

# 腔内滤波带宽对正色散束缚态孤子形成的影响

王凯杰, 王航, 杜团结, 李维炜, 陈楠, 罗正钱\*

厦门大学电子科学与技术学院(国家示范性微电子学院), 福建 厦门 361005

**摘要** 以被动锁模正色散掺镱(Yb)光纤激光器为研究对象,实验比较研究了激光腔内滤波带宽对产生正色散束缚态孤子的影响。采用高掺Yb光纤作为增益介质,半导体饱和吸收镜作为锁模部件,获得1064 nm全光纤线性腔锁模激光器。当腔内带通滤波器选用不同带宽(0.2,1.0,1.2,2.3 nm)时,观察到不同的皮秒锁模脉冲状态。在滤波带宽较小(0.2 nm)或较大(2.3 nm)时,仅产生稳定的单脉冲耗散孤子;相反地,在滤波带宽适中(1.0 nm或1.2 nm)时,分别观察到典型的相位差为 $\pi$ 和 $-\pi/2$ 束缚态耗散孤子,脉宽和脉冲间隔均分别为3 ps和14 ps。将束缚态耗散孤子激光通过主控振荡功率放大技术放大至1.4 W后,将其注入到光子晶体光纤中,获得了750~1600 nm超连续谱(10 dB谱宽),输出功率约为0.7 W,相比传统耗散孤子抽运具有更好的光谱平坦性。

**关键词** 激光器; 束缚态孤子; 滤波带宽; 超连续谱

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0806004

## Effect of Intracavity Filtering Bandwidth on Bound-State Soliton Generation in Normal Dispersion Regime

Wang Kaijie, Wang Hang, Du Tuanjie, Li Weiwei, Chen Nan, Luo Zhengqian\*

*School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College),*

*Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*

**Abstract** Based on passively mode-locked Yb-doped fiber lasers, the effect of intracavity filtering bandwidth on the generation of bound-state solitons in normal dispersion regime is studied experimentally. A heavily Yb-doped fiber as gain medium and a semiconductor saturable absorber mirror as mode-locked element are used to obtain the 1064 nm all-fiber linear cavity mode-locked laser. Different picosecond mode-locked pulse states are observed when the bandwidths of 0.2, 1.0, 1.2, and 2.3 nm of intracavity bandpass filter are selected. When the filtering bandwidth is narrow (0.2 nm) or broad (2.3 nm), only stable dissipative solitons are obtained. In contrast, when the filtering bandwidth is moderate (1.0 nm or 1.2 nm), we respectively observe the typical  $\pi$  and  $-\pi/2$  bound-state dissipative solitons both with the pulse width of 3 ps and pulse interval of 14 ps. Then the bound-state soliton laser is amplified to 1.4 W by the master oscillator power amplification technique and injected into a photonic crystal fiber, generating the supercontinuum spectrum with the spectral width of 10 dB in 750-1600 nm and the output power of 0.7 W, whose spectral flatness is better than that pumped by the traditional dissipative soliton.

**Key words** lasers; bound-state solitons; filtering bandwidth; supercontinuum spectrum

**OCIS codes** 140.3510; 140.7090; 320.6629

## 1 引言

光纤激光器中的增益介质是通过在光纤纤芯掺杂各种稀土离子得到,从而得到对应波长的激光输出。光纤激光器具有结构紧凑、光束质量好、转换效

率高等优势,在光纤传感、军事、光通信、医疗等领域均具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。锁模脉冲光纤激光器除了具备以上固有优势外,还具有超短脉冲、高峰值功率和低功耗等优点,进一步拓宽了激光应用市场,是最有潜力的激光光源之一<sup>[2-4]</sup>。

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-04-04; 录用日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(91750115)、福建省杰出青年科学基金(2017J06016)、厦门大学校长基金(20720180057)、福建省青年拔尖人才计划、厦门大学南强青年拔尖人才支持计划

\* E-mail: zq Luo@xmu.edu.cn

孤子锁模通过控制光纤激光器的腔内色散和非线性效应,从而获得超短锁模脉冲输出<sup>[5-9]</sup>。被动孤子锁模光纤激光器是由金兹伯格-朗道方程所描述的一种非线性系统<sup>[10]</sup>,当腔内增益足够大时,会出现多种不同的多脉冲运转模式,如孤子束<sup>[11-13]</sup>、谐波孤子<sup>[14-15]</sup>和束缚态孤子<sup>[16]</sup>等。其中,束缚态孤子是由于孤子在激光腔内连续往返过程中,孤子和共振色散波之间的非线性相互作用引起的,产生的多个脉冲作为一个整体进行传输和相互作用<sup>[17]</sup>。为了解这种孤子间相互作用的性质和结果,学者们也进行了大量的理论和实验研究。1991年, Malomed<sup>[18]</sup>利用非线性薛定谔-金兹伯格-朗道方程从理论上预测了束缚态孤子的存在。1997年, Akhmediev等<sup>[19]</sup>对一维复金兹伯格-朗道方程中 $\pi, 0, \pm\pi/2$ 相位差的束缚态孤子的存在和稳定性进行了分析和数值研究。2001年, Tang等<sup>[20]</sup>利用非线性偏振旋转技术在掺铒光纤激光器中观察到束缚态孤子脉冲。此后,学者们通过数值分析和实验研究了各种类型光纤激光器腔中的束缚态,如复合脉冲孤子光纤激光器<sup>[21]</sup>、脉冲展宽光纤激光器<sup>[22]</sup>和增益引导孤子锁模光纤激光器<sup>[23]</sup>等。利用不同锁模技术得到的光纤激光器中的束缚态孤子脉冲也被陆续报道。2012年, Yun等<sup>[24]</sup>在反常色散区的八字型锁模光纤激光器中得到脉冲宽度为1.3 ps、脉冲间隔为2.2 ps的束缚态孤子,并得到当束缚态孤子在腔外单模光纤中传输时,脉冲宽度和脉冲间隔随光纤长度呈近线性增加的结论。此外,学者们也用一些可饱和吸收体如碳纳米管<sup>[25]</sup>、石墨烯<sup>[26-27]</sup>、硫化钼<sup>[28]</sup>和半导体可饱和吸收镜(SESAM)<sup>[29]</sup>等实现锁模脉冲光纤激光器并在实验中观测到多种束缚态孤子。然而,上述工作仍主要侧重于如何获取束缚态孤子、改进性能及机理分析,且大多数工作在反常色散腔,对正色散腔束缚态孤子的研究相对较少,特别是缺少针对激光腔参数(如腔内滤波带宽)如何影响正色散束缚态孤子产生的研究。理解激光腔参数对束缚态孤子产生的影响不仅有利于实现高性能束缚态孤子,也将深化对锁模激光动力学的认识。

本文在利用SESAM实现1064 nm全正色散掺Yb被动锁模光纤激光器的基础上,研究和分析了4种不同腔内滤波带宽(0.2, 1.0, 1.2, 2.3 nm)对于束缚态孤子产生的影响,并将所得的束缚态孤子脉冲激光利用主控振荡功率放大(MOPA)技术放大后注入到光子晶体光纤中,得到10 dB光谱覆盖750~1600 nm的超连续谱,相关结果将为实现束缚

态孤子锁模光纤激光器和平坦的超连续谱产生提供一定的指导。

## 2 实验装置

获得1064 nm全正色散锁模光纤激光器的实验装置如图1所示。该锁模激光器采用线型腔结构,锁模机制是利用SESAM的可饱和吸收特性。抽运源的中心波长为976 nm,通过一个976 nm/1064 nm的波分复用器(WDM)将抽运激光耦合进激光腔的增益光纤中。增益光纤采用美国Nufern公司高掺Yb光纤单包层光纤(SM-YSF-HI),其对976 nm抽运光的吸收约为250 dB/m,光纤长约为80 cm。分光比为30/70的光纤耦合器置于增益光纤后,30%端用于激光输出,70%端连接SESAM。腔内加入的偏振控制器用于调节激光腔的偏振态,优化锁模运转状态。腔内SESAM为德国Batorp公司带尾纤的反射式SESAM(SAM-1064-40-3ps),其高反区为1000~1110 nm,在1064 nm附近的吸收约为40%,调制深度为24%,饱和恢复时间为3 ps,饱和通量为40  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ; SESAM作为腔的锁模器件的同时也作为激光谐振腔一端的反射镜。在WDM的1064 nm端接入另一个腔镜,该反射镜可在如下4种中选择:1)3 dB带宽为0.2 nm的光纤布拉格光栅(FBG);2)3 dB带宽为1 nm的FBG;3)3 dB带宽为1.2 nm的FBG;4)光纤端面镀膜镜(960~1090 nm波段大于99%反射率)+3 dB带宽约为2.3 nm的光纤带通滤波器(中心波长为1063.7 nm)。以此来控制腔内滤波带宽大小,研究激光腔内滤波带宽对于束缚态孤子产生的影响。整个腔长保持约为5 m,使得腔内仅有滤波带宽这一可变参量。

实验中使用日本Advantast公司Q8384型光谱分析仪测量1064 nm锁模光纤激光器的输出光谱,使用美国Agilent公司HP 70951B型光谱分析仪测量束缚态孤子放大光谱和超连续光谱,使用美国Electro-Optics Technology公司ET-3500F型光电探测器和美国Agilent公司DSO81204A型示波器测量输出的脉冲,使用美国Femtochrome公司FR-103XL型自相关仪测量脉冲宽度和观测束缚态孤子脉冲。

## 3 实验结果与分析

按照图1所示装置图搭建实验光路,保持光路其他部分不变,仅改变腔内滤波带宽,得到不同状态的锁模。具体实验结果如下。

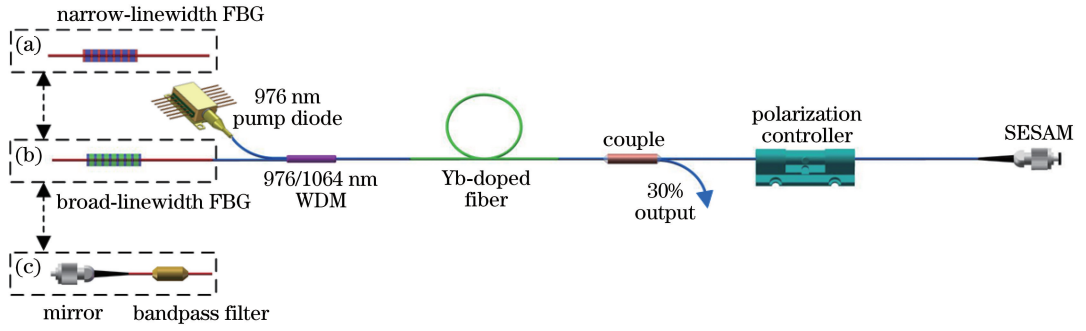


图 1 实验装置图。(a)窄带宽(0.2 nm)滤波腔;(b)中等带宽(1.0 nm 或 1.2 nm)滤波腔;(c)宽带宽(2.3 nm)滤波腔

Fig. 1 Diagram of experimental setup. (a) Filter cavity with narrow-bandwidth (0.2 nm);

(b) filter cavity with moderate-bandwidth (1.0 or 1.2 nm); (c) filter cavity with broad-bandwidth (2.3 nm)

### 3.1 0.2 nm 窄滤波带宽的单孤子锁模激光

如图 2 所示,实验装置中的反射镜选用 0.2 nm 带宽的光纤光栅时,当抽运功率增加到 40 mW 时,激光激射,激光中心波长为 1063.52 nm;当抽运功率增加到 70 mW 时,激光输出功率约为 2.5 mW,激光锁模自启动。适当调节偏振控制器,可在示波器上观察到稳定的孤子锁模脉冲序列。输出脉冲的

重复频率约为 20 MHz,脉冲宽度  $\tau \approx 18$  ps。光谱 3 dB 带宽为 0.07 nm,计算得到时间带宽积为 0.334,接近傅里叶转换极限,激光脉冲啁啾较小。继续增加抽运功率到 85 mW,激光输出功率约为 4 mW,容易观察到不稳定的脉冲分裂,但始终不能获得束缚态孤子脉冲。

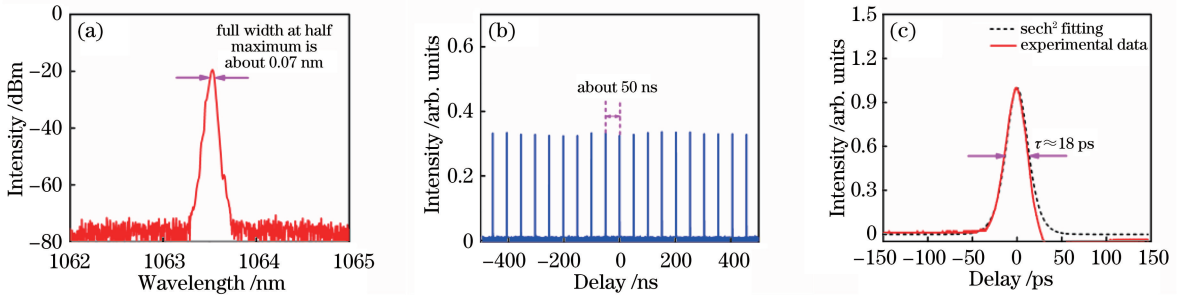


图 2 窄带宽锁模实验结果。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)自相关迹

Fig. 2 Experimental results of narrow bandwidth mode-locking. (a) Spectrum; (b) pulse sequence; (c) autocorrelation trace

### 3.2 2.3 nm 宽滤波带宽的单孤子锁模激光

如图 3 所示,实验装置中的反射镜选用光纤端面镀膜镜和 2.3 nm 带宽的光纤带通滤波器时,当抽运功率增加到 65 mW 时,产生中心波长为 1063.12 nm 的激光激射;继续增加抽运功率至

100 mW 时,得到耗散孤子锁模,激光线宽约为 2 nm (与滤波器带宽相当)。调节偏振控制器,可以得到稳定的间隔为 50 ns 的锁模脉冲序列,脉冲宽度约为 12 ps,时间带宽积为 3.18,表明该脉冲为典型的耗散孤子脉冲,此时激光输出功率约为 5 mW。继

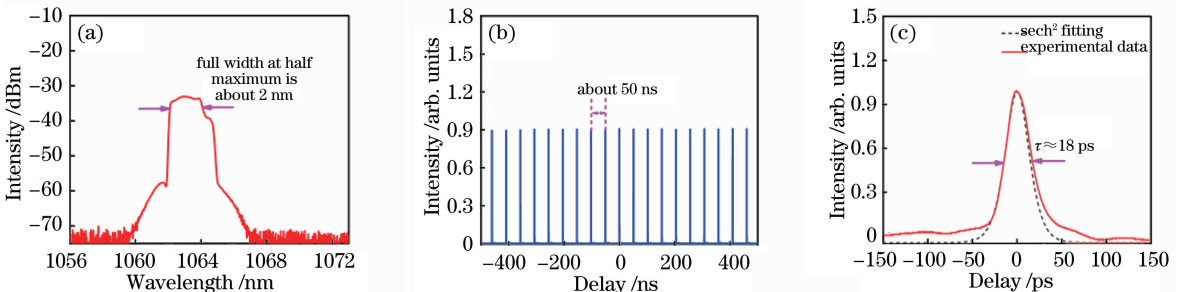


图 3 宽带宽锁模实验结果。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)自相关迹

Fig. 3 Experimental results of broad bandwidth mode-locking. (a) Spectrum; (b) pulse sequence; (c) autocorrelation trace

续增加抽运功率直到 150 mW, 始终没有观察到束缚态孤子脉冲和脉冲分裂现象。

### 3.3 1.0 nm 和 1.2 nm 滤波带宽的束缚态耗散孤子锁模激光

如图 4 所示, 实验装置中的反射镜选用 1.2 nm 带宽的光纤光栅, 当抽运功率增加到 50 mW, 可以观察到中心波长为 1064.52 nm 的激光; 当抽运功率增加到 78 mW 时, 激光输出功率为 3 mW。调节偏振控制器, 在示波器上观察到如图 4(b) 所示的稳定的脉冲序列, 间隔同样为 50 ns。此时在光谱仪上可以看到被调制的光谱[图 4(a)], 光谱调制间隔为 0.25 nm, 特别是从图 4(a) 中插图在线性坐标下的

光谱可以明显看出: 光谱调制具有不对称结构, 最高峰位于右侧, 并且光谱峰的强度满足<sup>[25]</sup>

$$I_k \approx (I_{k-1} + I_{k+1})/2, \quad k = 2, 3, 4, \dots, \quad (1)$$

式中:  $I_k$  为第  $k$  光谱峰的强度。该结果表明锁模激光是一种典型的相位差为  $-\pi/2$  的束缚态孤子, 如图 4(c) 所示, 脉冲间隔为 14 ps, 与光谱调制间隔 (0.25 nm) 相符; 脉冲宽度为 3 ps, 孤子分离间隔约为脉冲宽度的 4.7 倍, 说明此束缚态耗散孤子有着很强的相互作用; 3 个脉冲的峰值比为 1:2:1, 说明两个束缚态孤子具有相等的脉冲强度。另外, 脉冲时间带宽积约为 0.56, 表明锁模激光仍处于束缚态的耗散孤子状态。

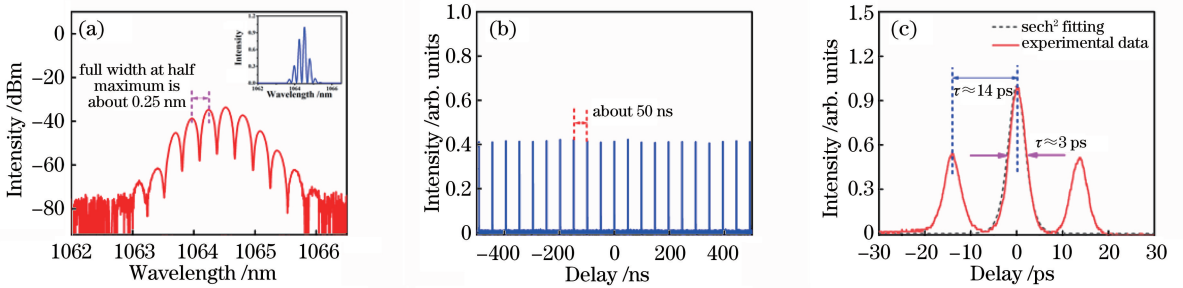


图 4 1.2 nm 带宽锁模实验结果。(a) 光谱(插图为线性坐标下的光谱); (b) 脉冲序列; (c) 自相关迹  
Fig. 4 Experimental results of 1.2 nm bandwidth mode-locking. (a) Spectrum (inset is spectrum in linear coordinate); (b) pulse sequence; (c) autocorrelation trace

如图 5 所示, 将腔内的反射镜换为 1.0 nm 带宽的光纤光栅, 当抽运功率增加至 46 mW 时, 可以得到 1063.92 nm 的激光; 当抽运功率继续增大至 68 mW 时, 可以得到 2.2 mW 的激光输出。此时调整偏振控制器, 仍可以得到类似图 4 的结果: 输出激光脉冲序列间隔约为 50 ns; 激光的光谱被调制[图 5(a)], 光谱间隔约为 0.25 nm, 不同的是, 此时

从图 5(a) 插图中线性坐标下的光谱可以看到, 光谱的调制关于中心波长对称, 且光谱最弱处位于中心波长处, 表明这是一种典型的相位差为  $\pi$  的束缚态孤子; 同样也观察了这种束缚态孤子的自相关迹: 与光谱调制间隔相符的脉冲间隔约为 14 ps, 脉冲宽度约为 3 ps, 其时域特征与 1.2 nm 带宽得到的束缚态耗散孤子基本一致。

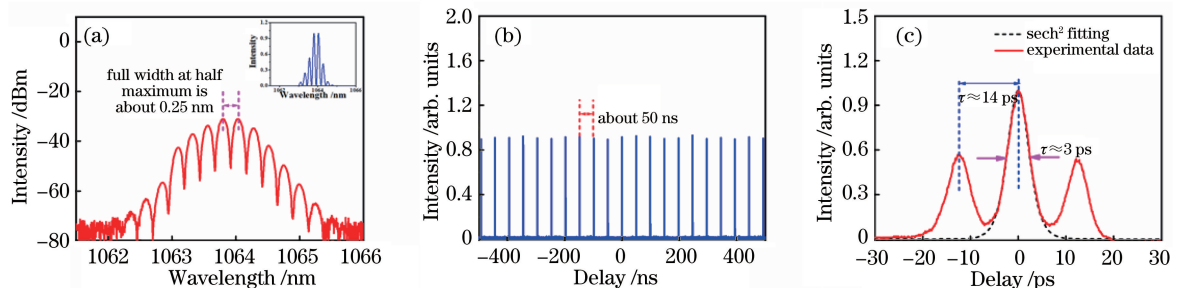


图 5 1.0 nm 带宽锁模实验结果。(a) 光谱(插图为线性坐标下的光谱); (b) 脉冲序列; (c) 自相关迹  
Fig. 5 Experimental results of 1nm bandwidth mode-locking. (a) Spectrum (inset is spectrum in linear coordinate); (b) pulse sequence; (c) autocorrelation trace

从以上 4 个实验结果可以得出, 当激光腔内滤波带宽较小 (0.2 nm) 或者较大 (2.3 nm) 时, 都不利于产生束缚态耗散孤子锁模。只有当激光腔内带宽

适中 (1.0 nm 或 1.2 nm) 时, 才有束缚态耗散孤子产生。这是由于当激光腔内滤波带宽较小时, 光谱过窄, 不易获得束缚态所需的光谱调制; 当激光腔内滤

波带宽较大时,时间带宽积比较大(啾啾较大),单脉冲能承受较大的能量,不易分裂为束缚态脉冲或谐波锁模脉冲;而当激光线宽介于两者之间时,单脉冲支持能量有限,同时光谱较宽,易于实现光谱调制,故容易实现束缚态耗散孤子锁模。

### 3.4 束缚态孤子脉冲抽运的超连续谱产生

利用 MOPA 技术将腔内滤波带宽为 1.2 nm 时得到的束缚态孤子脉冲种子激光放大至 1.39 W 后,将其注入到 5 m 光子晶体光纤(LMA-5 型, NKT Photonics 公司, 丹麦, 零色散波长约为

1050 nm<sup>[30]</sup>中,得到超连续谱[如图 6(a)所示]。光子晶体光纤两端熔有单模光纤,每一端的熔接损耗约为 1.4 dB,得到的超连续谱输出功率约为 0.7 W,10 dB 平坦度内光谱覆盖 750~1600 nm,10 dB 带宽约为 850 nm。与图 6(b)所示利用第 3.1 节获得的 0.07 nm 线宽耗散孤子和图 6(c)所示利用第 3.2 节获得的 2.00 nm 线宽耗散孤子抽运同一光子晶体光纤相比(相同的抽运功率下),束缚态孤子抽运产生的超连续谱具有更好的光谱平坦性。

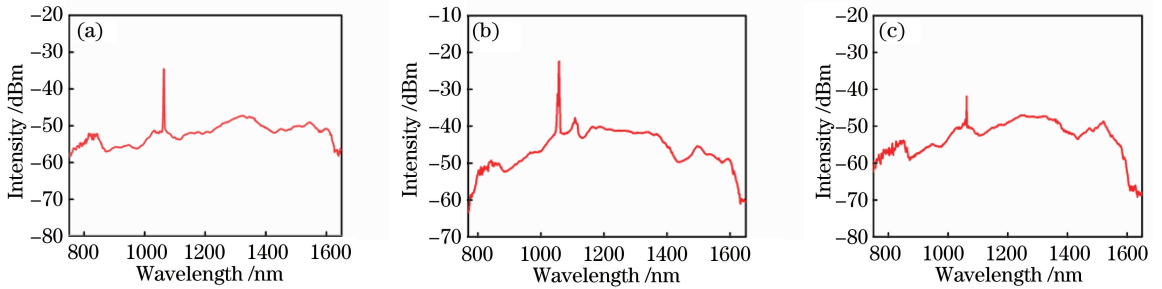


图 6 超连续谱光谱。(a)束缚态孤子抽运;(b) 0.07 nm 线宽的耗散孤子抽运;(c) 2.00 nm 线宽的耗散孤子抽运  
Fig. 6 Supercontinuum spectra. (a) Pumped by bound-state soliton; (b) pumped by dissipative soliton with 0.07 nm linewidth; (c) pumped by dissipative soliton with 2.00 nm linewidth

## 4 结 论

研究了 4 种不同腔内滤波带宽的 1064 nm 全正色散掺 Yb 锁模光纤激光器,分别对窄滤波带宽、较宽滤波带宽和宽滤波带宽能否产生束缚态孤子进行研究,并得出腔内滤波带宽对于束缚态孤子的产生有重要的影响且合适带宽的腔内滤波有利于束缚态孤子的产生的结论。利用 MOPA 技术将得到的束缚态孤子脉冲进行放大,放大脉冲经过光子晶体光纤后产生更为平坦的超连续谱。该研究结果有助于 1 μm 正色散区产生束缚态孤子和束缚态孤子脉冲激光抽运产生超连续谱的研究。

### 参 考 文 献

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.  
[2] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 868-874.  
[3] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.  
[4] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [Invited] [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.

[5] Duling I N. Subpicosecond all-fibre erbium laser[J]. Electronics Letters, 1991, 27(6): 544-545.  
[6] Luo Z Q, Huang Y Z, Wang J Z, et al. Multiwavelength dissipative-soliton generation in Yb-fiber laser using graphene-deposited fiber-taper [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1539-1542.  
[7] Xu J, Wu S D, Liu J, et al. Passively mode-locked traditional soliton, dissipative soliton Er-doped fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702003.  
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺钪光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702003.  
[8] Zou F, Yang X Z, Pan W W, et al. 1015-1080 nm tunable polarization-maintaining dissipative soliton mode-locked fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901005.  
邹峰, 杨学宗, 潘伟巍, 等. 1015~1080 nm 可调谐保偏光纤耗散孤子锁模激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0901005.  
[9] Yang S, Hao Q, Zeng H P. Repetition rate precision lock of nonlinear amplifying loop mirror passively mode-locked fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801007.  
杨松, 郝强, 曾和平. 非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器重复频率精确锁定研究 [J]. 中国激光,

- 2018, 45(8): 0801007.
- [10] Haus H A, Ippen E P, Tamura K. Additive-pulse modelocking in fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(1): 200-208.
- [11] Chouli S, Grelu P. Rains of solitons in a fiber laser [J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11776-11781.
- [12] Wang G D, Yang G, Liu Y G, *et al.* Soliton bundles and high-order harmonic mode-locked in Tm-doped fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0801011.  
王光斗, 杨光, 刘艳格, 等. 掺铥光纤激光器中的孤子束和高阶谐波锁模[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801011.
- [13] Ning Q Y, Liu H, Zheng X W, *et al.* Vector nature of multi-soliton patterns in a passively mode-locked figure-eight fiber laser[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11900-11911.
- [14] Grudinin A B, Gray S. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(1): 144-154.
- [15] Huang S S, Wang Y G, Li H Q, *et al.* Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 084202.  
黄诗盛, 王勇刚, 李会权, 等. 氧化石墨烯被动锁模掺镱光纤激光器多脉冲现象的实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 084202.
- [16] Seong N H, Kim D Y. Experimental observation of stable bound solitons in a figure-eight fiber laser[J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1321-1323.
- [17] Soto-Crespo J M, Akhmediev N, Grelu P, *et al.* Quantized separations of phase-locked soliton pairs in fiber lasers[J]. Optics Letters, 2003, 28(19): 1757-1759.
- [18] Malomed B A. Bound solitons in the nonlinear Schrödinger/Ginzburg-Landau equation [M] // Fournier J D, Sulem P L. Large scale structures in nonlinear physics. Lecture notes in physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991, 392: 288-294.
- [19] Akhmediev N N, Ankiewicz A, Soto-Crespo J. Multisoliton solutions of the complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(21): 4047-4051.
- [20] Tang D Y, Man W S, Tam H Y, *et al.* Observation of bound states of solitons in a passively mode-locked fiber laser [J]. Physical Review A, 2001, 64(3): 033814.
- [21] Tang D Y, Zhao B, Shen D Y, *et al.* Compound pulse solitons in a fiber ring laser [J]. Physical Review A, 2003, 68(1): 013816.
- [22] Grelu P, Bellhache F, Gutty F, *et al.* Phase-locked soliton pairs in a stretched-pulse fiber laser [J]. Optics Letters, 2002, 27(11): 966-968.
- [23] Zhao L M, Tang D Y, Wu X, *et al.* Bound states of gain-guided solitons in a passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3191-3193.
- [24] Yun L, Liu X M. Generation and propagation of bound-state pulses in a passively mode-locked figure-eight laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 512-519.
- [25] Li L, Ruan Q J, Yang R H, *et al.* Bidirectional operation of 100 fs bound solitons in an ultra-compact mode-locked fiber laser [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 21020-21026.
- [26] Li X L, Zhang S M, Meng Y C, *et al.* Observation of soliton bound states in a graphene mode locked erbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics, 2012, 22(4): 774-777.
- [27] Fu B, Li J, Cao Z, *et al.* Bound states of solitons in a harmonic graphene-mode-locked fiber laser [J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 116-120.
- [28] Wang Y D, Mao D, Gan X T, *et al.* Harmonic mode locking of bound-state solitons fiber laser based on MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 205-210.
- [29] Nielsen C K, Ortac B, Schreiber T, *et al.* Single pulse and bound state operation of a self-starting self-similar all-PM Yb-doped fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 610217.
- [30] Cheng H H, Luo Z Q, Huang Y Z, *et al.* Low-threshold supercontinuum generation and optimization of PCF-intracavity-excited Q-switched fiber lasers [J]. Optics Communications, 2014, 321: 145-149.