

文章编号:1001-5078(2024)08-1188-05

· 激光器技术 ·

## 环形铥光纤激光器中台阶形脉冲的产生

吴 佟, 朱光辉, 孙儒峰, 龙润泽, 张 昆, 张利明, 赵 鸿  
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:**研究了基于非线性偏振旋转(NPR)锁模的铥光纤激光器中台阶形脉冲的产生。通过在 NPR 锁模器件前后各引入一段长度分别为 100 m 和 350 m 长的 SMF-28 光纤以增强腔内非线性和积累负色散,得到底座宽度为 50 ns,重复频率为 615.6 kHz,信噪比为 55 dB 的双波长(波长分别为 2025 nm 和 2034 nm)台阶形脉冲。发现仔细调节偏振控制器和改变泵浦功率可以精细调节台阶形脉冲的形态。通过研究发现台阶形脉冲是由两个矩形脉冲组合而成,且前后泵浦对两个矩形脉冲的影响不同,通过改变偏振态能够实现能量在前后两个矩形脉冲之间的转化。本实验为研究被动锁模光纤激光器脉冲动力学和脉冲整形提供了良好的实验平台。

**关键词:**非线性偏振旋转;铥光纤激光器;锁模;台阶形脉冲;双波长

中图分类号:O437;TN248 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.002

## Generation of step shaped pulses in a thulium doped ring fiber laser

WU Tong, ZHU Guang-hui, SUN Ru-feng, LONG Run-ze, ZHANG Kun,  
ZHANG Li-ming, ZHAO Hong  
(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In this paper, the generation of stage shaped pulses in thulium fiber lasers based on nonlinear polarization rotation mode locking is investigated. By introducing a segment of SMF-28 fiber with a length of 100 m and 350 m respectively before and after the nonlinear polarization rotation mode locking device to enhance intracavity nonlinearity and accumulate negative dispersion, a dual-wavelength (wavelengths of 2025 nm and 2034 nm, respectively) step-shaped pulse with a base width of 50 ns, a repetition frequency of 615.6 kHz, and a signal-to-noise ratio of 55 dB is obtained, and it is found that carefully adjusting the polarization controller and changing the pump power can finely adjust the shape of step shaped pulses. Through the study, it is found that the stepped pulse is formed by the combination of two rectangular pulses, and the front and rear pumps have different influences on the two rectangular pulses, and the energy can be realized by changing the polarization state between the front and rear two rectangular pulses. The experiment provides a good experimental platform for studying the pulse dynamics and pulse shaping of passive mode-locked fiber lasers.

**Keywords:** nonlinear polarization rotation; Tm-doped fiber laser; mode locking; step shaped pulse; dual wavelength

### 1 引 言

工作在 2  $\mu\text{m}$  波段的铥光纤激光器(TDFL)处于大气透明窗口且具有很强的水吸收峰,具有结构紧凑、散热性好、光束质量好等优点,从而在医疗、激光雷达、测距遥感、光学对抗、无线通信以及材料加工<sup>[1-4]</sup>等领域

有非常重要的应用,成为激光领域一个研究热点。此外,2  $\mu\text{m}$  脉冲激光还可作为中红外波段激光器的理想泵浦源,通过光学参量振荡等措施实现对激光波长进行转换,通常可以达成微米量级的波长拓展,将光源波长拓展到 3~5  $\mu\text{m}$  波段的中红外激光<sup>[5]</sup>。

在锁模 TDFL 中, 光纤是光纤激光器的主要传输介质, 光纤对不同频率光的折射率不同, 由此造成的色散效应会使脉冲在传输过程中在时域上被展宽; 同时脉冲在光纤中传输时峰值功率很高, 光纤对不同强度脉冲的折射率响应不同, 由此造成的非线性效应导致脉冲传输过程中在频域上被展宽。与此同时, 在脉冲传输过程中还需要考虑增益、损耗、可饱和吸收和光谱滤波效应等物理过程, 这些物理过程共同作用会出现丰富的孤子动力学现象。最初人们研究的光纤激光器产生的都是传统孤子脉冲, 传统孤子工作在负色散区, 其形成机理是腔内反常色散和自相位调制形成的频率啁啾在脉冲前后沿的符号相反, 二者最终实现平衡, 形成光孤子。但是传统孤子的脉冲能量受到孤子面积理论的限制不会超过  $0.1 \text{ nJ}$ <sup>[6]</sup>, 为了进一步提升脉冲能量和脉冲峰值功率, 研究人员相继提出了色散管理孤子<sup>[7-8]</sup>、自相似孤子<sup>[9-10]</sup>、耗散孤子<sup>[11-12]</sup>、耗散孤子共振<sup>[13]</sup> (DSR) 等不同类型的脉冲。

在过去几十年里, 光纤激光器特别是被动锁模光纤激光器中脉冲的产生引起了人们极大的兴趣。由于光纤激光器中存在丰富而复杂的非线性动力学过程, 通过调节色散、非线性、光纤的增益和损耗等参数, 可以实现多种对脉冲时间进行整形或定制的机制。除了早期在被动锁模光纤激光器中实现的经典孤子外, 到目前为止还实现了许多其他类型的具有特定时间轮廓的脉冲, 如矢量孤子<sup>[14]</sup>、暗脉冲<sup>[15]</sup>、h 形脉冲<sup>[16-18]</sup>、台阶形脉冲<sup>[19]</sup>和椅子形脉冲<sup>[20-21]</sup>等。同时, 如果腔长足够长, h 形、台阶形和椅子形脉冲的持续时间可以达到几十上百纳秒。即使脉冲峰值功率很低, 也会产生显著的非线性效应。虽然很多形状的脉冲已经被报道, 但可以预期的是, 一些新的脉冲仍有待被发现和研究。

被动锁模光纤激光器由于存在固有的光纤非线性效应及其与色散、增益、损耗和光谱滤波的相互作用, 为研究脉冲整形动力学提供了极好的平台。由于在材料微加工方面的广泛应用和有助于脉冲形成动力学的研究, 被动锁模光纤激光器中的脉冲整形技术引起了人们极大的兴趣。脉冲特性如脉冲持续时间、形状和能量对材料微加工的效率和质量有很大的影响。最近, Semaan 等人报道了解释被动锁模光纤激光器中阶梯脉冲形成的理论和实验研究, 其

中指出台阶形脉冲由双峰光谱中不同波长的两个矩形脉冲组成<sup>[22-23]</sup>。关于台阶形脉冲的研究较少, 且集中在掺镱或掺铒光纤激光器中, TDFL 中产生的台阶形脉冲还鲜有报道。

## 2 实验

为了产生更多类型的时间定制脉冲, 在实验中创新性地在 NPR 锁模器件前后各引入一段长度分别为  $100 \text{ m}$  和  $350 \text{ m}$  的 SMF-28 (SMF1、SMF2) 光纤以增强腔内非线性和负色散, 经计算腔内净负色散为  $-40 \text{ ps}^2$ 。除 TDF、SMF1、SMF2 和缠绕在偏振控制器 (PC1、PC2) 上的 SM-1950 外, 各器件的尾纤均为 SMF-28, 尾纤总长度约为  $35 \text{ m}$ , 总腔长约为  $495 \text{ m}$ 。腔内  $5\%$  的功率通过一个  $5/95$  光纤耦合器输出以检测脉冲特性,  $95\%$  的光留在腔内继续运行。实验结构示意图如图 1 所示。

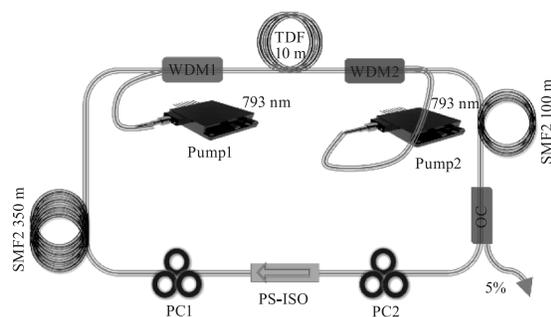


图 1 产生台阶形脉冲的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device for generating step shaped pulses

## 3 结果与分析

在泵浦功率为  $14 \text{ W}$  时, 通过仔细调节 PC1 和 PC2, 观察到了形状上由两个矩形脉冲组合而成的台阶形脉冲, 如图 2(a) 所示, 脉冲由一个顶部较陡振幅较高的前部脉冲和一个顶部较缓振幅较低的后部脉冲组合而成。图 2(a) 中插图部分为脉冲的序列图, 脉冲之间的时间周期为  $1624.4 \text{ ns}$ , 与  $495 \text{ m}$  的腔长对应。这里特殊形状的台阶形脉冲与多孤子和束缚态孤子并不相同, 因为每个脉冲表现出完全相同的时间特性。脉冲的光谱图显示光谱有两个峰, 如图 2(b) 所示, 光谱两个峰的中心波长分别为  $2025 \text{ nm}$  和  $2034 \text{ nm}$ , 且  $2025 \text{ nm}$  处峰强度明显比  $2034 \text{ nm}$  处的峰强, 强度相差约  $1.3 \text{ dBm}$ 。脉冲光谱有两个峰值, 表明脉冲处于双波长状态, 考虑到时间轮廓的特殊形状, 此台阶形脉冲应该是由两个矩形脉冲组合而成。

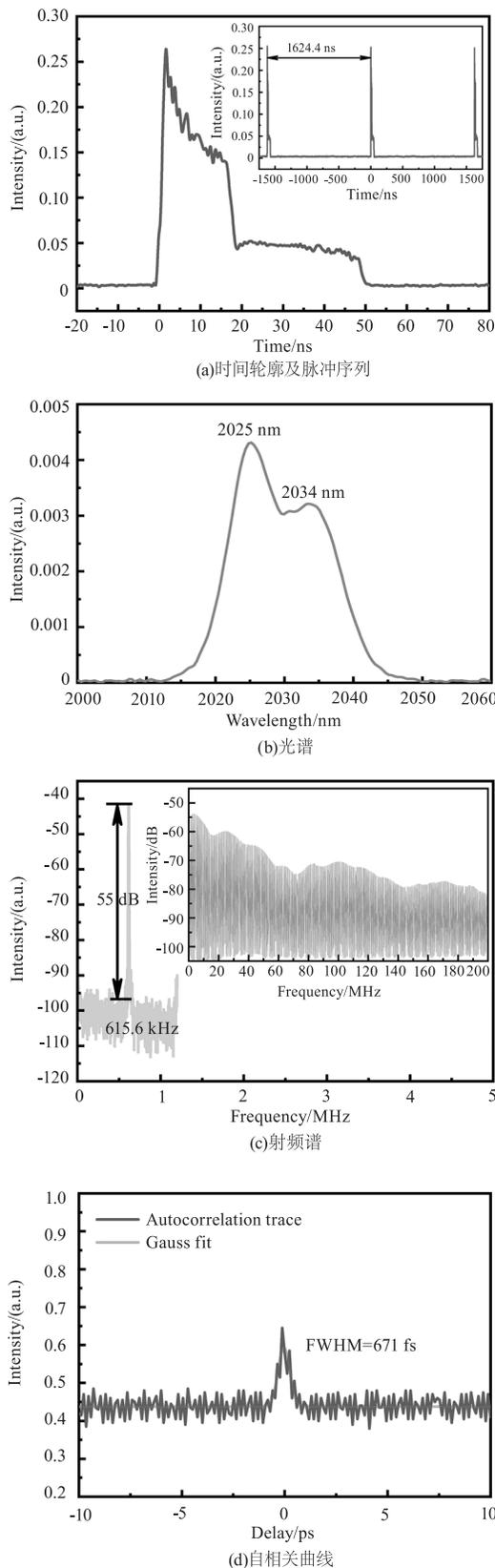


图2 泵浦功率为 14 W 时产生的台阶形脉冲

Fig. 2 Shows the step shaped pulse generated at a pump power of 14 W

图 2(c) 及其插图部分分别为 0 ~ 1.2 MHz 和 0 ~ 200 MHz 范围内的频谱图, 脉冲的重复频率为

615.6 kHz, 与腔长和周期对应, 信噪比为 55 dB, 表明脉冲锁模状态稳定。脉冲的频谱序列显示频谱存在周期性的振幅调制, 但调制周期并不固定, 可见这其中存在较为复杂的脉冲动力学过程。图 2(d) 为实验测得的自相关曲线, 这里自相关曲线在较平的基底上出现了一个较高的峰值, 经过高斯拟合, 峰的半高宽为 671 fs。

为研究台阶形脉冲中两个强度不同的矩形脉冲之间的联系, 实验中仔细调节 PC 以控制脉冲前后沿两个矩形脉冲的时间占比, 如图 3(a) 所示。由于装置一共有 6 个偏振环, 实验中通过仔细调节, 在保持其中 5 个偏振环不变的情况下通过连续调节另外 1 个偏振环可以让脉冲形状连续变化。随着调节 PC 让腔内偏振态从 PS1 改变为 PS5, 脉冲后部幅度较低的矩形脉冲的时间占比越来越大, 脉冲前部的矩形脉冲宽度降低的同时伴随着振幅的小幅降低, 这说明改变偏振态让脉冲前部的矩形脉冲的部分能量转移到了脉冲后部的矩形脉冲。脉冲在变化的过程中总体的宽度在展宽。图 3(b) 为这个过程对应的光谱变化, 随着偏振态从 PS1 变化到 PS5, 脉冲光谱中前面的峰不断增强、后面的峰不断减弱, 这表明台阶形脉冲前(后)沿强度较强(弱)的矩形脉冲对应光谱双波长中波长较长(短)的部分。

图 4 所示。当泵浦功率为 8 W 时, 脉冲前部的矩形脉冲没有出现, 随着泵浦功率的增加, 脉冲前部的矩形脉冲开始出现, 且随着泵浦功率的进一步增加, 脉冲前部的振幅越来越高, 直至达到一个稳定的水平。继续增加泵浦功率脉冲前后沿的矩形脉冲都将展宽, 但脉冲振幅保持不变, 脉冲前后部的矩形脉冲均受到明显的峰值功率钳制 (PPC) 效应。

实验中为了详细研究前后向泵浦对台阶形脉冲形状的影响。详细记录了不同前后向泵浦功率下脉冲形状的变化, 如图 5(a) 所示。从图中明显可以看出, 虽然各个脉冲的泵浦功率不相同, 但脉冲前后沿的矩形脉冲的振幅并不改变, 只是脉冲宽度有所不同, 台阶形脉冲前后沿的矩形脉冲均存在明显的 PPC 效应。图 5(b) 为固定后向泵浦功率为 5.5 W, 只改变前向泵浦功率时脉冲形状的演化, 脉冲前部的矩形脉冲的调谐范围为 2.2 ns, 脉冲后部的矩形脉冲的调谐范围为 4.2 ns。

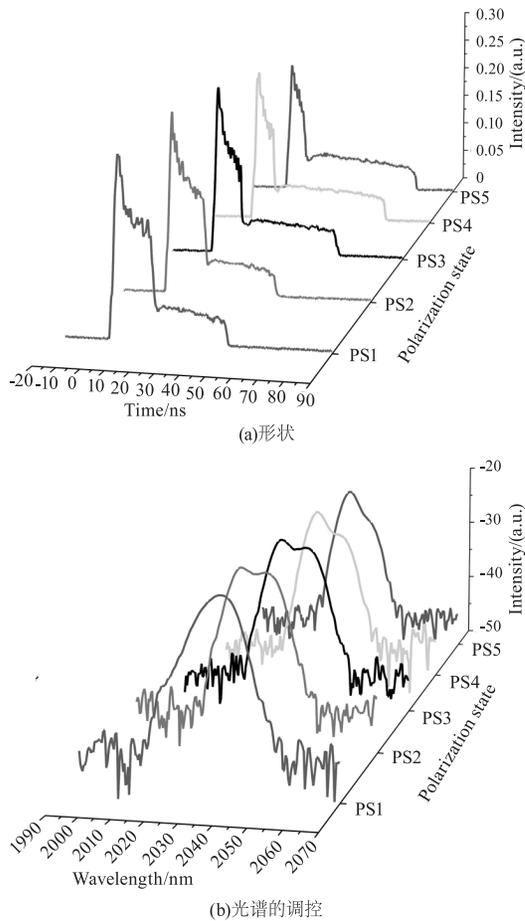


图3 改变偏振态对台阶形脉冲对  
Fig.3 Changing the polarization state to the step shaped pulse pair

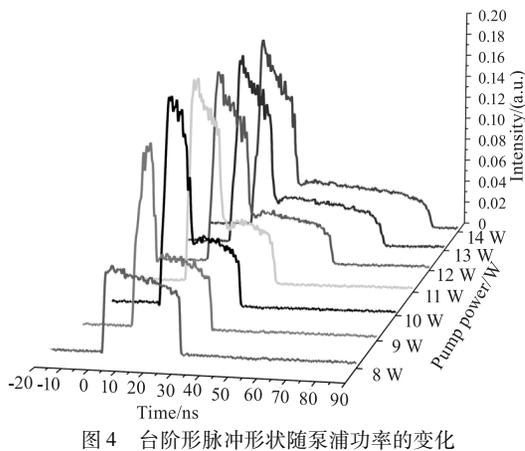


图4 台阶形脉冲形状随泵浦功率的变化  
Fig.4 Variation of step shaped pulse shape with pump power

图5(c)为固定前向泵浦功率为5.5 W 而改变后向泵浦时脉冲的演化,脉冲前部的矩形脉冲的调谐范围为3.9 ns,脉冲后部的矩形脉冲的调谐范围为4.1 ns。此实验结果表明,台阶形脉冲前后部矩形脉冲对前后向泵浦的敏感程度不同,脉冲前部强度较高的矩形脉冲对后向泵浦更敏感,而脉冲后部强度较低的矩形脉冲对前向泵浦更敏感。固定后向泵浦时,脉冲后部强度较低的矩形脉冲对前向泵浦

的敏感度更大;而固定前向泵浦时,脉冲前沿和后沿的矩形脉冲对后向泵浦的敏感程度相当。

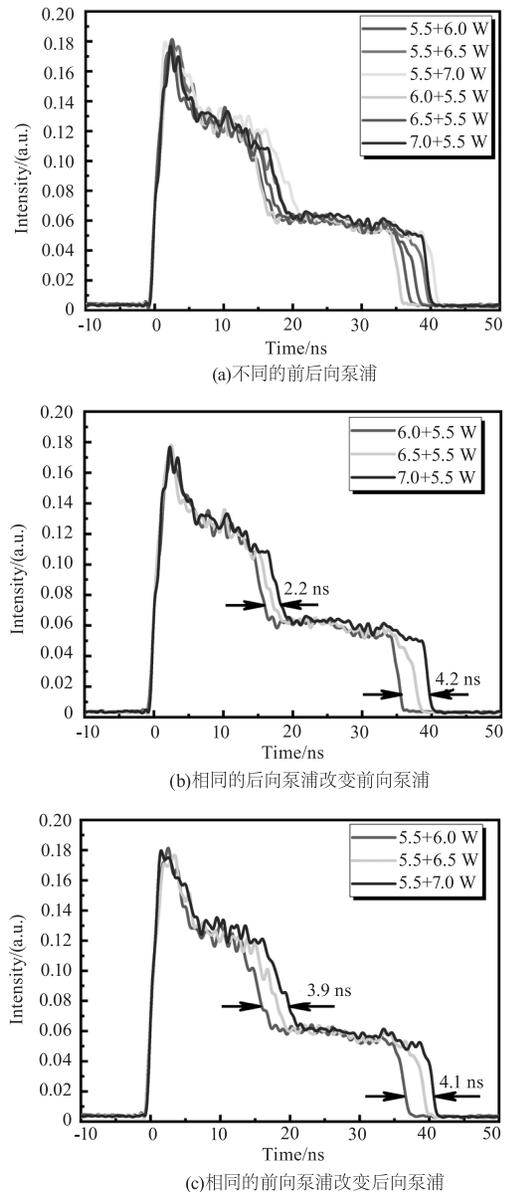


图5 不同泵浦功率下台阶形脉冲的形状变化  
Fig.5 Shape changes of stage shaped pulses under different pump powers

在实验中,一旦锁模状态为双波长锁模,两个不同波长的矩形脉冲总是相互粘附。结果可以解释为反常色散和正非线性之间的平衡。在反常色散区,高频强脉冲比低频弱脉冲传播得快。然而,当更强的脉冲引起更高的非线性时,它将经历更大的强度相关折射率和更小的传播速度。结果,两个不同波长的矩形脉冲作为一个整体在腔内运动,形成台阶形脉冲。

#### 4 结 论

在非线性偏振锁模铯光纤激光器中,通过非线性偏振旋转锁模器件前后各引入一段长度分别为

100 m 和 350 m 长的 SMF-28 光纤,得到底座宽度为 50 ns,重复频率为 615.6 kHz,信噪比为 55 dB 的双波长(波长分别为 2025 nm 和 2034 nm)台阶形脉冲。仔细调节偏振控制器和改变泵浦功率可以精细调节台阶形脉冲的形态。研究发现台阶形脉冲是由两个矩形脉冲组合而成,且前后泵浦对两个矩形脉冲的影响不同,通过改变偏振态能实现能量在前后两个矩形脉冲之间的转化。本实验为研究被动锁模光纤激光器脉冲动力学和脉冲整形提供了良好的实验平台。

#### 参考文献:

- [1] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996, 203(none): 19–26.
- [2] Barria J B, Mammez D, Cadiou E, et al. Multispecies high-energy emitter for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O monitoring in the 2 μm range [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6719–6722.
- [3] Bekman H H P T, Heuvel J C V D, Putten F J M V, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques [J]. *Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering*, 2004, 5615: 27–38.
- [4] Ludwig H C, Kruschat T, Knobloch T, et al. First experiences with a 2.0 μm near infrared laser system for neuroendoscopy [J]. *Neurosurgical Review*, 2007, 30(3): 195.
- [5] Simakov N, Davidson A, Hemming A, et al. Mid-infrared generation in ZnGeP<sub>2</sub> pumped by a monolithic, power scalable 2 μm source [J]. *Proc. of SPIE*, 2012, 8237: 82373k.
- [6] 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.
- [7] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77 fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080–1082.
- [8] Ruehl A, Kuhn V, Wandt D, et al. Normal dispersion erbium-doped fiber laser with pulse energies above 10 nJ [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3130–3135.
- [9] Fermann M E, Kruglov V I, Thomsen B C, et al. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6010–6013.
- [10] Lefrançois S, Liu C H, Stock M L, et al. High-energy similariton fiber laser using chirally coupled core fiber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 43–45.
- [11] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095–10100.
- [12] Lefrançois S, Kieu K, Deng Y, et al. Scaling of dissipative soliton fiber lasers to megawatt peak powers by use of large-area photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1569–1571.
- [13] Ding E, Grell P, Kutz J N. Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1146–1148.
- [14] Song Y F, Zhang H, Zhao L M, et al. Coexistence and interaction of vector and bound vector solitons in a dispersion-managed fiber laser mode locked by graphene [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1814–1822.
- [15] Li X L, Zhang S M, Meng Y C, et al. Harmonic mode locking counterparts of dark pulse and dark-bright pulse pairs [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8409–8416.
- [16] Zhao J Q, Zhou J, Li L, et al. Narrow-bandwidth h-shaped pulse generation and evolution in a net normal dispersion thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29770–29780.
- [17] Zheng Z J, Ren X K, Zhu K, et al. Fundamental and harmonic mode-locked h-shaped pulse generation using a figure-of-9 thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37172–37179.
- [18] He Z W, Chen Y, Deng Z X, et al. H-shaped pulse generation with tunable leading edge from a Tm-doped mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 12011–12016.
- [19] Mao D, Liu X M, Wang L R, et al. Dual-wavelength step-like pulses in an ultra-large negative-dispersion fiber laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 3996–4001.
- [20] Dong Z P, Lin J Q, Li H X, et al. Generation of mode-locked square-shaped and chair-like pulse based on reverse saturable absorption effect of nonlinear multimode interference [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27610–27617.
- [21] Gupta P K, Singh C P, Singh A, et al. Chair-like pulses in an all-normal dispersion Ytterbium-doped mode-locked fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 9961–9967.
- [22] Semaan G, Komarov A, Niang A, et al. Spectral dynamics of square pulses in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2018, 97(2): 23812.1–23812.5.
- [23] Semaan G, Komarov A, Niang A, et al. Theoretical and experimental analysis of staircase pulses in passive mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(3): 33819.1–33819.7.