

基于半导体可饱和吸收镜的全光纤掺镱锁模皮秒激光器

迟凯丽 孔梅 杨翘楚 刘显著 王天枢

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

CHI Kaili, KONG Mei, YANG Qiaochu, LIU Xianzhu, WANG Tianshu

引用本文:

迟凯丽, 孔梅, 杨翘楚, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的全光纤掺镱锁模皮秒激光器[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 217–223. DOI: 10.5768/JAO202546.0108001

CHI Kaili, KONG Mei, YANG Qiaochu, et al. All-fiber ytterbium-doped mode-locked picosecond laser based on semiconductor saturable absorber mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 217–223. DOI: 10.5768/JAO202546.0108001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0108001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于氧化铜可饱和吸收体的掺铒光纤激光器

Erbium-doped fiber laser based on copper oxide saturable absorber

应用光学. 2023, 44(3): 684–692 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0308001>

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>

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>

基于腔内滤波效应的双波长光纤激光器

Experimental and simulation study of dual-wavelength fiber laser based on intracavity filtering effect

应用光学. 2024, 45(5): 1079–1084 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0508001>

孤子分子/类噪声脉冲可切换的混合锁模光纤激光器

Switchable soliton molecules and noise-like pulses in hybrid mode-locking fiber laser

应用光学. 2023, 44(2): 456–461 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208001>

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) 01-0217-07

引用格式: 迟凯丽, 孔梅, 杨翹楚, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的全光纤掺镱锁模皮秒激光器[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 217-223.

CHI Kaili, KONG Mei, YANG Qiaochu, et al. All-fiber ytterbium-doped mode-locked picosecond laser based on semiconductor saturable absorber mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 217-223.



在线阅读

基于半导体可饱和吸收镜的全光纤掺 镱锁模皮秒激光器

迟凯丽^{1,2}, 孔 梅¹, 杨翹楚^{2,3}, 刘显著^{2,3}, 王天枢^{2,3}

(1. 长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 设计一种基于半导体可饱和吸收镜的掺镱(Yb)光纤激光器。通过啁啾光纤布拉格光栅调节腔内净色散, 研究谐振腔内净色散处于负色散区域时, 激光器输出脉冲的特性。实验采用全保偏的线性腔结构, 当泵浦功率为 138 mW 时, 实现了稳定的自启动锁模。输出脉冲的最小脉冲宽度为 4.5 ps, 最高重复频率为 46.5 MHz, 中心波长为 1 063.7 nm, 3 dB 光谱宽度为 1.44 nm。当泵浦功率为 220 mW、腔内滤波带宽为 4 nm 时, 可以观察到束缚态孤子, 其脉宽为 6.24 ps, 脉冲间隔为 46.58 ps。最后通过 12 h 的稳定测试, 证明该激光器具有良好的功率稳定性, 可以作为稳定的种子源应用。

关键词: 激光器; 被动锁模; 半导体可饱和吸收镜; 束缚态孤子; 啁啾光纤布拉格光栅

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0108001

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

CHI Kaili^{1,2}, KONG Mei¹, YANG Qiaochu^{2,3}, LIU Xianzhu^{2,3}, WANG Tianshu^{2,3}

(1. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A ytterbium (Yb)-doped fiber laser based on semiconductor saturable absorber mirror was designed. By adjusting the net dispersion in the cavity with chirped fiber Bragg grating, the output pulse characteristics of the laser were studied when the net dispersion in the cavity was in the negative dispersion region. In the experiment, the linear cavity structure with all-polarization maintaining was adopted. When the pump power was 138 mW, the stable self-starting mode-locking was realized. The minimum pulse width of the output pulse is 4.5 ps, the maximum repetition frequency is 46.5 MHz, the central wavelength is 1 063.7 nm, and the spectral width of 3 dB is 1.44 nm. When the pump power is 220 mW and the intracavity filtering bandwidth is 4 nm, the bound solitons with pulse width of 6.24 ps and pulse interval of 46.58 ps can be observed. Finally,

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2023-12-27

基金项目: 吉林省自然科学基金 (YDZJ202101ZYTS139, YDZJ202201ZYTS418, 20220508134RC); 国家自然科学基金青年基金 (62105042)

作者简介: 迟凯丽 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器研究。E-mail: 2021100099@mails.cust.edu.cn

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事无线光通信技术、超快光纤激光器及应用、光纤传感技术等研究。

E-mail: wangts@cust.edu.cn

the 12-h stability test proves that the laser has good power stability, and can be used as a stable seed source for subsequent applications.

Key words: lasers; passive mode-locking; semiconductor saturable absorber mirror; bound solitons; chirped fiber Bragg grating

引言

近年来,随着超短脉冲激光的广泛应用,例如应用于工业上的精密制造、打标,以及医疗上的眼部激光手术等,吸引了越来越多的学者投身锁模光纤激光器的研究。根据光纤激光器不同的锁模方式,可分为主动锁模和被动锁模,由于被动锁模光纤激光器结构简单、脉宽较窄,因此具有更大的发展潜力^[1]。被动锁模方式有很多,例如非线性放大环形镜 (nonlinear loop mirror, NOLM) 锁模^[2]、可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 锁模和非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 锁模^[3]。而半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 锁模由于具有结构简单,能实现自启动及可靠性高等优势,被广泛应用于皮秒锁模光纤激光器中^[4-6]。

又根据激光腔内净色散值不同,光纤激光器可分为孤子锁模激光器、色散管理锁模激光器、全正色散锁模激光器等^[7-10]。其中孤子锁模激光器腔内净色散必须为负,对于提供正常色散的掺铒光纤,在光纤激光器的谐振腔中使用色散补偿器件。啁啾光纤布拉格光栅 (chirped fiber Bragg grating, CFBG) 作为可以提供反常色散的元件之一,被广泛应用于谐振腔内外。并且它与其他空间色散管理元件 (如光栅对、棱镜)^[11-12] 相比,易于获得全光纤的谐振腔结构。金兹伯格—朗道方程^[13-14] 可描述孤子锁模激光器的非线性传输过程,它预测了束缚态孤子的形成,由 2 个或多个相同强度和脉宽的脉冲构成。同时,在负色散区产生孤子脉冲具有时间带宽积较小、几乎无啁啾等优点^[15]。

2007 年, KATZ O 等首次利用 CFBG 实现了脉宽为 3.6 ps、重复频率为 45 MHz 的掺铒锁模脉冲,但由于采用的是单模光纤,导致腔内稳定性较差^[16]。2018 年,孙江等报道了基于 SESAM 的全保偏被动锁模掺铒光纤激光器,其重复频率为 15.7 MHz,脉冲宽度为 4.26 ps, 3 dB 光谱带宽为 7.2 nm,在负色散区实现了宽光谱宽度的锁模脉冲,但由于腔中仍存在大量正色散,故未实现孤子锁模脉冲输出,并且使得脉冲展宽,因此需要进一步对腔中色散进行补偿^[17]。2021 年, YAN D Y 等利用 CFBG 和 SESAM 实现了在 1 μm 波段近零色散区域产生束

缚态孤子,脉宽为 260 fs,脉冲间隔为 4.8 ps^[18]。但其工作侧重于色散在近零色散区域产生束缚态孤子。根据上述研究内容可知,当前研究人员在掺铒光纤激光器的研究中,激光器输出脉冲的重复频率普遍偏低,对孤子的研究大多数集中于色散管理孤子和耗散孤子,同时在负色散区对束缚态孤子特性的研究较少。通过分析激光器腔内参数对束缚态孤子产生的影响,有利于输出性能更好的束缚态孤子。本文利用 SESAM 实现锁模,通过 CFBG 达到色散补偿的目的,为提高腔内的稳定性采用全保偏结构,在负色散区域对全光纤掺铒锁模激光器进行研究,并且实现了束缚态孤子的产生,丰富了 1 μm 波段负色散区孤子输出的研究。

1 实验原理及结构设计

基于 SESAM 的全光纤掺铒锁模皮秒激光器的实验原理如图 1 所示,采用线性腔结构。采用 980 nm 的泵浦光通过 980/1 064 滤波波分复用器 (filter wavelength division multiplexer, FWDM) 耦合进入一端作为激光器谐振腔反射镜的 CFBG (Teraxion, 中心波长为 1 064 nm,色散量为 0.62 ps/nm), CFBG 又可以用作补偿腔内色散量。其中 CFBG 的反射率会影响激光器的输出稳定性,随着反射率的降低,腔内损耗提高,使得激光产生的阈值很高,从而遏制了起振,谐振腔中起振模式减少,模式竞争不激烈使得稳定性越好。同样 CFBG 的反射带宽影响输出脉冲的平均功率,反射带宽越宽对应的平均功率越高,这是由于在一定泵浦功率下, CFBG 能从增益介质中获得更多的能量,但反射带宽太宽,会使得输出脉冲噪声较大^[19],故本文选择反射率为 22%、反射带宽为 4 nm 的 CFBG。采用的保偏增益光纤 (YB401-PM) 的吸收系数为 140 dB/m@915 nm,长度为 40 cm,群速度色散量为 0.0099 ps²,以确保其能够将泵浦光充分吸收,将其熔接在 CFBG 的另一端作为增益介质。采用反射式带尾纤的 SESAM 作为另一端腔镜 (Batop, SAM-1064-6 ps),调制深度为 24%,饱和通量为 40 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,另一个 980/1 064 FWDM 连接 SESAM 以从线性腔中移除残余泵浦光,避免 SESAM 的热问题。另一个 FWDM 的端口可以观察腔内锁模脉冲的脉冲宽

度、平均功率、稳定性等输出特性。激光器谐振腔中除增益光纤外,腔内器件尾纤均采用保偏光纤 PM980, 长度为 1.82 m, 群速度色散量为 0.045 ps^2 。

通过缩短腔长实现高重复频率, 最终谐振腔长度为 2.22 m。根据色散补偿原理, 该实验结构在 1 064 nm 处腔内的净色散量为 -0.315 ps^2 。

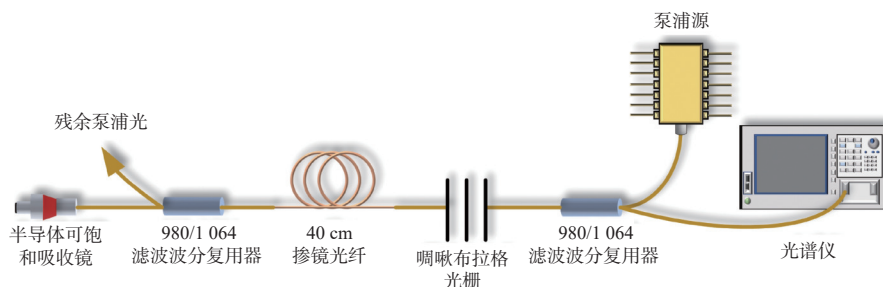


图1 掺镱光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device of Yb-doped fiber laser

该实验装置起到色散补偿作用的关键是 CFBG, 其二阶色散量可以简单表示为

$$|D| = \frac{2nL}{c\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中: n 为有效折射率; c 为光在真空中的传播速度; $\Delta\lambda$ 为 CFBG 两端反射的波长之差; L 为 CFBG 的长度。当脉冲光经过 CFBG 时, 长波长分量在光栅起始端被反射, 短波长分量在光栅末端被反射, 因此长波长比短波长的距离多走了 $2L$, 产生 $\Delta\tau = 2L/v_g$ 时间延迟差, 其中 v_g 为群速度色散, 使得脉冲光在整个过程中被压缩或还原, 从而达到补偿光脉冲色散的作用。

2 结果与讨论

在实验中逐渐增加泵浦功率, 激光器可以实现自启动锁模且保持稳定的输出, 其输出平均功率随泵浦功率的变化曲线如图 2 所示。

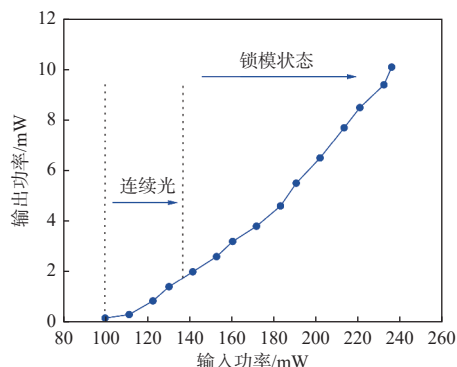


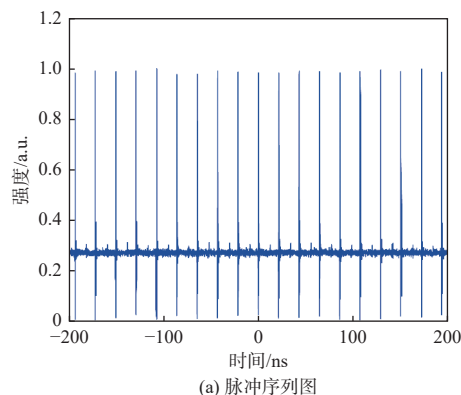
图2 激光输出功率随泵浦功率变化

Fig. 2 Variation of laser output power with pump power

当泵浦功率为 100 mW 时, 腔内产生连续光, 随着泵浦功率增加到 138 mW 时, 可输出稳定的锁

模脉冲, 且始终保持在锁模状态, 此时平均输出功率为 1.66 mW, 脉冲重复频率为 46.5 MHz, 激光器谐振腔的光学长度为 2.22 m, 通过腔长计算得到重复频率为 46.57 MHz, 与实际值符合。当泵浦功率高于 240 mW 时, 由于泵浦功率过高, 出现脉冲分裂的现象。

图 3(a) 为采用示波器 (Agilent Infiniium DSO-9254A) 在 50 ns/div 下测量得到的锁模脉冲序列。可以看出此时为单脉冲状态, 脉冲顶端平整且无明显毛刺, 说明锁模非常稳定且无调制包络。在示波器上观察到此时的脉冲间隔为 21 ns, 与 2.22 m 的腔长相匹配。为进一步研究锁模时激光器的输出特性, 采用频谱仪 (Agilent N1996A) 对输出脉冲的频谱特性进行分析。图 3(b) 为扫描分辨率为 1 kHz 时在 20 MHz~70 MHz 频率范围内测得基频 46.5 MHz 的频谱图。可以看出该激光器输出频谱信号的信噪比大于 50 dB, 证明此时激光器的输出脉冲具有较好的锁模质量。图 3(c) 给出了范围在 500 MHz 的脉冲频谱分布, 可以看出脉冲的频谱信号干净且无调 Q 包络, 证明此时激光器具有很好的脉冲稳定性。



(a) 脉冲序列图

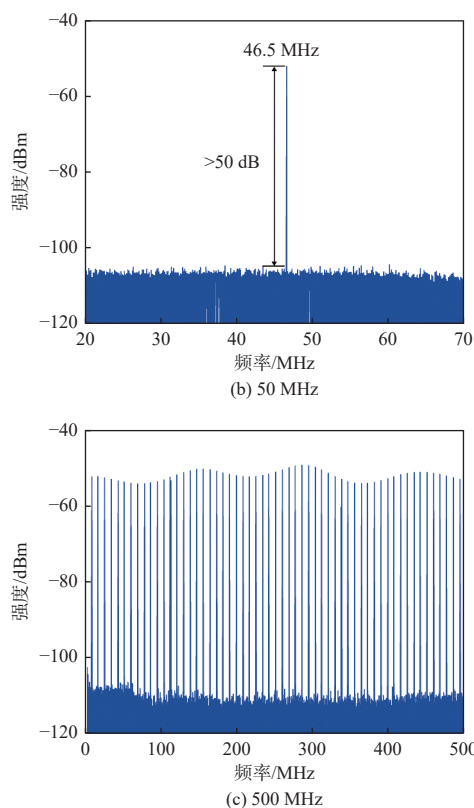


图3 脉冲序列及不同频率带宽下的频谱图

Fig. 3 Pulse sequence and RF spectrum with different frequency bandwidths

接着使用光谱仪(Yokogawa AQ6370D)在锁模状态下分析光谱,如图4(a)所示,中心波长为1 063.7 nm, 3 dB 光谱宽度为 1.44 nm。光谱中无 980 nm 的吸收峰,证明泵浦光已完全被吸收,高掺杂浓度的增益光纤可以有效抑制短波长,激发长波长并且减少放大的自发辐射现象。通过腔内色散分析结果表明,整个腔内净色散量为负值。图4(a)表明光谱具有对称的 Kelly 边带,因此激光器产生孤子脉冲,腔内色散在负色散区域。同时观察对数坐标下的光谱 Kelly 边带并不明显,可能是由于激光频率在脉冲带宽内的相位与色散波的相位相对较难发生准相位匹配。此时采用自相关仪(Femtochrome FR-103XL)对脉冲的自相关轨迹进行测试,如图4(b)所示。实验测量值如实线所示,双曲正割拟合的结果如虚线所示,经拟合可得到稳定锁模脉冲的脉冲宽度约为 4.5 ps。

为证明该锁模激光器具有高稳定性,首先对激光器进行 12 h 输出稳定性测试,输入功率固定在 138 mW,图5(a)为功率稳定性测试结果。平均功率为 1.67 mW,计算出标准偏差为 0.02%,功率稳定性为 5.4%,并且长时间测试过程中并未出现失锁

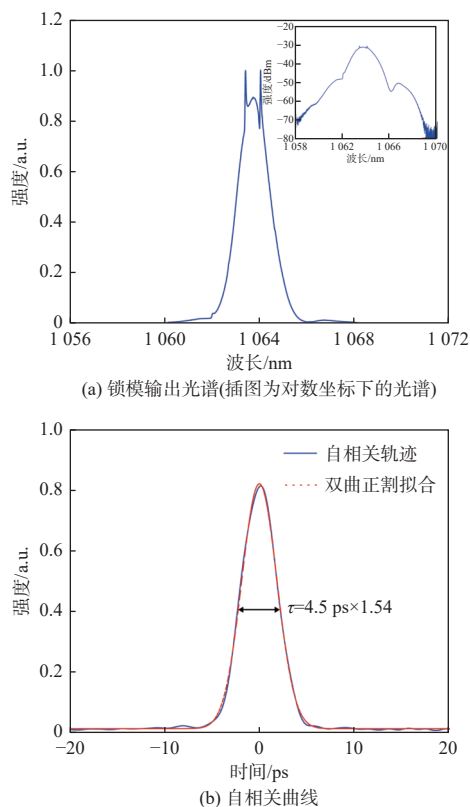


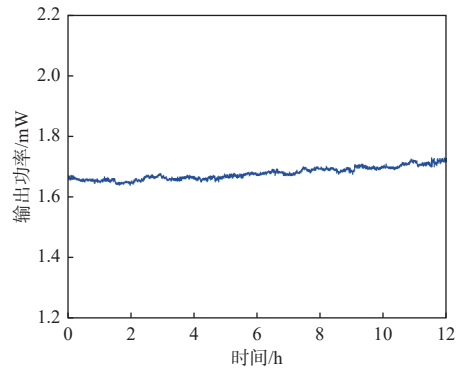
图4 锁模状态下的光谱图和自相关曲线

Fig. 4 Mode-locked output spectrum and auto-correlation curve

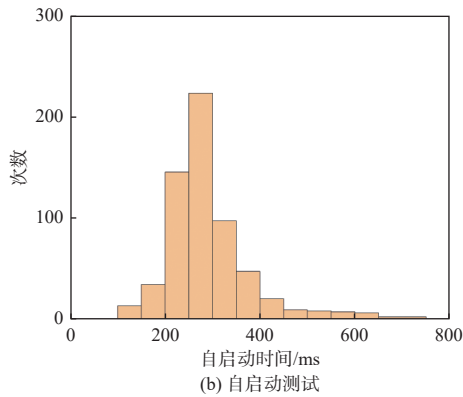
现象。由于泵浦源长时间工作,泵浦功率呈轻微上升趋势,导致输出功率上升,但功率变化并不明显,表明功率稳定性较好。接着对激光器进行自启动测试,图5(b)为对激光器进行 500 次自启动的测试结果。通过开关泵浦源,记录输出连续光变为锁模光所需要的时间,通过分析数据结构,超过 99% 的自启动时间小于 500 ms,并且满足泊松分布,符合自启动所需要的条件。

将泵浦功率逐渐增大,观察锁模状态的变化,当泵浦输入功率达到 220 mW 时,输出功率为 8.6 mW,此时在光谱仪上可以看到被调制的光谱如图6(a)所示,光谱调制间隔为 0.08 nm。该束缚态孤子的自相关迹如图6(b)所示,其脉冲间隔约为 46.58 ps,与光谱调制间隔相符,脉冲宽度约为 6.24 ps。在负色散区域产生的束缚态孤子,可根据束缚态的脉冲间隔与脉宽的关系,分为紧密束缚态和松散束缚态,当主脉冲和子脉冲间距大于脉宽的 5 倍时为松散束缚态,反之为紧密束缚态,故此时为松散束缚态。

为了与国内外现有掺铋光纤激光器进行全面对比,表1将我们的工作与前期研究人员的工作进



(a) 功率稳定性测试

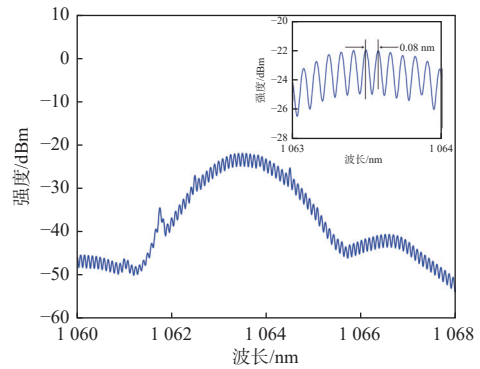


(b) 自启动测试

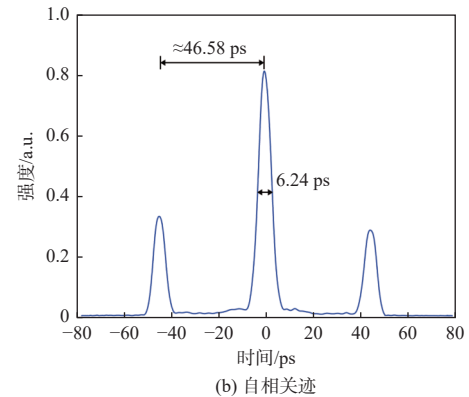
图5 激光器稳定性测试结果

Fig. 5 Laser stability test results

行了总结, 主要对研究内容、输出脉冲脉宽、重复频率及色散区域进行了汇总。从表中可以发现, 研究人员通常采用CFBG进行色散管理, 探究在不同色散区域内的孤子特性, 但多数研究中激光器输出脉冲的重复频率较低, 且很少有对负色散区



(a) 光谱



(b) 自相关迹

图6 束缚态下的输出特性

Fig. 6 Output characteristics of bound solitons

束缚态孤子产生特性进行研究。因此, 本文提出了一种利用CFBG进行色散补偿, 在负色散区实现束缚态孤子输出的掺镱光纤激光器, 为1 μm 波段掺镱光纤激光器输出孤子特性的研究提供了参考价值。

表1 国内外掺镱光纤激光器对比

Table 1 Comparison of Yb-doped fiber laser at home and abroad

研究机构	研究内容	脉宽/ps	色散区域	重复频率/ MHz	优点	缺点	参考文献
天津大学	掺镱光纤激光器中的光纤布拉格光栅对多脉冲的光谱滤波效应	0.26	近零色散	40.6	实现了近零色散区域束缚态孤子的产生	重复频率较低	[18]
天津大学	不同腔内净色散对锁模激光器输出特性和稳定性的影响	0.034	近零色散	26	6 MHz重频调谐范围, 稳定性好		[20]
西北大学	利用CFBG控制保偏锁模光纤激光的光谱形状和腔内色散	4.26	正色散	15.7	光谱带宽宽		[17]
天津大学	全保偏掺镱光纤激光器的时间抖动	6.63	正色散	10.4	低时间抖动		[21]
以色列索瑞克核研究中心	利用CFBG进行色散控制, 实现孤子模式锁定	3.6	负色散	45	重复频率较高	采用普通单模光纤, 环境稳定性较差	[16]
耶拿大学	实现全光纤掺镱锁模激光器在无波破碎和拉伸脉冲状态下工作	15.4	正色散	20.3	环境稳定性强	脉宽较宽	[22]
长春理工大学	谐振腔内净色散处于负色散区域时, 激光器输出脉冲的特性	4.5	负色散	46.5	实现了负色散区域束缚态孤子的产生, 重复频率较高		本文

3 结论

本文研究了基于线性腔结构的掺镱锁模光纤激光器, 利用 CFBG 调节腔内色散, 对在负色散区域产生孤子脉冲进行研究, 并得到具有 Kelly 边带的孤子脉冲以及滤波带宽影响产生束缚态孤子的结论。本文利用光纤式的 SESAM 和 CFBG 作为腔镜, 实现稳定的锁模脉冲, 当泵浦功率为 138 mW 时, 脉冲宽度为 4.5 ps, 重复频率为 46.5 MHz, 中心波长为 1 063.7 nm, 3 dB 光谱带宽为 1.44 nm。经过 12 h 的稳定测试, 证明该激光器锁模具有优异的稳定性和可靠性。通过增大泵浦功率, 观察到束缚态孤子脉冲, 脉宽为 6.24 ps, 脉冲间隔为 46.58 ps, 且一直保持锁模状态。该光源可以通过放大构成超快激光光源, 可广泛应用于工业、医疗、军事等领域。

参考文献:

- [1] CHANG G Q, WEI Z Y. Ultrafast fiber lasers: an expanding versatile toolbox[J]. *iScience*, 2020, 23(5): 101101.
- [2] SONG Y Q, JIA X Z, LIN Q M, et al. Tunable all-normal-dispersion femtosecond Yb: fiber laser with biased nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14(10): 102002.
- [3] ALAMGIR I, ROCHETTE M. Thulium-doped fiber laser mode-locked by nonlinear polarization rotation in a chalcogenide tapered fiber[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14300-14310.
- [4] 王婉琳, 王蓓, 徐廉伟, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的可调谐光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(5): 672.
WANG Wanlin, WANG Ji, XU Lianwei, et al. Tunable fiber lasers based on semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 672.
- [5] LIN Q M, YAN L, SONG Y Q, et al. Switchable single- and dual-wavelength femtosecond mode-locked Er-doped fiber laser based on carboxyl-functionalized graphene oxide saturable absorber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111405.
- [6] ZHOU Y, LIN W, CHENG H H, et al. Composite filtering effect in a SESAM mode-locked fiber laser with a 3.2 GHz fundamental repetition rate: switchable states from single soliton to pulse bunch[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10842-10857.
- [7] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9(1): 1881-1888.
- [8] HE W B, PANG M, YE H D, et al. Synthesis and dissociation of soliton molecules in parallel optical-soliton reactors[J]. *Light, Science & Applications*, 2021, 10(7): 1289-1303.
- [9] YAN D Y, LIU B W, GUO J, et al. Route to stable dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers with near-zero net cavity dispersion[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29766-29774.
- [10] WOODWARD R I. Dispersion engineering of mode-locked fibre lasers[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(3): 033002.
- [11] MA X X, LYU J L, LUO J, et al. Pulse convergence analysis and pulse information calculation of NOLM fiber mode-locked lasers based on machine learning method[J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 163: 2874-2878.
- [12] 郭婕, 闫东钰, 毕根毓, 等. 色散管理光纤锁模激光器在近零色散域的非线性优化[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 121-127.
GUO Jie, YAN Dongyu, BI Genyu, et al. Nonlinearity optimization of dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers with near-zero net cavity dispersion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 121-127.
- [13] ZHANG W C, LIU Y, WANG C, et al. Ultrafast PM fiber ring laser mode-locked by nonlinear polarization evolution with short NPE section segments[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 7934-7941.
- [14] KURTNER F X, DER AU J A, KELLER U. Mode-locking with slow and fast saturable absorbers-what's the difference?[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 159-168.
- [15] 陈嘉宁, 于涵, 司璐, 等. 基于非线性偏振旋转锁模技术的光纤飞秒激光振荡器[J]. *光学仪器*, 2023, 45(1): 1-7.
CHEN Jianing, YU Han, SI Lu, et al. Femtosecond fiber laser oscillator by nonlinear polarization rotation mode locking technique[J]. *Optical Instruments*, 2023, 45(1): 1-7.
- [16] KATZ O, SINTOV Y, NAFCHA Y, et al. Passively mode-locked ytterbium fiber laser utilizing chirped-fiber-Bragg-gratings for dispersion control[J]. *Optics Communications*, 2007, 269(1): 156-165.
- [17] 孙江, 侯磊, 林启蒙, 等. 基于啁啾光纤布拉格光栅的掺镱保偏锁模光纤激光研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 0114001.

- SUN Jiang, HOU Lei, LIN Qimeng, et al. All-polarization maintaining mode-locked Yb-doped fiber laser with chirped fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 0114001.
- [18] YAN D Y, LIU B W, ZOU D F, et al. Spectral filtering effect on multi-pulsing induced by chirped fiber Bragg grating in dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e46.
- [19] 宋锐, 侯静, 王彦斌, 等. 线形腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102007.
- SONG Rui, HOU Jing, WANG Yanbin, et al. Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102007.
- [20] ZHAO S C, QIN P, YAN D Y, et al. Stable mode-locked Yb-fiber laser with a 6 MHz repetition rate tuning range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200205.
- [21] CHEN W, SONG Y J, JUNG K, et al. Few-femtosecond timing jitter from a picosecond all-polarization-maintaining Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1347-1357.
- [22] ORTAÇ B, PLÖTNER M, SCHREIBER T, et al. Experimental and numerical study of pulse dynamics in positive net-cavity dispersion modelocked Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15595-15602.