

文章编号: 0258-7025(2007)11-1512-05

正常色散光纤放大器中超短脉冲的 自相似演化条件

涂成厚, 雷 霆, 李勇男, 郭文刚, 朱 辉, 魏 岱, 吕福云

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要 在正常色散条件下,超短光脉冲在光纤放大器中可以演化成具有线性啁啾的自相似抛物脉冲,其演化结果可影响脉冲的压缩质量。采用分步傅里叶方法数值研究了正常色散光纤放大器中,初始输入脉冲宽度、能量、光纤增益和色散系数对超短脉冲自相似演化结果的影响。发现色散长度是脉冲能否实现自相似演化的关键因素。当色散长度与光纤长度相近(几倍)时,脉冲可以实现自相似演化;两者相差越大,脉冲的自相似演化程度越差。增加初始脉冲能量可以加速脉冲的自相似演化,缩短自相似演化的距离。放大器总增益一定时,增益系数越大,脉冲受非线性扭曲的影响越大,使脉冲的自相似演化结果越差;增益系数为 0.95 m^{-1} 时放大器可获得的总增益比 3.8 m^{-1} 时大3.3 dB。

关键词 激光技术;自相似演化;数值模拟;超短脉冲;光纤放大器;色散长度

中图分类号 TN 241;O 437 **文献标识码** A

Ultra-Short Pulses Self-Similar Evolution Conditions in Normal Dispersive Fiber Amplifiers

TU Cheng-hou, LEI Ting, LI Yong-nan, GUO Wen-gang,
ZHU Hui, WEI Dai, LÜ Fu-yun

(*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract Ultrashort pulses can evolve into self-similar parabolic pulses with a linear chirp in optical fiber amplifiers with normal group velocity dispersion, and the evolution result can affect the consequent pulse compression. The influences of the initial pulse width and energy as well as fiber dispersion and gain coefficient on the pulse self-similar evolution were numerically studied by split-step Fourier method, and the results reveal that dispersion length is the key factor determining whether the pulse can evolve self-similarly or not. When the dispersion length is close to fiber length (just severalfold), the initial pulse can evolve into a parabolic pulse; the larger the difference between the dispersion length and fiber length, the worse the self-similar evolution. Increasing the initial pulse energy can accelerate the pulse self-similar evolution, and therefore decrease the distance for self-similar evolution. Under a given amplifier total gain the higher the gain coefficient is, for the effect of nonlinear distortion, the worse the self-similar evolution is. When the gain coefficient is 0.95 m^{-1} , the total gain of the amplifier is 3.3 dB larger than that when the gain coefficient is 3.8 m^{-1} .

Key words laser technique; self-similar evolution; numerical simulation; ultra-short pulse; fiber amplifier; dispersion length

收稿日期: 2007-02-08; **收到修改稿日期**: 2007-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(60677013)和高等学校博士学科点专项科研基金(20060055021)资助项目。

作者简介: 涂成厚(1976—),男,河南人,博士研究生,主要从事超短脉冲光纤激光器、放大器以及非线性的研究。

E-mail: tuchenghou@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 吕福云(1945—),女,河北人,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器和放大器、光子学及现代光通信的研究。

E-mail: lufy@nankai.edu.cn

1 引言

避免波分裂获得高能量超短光脉冲,一直是倍受关注的研究课题^[1~3]。M. E. Fermann 等^[4]指出线性啁啾的抛物脉冲是有常数增益的非线性薛定谔方程(NLSE)的渐近解。在光纤放大器中,飞秒脉冲在正色散和增益以及非线性的共同作用下被同步展宽和放大,并逐渐演化成具有线性啁啾的抛物脉冲。它在放大过程中维持形状不变,并可以实现较长距离的无波分裂传输,因此又被称为自相似抛物脉冲^[4]。这很好地解决了光脉冲在放大传输时能量受限的问题。借助脉冲压缩器可以补偿自相似抛物脉冲的线性啁啾,从而获得能量极大、近转换极限的飞秒脉冲^[5~9]。

为了使脉冲在正色散光纤放大器中得到充分演化形成自相似抛物脉冲,需要确定脉冲的自相似演化条件,这是设计自相似脉冲放大器的前提。V. I. Kruglov 等^[5]给出了实现脉冲自相似演化的特征距离公式,但该公式只对亚皮秒脉冲有效。对于皮秒脉冲,在公式给出的演化长度内根本不可能达到自相似演化,因此需要对该公式的适用范围进行限定。本文研究了放大器各参数对脉冲自相似演化的影响,明确了 V. I. Kruglov 特征距离公式的适用范围和任意形状初始脉冲的自相似演化条件。研究结果可为自相似脉冲放大器的设计提供理论指导。

2 光纤放大器中自相似抛物脉冲的形成及特点

在正常色散光纤放大器中,输入脉冲的自相似演化可用有增益的非线性薛定谔方程来描述^[4~6]

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

式中 z 为传输距离, ψ 为脉冲的慢变包络, $T = t - z/v_g$ 为相对延时系时间, g 为光纤增益系数, β_2 为二阶色散系数, γ 为非线性系数。

在传输演化距离足够时可以得到(1)式的一个渐近自相似抛物脉冲解^[4,5]

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

在 $|T| > T_p(z)$ 时, $\psi(z, T) = 0$ 。 $A_0 = (gU_{in}/\sqrt{\gamma\beta_2/2})^{1/3}/2$, U_{in} 为初始输入脉冲的能量。有效脉冲宽度 $T_p(z)$ 和相位 ϕ 分别为

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

$$\phi(z, T) = \varphi_0 + \frac{3\gamma A_0^2}{2g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) - \frac{g}{6\beta_2} T^2, \quad (4)$$

由(4)式可知,自相似抛物脉冲具有严格的线性啁啾。另外,自相似抛物脉冲也具有抛物形状的频谱^[5]。图 1(a)给出了(2),(3)式的自相似抛物脉冲形状随传输距离的演化示意图。借助图 1(a)的结果和图 1(b)所示的严格线性啁啾,同时根据其是否具有典型的抛物型频谱来共同判断光脉冲是否演化成自相似抛物脉冲。

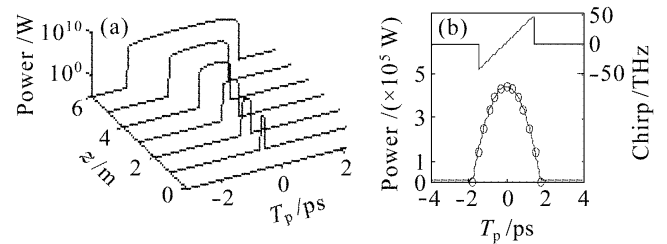


图 1 自相似抛物脉冲的特点

(a) 宽度、形状随传输距离的变化;

(b) 脉冲形状及抛物拟合(圆圈)以及线性啁啾情况

Fig. 1 Characteristics of self-similar pulse

(a) pulse width and shape evolution with distance; (b) pulse shape and its parabolic fit (circles), linear chirp of self-similar pulse

定义入射脉冲在光纤放大器中演化成自相似抛物型脉冲的最短距离为特征距离^[5]

$$z_c(N) = \frac{3}{2g} \ln\left(\frac{Ng}{6|\gamma|A_0^2}\right), \quad (5)$$

式中 N 为文献[5]定义的表征脉冲自相似演化发生的一个参量。V. I. Kruglov 等根据模拟结果指出当 $N > 100$ 时,在由(5)式计算得到的特征距离内脉冲可以较好地演化成自相似抛物脉冲。

3 输入脉冲的自相似演化条件

当传输距离足够时,由(2)式可知,脉冲的自相似演化特征仅与脉冲的初始能量和光纤参数有关,而与脉冲的初始形状、宽度无关。但在实际的放大器中,脉冲演化距离是有限的,必然受上述因素的影响。为了简化计算且不失一般性,将高斯脉冲 $\psi(0, T) = \sqrt{P_0} \exp[-(T/T_0)^2/2]$ 作为输入脉冲, P_0 为峰值功率, T_0 为脉冲强度的 $1/e$ 宽度。采用分步傅里叶法^[10]数值研究各参数对脉冲自相似演化的影响,分析得到了脉冲自相似演化的条件。所用增益光纤的相关参数为:增益系数 $g = 1.9 \text{ m}^{-1}$,色散系数 $\beta_2 = 25 \times 10^{-3} \text{ ps}^2/\text{m}$,非线性系数 $\gamma =$

$5.8 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。初始脉冲宽度 T_0 分别为 0.2 ps, 0.8 ps, 10 ps。

3.1 输入脉冲宽度对脉冲自相似演化的影响

假设脉冲的初始能量均为 $U_{in} = 10 \text{ pJ}$, 若取 $N = 150$, 根据(5)式计算得到脉冲自相似演化的特征距离为 $z \geq 4 \text{ m}$ 。设定放大器增益光纤长度为 5 m, 即放大器的总增益为 41 dB。图 2 给出了三种不同宽度初始脉冲的演化结果, 图中上面为演化脉冲的啾啾, 下面为其形状。

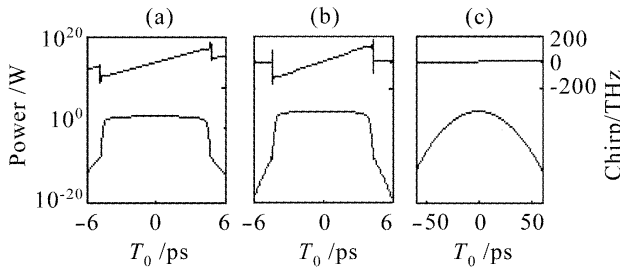


图 2 初始脉冲能量为 10 pJ, 脉宽为 0.2 ps(a), 0.8 ps(b) 和 10 ps(c) 时脉冲的演化结果

Fig. 2 With $U_{in} = 10 \text{ pJ}$, the evolution results of 0.2 ps (a), 0.8 ps (b) and 10 ps (c) pulse

由图 2(a), (b) 可以看出, 脉冲宽度 T_0 为 0.2 ps 和 0.8 ps 的初始脉冲的演化均接近了自相似抛物脉冲, 功率 10^{-10} W 以上的脉冲部分具有线性啾啾。由于传输距离有限, 在功率 10^{-10} W 以下, 脉冲出现了边翼, 表明演化是不完全的。但这并不影响其自相似的特征, 随着传输距离的增加, 脉冲边翼会逐渐消失^[5]; 图 2(c) 表明宽度 T_0 为 10 ps 的初始脉冲并没有演化成自相似抛物脉冲, 因此(5)式对 10 ps (或者更宽) 的脉冲无效。延长演化距离到 10 m, 脉冲几乎不展宽 (仍为 10 ps), 其峰值功率增加到约 $1.1 \times 10^8 \text{ W}$ 。继续增大演化距离, 高功率的脉冲将经受更严重的非线性, 导致脉冲形状的扭曲及分裂。可见, 不能仅仅通过增加增益光纤长度来促成脉冲的自相似演化。

为了解释上述结果, 考虑三个不同宽度脉冲的色散长度 $L_D (L_D = T_0^2 / |\beta_2|)$ 和非线性长度 $L_{NL} (L_{NL} = 1 / \gamma P_0)$ 。计算得到三种脉冲对应的初始 L_D 和 L_{NL} 分别为 1.6 m, 25.6 m, 4000 m 和 5.1 m, 20.4 m, 254.6 m。注意在演化过程中脉冲的能量和宽度随着演化距离 z 的增加而变化, L_D 和 L_{NL} 也随之作相应的改变。对宽度为 0.2 ps 和 0.8 ps 的初始脉冲, 图 3 给出了其 L_D 和 L_{NL} 的动态变化情况。

由图 3 可见, 在演化距离 3 m 以内色散长度 L_D 缓慢增加。演化距离超过 3 m 后, 随着 z 的增加, L_D

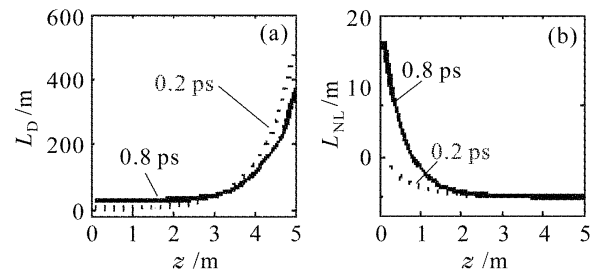


图 3 不同宽度初始脉冲的 L_D (a) 和 L_{NL} (b) 随演化距离的动态变化

Fig. 3 Dynamic change of L_D (a) and L_{NL} (b) with evolution distance for pulses with different widths

急剧增大; 在演化距离 2.5 m 以内, 非线性长度 L_{NL} 急剧变小。当演化距离大于 2.5 m 以后, L_{NL} 逐渐趋于一个很小值。对于 0.2 ps 和 0.8 ps 的脉冲来说, 在初期的演化过程中, 由于 L_D 与增益光纤长度相近 (几米), 脉冲经历足够的色散作用, 因此在非线性和色散及增益的共同作用下很快形成抛物脉冲。当演化成自相似抛物脉冲后, 随着 L_{NL} 迅速变小和 L_D 急剧增加, 脉冲主要受非线性影响而保持抛物形状不变。对于脉宽 10 ps 的初始脉冲, 由于 L_D 与光纤长度相差较大 (大 800 倍), 在几米的演化距离内脉冲经受的色散作用非常弱, 因此在给定的较短演化距离内, 脉宽几乎不变化; 但 L_{NL} 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的影响而维持其高斯脉冲形状不变^[11], 这阻止了脉冲的自相似演化。

由此可知, 对给定的增益光纤, 相同能量、不同宽度的输入脉冲具有不同的初始 L_D 。 L_D 和光纤长度 z 相近时, 可以实现脉冲的自相似演化。否则, 自相似演化不能实现。 L_D 成为输入脉冲在放大器中能否完成自相似演化的最关键参量。

3.2 脉冲能量对自相似演化的影响

从(5)式可以看出, 提高脉冲能量可以使脉冲的自相似演化距离变短, 即促进脉冲的自相似演化过程。假设 $T_0 = 0.8 \text{ ps}$, 设定不同的脉冲能量, 通过数值模拟确定脉冲实现自相似演化所需要的传输距离 (Z_c) 以及演化后脉冲的有效宽度 T_p , 如图 4(a) 所示, 其中横坐标为对数坐标。这里可以认为功率在 10^{-10} W 以上, 脉冲形状演化成方形即实现了自相似演化。将 $T_0 = 10 \text{ ps}$ 的脉冲初始能量提高到 12 mJ 和 120 mJ, 研究 $z = 5 \text{ m}$ 的演化情况, 所得结果如图 4(b) 所示。

从图 4(a) 可以看出, 对 0.8 ps 的脉冲, 当初始能量增加时, 在对数坐标下其演化距离接近线性递

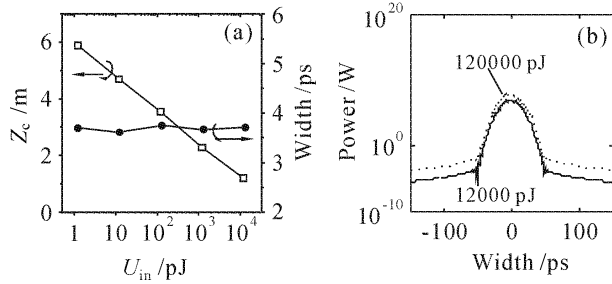


图 4

(a) 0.8 ps 脉冲自相似演化距离与脉冲能量的关系；
 (b) $U_{in} = 12$ mJ 和 120 mJ 时, 10 ps 脉冲在 $z \approx 5$ m 的演化结果

Fig. 4

(a) relation between the self-similar evolution distance and U_{in} for 0.8 ps pulse; (b) evolution results for 10 ps pulse with $U_{in} = 12$ mJ and 120 mJ at $z = 5$ m

减,但演化脉冲的宽度基本相同。图 4(b)结果表明,尽管脉宽为 10 ps 的输入脉冲能量提高了三、四个量级,但其脉冲宽度和形状均没有改变。分析其原因可知,当脉冲能量提高时, L_D 并不变,而 L_{NL} 变得更小,因此脉冲受非线性的作用更强,当 $L_D/L_{NL} \ll 1$ 时脉冲主要受非线性的影响,不能演化成自相似抛物脉冲。

因此,当 L_D 与增益光纤长度相近时,提高脉冲能量可以使脉冲在较短的距离内达到自相似演化。而当 L_D 远大于增益光纤长度时(对 10 ps 的脉冲),进一步提高能量对脉冲自相似演化并没有促进作用。

3.3 放大器增益及色散系数对脉冲自相似演化的影响

对于给定的放大器总增益,在不同增益系数情况下,脉冲的能量经历不同的增长速度,并对应不同的峰值功率。假定脉冲初始能量为 10 pJ,脉宽为 0.8 ps,放大器的总增益为 41 dB,光纤的增益系数分别为 $g = 0.95 \text{ m}^{-1}, 1.9 \text{ m}^{-1}, 3.8 \text{ m}^{-1}$,图 5 给出

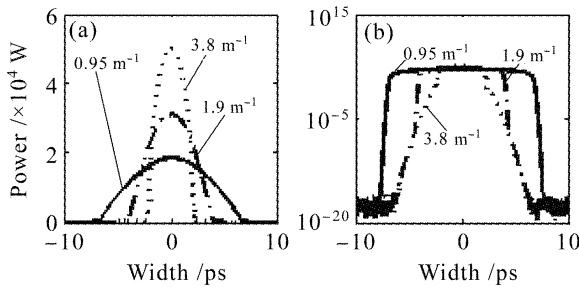


图 5 放大器增益为 41 dB,不同增益系数下 0.8 ps 脉冲的演化结果

Fig. 5 With total gain of 41 dB, the evolution results of 0.8 ps pulse with different gain coefficients

了脉冲的演化结果。结果表明在相同的总增益下,增益系数越小(增益光纤越长),脉冲受到色散的作用越大,则演化脉冲的宽度越大,峰值功率越低(如图 5(a)所示),此时脉冲的演化越彻底(如图 5(b)所示)。

为了说明增益系数对脉冲自相似演化后传输放大的影响,当增益系数分别为 0.95 m^{-1} 和 3.8 m^{-1} 时,模拟了初始能量为 10 pJ, $T_0 = 0.8$ ps 脉冲的演化过程。脉冲在扭曲变形前的最大演化传输距离分别为 13.2 m 和 3.1 m,放大器的总增益分别为 54.5 dB 和 51.2 dB,即增益系数为 0.95 m^{-1} 时放大器可获得的总增益比 3.8 m^{-1} 时大 3.3 dB。因此较小的增益系数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,使得放大器可以获得较大的增益;增益系数大时,由于脉冲自相似演化和传输的距离变小,因此较大的增益系数加速了脉冲的演化进程。

较低的增益系数允许脉冲在扭曲变形前有较长的传输距离,为达到脉冲的自相似演化可选择较低增益系数的光纤使得传输距离和 L_D 相近。考虑比较极端的情况,设放大器增益为 41 dB,增益系数为 0.0095 m^{-1} (则增益光纤长度为 1000 m),初始脉冲能量为 10 pJ,图 6(a)给出了在其他参数不变时,10 ps 脉冲的演化结果。

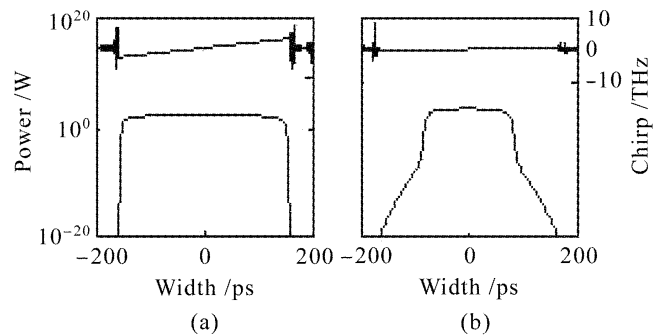


图 6 10 ps 脉冲在 $L_D = 4000$ m, $z = 1000$ m(a)和 $L_D = 4$ m, $z = 5$ m(b)时的演化结果

Fig. 6 Evolution result of 10 ps pulse at the condition of $L_D = 4000$ m, $z = 1000$ m (a) and $L_D = 4$ m, $z = 5$ m (b)

由图 6(a)可见,脉冲在 $z = 1000$ m 时具有很好的自相似脉冲形状。这说明可以通过减小增益系数使脉冲在光纤中的传输距离与 L_D 相近,而实现脉冲的自相似传输。另外,还可以通过调整色散系数来实现给定脉冲的自相似演化。设放大器的增益仍为 41 dB,光纤长度为 5 m,将增益光纤的色散系数增大 1000 倍,即 $\beta_2 = 25 \text{ ps}^2/\text{m}$,则 $L_D = 4$ m,和传输

距离非常接近,此时 $L_{NL}/L_D \approx 60$, 图 6(b)给出了 10 ps 脉冲在 $z = 5$ m 时的演化结果。可见,将 L_D 调整到和光纤长度相当时,可以使脉冲达到自相似演化。与图 6(a)相比可知脉冲的展宽较少,其自相似演化程度也差一些,且其啁啾也很小。出现这样的差别是由于在图 6(a)中非线性的作用距离较长,产生了较大的啁啾;而在图 6(b)中由于传输距离较短,因此非线性的影响相对减少。

图 1 和图 6 的结果表明,当增益光纤长度与 L_D 相近(相差几倍)时,脉冲即可以实现自相似演化,结合另外的模拟结果可知这对于任意宽度的脉冲均成立。

在正色散的光纤放大器中,任意宽度的脉冲若要实现自相似演化,其 L_D 必须与光纤长度相近以保证脉冲受色散的充分作用。由于 L_{NL} 在脉冲的放大演化过程中逐渐变小,较大的初始 L_{NL} 并不会阻止脉冲的自相似演化。在满足增益光纤长度与 L_D 相近时,一般来说当 L_D 小于或等于 L_{NL} , 即 $L_D/L_{NL} \leq 1$ 时脉冲的演化效果较好。这是因为脉冲在放大器中传输时会不断展宽, L_D 不断增大;同时脉冲的峰值功率不断增加,造成 L_{NL} 不断减小。在脉冲的动态演化过程中,非线性效应会越来越显著,而色散作用会越来越弱。脉冲需要在色散、非线性和增益的共同作用下才能实现自相似演化,因此需对初始的 L_D, L_{NL} 进行限定。

4 结 论

研究了脉冲宽度、脉冲能量、光纤增益系数及色散系数对脉冲自相似演化的影响,得到了脉冲自相似演化的条件。研究表明,对初始输入脉冲和增益光纤参数来说,若 L_D 满足与光纤长度相近(相差在几倍以内)的条件,则可以实现脉冲的自相似演化。 L_D 越小,自相似演化程度越充分,此时使用 V. I. Kruglov 特征距离公式可以得自相似演化的特征距离;若不满足此条件,脉冲不能演化成自相似抛物脉冲,特征距离公式也不再适用。提高脉冲的初始能量一般可以加速其自相似演化,但在 L_D 远大于光纤长度的情况下,不能使脉冲实现自相似演化。放

大器增益一定时,增益系数越大,脉冲的自相似演化结果越差;采用较低的增益系数可使放大器获得较高的总增益。本文的研究结果对于自相似抛物脉冲光纤放大器的设计具有一定意义,确定初始脉冲和光纤参数后,利用以上结论可以方便地设计自相似抛物脉冲放大器。

参 考 文 献

- 1 Joehua E. Rothenberg. Femtosecond optical shocks and wave breaking in fiber propagation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(12):2392~2401
- 2 D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak *et al.*. Wave breaking in nonlinear optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(8):1358~1361
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 J. Limpert, T. Schreiber, T. Clausnitzer *et al.*. High power femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14):628~638
- 7 Edmond B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9):454~458
- 8 Zhu Pengfei, Qian Liejia, Liu Yupu *et al.*. Alignment of grating pair for single pulse compression [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):509~512
朱鹏飞,钱列加,刘玉璞等. 单次工作的压缩器光栅对的平行性调整[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):509~512
- 9 Song Ji'en, Huang Yongqing, Guo Yong *et al.*. Transmission properties of the strong pulse in fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):1003~1005
宋继恩,黄永清,郭勇等. 强脉冲在光纤光栅中的传输特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):1003~1005
- 10 Zhou Bing, Jiang Yongliang, Chen Xiaowei *et al.*. Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):323~328
周冰,姜永亮,陈晓伟等. 超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):323~328
- 11 G. P. Agrawal, translated by Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. Principle and Application of Nonlinear Fiber Optics [M]. 1st edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 64~65
G. P. Agrawal 著,贾东方,余震虹,谈斌等译. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第一版. 北京:电子工业出版社, 2002. 64~65