

# 光纤放大器中有限增益带宽对自相似脉冲放大演化的数值研究

赵佳生

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 通过求解包含超高斯增益系数滤波项的分布增益非线性薛定谔方程, 模拟研究了短脉冲在有限增益带宽指数增益光纤放大器中的自相似演化行为及其差异。结果表明脉冲在不同指数增益分布放大器中传输时都会受到增益带宽的限制。相同输入脉冲在相同长度、相同总增益的指数上升、下降和双向分布放大器中放大时, 在双向分布放大器中输出能量最高, 输出脉冲线性啁啾特性最好, 指数下降放大器输出能量最低, 输出脉冲线性啁啾特性最差, 指数上升放大器居两者之间。另外, 总增益相同时, 无论是指数上升、下降和双向分布放大器, 初始增益系数较小, 输出脉冲能量较高, 脉冲线性啁啾特性较好。

**关键词** 激光光学; 分布增益放大器; 有限增益带宽; 线性啁啾

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0802006

## Influences of Finite Gain Bandwidth on Evolution of Self-Similar Pulse Propagation in Fiber Amplifiers

Zhao Jiasheng

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The evolutions of the pulse propagation in gain distributed fiber amplifiers with a finite gain bandwidth are investigated with the simulation of the nonlinear Schrödinger equation. The results show that the parabolic pulse propagations in different gain amplifiers are restricted by the finite gain bandwidth. With the same input pulse and amplifier length and overall gain, the largest energy and best linear chirp output pulse can be obtained from the bidirectional gain distributed fiber amplifier. The smallest and worst linear chirp pulse output can be obtained from decreasing gain distributed fiber amplifier, while pulse obtained from decreasing gain distributed fiber amplifier is between them. Moreover, by choosing smaller initial gain coefficient, the whole gain limited by the gain bandwidth may be larger, linear chirp is better with the same overall gain.

**Key words** laser optics; gain distributed fiber amplifier; finite gain bandwidth; linear chirp

**OCIS codes** 140.3510; 190.4380

## 1 引 言

高重复频率超短激光脉冲在高精度材料处理、超快动力学过程和非线性频率变换等方面具有广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。稀土掺杂光纤具有很宽的增益谱, 利用锁模光纤激光器能够产生高重复频率超短激光脉冲<sup>[5~11]</sup>。由于高峰值功率超短脉冲在小芯径、长程光纤中传输时非线性效应严重, 在正色散介质中传输时容易发生光波分裂; 在负色散介质中将演化成

为高阶孤子, 传输过程中脉冲周期性破裂, 所以限制了光纤中单脉冲能量的提高。研究表明高功率抛物线脉冲能够在正色散介质中无光波分裂自相似传输<sup>[12]</sup>, 且此线性啁啾脉冲可以高效压缩获得持续时间短、峰值功率高的脉冲<sup>[13]</sup>。这种特性如此优良的脉冲引起了广泛关注<sup>[14~17]</sup>, Tamura 等<sup>[18]</sup>发现超短脉冲在正色散光纤放大器中放大时能够产生抛物线形状脉冲。Fermann 等<sup>[19,20]</sup>在正色散光纤中得到

收稿日期: 2012-05-02; 收到修改稿日期: 2012-05-09

基金项目: 国家 973 计划(2007CB936603)和国家自然科学基金(11104282)资助课题。

作者简介: 赵佳生(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: zjs66@hotmail.com

了常数增益非线性薛定谔方程精确的抛物线渐进解,并在实验上论证了产生的抛物线脉冲能够在正色散标准单模光纤中保持抛物线形状传输。另外,实际光纤放大器增益系数分布不为常数,对应于正向抽运和反向抽运光纤放大器,Kruglov 等<sup>[21]</sup>研究了脉冲在增益呈指数下降和上升的分布放大器中的自相似放大行为,得到了解析解,表明脉冲在增益呈指数下降和上升的分布放大器中都能演化为抛物线脉冲。实际放大器增益带宽有限,放大脉冲的谱宽超过增益带宽后将偏离抛物线脉冲演化<sup>[22,23]</sup>。并且实际放大器有不同的抽运方式,对应着不同的增益分布。由于脉冲在增益呈指数下降、上升以及双向指数增益分布放大器中放大时,脉冲的自相似演化行为不同,因此脉冲在不同增益分布放大器中自相似放大时受增益带宽限制的程度可能不同。

本文通过求解包含超高斯增益系数滤波的分布增益非线性薛定谔方程,模拟研究了短脉冲在有限增益带宽指数增益光纤放大器中的自相似演化行为。研究相同输入脉冲在相同总增益的指数上升、下降和双向分布放大器中放大时输出脉冲的差异,在此基础上比较了不同能量的高斯脉冲在相同放大器中放大时输出脉冲的优劣。

## 2 理论模型

考虑正群速度色散(GVD)、自相位调制效应以及增益和损耗,短脉冲在有限增益带宽的光纤放大器中的传输放大行为,可以用频域非线性薛定谔方程描述<sup>[24]</sup>:

$$\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial z} = \frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 \bar{\Psi} - \frac{\alpha}{2} \bar{\Psi} + i\gamma |\bar{\Psi}|^2 \bar{\Psi} + \frac{g}{2} \bar{\Psi}, \quad (1)$$

式中  $\omega$  为角频率,  $\bar{\Psi}$  为脉冲的包络振幅,  $\beta_2$  为群速度色散,  $\gamma$  为非线性系数,  $\alpha$  为放大器本底损耗系数,  $z$  为脉冲传输距离,  $g$  为放大器的增益。为研究增益带宽对抛物线脉冲放大的影响,将  $g$  表示为  $g = g(z)f(\omega)$ , 式中  $f(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\Omega_g}\right)^{10}\right]$  为超高斯型滤波函数,其中  $\Omega_g$  为增益带宽,这与实际的光纤放大器平坦的增益谱相对应,如图 1 所示。考虑到实际光纤放大器的主要抽运方式有正向、反向和双向三种抽运,分布增益系数  $g(z)$  可分别表示为

$$g(z) = g_0 \exp(z/5), \quad (2)$$

$$g(z) = g_0 \exp(-z/5), \quad (3)$$

$$g(z) = \begin{cases} g_1 \exp(-z/5) & 0 < z < L/2 \\ g_2 \exp(z/5) & L/2 \leq z \leq L \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $g_0$  为脉冲输入端增益系数。增益系数变化率与抽运功率,掺杂浓度相关,选择为 1/5,与文献[7]中相近。

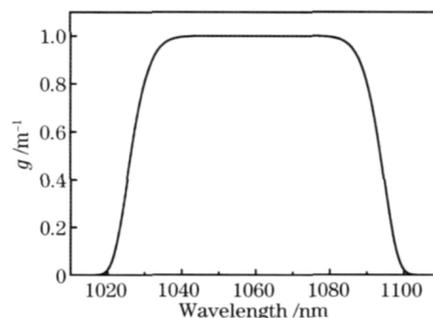


图 1 归一化超高斯增益系数滤波函数曲线

Fig. 1 Curve of normalization super Gauss filter function

利用(1)式,采用标准分步傅里叶算法<sup>[24]</sup>,能够数值模拟抛物线脉冲演化行为。实际计算中使用的参数如表 1 所示。

表 1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
GVD $\beta_2 / (\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	$25 \times 10^{-27}$
Nonlinearity parameter $\gamma / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	0.58
Loss coefficient $\alpha / \text{m}^{-1}$	0.002
Gain bandwidth $\Omega_g / \text{nm}$	35
Center wavelength of the pulse $\lambda / \text{nm}$	1060
Center wavelength of gain $\lambda' / \text{nm}$	1060
Input pulse width $T / \text{fs}$	200

## 3 结果与讨论

研究了光纤放大器对输入超短光脉冲进行自相似放大所受的增益带宽限制,在模拟计算中,脉冲为无啁啾高斯脉冲,输入脉冲能量为 1.4 nJ。考虑实际放大器,一般长度为几米,总增益为 20~30 dB,初始增益为 1~3,因此设定指数下降、上升和双向分布放大器增益系数随光纤长度分别为

$$g(z) = 2.1 \exp(-z/5), \quad (5)$$

$$g(z) = 1.2 \exp(z/5), \quad (6)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1.75 \exp(-z/5) & 0 < z < 2 \\ 1.17 \exp(z/5) & 2 \leq z \leq 4 \end{cases}. \quad (7)$$

图 2 为受到增益带宽限制后,超短光脉冲时域波形和频谱结构沿光纤放大器长度方向上的自相似放大演化行为,为方便比较,图中给出了无增益带宽限制的相应演化行为。

由图 2 可见,无论是指数下降、上升还是双向分布放大器,由于输入脉冲谱宽远小于放大器增益带

宽,所以脉冲初始输入放大器时其演化行为不会受到增益带宽限制,脉冲时域、频域逐渐展宽向抛物线脉冲演化。当脉冲传输放大特定长度后,谱宽逐渐展宽到增益带宽,脉冲将偏离抛物线脉冲演化。脉冲时域偏离抛物线形状,频谱边缘出现明显多峰振荡结构,从图 3 也可以看出对应的脉冲啁啾逐渐偏离线性啁啾演化。其中实线为增益带宽限制的情

况,虚线为无增益带宽限制的情况。这是因为当放大脉冲带宽超过放大器增益带宽时,放大器不能支持边缘频谱放大,只有带宽内的频谱可以持续放大,导致脉冲总的色散作用较弱,脉冲不能保持抛物线形状同步展宽,输出脉冲相对于无增益带宽限制时较窄。脉冲偏离抛物线脉冲形状,在自相位调制作用下将引入的非线性啁啾,使得脉冲不同部分存在

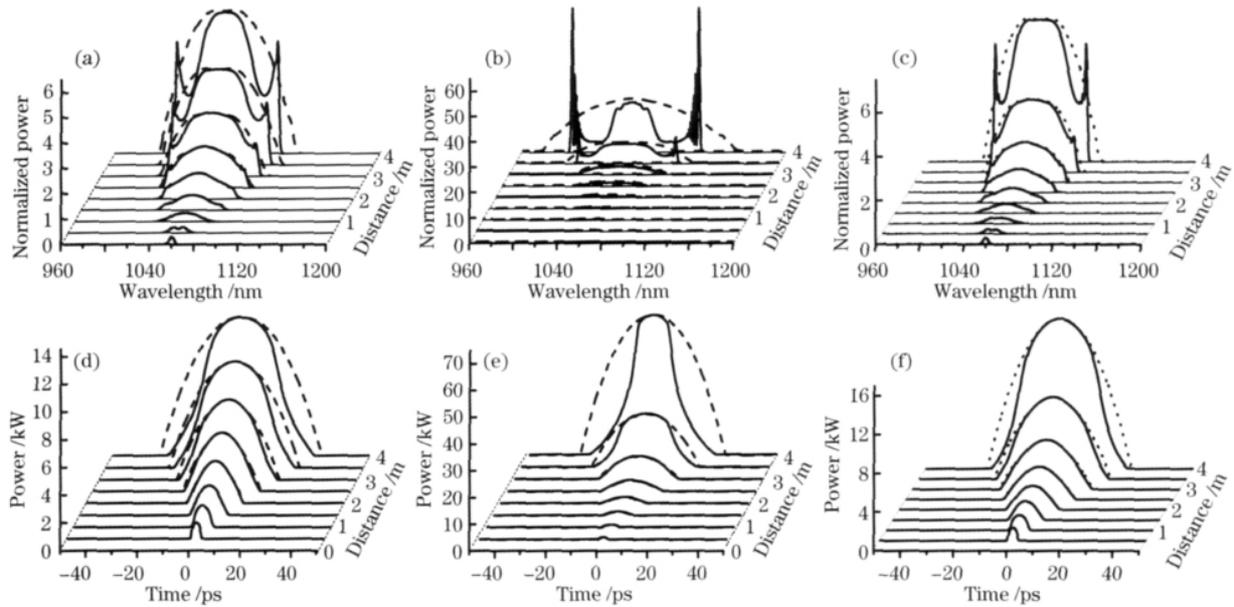


图 2 无啁啾高斯脉冲在有增益带宽限制(实线)和无增益带宽限制(虚线)分布增益放大器的传输时频谱和时域脉冲演化行为。(a)和(d)指数下降放大器;(b)和(e)指数上升放大器;(c)和(f)双向分布放大器

Fig. 2 Evolutions of normalization frequency profile and waveform of the chirp-free Gaussian pulse propagating along distributed gain fiber amplifiers with (solid curves) and without (dash curves) the limit of the gain bandwidth. (a) and (d) decreasing gain distributed; (b) and (e) increasing gain distributed; (c) and (f) bidirectional gain distributed

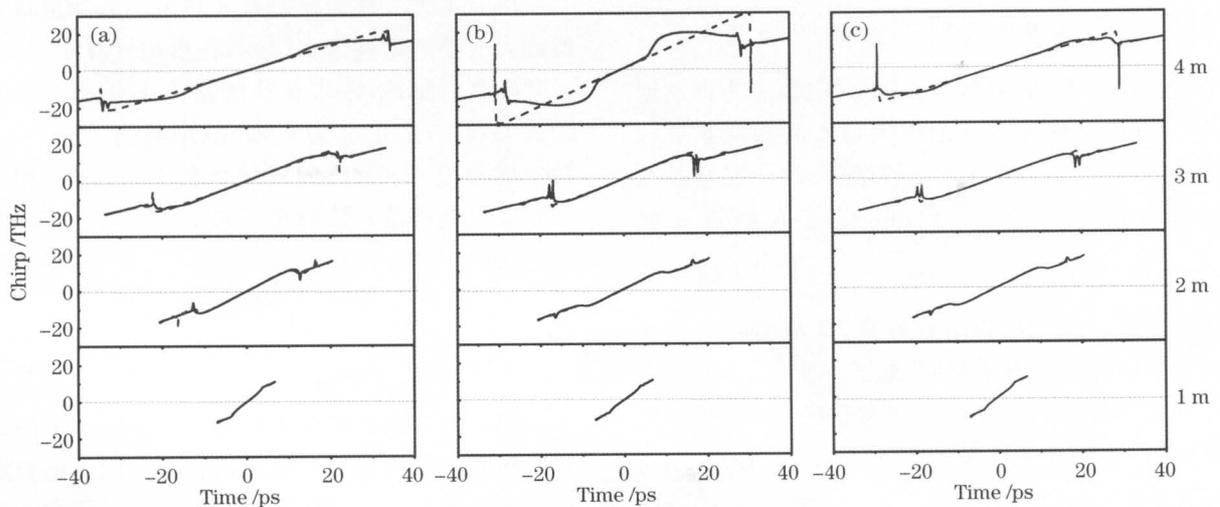


图 3 脉冲啁啾在光纤放大器中的演化行为。(a)指数下降放大器;(b)指数上升放大器;(c)双向指数分布放大器

Fig. 3 Evolutions of chirps of the pulse propagation in fiber amplifiers. (a) Decreasing gain distributed fiber amplifiers; (b) increasing gain distributed fiber amplifiers; (c) bidirectional gain distributed fiber amplifiers

相同的频率成分,它们之间相互干涉形成了多峰结构的振荡边带。随着放大器长度的增加这种效应就越明显,频谱边缘多峰结构就更强。

以上研究表明,当放大器足够长时,短脉冲在增益系数指数下降、上升和双向指数分布放大器中自相似放大时都会受增益带宽的限制,偏离自相似脉冲演化,产生携带大量非线性啁啾的脉冲。此脉冲质量较差,传输过程中不能抑制光波分裂,亦不能进行高效压缩。但是,脉冲在增益呈指数下降、上升和双向分布放大器中自相似演化规律不同,放大脉冲光谱逐渐展宽到放大器增益带宽的放大器长度也不同(在增益系数指数上升放大器长度为 2.8 m;指数下降放大器长度为 2.2 m,在双向指数增益分布放大器长度为 3.0 m),因此,对于特定长度、总增益的不同增益分布的放大器受有限增益带宽限制的程度不同,输出脉冲及其啁啾特性也不同,针对此问题进行了数值研究。

图 4(a)~(c)分别为高斯脉冲在 4 m 指数下降、上升和双向分布放大器中(脉冲放大都已明显受到增益带宽限制)输出脉冲形状及其啁啾图。图 4(d)~(f)对应为初始增益较小,长度为 5.1 m 指数下降、上升和双向分布放大器的情况,以上放大

器在 1060 nm 具有相同的总增益 25.1 dB,内嵌图给出了放大器具体增益分布形式。由图 4(a)~(c)可见,输出脉冲能量高低依次为指数上升放大器(102.3 nJ)、指数双向分布放大器(94.3 nJ)、指数下降放大器(85.4 nJ)。主脉冲啁啾线性拟合度高低一次为指数上升放大器(99.3%)、指数双向分布放大器(98.9%)、指数下降放大器(98.6%)。这是因为此三种分布放大器中,指数上升放大器初始增益较小,脉冲能量和峰值功率提升较慢,由自相位调制(SPM)导致的频谱展宽较慢,最不易受带宽限制,脉冲频谱在较长的放大器长度内处于增益带宽内,能充分有效地放大。对于指数下降放大器则最易带宽限制,脉冲不能充分放大,双向分布放大器性能居中。对于图 4(d)~(f)有同样规律。分别比较图 4(a)和(d)、(b)和(e)、以及(c)和(f)可见,无论是指数下降、上升和双向分布放大器,初始增益较小时输出脉冲能量较高,线性啁啾特性较好。这是因为,对于相同输入脉冲初始增益较小时,脉冲能量和峰值功率提升较慢。脉冲所经历的 SPM 作用较弱,频谱展宽较慢,脉冲放大不易受增益带宽限制,脉冲能更有效地放大输出脉冲能量较高,同时其输出脉冲线性啁啾特性较好。

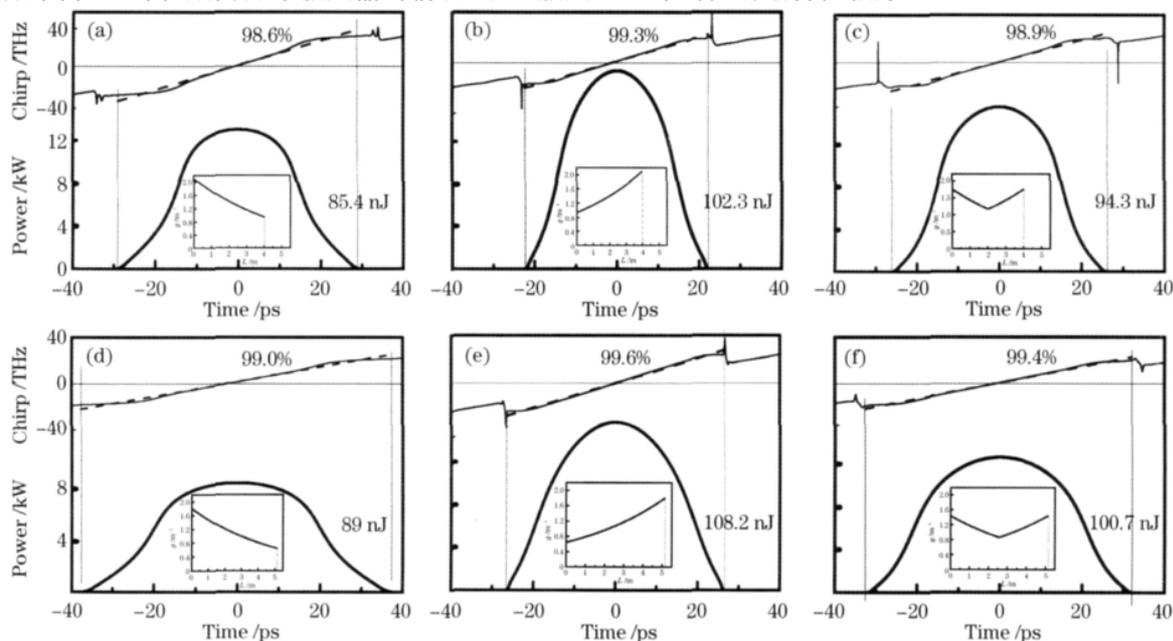


图 4 无啁啾高斯脉冲在相同总增益、不同增益分布放大器中输出的脉冲波形及其啁啾特性。(a)和(d)初始增益系数为 2.1 和 1.8 的指数下降放大器;(b)和(e)初始增益系数为 0.94 和 0.64 的指数上升放大器;(c)和(f)初始增益系数为 1.75 和 1.44 的指数双向分布放大器

Fig. 4 Output pulse shapes and chirp decreasing gain amplifiers with the same overall gain. (a) and (d) Decreasing gain distributed fiber amplifiers with initial gain 2.1 and 1.8; (b) and (e) increasing gain distributed fiber amplifiers with initial gain 0.94 and 0.64; (c) and (f) bidirectional gain distributed fiber amplifiers with initial gain 1.75 and 1.44

对于给定的掺杂光纤,放大器的增益带宽有限,而放大器增益分布主要与抽运方式和抽运功率有关。根据研究结果,采用低输入端增益的反向抽运放大器,由于SPM导致的频谱展宽较弱,受增益带宽限制的程度相对较小有利于获得较高能量、线性啁啾特性较好的脉冲输出。另外,选择较小能量的输入脉冲也是有利的,但是得考虑实际放大器的噪声特性。模型中考虑了有限增益带宽的限制以及放大器的增益分布,能够描述实际放大的特性。但是,模型依然存在不足,由于实际放大器存在增益饱和效应,脉冲在逐渐放大过程中,峰值功率不断增益高阶效应也会突显,同样高阶色散作用也会使脉冲发生畸变。

## 4 结 论

通过求解包含超高斯增益系数滤波的分布增益非线性薛定谔方程,数值研究了短脉冲在有限增益带宽指数增益光纤放大器中的自相似演化行为及其差异。结果表明,短脉冲在指数上升、下降和双向分布放大器中自相放大时都会受到增益带宽限制。相同输入脉冲在相同长度,相同总增益的指数上升、下降和双向分布放大器中放大时,在双向分布放大器输出能量最高,输出脉冲线性啁啾特性最好,指数下降放大器输出能量最低,输出脉冲线性啁啾特性最差,指数上升放大器居两者之间。此外,总增益相同时,无论是指数上升、下降和双向分布放大器,初始增益系数较小时,则输出脉冲能量均较高,脉冲线性啁啾特性均较好。因此,采用低初始增益的反向抽运放大器有利于获得较高能量、线性啁啾特性较好的脉冲输出。

## 参 考 文 献

- C. B. Schaffer, A. Brodeur, J. F. Garcia *et al.*. Micromachining bulkglass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(2): 93~95
- Yanmei Wang, Huan Shen, Linqiang Hua *et al.*. Predissociation dynamics of the B state of CH<sub>3</sub>I by femtosecond pump-probe technique[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10506~10513
- F. Korte, S. Adams, A. Egbert *et al.*. Sub-diffraction limited structuring of solid targets with femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 41~49
- Z. Y. Wei, Z. H. Wang, P. Wang *et al.*. A compact 355 TW femtosecond Ti:sapphire laser facility and trend to high contrast ratio[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 032003
- B. Ortac, A. Hideur, T. Chartie *et al.*. 90-fs stretched-pulse ytterbium-doped double-clad fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(15): 1305~1307
- Xueming Liu. Pulse evolution without wave breaking in a strongly dissipative-dispersive laser system[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(5): 053819
- Xueming Liu. Dissipative soliton evolution in ultra-large normal-cavity-dispersion fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9549~9557
- Zhao Yu, Zhao Deshuang, Liu Yongzhi *et al.*. Output coupling ratio in passively mode-locked fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 794~798  
赵 羽, 赵德双, 刘永智等. 被动锁模光纤激光器的耦合输出比[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 794~798
- Ren Fang, Xiang Wanghua, Bai Yangbo *et al.*. Experimental study on the nonlinear polarization rotation mode-locking fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 56~60  
任 芳, 向望华, 白扬博等. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 56~60
- Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177  
宋 方, 徐文成, 陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177
- Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 50~54  
张 欣, 陈 伟, 刘 宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 50~54
- J. M. Dudley, C. Fino, D. J. Richard *et al.*. Self-similarity in ultrafast nonlinear optics [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**: 597~603
- D. Anderson, M. Desaix, M. Karlsson *et al.*. Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1993, **10**(7): 1185~1190
- S. Haghgoo, S. A. Ponomarenko. Self-similar pulses in coherent linear amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9750~9758
- J. Y. Zhang, Q. Tian, Y. Y. Wang *et al.*. Self-similar optical pulses in competing cubic-quintic nonlinear media with distributed coefficients[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(2): 023832
- W. H. Renninger, A. Chong, F. W. Wise. Self-similar pulse evolution in an all-normal-dispersion laser[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(2): 021805
- C. K. Nielsen, B. Ortac, T. Schreiber *et al.*. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23): 9347~9351
- K. Tamura, M. Nakazawa. Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 68~70
- M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26): 6010~6013
- V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(3): 461~469
- V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey. Exact self-similar solutions of the generalized nonlinear Schrödinger equation with distributed coefficients [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113902
- D. B. Soh, J. Nilsson, A. B. Grudinin. Efficient femtosecond pulse generation using a parabolic amplifier combined with a pulse compressor. II. Finite-gain-bandwidth effect[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(1): 10~19
- J. Limpert, T. Schreiber, T. Clausnitzer *et al.*. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14): 628~638
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 42~43  
G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 42~43

栏目编辑: 宋梅梅