Nature*, 1985, 316(6026): 325-330.

[6] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs:coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.

[7] 郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展[J]. *中国激光*, 2019(5): 89-99.

ZHENG Shikai, YANG Kangwen, AO Jianpeng, et al. Research progress of optical fiber coherent Raman scattering imaging light source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019(5): 89-99.

[8] WANG Q, CHEN T, ZHANG B, et al. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noiselike modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3750-3752.

[9] 贺明洋, 李敏, 袁帅, 等. 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 255-260.

HE Mingyang, LI Min, YUAN Shuai, et al. High power femtosecond self-similar fiber laser amplification system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 255-260.

[10] KIEU K, RENNINGER W H, CHONG A, et al. Sub-100 fs pulses at watt-level powers from a dissipative-soliton fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 593-595.

[11] WRIGHT L G, ZIEGLER Z M, LUSHNIKOV P M, et al. Multimode nonlinear fiber optics: massively parallel numerical solver, tutorial, and outlook[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 5100516.

[12] WRIGHT L G, CHRISTODOULIDES D N, WISE F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.

[13] QIN H Q, XIAO X S, WANG P, et al. Observation of

- soliton molecules in a spatiotemporal mode-locked multimode fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1982-1985.
- [14] DING Y H, XIAO X S, WANG P, et al. Multiple-soliton in spatiotemporal mode-locked multimode fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11435-11446.
- [15] DING Y H, XIAO X S, LIU K W, et al. Spatiotemporal mode-locking in lasers with large modal dispersion[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 093901.
- [16] LIU K W, XIAO X S, YANG C X. Observation of transition between multimode Q-switching and spatiotemporal mode locking[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 530-534.
- [17] CAO B, GAO C X, LIU K W, et al. Spatiotemporal mode-locking and dissipative solitons in multimode fiber lasers[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(11): 2309-2324.
- [18] GUO Y K, WEN X X, LIN W, et al. Real-time multispeckle spectral-temporal measurement unveils the complexity of spatiotemporal solitons[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 100-107.
- [19] TEĞİN U, KAKKAVA E, RAHMANI B, et al. Spatiotemporal self-similar fiber laser[J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1412-1415.
- [20] TEĞİN U, RAHMANI B, KAKKAVA E, et al. Single-mode output by controlling the spatiotemporal nonlinearities in mode-locked femtosecond multimode fiber lasers[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(5): 056005.
- [21] TEĞİN U, RAHMANI B, KAKKAVA E, et al. All-fiber spatiotemporally mode-locked laser with multimode fiber-based filtering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23433-23438.
- [22] ZHANG H W, LU J Y, PENG J Y, et al. Investigation of high-power spatiotemporal mode-locking with high beam quality[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(9): 2300017.
- [23] WU H, LIN W, TAN Y J, et al. Pulses with switchable wavelengths and hysteresis in an all-fiber spatio-temporal mode-locked laser[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(2): 022008.
- [24] LONG J G, GAO Y X, LIN W, et al. Switchable and spacing tunable dual-wavelength spatiotemporal mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 588-591.
- [25] XIE S Z, JIN L, ZHANG H, et al. All-fiber high-power spatiotemporal mode-locked laser based on multimode interference filtering[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2909-2917.
- [26] YANG K W, ZHOU Y, LING Y Q, et al. Spectral period doubling and encoding of dissipative optical solitons via gain control[J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 724-731.
- [27] ZHOU Y, REN Y X, SHI J W, et al. Buildup and dissociation dynamics of dissipative optical soliton molecules[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 965-972.
- [28] 陈海燕, 陈聪, 罗江华, 等. 光纤通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 53.
CHEN Haiyan, CHEN Cong, LUO Jianghua, et al. Fiber optic communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 53.
- [29] 钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. 光学学报, 2009, 5(5): 1188-1192.
QIAN Jingren. Coupled mode theory and its application in fiber optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 5(5): 1188-1192.
- [30] ELKIN N N, NAPARTOVICH A P, TROSHCHIEVA V N, et al. Mode competition in multi-core fiber amplifier[J]. *Optics Communications*, 2007, 277(2): 390-396.