

文章编号: 0253-2239(2009)11-2994-06

# 高功率脉冲在大模场掺 $\text{Yb}^{3+}$ 光纤中的自相似传输放大特性

许党朋 王建军 林宏奂 邓颖 张锐 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 分析了高功率脉冲在增益光纤中传输放大时非线性薛定谔方程的自相似解, 得出注入光的脉宽和能量满足一定关系时, 优化增益光纤的长度, 才能满足种子光脉冲在增益光纤中的自相似传输放大。揭示了高功率种子光脉冲在光纤中自相似演化的特征参量。此外, 模拟了注入能量为 400 pJ, 脉宽为 200 fs, 波形分别为正割、高斯以及 3 阶超高斯的种子光脉冲在纤芯为 30  $\mu\text{m}$  的大模场增益光纤中的传输放大特性。结果表明 3 种波形的种子光脉冲的时间波形与光谱均演化为抛物形, 时间波形与光谱均发生展宽, 但光谱两侧均发生抖动。自相似传输放大后, 脉冲为线性啁啾, 易于压缩, 对实现全光纤高功率超短脉冲产生系统具有重要意义。

**关键词** 光纤光学; 光纤放大器; 自相似; 掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.2994

## Self-Similar Propagation and Amplification of High-Power Pulses in Large Mode Area Ytterbium Doped Fiber

Xu Dangpeng Wang Jianjun Lin Honghua Deng Ying Zhang Rui Li Mingzhong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The self-similar solutions of the nonlinear Schrödinger equation for the high-power pulses propagated and amplified in the gain fiber are analyzed, which result showing that when the pulse duration and energy satisfied the certain relation, the seed pulse can be propagated and amplified in the gain fiber by optimizing the length of the gain fiber. The key self-similar evolution parameters of the seed pulse in the gain fiber are investigated. When the injection energy is 400 pJ and the pulse duration is 200 fs, the propagation and amplification characteristics of the secant, Gaussian, and super Gaussian seed pulses propagated and amplified in the large mode area gain fiber whose core diameter is 30  $\mu\text{m}$  are numerical simulated. The results show that the temporal and spectral profiles of the three kinds of seed pulses are evolved into parabolic profiles and broadened. However, there are strong oscillations structure on the edges of the spectral profile. Moreover, the output pulse is linearly chirped parabolic pulse, which is easy to compress and has very important significance for realizing the all fiber high power ultra-short pulse generation system.

**Key words** fiber optics; fiber amplifier; self-similar; ytterbium doped fiber

### 1 引 言

近年来, 利用掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤产生和传输高能量、高峰值功率、严格线性啁啾特性的超短激光脉冲是国际上光纤光学领域研究的热点之一。自相似脉冲特性<sup>[1]</sup>很好解决了脉冲在光纤中传输时的强度限制问题, 在高功率短脉冲传输时, 时域脉冲波形演化为

抛物形之后不发生改变, 光谱未发生畸变, 具有抵御光波分裂的能力。所有的入射脉冲能量都可以转化在输出的自相似脉冲中, 并且自相似脉冲具有严格的线性啁啾, 可以进行高效的脉冲压缩, 以获得高功率的超短脉冲。所以, 光纤中脉冲的自相似特性, 对于高功率超短脉冲研究领域具有非常重要的应用前

收稿日期: 2008-10-29; 收到修改稿日期: 2008-12-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA4303)资助课题。

作者简介: 许党朋(1982—)男, 硕士, 主要从事高功率光纤激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: xudangpeng@yahoo.com.cn

景。2000 年起 M. E. Fermann 与 V. I. Kruglov 等<sup>[2~4]</sup>就对脉冲在光纤中的自相似传输与放大理论进行了研究,在此后的几年内,众多研究者分别研究了光波导<sup>[5]</sup>、增益递增与递减<sup>[6]</sup>、高阶非线性效应<sup>[7]</sup>以及色散系数递增或递减<sup>[8]</sup>对脉冲在光纤中自相似传输放大的影响。2004 年 F. O. Ilday 等<sup>[10]</sup>在理论和实验上研究了超短、抛物脉冲在光纤激光器谐振腔中的自相似传输,实质上这是一种新型脉冲整形锁模光纤激光器。2005 年 David Méchin 等<sup>[11]</sup>首次在实验上证明了脉冲在色散减弱的光纤放大器中自相似传输放大。脉冲在光纤中的这种自相似特性不仅在光纤放大器中得到了广泛的研究,而且也应用于高峰值功率,超短脉冲光纤激光器的研究中<sup>[12]</sup>。2007 年 D. N. Papadopoulos 等<sup>[13]</sup>实验得出了脉宽为 63 fs,脉冲能量为 290 nJ,峰值功率为 4.1 MW 的保偏掺镱光纤自相似抛物脉冲放大系统。国内关于这方面的研究还较少,2006 年冯杰等<sup>[14]</sup>与 2007 年涂成厚等<sup>[15]</sup>分别总结了国外关于脉冲在光纤中自相似传输放大的研究情况。直到 2007 年雷霆等<sup>[16]</sup>才对高能量脉冲的自相似传输放大做了初步的数值模拟分析。

这里主要研究大模场光纤中高能量脉冲的自相似传输放大特性。理论研究了同时含有色散、自相位调制与增益项时,非线性薛定谔方程自相似解的特性;数值分析了一定能量条件下,不同波形的种子光脉冲,在大模场掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤中的传输放大特性。

## 2 理论分析

不考虑增益饱和效应并且入射脉冲的谱宽小于光纤放大器的增益谱宽时,光纤放大器中脉冲的演化过程可以用具有增益的非线性薛定谔方程(NLSE)来描述,并且假设光纤中的色散系数、非线性系数都是常数,即不随光纤的传播距离改变而改变。考虑群速度色散与自相位调制效应时,NLSE 方程可以写为

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

式中  $\psi(z, T)$  为脉冲在光纤放大器中的慢变振幅,  $\beta_2$  为群速度色散参数,  $\gamma$  为非线性参数,  $g$  为沿光纤分布的小信号增益系数。光纤中不同位置处脉冲能量演化满足以下关系

$$U(z) = U_{in} \exp(gz), \quad (2)$$

式中  $U_{in}$  为注入种子光脉冲的初始能量。

为了求解(1)式的自相似解,将脉冲的光场按照

振幅与相位展开写成

$$\psi(z, T) = A(z, T) \exp[i\varphi(z, T)]. \quad (3)$$

### 2.1 自相似脉冲的振幅

通过对(1)式的求解,可将脉冲的振幅项表示为

$$\begin{cases} A(z, T) = A_0 \exp\left(\frac{g}{3}z\right) \left[1 - \frac{T^2}{T_p^2(z)}\right]^{1/2}, \\ \quad \quad \quad |T| \leq T_p(z); \\ A(z, T) = 0, \quad |T| > T_p(z). \end{cases} \quad (4)$$

式中  $T_p(z)$  定义为有效脉冲宽度,表示为

$$T_p(z) = \frac{6(\gamma\beta_2/2)^{1/2} A_0}{g} \exp\left(\frac{g}{3}z\right). \quad (5)$$

从(4)式可以看出,脉冲轮廓为抛物型的,其有效宽度为  $T_p(z)$ 。 $A_0$  可表示为

$$A_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{gU_{in}}{\sqrt{\gamma\beta_2/2}} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

### 2.2 自相似脉冲相位

自相似脉冲的啁啾量的变化规律<sup>[4]</sup>为

$$C(z) = -\frac{g}{6\beta_2}. \quad (7)$$

在假设增益和群速度色散值沿着光纤分布为常数的情况下,实际上啁啾量的变化与增益介质中的传输距离  $z$  无关。

自相似脉冲的相位表达式<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \varphi(z, T) = \varphi_0 + \frac{3\gamma A_0^2}{2g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) - \frac{g}{6\beta_2} T^2, \\ |T| \leq T_p(z), \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\varphi_0$  为常量,对(8)式求时间微分,可以看出相位产生了常数的线性啁啾

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial\varphi(z, T)}{\partial T} = g(3\beta_2)^{-1} T, \quad |T| \leq T_p(z). \quad (9)$$

从(3)式给出了自相似渐进脉冲解的形式,通过以上的推导,可以看出其振幅项由(4)式~(6)式决定,其相位项由(8)式决定。脉冲渐进尺度与脉冲幅度和宽度的指数增长有关;自相似脉冲的特性仅仅取决于其初始能量,和其初始脉冲的形状、宽度无关;线性啁啾量与脉冲在光纤中传输的位置  $z$  无关,但是随着时域脉冲的加宽,脉冲的前沿和后沿分别产生红移和蓝移,与此同时,脉冲的光谱宽度也变宽,其频谱可以通过傅里叶变换表示为

$$\begin{aligned} |\psi(z, \omega)|^2 = \frac{3|\beta_2|^2 A_0^2}{g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) \left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2(z)}\right], \\ \quad \quad \quad |\omega| \leq \omega_p(z); \\ |\psi(z, \omega)|^2 = 0, \quad |\omega| > \omega_p(z). \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\omega_p(z)$  为自相似脉冲的有效频谱宽度,可表

示为

$$\omega_p(z) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta_2}} A_0 \exp\left(\frac{g}{3} z\right). \quad (11)$$

### 2.3 初始注入能量、脉冲宽度与小信号增益系数的关系

脉冲在增益光纤中的自相似演化只与脉冲的初始能量和脉宽有关。为了得出初始注入能量、脉冲宽度与小信号增益系数的关系,令  $z=0$ , (5) 式可以表示为

$$T_p(0) = \frac{6(\gamma\beta_2/2)^{\frac{1}{2}} A_0}{g}, \quad (12)$$

将(6)式代入(12)式,化简得到

$$U_{in} = \frac{2T_p^3(0)g^2}{27\gamma\beta_2}. \quad (13)$$

中心波长为 1053 nm 时,色散系数  $\beta_2 = 0.018 \text{ ps}^2/\text{m}$ ; 由于非线性系数  $\gamma$  与中心波长、非线性折射率以及光纤纤芯的有效面积有关,对于光纤纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$  的大模场掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤,  $\gamma = 1.87 \times 10^{-4}/(\text{W} \cdot \text{m})$ 。图 1 表示注入脉冲宽度为 200 fs 时,光纤放大器中小信号增益系数与注入脉冲能量之间的关系,可以看出,随着光纤放大器中小

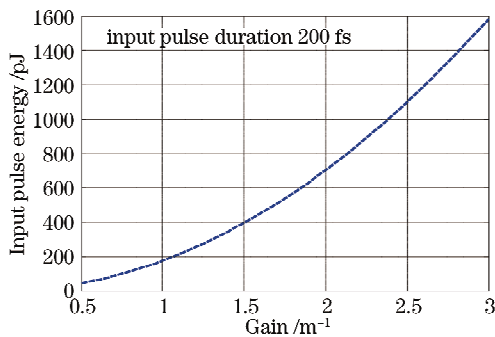


图 1 注入脉冲能量与增益的关系

Fig. 1 Input pulse energy as a function of the amplifier gain

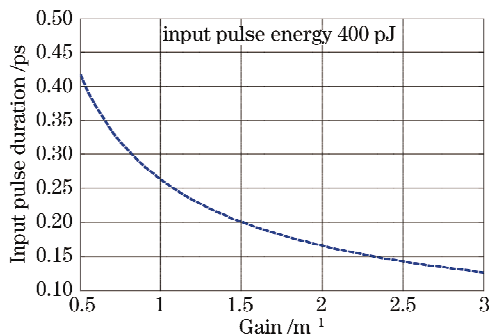


图 2 注入脉冲宽度与增益的关系

Fig. 2 Input pulse duration as a function of the amplifier gain

信号增益系数的增大,注入脉冲的能量也越大才能满足脉冲在光纤中的自相似传输放大。图 2 表示注入脉冲能量为 400 pJ 时,注入脉冲宽度与小信号增益系数之间的关系,可以看出,注入脉冲宽度随着增益的增大而减小,因此当光纤放大器中小信号增益系数较大时,注入脉冲宽度较小的脉冲才能在光纤中自相似传输放大。

### 2.4 增益光纤的特征长度

脉冲在增益光纤中传输到一定长度之后才能演化为自相似抛物脉冲,定义此长度为增益光纤的特征长度  $L_c$ ,可表示为

$$L_c = \frac{3}{2g} \ln\left(\frac{Ng}{6\gamma A_0^2}\right), \quad (14)$$

当光纤长度  $z \geq L_c$  时,脉冲在光纤放大器中的演化将会接近抛物形。 $N$  是计算中的特征参量,其意义在于决定了特征光纤长度,即表示当光纤放大器中总的增益满足能量平衡时,脉冲将会演化成抛物形,从而趋于稳定。图 3 表示注入脉冲宽度为 200 fs,脉冲能量为 400 pJ 情况下光纤放大器中增益光纤的特征长度与小信号增益系数之间的关系,可以看出,随着小信号系数的增大,增益光纤的长度减小。

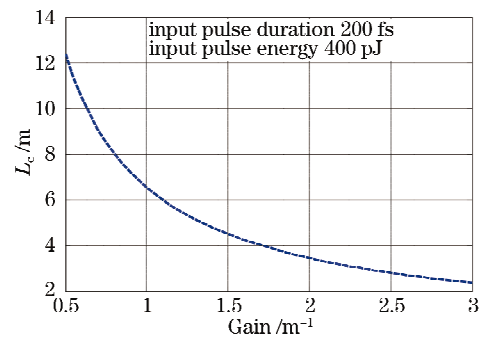


图 3 增益光纤长度随增益的变化关系

Fig. 3 The fiber length of the amplifier as a function of the amplifier gain

通过以上分析可以得到:只有当注入的脉冲宽度、脉冲能量、增益光纤长度与小信号增益系数之间的关系满足一定关系时,所注入的脉冲才能在光纤中自相似传输放大,在此过程中,对于任意注入种子脉冲形状,经过自相似传输放大后,时间波形和光谱都表现为抛物形。

## 3 脉冲自相似传输放大的模拟与分析

采用分步傅里叶方法,对具有增益、群速度色散和自相位调制项的非线性薛定谔方程进行数值分析,对于芯径为 30  $\mu\text{m}$  的大模场掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤,种子

光脉冲中心波长为 1053 nm 时,其相应的色散系数和非线性系数为  $\beta_2 = 0.018 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,  $\gamma = 1.87 \times 10^{-4}/(\text{W} \cdot \text{m})$ 。若采用两端抽运方案,则可假定增益沿光纤均匀分布,光纤长度为 4.5 m 时,小信号增益系数  $g = 1.5 \text{ m}^{-1}$ 。设注入脉冲的半高全宽  $T_0 = 200 \text{ fs}$ ,中心波长为 1053 nm,脉冲能量为 400 pJ。分

别考虑了脉冲形状为高斯、双曲正割以及 3 阶超高斯型的脉冲在光纤中自相似传输放大的情况。

### 3.1 注入种子脉冲

图 4(a)~图 4(c)分别表示注入高斯型、双曲正割和 3 阶超高斯种子脉冲时,脉冲宽度为 200 fs,脉冲能量为 400 pJ 的情况下脉冲的时间波形。

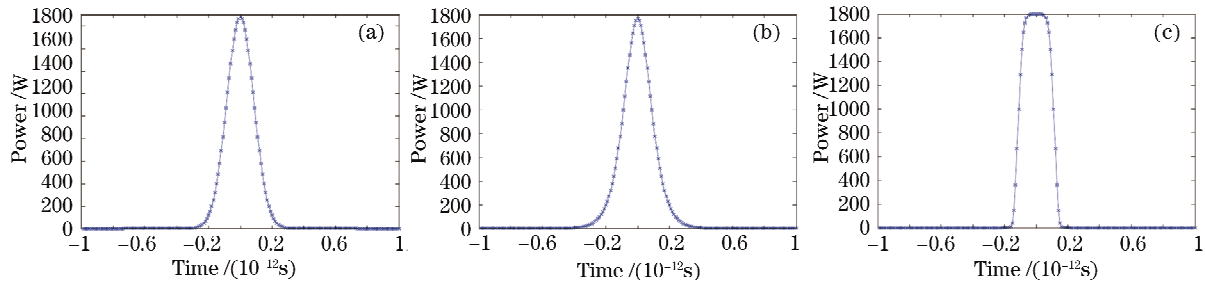


图 4 注入脉冲波形图。(a)高斯脉冲;(b)正割脉冲;(c)3 阶超高斯脉冲

Fig. 4 Input pulse shape. (a)Gaussian pulse;(b)hyperbolic-secant pulse;(c)super-Gaussian pulse

### 3.2 传输放大后脉冲的时间波形与光谱特性

图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)分别表示小信号增益为  $1.5 \text{ m}^{-1}$  时,经过 4.5 m 的大模场增益光纤后,注入高斯型、双曲正割以及 3 阶超高斯种子脉冲在光纤中自相似传输放大后的脉冲波形与啁啾特性。可见,注入

种子脉冲为高斯型、双曲正割和 3 阶超高斯时,经过在增益光纤中的自相似传输放大后,脉冲的时间波形皆呈现出抛物形,而且均发生展宽,时间波形的半高全宽从放大前的 200 fs 展宽到 3 ps 左右,此外,高斯型种子脉冲经过光纤中的传输放大后,输出脉冲呈线性啁啾。

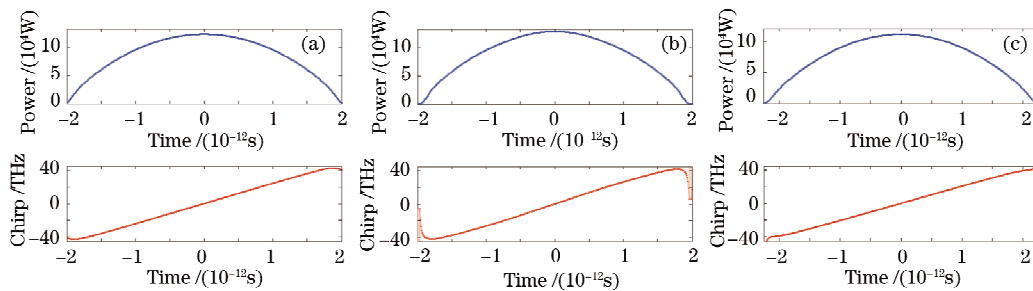


图 5 三种不同脉冲放大后时间波形与啁啾特性。(a)高斯脉冲;(b)正割脉冲;(c)3 阶超高斯脉冲

Fig. 5 The three different amplified pulse shape and chirp characteristic. (a)Gaussian pulse;(b)hyperbolic-secant pulse;(c)super-Gaussian pulse

图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别表示三种脉冲自相传输放大后的光谱特性。可以看出,光谱从放大前的 20 nm 左右,展宽为 60 nm 左右,与此同时,传输放

大后,光谱两侧产生振荡现象,超高斯最严重,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。

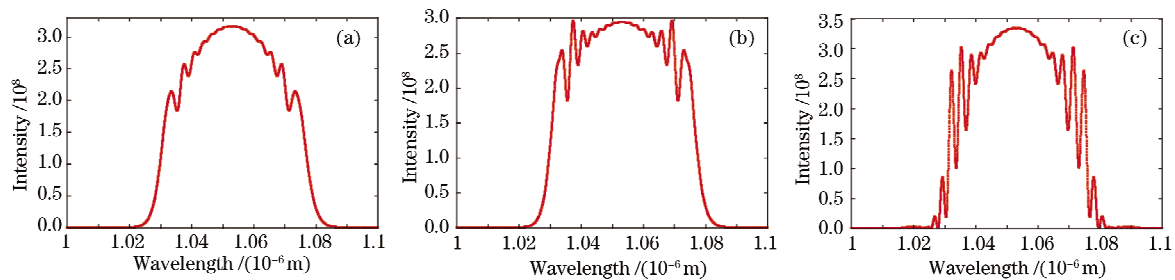


图 6 三种不同脉冲波形放大后光谱特性。(a)高斯脉冲;(b)正割脉冲;(c)3 阶超高斯脉冲

Fig. 6 The spectral characteristics of the three different amplified pulse. (a)Gaussian pulse;(b)hyperbolic-secant pulse;(c)super-Gaussian pulse

### 3.3 脉冲在增益光纤中的演化过程分析

图 7(a)、图 7(b)和图 7(c)分别表示高斯脉冲、双曲正割脉冲以及超高斯脉冲在大模场增益光纤中自相似传输放大时的脉冲波形展宽过程。图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)分别表示高斯脉冲、双曲正割脉冲以及超高斯脉冲在大模场增益光纤中自相似传输放大时的光谱展宽过程。可以看出,脉冲能量相同,脉

冲时间宽度相同,不同脉冲波形的脉冲在大模场光纤中自相似传输放大时,时间波形展宽基本相似,而光谱的展宽则有所不同。由于时间波形的差别,自相位调制效应所致的频率啁啾不同造成光谱在展宽过程中产生振荡结构,其中超高斯脉冲最为严重、双曲正割脉冲次之,高斯脉冲的振荡结构最轻。

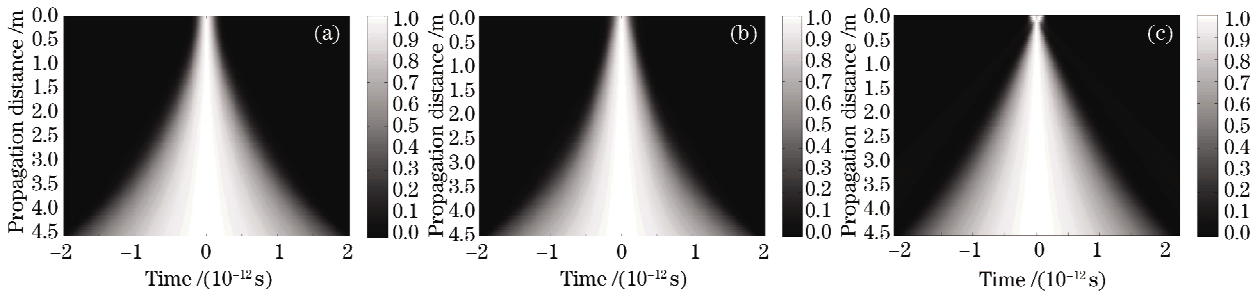


图 7 脉冲波形演化过程。(a)高斯脉冲;(b)正割脉冲;(c)3 阶超高斯脉冲

Fig. 7 The evolution of the pulse shape. (a)Gaussian pulse;(b)hyperbolic-secant pulse;(c) super-Gaussian pulse

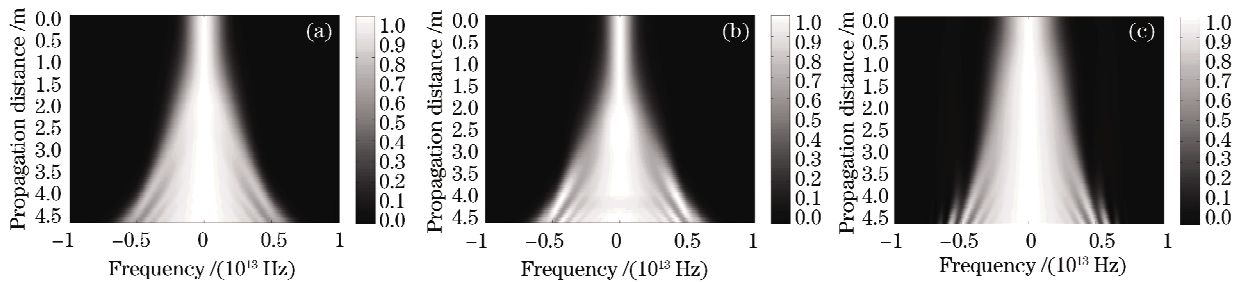


图 8 脉冲光谱的演化过程。(a)高斯脉冲;(b)正割脉冲;(c)3 阶超高斯脉冲

Fig. 8 The evolution of the spectral. (a)Gaussian pulse;(b)hyperbolic-secant pulse;(c) super-Gaussian pulse

## 4 结 论

高功率脉冲光纤放大器中,非线性、群速度色散等效应的影 响,使得高 峰值功率的短脉冲在光纤放大器传输放大后,时间波形和光谱产生严重畸变,不能满足实际的需求。因此当光纤放大器的设计满足一定条件时,自相位调制、群速的色散与增益相互作用使得高功率短脉冲种子脉冲在光纤中自相似传输放大,放大后脉冲的时间波形与光谱皆呈现抛物形。理论分析了在自相位调制、群速度色散和增益共同作用时的非线性薛定谔方程,得出了该方程的时域与频域的自相似解,结果表明传输放大后,脉冲的时域与频域形状都是抛物形。分析了影响脉冲在增益光纤中传输放大的特征量:注入脉宽、注入脉冲能量和增益光纤的小信号增益系数,并且分析了三者之间的关系。数值分析了相同条件下注入脉冲波形分别为高斯、双曲正割与 3 阶超高斯时,高 峰值功率、

短脉冲光在大模场增益光纤中的传输放大演化过程与结果。结果显示,传输放大后,脉冲的时间波形与光谱皆为抛物形,但是光谱两侧都会出现震荡结构,且 3 阶超高斯最严重,出现多个尖峰,双曲正割次之,高斯脉冲光谱畸变最小。此外,传输放大后脉冲的啁啾量为线性,这有利于脉冲的进一步压缩,从而易实现高 峰值功率的超短脉冲。对大模场中实现自相似脉冲传输放大的研究也为进一步提高更短脉冲的峰值功率和克服高功率短脉冲放大过程中时间波形与光谱的畸变奠定了基础。

### 参 考 文 献

- 1 M. J. Ablowitz, H. Segur. Solitons and the inverse scattering transform[C]. Studies in Applied Mathematics, Philadelphia, 1981
- 2 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
- 3 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. M. Dudley *et al.*. Self-similar

- propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(24): 1753~1755
- 4 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(3): 461~469
- 5 Sergey A. Ponomarenko, Govind P. Agrawal. Optical similaritons in nonlinear waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1659~1661
- 6 Vladimir I. Kruglov, John D. Harvey. Asymptotically exact parabolic solutions of the generalized nonlinear Schrödinger equation with varying parameters [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(12): 2541~2550
- 7 Vladimir I. Kruglov, David Méchin, John D. Harvey. High compression of similariton pulses under the influence of higher-order effects [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(4): 833~838
- 8 Toshihiko Hirooka, Masataka Nakazawa. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 498~500
- 9 David Méchin, Sung-Hoon Im, Vladimir I. Kruglov *et al.*. Experimental demonstration of similariton pulse compression in a comblike dispersion-decreasing fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2106~2108
- 10 F. O. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902-1~213902-4
- 11 D. N. Papadopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna *et al.*. Generation of 83 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2520~2522
- 12 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): 9346~9351
- 13 A. Ruehl, O. Prochnow, D. Wandt *et al.*. Dynamics of parabolic pulses in an ultrafast fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2734~2736
- 14 Feng Jie, Xu Wencheng, Zhang Qiaofen *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
- 15 Tu Chenghou, Lei Ting, Zhu Hui *et al.*. Development progress of high energy and wave-breaking-free ultra-short pulse optical source [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(4): 304~307
- 涂成厚, 雷霆, 朱辉等. 高能量、无波分裂的超短脉冲光源的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(4): 304~307
- 16 Lei Ting, Tu Chenghou, Li Enbang *et al.*. The theoretical study and numerical simulation of self-similar transmission of high energy wave-breaking free ultra-short pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2769~2775
- 雷霆, 涂成厚, 李恩邦等. 高能量无波分裂超短脉冲自相似传输的理论研究和数值模拟 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2769~2775