

# 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** 本文以被动锁模正色散掺 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 全光纤线型腔锁模激光器。当腔内带通滤波器选用不同带宽 (0.2 nm、1 nm、1.2 nm 或 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 nm 或 1.2 nm) 时, 我们分别观察到典型的相位差为  $\pi$  和  $-\pi/2$  束缚态耗散孤子, 脉宽和脉冲宽度都分别为  $\sim 3$  ps 和  $\sim 14$  ps。进一步, 将束缚态耗散孤子激光通过主控振荡功率放大 (MOPA) 技术放大至 1.4 W 后, 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  $\sim 0.7$  W, 相比传统耗散孤子泵浦具有更好的光谱平坦性。

**关键词** 光纤激光器; 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

## Effect of Intracavity Filtering Bandwidth on Generation of Bound-state Solitons in the 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-locking 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 different bandwidth (0.2 nm, 1 nm, 1.2 nm or 2.3 nm) of intracavity bandpass filter is 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 observed the typical  $\pi$  and  $-\pi/2$  bound-state dissipative solitons both with the pulse width of  $\sim 3$  ps and pulse interval of  $\sim 14$  ps. Then the bound-state soliton laser is amplified to  $\sim 1.4$  W by the master oscillator power amplification technique and injected into a photonic crystal fiber, generating the supercontinuum spectrum with the 10 dB spectrum of 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** fiber lasers; bound-state solitons; filtering bandwidth; supercontinuum spectrum

**OCIS codes** 140.3510; 140.7090; 320.6629

**收稿日期:** 年-月-日; **修回日期:** 年-月-日; **录用日期:** 年-月-日

**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和厦门大学南强青年拔尖人才计划。

\*E-mail: zqluo@xmu.edu.cn

# 1 引言

光纤激光器通过在光纤纤芯掺杂各种稀土离子作为增益介质,得到对应波长的激光输出。因为其具有结构紧凑、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>。而锁模脉冲光纤激光器除了具备以上固有优势,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>。

孤子锁模是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>,当腔内增益足够大的时候,会出现多种不同的多脉冲运转模式,比如孤子束<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>。为了解这种孤子间的相互作用的性质和结果,人们也进行了大量的理论和实验研究。1991年, Malomed 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<sup>[18]</sup>。1997年, Akhmediev 等人对一维复金兹伯格-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<sup>[19]</sup>。2001年,唐定远等人利用非线性偏振旋转(NPR)技术在掺铒光纤激光器中首次观察到束缚态孤子脉冲<sup>[20]</sup>。此后,人们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。不同的锁模技术得到光纤激光器中的束缚态孤子脉冲也被陆续报道。2012年, Yun 等人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,脉冲宽度和间隔随光纤长度近线性增加的结论<sup>[24]</sup>。此外,人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在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,研究和分析了四种不同腔内滤波带宽(0.2 nm、1 nm、1.2 nm 和 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 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 nm 到 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。抽运源的中心波长是 976 nm，通过一个 976 nm/1064 nm 的波分复用器 (WDM) 耦合进激光腔的增益光纤中。增益光纤采用美国 Nufern 公司高掺掺 Yb 光纤单包层光纤 (SM-YSF-HI)，对于 976 nm 抽运光的吸收大约为 250 dB/m，光纤长约 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。腔内加入偏振控制器 (PC) 用于调节激光腔的偏振态并且优化锁模运转状态。腔内 SESAM 是德国 Batop 公司带尾纤的反射式半导体可饱和吸收镜 (SAM-1064-40-3ps)，其高反区为 1000-1110 nm，在 1064 nm 附近的吸收大约为 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。在波分复用器的 1064 nm 端接入另一个腔镜，该反射镜可在如下 4 种中选其一：1) 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 的光纤布拉格光栅 (FBG) 3) 3 dB 带宽为 1.2 nm 的光纤布拉格光栅 (FBG) 和 4) 光纤端面镀膜镜 (960-1090 nm 波段 >99% 反射率) + 3dB 带宽 ~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。整个腔长保持大约为 5 m，使得腔内仅有滤波带宽这一可变参量。

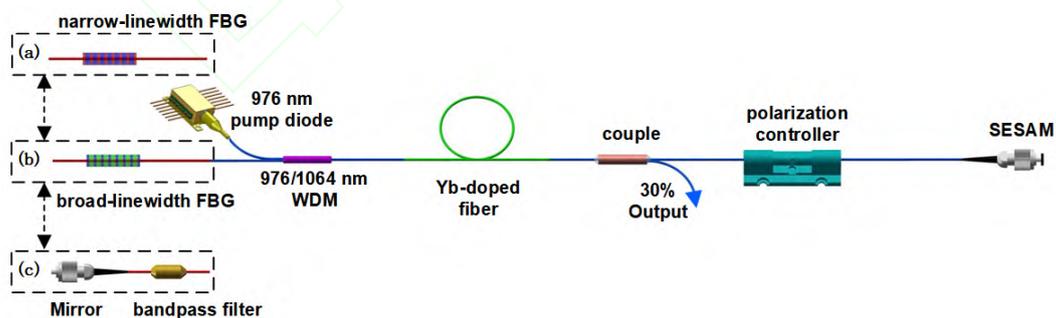


图1 实验装置图 (a) 窄带宽(0.2 nm)滤波腔；(b) 中等带宽(1 nm或1.2 nm)滤波腔；(c) 宽带宽(2.3 nm)滤波腔

Fig. 1 Diagram of the experimental setup (a) cavity with narrow-bandwidth filter(0.2 nm); (b) cavity with moderate-bandwidth filter (1 nm或1.2 nm); (c) cavity with broad-bandwidth filter (2.3 nm);

实验中使用 Advantast Q8384 光谱分析仪测量 1064 nm 锁模光纤激光器的输出光谱和

HP 70951B 光谱分析仪测量束缚态孤子放大光谱和超连续光谱；光电探测器（ET-3500F）和 Agilent DSO81204A 示波器测量输出的脉冲；用 Femtochrome 公司 FR-103XL 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 装置图搭建实验光路，保持光路其它不变，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：

#### 3.1 0.2 nm 窄滤波带宽的单孤子锁模激光

如图 2 所示，当实验装置中的反射镜选用 0.2 nm 带宽的光纤光栅时，抽运功率加到 40 mW 时，激光激射，激光中心波长为 1063.52 nm。当抽运功率加到 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，在示波器上能观察到稳定的孤子锁模脉冲序列。输出脉冲的重复频率大约为 20 MHz，脉冲宽度为 18 ps。光谱 3 dB 带宽为 0.07 nm，计算得时间带宽积为 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~4 mW，可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。

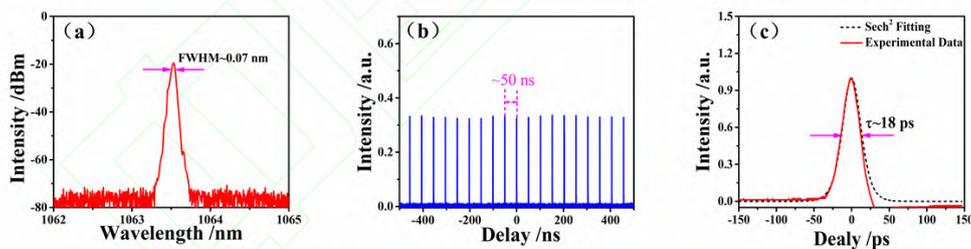


图 2 窄带宽锁模实验结果 (a) 光谱；(b) 脉冲序列；(c) 自相关迹

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

#### 3.2 2.3 nm 宽滤波带宽的单孤子锁模激光

如图 3 所示，当实验装置中的反射镜选用光纤端面镀膜镜+2.3 nm 带宽的光纤带通滤波器时，当抽运功率加到 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，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 锁模脉冲序列，脉冲宽度约为 12 ps，时间带宽积为 3.18，表明典型的耗散孤子脉冲。此时激光输出功率~5 mW。继续增加抽运功率直到 150 mW，

仍始终没有观察到束缚态孤子脉冲，也没产生脉冲分裂现象。

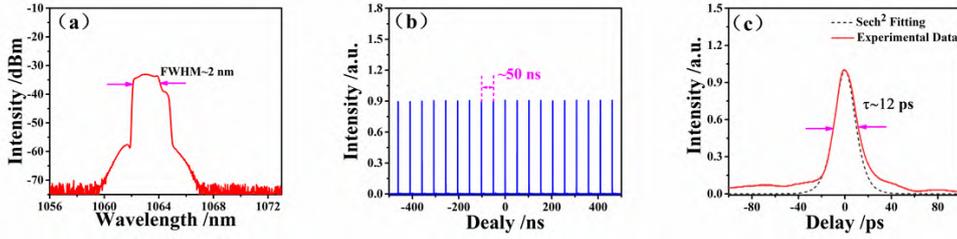


图3 宽带宽锁模实验结果 (a) 光谱; (b) 脉冲序列; (c) 自相关迹

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

### 3.3 1 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，当实验装置中的反射镜选用 1.2 nm 带宽的光纤光栅时，抽运功率加到 50 mW 时，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~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~0.25 nm，特别是图 4 (a) 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以下关系<sup>[25]</sup>：

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

式中  $I_k$  表示第  $k$  光谱峰的强度。表明这是一种典型的相位差为  $-\pi/2$  的束缚态孤子。如图 4 (c) 所示，在自相关仪上进一步验证了其  $-\pi/2$  束缚态孤子：脉冲间隔~14 ps，与光谱调制间隔 (~0.25 nm) 相符；脉冲宽度~3 ps，孤子分离间隔约是脉冲宽度的 4.7 倍，说明此束缚态耗散孤子有着很强的相互作用；三个脉冲的峰值比为 1:2:1，说明了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~0.56，表明仍处于束缚态的耗散孤子状态。

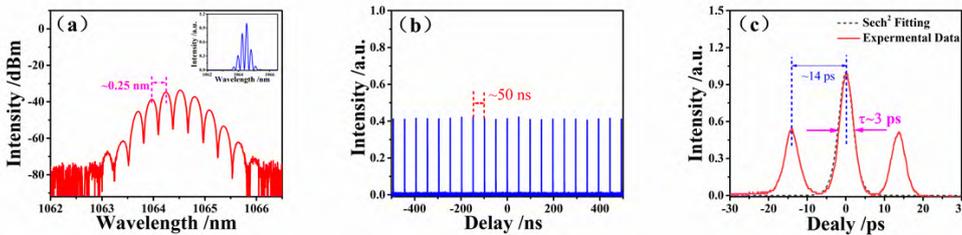


图4 1.2 nm带宽锁模实验结果 (a) 光谱 (插图为线性坐标下的光谱); (b) 脉冲序列; (c) 自相关迹

Fig. 4 Experimental results of 1.2 nm bandwidth mode-locking (a) spectrum (inset: spectrum in linear coordinates); (b) pulse sequence; (c) autocorrelation traces

如图 5 所示，当我们将腔内的反射镜换作 1 nm 带宽的光纤光栅时，抽运功率加至 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，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)]，光谱间隔大约~0.25 nm，不同的是，此时从图 5 (a) 插图中的线性坐标下的光谱可以看到，光谱的调制关于中心波长具有对称结构，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；同样的，我们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~14 ps，脉冲宽度~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。

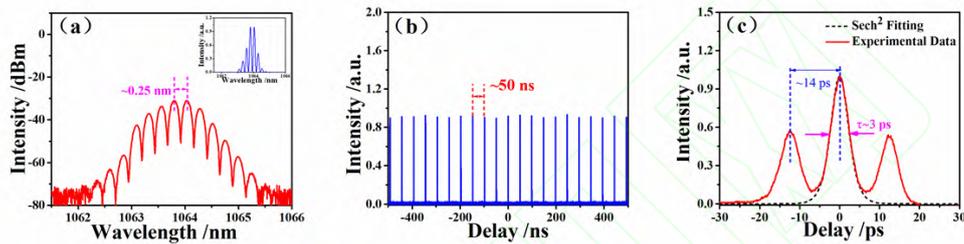


图5 1 nm带宽锁模实验结果 (a) 光谱 (插图为线性坐标下的光谱)；(b) 脉冲序列；(c) 自相关迹

Fig. 5 Experimental results of 1 nm bandwidth mode-locking (a) spectrum (inset: spectrum in linear coordinates) ; (b) pulse sequence; (c) autocorrelation traces

从以上四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 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 (啁啾较大)，单脉冲能承受较大的能量，不易分裂产生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的状态。

### 3.4 束缚态孤子脉冲泵浦的超连续谱产生

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利用 MOPA 技术放大至 1.39 W 后，注入到 5 m 光子晶体光纤 (NKT LMA-5 光纤，零色散波长~1050 nm<sup>[30]</sup>) 中，得到超连续谱产生[如图 6 (a) 所示]。光子晶体光纤两端熔有单模光纤，每一端的熔接损耗大约为 1.4 dB，得到的超连续谱输出功率大约为 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 3.1 获得的 0.07 nm 线宽耗散孤子泵浦和图 6 (c) 所示利用 3.2 获得的 2 nm 线宽耗散孤子泵浦同一光子晶体光纤相比 (相同的泵浦功率

下)，束缚态孤子泵浦产生的超连续谱具有更好的光谱平坦性。

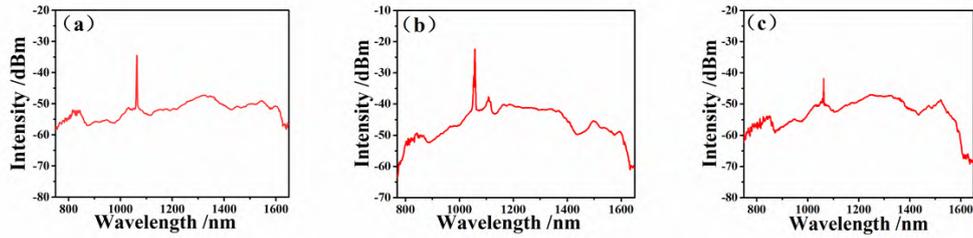


图6 超连续谱光谱 (a) 束缚态孤子泵浦; (b) 0.07 nm线宽的耗散孤子泵浦; (c) 2 nm线宽的耗散孤子泵浦

Fig. 6 Supercontinuum spectrum (a) pumped by the bound-state soliton; (b) pumped by the dissipative soliton of 0.07 nm linewidth; (c) pumped by the dissipative soliton of 2 nm linewidth

## 4 结 论

本文研究了四种不同腔内滤波带宽的 1064 nm 全正色散掺镱锁模光纤激光器，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产生有重要的影响，合适带宽的腔内滤波才有利于束缚态孤子的产生。并且将得到的束缚态孤子脉冲采用 MOPA 技术放大后经过光子晶体光纤产生更为平坦的超连续谱。研究结果有助于 1  $\mu\text{m}$  正色散区产生束缚态孤子和束缚态孤子脉冲激光泵浦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[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.
- [3] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831.
- [4] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications[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 Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(07):0702003.  
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(07):0702003.

- [8] Zou F, Yang X Z, Pan W W, *et al.* 1050-1080 nm Tunable Polarization-Maintaining Dissipative Soliton Mode-Locked Fiber Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(09):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(09):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(08):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(08):0801007.
- [10] Haus H A, Ippen E P, Tamura K. Additive-pulse mode locking 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 Physics 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]//Large Scale Structures in Nonlinear Physics. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991: 288-294.
- [19] Akhmediev N N, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M. Multisoliton solutions of the complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(21): 4047.
- [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, Belhache F, Gutton 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. 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, Yang R, 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, Mao D, Gan X, 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[C]//Fiber Lasers III: Technology, Systems, and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6102: 610217.
- [30] Cheng H, Luo Z, Huang Y, et al. Low-threshold supercontinuum generation and optimization of PCF-intracavity-excited Q-switched fiber lasers[J]. Optics Communications, 2014, 321: 145-149.

## 网络首发:

**标题:** 腔内滤波带宽对正色散束缚态孤子形成的影响

**作者:** 王凯杰,王航,杜团结,李维炜,陈楠,罗正钱

**收稿日期:** 2019-02-26

**录用日期:** 2019-04-12

**DOI:** 10.3788/cjl201946.0806004

## 引用格式:

王凯杰,王航,杜团结,李维炜,陈楠,罗正钱. 腔内滤波带宽对正色散束缚态孤子形成的影响[J]. 中国激光,2019,46(08):0806004.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 基于无芯光纤结合保偏光纤的可切换多波长光纤激光器

赵小丽 张钰民 宋言明 骆飞 祝连庆

北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192

中国激光,2019,46(2):0201005

### 基于保偏掺铥光纤饱和吸收体的2 $\mu\text{m}$ 波段超窄线宽光纤激光器

白燕 延凤平 冯亭 韩文国 张鲁娜 程丹 白卓娅 温晓东

北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

中国激光,2019,46(1):0101003

### 光纤激光器外腔型光谱组束研究

刘小溪 王学锋 王军龙 朱占达 郑也 李磐

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

中国激光,2018,45(8):0801009

### 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

杨松 郝强 曾和平

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

中国激光,2018,45(8):0801007

### 结构紧凑的kHz重复频率光纤-固体皮秒激光光源

赵明 郝强 郭政儒 曾和平

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

中国激光,2018,45(4):0401010