

2 μm 掺铥光纤激光器中自相似脉冲产生的理论研究

石郑楠, 延凤平*, 韩文国, 张鲁娜

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 以 2 μm 掺铥锁模光纤激光器的理论模型, 以及非线性薛定谔方程(NLSE)为依据, 分析了激光器内自相似脉冲的演化条件, 并输出了峰值功率约为 22.66 W 的自相似脉冲, 同时研究了腔内净色散、色散补偿光纤长度和增益系数等参量对自相似脉冲的影响。结果表明, 随着腔内净色散和色散补偿光纤长度的增加, 脉冲宽度随之增加, 单脉冲能量随之降低, 而小信号增益系数的增加会使脉冲宽度和单脉冲能量均随之增加。

关键词 激光器; 光纤光学; 掺铥锁模光纤激光器; 自相似脉冲; 非线性薛定谔方程

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.091401

Theoretical Analysis of Self-Similar Pulse Generation in 2 μm Thulium-Doped Fiber Laser

Shi Zhengnan, Yan Fengping*, Han Wenguo, Zhang Luna

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Based on a theoretical model of a 2- μm thulium-doped mode-locked fiber laser and nonlinear Schrödinger equation (NLSE), this study analyzed the evolution conditions of self-similar pulses in the laser. The peak power output of the self-similar pulse was approximately 22.66 W. Further, the effects of parameters, such as net dispersion, length of dispersion-compensation fiber, and gain coefficient on self-similar pulses were simultaneously studied. The results show that increasing the net dispersion in the cavity and the length of the dispersion-compensation fiber increases the pulse width and decreases the energy of the single pulse. Moreover, increasing the small-signal gain coefficient increases both the pulse width and energy of the single pulse.

Key words lasers; fiber optics; thulium-doped mode-locked fiber laser; self-similar pulse; nonlinear Schrödinger equation

OCIS codes 140.3538; 190.4360; 190.4370; 190.5530

1 引言

自相似是自然界中的一种普遍现象^[1]。1981年, Ablowitz 等^[2]指出自相似脉冲是非线性薛定谔方程(NLSE)在长传输距离上的渐近解, 并且该渐近解具有抛物线型包络, 因此自相似脉冲即为抛物线型脉冲。近年来, 产生和传输高能量、高功率和严格线性啁啾特性的光脉冲^[3-5]是国际上光纤光学研究热点之一。自相似脉冲很好地解决了传输中脉冲强度受限的问题, 高功率传播时, 脉冲不会发生变

形, 具有较好的抵御光波分裂的能力, 并具有严格的线性啁啾, 能够有效压缩获得高功率超短脉冲。因此, 高功率自相似脉冲具有非常重要的应用价值。

自从 2000 年, Fermann 等^[6]在数值模拟的基础上, 通过实验证实了工作在 1064 nm 波段附近的掺铥光纤放大器中脉冲传播形状为抛物线型, 关于激光器中产生自相似脉冲的理论研究迅速发展起来。2010 年, Oktem 等^[7]首次从工作在 1550 nm 波段的被动锁模光纤激光器中发现脉冲以自相似子的形式在增益光纤中演化。国内外研究机构致力于产生

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2019-08-30; 录用日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61620106014, 61775128)

* E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

高能量自相似脉冲。2005年, Nielsen等^[8]从1064 nm波段的掺镱光纤激光器中获得了重复频率为17 MHz、脉冲能量为1 nJ的抛物线型脉冲。2014年, Liu等^[9]在工作波段为1550 nm的掺铒光纤激光器中, 使用色散位移光纤输出了能量为3.5 nJ、脉冲宽度为70 fs的抛物线型脉冲。近年来, 对于正色散光纤激光器中的自相似脉冲也有一定研究。2010年, Renninger等^[10]在正常色散激光器内观察到抛物线型脉冲放大器类似物。2014年, Yang等^[11]探究了正色散掺铊锁模光纤激光器中可饱和吸收体的调制深度和饱和功率对脉冲的影响。2018年, Chen等^[12]制造了正色散掺铊光纤, 并应用于锁模激光器中产生了脉宽为700 fs、能量为0.6 nJ的脉冲。

自相似性在1064 nm波段和1550 nm波段的研究已有了很大进展, 但在2 μm波段中的研究还处于初级阶段。自相似脉冲的产生取决于光纤参数和输入脉冲能量, 并产生于净色散为较大正值且在反常色散器件中无非线性效应的谐振腔内^[13]。2 μm波段处, 增益光纤和普通单模光纤工作于反常色散区, 需增加一段色散补偿光纤来调节腔内色散值, 使2 μm波段激光器输出自相似脉冲。2 μm波段处于人眼安全波段, 因此该波段的超短激光在医疗方面有很大使用价值; 此外, 水分子的吸收峰^[14]在2 μm波段附近, 2 μm波段激光对生物组织的处理也会更有效。所以, 在2 μm波段处产生稳定的高功率自相似脉冲具有重要意义。

鉴于此, 本文主要探究2 μm波段处自相似脉冲的产生条件及相关特性。为了在2 μm波段处输出稳定的自相似脉冲, 以NLSE为基础, 利用色散管理技术搭建了掺铊锁模光纤激光器的理论模型, 采用分布傅里叶算法进行计算, 借助MATLAB工具实现仿真, 产生并输出了稳定的自相似脉冲, 并讨论了腔内净色散、色散补偿光纤长度和增益系数对脉冲的影响^[15]。

2 基本原理

忽略高阶色散和损耗的影响, 可用NLSE, 即

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) - i \frac{\beta_2 \partial^2 A(z, t)}{2 \partial t^2} + \frac{gA(z, t)}{2}, \quad (1)$$

来描述^[16]光脉冲在单模光纤中的传输特性。式中: z 为脉冲传输距离; t 为传输时间; $A(z, t)$ 为脉冲包络的慢变振幅; β_2 为群速度色散系数; γ 为非线性系

数; g 为增益系数, 可表示为

$$g = g_0 / (1 + E_{\text{pulse}} / E_{\text{sat}}), \quad (2)$$

式中: g_0 为小信号增益系数; E_{sat} 为增益饱和能量; E_{pulse} 为脉冲能量, 可表示为

$$E_{\text{pulse}} = \int_{-T/2}^{T/2} |A(z, t)|^2 dt, \quad (3)$$

式中: T 为脉冲在光纤中传输一次的时间。

可饱和吸收体(SA)的透射率 T_{SA} 可表示为

$$T_{\text{SA}} = 1 - \frac{q_0}{1 + P(\tau) / P_{\text{sat}}}, \quad (4)$$

式中: q_0 为SA的调制深度; $P(\tau)$ 为瞬时功率; P_{sat} 为饱和功率。

滤波器透射率函数为频率 f 的高斯函数, 即

$$T_{\text{filter}} = A_0 \exp[-(f/F)^2 / 2], \quad (5)$$

式中: F 为频域内的线宽; A_0 为滤波器透射率。

3 激光器中的自相似脉冲

理论上设计的掺铊锁模光纤激光器为环形结构, 如图1所示。光纤合束器(FC)将泵浦源(pump)耦合进激光器, 脉冲依次经过掺铊光纤(TDF)、普通单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF)。其中, TDF作为增益介质, 其长为1.330 m, SMF长为1.360 m, DCF长为1.985 m, 这些值用来改变腔内净色散值。同时, 在腔内使用SA和偏振控制器(PC)有助于启动和稳定锁模, 利用滤波器(filter)使脉冲窄化, 引入光隔离器(isolator)保证光的单向传输用10:90光纤耦合器(coupler)来输出激光器产生的脉冲, 其中10%的端口作为输出端。

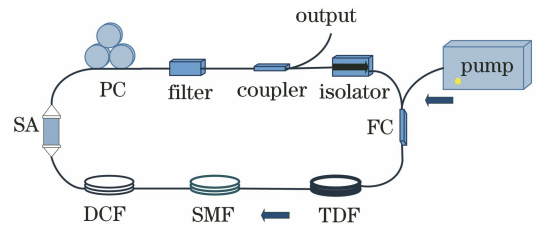


图1 掺铊锁模光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the thulium-doped mode-locked fiber laser

3.1 自相似脉冲的产生

数值模拟过程中忽略了损耗和三阶色散的影响, 为了使激光器产生稳定的脉冲, 仿真中选取的光纤器件参数如下。SMF: $\beta_2 = -60 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 4.7 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; TDF: $\beta_2 = -80 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 5.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; DCF: $\beta_2 = +92 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma =$

$5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 腔内净色散值由公式 $\Delta\beta_2 = \beta_2^{\text{SMF}} L_a + \beta_2^{\text{TDF}} L_b + \beta_2^{\text{DCF}} L_c$ 计算得到, 其中 $\Delta\beta_2$ 为腔内净色散, L_a 为单模光纤长度, L_b 为掺铥光纤长度, L_c 为色散补偿光纤长度。中心波长 $\lambda_0 = 2 \mu\text{m}$, 小信号增益系数 $g_0 = 0.99 \text{ m}^{-1}$, 泵浦功率与小信号增益系数成正比, 因此, 仿真时用小信号增益系数代替泵浦功率。增益饱和能量 $E_{\text{sat}} = 3 \text{ nJ}$, 初始脉冲选择峰值功率为 $3.6 \times 10^{-20} \text{ W}$ 的无啁啾高斯脉冲, SA 调制深度 $q_0 = 0.48$, 滤波器透射率 $A_0 = 0.9$ 。

基于以上数学模型和相关参数, 仿真过程中在自相位调制 (SPM) 和正群速度色散 (GVD) 的制约

下, 得到近似线性啁啾脉冲, 图 2(a) 为激光器输出的时域脉冲演化图, 激光器在运作约为 400 个循环后, 会输出稳定脉冲。图 2(b) 为最终输出的单脉冲图形与对应的啁啾曲线, 由图可知, 脉冲峰值功率约为 22.66 W, 脉冲形状近似为抛物线型, 由于谐振腔内总体正常色散值大于反常色散值, 因此正啁啾抵消掉由反常色散引起的负啁啾, 最终体现为正啁啾。图 2(b) 所示为激光器产生的严格线性正啁啾。图 2(c) 为脉冲的半峰全宽 (FWHM) 在激光腔内不同位置的变化情况, 从图中可以看到脉冲沿着光纤激光器的腔经过所有元件的显著演变过程。

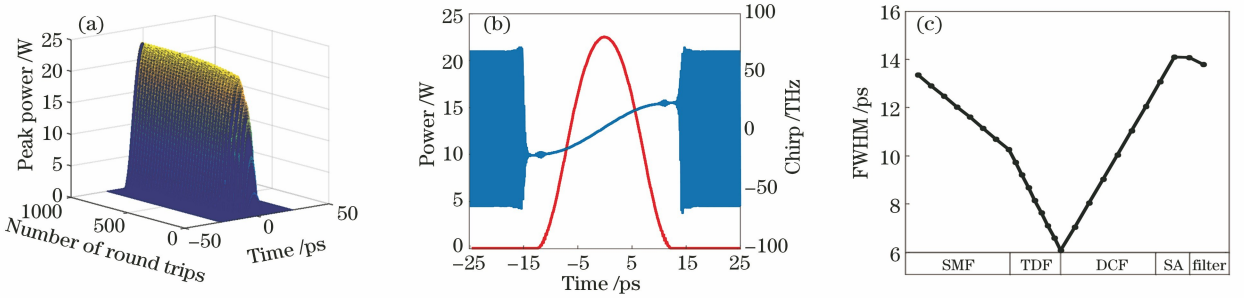


图 2 自相似脉冲时域图。(a) 脉冲演化图; (b) 输出单脉冲与啁啾曲线; (c) 脉冲的 FWHM 在腔内不同位置的变化
Fig. 2 Time domain graphs of self-similar pulse. (a) Pulse evolution graph; (b) output monopulse and chirp curve; (c) change of pulse FWHM at different positions in the cavity

3.2 腔内净色散对自相似脉冲的影响

为了更好地分析 $2 \mu\text{m}$ 波段处激光腔内净色散值对抛物线型脉冲演化进程的影响, 保持其他参数不变, 线性缓慢地调整色散补偿光纤的色散值。使用失配参数 $M^2 = \int [|u(t)|^2 - |p(t)|^2]^2 dt / \int |u(t)|^4 dt$ 来描述^[17] 模拟结果和特定抛物线之间的关系。其中 $u(t)$ 为演化脉冲, $p(t)$ 为脉冲时域 FWHM、峰值功率与 $u(t)$ 相同的抛物线型脉冲。图 3 所示为 $\Delta\beta_2$ 与 M^2 之间的关系, 随着 $\Delta\beta_2$ 线性增加, 脉冲形状也在发生变化。 $\Delta\beta_2$ 值在 $3.42 \sim 6.00 \text{ ps}^2/\text{km}$ 之间, M^2 值小于 0.15, 由此可说明模拟产生的脉冲在这个范围内与抛物线型脉冲拟合较好, 可认为在 $3.42 \sim 6.00 \text{ ps}^2/\text{km}$ 之间激光器输出的脉冲为抛物线型脉冲。 $\Delta\beta_2 = 3.42 \text{ ps}^2/\text{km}$ 时, M^2 值最小, 为 0.008。图 4 为 $\Delta\beta_2$ 值为 $3.42 \text{ ps}^2/\text{km}$ 时, 数值模拟产生的脉冲与抛物线型脉冲 (parabolic pulse) 和高斯脉冲 (Gaussian pulse) 的对比。由图 4 可以看到, 输出脉冲宽度约为 830 fs, 峰值功率约为 22.66 W, 脉冲能量约为 189.39 pJ。

3.3 色散补偿光纤长度对自相似脉冲的影响

为了研究色散补偿光纤长度对自相似脉冲的影

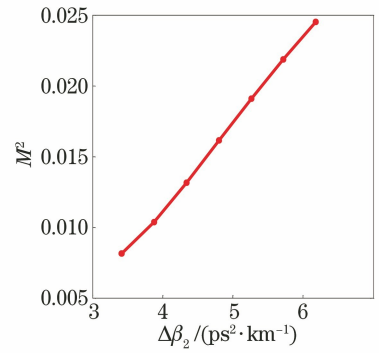


图 3 $\Delta\beta_2$ 与 M^2 的关系
Fig. 3 Relationship between $\Delta\beta_2$ and M^2

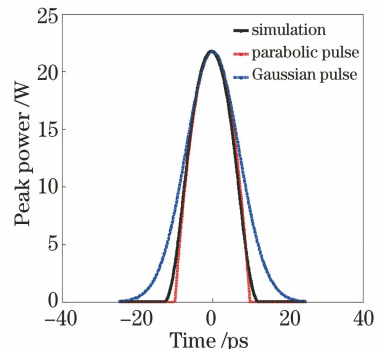


图 4 激光器输出脉冲形状拟合
Fig. 4 Shape fitting of laser output pulse

响,保持其他参数不变,只改变色散补偿光纤长度。在构建的模型中,可得到激光器获得稳定自相似脉冲的色散补偿光纤长度范围为 1.98~2.03 m,在这

个范围内对自相似脉冲进行分析,图 5(a)、5(b)和 5(c)分别为色散补偿光纤长度 L 与脉冲峰值功率、FWHM 和单脉冲能量之间的关系。

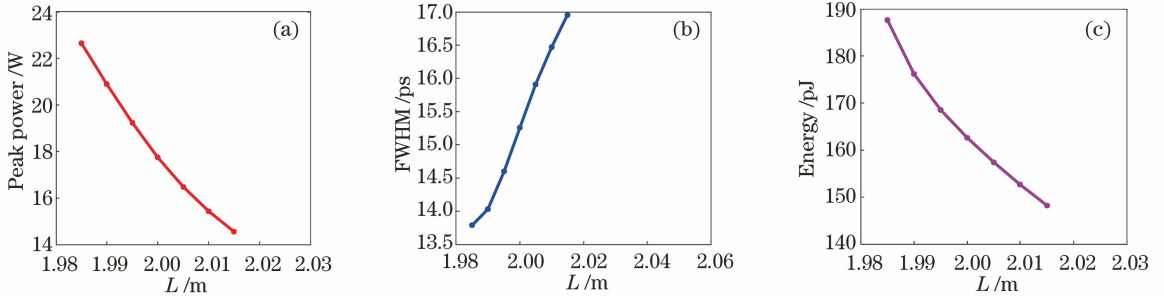


图 5 L 对脉冲不同参数的影响。(a)脉冲峰值功率;(b) FWHM;(c)单脉冲能量

Fig. 5 Effect of L on different parameters of pulse. (a) Peak power of the pulse; (b) FWHM; (c) single pulse energy

从图 5(a)可以看到,脉冲峰值功率随着 L 线性增加近似呈线性减少, L 为 1.985 m 时,此时腔内净色散值为 $3.42 \text{ ps}^2/\text{km}$,脉冲峰值功率最高为 22.66 W;图 5(b)所示为脉冲 FWHM 随着 L 增加呈线性增加;图 5(c)所示为单脉冲能量随着 L 线性增加呈线性减小,脉冲最高能量约为 189.39 pJ。从图 5 可以看到,脉冲峰值功率和单脉冲能量减小趋势相同。研究表明,色散补偿光纤长度的增加直接导致腔内净色散值的增大,进而使脉冲 FWHM 宽度增加,脉冲峰值功率降低。脉冲能量随着色散补偿光纤长度的增加而降低,原因在于腔内净色散值的增加引起脉冲展宽,脉冲峰值功率随之降低,脉冲经过可饱和吸收时不会被明显

窄化,同时腔内损耗随之增加,降低稳定运行时的脉冲能量。

3.4 增益系数对自相似脉冲的影响

为了探究增益系数对自相似脉冲的影响,由(2)式可知,增益系数与小信号增益系数成正比关系,因此,使用小信号增益系数代替增益系数来分析对自相似脉冲产生的影响,得到结果相同。仿真过程中,保持其他参数不变,只改变小信号增益系数 g_0 值。在构建的模型中小信号增益系数 g_0 在 $0.65\sim 1.18 \text{ m}^{-1}$ 之间,可得到稳定的自相似脉冲。在这个范围内对抛物线型脉冲进行分析,图 6(a)、6(b)和 6(c)分别为小增益系数 g_0 与脉冲峰值功率、FWHM 和单脉冲能量之间的关系。

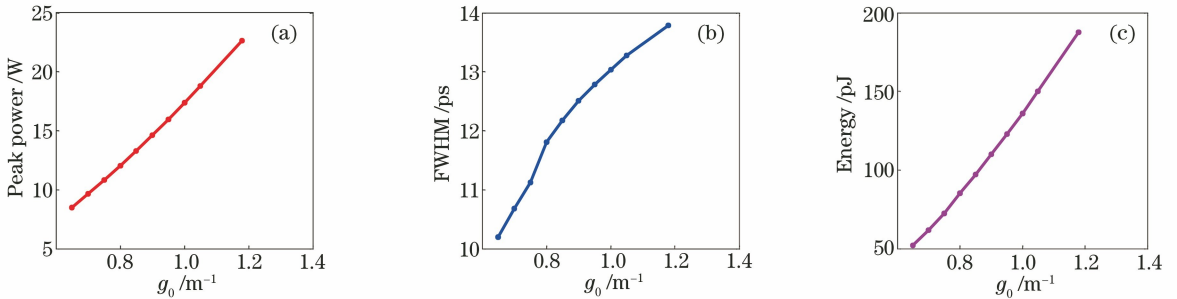
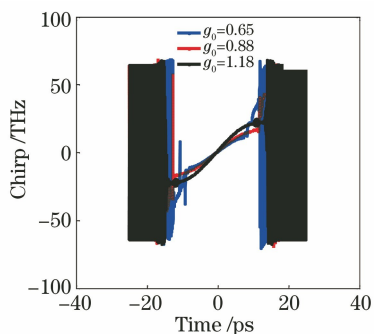


图 6 g_0 对脉冲不同参数的影响。(a)脉冲峰值功率;(b) FWHM;(c)单脉冲能量

Fig. 6 Effect of g_0 on different parameters of pulse. (a) Peak power of the pulse; (b) FWHM; (c) single pulse energy

由图 6(a)可以看到,脉冲峰值功率随着小信号增益系数的线性增大而线性增加,当小信号增益系数 $g_0 = 1.18 \text{ m}^{-1}$ 时,脉冲峰值功率最大可达 22.66 W;图 6(b)表明脉冲 FWHM 随着小信号增益系数的线性增大而逐渐增加;从图 6(c)可以看到,脉冲能量也随着小信号增益系数的线性增大而线性增加,且脉冲最高能量达到 189.39 pJ。脉冲能量和脉冲 FWHM 与小信号增益系数成正比,

而脉冲形状并没有因为小信号增益系数的变化而发生改变,表明激光器输出脉冲形状与增益系数无关。图 7 所示为自相似脉冲啁啾与小信号增益系数 g_0 之间的关系,随着 g_0 增大,啁啾中间线性部分的斜率显著上升,即脉冲的瞬时频率变化量增加,但啁啾中间部分的线性范围有减小趋势,这说明为了产生高功率的自相似脉冲可适当加大小信号增益系数 g_0 。

图7 不同 g_0 对应的啁啾曲线Fig. 7 Chirp curve corresponding to different g_0 values

4 结 论

基于 $2\ \mu\text{m}$ 波段处的掺铥锁模光纤激光器产生自相似脉冲的理论模型,分析了激光器产生抛物线型脉冲的条件及脉冲在腔内的演化进程,同时数值分析了腔内净色散、色散补偿光纤长度和增益系数等参量对自相似脉冲的影响。研究表明,只有满足一定的色散和非线性条件,激光器才能输出自相似脉冲。腔内净色散 $\Delta\beta_2$ 值在 $3.42\sim 6.00\ \text{ps}^2/\text{km}$ 之间,激光器输出的脉冲为自相似脉冲;色散补偿光纤长度 L 在 $1.98\sim 2.03\ \text{m}$ 之间,脉冲峰值功率和单脉冲能量随着色散补偿光纤长度的线性增加而降低,脉冲半峰全宽随之增加。当 L 长度为 $1.985\ \text{m}$ 时,此时 $\Delta\beta_2$ 值为 $3.42\ \text{ps}^2/\text{km}$,输出脉冲宽度约为 $830\ \text{fs}$,最高峰值功率约为 $22.66\ \text{W}$,最大脉冲能量约为 $189.39\ \text{pJ}$;小信号增益系数 g_0 在 $0.65\sim 1.18\ \text{m}^{-1}$ 之间,可得到稳定的自相似脉冲。随着增益系数的增加,脉冲峰值功率、单脉冲能量和脉冲半峰全宽随之增加,较大的增益系数对于产生高功率脉冲有好处。仿真结果可为优化工作提供指导,从而在 $2\ \mu\text{m}$ 掺铥光纤激光器中获得高功率、窄脉宽的自相似脉冲。

参 考 文 献

[1] Feng J, Xu W C, Zhang Q F, et al. Self-similar pulse evolution in optical fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 26-36.
冯杰, 徐文成, 张巧芬, 等. 光纤中自相似脉冲研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 26-36.

[2] Ablowitz M J, Segur H. Solitons and the inverse scattering transform [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1981.

[3] Wang X D, Zhou Z, Li S W, et al. Self-similar pulse evolution in ytterbium doped fiber amplifiers [J].

Laser Technology, 2012, 36(1): 8-12.

汪徐德, 周正, 李素文, 等. 掺铥光纤放大器中脉冲自相似演化特性分析[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 8-12.

- [4] Wang D S, Wu G, Gao B, et al. Study on the interaction of a parabolic-shaped pulse pair transferring in fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 070603.
王大帅, 吴戈, 高博, 等. 抛物线形脉冲对在光纤中的作用机制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 070603.
- [5] Feng J, Du G P, Zhu R X, et al. Progress of ultrashort self-similar pulse optical fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081409.
冯杰, 杜国平, 朱瑞兴, 等. 自相似超短脉冲光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081409.
- [6] 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.
- [7] Oktem B, Ülgüdür C, Ilday F Ö. Soliton-similariton fiber laser [J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 307-311.
- [8] Nielsen C K, Ortaç B, Schreiber T, et al. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2005, 13(23): 9346-9351.
- [9] Liu H, Liu Z W, Lamb E S, et al. Self-similar erbium-doped fiber laser with large normal dispersion [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1019-1021.
- [10] Renninger W H, Chong A, Wise F W. Self-similar pulse evolution in an all-normal-dispersion laser [J]. Physical Review A, 2010, 82(2): 021805.
- [11] Yang X L, Chen Y, Zhao C J, et al. Pulse dynamics controlled by saturable absorber in a dispersion-managed normal dispersion Tm-doped mode-locked fiber laser [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(3): 031405.
- [12] Chen Y H, Raghuraman S, Ho D, et al. Normal dispersion thulium fiber for ultrafast near- $2\ \mu\text{m}$ fiber laser [C] // 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 13-18, 2018, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2018: 18035999.
- [13] Wang D S. Study on theory of self-similar pulse generation and transition based on passively mode locked fiber laser [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 51-63.

- 王大帅. 基于被动锁模光纤激光器的自相似脉冲产生与传输理论研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 51-63.
- [14] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2 μm laser sources and their possible applications [M] // Frontiers in guided wave optics and optoelectronics. Bishnu Pal: Intech Open, 2010.
- [15] Li C, Zhao L, Huang Z H, et al. Theory study on self-similar pulse in mode-locked fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602017. 李超, 赵磊, 黄志华, 等. 自相似脉冲在锁模光纤激光器中产生的理论研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602017.
- [16] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M] // Christiansen P L, Sørensen M P, Scott A C. Nonlinear science at the dawn of the 21st century. Lecture notes in physic. Heidelberg: Springer, 2000, 542: 109-113.
- [17] Finot C, Parmigiani F, Petropoulos P, et al. Parabolic pulse evolution in normally dispersive fiber amplifiers preceding the similariton formation regime [J]. Optics Express, 2006, 14(8): 3161-3170.