

文章编号:1004-4213(2010)03-0412-5

新型全光纤高能量飞秒光脉冲源的数值模拟*

孟义昌,张书敏[†],靳春江,李辉辉,王新占

(河北师范大学 a. 物理科学与信息工程学院;b. 河北省新型薄膜材料实验室,石家庄 050016)

摘要:数值模拟了自相似脉冲的产生与压缩,得到一种产生高能量飞秒光脉冲的新方法.结果表明:利用掺铒光纤对光脉冲进行自相似传输,可得到含线性频率啁啾的高能量自相似光脉冲;自相似光脉冲经过空芯光子带隙光纤的一级线性压缩和高非线性光纤的二级非线性压缩,可获得高峰值功率的飞秒光脉冲;压缩过程中存在最佳光纤长度;喇曼自频移和自陡效应对脉冲压缩产生不利影响.

关键词:自相似脉冲;脉冲压缩;空芯光子带隙光纤;超短光脉冲

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0412

0 引言

为推进超快光学的应用,1 550 nm 波段全光纤高能量超短光脉冲的产生成为人们研究的重点^[1]. 脉冲压缩技术是获得超短光脉冲的有效方法之一. 利用体光栅对脉冲进行压缩的传统技术破坏了光脉冲源的全光纤结构;而简单的单级孤子效应压缩技术只能获得约 30~40 fs 的光脉冲,且压缩脉冲往往伴有较大基座^[2-4]. 为了获得高压缩质量的光脉冲,人们常采用色散渐减光纤代替常规的负色散光纤进行脉冲压缩^[5]. 尽管上述方法可以提高光脉冲的压缩质量,但获得的光脉冲能量较低,当光脉冲能量较高时,光脉冲很容易发生分裂. 自相似脉冲的出现解决了能量受限的问题,与孤子光脉冲类似,自相似光脉冲解亦存在于非线性薛定谔方程(Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE)中^[6],其优点是光脉冲在高功率传播时,可保持脉冲形状不变,具有抵御光波分裂的能力,即可获得高能量光脉冲;自相似光脉冲的另一显著特点是其具有严格的线性频率啁啾,因而可对其进行线性压缩,进而得到高能量超短光脉冲^[7-8].

本文利用掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)放大器对皮秒光脉冲进行自相似传输,获得高能量的自相似光脉冲;而后利用空芯光子带隙光纤(Hollow Core Photonic Bandgap Fibers, HC-

PBGF)较大的负色散对该自相似脉冲进行线性一级压缩,进一步提高光脉冲的质量;得到的脉冲再经历一段高非线性光纤(Highly Nonlinear Fiber, HNLF)进行非线性二级压缩,进而得到高峰值功率、高压缩质量的飞秒光脉冲. 本文同时研究了高非线性光纤中的自陡效应和喇曼自频移效应对光脉冲压缩的影响.

1 理论模型

光脉冲在含有增益的光纤中传输时,可由式(1)含增益的 NLSE 描述^[9]

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

式中, $A(z, T)$ 为脉冲慢变包络振幅, z 为光在光纤中的传输距离, β_2 为二阶群速度色散, g 为增益系数, γ 为非线性系数, T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度.

通过求解方程(1)可以研究自相似脉冲的产生、两级压缩,最后获得高峰值功率、高压缩质量飞秒光脉冲的过程.

随着传输距离的增加,方程(1)具有下列形式的渐进解^[10-12]

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

式中, A_0 为脉冲演化的初始振幅, $T_p(z)$ 为脉冲的有效宽度. 从式(2)可以看出,对于任意形式的初始脉冲,经过传输后都将最终演化为抛物线形式,且具

* 河北省自然科学基金(F2009000321)、河北师范大学重点基金(130243)和河北师范大学博士科研启动基金(L2005B05)资助

[†] Tel: 0311-86267202 Email: zhangsm@hebtu.edu.cn

收稿日期: 2009-07-13

修回日期: 2009-10-20

有下列的啁啾形式^[10]

$$C(z) = -g/(6\beta_2) \quad (3)$$

式(3)表明啁啾是线性的,并且随 g 的增大而增大.

2 数值模拟结果及讨论

2.1 自相似脉冲的产生

为了验证上述理论的正确性,现利用分步傅里叶变换方法,对方程(1)进行数值求解.选取无啁啾的高斯型脉冲 $A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp(-T^2/2T_0^2)$ 作为初始输入条件,式中, $T_0 = 0.65$ ps 为脉冲半宽度(在光强度峰值处), $P_0 = 40$ W 为输入脉冲的峰值功率.选用掺铒光纤作为增益介质,对该光脉冲进行放大,该增益光纤在 1 550 nm 处的色散值为: $D = -30$ ps · nm⁻¹ · km⁻¹,非线性系数为: $\gamma =$

6 W⁻¹ · km⁻¹,增益系数为: $g = 0.33$ m⁻¹.图 1(a)和(b)给出了光脉冲在掺铒光纤中传输时的时域演化和相应的频谱演化.图 1(a)清晰地展示了自相似光脉冲的形成过程:脉冲无分裂的展宽放大,所积聚的能量不断增大,当脉冲在掺铒光纤中传输到 11 m 时,脉冲宽度达到 4.77 ps,峰值功率达到 380 W.图 1(b)表明光脉冲的频谱同样被展宽为抛物线形状.图 1(c)给出了掺铒光纤长度分别为 4 m、7 m、11 m 时所形成光脉冲的频率啁啾图像.由图可见,随着传输距离的增加,频率啁啾在脉冲时域内的线性范围逐渐增大,当掺铒光纤长度为 11 m 时,频率啁啾的线性部分几乎覆盖了整个脉冲.众所周知,光脉冲所积聚的线性啁啾能被空芯光子带隙光纤很好的补偿,进而得到高压缩质量的超短光脉冲.

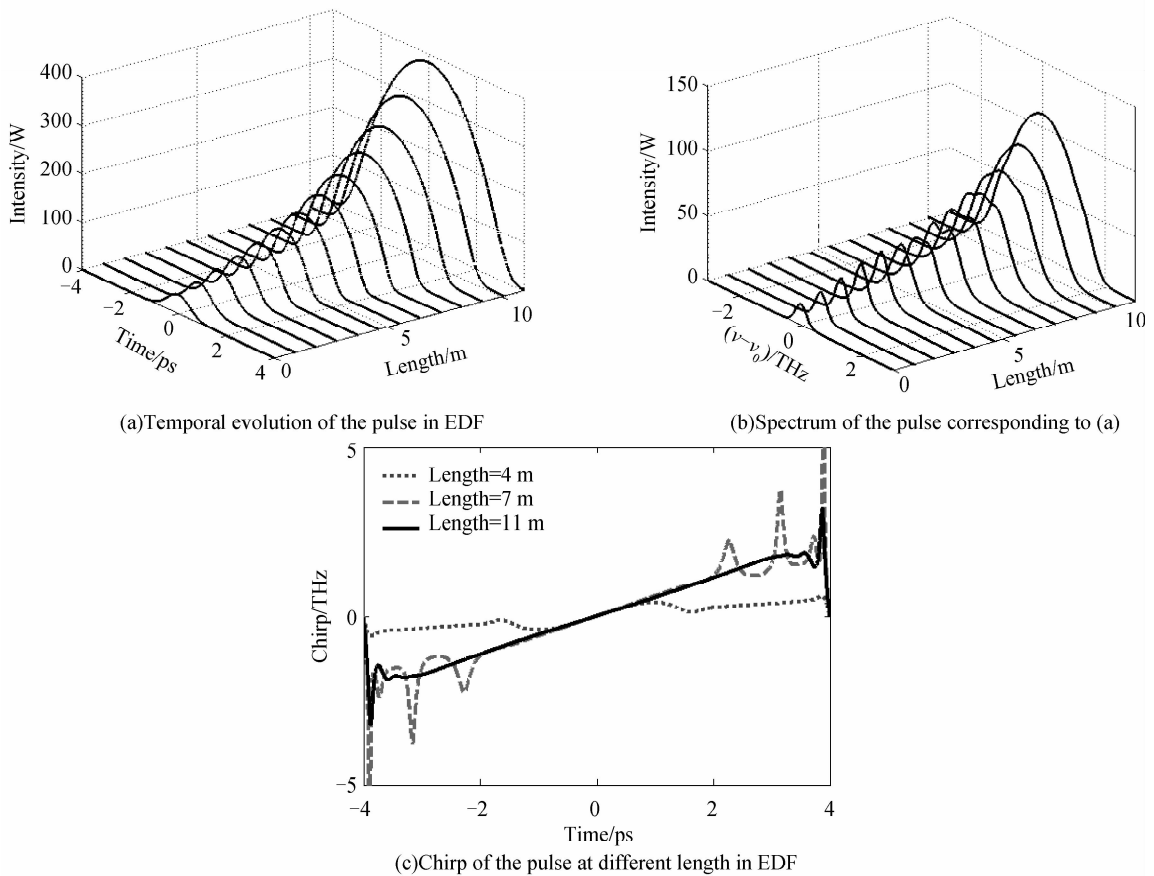


图 1 光脉冲在掺铒光纤中传输时的时域演化、图(a)所对应的频谱,以及不同长度的掺铒光纤所形成光脉冲的频率啁啾
Fig. 1 Temporal evolution of the pulse in EDF, Spectrum of the pulse corresponding to (a) and Chirp of the pulse at different length in EDF

2.2 自相似光脉冲的线性一级压缩

经研究可知,尽管利用光脉冲的放大技术可以得到较高能量的光脉冲,但所得光脉冲的脉宽较宽,因而必须利用光脉冲压缩技术对其进行压缩.因光子带隙光纤的非线性系数比常规光纤小近 1 000 倍^[13],若选用 HC-PBGF 对光脉冲进行压缩,可减小高阶非线性效应的影响,进而得到无分裂、高能量的较短光脉冲.数值模拟中,选取光子带隙光纤在

1 550 nm 处的色散值为: $D = +86$ ps · nm⁻¹ · km⁻¹,非线性系数为: $\gamma = 1 \times 10^{-3}$ W⁻¹ · km⁻¹,在无增益的光纤中, $g = 0$.忽略光纤损耗,数值求解方程(1),得到光脉冲在光纤中传输时的演化如图 2(a).

由图 2(a)可见,光脉冲首先被压缩,这说明空芯光子带隙光纤提供的负色散对具有正啁啾的自相似脉冲进行色散补偿.当脉冲到达一最佳长度时,总色散接近于零,此时脉宽最窄,若继续增加光纤的长

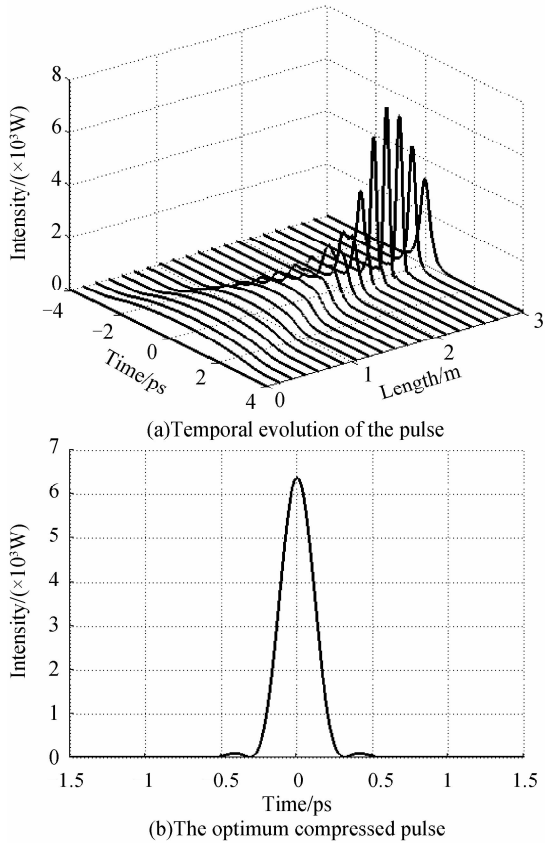


图2 脉冲在 HC-PBGF 中传输时的时域演化以及最佳压缩脉冲

Fig. 2 Temporal evolution of the pulse and the optimum compressed pulse in HC-PBGF

度,总的色散开始变为负值,且随着光纤长度的增加而逐渐增大,脉冲又开始展宽.从图中可以看出,最佳光纤长度为 2.58 m.即在总腔长为 13.58 m 处得到最好的一级压缩.得到的最佳脉冲形状如图 2 (b),光脉冲的半极大全宽为 260 fs,峰值功率为 6.373 kW.脉冲旁瓣的产生是因为脉冲的前、后沿在传输过程中受到自相位调制的作用,进而积聚非线性啁啾,而这些非线性啁啾不能被线性啁啾补偿,于是在脉冲两边形成基座.

2.3 非线性二级压缩

由上述研究可以看出,尽管利用空芯光子带隙光纤可以将光脉冲进行压缩,得到能量较高、脉宽较窄的光脉冲,但由于空芯光子带隙光纤小的非线性,在压缩过程中自相位调制作用较弱,所得压缩光脉冲的宽度依然较宽.

为了得到更窄的高能量光脉冲,利用孤子效应压缩机制,采用色散平坦的高非线性光纤对上述得到的压缩光脉冲进行二级非线性压缩.所采用光纤的色散值为: $D = +4.1 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,非线性系数为: $\gamma = 7 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,同样忽略光纤损耗,在 $g=0$ 的情况下,数值求解方程(1),得到光脉冲的演化如图 3 (a).由图可见,当光纤长度很短,仅为

0.216 m时,光脉冲即可得到最佳压缩.最佳压缩光脉冲形状如图 3 (b),脉冲宽度约为 6 fs,峰值功率可达 84.63 kW.由于计算过程中没有考虑光纤的高阶色散和高阶非线性效应,所得压缩后的光脉冲接近衍射极限.

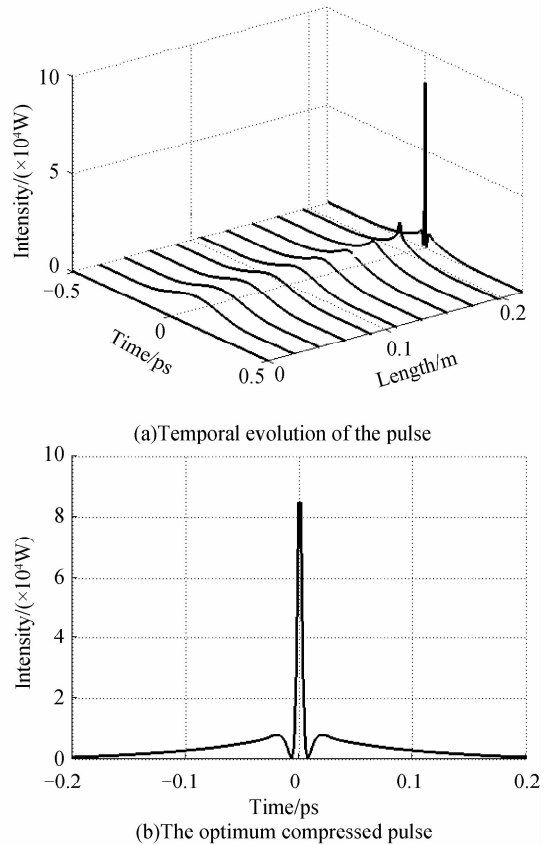


图3 脉冲在 HNLF 中传输时的时域演化和最佳压缩脉冲
Fig. 3 Temporal evolution of the pulse and the optimum compressed pulse in HNLF

3 喇曼自频移、自陡效应对光脉冲压缩的影响

当脉冲宽度较窄、峰值功率较大时,高阶色散和高阶非线性效应对光脉冲压缩的影响将不可忽略,此时光脉冲在光纤中的传输满足广义非线性薛定谔方程^[14]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} = i\gamma[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T}] \quad (4)$$

方程左边的第三项为三阶色散效应, β_3 为三阶色散值,方程右边的第二、三项分别为自陡效应和喇曼自频移效应, ω_0 和 T_R 分别为光脉冲的中心频率和喇曼响应时间.

由于采用的是色散平坦的高非线性光纤,方程中取 $\beta_3 = 0$.图 4 (a) 给出了其他参量与图(3)相同,但考虑喇曼自频移效应,并取喇曼响应时间为 $T_R =$

3 fs 时,光脉冲的时域演化图.由图可见,随着传输距离的增加,喇曼自频移效应将使主脉冲发生明显的延迟.图 4(b)则给出了其他参量与图(3)相同,但考虑自陡效应并取中心波长为 1 550 nm 时,光脉冲的时域演化图.由图可见自陡效应将导致压缩光脉冲发生分裂.

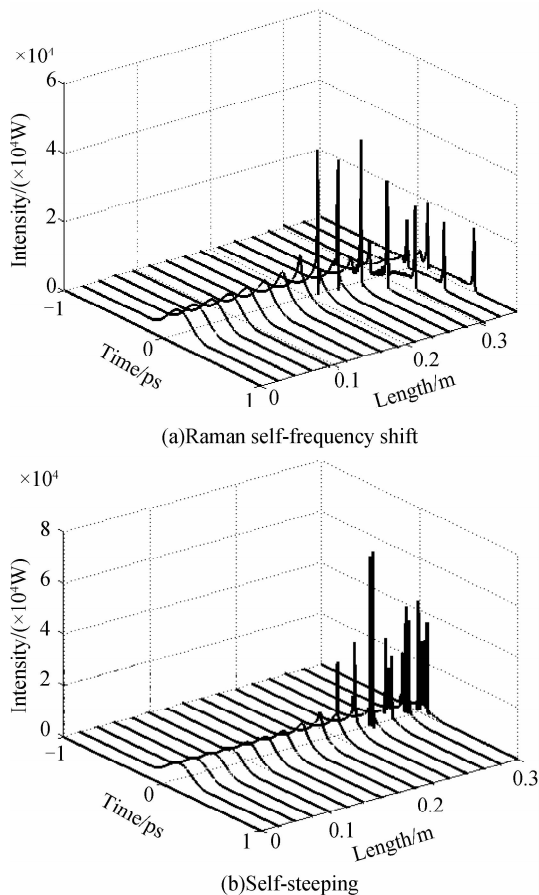


图 4 仅考虑喇曼自频移和仅考虑自陡效应时脉冲在 HNLF 中的时域演化

Fig. 4 Temporal evolution of the pulse in HNLF while only Raman self-frequency shift and while only self-steepening is considered

当同时考虑喇曼自频移和自陡效应的影响时,经过数值模拟,得到的压缩脉冲质量更差(文中没有给出图).得出:在此情况下,喇曼自频移和自陡效应的作用对脉冲压缩产生不利影响,因此在实际应用中应尽量减小两者的影响.

4 结论

基于非线性薛定谔方程,运用分步傅里叶变换方法,数值模拟了利用自相似脉冲的产生与压缩,得到高能量飞秒光脉冲源的新方法.利用脉宽为 1.3 ps、峰值功率为 40 W 的高斯型脉冲作为初始输入条件,在掺铒光纤中自相似传输,得到含线性频率啁啾的高能量自相似光脉冲,该自相似光脉冲分别经过线性和非线性两级压缩,在不考虑高阶色散和

高阶非线性效应作用时,最终得到脉冲宽度为 6 fs,峰值功率高达 84.63 kW 最佳压缩超短光脉冲;同时研究了自陡效应和喇曼自频移效应对光脉冲压缩的影响.结果表明,喇曼自频移和自陡效应对脉冲压缩产生不利影响.

参考文献

- [1] WADA O, Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing[J]. *New J Phys*, 2004, **6** (183):1-35.
- [2] MITSCHKE F M, MOLLENAUER L F, Ultrashort pulses from the soliton laser[J]. *Opt Lett*, 1987, **12**(6):407-409.
- [3] NICHOLSON J W, YABLON A D, WESTBROOK P S, et al. High-power single mode all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(13):3025-3034.
- [4] TAKAYANAGI J, NISHIZAWA N, NAGAI H, et al. Generation of high-power femtosecond pulse and octave-spanning ultrabroad supercontinuum using all-fiber system[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2005, **17**(1):37-39.
- [5] LIU Jian-hui, DING Yong-kui, TAN Li, et al. Study on pulse compression in dispersion-decreasing fibers[J]. *Acta Phys Sin*, 2004, **53**(5):1373-1377.
刘俭辉,丁永奎,谭莉,等.色散渐减光纤的脉冲压缩研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5):1373-1377.
- [6] FENG Jie, XU Wen-cheng, ZHANG Qiao-fen, et al. Self-similar pulse evolution in optical fibers[J]. *Laser & Opt Progress*, 2006, **43**(10):26-36.
冯杰,许文成,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.
- [7] FINOT C, MILLOT G, DUDLEY J M. Asymptotic characteristics of parabolic similariton pulses in optical fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(21):2533-2535.
- [8] BILLET C, DUDLEY J M, JOLY N, et al. Intermediate asymptotic evolution and photonic bandgap fiber compression of optical similaritons around 1550 nm[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(9):3236-3241.
- [9] KRUGLOV V I, PEACOCK A C, HARVEY J D. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**(26):6010-6013.
- [10] ZHANG Qiao-fen, XU Wen-cheng, FENG Jie, et al. Propagation properties of self-similar pulse in a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):30-34.
张巧芬,徐文成,冯杰,等.色散渐减光纤中自相似脉冲传输特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):30-34.
- [11] TU Cheng-hou, LEI Ting, ZHU Hui, et al. The ultra-short pulse evolution characteristic in self-similar parabolic pulse fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):879-882.
涂成厚,雷霆,朱辉,等.自相似抛物脉冲光纤放大器中超短脉冲的演化特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5):879-882.
- [12] TU Cheng-hou, LEI Ting, ZHU Hui, et al. Influence of femtosecond pulse's initial width and chirp on its self similar evolution and compression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10):1932-1936.
涂成厚,雷霆,朱辉,等.飞秒脉冲初始脉宽和啁啾对其自相似演化及压缩的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10):1932-1936.
- [13] BHAGWAT A R, GAETA A L. Nonlinear optics in hollow-core photonicbandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(7):5035-5047.
- [14] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 4th ed. Boston: Academic Press, 2007:40.

Numerical Simulations of Novel All-Fiber Source of High Energy Femtosecond Pulses

MENG Yi-chang, ZHANG Shu-min, JIN Chun-jiang, LI Hui-hui, WANG Xin-zhan
(a. College of Physics Science and Information Engineering; b. Hebei Advanced Thin Films Laboratory,
Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050016, China)

Abstract: The generation and compression of parabolic similariton pulses are investigated numerically, and a novel method of generating high-energy femtosecond pulses is obtained. The results show that the high-energy parabolic pulses with linear chirp can be obtained by propagating of pulses inside the Erbium-doped fibers. Employing the linear compression with hollow core photonic bandgap fibers in the first stage and the nonlinear compression with highly nonlinear fiber in the second stage, the parabolic similariton pulse can be compressed into a femtosecond pulse with high peak power. There is an optimum fiber length for the pulse compression, and the Raman self-frequency shift and the self-steepening effects are disadvantageous for pulse compression.

Key words: Self-similar pulses; Pulse compression; Hollow-core photonic bandgap fiber; Ultrashort pulse



MENG Yi-chang was born in 1980. Now he is working towards the M. S. degree at Institute of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University. His research interests focus on laser technology, pulse compression and optical communications.



ZHANG Shu-min was born in 1965. She received her Ph. D. degree from Nankai University in 2005. Now, she is a professor, and her current research interests focus on optical pulse compression in fibers and fiber laser.