

# 激光与光电子学进展

## 间距可控的耗散孤子分子锁模光纤激光器

韩冬冬\*, 梅灵芝, 张佳月, 任凯利, 郑益朋, 惠战强, 赵峰, 巩稼民

西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710072

**摘要** 通过在耗散孤子锁模光纤激光器外接入马赫-曾德尔干涉仪, 实现了间隔可控的耗散孤子分子超短脉冲输出。马赫-曾德尔干涉仪由两个 50:50 分束器和一个可调谐时间延迟线构成。通过调节时间延迟线控制马赫-曾德尔干涉仪两臂的光程差, 可以实现耗散孤子分子的间距连续可调谐。实验中实现了脉冲间隔分别为 0.8、1.3、2.37、4.25、6.24、9.4、15.3 ps 的耗散孤子分子, 对应的光谱调制间隔分别为 8.3、6.1、3.83、1.88、1.27、0.85、0.52 nm。理论分析了孤子分子的产生机理并与实验数据保持一致。本研究为实现间距可控孤子分子超短脉冲提供了一个行之有效的方法。

**关键词** 激光光学; 耗散孤子; 孤子分子; 锁模光纤激光器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114013

## Dissipative Soliton Molecule Mode-Locked Fiber Laser with Controllable Separation

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

*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and  
Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710072, China*

**Abstract** A Mach-Zehnder interferometer is connected outside the dissipative soliton mode-locked fiber laser to realize the ultrashort pulse output of the dissipative soliton molecule with controllable separation. The Mach-Zehnder interferometer is constructed by two 50 : 50 optical coupler and a tunable optical time delay line. The separation of the dissipative soliton molecule can be adjusted with the optical path difference of the Mach-Zehnder interferometer, by adjusting the time delay line. The dissipative soliton molecules with the pulse separation of 0.8 ps, 1.3 ps, 2.37 ps, 4.25 ps, 6.24 ps, 9.4 ps, and 15.3 ps are observed, respectively, the corresponding spectrum separation are 8.3 nm, 6.1 nm, 3.83 nm, 1.88 nm, 1.27 nm, 0.85 nm, and 0.52 nm. The generation mechanism of the soliton molecule are analyzed theoretically, which agree well with the experimental results. The work provides an effective way to realize dissipative soliton molecule with controllable separation.

**Key words** laser optics; dissipative soliton; soliton molecule; mode-locked fiber laser

**OCIS codes** 140.4050; 060.3510; 060.5530

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-07-01; 录用日期: 2021-07-05

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

## 1 引言

被动锁模光纤激光器由于其在工业应用和科学研究等方面有着重要的应用,受到人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。同时,被动锁模光纤激光器为研究非线性效应提供了一个理想的平台。通过调节激光器谐振腔的净色散,可以从被动锁模光纤激光器中输出传统孤子<sup>[6]</sup>、展宽脉冲<sup>[7]</sup>、自相似脉冲<sup>[8]</sup>和耗散孤子<sup>[9]</sup>等。其中,耗散孤子存在于耗散系统中,激光系统中的增益和损耗对其形成起了决定性作用<sup>[10]</sup>。孤子脉冲在激光腔内运转时会积累非线性相移,当泵浦功率过高时,脉冲积累过多的非线性相移会导致脉冲的分裂<sup>[11]</sup>。耗散孤子与传统孤子、展宽脉冲等相比,可以忍受更高的非线性相移、不易分裂,输出更高能量的脉冲<sup>[12]</sup>。

另一方面,孤子分子是被动锁模光纤激光器中一种特殊的多脉冲锁模状态。它一般是由两个或多个脉冲相隔一定的距离组成一个稳定的整体,其性质表现类似于一个单脉冲<sup>[13]</sup>。孤子分子最早由 Tang 等<sup>[14]</sup>在传统孤子锁模光纤激光器中发现。之后在展宽脉冲<sup>[15]</sup>、自相似脉冲<sup>[16]</sup>和耗散孤子<sup>[17]</sup>锁模光纤激光器中也观测到了孤子分子的存在。孤子分子的脉冲间隔一般是脉冲本身的几倍或者几十倍,在同一个激光器可能存在不同间隔的孤子分子,这一般是由激光器的泵浦功率和偏振状态决定的<sup>[18]</sup>。由于孤子分子的特殊结构,其在光纤通信、数据存储等方面都有着重要的用途<sup>[19-20]</sup>。近年来,科学家对孤子分子的产生和特性等做了大量研究<sup>[21-26]</sup>。Peng 等<sup>[22]</sup>利用色散傅里叶变换实时测量技术研究了被动锁模光纤激光器中耗散孤子分子产生的过程。Krupa 等<sup>[23]</sup>研究了孤子分子之间实时的相互作用过程。然而,孤子分子的产生与激光器的泵浦、偏振态等参数的关系还没有完全明确,被动

锁模光纤器中产生孤子分子往往具有很大的不确定性。如何可控地产生孤子分子,相关的研究还非常少。

本文通过在激光器腔外加入一个马赫-曾德尔(MZ)干涉仪设计了一种间距可控的耗散孤子分子被动锁模激光器。首先,利用非线性偏振旋转技术设计了一个耗散孤子被动锁模光纤激光器,其锁模波长约为 1565 nm,3 dB 带宽为 8.3 nm。之后将得到的耗散孤子输入到由两个 50:50 分束器和一个可调谐时间延迟线组成的 MZ 干涉仪中。通过调节时间延迟线可以精确控制两臂的光程差,从而获得脉冲间距可控的耗散孤子分子。实验中获得了脉冲间距分别为 0.8、1.3、2.37、4.25、6.24、9.4、15.3 ps 的耗散孤子分子,对应的光谱调制间隔分别为 8.3、6.1、3.83、1.88、1.27、0.85、0.52 nm。最后,进行了理论分析,理论和实验数据保持一致。

## 2 实验装置

图 1 为实验结构示意图,由耗散孤子激光器和 MZ 干涉仪两部分组成。其中耗散孤子激光器由一个 980/1550 nm 波分复用器,一段 20 m 长的掺铒光纤,一个 70% 输出耦合器,两个偏振控制器和一个偏振相关隔离器组成。一个 980 nm 的单模半导体激光器用于激光器的泵浦,并通过 980/1550 nm 波分复用器输入到谐振腔中。两个偏振控制器和一个偏振相关隔离器以及腔内的其他光纤构成了非线性偏振旋转锁模技术,同时保证激光在谐振腔中单向运转。激光器其他组成部分为各器件自带的尾纤,长度约为 11.1 m,色散系数  $D=17$  ps/nm/km。考虑到掺铒光纤色散系数为  $-9$  ps/nm/km,谐振腔净色散大小为  $0.173$  ps<sup>2</sup>。MZ 干涉仪由两个 50:50 分束器组成。将一个尾纤长度为 2.2 m 的时间延迟线接入到其中一臂,一个挤压式偏振控制器接入另外一

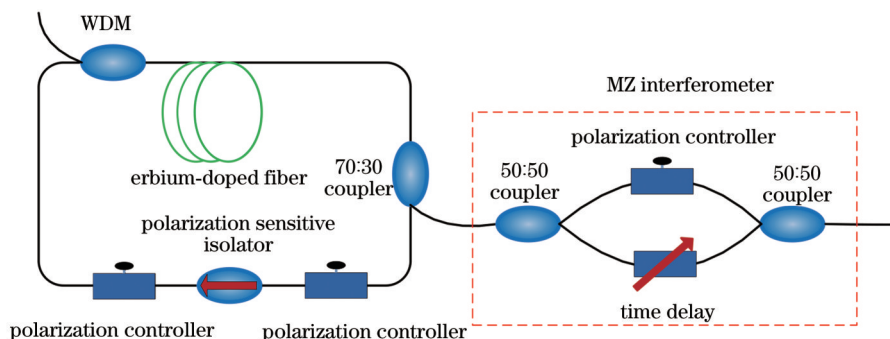


图 1 锁模光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mode-locked fiber laser structure

臂。MZ干涉仪单臂光纤的长度约为 4.3 m。通过调节时间延迟线可以对两臂的光程差进行调控。实验中,通过一台光谱分析仪、一台示波器和一台自相关仪对输出的数据进行实时监测。

### 3 实验结果与讨论

图 2 为泵浦功率为 170 mW 时激光器直接输出的耗散孤子的输出特性。其中图 2(a)为耗散孤子的输出光谱,可以看到其中心波长约为 1565 nm,

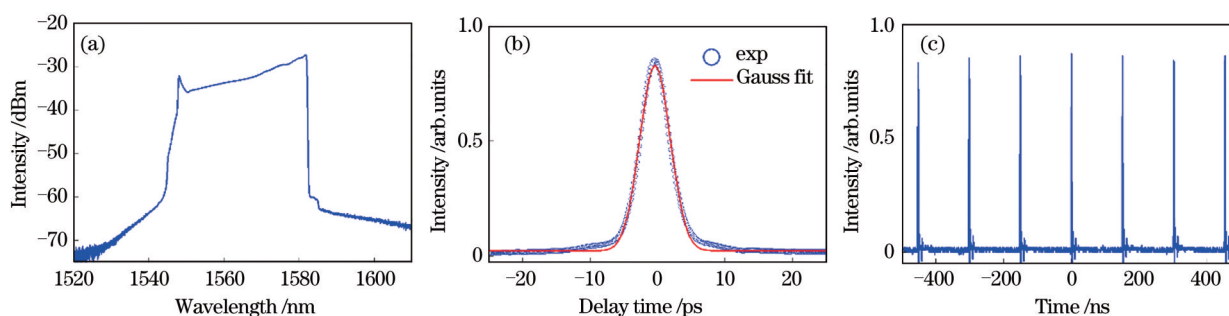


图 2 耗散孤子输出特性。(a)光谱;(b)自相关曲线;(c)示波器曲线

Fig. 2 Output characteristics of dissipative soliton. (a) Spectrum; (b) autocorrelation trace; (c) oscilloscope trace

将得到的耗散孤子输入到自制的 MZ 干涉仪中,可以获得孤子分子输出,如图 3 所示。图 3(a)为得到的孤子分子的光谱数据,可以看出光谱上有明显的调制图样出现,光谱调制的间隔为 9.9 nm。其对应的自相关曲线如图 3(b)所示,可以看出自相关曲线是双脉冲孤子分子典型调制图样,两个脉冲的间隔约为 0.8 ps。此外,自相关曲线中间峰值和两边峰值的比值不是典型的 1:1,这是由于 MZ 干涉仪两个臂的损耗不同,孤子分子两个脉冲的强度不同

3 dB 带宽为 8.3 nm,光谱呈陡峭的矩形,符合耗散孤子的特性。图 2(b)为测量得到的自相关曲线,利用高斯函数进行拟合,可以得到耗散孤子的脉冲宽度为 3.765 ps。因此,可以计算出得到的耗散孤子的时间带宽积为 3.9,脉冲存在一定的啁啾。图 2(c)为耗散孤子的示波器曲线,每个脉冲强度基本相等,间隔为 151.3 ns,与激光器腔长 31.1 m 保持一致。可以看出,此时激光器处于一个稳定的单脉冲耗散孤子锁模状态。

造成的。图 3(c)为对应的示波器曲线,从图中可以看出,由于示波器分辨率的原因,孤子分子仍然保持单脉冲状态,脉冲间隔为 151.3 ns。为了验证孤子分子的稳定性,把所得的孤子分子脉冲输入到 25 km 普通单模光纤中,获得的光谱数据如图 3(a)所示。可以看出,孤子分子传输 25 km 单模光纤后,光谱间隔保持在 9.9 nm。可以看出所得孤子分子两个脉冲的间隔在传输长距离光纤后仍处于一个稳定的状态,符合孤子分子的特性<sup>[19]</sup>。

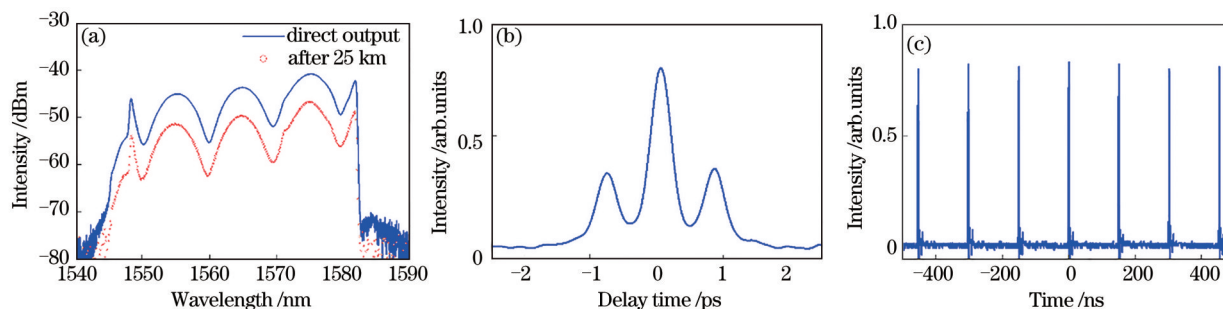


图 3 孤子分子输出特性。(a)光谱;(b)自相关曲线;(c)示波器曲线

Fig. 3 Output characteristics of soliton molecule. (a) Spectrum; (b) autocorrelation trace; (c) oscilloscope trace

通过调节时间延迟线,控制 MZ 干涉仪的两臂的光程差,可以获得不同脉冲间距的孤子分子,如图 4 所示。图 4(a)~(f)分别为不同时间延迟下得到的孤子分子的光谱数据。在不同的时间延迟下,孤子分子两个脉冲的间隔不同,其光谱调制的间隔

也不相同。图 4(a)~(f)的光谱间隔分别为 6.1, 3.83, 1.88, 1.27, 0.85, 0.52 nm。图 4(a)~(f)内的插图为对应的自相关曲线,可以看出孤子分子相应的脉冲间隔分别为 1.3, 2.37, 4.25, 6.24, 9.4, 15.3 ps。

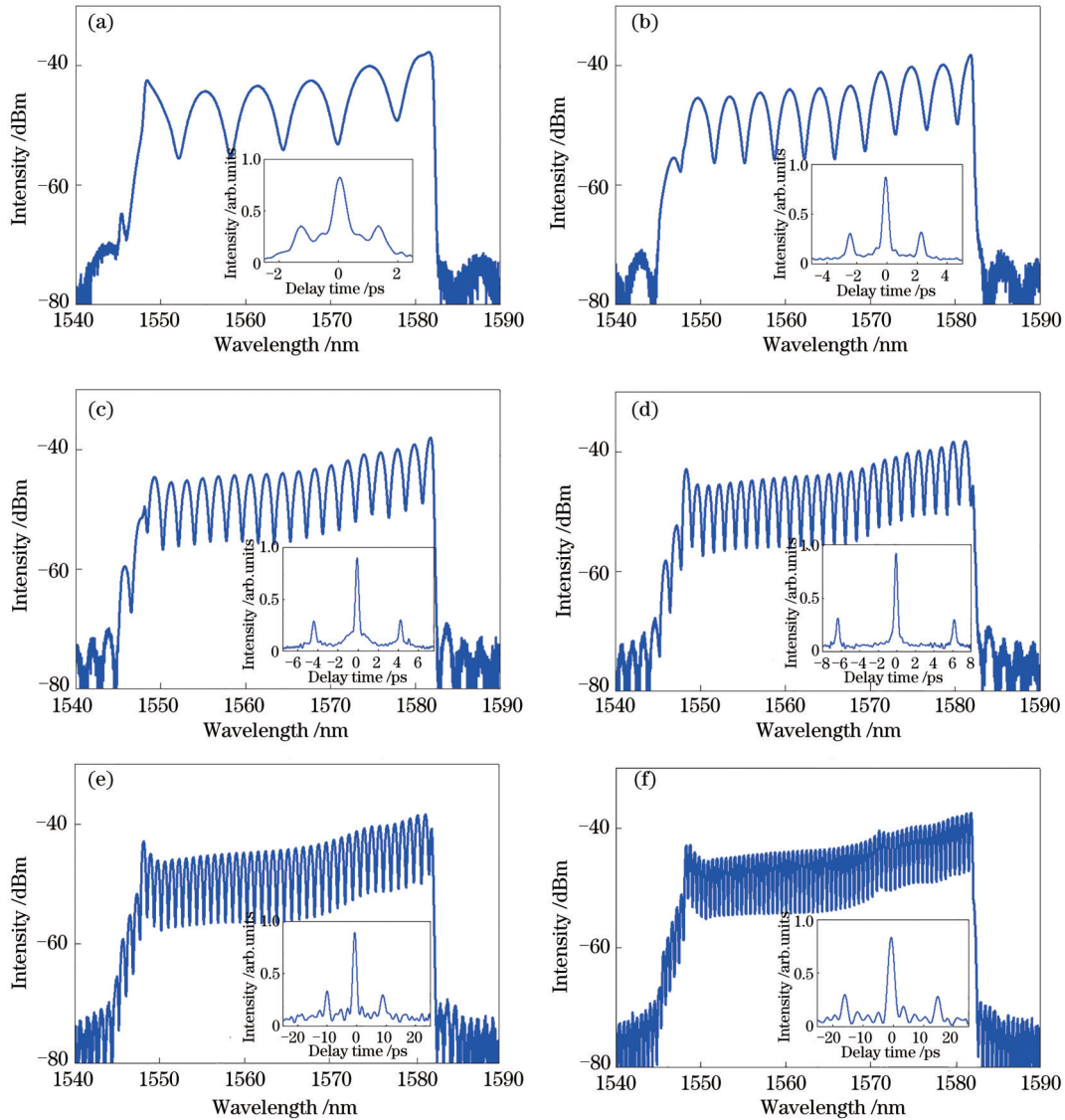


图 4 不同间隔下的耗散孤子分子输出特性。(a) 6.1 nm; (b) 3.83 nm; (c) 1.88 nm; (d) 1.27 nm; (e) 0.85 nm; (f) 0.52 nm (插图: 对应孤子分子的自相关曲线 1.3 ps, 2.37 ps, 4.25 ps, 6.24 ps, 9.4 ps, 15.3 ps)

Fig. 4 Output characteristics of dissipative soliton molecule with different separations. (a) 6.1 nm; (b) 3.83 nm; (c) 1.88 nm; (d) 1.27 nm; (e) 0.85 nm; (f) 0.52 nm (insets: corresponding autocorrelation traces 1.3 ps, 2.37 ps, 4.25 ps, 6.24 ps, 9.4 ps, and 15.3 ps, respectively)

接下来对利用MZ干涉仪产生孤子分子的原理进行分析, MZ干涉仪的透过率  $T$  可以表示为<sup>[27]</sup>

$$T = [1 - \cos(\Phi_L + \Phi_{NL})] / 2, \quad (1)$$

式中:  $\Phi_L$  和  $\Phi_{NL}$  分别为线性和非线性相移。在本实验中由于  $\Phi_L \gg \Phi_{NL}$ , 所以 MZ干涉仪透过率可以简化为

$$T = (1 - \cos \Phi_L) / 2 = [1 - \cos(2\pi\Delta L / \lambda)] / 2, \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为激光的波长;  $\Delta L$  为两臂的光程差。可以看出 MZ干涉仪的透过率与波长和光程差相关。其调制周期对应于  $\Phi_L = 2\pi$ , 即

$$2\pi\Delta L / \lambda_1 - 2\pi\Delta L / \lambda_2 = 2\pi, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda\Delta L / (\lambda_1\lambda_2) = 1, \quad (4)$$

式中:  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 。由于  $\Delta\lambda$  相对于  $\lambda$  较小,  $\lambda_1\lambda_2 \approx \lambda^2$ 。因此, 通过 MZ干涉仪后光谱间隔与光程差的关系可以表示为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta L. \quad (5)$$

图 5(a) 为分别利用(5)式和实验测量数据做出的孤子分子光谱间隔与光程的关系图, 可以看出理论和实验数据非常吻合。而孤子分子光谱频率的调制周期  $\Delta\nu$  与脉冲间隔  $\Delta T$  满足关系  $\Delta\nu = 1 / \Delta T$ 。而  $\Delta\nu = c\Delta\lambda / \lambda^2$ , 所以, 孤子分子脉冲间隔与 MZ光程



差的关系可以表示为

$$\Delta T = \Delta L / c. \quad (6)$$

图 5(b)为分别利用(6)式和实验测量数据做出的

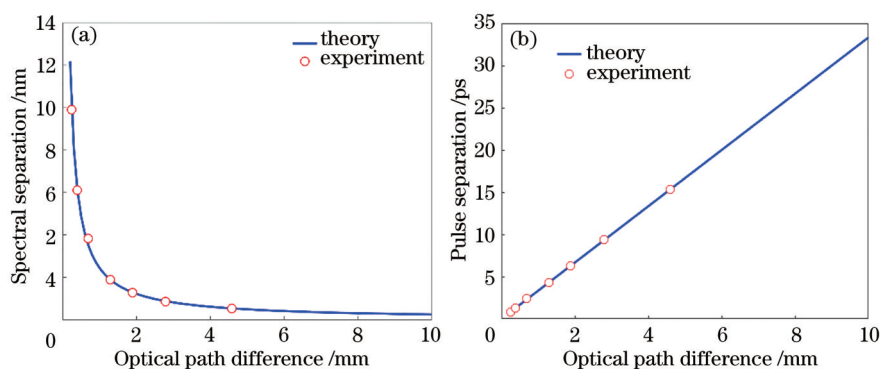


图 5 孤子分子间隔与 MZ 干涉仪光程差的关系。(a)光谱间隔与光程差的关系;(b)脉冲间隔与光程差的关系

Fig. 5 Relationship between dissipative soliton molecule separation and optical path difference of MZ interferometer.

(a) Relationship between spectral separation and optical path difference; (b) relationship between pulse separation and optical path difference

## 4 结 论

通过将耗散孤子输入到 MZ 干涉仪中,实现了间距可控的耗散孤子分子脉冲输出。MZ 干涉仪的光程差可以由时间延迟线进行调控,从而实现耗散孤子分子间距的精确可控。实验中,通过改变 MZ 干涉仪的光程差,分别实现了脉冲间距分别为 0.8、1.3、2.37、4.25、6.24、9.4、15.3 ps 的耗散孤子分子输出。理论分析与实验结果保持一致。本研究对可控孤子分子的研究有着重要的意义。

## 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): 1381-1387.
- [3] Xu C, Wise F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 875-882.
- [4] Du Y S, Yuan S, Wang Y, et al. 706 MHz high repetition rate femtosecond Yb-doped fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0914004. 杜迎生, 袁帅, 王勇, 等. 706 MHz 高重复频率掺镱光纤飞秒激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0914004.
- [5] 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.
- [6] Dai L L, Zou C H, Huang Q Q, et al. Continuously tunable mode-locked fiber laser based on tilted fiber grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508026. 戴礼龙, 邹传杭, 黄千千, 等. 基于倾斜光纤光栅的连续可调谐锁模激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508026.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zhu X J, Geng J, Zhang G A, et al. Tunable double pulse dissipative solitons Yb-doped fiber laser based on Sagnac loop[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0414002. 朱晓军, 耿健, 章国安, 等. 基于 Sagnac 环的可调谐双脉冲耗散孤子掺 Yb 光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0414002.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [13] Han D D, Ren K L, Zheng Y P, et al. Simultaneous generation and real-time observation of soliton molecules and singlets in an anomalous dispersion mode-locked fiber laser[J]. *Optik*, 2021, 242: 167312.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Ortaç B, Hideur A, Brunel M, et al. Generation of parabolic bound pulses from a Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6075-6083.
- [17] Wang K J, Wang H, Du T J, et al. Effect of intracavity filtering bandwidth on bound-state soliton generation in normal dispersion regime[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806004.  
王凯杰, 王航, 杜团结, 等. 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(8): 0806004.
- [18] Gui L L, Wang P, Ding Y H, et al. Soliton molecules and multisoliton states in ultrafast fibre lasers: intrinsic complexes in dissipative systems[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(2): 201.
- [19] Stratmann M, Pagel T, Mitschke F. Experimental observation of temporal soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(14): 143902.
- [20] Pang M, He W, Jiang X, et al. All-optical bit storage in a fibre laser by optomechanically bound states of solitons[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(7): 454-458.
- [21] 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.
- [22] Peng J S, Zeng H P. Build-up of dissipative optical soliton molecules via diverse soliton interactions[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800009.
- [23] Krupa K, Nithyanandan K, Andral U, et al. Real-time observation of internal motion within ultrafast dissipative optical soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(24): 243901.
- [24] Wang Z Q, Nithyanandan K, Coillet A, et al. Optical soliton molecular complexes in a passively mode-locked fibre laser[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 830.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Agrawal G P. *Applications of nonlinear fiber optics* [M]. San Diego: Academic Press, 2001.