

# 基于混合锁模的耗散孤子掺铒光纤激光器\*

丰兴理<sup>1</sup>, 赵磊<sup>1,2</sup>, 张昊宇<sup>2</sup>, 邓国亮<sup>1</sup>, 汪莎<sup>1</sup>,  
冯国英<sup>1</sup>, 周寿桓<sup>1,3</sup>, 马裕宽<sup>1</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 3. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 从一种简单、全光纤结构的混合被动锁模掺铒光纤激光器中, 得到了高稳定性、宽光谱的耗散孤子。激光器结合了半导体可饱和吸收体和非线性偏振旋转两种锁模机制, 并运行在正常色散区内; 通过色散管理, 激光器能产生光谱宽度 39.1 nm 和时域宽度 178 fs 的孤子脉冲序列。激光输出的中心波长为 1.55  $\mu\text{m}$ , 重复频率约为 34.3 MHz, 单脉冲能量在 0.33 nJ 左右。与此同时, 激光器的斜效率也约等于 15.5%; 室温工作下, 激光器能实现自启动锁模, 且运行在稳定单脉冲输出状态的时长在 15 h 以上。

**关键词:** 掺铒光纤激光器; 混合锁模; 超快; 宽光谱; 耗散孤子

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190481

## Dissipative soliton erbium-doped fiber laser based on hybrid mode-locking

Feng Xingli<sup>1</sup>, Zhao Lei<sup>1,2</sup>, Zhang Haoyu<sup>2</sup>, Deng Guoliang<sup>1</sup>, Wang Sha<sup>1</sup>,  
Feng Guoying<sup>1</sup>, Zhou Shouhuan<sup>1,3</sup>, Ma Yukuan<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;  
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;  
3. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The dissipative solitons with high stability and wide spectrum are obtained from a simple and all fiber hybrid passively mode-locked erbium-doped fiber laser. The laser combines two mode-locked mechanisms of saturable absorber and nonlinear polarization rotation, and operates in the normal dispersion region. Through dispersion management, the laser can generate a series of soliton pulses with spectral width of 39.1 nm and pulse duration of 178 fs. The wavelength of laser operation is 1.55  $\mu\text{m}$ , the repetition frequency is about 34.3 MHz, and single pulse energy is evaluated to be 0.33 nJ. At the same time, the laser also possesses the slope efficiency of about 15.5%; at room temperature, the laser can realize self-starting mode locking, and the operation time in the stable state of a single pulse output is more than 15 h.

**Key words:** erbium-doped fiber laser; hybrid mode-locking; ultrafast; wide spectrum; dissipative soliton

被动锁模光纤激光器因具有结构紧凑、稳定性较好、操作容易、可自启动等优点<sup>[1-3]</sup>, 被广泛应用于超连续谱<sup>[4]</sup>、光频率梳<sup>[5]</sup>、光采样系统<sup>[6]</sup>等多个领域。谐振腔净群速度色散的正负产生不同机制的脉冲输出。在负色散区域, 光纤产生的自相位调制等非线性效应与群色散效应达到平衡, 产生传统的负色散孤子脉冲。由孤子面积理论可知, 传统孤子单脉冲能量只能限制很低的水平(通常在 0.1 nJ)<sup>[7-8]</sup>。在正色散区域内, 非线性效应、色散、损耗和增益相互作用, 形成耗散孤子脉冲<sup>[9-10]</sup>; 相较于传统孤子脉冲, 耗散孤子脉冲的能量能扩大到 4 个量级<sup>[11]</sup>, 脉冲压缩后能达到较高的峰值功率<sup>[12]</sup>。被动锁模耗散孤子脉冲的这些优点使其在光学、普通物理、生物学和医学等多个领域具有广泛的应用<sup>[13-14]</sup>。

最近十几年, 大量的文献报道了各种各样的耗散孤子光纤激光器。被动锁模光纤激光器的锁模机制可分为两种: 可饱和吸收体和人工可饱和吸收体。可饱和吸收体是一种透射率与光强相关的器件, 可吸收低强度的光, 透过高强度的光。目前, 主流的可饱和吸收体有: 石墨烯氧化物可饱和吸收体、碳纳米管可饱和吸收体(Carbon

\* 收稿日期: 2019-11-23; 修订日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705149)

作者简介: 丰兴理(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为锁模脉冲光纤激光器; 775347352@qq.com。

通信作者: 赵磊(1984—), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为光纤激光器; 38639752@qq.com。

Nanotubes, CNT)、半导体可饱和吸收体 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)<sup>[15-22]</sup>。人工可饱和吸收体是利用非可饱和吸收体器件实现锁模脉冲,与可饱和吸收体的机理大致相同,如非线性偏振旋转 (Nonlinear Polarization Rotation, NPR)、“8”字形谐振腔锁模技术等<sup>[23-25]</sup>。这两种技术都有各自的优缺点:可饱和吸收体拥有很宽的可饱和吸收带、低吸收损耗、调制深度可控、锁模状态稳定,但受波长限制、受温度变化影响比较大、制作麻烦;人工可饱和吸收体不受波长影响、操作简便,本质上却极不稳定。

通过两种锁模机制的组合,能获得各自的优点,产生更高平均功率和时间纯度的超短脉冲<sup>[26]</sup>。Haxsen F 等人也发现结合 SESAM 和 NPR 两种技术混合锁模,能抑制连续波的竞争,从而能有效稳定脉冲输出和降低自锁模阈值<sup>[20]</sup>。Li Xing 等人用 SESAM 和空间结构 NPR 混合锁模产生了耗散孤子脉冲,所使用 SESAM 的调制深度低至 6%,激光器可稳定工作 48h 以上<sup>[27]</sup>。

已报道过的仅采用 SESAM 锁模技术,或采用混合锁模技术的耗散孤子光纤激光器,其输出光谱的带宽较窄,进行脉冲压缩,无法得到很窄的时域脉冲宽度(半高全宽) $\Delta\tau$ 。为得到更窄脉宽的耗散孤子脉冲,又鉴于混合被动锁模技术的优点,我们用掺铒光纤作为增益介质,在采用 SESAM 和 NPR 混合锁模的基础上,引进了光纤色散管理的方法。最终实现了波长在 1.55  $\mu\text{m}$ 、光谱宽度 $\Delta\lambda$ (3 dB 带宽)为 39.1 nm 的耗散孤子。脉冲的重复频率约为 34.3 MHz,平均功率为 11.3 mW,能量在 0.33 nJ 左右。用单模光纤进行压缩后,脉宽 $\Delta\tau$ 为 178 fs;泵浦功率大于 360 mW,激光器能实现自启动锁模且稳定运行时长超过 15 h。

## 1 实验装置及原理

图 1 为混合被动锁模耗散孤子激光器的结构示意图。一段 0.4 m 长的掺铒光纤 (Erbium-doped Fiber, EDF, Likkie Er110-4/125) 作为增益介质,群速度色散 (Group Velocity Dispersion, GVD- $\beta_2$ ) 为 0.011 4 ps<sup>2</sup>/m,  $\beta_2=0.017$  ps<sup>2</sup>/m 的色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF) 给谐振腔提供正色散,一个输出波长为 976 nm 的半导体激光器 (最大输出功率 970 mW) 作为泵浦源。一个偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 和偏振相关隔离器 (Polarization Sensitive Isolator, PS-ISO) 构成非线性偏振旋转模块,ISO 确保光在谐振腔内的单向传播,PC 则用来启动和微调激光器的锁模状态。其余的器件包括:光耦合器 (Optical coupler, OC) 90/10、环形器 (Circulator, CIR)、反射式 SESAM (BATOP, GmbH)。SESAM 的调制深度  $\Delta R=10\%$ ,恢复时间  $\tau=1.5$  ps,饱和通量  $\Phi_{\text{sat}}=40$   $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。实验中所使用器件的尾纤都是单模光纤 SMF28 (Single Mode Fiber, SMF,  $\beta_2=0.022$  ps<sup>2</sup>/m),为方便控制腔的净色散,我们特意采用了尾纤为 Hi1060flex (Corning,  $\beta_2=0.018$  ps<sup>2</sup>/m) 的波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM)。

## 2 实验结果与分析

把 OC 的“90%”输出端接入腔内,单模光纤 SMF28 和 WDM 尾纤长度都是 0.8 m。把 DCF 长度作为唯一变量(由长变短)来控制谐振腔的净色散,从而得到光谱随色散的演变,如图 2 所示。起初,DCF 的长度为 10 m,谐振腔总长为 12 m,相应的净群速度色散  $\beta_1=0.181$  ps<sup>2</sup>。输出光谱呈现方形,这是典型的正净色散下的耗散孤子光谱。随着 DCF 逐渐缩短,腔净色散也逐渐变小, $\Delta\lambda$  逐渐增大。腔净色散小于 0.045 ps<sup>2</sup>(即 DCF 长度小于 3 m)时,无法实现耗散孤子锁模脉冲。从图中可看出,腔净色散等于 0.045 ps<sup>2</sup> 时,光谱宽度能

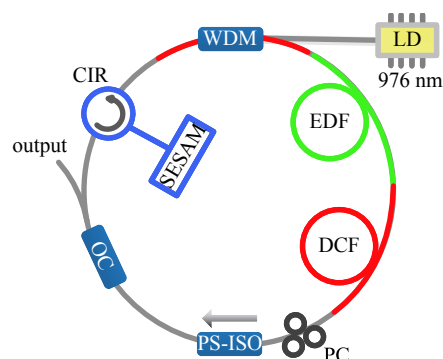


Fig. 1 Configuration of the hybrid mode-locking fiber laser

图 1 混合锁模光纤激光器结构示意图

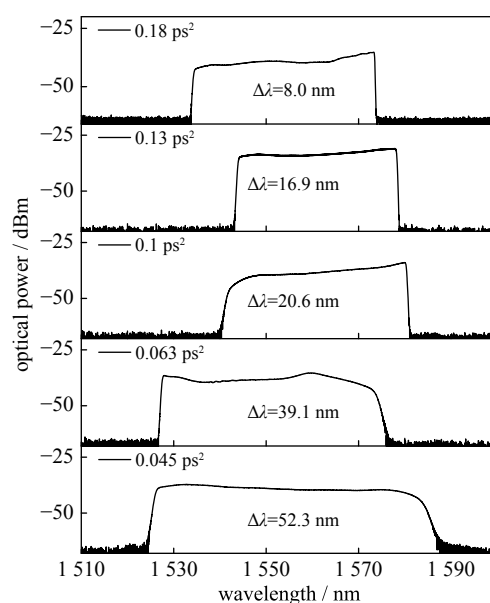


Fig. 2 Output optical spectrum evolution as a function of the net cavity dispersion

图 2 输出光谱随净色散的演变

到达最大( $\Delta\lambda=52.3$  nm)。在该参数下,激光器无法实现自启动锁模,工作时长仅有数十分钟。相比之下,净色散为  $0.063$  ps<sup>2</sup> 时,  $\Delta\lambda$  虽小了一点,却能稳定地实现启动锁模,工作时长也达 15 h。此参数下,为最理想的输出状态。

图 3 是腔净色散为  $0.063$  ps<sup>2</sup> 时,输出单脉冲光谱和平均功率随泵浦功率增强的演变。图 3(a) 为不同泵浦功率下的输出光谱,结果和 Zhao 等人报道的增益导引耗散孤子基本吻合<sup>[23]</sup>。各泵浦功率对应的输出单脉冲光谱左侧都具有边缘尖峰,说明光纤内存在很强的自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)<sup>[28]</sup>;光谱的中心波长也向短波方向移动,这是由于更高的泵浦光激发了更强的非线性效应<sup>[29]</sup>。光谱宽度随功率的变化则记录在图 3(b)中,  $\Delta\lambda$  由  $4.7$  nm 逐渐增加到  $730$  mW 时的  $39.1$  nm, 往后继续增加泵浦功率,  $\Delta\lambda$  逐渐减小(如图 3(b)所示),这可能是随着泵浦光的逐渐加强,脉冲能量得到进一步提高,SPM 效应逐渐增强,光谱右侧由下滑的曲线出现越来越高的尖峰,因此,  $\Delta\lambda$  才逐渐增大,又逐渐减小。图 3(b)还列出了不同泵浦功率对应的输出功率值,激光器的泵浦光自启动锁模阈值为  $360$  mW; 根据不同泵浦功率下的输出功率,计算出激光器的斜效率  $\eta=15.5\%$ 。

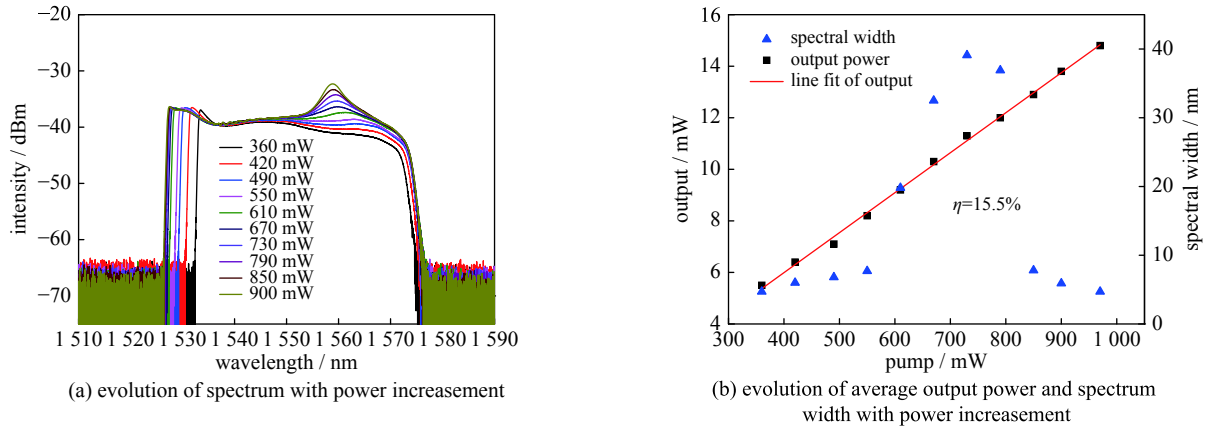


Fig. 3 Evolution of laser performance at  $0.063$  ps<sup>2</sup> estimated net dispersion with the increase of pump power

图 3 腔净色散为  $0.063$  ps<sup>2</sup> 时,激光器特性随泵浦功率增加的变化

泵浦功率  $P=730$  mW 时,可得到光谱最宽( $\Delta\lambda=39.1$  nm)的输出脉冲,脉冲重复频率为  $34.3$  MHz, 相应的脉冲能量在  $0.33$  nJ 左右。为得到真实的短脉冲输出,需要在腔外进行色散补偿,先在 OC 输出尾纤端熔接一段 DCF, 消除单模尾纤对脉冲的压缩,再测量脉冲的自相关仪曲线图(如图 4(a)所示)。脉冲形状为典型的高斯形  $\Delta\tau=4.9$  ps,

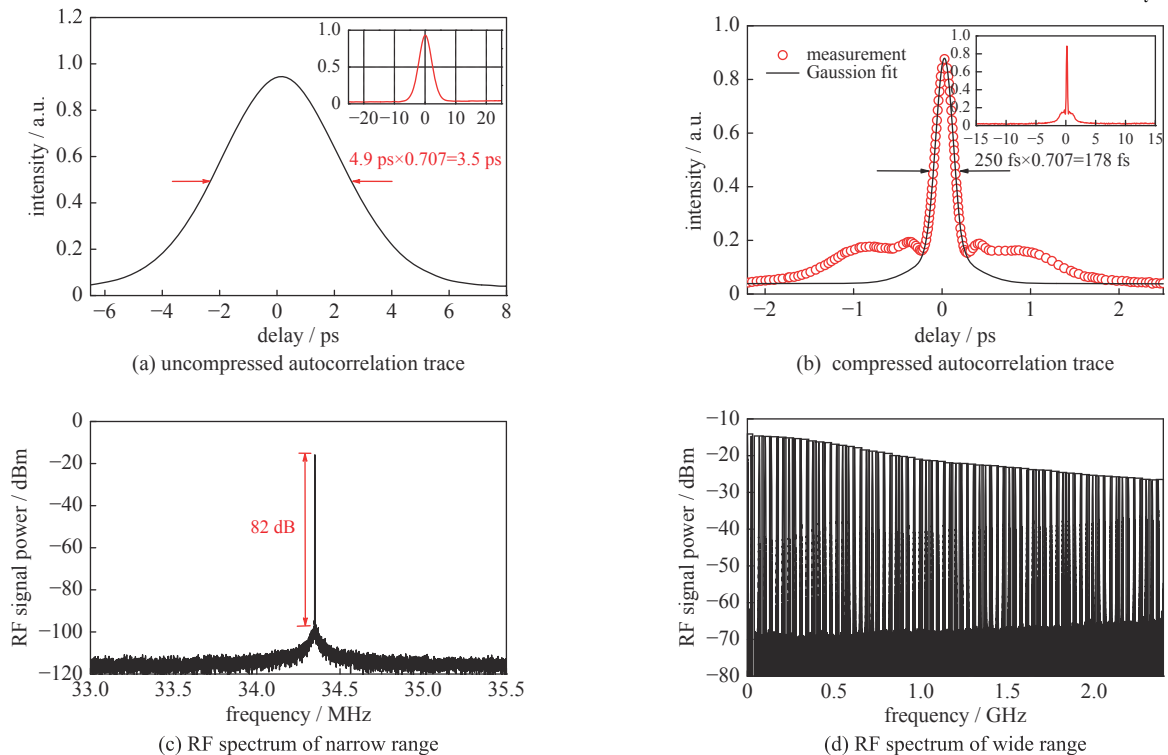


Fig. 4 Performance of the laser at pump power of  $730$  mW

图 4 泵浦功率为  $730$  mW 时激光器的特性

经高斯拟合  $\Delta\tau = 3.5$  ps。由于谐振腔净色散在正常色散区内,脉冲可以在腔外引入负啁啾并用标准单模光纤进行压缩。为更好的压缩脉冲,用 5 m 的 SMF28 光纤熔接上 3.1 m 长的 Hi1060 单模光纤(Corning,  $\beta_2 = -0.11$  ps<sup>2</sup>/m)作为脉冲压缩器,把压缩器输出端接入自相关仪,测量压缩后的脉冲轨迹(如图 4(b)所示)。对压缩后的脉冲进行高斯拟合,得到去啁啾后的脉宽  $\Delta\tau = 178$  fs。对应的时间带宽积为 0.87,几乎是傅里叶变换极限(0.44)的两倍,表明输出脉冲包含了大量的非线性啁啾。同时,也可以观察到脉冲有两个边带峰和类似“梯形”的基座,这是由于高阶非线性啁啾难以压缩,这个“基座”占了脉冲接近 35% 的能量。图 4(c)是频谱分析仪的分辨率带宽设置为 30 Hz 时,窄频范围的脉冲射频频谱图。从图中可知,脉冲的信噪比为 82 dB。宽频范围(3 MHz~2.5 GHz)的射频频谱图描绘在图 4(d)中,可清晰看出,脉冲没有受到调制,表明稳定运行在单脉冲输出状态下(有任何多脉冲或谐波锁模脉冲都可以明显从 RF 图中看出<sup>[30]</sup>)。实验恒温下(18 °C),稳定单脉冲输出的时长在 15 h 以上。

### 3 结 论

从一种简单、全光纤结构的锁模掺铒激光器,通过 SESAM 和 NPR 混合锁模,产生了宽光谱的耗散孤子脉冲。由于使用了色散补偿光纤,不需色散调控器件,激光器也能工作在正常色散区的耗散孤子机制下。通过色散管理,激光器能产生中心波长 1.55  $\mu\text{m}$ 、光谱宽度 39.1 nm、重复频率 34.3 MHz、平均功率 11.3 mW 的耗散孤子。单脉冲能量为 0.33 nJ,信噪比为 82 dB。通过测量不同泵浦功率所对应的输出功率,计算出激光器的斜效率约等于 15.5%;经过单模光纤,可以把初始脉宽 3.5 ps 的脉冲压缩至 178 fs,由于包含了高阶非线性啁啾,压缩后的脉冲存在着“底座”。在室温条件下,激光器能实现自启动锁模,运行在稳定单脉冲输出状态的时长在 15 h 以上。本文的研究为制备宽光谱、高频率稳定性的被动锁模光纤激光器提供了可行方案,由于紧凑、全光纤、输出稳定、易制作的特点,它具有很大的潜力。

#### 参 考 文 献:

- [1] Ferman M E, Hart I. Ultrafast fiber laser technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 191-206.
- [2] 林宏奂, 隋展, 李明中, 等. 被动锁模 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形腔激光器的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(5): 123-126. (Lin Honghuan, Sui Zhan, Li Mingzhong, et al. Passive mode-locked Yb<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 123-126)
- [3] Liu X M, Wang T, Shu C, et al. Passively harmonic mode-locked erbium-doped fiber soliton laser with a nonlinear polarization rotation[J]. *Laser Physics*, 2008, 18(11): 1357-1361.
- [4] 李超, 朱启华, 赵磊, 等. 中红外超连续谱在氟化物光纤中的产生[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(10): 53-55. (Li Chao, Zhu Qihua, Zhao Lei, et al. Mid-IR supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(10): 53-55)
- [5] Brian R, Washburn, Scott A, et al. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 250-252.
- [6] Hochrein T, Wilk R, Mei M, et al. Optical sampling by laser cavity tuning[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1613-1617.
- [7] Nelson L E, Jones D J, Tamura K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers[J]. *Applied Physics B (Lasers and Optics)*, 1997, 65(2): 277-294.
- [8] Liu Xueming. Coexistence of strong and weak pulses in a fiber laser with largely anomalous dispersion[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5874-5887.
- [9] Zhao L M, Tang D Y, Zhang H, et al. Dynamics of gain-guided solitons in an all-normal-dispersion fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1806-1808.
- [10] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [11] Bulend O, Baumgartl M, Limpert J, et al. Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1585-1587.
- [12] Kieu K, Renniger 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.
- [13] Ackemann T, Firth W J. Dissipative solitons in pattern-forming nonlinear optical systems: cavity solitons and feedback solitons[M]. Berlin: Springer, 2005: 55-100.
- [14] Akhmediev N, Ankiewicz A. Dissipative solitons: from optics to biology and medicine[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] Xu Jia, Wu Sida, Li Huihui, et al. Dissipative soliton generation from a graphene oxide mode-locked Er-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23653-23658.
- [16] Liu Xianglian, Wang Yonggang, Li Xiaohui, et al. The generation of dissipative solitons in an all-fiber passively mode-locked laser based on semiconductor type of carbon nanotubes absorber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(3): 200-205.
- [17] Cabasse A, Martel G, Oudar J L, et al. High power dissipative soliton in an Erbium-doped fiber laser mode-locked with a high modulation depth saturable absorber mirror[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9537-9542.
- [18] Amelie C, Gaponov D, Ndao K, et al. 130 mW average power, 46 nJ pulse energy, 102 ps pulse duration from an Er<sup>3+</sup> fiber oscillator passively mode locked by a resonant saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2620-2622.
- [19] Wang Hongjie, Kotov L V, Gaponov D A, et al. Dissipative soliton generation and amplification in erbium-doped fibers operating at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 283-289.

- [20] Haxsen F, Wandt D, Morgner U, et al. Monotonically chirped pulse evolution in an ultrashort pulse thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1014-1016.
- [21] Gumenyuk R, Vartiainen I, Tuovinen H, et al. Dissipative dispersion-managed soliton 2  $\mu\text{m}$  thulium/holmium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 609-611.
- [22] Huang Chongyuan, Wang Cong, Shang Wei, et al. Developing high energy dissipative soliton fiber lasers at 2 micron[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13680-13684.
- [23] Zhao L M, Tang D Y, Wu J, et al. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1788-1790.
- [24] Wu X, Tang D Y, Zhang H, et al. Dissipative soliton resonance in an all-normal dispersion erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5580-5584.
- [25] Yang Jinhui, Guo Chunyu, Ruan Shuangchen, et al. Observation of dissipative soliton resonance in a net-normal dispersion figure-of-eight fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 1500806.
- [26] Kim S, Kim Y, Park J, et al. Hybrid mode-locked Er-doped fiber femtosecond oscillator with 156 mW output power[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15054-15060.
- [27] Li X, Wu M, Zou W, et al. Purified dissipative solitons with a rectangle spectrum from a hybrid mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1635-1638.
- [28] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [29] Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium fiber laser without dispersion compensation and additional filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1023-1029.
- [30] Meng Yichang, Niang A, Guesmi K, et al. 1.61  $\mu\text{m}$  high-order passive harmonic mode locking in a fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29921-29929.