

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.006

# 基于窄带耗散孤子 Figure-9 光纤振荡器和单级单模光纤放大器的皮秒脉冲光纤前端

张震<sup>1,2</sup>, 段典<sup>1,2</sup>, 陈雨君<sup>1,2</sup>, 魏珊珊<sup>1</sup>,  
马金栋<sup>1</sup>, 姚波<sup>1</sup>, 毛庆和<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室,  
安徽 合肥 230031;  
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 报道了一种基于 Figure-9 光纤振荡器和单级单模光纤放大器的皮秒脉冲光纤前端。通过优化光纤振荡器腔内光纤长度, 获得了中心波长约为 1064 nm、重复频率 10 MHz、脉冲能量 0.4 nJ 的自启动单脉冲锁模窄带耗散孤子皮秒脉冲; 通过优化光纤放大器的增益光纤长度, 对光纤振荡器产生的 21.07 ps 脉冲进行单级单模光纤放大后, 脉冲能量达 10 nJ 时的脉冲光谱依然呈钟形结构, 3 dB 谱宽和脉宽分别为 0.31 nm 和 19.8 ps, 该皮秒脉冲光纤前端有望在精密加工等领域发挥重要作用。

**关键词:** 激光技术; 锁模光纤激光器; 脉冲能量; 非线性相移

中图分类号: TN248 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2023)04-00476-07

## Picosecond pulse fiber front end based on narrow-band dissipative soliton Figure-9 fiber oscillator and single-stage single-mode fiber amplifier

ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, DUAN Dian<sup>1,2</sup>, CHEN Yujun<sup>1,2</sup>, WEI Shanshan<sup>1</sup>,  
MA Jindong<sup>1</sup>, YAO Bo<sup>1</sup>, MAO Qinghe<sup>1\*</sup>

(1 Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** A picosecond pulse fiber front end based on a narrow-band dissipative soliton Figure-9 fiber oscillator and a single-stage single-mode fiber amplifier is reported here. By optimizing the fiber length of the fiber oscillator cavity, a self-starting single pulse mode-locked narrow-band dissipative soliton picosecond pulse with a center wavelength of about 1064 nm, a repetition rate of 10 MHz, and a pulse

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2017YFB0405100, 2017YFB0405200), 中国科学院战略性先导科技专项(B类) (XDB21010300), 国家自然科学基金 (61805258), 先进激光技术安徽省实验室主任基金 (20191001), 安徽省科技重大专项 (201903a07020021)

**作者简介:** 张震 (1993-), 江苏徐州人, 研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: zhangzen@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 毛庆和 (1963-), 安徽泾县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事纤维光学、激光物理与器件及其应用技术等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-04-02; 修改日期: 2021-05-17

\*通信作者。

energy of 0.4 nJ is obtained. Then the 21.07 ps picosecond pulse generated by the fiber oscillator is amplified by a single-stage single-mode fiber amplifier, and the spectrum can still maintain a bell-shaped structure with a 3 dB spectral width of 0.31 nm and a pulse width of 19.8 ps, respectively, even the pulse energy reaches 10 nJ. The picosecond fiber front end is expected to play an important role in precision machining and other fields.

**Key words:** laser techniques; mode-locked fiber laser; pulse energy; nonlinear phase shift

## 0 引言

大能量皮秒脉冲在精密加工、测距、医学成像等领域应用广泛<sup>[1-5]</sup>。通常,通过皮秒脉冲种子源后接固体放大器来获得这类脉冲<sup>[6]</sup>。但是,皮秒脉冲种子源光谱带宽必须足够窄,才能利用高增益激光晶体较窄的增益带宽(一般 $< 0.6$  nm)来实现高效固体放大;同时,还需要种子脉冲能量足够高,才能避免固体放大过程中极易出现的混沌、分形等非线性物理过程<sup>[6]</sup>。迄今,短腔调 $Q$ 激光器<sup>[7]</sup>、锁模固体<sup>[8]</sup>和光纤激光器<sup>[9]</sup>等均可作为这类皮秒脉冲种子源。锁模光纤激光器具有光束质量好、结构紧凑、易维护、成本低廉等优点,已逐渐成为最重要的皮秒脉冲源之一。采用非线性偏振旋转(NPE)<sup>[10]</sup>、半导体可饱和吸收体(SESAM)<sup>[11]</sup>以及非线性放大环形镜(NALM)<sup>[12]</sup>等可饱和吸收体,均已实现了锁模光纤激光器的皮秒脉冲输出。其中,基于NPE的锁模光纤激光器产生的皮秒脉冲性能优良,但因其由非保偏光纤构建,环境稳定性差,难以用于实验室以外的工作环境;而基于SESAM的锁模光纤激光器结构简单、易自启动,是当前广泛应用的皮秒种子源<sup>[11,13,14]</sup>,但SESAM损伤阈值低、使用寿命短,制约了SESAM锁模激光器的长期稳定运转。近年来,基于NALM的Figure-9光纤激光器已实现窄带皮秒脉冲锁模,与基于SESAM等可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器类似,锁模自启动均是基于腔内的可饱和和吸收效应,当腔内色散、非线性、增益和损耗达到平衡时可获得稳定的脉冲输出<sup>[15]</sup>。这种激光器不仅可以很容易地实现锁模自启动,且锁模器件不存在寿命问题,非常适合在实验室外的复杂环境中长期稳定运转<sup>[15-18]</sup>。国内外许多研究机构均开展了对这种皮秒脉冲Figure-9光纤激光器的研究。迄今,采用基于NALM的全正色散Figure-9光纤激光器,已可方便地获取不同重复频率、不同脉宽的皮秒脉冲,但是,Figure-9光纤激光器产生的窄带耗散孤子皮秒脉冲的能量依然偏低,不能直接用作固体放大器种子源来获取大能量皮秒脉冲。文献[19, 20]使用单级单模光纤对窄带皮秒脉冲进行放大,在保证放大后脉冲光谱宽度不超过固体增益介质的增益带宽情况下,输出最大单脉冲能量均小于10 nJ。本课题组Lu等<sup>[9]</sup>通过采用级间陷波滤波与整形的两级单模光纤放大方案,获得了10 nJ、0.5 nm的皮秒脉冲输出,该皮秒脉冲非常适合于用作皮秒固体放大器的种子脉冲光纤前端。但是,该方案中的级间陷波滤波器的技术要求相对较高,两级光纤放大结构也较复杂。对于实际应用极为广泛的20 ps及以上的皮秒脉冲,采用直接的单级光纤放大器,在将脉冲能量提升到大于10 nJ的同时,能否将其谱宽依然控制在固体放大器增益带宽之内,急需进行演示验证。

本文构建了窄带耗散孤子Figure-9光纤振荡器<sup>[21]</sup>,产生出脉宽21.07 ps、谱宽0.20 nm的皮秒脉冲,其单脉冲能量为0.43 nJ,与文献[22, 23]中报道的同类型激光器结果相仿。通过合理优化单级光纤放大器结构参数,放大后脉冲能量达10 nJ时的3 dB谱宽依然只有0.31 nm,从而可直接用作固体放大的光纤前端。



变化时, 振荡器均能实现锁模自启动, 但是, 随着该段无源光纤长度的增加, 对应于振荡器单脉冲锁模运转的泵浦区间逐渐减小。不失一般性, 将FBG与PM-OC之间的无源光纤长度固定在5.9 m (对应于振荡器重复率为10 MHz) 来展示此振荡器的输出特性。

当泵浦光功率逐渐增加至86 mW, 振荡器自启动锁模, 输出为多脉冲状态。缓慢降低泵浦功率至72 mW时, 振荡器输出转化为稳定的单脉冲序列。泵浦光功率为69 mW时使用示波器 (Agilent, MSO8064A) 和探测器 (EOT, ET3000A) 测得的振荡器输出脉冲时域波形如图2(a)所示, 由图可见, 相邻脉冲间隔为99 ns, 对应的脉冲序列重复频率约为10 MHz, 该重复频率与激光器纵模间隔相等, 均为 $c/L$  ( $c$ 为光速,  $L$ 为谐振腔光学长度), 这与20 m的腔长相对应。继续降低泵浦功率至61 mW时, 振荡器转换为调Q锁模状态。可见当泵浦功率处于62~72 mW时, 振荡器工作在单脉冲锁模状态, 并且测量得到对应的单脉冲能量为0.29~0.43 nJ。使用频谱仪 (Agilent, E4402B) 和探测器测得泵浦光功率为69 mW时输出脉冲频谱如图2(b)所示, 重复频率处的信噪比可达60 dB, 且无任何亚结构, 这表明振荡器输出为规整的锁模脉冲。

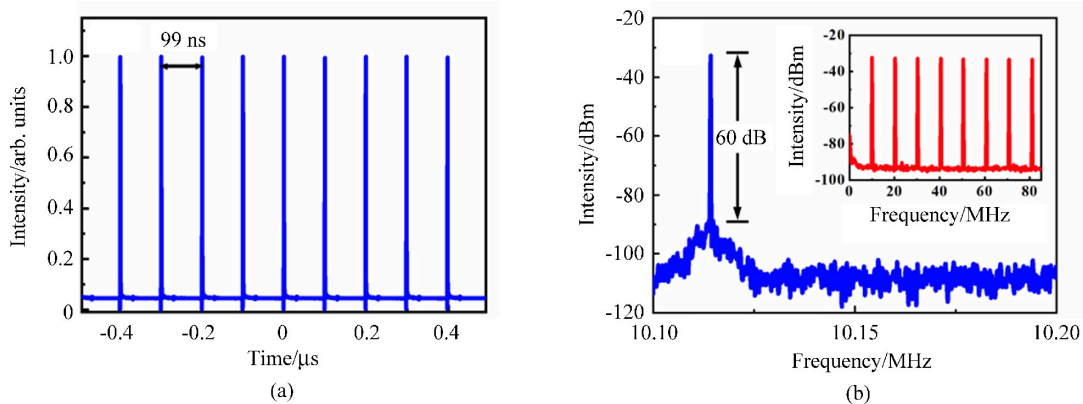


图2 激光器单脉冲锁模输出特性。(a) 输出脉冲序列; (b) 输出脉冲的频谱, 测量分辨率带宽为100 Hz, 测量范围为1 MHz, 插图 of 高次谐波频谱, 测量分辨率为1 kHz

Fig. 2 Output pulse characteristics of the laser. (a) Measured pulse train; (b) Measured RF spectrum of the pulse train with resolution bandwidth of 100 Hz, measured span of 1 MHz, and the inset shows the higher harmonics with resolution bandwidth of 1 kHz

图3(a)是采用光谱分析仪 (Yokogawa, AQ6370D) 测得的泵浦功率为69 mW时的振荡器输出脉冲光谱, 由图可见, 输出脉冲的中心波长为1064.03 nm, 3 dB带宽为0.2 nm (分辨率为0.02 nm); 图3(b)为测得的振荡器输出脉冲的强度自相关迹。经高斯拟合后得到的脉宽为21.07 ps, 对应的皮秒脉冲序列时间带宽积偏大, 约为1.1, 这可能是因为NALM中具有不同光谱特征的相向传输脉冲在输出耦合器处相干叠加, 导致了输出谱宽增宽, 从而增大了时间带宽积。

为验证能否采用单级光纤放大器将该20 ps脉冲的能量提升到大于10 nJ时, 谱宽依然处在固体放大器增益带宽之内, 采用图1所示的正向泵浦光纤放大器对该脉冲进行了能量提升。考虑到光纤放大过程中因自相位调制 (SPM) 效应会导致脉冲的光谱展宽<sup>[26]</sup>, 而SPM效应产生的非线性相移积累与脉冲峰值功率和光纤长度均有关, 因此, 选取0.7、1.2、1.5 m三种不同掺杂光纤长度来构建光纤放大器, 并分别考察以振荡器输出的0.4 nJ皮秒脉冲作为输入脉冲时, 这三种光纤放大器的脉冲输出特性。

图4(a)给出了这三种光纤放大器的输出脉冲平均功率随泵浦功率的变化关系。当增益光纤长度为0.7 m时,光纤放大器在泵浦功率为250 mW时出现饱和,尽管测得的输出脉冲光谱宽度仅为0.27 nm [如图4(b)],但因放大器饱和造成输出平均功率过低(仅27 mW),对应的单脉冲能量仅为2.7 nJ,远未达到10 nJ的脉

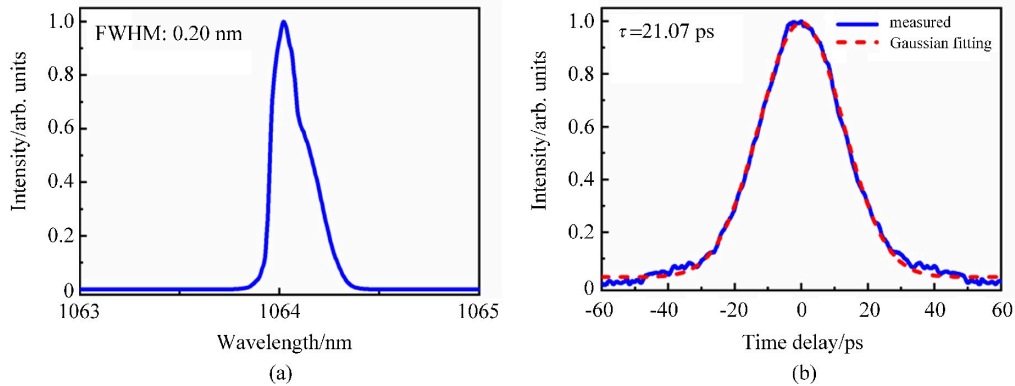


图3 激光器单脉冲锁模输出特性。(a) 光谱图; (b) 强度自相关曲线

Fig. 3 Output single pulse characteristics of the laser. (a) Output spectrum; (b) Intensity autocorrelation trace

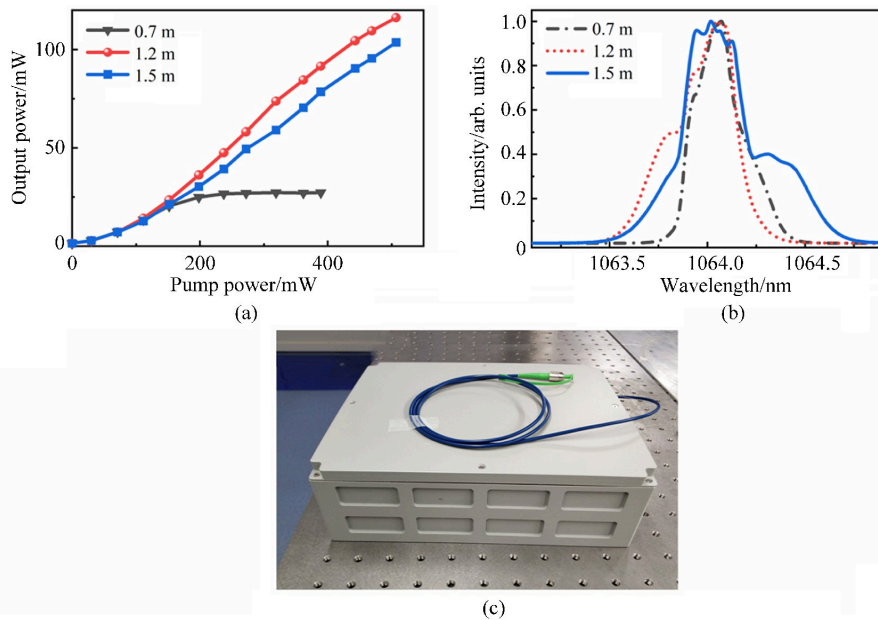


图4 放大后的输出特性。(a) 放大后输出功率随抽运功率的变化; (b) 使用0.7、1.2、1.5 m增益光纤放大后输出脉冲的光谱图, 谱宽分别为0.27、0.31、0.32 nm; (c) 集成样机实物照片

Fig. 4 Output characteristics after amplification. (a) Amplifier output power versus pump power; (b) Output spectrum after amplification with 0.7, 1.2, 1.5 m doped fiber, and the spectrum FWHM are 0.27, 0.31, 0.32 nm respectively;

(c) Photo of the packaged prototype

冲能量要求。但是,当增益光纤长度超过1.2 m时,输出平均功率随着泵浦功率的增加而增大,单脉冲能量均能达到10 nJ,并且,增益光纤长度越长,可获得的单脉冲能量也越高。但是,对于1.2 m和1.5 m长增益光纤构成的光纤放大器,输出脉冲能量达10 nJ时的光谱特征不相同,如图4(b)所示,尽管两种增益光纤长度的放大器输出光谱的3 dB带宽相差不大,分别为0.31 nm和0.32 nm,相比于振荡器输出脉冲的3 dB谱宽0.2 nm均无太大展宽,但是,使用1.5 m长增益光纤的光纤放大器输出脉冲光谱带有明显的宽带底座,不利于后续固体

放大器对脉冲的高效放大, 而增益光纤为 1.2 m 的光纤放大器输出脉冲光谱依然保持了“钟形”, 10 dB 谱宽仅为 0.65 nm, 经高斯拟合测得的自相关曲线得到的脉宽为 19.8 ps, 适于用作后续固体放大的前端种子源。尽管通过增加放大器增益光纤长度和泵浦功率可实现更高的脉冲能量输出, 但是此时脉冲光谱会出现劣化。为提高该皮秒脉冲光纤激光前端的稳定性和实用性, 已采用光电分离技术将光纤振荡器和放大器集成封装在 250 mm × 250 mm × 70 mm 的机盒中, 图 4(c) 为集成样机的实物照片。

### 3 结 论

报道了一种基于窄带耗散孤子 Figure-9 光纤振荡器和单级单模光纤放大器的可用作固体放大器种子源的皮秒脉冲光纤前端。通过对窄带耗散孤子 Figure-9 光纤振荡器结构参数进行优化设计, 使该振荡器具有很强的自启动锁模能力, 对于产生的 10 MHz 重复率的 20 ps 脉冲, 稳定单脉冲运转所对应的泵浦功率区间为 62~72 mW, 最大单脉冲能量达到 0.43 nJ。通过优化单级单模光纤放大器中增益光纤的长度, 在将振荡器输出脉冲能量提升到 10 nJ 的同时, 放大后的脉宽依然保持在 19.8 ps 且光谱呈钟形结构, 3 dB 谱宽仅为 0.31 nm, 从而非常适于用作固体放大器种子源的皮秒脉冲光纤前端。此外, 采用光电分离技术, 已将该皮秒脉冲光纤前端集成为激光器样机, 有望在精密加工等领域发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] Phillips K C, Gandhi H H, Mazur E, *et al.* Ultrafast laser processing of materials: A review [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(4): 684-712.
- [2] Kang M Q, Deng Y, Wang F, *et al.* Discuss and design of picosecond laser pulse applied in long-distance ranging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 247-251.  
康民强, 邓颖, 王方, 等. 皮秒脉冲激光远程测距应用探讨及系统初步设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 247-251.
- [3] Lubatschowski H, Maatz G, Heisterkamp A, *et al.* Application of ultrashort laser pulses for intrastromal refractive surgery [J]. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2000, 238(1): 33-39.
- [4] Zheng S K, Yang K W, Ao J P, *et al.* Advances in fiber laser sources for coherent Raman scattering microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508008.  
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, 46(5): 0508008.
- [5] Yang Y, Cheng X W, Yang G T, *et al.* Research progress of lidar for upper atmosphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(5): 566-579.  
杨勇, 程学武, 杨国韬, 等. 高层大气探测激光雷达研究进展 [J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 566-579.
- [6] Lu Q, Mao Q H. Two key frontier issues on picosecond pulses generated by mode-locked fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121005.  
路桥, 毛庆和. 皮秒光纤激光脉冲两个关键问题的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121005.
- [7] Zayhowski J J, Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1427-1429.
- [8] Papadopoulos D N, Forget S, Delaigue M, *et al.* Passively mode-locked diode-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> oscillator operating at an ultralow repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(19): 1838-1840.

- [9] Lu Q, Ma J D, Duan D, *et al.* High fidelity picosecond pulse fiber amplification with inter-stage notch filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6082-6088.
- [10] Boivinet S, Lecourt J B, Hernandez Y, *et al.* All-fiber 1  $\mu\text{m}$  PM mode-lock laser delivering picosecond pulses at sub-MHz repetition rate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2256-2259.
- [11] Turchinovich D, Liu X M, Laegsgaard J. Monolithic all-PM femtosecond Yb-fiber laser stabilized with a narrow-band fiber Bragg grating and pulse-compressed in a hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14004-14014.
- [12] Ozeki Y, Fukazu T. A wavelength-tunable, polarization-maintaining picosecond figure-nine fiber laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2016.
- [13] Agnesi A, Carrá L, Pirzio F, *et al.* Low repetition rate, hybrid fiber/solid-state, 1064 nm picosecond master oscillator power amplifier laser system [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(11): 2960-2965.
- [14] Baumgartl M, Abreu-Afonso J, Díez A, *et al.* Environmentally stable picosecond Yb fiber laser with low repetition rate [J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(1): 39-43.
- [15] Zhou J Q, Pan W W, Zhang L, *et al.* Research advances in mode-locked fiber lasers based on nonlinear loop mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508013.  
周佳琦, 潘伟巍, 张磊, 等. 非线性环路反射镜锁模光纤激光器的研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508013.
- [16] Hänsel W, Hoogland H, Giunta M, *et al.* All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(1): 41.
- [17] Nishizawa N, Suga H, Yamanaka M. Investigation of dispersion-managed, polarization-maintaining Er-doped figure-nine ultrashort-pulse fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19218-19232.
- [18] Shi J K, Dong D F, Pan Y L, *et al.* Suppression of multi-pulse formation in all-polarization-maintaining Figure-9 erbium-doped fiber mode-locked laser [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(1): 014206.
- [19] 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.
- [20] Zhao M, Hao Q, Guo Z R, *et al.* Compact fiber-solid picosecond laser source with kilohertz repetition rate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401010.  
赵明, 郝强, 郭政儒, 等. 结构紧凑的kHz重复频率光纤-固体皮秒激光光源 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401010.
- [21] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [22] Zhao X, Liu Y, Zhou L, *et al.* All-normal-dispersion polarization-maintaining Yb-doped fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508025.  
赵翔, 刘洋, 周廉, 等. 全正色散非线性放大环形镜保偏掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508025.
- [23] Zhou J Q, Qi W A, Pan W W, *et al.* Dissipative soliton generation from a large anomalous dispersion ytterbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5768-5771.
- [24] Liu X Y, Liu G Y, Zhou R L, *et al.* An all polarization-maintaining fiber laser mode locked by nonlinear amplifying loop mirror with different biases [J]. *Laser Physics*, 2020, 30(8): 085104.
- [25] Duan D, Wang J, Wu Y, *et al.* Approach to high pulse energy emission of the self-starting mode-locked Figure-9 fiber laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33603-33613.
- [26] Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Transl. by Jia D F, *et al.* Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 60-63.  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014: 60-63.