

文章编号: 1001-3806(2012)01-0008-05

## 掺镱光纤放大器中脉冲自相似演化特性分析

汪徐德 周正 李素文 姜恩华

(淮师范大学 物理与电子信息学院 淮北 235000)

**摘要:** 为了研究自相似演化对于高功率超短脉冲系统产生的影响,采用非线性薛定谔方程,对掺镱光纤放大器中自相似解进行了理论分析,得到初始脉冲、脉冲宽度、增益系数、增益色散等参量变化时对其自相似演化产生不同的影响。结果表明,初始脉宽不同时,只有其初始色散长度和光纤长度相接近时,才可以实现脉冲自相似的演化;初始输入脉冲不同时均能演化成抛物线形,但是演化的进程不同;大的增益系数可以获得高功率、宽频谱的自相似脉冲;增益色散对自相似放大起滤波作用。研究结果对设计自相似脉冲放大器具有一定的借鉴价值。

**关键词:** 光纤光学; 自相似脉冲; 非线性薛定谔方程; 光纤放大器; 啁啾

中图分类号: TN253; TN722 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.003

## Self-similar pulse evolution in ytterbium doped fiber amplifiers

WANG Xu-de, ZHOU Zheng, LI Su-wen, JIANG En-hua

(School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

**Abstract:** In order to study the evolution and transmission of a self-similar pulse in a high power ultra-short pulse generation system, the self-similar solutions of the nonlinear Schrödinger equation in ytterbium doped fiber amplifiers were analyzed theoretically. The influence of the initial pulse shape, the initial pulse width as well as gain coefficient and gain dispersion on the pulse self-similar evolution were numerically studied. It is shown that when the dispersion length is close to fiber length, the initial pulse can evolve into a parabolic pulse. Different kinds of initial pulses are all evolved into parabolic profiles with different evolutionary process. Larger gain coefficient is beneficial to generate self-similar parabolic pulse with high power and wide frequency range. The gain dispersion plays an important role in frequency filtering.

**Key words:** fiber optics; self-similar pulse; nonlinear Schrödinger equation; fiber amplifier; chirp

### 引言

产生和传输高能量、高功率、严格线性啁啾特性的光脉冲是国际上光纤光学研究热点之一。光纤中的自相似现象是指在光纤中的正常群速度色散、自相位调制和增益的共同作用下,能够产生能量被显著放大、具有很强线性啁啾而且其时域特征类似于抛物线形状的渐进形脉冲。自相似脉冲很好地解决了传输中脉冲的强度限制问题,它在高功率传播时,脉冲形状不改变(始终保持抛物线形状),具有抵御光波分裂的能力,它具有严格的线性啁啾,能够获得高功率、高能量的超短压缩脉冲,同时自相似特性只由入射脉冲的能量和光纤参量决定,而与初始脉冲的形状无关等<sup>[1]</sup>。自从

2000年FERMANN等人确立了自相似脉冲放大的理论,自相似脉冲放大理论以及以此为基础的脉冲放大系统发展迅速。2004年,HIROOKA等人提出了利用不掺杂的正色散色散渐减光纤得到自相似脉冲的理论,为脉冲压缩提供了新的方法<sup>[2]</sup>。2005年HARVEY等人又通过喇曼光纤放大器验证了变系数条件下脉冲自相似传输的理论<sup>[3]</sup>。2008年,PAPADOPOULOS等人通过Yb<sup>3+</sup>光子晶体光纤的自相似放大系统,得到了脉冲宽度70fs、重复频率10MHz、平均功率为12.5W的脉冲<sup>[4]</sup>。光纤中脉冲的自相似性特性对于高功率超短脉冲的产生以及科学研究等具有重要的意义,并已经被广泛的应用到高功率的放大系统<sup>[5-6]</sup>,高效在线压缩器、光纤布喇格光栅以及自写波导演化<sup>[7-8]</sup>等众多方面。

作者从光纤中脉冲演化的实际情况出发,理论研究了同时含有色散、自相位调制、增益和增益色散时,非线性薛定谔方程自相似解的特性;数值分析了初始脉冲、脉冲宽度、增益系数、增益色散等参量变化时对其自相似演化产生的影响。研究结果表明,参量变化时,实际的放大器中具有不同特性的脉冲自相似演

基金项目:淮师范大学青年科研资助项目(2011xqxm35);  
淮师范大学教科研资助项目(jy110225)

作者简介:汪徐德(1980-),男,讲师,硕士,主要从事光纤非线性传输特性及其器件研究。

E-mail: wangxudemail@126.com

收稿日期:2011-03-28;收到修改稿日期:2011-04-20

化规律,具有实际的研究意义。

### 1 理论分析

假定光脉冲在光纤放大器中的演化是在忽略增益饱和和初始脉冲频谱宽度不大于放大器带宽的情况下进行的,那么脉冲的传输方程可以写为如下的非线性薛定谔方程的形式:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} + i \frac{\beta_3}{6\partial T^3} \psi^2 \psi + i \frac{g}{2} \psi \quad (1)$$

式中  $\psi(z, T)$  是脉冲慢变包络振幅  $\beta_2$  是光纤 2 阶色散系数  $\gamma$  是光纤非线性系数  $g$  是掺杂光纤的增益系数。由于掺镜光纤中掺杂了 3 价稀土离子 ( $Yb^{3+}$ ) 感应电极化强度  $P(r, t)$  应包括稀土离子的贡献,则与掺杂有关的色散效应需要加以考虑,即在  $Yb^{3+}$  影响下 2 阶色散系数等效为  $\beta_2 + igT_2^2$ ,如果信号脉冲脉宽  $T_0$  为皮秒级(约 1ps) 增益介质的荧光持续时间  $T_1$  为毫秒级(约 1ms) 而掺杂元素偶极子的弛豫时间  $T_2$  为飞秒级(10fs ~ 100fs) 则描述掺杂光纤中的脉冲信号传输演化方程为简化的金兹堡-朗道方程<sup>[9]</sup>:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{1}{2} (\beta_2 + igT_2^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - i \frac{\beta_3}{6\partial T^3} \psi^2 \psi = - \left( \gamma + \frac{i}{2} \alpha_2 \right) \psi^2 \psi + \frac{i}{2} (g - \alpha) \psi \quad (2)$$

式中  $\beta_2 + igT_2^2$  称为增益色散;  $gT_2^2$  为增益色散因子,其物理意义是掺杂元素对信号脉冲提供一种依赖于频率的增益效果;  $\alpha_2$  是光纤双光子吸收系数;  $\alpha$  是光纤损耗系数。(2) 式较完整地描述了稀土元素掺杂光纤中自相似抛物渐近脉冲的演化行为。忽略双光子吸收和损耗,忽略 3 阶色散,光纤中不同位置处脉冲能量演化满足关系式  $U(z) = U_{in} \exp(gz)$ ,从参考文献[10]中可得到其解析解为:

$$\psi(z, T) = A_0 \exp\left(\frac{gz}{3}\right) \left[1 - \frac{T^2}{T_p^2(z)}\right]^{\frac{1}{2}} \times \exp[i\Phi(z, T)] \quad (T \leq T_p(z)) \quad (3)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \left[ U_{in} g \sqrt{\frac{\gamma \beta_2 (6\beta_2 \gamma - g^2 T_2^2)}{6\beta_2 \gamma + g^2 T_2^2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\Phi(z) = \varphi_0 - \frac{g}{6\beta_2} g T_2^2 z + \frac{3\gamma A_0^2}{2g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) - \frac{g}{6\beta_2} T^2 \quad (5)$$

$$T_p(z) = \frac{6A_0}{g} \sqrt{\frac{\gamma \beta_2 (6\beta_2 \gamma - g^2 T_2^2)}{6\beta_2 \gamma + g^2 T_2^2}} \exp\left(\frac{g}{3}z\right) \quad (6)$$

从而得到其啁啾函数为:

$$\delta\omega(T) = - \frac{\partial \Phi}{\partial T} = \frac{g}{3\beta_2} T \quad (7)$$

从解析解(3) 式中可以看出,对于任意的初始脉冲,在

传输演化足够距离时最终得到一个渐进抛物线形式,且脉冲的自相似演化特征仅与脉冲的初始能量和光纤参量有关,而与脉冲的初始形状、宽度无关。(7) 式则表明自相似脉冲具有严格的线性啁啾。

图 1 中给出了无啁啾的高斯脉冲在 10m 的光纤长度中的自相似演化过程,初始能量为  $U_{in} = 90pJ$ ,初始脉冲宽度为  $T_0 = 0.25ps$ ,增益介质的掺杂元素偶极子的弛豫时间为  $T_2 = 0.05ps$ ,光纤的增益系数为  $g = 0.6m^{-1}$   $\beta_2 = 44 \times 10^{-3} ps^2 \cdot m^{-1}$   $\gamma = 5.6 \times 10^{-3} W^{-1} \cdot m^{-1}$ ,可以看出,脉冲由高斯形演化为抛物线形,并且振幅和脉宽都随着传输距离的增加而增大。

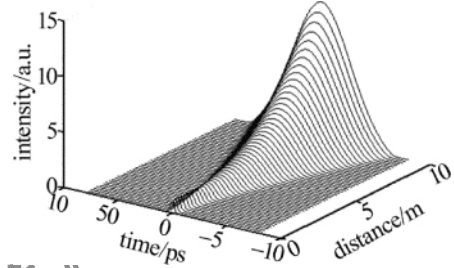


Fig. 1 Evolution of a Gaussian pulse in a fiber in 10m long

### 2 数值模拟

#### 2.1 初始脉冲宽度对自相似脉冲演化产生影响

根据参考文献[11],定义初始脉冲在光纤放大器中演化成自相似抛物线脉冲的最短距离为特性演化长度  $z_c$ ,  $z_c(N) = \frac{3}{2g} \ln\left(\frac{Ng}{6\gamma A_0^2}\right)$ ,对于某一较大的数值  $N$ ,当  $z > z_c(N)$  时,输出脉冲为严格的抛物线自相似脉冲,若取  $N = 100$ ,放大器的增益系数  $g = 0.6m^{-1}$ ,则  $z_c = 8m$ ,放大器的总增益为 21dB。图 2 中给出了初始脉冲宽度  $T_0$  分别为 0.25ps, 0.6ps, 5ps 3 种不同宽度初始脉冲的演化结果。

从图 2 可以看出,脉冲宽度  $T_0$  为 0.25ps 和 0.6ps 的初始脉冲的演化均接近了自相似抛物线脉冲,且其对应的啁啾具有线性特征,这和理论推导的(7) 式一致,在脉冲的前后沿,出现了边翼,表明脉冲的演化不完全,随着传输距离的增加,脉冲边翼会逐渐消失。而脉宽为 5ps 的初始脉冲并没有演化成自相似脉冲。主要原因在于自相似脉冲在产生的过程中,群速度色散和自相位调制同时作用于脉冲的传输,对于脉宽 5ps 的初始脉冲,由于色散长度  $L_d = T_0^2 / \beta_2$  远远大于光纤的长度(8m),在几米的演化距离内脉冲受到色散作用非常小,因此在给定较短演化距离内,脉宽几乎不发生变化,而非线性长度  $L_{nl} = 1 / (\gamma P_0)$  随着脉冲峰值功率的不断增大而逐渐变小,因此,导致脉冲主要受非线性作用而维持其高斯脉冲形状不变,从而阻止了脉

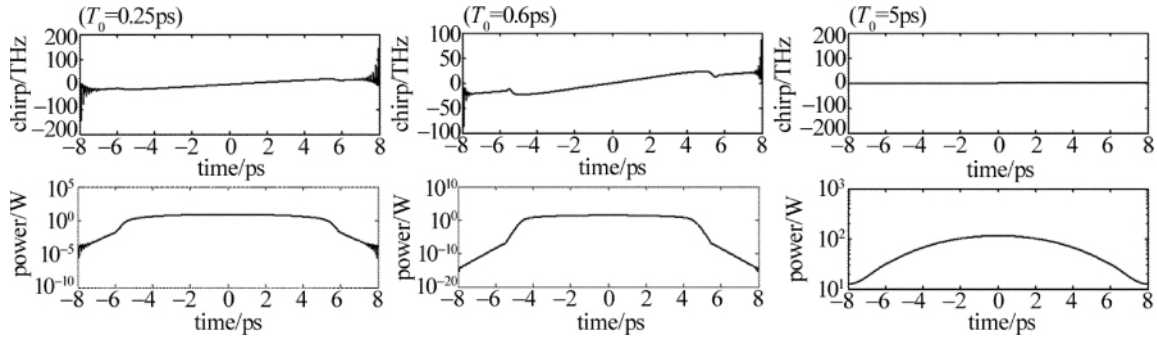


Fig. 2 Evolution results of 0.25ps ,0.6ps and 5ps of initial pulse width ,the upper is chirp and the under is output pulse ( on a logarithmic scale)

冲的自相似演化。因此对于不同宽度的输入脉冲,若其初始  $L_d$  和光纤长度  $z$  相接近时,才可以实现脉冲自相似的演化。

2.2 不同初始脉冲对自相似脉冲演化产生的影响

当输入光纤放大器初始脉冲的能量相同,而初始脉冲形状不同时,虽然最终都能演化形成抛物线型的自相似脉冲,但是演化的进程却不同。为了研究不同初始脉冲对自相似脉冲演化的影响,图3中分别给出了输入脉

冲为高斯脉冲  $\Psi(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right)$ 、双曲正割脉冲  $\Psi(0, T) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}\left(-\frac{T}{T_0}\right)$  和超高斯脉冲  $\Psi(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right]$   $m=2$  在同一传输距离上的传输情况。

由图3可以看出,经过增益光纤中的自相似传输后,3种不同初始脉冲的脉冲波形均能够演化成抛物

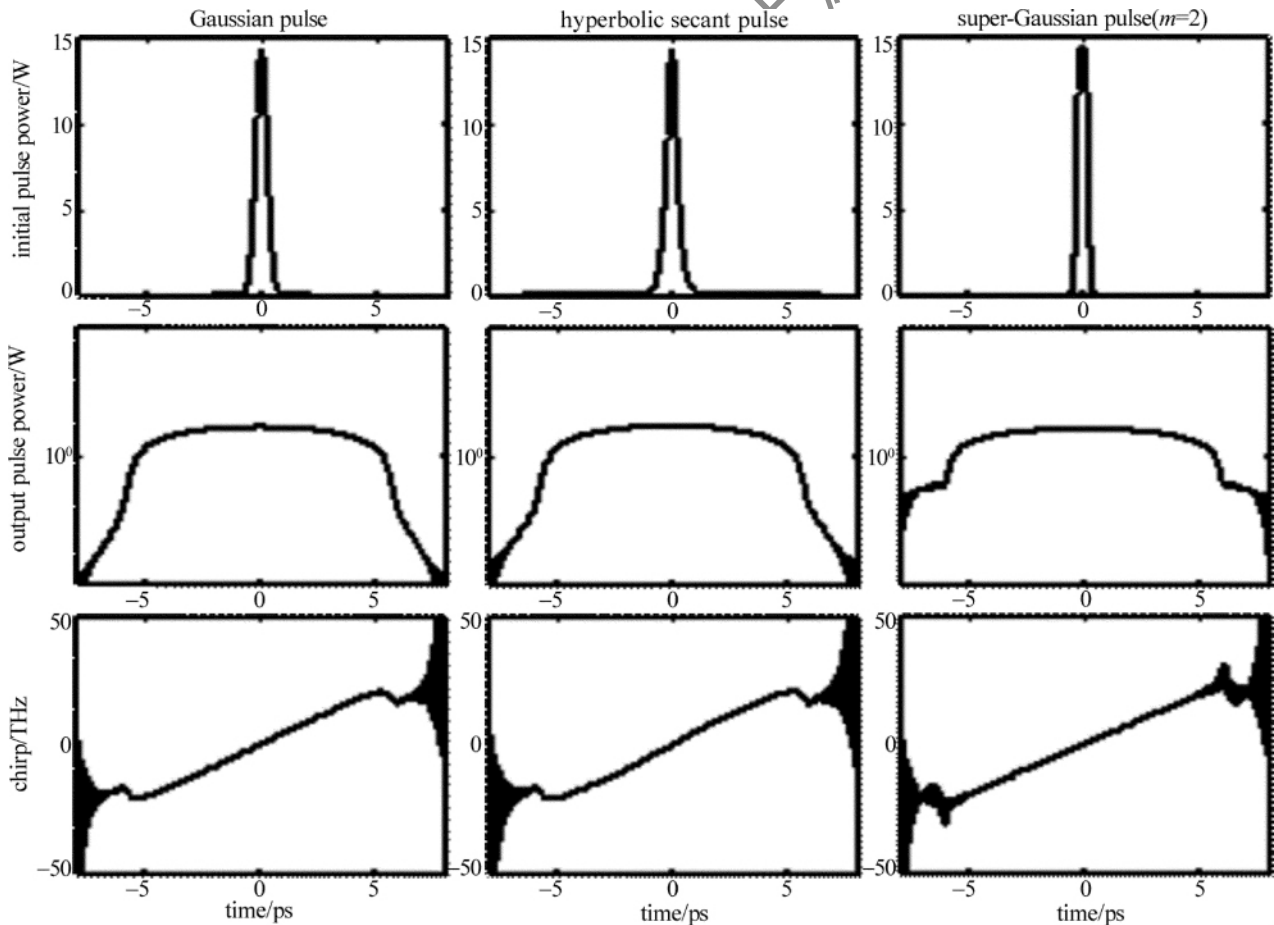


Fig. 3 Initial pulse shape ,output pulse shape and chirp of Gaussian pulse ,hyperbolic secant pulse and super-Gaussian pulse

线形式,并且波形均发生了展宽。因为输入脉冲的形状不同,脉冲向自相似抛物线脉冲演变的速度不同,从图中可以看出,高斯型输入脉冲能较快地向自相似抛物线脉冲演变,其波形、频谱和线性啁啾都与

自相似渐进解析解符合最好,超高斯脉冲和双曲正割脉冲在向自相似抛物线脉冲演变过程中,其脉冲沿的形状由两部分构成的,脉冲中心部分是抛物线,前后沿部分是指数渐进形。

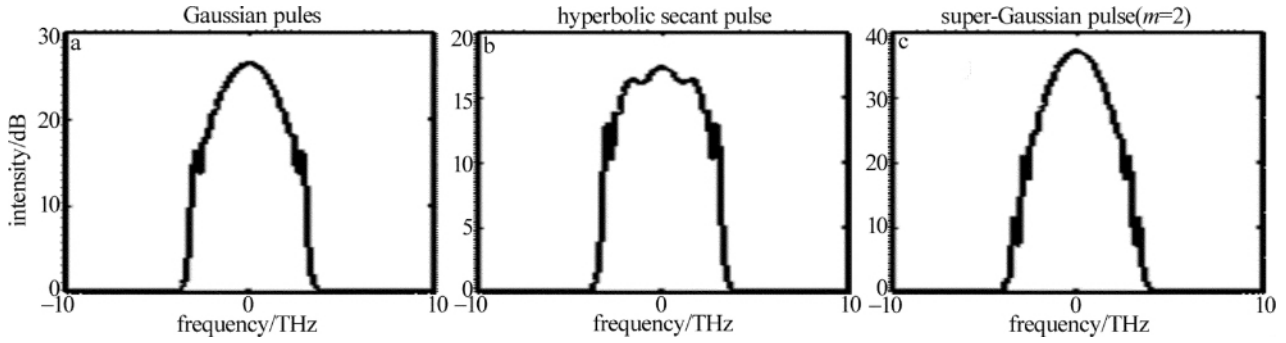


Fig. 4 The spectral characteristics of Gaussian pulse, hyperbolic secant pulse and super-Gaussian pulse

从图 4 这 3 种脉冲的光谱特性上可以看出,传输放大后,光谱两侧产生了振荡现象,其中超高斯最为严重,双曲正割次之,高斯脉冲最小,这是由于脉冲波形对自相位调制效应的影响,产生的频率啁啾不同所致。

### 2.3 增益系数对脉冲自相似演化的影响

假设给定的放大器总增益为 21dB,在不同增益系数( $g$  分别为  $0.6\text{m}^{-1}$ ,  $1.0\text{m}^{-1}$ ,  $2.5\text{m}^{-1}$ ) 情况下,讨论自相似脉冲演化情况。

图 5a 中给出了脉冲的演化结果。结果表明,在相同的总增益条件下,增益系数  $g$  较小时,可以允许脉冲在达到自相似演化后,继续传输较长的距离而不受非线性扭曲的影响,脉冲的演化结果最好,脉冲宽度最大,峰

值功率最小;增益系数  $g$  大时,在相同的传输距离上,大的  $g$  能够获得较高功率的自相似脉冲,脉冲自相似演化和传输的距离将变小,从而加速了脉冲的演化。图 5b 中给出了啁啾的演化结果,自相似脉冲啁啾的大小是随  $g$  线性变化的。当  $g$  增大时,啁啾线性部分斜率明显升高,但是啁啾中间部分线性范围减小,从(7)式对啁啾的定义中可以得出,由于  $g$  的增大使得啁啾增大,即脉冲的瞬时频率变化量增大,而这种变化导致的结果可以从频谱变化图 5c 中清楚地描述出来,在相同的传输距离上,大的  $g$  能够获得宽的频谱,同时谱的平坦性也得到了增强。由以上的分析可以得出,大的  $g$  对产生高功率、宽频谱的自相似脉冲具有较大的优势。

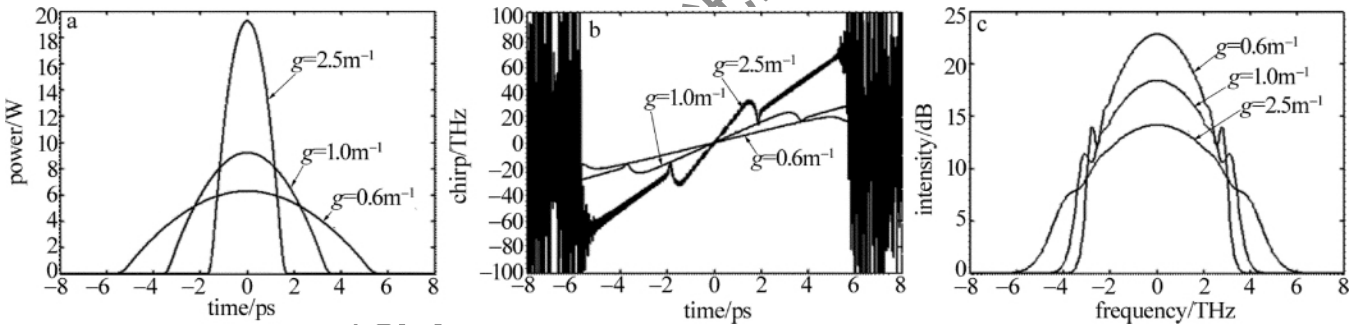


Fig. 5 Waveform (on a linear scale), chirp and spectrum evolution of self-similar pulse with  $g$  changing

### 2.4 增益色散对自相似脉冲产生的影响

若考虑增益色散项对脉冲传输影响时,不考虑损耗,(2)式与非线性薛定谔方程(1)式比较,不同之处是在方程式左边群速度色散项的基础上增加了一项依赖于频率的增益色散项  $igT_2^2$ ,数值计算过程中选取  $T_2 = 0.06\text{ps}$ ,  $\beta_3 = 0$ 。

从图 6 中可以看出,在不考虑增益色散的影响时,前后沿陡峭,衰减速度快,频谱上形成边带振荡。若考虑增益色散的影响,脉冲沿附近强度变化相对缓慢,同时频谱边带振荡现象消失,脉冲的宽度减小,相当于一定的成分被滤掉,强度也随之降低,这说明了方程中的增益色散项  $igT_2^2$  有滤波作用,可以对脉冲进行整形,整形后脉冲两翼收敛,相应地也就延长了从初始输入脉冲到形成渐近抛物型自相似脉冲的演化过程。

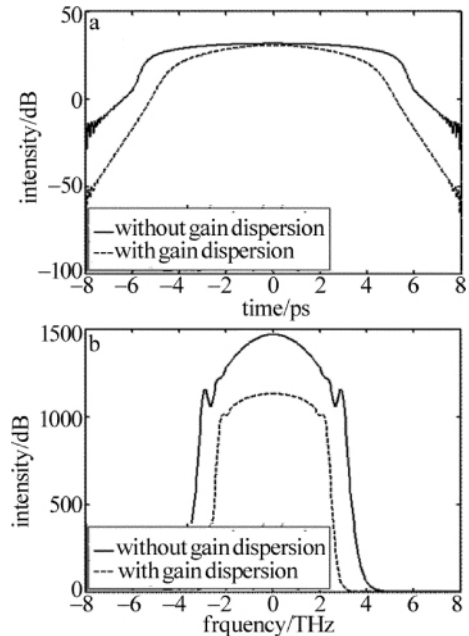


Fig. 6 Output waveform and spectrum with gain dispersion

### 3 结论

数值分析了初始脉冲、脉冲宽度、增益系数、增益色散等参量变化时对其自相似演化产生的影响。研究表明:对于不同初始脉宽的脉冲,只有满足一定关系时,才能在放大器中实现脉冲自相似的演化;初始脉冲形状不同时,最终都能演化形成抛物线型的自相似脉冲,但是演化的进程不同,高斯型输入脉冲能较快地向自相似抛物线脉冲演变;相同的总增益条件下,增益系数  $g$  较小时,可以允许脉冲在达到自相似演化后,继续传输较长的距离而不受非线性效应的影响,脉冲的演化结果最好,而大的  $g$  对产生高功率、宽频谱的自相似脉冲具有较大的优势;增益色散项  $igT_2^2$  可以对脉冲进行滤波整形,延长了从初始输入脉冲到形成渐近抛物型自相似脉冲的演化过程。自相似抛物脉冲很好地解决了在光纤中传输时脉冲能量受限的问题,研究结果对于设计自相似脉冲放大器具有一定的借鉴价值。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Q F, WU L M, LÜ H, *et al.*, Influence of stimulated Raman scattering on parabolic pulse propagation in a dispersion decreasing fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2543-2546( in Chinese).
- [2] HIROOKA T, NAKAZAWA M. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Optics Letters* 2004, 29(5): 498-500.
- [3] HARVEY J D, MÉCHIN D, IM S H. Generation of a 800fs pulse using a self-similar pulse compression technique[C]//Lasers and Electro-optics Society 2005, the 18th Annual Meeting of the IEEE. Sydney, Australia: Lasers and Electro-optics Society 2005: 69-370.
- [4] ZAOUTER Y, PAPADOPOULOS D N, HANNA M. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers[J]. *Optics Letters* 2008, 33(2): 107-109.
- [5] XU Y F, ZHAN Y, ZHENG Y. Analysis of pulse amplification of yttrium-doped fiber amplifiers by means of finite elements[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 201-203( in Chinese).
- [6] LIMPET J, SCHREIBER T, CLAUSNITZER T, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 628-638.
- [7] MALINOWSKI A, PIPER A, PRICE J H V, *et al.* Ultrashort pulse Yb<sup>3+</sup> fiber-based laser and amplifier system producing >25W average power[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2073-2075.
- [8] TANYA M M, ETER D M. Self-similar evolution of self-written waveguides[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 268-270.
- [9] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. New York: Academic Press, 1995: 384.
- [10] JIE F, XU W Ch, LI Sh X, *et al.* Dependence constant coefficient of Ginzburg-Landau equation on the analytic of self-similar solution [J]. *Science in China*, 2007, 37(4): 427-433( in Chinese).
- [11] KRUGLOV V I, PEACOCK A C, HARVEY J D, *et al.* Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *Journal of the Optics Society of America* 2002, B19(3): 461-469.
- [4] YARIY A, LOTSPEICH J F. Coupled-mode analysis of light propagation in optical active crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(2): 273-277.
- [5] SILVER M P, BADOZ J, BRIAT B. Chiral reflection from a naturally optically active medium [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(12): 886-888.
- [6] CHEUNG C K, NAIK P S, BELLING C D, *et al.* Performance of a slow positron beam using a hybrid lens design [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(9): 3132-3137.
- [7] MITSUI T, SAKURAI K. Precise measurement of the refractive index and optirotatory power of a suspension by a delayed optical heterodyne technique[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(13): 2253-2258.
- [8] BARRON L. *Molecular light scattering and optical activity* [M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 386-388.
- [9] COTE D, VITAINI A. Balanced detection for low-noise precision polarimetric measurement of optically active [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(1): 213-220.
- [10] ZHAO P T, LI G H, PENG H D, *et al.* New design of optical activity measurement system[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 504-506( in Chinese).
- [11] FENG W W, SONG L K, CHEN L G. The study of the relation between circular polarized light's refractive rate and wavelength [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 639-644( in Chinese).

(上接第7页)