

耗散孤子分裂过程的实时测量研究

韩冬冬*, 张佳月, 任凯利, 郑益朋, 惠战强, 赵峰, 巩稼民

西安邮电大学工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 色散傅里叶变换技术为研究被动锁模光纤激光器中孤子各种瞬时、复杂、非重复的非线性过程提供了一种强有力的实时测量手段。利用色散傅里叶变换技术研究了基于非线性偏振旋转技术的被动锁模光纤激光器中耗散孤子分裂的整个实时动态过程。研究发现,当泵浦功率为 280 mW 时耗散孤子发生分裂,耗散孤子分裂前首先由噪声背景脉冲产生单孤子脉冲。与泵浦功率为 180 mW 时的单孤子锁模状态不同的是,分裂前的单孤子的光谱上有新的光谱成分产生。这个新的频率成分会随着孤子脉冲在谐振腔中循环的圈数不断放大和展宽,并最终演化为一个新的耗散孤子脉冲。本研究对明确被动锁模光纤激光器中耗散孤子的产生和分裂机理有着重要的意义。

关键词 光纤光学; 耗散孤子; 孤子分裂; 锁模; 光纤激光器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0706001

Real-Time Measurement of Fission Dynamics of Dissipative Soliton

Han Dongdong*, Zhang Jiayue, Ren Kaili, Zheng Yipeng, Hui Zhanqiang,
Zhao Feng, Gong Jiamin

School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract Dispersive Fourier transform offers a powerful real-time way to measure the transient, complex, and non-repetitive nonlinear dynamics of the soliton in a passively mode-locked fiber laser. With this technique, we investigate the real-time fission dynamics of a dissipative soliton in a passively mode-locked fiber laser based on the nonlinear polarization rotation technique. The results show that the dissipative soliton fissions occur when the pump power is 280 mW and that a single soliton pulse is generated by the background noise pulse before the dissipative soliton fissions. Different from the single soliton mode-locking state when the pump power is 180 mW, a new spectral component is observed on the spectrum of the single soliton generated before fission. The new frequency component amplifies and stretches with the increase in the number of round trips and ultimately evolves into a new dissipative soliton pulse. This research is significant for understanding the formation and fission mechanism of the dissipative soliton in a passively mode-locked fiber laser.

Key words fiber optics; dissipative soliton; soliton fission; mode locking; fiber laser

1 引言

被动锁模光纤激光器由于其光束质量好、稳定性高、成本低等优点,在工业加工、生物成像和光通信等方面有着重要的应用^[1-5]。光纤激光器实现被动锁模的技术分为两类:一类是利用可饱和吸收体

的技术,可饱和吸收体包括半导体可饱和吸收反射镜^[6]、单壁碳纳米管^[7]、石墨烯^[8]、过渡金属硫化物^[9]等;另一类是利用光束干涉作用形成的“人造可饱和吸收体”的技术,包含非线性偏振旋转(NPR)技术^[10]、“8”字腔锁模技术^[11]、多模-单模-多模干涉技术^[12]等。其中 NPR 技术以其结构简单、损伤阈

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(61805198)、陕西省重点研发计划(2020KWZ-017)、西安市科技计划项目(2019218114GXRC017CG018-GXYD17.21)

通信作者: *handongdong@xupt.edu.cn

值高、锁模自启动等优点受到人们的广泛关注。通过调节激光器谐振腔的色散值,可以从激光器中输出传统孤子^[13]、展宽脉冲^[14]、自相似脉冲^[15]和耗散孤子^[16-17]等不同类型的孤子脉冲。其中,耗散孤子存在于耗散系统中,系统中的增益和损耗对孤子的形成起着决定性作用^[18]。与其他类型的脉冲相比,耗散孤子可以承受更大的非线性相移,从而形成更高能量的脉冲。近年来,为了明确耗散孤子的形成分裂机理,人们在耗散孤子锁模相关过程方面做了大量研究^[19-23]。以往的研究中一般是利用光谱分析仪、示波器和自相关仪等设备对耗散孤子的频谱和时域特性进行研究。然而,在研究其频域特性时,受传统光谱分析仪响应速度的限制,所得到的光谱数据是经过多次平均后的数据而非实时的数据。而在被动锁模光纤激光器中,孤子的形成、分裂等动态过程往往是瞬时、复杂、不可重复的,如何对这些过程进行频域的实时测量是困扰人们的一个难题。

最近,色散傅里叶变换(DFT)技术的出现解决了光谱数据实时捕获的难题。DFT技术的原理是超短脉冲经过足够大的色散介质传输后,其频域光谱的特性将会映射到时域脉冲上^[24-25]。利用高速探测器和实时示波器对时域脉冲数据进行测量,就可以获得脉冲的频域光谱数据。利用这种技术获得的光谱分辨率与色散介质的色散值大小、探测器带宽、示波器带宽和采样率等参数相关^[26]。通过选择合适参数的器件设备,就可以对被动锁模激光器的各种动态过程进行实时的测量。人们利用DFT技术对传统孤子^[27]、展宽脉冲^[28]、耗散孤子^[29]、孤子分子^[30]以及谐波锁模^[31]等各种锁模脉冲产生的动态过程进行了实时测量研究。此外,被动锁模光纤激光器中的光怪波^[32]、类噪声脉冲^[33]、孤子爆炸^[34]、孤子脉动^[35]等各种非线性过程也在实验上得到了揭示和验证。然而,关于耗散孤子分裂的整个实时

动态过程的研究还很少。

本文利用DFT技术对被动锁模光纤激光器中耗散孤子的分裂进行了实时测量研究。首先,在基于NPR技术的被动锁模光纤激光器中实现了耗散孤子输出,并利用DFT技术对耗散孤子形成的实时动态过程进行了研究。随后,通过升高泵浦功率获得双脉冲耗散孤子,并利用DFT技术对耗散孤子的分裂过程进行了实时测量研究。孤子脉冲分裂前首先产生单孤子脉冲,单孤子脉冲光谱上会产生新的频率成分,其随圈数的增加而得到放大展宽,并最终演化为一个新的孤子脉冲。

2 实验装置

图1为实验过程中研究耗散孤子分裂的被动锁模光纤激光器以及DFT实时测量系统的结构示意图。其中被动锁模光纤激光器由一个980 nm/1550 nm波分复用器(WDM)、一段20 m长掺铒光纤(EDF, Nufern EDFC-980-HP)、一个30:70输出耦合器、两个偏振控制器(PC)和一个偏振相关隔离器(PS-ISO)组成。一台单模980 nm半导体激光器通过波分复用器接入激光器内并为激光器提供泵浦。两个偏振控制器、偏振相关隔离器和激光器内其他光纤构成NPR器件,确保激光器内光的单向运转。激光由耦合器70%端口输出,对激光器进行实时监测。谐振腔其他部分为各个器件的尾纤(Coning SM-28),长度约为11 m,色散系数为 $17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。掺铒光纤的色散系数为 $-9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,激光器净色散值为 0.173 ps^2 。DFT实时测量系统由一段色散约为 $660 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1}$ 的色散补偿光纤(DCF, Accelink DCM-F-C-20-LC/UPC-57)、一个带宽为70 GHz的高速探测器(PD, Finisar XPDV3120R)和一台带宽为33 GHz的高速实时示波器(Keysight, UXR0334A)组成。此外,一台分辨率为

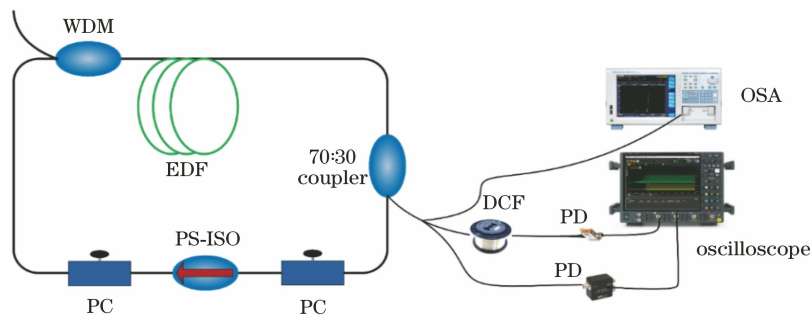


图1 实验中研究耗散孤子分裂过程的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for investigating dissipative soliton fission process

0.02 nm 的传统光谱分析仪 (OSA, Yokogawa AQ6370D) 和一个带宽为 5 GHz 的探测器 (Thorlabs DET08CFC/M) 用来监测激光器的平均输出光谱和脉冲数据。

3 实验结果与讨论

当泵浦功率为 180 mW 时, 激光器处于单脉冲锁模状态, 图 2(a) 和 (b) 所示为输出的光谱和示波器曲线。图 2(a) 为分别利用光谱分析仪和 DFT 技术测量得到的锁模光谱, 可以看出两者结果保持一致。图 2(a) 所示为比较标准的耗散孤子光谱, 中心波长约为 1562 nm, 3 dB 带宽约为 2.1 nm, 光谱顶部比较平坦, 两边陡峭。光谱的长波边缘有陡峭峰值结构, 这是由于脉冲在经过较长的掺铒光纤的放

大后积累了大量的非线性相移^[36]。锁模脉冲的自相关曲线如图 2(a) 中插图所示, 利用高斯曲线进行拟合, 计算得到脉冲宽度为 8.3 ps。图 2(b) 为对应的示波器脉冲曲线, 脉冲间隔为 151.3 ns, 与腔长 31 m 对应周期保持一致, 可以看出此时孤子脉冲没有发生分裂, 激光器处于单脉冲锁模状态。激光器的平均输出功率约为 8 mW。耗散孤子锁模状态的激发和停止可以通过控制泵浦激光器的开关完成, 图 2(c) 是利用 DFT 技术测量得到的耗散孤子形成的整个动态过程。可以看出锁模谱从噪声背景上一个小脉冲开始, 然后不断地被放大并在频域上受自相位调制等非线性效应的影响而展宽。之后, 光谱出现短暂的不稳定状态 (约 200 圈) 并在约 12000 圈时最终形成了稳定的耗散孤子锁模状态。

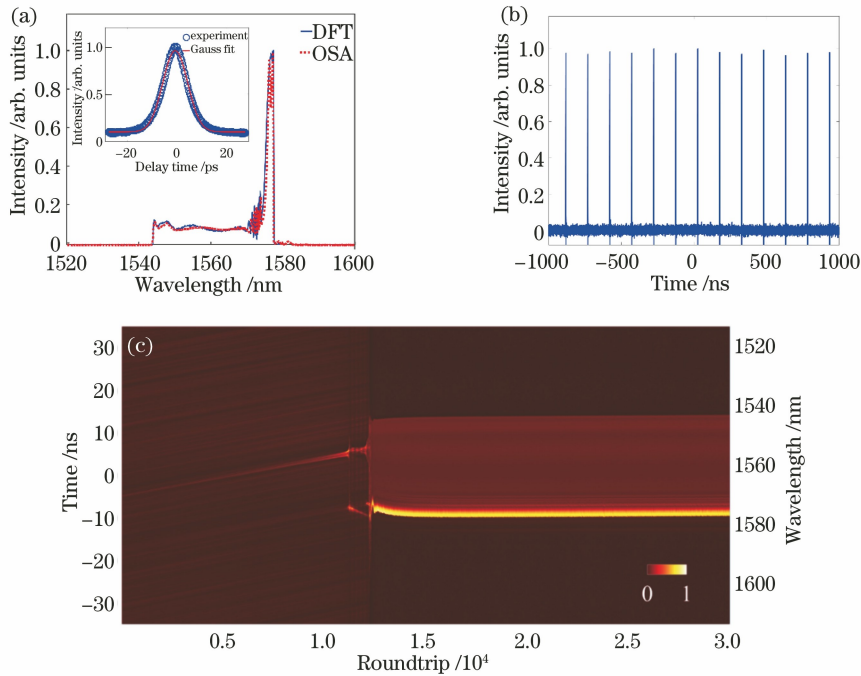


图 2 单脉冲耗散孤子输出。(a) 利用 OSA 和 DFT 测量的光谱, 插图为对应的自相关曲线; (b) 示波器曲线; (c) 利用 DFT 技术测量的单脉冲耗散孤子形成的实时动态过程

Fig. 2 Output of single pulse dissipative soliton. (a) Spectra recorded using OSA and DFT [inset in Fig. 2 (a) is corresponding autocorrelation traces]; (b) oscilloscope traces; (c) real time dynamic process of single pulse dissipative soliton measured by DFT technique

脉冲在腔内运转时会累积非线性相移, 其大小为

$$\Phi_{\text{NL}} = \frac{\omega}{c} \int_0^L n_2 I(z) dz, \quad (1)$$

式中: ω 、 c 、 $I(z)$ 、 L 和 n_2 分别为光的圆频率、光速、光强、传输距离和传输介质的非线性折射率系数^[37]。脉冲在腔内运转一个周期 (一圈) 后累积的非线性相移过大, 会影响孤子脉冲频域和时域的形状,

甚至使其发生分裂。实验中, 当泵浦功率升高至 280 mW 时, 耗散孤子发生分裂, 激光器处于双脉冲锁模状态, 图 3 为利用 DFT 技术测量的双脉冲耗散孤子产生的整个动态演化过程。其中, 图 3(a) 和 3(b) 分别为频域和时域的动态演化过程。从图 3(a) 中可以看出, 与图 2(a) 类似, 锁模状态也是从噪声背景开始, 在经历约 1 万多圈的循环后, 由一个小脉冲迅速放大展宽演化而来。由图 3(a) 和 3(b) 可

以看出激光器中首先出现单孤子锁模状态,约持续了 5000 圈。与图 2(a)中单孤子锁模状态不同的是,耗散孤子光谱上有新的成分产生,其原因是:泵浦功率过高,脉冲积累了大量的非线性相移,从而导致孤子脉冲变得不稳定,脉冲中多余的能量从光谱上新的成分中释放出来。在经过约 2000 圈的不稳定过渡状态后孤子发生分裂,形成双孤子锁模状态。从图 3(b)中可以看出,开始时激光器中只存在一个脉冲,在孤子分裂发生时原来的孤子脉冲经过塌缩后重新恢复到稳定的孤子状态。而新的孤子由不稳定

状态演化为另一个稳定的孤子脉冲。图 3(c)为每圈脉冲的能量大小随着圈数变化的曲线。可以看出在单孤子锁模状态形成和孤子分裂前,激光器内脉冲都有着非常剧烈的振动,这个是图 3(a)中光谱发生的过渡态是相对应的。另外,可以看出,孤子分裂后的脉冲能量低于分裂前的脉冲能量。这是由于脉冲能量过高时会积累过量的非线性相移,导致孤子不稳定甚至分裂。脉冲分裂后,单个脉冲的能量降低,脉冲积累的线性相移变小,孤子就可以重新回到稳定的锁模状态。

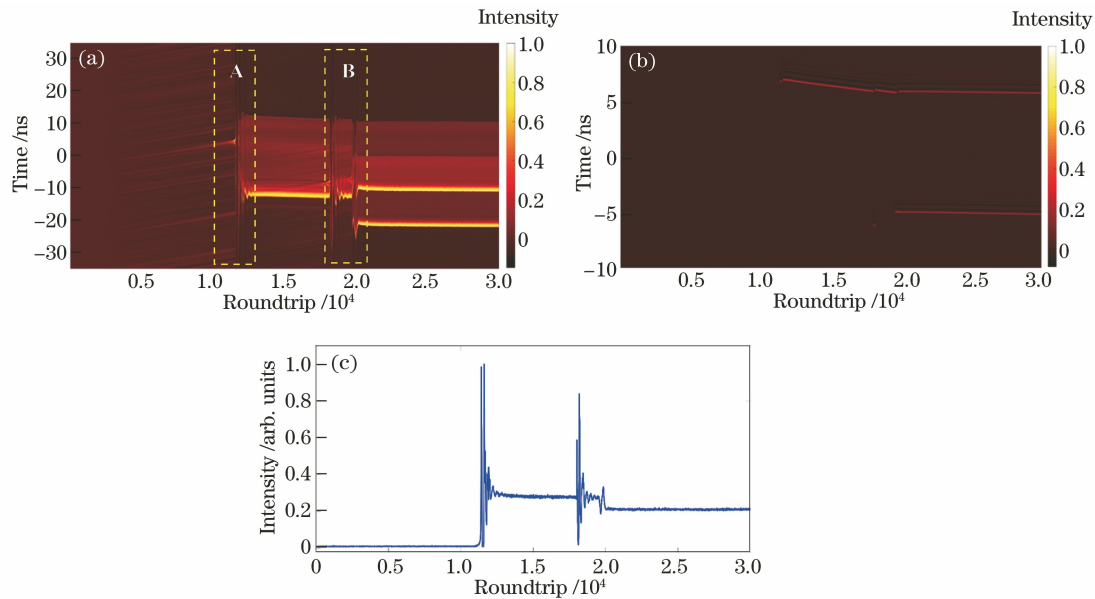


图 3 耗散孤子分裂的实时动态演化过程。(a)光谱;(b)脉冲;(c)脉冲能量

Fig. 3 Real time dynamic evolution process of dissipative soliton fission. (a) Spectrum;

(b) pulse; (c) pulse energy

为了更清晰地分析耗散孤子的分裂过程,将图 3(a)中虚线方框中的孤子产生和分裂的过渡态过程(即区域 A 和 B)进行放大,分别如图 4(a)和 4(b)中所示。其中图 4(a)是孤子形成时的过渡过程,与图 2(a)中低泵浦功率下单孤子形成前的过程类似,孤子锁模状态也是由噪声背景中一个强度较高的脉冲经过放大和光谱展宽发展而来,经历了脉冲的塌缩(区域 i)、重构(区域 ii)以及脉冲强度的振荡(区域 iii)过渡态后最终形成稳定的孤子锁模状态。图 4(b)是孤子发生分裂时的过渡态光谱的实时动态过程。可以看出在耗散孤子光谱长波位置中新产生的光谱成分随着圈数的增加而得到放大展宽,这个光谱成分被放大到一定程度后原有孤子发生塌缩。之后,在经历约 100 圈[图 4(b)中区域 iv]后,原位置孤子脉冲经过强度振荡后又重新生成。光谱上新产生的光谱成分依然在被放大和展宽,直到约 19700

圈后新的光谱成分发展为一个新的孤子脉冲。随后,腔内原来的孤子脉冲经历短时间的塌缩后也重新恢复为稳定的孤子脉冲。此时,孤子分裂完成,激光腔出现了两个稳定的孤子锁模脉冲。

从以上结果可以看出,当泵浦功率过高(孤子脉冲可以分裂)时,激光器依然会首先生成单孤子脉冲,其过程与泵浦功率较低时类似[图 2(c)]。但此时,孤子脉冲自身能量较高,其在腔内运转时会积累过量的非线性相移,从而导致孤子脉冲变得不稳定。孤子脉冲过剩的能量会在光谱上产生新的光谱成分并在腔内循环过程中不断地被增益介质放大和展宽,这样会进一步影响原有孤子脉冲的稳定性。这些新产生的光谱成分能量被放大到一定程度时就会导致原来的孤子脉冲的塌缩。当孤子脉冲重新生成后,光谱上新的频率成分依然存在,它会继续被放大展宽,最后演化为一个新

的孤子脉冲。此时孤子完成分裂,原来的孤子脉冲分裂为两个能量较低的孤子脉冲。脉冲积累的

非线性相移可以在其承受的范围之内,脉冲趋于稳定状态时孤子脉冲分裂完成。

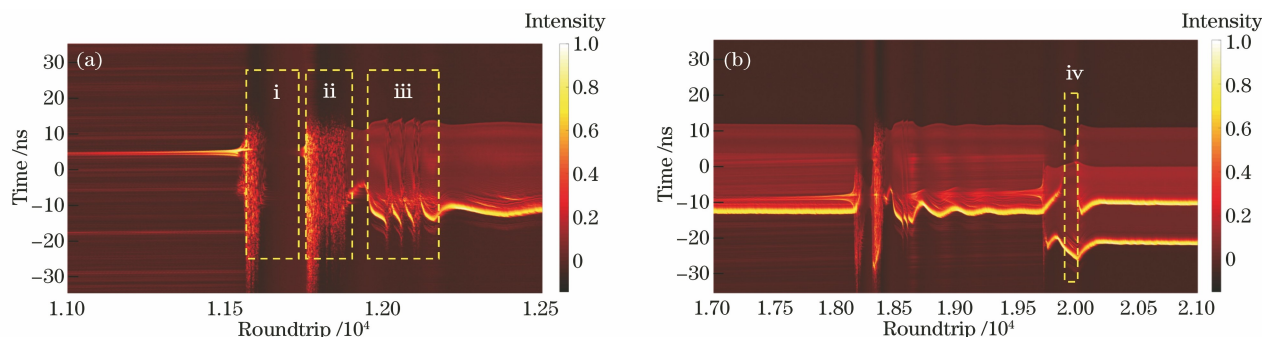


图 4 孤子锁模产生和分裂过渡态的光谱实时动态过程。(a)图 3(a)中区域 A 虚线框中的放大数据,即孤子锁模产生的过渡态过程;(b)图 3(a)中区域 B 虚线框中的放大数据,即孤子分裂的过渡态过程

Fig. 4 Real time spectral dynamic process of soliton mode-locking formation and fission transient state. (a) Amplified data from region A in Fig. 3(a), i.e., transient state of soliton mode-locking formation; (b) amplified data from region B in Fig. 3(a), i.e., transient state of soliton fission

4 结 论

利用 DFT 实时测量技术研究了净正色散被动锁模光纤激光器中耗散孤子分裂的实时动态过程。耗散孤子在较高的泵浦功率下会发生分裂,其在分裂前在激光器内会先产生单孤子脉冲锁模。与较低功率下的单孤子脉冲锁模不同的是,分裂前的单孤子脉冲光谱上会有新的频率成分产生。新的频率成分产生的原因是:孤子脉冲在较高的泵浦功率下积累过大的非线性相移,它会在激光器内随着脉冲的循环而不断被放大和展宽,并最终演化为一个新的独立的耗散孤子脉冲。本研究为进一步明确耗散孤子的分裂机制具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Dong Z K, Song Y R. Research progress of mode-locked fiber lasers based on saturable absorbers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501006. 董自凯, 宋晏蓉. 光纤激光器被动锁模技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501006.
- [2] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology[J]. Optica, 2016, 3(12): 1381.
- [3] Xu C, Wise F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 875-882.
- [4] Wei D, Feng T, Yan F P, et al. Frequency-swept fiber laser based on Fourier-domain mode-locking: a case study on erbium-doped fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601003. 韦达, 冯亭, 延凤平, 等. 傅里叶域锁模扫频光纤激光器研究方法:以掺铒光纤激光器为例[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601003.
- [5] Chen X, Jin X Y, Wang Q T, et al. A miniaturized adaptive dual-comb based on piezoelectric transducer and multi-stage temperature feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1036001. 陈旭, 金相宇, 王庆婷, 等. 基于压电陶瓷传感器以及多级温度反馈的小型化自适应双光梳[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1036001.
- [6] Fan M Q, Xia H D, Xu D P, et al. Research progress of new regime mode-locked fiber lasers and amplification and compression technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300003. 范孟秋, 夏汉定, 许党朋, 等. 新体制锁模光纤激光器及其放大压缩技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300003.
- [7] Hu G Q, Pan Y L, Zhao X, et al. Asynchronous and synchronous dual-wavelength pulse generation in a passively mode-locked fiber laser with a mode-locker[J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 4942-4945.
- [8] Lau K Y, Bakar M H A, Muhammad F D, et al. Dual-wavelength, mode-locked erbium-doped fiber laser employing a graphene/polymethyl-methacrylate saturable absorber[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12790-12800.
- [9] Guo B. 2D noncarbon materials-based nonlinear optical devices for ultrafast photonics[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(2): 020004.
- [10] Pottiez O, Ibarra-Villalon H E, Bracamontes-Rodriguez Y, et al. Soliton formation from a noise-like pulse during extreme events in a fibre ring laser[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(10): 105101.
- [11] Liu W, Shi H S, Cui J H, et al. Single-polarization large-mode-area fiber laser mode-locked with a

- nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2848-2851.
- [12] Yang F, Wang D N, Wang Z K, et al. Saturable absorber based on a single mode fiber-graded index fiber-single mode fiber structure with inner micro-cavity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 927-934.
- [13] Han D D, Zhang J Y, Gao Q, et al. Switchable multi-wavelength passively mode-locked all-fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (5): 0512002.
韩冬冬, 张佳月, 高琼, 等. 可切换多波长全光纤被动锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0512002.
- [14] Yan M, Hao Q, Shen X L, et al. Experimental study on polarization evolution locking in a stretched-pulse fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16086-16092.
- [15] Ilday F O, Buckley J R, Clark W G, et al. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(21): 213902.
- [16] Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1788-1790.
- [17] Han D D, Mei L Z, Zhang J Y, et al. Dissipative soliton molecule mode-locked fiber laser with controllable separation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2114013.
韩冬冬, 梅灵芝, 张佳月, 等. 间距可控的耗散孤子分子锁模光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(21): 2114013.
- [18] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6 (2): 84-92.
- [19] 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.
- [20] Li H, Ouzounov D G, Wise F W. Starting dynamics of dissipative-soliton fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2403-2405.
- [21] Renninger W H, Chong A, Wise F W. Pulse shaping and evolution in normal-dispersion mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(1): 389-398.
- [22] Liu X M. Hysteresis phenomena and multipulse formation of a dissipative system in a passively mode-locked fiber laser [J]. *Physical Review A*, 2010, 81 (2): 023811.
- [23] Lin W, Wang S, Zhao Q, et al. Mechanism of solitary wave breaking phenomenon in dissipative soliton fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (22): 28761-28774.
- [24] Zeng H P, Peng J S. Time-varying dynamics of mode-locked fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114005.
曾和平, 彭俊松. 锁模光纤激光器时变动力学 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114005.
- [25] Wang Y, Wang C, Zhang F, et al. Recent advances in real-time spectrum measurement of soliton dynamics by dispersive Fourier transformation [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83 (11): 116401.
- [26] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 102-112.
- [27] Chen H J, Liu M, Yao J, et al. Soliton booting dynamics in an ultrafast anomalous dispersion fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10 (2): 1501809.
- [28] Han D D, Hui Z Q, Xie J H, et al. Single-shot observation of stretched-pulse buildup dynamics in an ultrafast fiber laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 102984.
- [29] Herink G, Kurtz F, Jalali B, et al. Real-time spectral interferometry probes the internal dynamics of femtosecond soliton molecules [J]. *Science*, 2017, 356(6333): 50-54.
- [30] Liu M, Li H, Luo A P, et al. Real-time visualization of soliton molecules with evolving behavior in an ultrafast fiber laser [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20 (3): 034010.
- [31] Liu X M, Pang M. Revealing the buildup dynamics of harmonic mode-locking states in ultrafast lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13 (9): 1800333.
- [32] Lecaplain C, Grellu P. Rogue waves among noise-like-pulse laser emission: an experimental investigation [J]. *Physical Review A*, 2014, 90: 013805.
- [33] Wang Z H, Ma C Y, Song Y F, et al. Simultaneous generation and real-time observation of loosely bound solitons and noise-like pulses in a dispersion-managed fiber laser with net-normal dispersion [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39463-39474.
- [34] Wei Z W, Liu M, Ming S X, et al. Exploding soliton in an anomalous-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 531-534.
- [35] Chen H J, Tan Y J, Long J G, et al. Dynamical diversity of pulsating solitons in a fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28507-28522.
- [36] Chong A, Renninger W H, Wise F W. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25 (2): 140-148.
- [37] Wise F W, Chong A, Renninger W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion [J]. *Laser & Photonics Review*, 2008, 2(1/2): 58-73.