

自相似脉冲在锁模光纤激光器中产生的理论研究

李 超^{1,2} 赵 磊¹ 黄志华¹ 林宏奂¹ 田小程¹ 邓 颖^{1*} 黄小军¹ 朱启华¹

(¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
²中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于非线性薛定谔方程(NLSE)建立了自相似脉冲在振荡器中的产生模型,在此模型的基础上研究了自相似脉冲在激光器中形成的物理机制。通过合理设置参数,得到自相似锁模脉冲在激光器中的演化。此自相似脉冲具有严格的线性啁啾,可压缩至 90 fs,脉冲峰值功率可以达到 26 kW。在谐振腔内,随着位置的变化脉冲宽度被展宽或压缩,这种变化主要源于光纤内的自相位调制和色散综合作用。随着腔内净色散的增加,锁模脉冲输出能量逐渐增加,腔内脉冲呼吸比逐渐降低。随着抽运功率的增加,脉冲能量和腔内呼吸比也随之增加。这种可呼吸的自相似脉冲可在腔外压缩至接近变换极限,且具有超高峰值功率。

关键词 激光器; 锁模光纤激光器; 自相似; 呼吸脉冲

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602017

Theory Study on Self-Similar Pulse in Mode-Locked Fiber Laser

Li Chao^{1,2} Zhao Lei¹ Huang Zhihua¹ Lin Honghuan¹ Tian Xiaocheng¹
Deng Ying¹ Huang Xiaojun¹ Zhu Qihua¹

(¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physical, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A numerical model for propagation of optical pulse in fiber is established based on nonlinear Schrödinger equation (NLSE), and the formation mechanisms of self-similar pulse in the oscillator are studied. Self-similar pulse evolution in laser is available under reasonable parameters. The pulse, with strict linear chirp, can be compressed to 90 fs, and its peak power reaches to 26 kW. Pulse width is broadened or compressed along with the different positions of the oscillator. This is because of the interaction of self-phase modulation and group velocity dispersion in fiber. With the increase of net dispersion of the cavity, the output pulse energy increases gradually, while the pulse breathing ratio decreases gradually. Whereas, with the increase of pumping power, both pulse energy and pulse breathing ratio increase. This self-similar pulse can be compressed to near transform-limited with ultra-high peak power.

Key words lasers; mode-locked fiber laser; self-similar; stretched-pulse

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 140.3430; 140.3560

1 引 言

被动锁模光纤激光器具有非常广泛的应用,包括光频率梳^[1]、材料制备^[2]、超连续谱产生^[3]和光示波器^[4]等。历史上,锁模激光器性能的大幅提升都是由于新的锁模机理的发现^[5],所以新的锁模机理的研究不仅是理论研究的热点,同时也是提升锁模

激光器性能的必要手段。基于负色散、全正色散和色散管理的锁模激光器已经有了较为深入的研究。但是,由于非线性效应的累积可能导致的脉冲劈裂,限制了超短脉冲的能量^[6]。2000年 Fermann 等^[7]在放大器中发现了自相似脉冲,通过光栅对压缩,峰值功率达到 80 kW。到 2004 年, Ilday 等^[8]在振荡

收稿日期: 2013-01-28; 收到修改稿日期: 2013-03-24

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0401063)资助课题。

作者简介: 李 超(1987—),男,硕士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail:licsx@sina.com

导师简介: 朱启华(1969—),男,博士,研究员,主要从事超短脉冲激光器方面的研究。E-mail:qihzh@163.com

* 通信联系人。E-mail: tjudengying@sina.com

器中发现自相似脉冲。自相似脉冲可以保持较高能量而不会劈裂,单个脉冲能量可达数十纳焦,因此很容易获得高平均功率锁模激光。2010年,Oktem等^[5]从理论和实验上观察到激光器中的自相似锁模脉冲演化,并理论研究了自相似锁模激光器的形成原理。国内一些研究机构也对自相似锁模脉冲进行了一定的理论研究。2007年,冯杰等^[9]理论计算了自相似脉冲在色散渐减光纤中的产生,并计算了自相似脉冲在放大器中的演化过程。2009年,邓一鑫等^[10]理论研究了自相似脉冲在非线性偏振旋转(NPR)锁模激光器中的产生。2011年,李莉苹等^[11]研究了非线性渐增光纤中自相似脉冲的产生,但结果并不满意。2011年,冯杰等^[12]系统总结了近10年国际上自相似脉冲的研究进展,并总结了自相似脉冲的两个显著特点:1)自相似脉冲特点只由输入脉冲能量和光纤参数决定;2)在高功率传输时,具有抵御脉冲分裂的能力,具有严格的线性啁啾。

本文利用非线性薛定谔方程(NLSE)建立了自相似锁模光纤激光器的理论模型,研究自相似锁模在激光器中的演化过程,并研究了腔内净色散、谐振腔长度和抽运功率对自相似脉冲的影响。

2 理论模型

脉冲在光纤中的传输可用NLSE描述^[13]

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

式中 $A(z,t)$ 为光波电场的振幅; β_2 为光纤中的二阶色散系数; γ 为非线性系数;增益系数

$$g(t) = g(E_{\text{pulse}}) \left(1 + T_2^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right), \quad (2)$$

式中 E_{pulse} 为脉冲能量, $T_2 = \frac{2\pi}{ck^2 \Delta\lambda_g}$, $\Delta\lambda_g$ 为增益带宽,

$$g(E_{\text{pulse}}) = \frac{g_0}{1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}}}, \quad (3)$$

式中 E_{sat} 为饱和能量; g_0 为小信号增益,取决于光纤的增益系数和抽运功率, $g_0 = \frac{\Gamma_s \sigma_s \Gamma_p \sigma_p P_p}{a_p h \nu_p}$,其中 Γ_s 是信号光重叠因子, σ_s 为信号光频率的跃迁截面, Γ_p 是抽运光重叠因子, σ_p 为抽运光频率的跃迁截面, P_p 为抽运光功率, a_p 为光纤中抽运光的模场面积, ν_p 为抽运光频率,即

$$P_p = \frac{g_0}{A}, \quad A = \frac{\Gamma_s \sigma_s \Gamma_p \sigma_p}{a_p h \nu_p}. \quad (4)$$

故小信号增益与抽运光功率成正比。在研究自相似脉冲与抽运功率的关系时,可用小信号增益代替。

$$E_{\text{pulse}} = \int_{-T_R/2}^{T_R/2} |A(z,t)|^2 dt, \quad (5)$$

式中 T_R 为脉冲在光纤中传播一周的时间,在计算过程中实际为时间窗口。

滤波器透射率函数为超高斯函数:

$$T_{\text{filter}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^{2m}\right], \quad (6)$$

式中 m 表示超高斯函数的阶数。可饱和吸收体(SA)的透射率可表示为

$$T_{\text{SA}} = 1 - \frac{l_0}{(1 + P_t/P_{\text{sat}})}, \quad (7)$$

式中 l_0 为不饱和损耗, P_t 为瞬时功率, P_{sat} 为饱和功率。吸收体之后接90/10分束器,10%作为输出端。

光栅作为色散延迟线可直接表示为

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_{\text{grating}} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z,t), \quad (8)$$

式中 β_{grating} 为光栅的色散量。

3 振荡器中的自相似脉冲

3.1 自相似脉冲的产生

建立以上数学模型,合理选择光纤长度、腔内净色散和光谱滤波函数等参量,初始脉冲选取峰值为 10^{-20} W的高斯脉冲,经过合适的腔内循环,可得到稳定的锁模脉冲输出。单模光纤长度为6 m,掺Yb光纤长度为0.23 m,非线性系数 $\gamma = 0.0047 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,二阶色散系数 $\beta_2 = 23 \text{ ps}^2/\text{km}$,掺Yb光纤小信号增益 $g_0 = 30.4 \text{ m}^{-1}$,增益带宽 $\Delta\lambda_g = 45 \text{ nm}$,饱和能量 $E_{\text{sat}} = 4 \text{ nJ}$;光谱滤波器为超高斯函数, $m = 5$, $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$,即带宽为60 nm;可饱和吸收体饱和功率 $P_{\text{sat}} = 1.5 \text{ kW}$,不饱和损耗 $l_0 = 0.7$;光栅色散为 -0.13 ps^2 ;光纤净色散为 0.143 ps^2 ,腔内净色散为 0.013 ps^2 。

基于以上数学模型和参数,利用分布傅里叶算法进行仿真计算得到抛物线型锁模脉冲,如图1所示。从图1(a)和(b)中可以看到,噪声脉冲经过增益光纤逐渐放大,脉宽逐渐压窄;第10圈后,光谱出现了明显的自相位调制,第28圈后脉冲宽度和形状逐渐稳定,脉冲从高斯脉冲最终演化为抛物线型脉冲。图1(c)为第28圈时的脉冲波形,红色点划线为抛物脉冲拟合,可以看出输出脉冲与抛物脉冲极

为接近;图 1(d)为 28 圈时的脉冲光谱。计算脉冲啾啾得到锁模脉冲近似线性啾啾,如图 2 所示。可见此抛物线型脉冲为自相似锁模脉冲^[7,8]。进一步

利用光栅对对此自相似脉冲进行压缩,光栅色散量为 -0.1435 ps^2 ,得到锁模锁模脉冲压缩至 90 fs,峰值功率达到 26 kW。

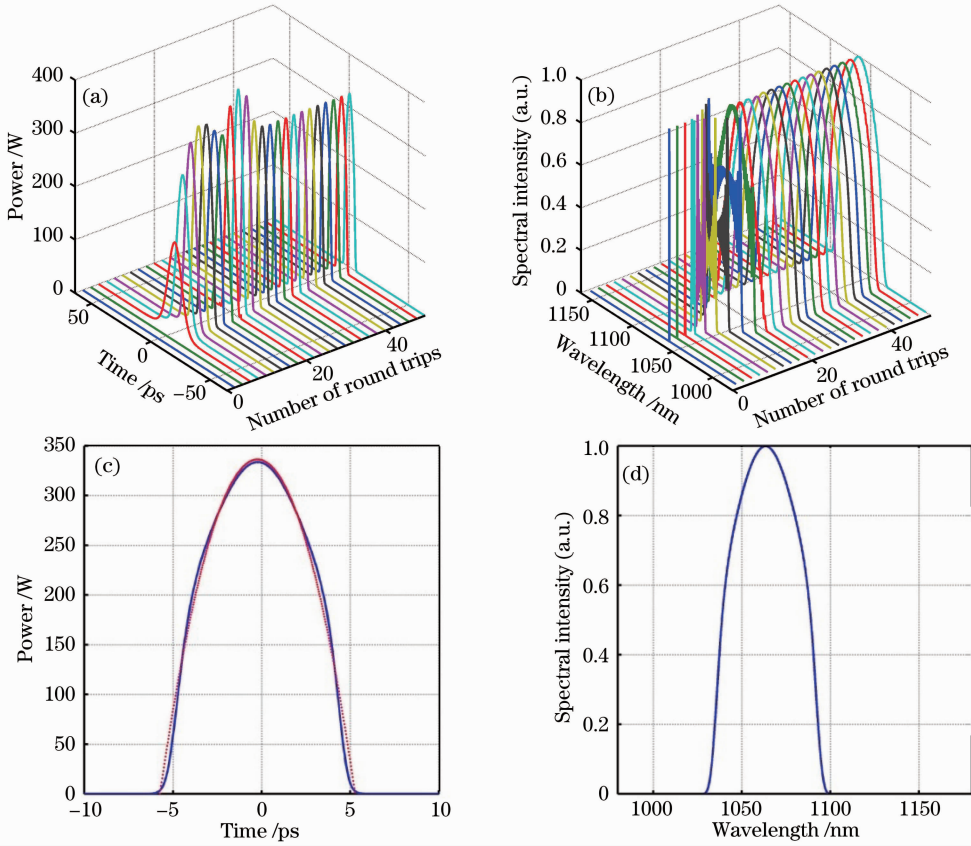


图 1 自相似锁模脉冲时域演化图。(a)脉冲演化图;(b)光谱演化图;(c)循环第 28 圈输出脉冲形状,红色点划线为抛物线拟合;(d)第 28 圈脉冲光谱

Fig.1 Evolution graphs of self-similar mode-locked pulse in time-domain. (a) Pulse evolution graph; (b) spectrum evolution graph; (c) output pulse with a parabolic fitting (red dotted) in the 28th round trips; (d) output spectrum in the 28th round trips

自相似锁模脉冲在谐振腔内的单圈演化如图 3 所示。在正群速度色散(GVD)的单模光纤(SMF)中,高功率的锁模脉冲因自相位调制(SPM)使脉

冲和光谱同时得到展宽,同时也证明脉冲具有正啾啾。经过增益(掺 Yb)光纤,脉冲和光谱同时压缩,这是由增益带宽受限所导致的:脉冲具有线性啾啾,锁模脉冲前后沿对应光谱的红移和蓝移部分,增益窄化(增益带宽只有 45 nm)使得光谱窄化,同时脉冲宽度也得到限制。脉冲通过光谱滤波器和可饱和吸收体,锁模脉冲和光谱进一步窄化。通过光栅对,对锁模脉冲进行压缩,最后再进入单模光纤。从图 3(b)中还可以看出,在单模光纤中,脉宽迅速展宽,同时峰值功率急剧下降,SPM 调制逐渐减弱,光谱展宽变缓,但是脉冲具有较大频率啾啾,在较短的单模光纤中(弱色散效应)脉冲依然线性展宽,最后演化为近似方波脉冲[图 3(b)]。在掺 Yb 光纤中,方波脉冲逐渐放大,脉冲逐渐演化为抛物脉冲,这正是脉冲在放大器中演化成抛物脉冲的过程^[14]。

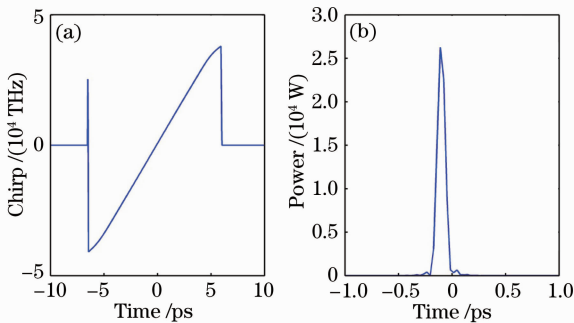


图 2 (a)自相似锁模脉冲的频率啾啾;(b)光栅压缩后的锁模脉冲

Fig.2 (a) Chirp profile of self-similar mode-locked pulse; (b) compressed pulse after grating compression

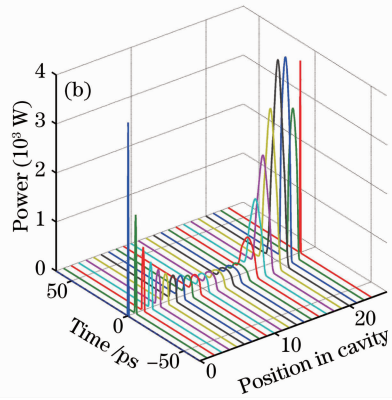
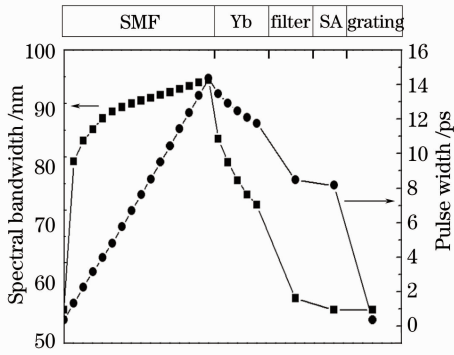


图3 锁模脉冲在振荡器的单圈演化。(a)脉宽和谱宽在腔内不同位置的变化;(b)单圈脉冲演化(腔内0~15为单模光纤, 16~20为掺Yb光纤,21为光谱滤波器,22为可饱和吸收体,23为光栅)

Fig.3 Evolution graphs of mode-locked laser in one round trip. (a) Pulse width and spectrum width variation along laser cavity; (b) evolution graph of mode-locked laser (0~15 denote single mode fiber, 16~20 denote Yb-doped fiber, 21 is filter, 22 denotes saturated absorption, 23 denotes grating)

3.2 腔内净色散对自相似脉冲的影响

为研究腔内净色散对自相似锁模脉冲的影响,除光栅色散外,其他参数取值和3.1节中相同。通过改变光栅色散值,调整激光器内净色散,得到可以稳定获得自相似锁模脉冲的色散范围为 $0.005 \sim 0.017 \text{ ps}^2$ 。计算输出脉冲能量和腔内脉冲呼吸比得到图4,从图4可以看出,随着腔内净色散的增加,脉冲能量逐渐增加,而脉冲在腔内的呼吸比却逐渐降低。由图3可知,脉宽最宽处出现在单模光纤的末端,而最窄处在光栅之后。图5表示单模光纤末端和光栅之后的脉冲宽度随着净色散变化。可以得到,随着腔内色散的增加,压缩光栅之后的脉冲宽度逐渐增加,峰值功率逐渐降低,在单模光纤中传输的过程中,因自相位调制产生的光谱展宽效应减弱,同时脉冲宽度的展宽程度逐渐降低,导致单模光纤末端的脉冲宽度随着净色散的增加逐渐降低。

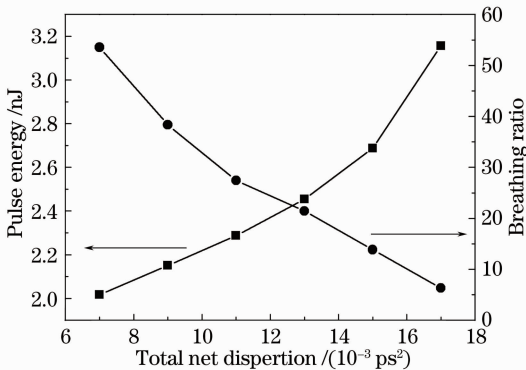


图4 自相似脉冲能量和呼吸比与腔内净色散之间关系
Fig.4 Pulse energy and intra-cavity breathing ratio with respect to total net dispersion for self-similar pulse

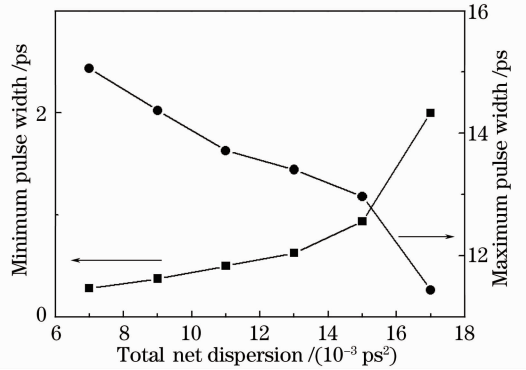


图5 自相似脉冲宽度与净色散之间的关系
Fig.5 Pulse width with respect to total net dispersion for self-similar pulse

3.3 谐振腔长度对自相似脉冲的影响

而在腔内净色散一定的情况下,改变谐振腔内光纤长度对自相似脉冲特性也会产生一定影响。改变光纤长度时,调节光栅色散,使得腔内净色散保持在 0.013 ps^2 。在这里只改变无源光纤的长度,增益光纤保持不变,这样可以使得振荡器增益保持不变。单模光纤长度在 $3 \sim 6.5 \text{ m}$ 范围内变化时,可以获得稳定的自相似脉冲,获得的脉冲能量和脉冲腔内呼吸比如图6所示,脉冲能量随着腔长增加而减小,而呼吸比随着腔长增加而增加。从图3(a)中可以看出,在单模光纤中,脉冲逐渐展宽。这是因为脉冲在更长的单模光纤中可以得到更宽的宽度,因此脉冲呼吸比得以增大。而脉冲能量降低主要是由于在没有更大增益的情况下,更宽的脉冲在经过可饱和吸收体时,脉冲边缘的能量被吸收了,这样使得脉冲能量降低。

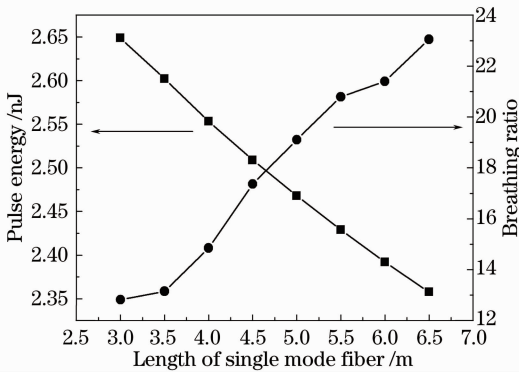


图6 脉冲能量和呼吸比与单模光纤长度之间的关系
Fig. 6 Pulse energy and intra-cavity breathing ratio with respect to length of single mode fiber

3.4 抽运功率对自相似脉冲的影响

在第2节中已经提到,抽运功率与小信号增益成正比,即 $P_p = g_0/A$ 。在计算抽运功率对自相似脉冲影响时,用小信号增益代替,得到的结果与抽运功率对脉冲的影响相同。在模型中小信号增益在 $26 \sim 35 \text{ m}^{-1}$ 之间可以得到稳定的自相似脉冲,因此计算了在此区间内的脉冲能量和脉冲呼吸比之间的关系,如图7所示,脉冲能量随着小信号增益(抽运功率)的增长而线性增长,脉冲呼吸比也随着小信号增益抽运功率的增加而呈线性增长,但是增长幅度并不大。对比图4、5和7,腔内色散对脉冲呼吸比的影响远大于抽运功率的影响,而大的腔内呼吸比更有利于获得更宽的光谱,这是由于一般大呼吸比的脉冲在腔内可以压缩得更窄,获得更高的峰值功率,产生更强的非线性效应,从而产生更宽光谱。因此一般要获得更宽光谱,调节色散量比增加抽运功率更为有效。

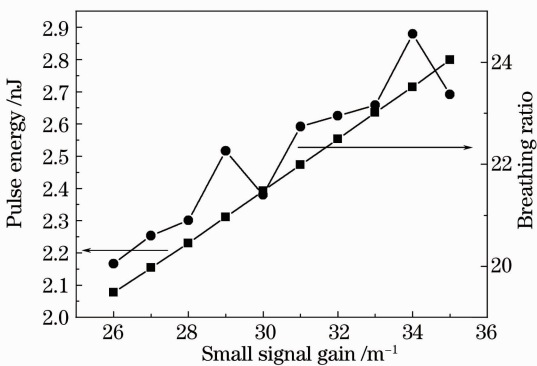


图7 脉冲能量和呼吸比与小信号增益(抽运功率)之间关系
Fig. 7 Pulse energy and intra-cavity breathing ratio with respect to small signal gain (pumping power)

4 结 论

基于NLSE建立了自相似脉冲在振荡器中产生的理论模型。计算表明,振荡器中,脉冲在增益光纤中逐渐演化为自相似脉冲,脉冲和光谱都具有抛物脉冲的形状,输出脉冲也具有严格的线性啁啾;在腔外脉冲被压缩至90 fs,脉冲峰值功率达到26 kW。脉冲在腔内的循环具有明显的呼吸特性,在单模光纤中因SPM和GVD效应脉冲和光谱同时展宽,在增益光纤中因增益线宽的影响,脉冲和光谱同时窄化,最后经过光谱滤波器、可饱和吸收体和光栅对,脉冲进一步窄化。随着腔内净色散的增加,脉冲能量随之增加,而腔内呼吸比逐渐降低。与之相反,随着谐振腔长度的增加,脉冲能量随之降低,脉冲呼吸比随之增加。抽运功率的增加却获得更高的脉冲能量和脉冲呼吸比,但是其影响小于色散的作用。因此要获得更大的脉冲呼吸比和更宽的光谱,合理控制色散比提高抽运功率更为有效。

参 考 文 献

- 1 B. R. Washburn, S. A. Diddams, N. R. Newbury. Phase-locked erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(3): 250~252
- 2 L. Shah, M. E. Fermann, J. W. Dawson *et al.*. Micromachining with a 50 W, 50 μJ , sub-picosecond fiber laser system[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12546~12551
- 3 Zhao Lei, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Experimental research of high conversion efficiency all-fiber supercontinuum source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(8): 1143~1147
赵磊,王建军,林宏奂等. 全光纤高效超连续谱光源实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(8): 1143~1147
- 4 Zhang Jianguo, Liu Yuanshan. Development of ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope equipment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 487~504
张建国,刘元山. 研制超宽带全光取样示波器设备[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 487~504
- 5 Bulent Oktem, Coskun Ügüdü, F. Ömer İlday. Soliton-similariton fiber laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 307~311
- 6 L. M. Zhao, D. Y. Tang, H. Zhang *et al.*. Dynamics of gain-guided solutions in an all-normal-dispersion fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1806~1808
- 7 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
- 8 F. O. İlday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902
- 9 Feng Jie, Xu Wencheng, Li Shuxian *et al.*. Analytical self-similar solutions of Ginzburg-Landau equation for the dispersion decreasing fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5835~5842
冯杰,徐文成,李书贤等. 色散渐减光纤中Ginzburg-Landau方程的自相似脉冲演化的解析解[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5835~5842

- 10 Deng Yixin, Xu Chenghou, Lü Fuyun. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser. [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3173~3178
 邓一鑫,徐成厚,吕福云. 非线性偏振旋转锁模自相似脉冲光纤激光器的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3173~3178
- 11 Li Liping, Zhang Ailing. Study on parabolic self-similar pulse generation in a nonlinearity increasing fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805006
 李莉苹,张爱玲. 基于非线性渐增原理获得抛物线型自相似脉冲的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805006
- 12 Feng Jie, Du Guoping, Zhu Ruixing *et al.*. Progress of ultra-short self-similar pulse optical fiber laser [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
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. London: Academic Press, 2001. 109~113
- 14 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): 461469

栏目编辑: 张 腾