

# 堆积啁啾脉冲在单模光纤中的非线性传输特性

周晓军<sup>1</sup> 张旨遥<sup>1</sup> 隋 展<sup>2</sup> 王建军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 通过数值求解广义非线性薛定谔方程, 分析了 32 路线性啁啾高斯脉冲堆积后的整形脉冲在单模光纤中的传输特性。结果表明经 50 m 单模光纤传输后脉冲的脉宽和包络形状基本不变; 非线性效应中的自相位调制和脉冲内 Raman 散射对脉冲频域特性影响较大, 使频谱展宽约 40 THz, 中心角频率下移约 10 THz; 而自陡效应, 三阶色散对传输特性影响不大。

**关键词** 堆积啁啾脉冲; 自相位调制; Raman 频移; 自陡效应

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0159

## Characteristics of Nonlinear Transmission of Stacking Chirped Pulses in Single-Mode Fiber

Zhou Xiaojun<sup>1</sup> Zhang Zhiyao<sup>1</sup> Sui Zhan<sup>2</sup> Wang Jianjun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China  
<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** The characteristics of nonlinear transmission of shaped pulse through the stacking 32 linearly chirped Gaussian pulses in single mode fiber were analyzed by solving the generalized nonlinear Schrödinger equation numerically. The simulating results indicate that after 50 m transmission in a single mode fiber, the duration and the envelope shape of the stacking chirped pulses have almost no change. The nonlinear effects, such as self-phase modulation and intrapulse Raman scattering, impact seriously on the spectral domain characteristics of the pulse, the spectral width is broaden about 40 THz and the center angle-frequency is downshift about 10 THz. The self-steepening effect and the third order dispersion affect the transmission characteristics little.

**Key words** stacking chirped pulses; self-phase modulation; Raman-induced frequency shift; self-steepening effect

## 1 引 言

惯性约束聚变激光驱动器对前端系统的要求是能够输出任意形状的整形光脉冲, 以补偿光脉冲放大过程造成的波形畸变<sup>[1~3]</sup>。由于利用电子器件进行脉冲整形难以获得快上升沿脉冲和与时间零同步的可整形压缩脉冲, 一些发达国家已经采用了利用超短脉冲堆积进行光脉冲整形的方法。美国与日本分别用分光镜分束光脉冲堆积整形、多模光纤分束光脉冲堆积整形获得了快上升沿的整形脉冲<sup>[4~6]</sup>。最近, 一种用并联可编程单模光纤延迟线进行啁啾光脉冲堆积整形的新方法获得了结构紧凑的任意形状整形脉冲<sup>[7~9]</sup>。这种啁啾光脉冲堆积整形首先将掺 Yb<sup>3+</sup> 锁模光纤激光器输出的脉冲序列选单、进行

线性啁啾展宽后用光滤波器滤波; 然后分束延时、各光束按整形光脉冲波形的需要按一定比例衰减; 最后合束堆积形成任意形状的整形脉冲。

为了降低后级放大系统的增益压力以及控制束间的功率平衡, 要求前端系统输出具有一定的能量、任意整形及高光束质量的激光脉冲, 因此通过啁啾脉冲堆积产生的任意形状的整形脉冲需要进一步在单模光纤中进行放大传输, 最后通过准直透镜进行准直以空间光束注入后级放大系统中。而高功率的堆积啁啾整形光脉冲在光纤的传输过程中, 会出现一些三阶非线性效应, 例如自相位调制 (SPM), 脉冲内 Raman 散射 (RIFS), 自陡效应 (SS) 等, 同时还可能会出现色散、损耗等, 这些效应相互影响, 使光纤输出端的堆

积啁啾整形脉冲的波形与频谱发生很大的变化。啁啾脉冲在单模光纤中可产生脉冲压缩,对此已进行了一些研究<sup>[10,11]</sup>,但对由基元为啁啾脉冲组成的堆积脉冲,尤其是在高峰值功率下的传输特性还未见报导。本文通过求解广义非线性薛定谔方程研究了堆积啁啾脉冲在单模光纤中的演化过程,分析了各种物理效应对输出脉冲时域及频域特性的影响。

## 2 堆积啁啾脉冲与传输方程

### 2.1 基元啁啾脉冲特性

堆积啁啾脉冲是基元啁啾脉冲经过光纤分束延时再合束形成的<sup>[7~9]</sup>。设基元脉冲为线性啁啾高斯

脉冲,光脉冲的电场可表示为

$$A(T) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{(1+iC)}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right] \times \exp(-i\omega_0 T), \quad (1)$$

式中  $P_0$ 、 $\omega_0$ 、 $C$  分别是基元啁啾脉冲的光功率、中心角频率、线性啁啾系数。 $T_0$  是以  $1/e$  光功率定义的脉冲半宽,  $T = t - \beta_1 z$  ( $\beta_1 = d\beta/d\omega$ ) 是移动坐标系时间。对  $T_0 = 60$  ps,  $C = 59.5$  的基元啁啾高斯脉冲,脉冲的时域与频域特性如图 1 所示。由图 1(b) 可看出无啁啾脉冲( $C=0$ )具有由 Heisenberg 测不准原理确定的最小谱宽,而啁啾在光场中引入随时间变化的相位量,展宽了脉冲的频谱,谱宽约 2 THz(FWHM)。

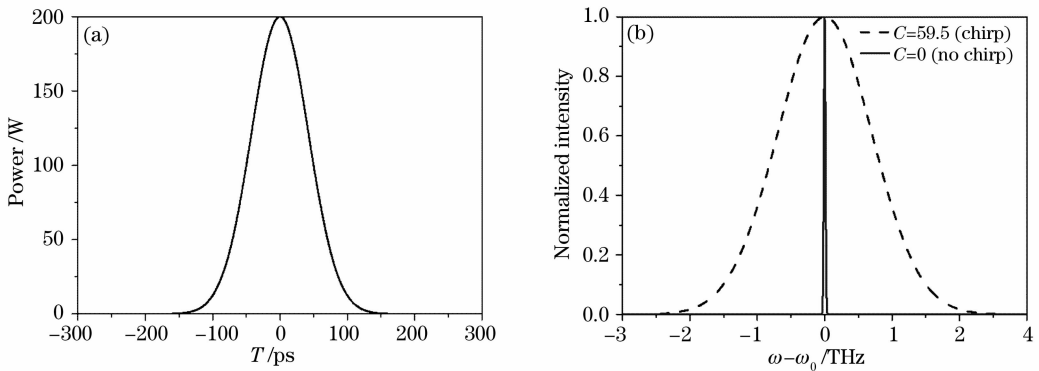


图 1 基元啁啾脉冲的特性。(a) 时域特性, (b) 频域特性

Fig. 1 Characteristics of the fundamental chirped pulse in (a) time domain, (b) frequency domain

### 2.2 32 路堆积啁啾脉冲的特性

基元啁啾脉冲经过 32 路分束延时后合束堆积形成的整形光脉冲的电场可用下式表示<sup>[7~9]</sup>

$$A(T) = \sum_{k=-15}^{16} \sqrt{P_k} \exp\left\{-\frac{(1+iC)}{2}\left[\frac{T - (k-1/2)rT_0}{T_0}\right]^2\right\} \exp\{-i\omega_0[T - (k-1/2)rT_0]\}, \quad (2)$$

式中  $r$  为相邻脉冲的重叠因子,  $r$  越小脉冲的重叠部分越多。 $P_k$  是堆积器第  $k$  路脉冲的峰值光功率。对  $r = 1.1656$ ,  $P_k = 200$  W 的堆积啁啾脉冲, 时域与频域特性如图 2 所示, 图中小图表示脉冲在时域的

细节。从图 2 可看出 32 路基元啁啾脉冲堆积后, 在脉冲的持续时间内功率分布较均匀, 其峰值功率约 800 W, 脉宽约为 2.2 ns(FWHM)。脉冲堆积后谱宽仍为 2 THz, 与基元脉冲相比几乎没有变化。

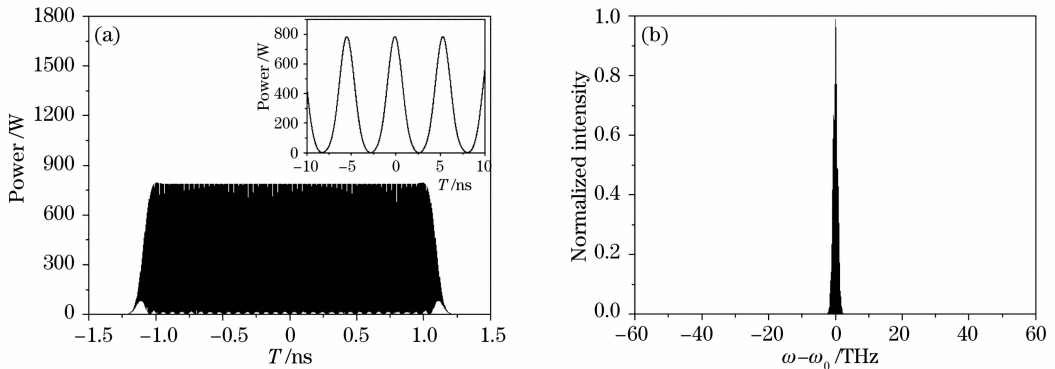


图 2 32 路啁啾脉冲堆积后的脉冲特性。(a) 时域特性, (b) 频域特性

Fig. 2 Characteristics of the stacking pulse by 32 fundamental chirped pulses in (a) time domain, (b) frequency domain

### 2.3 堆积啁啾脉冲的传输方程

堆积啁啾脉冲在单模光纤中的传播满足广义非线性薛定谔方程<sup>[12]</sup>：

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

式中  $A$  为光场的慢变包络幅度。 $\alpha, \beta_2, \beta_3$  分别为光纤的损耗系数, 群速色散 (GVD) 参量, 三阶色散 (TOD) 参量。  $T_R = 3 \text{ fs}$  为 Raman 响应函数的一阶矩<sup>[12]</sup>,  $\gamma = n_2\omega_0 / (cA_{\text{eff}})$  是光纤的非线性系数。(3) 式左端第二项表示光纤的损耗, 第三和第四项分别表示光纤的二阶与三阶色散效应, (3) 式右端三项分别表示在光纤中的自相位调制效应 (SPM), 自陡效应 (SS) 和脉冲内 Raman 散射效应 (RIFS)。

## 3 堆积啁啾脉冲的传输特性

### 3.1 单模光纤参量

通过求解单模光纤的本征模方程, 获得了 Corning HI-1060 型光纤的传播常数及各阶色散系数, 光纤参量列于表 1。

表 1 光纤的参量  
Table 1 Fiber parameters

Parameters	Values
Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	1.053
Mode-field diameter (MFD) / $\mu\text{m}$	6
Second-order dispersion coefficient $\beta_2 / (\text{ps}^2/\text{km})$	22
Third-order dispersion coefficient $\beta_3 / (\text{ps}^3/\text{km})$	-0.1
Fiber attenuation $\alpha / (\text{dB}/\text{km})$	1.5
Numerical aperture NA	0.14

### 3.2 光纤的有效非线性系数

计算光纤的有效非线性系数  $\gamma$ , 需要知道单模光纤的有效非线性折射率系数  $n_2$  和光纤的有效模场面积  $A_{\text{eff}}$ 。掺  $\text{GeO}_2$  块石英的非线性折射率系数是掺  $\text{GeO}_2$  石英与纯石英相对折射率差  $\Delta$  [ $\Delta = (n_1^2 - n_0^2) / (2n_1^2)$ ,  $n_0$  和  $n_1$  分别为纯石英和掺  $\text{GeO}_2$  石英的折射率] 的函数, 可表示为<sup>[13]</sup>

$$n_2 = 2.507 + 50.5\Delta, \quad (4)$$

对于由掺  $\text{GeO}_2$  石英纤芯与纯石英包层构成的单模光纤, 设模场为高斯分布, 光纤的有效非线性折射系数为<sup>[13]</sup>

$$n_{2\text{eff}} = n_2(\text{core}) - [n_2(\text{core}) - n_2(\text{clad})] \exp(-d^2/\omega^2), \quad (5)$$

式中  $d, \omega$  分别为光纤纤芯直径和模场半径。单模光纤有效模场面积为  $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$ , 模场半径<sup>[14]</sup>

$$\omega = (0.616 + 1.66V^{-3/2} + 0.987V^{-6})R_{\text{core}}, \quad (6)$$

式中  $V = \pi d(n_1^2 - n_0^2)^{1/2} / \lambda$  是光纤的归一化频率,  $R_{\text{core}}$  为纤芯半径。经计算得 Corning HI-1060 型光纤在波长 1053 nm 处的光纤有效模场面积  $A_{\text{eff}} = 27.3 \mu\text{m}^2$ , 有效非线性系数  $\gamma = n_{2\text{eff}}\omega / (cA_{\text{eff}}) = 6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

### 3.3 堆积啁啾脉冲的传输特性

利用分步傅里叶方法对广义非线性薛定谔方程 (3) 进行了数值求解。由于所采用的快速傅里叶变换只能在有限的时间及频率范围内对光场进行离散傅里叶变化, 为避免计算窗口小, 光场在计算窗口边界反射造成的计算误差, 时间计算窗口选为基元脉冲脉宽 ( $2T_0$ ) 的 25 倍, 时间离散点数为  $2^{16}$ 。为提高计算精度, 采用了具有三阶精度的对称指数算子。计算方法是将光纤分为多段长度为  $h$  的短光纤元, 在每段  $h$  内重复以下计算步骤: 首先在频域计算色散损耗算子在前半段光纤元  $h/2$  内对脉冲演化的影响, 然后利用光纤元中点处的光场分布在时域计算非线性算子在整个光纤元  $h$  内对脉冲演化的影响, 最后在频域计算色散损耗算子在后半段光纤元  $h/2$  内对脉冲演化的影响。由于采用了快速傅里叶变换

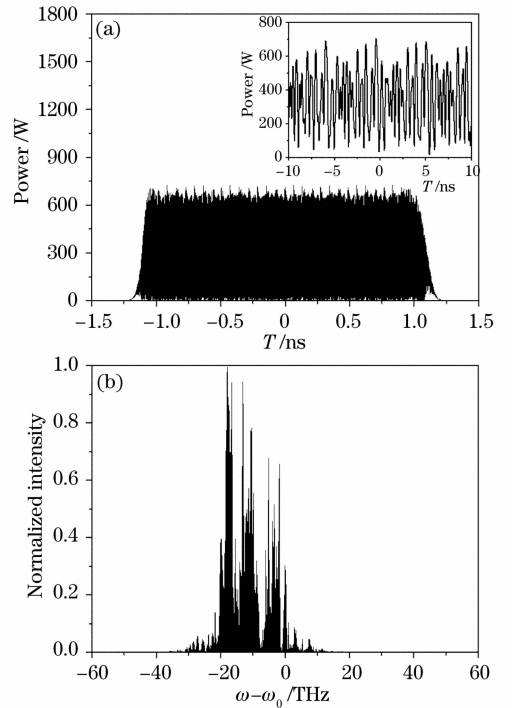


图 3 在单模光纤中传输 50 m 后堆积啁啾脉冲的特性。

(a) 时域特性, (b) 频域特性

Fig. 3 Characteristics of the stacking pulse after 50 m propagation in single mode fiber in (a) time domain, (b) frequency domain

算法,计算速度得到了很大的提高。图 3 给出了脉冲传输 50 m 后的时域和频域特性。由图可看出脉宽基本没有变,而频谱分布的变化很大,谱宽被大大展宽,频谱扩展到近 40 THz。

为了分析各种物理效应对堆积啁啾脉冲传输的影响,我们分别在几种情况下进行了计算。图 4 是仅考虑自相位调制(SPM)与二阶色散(GVD)效应时堆积啁啾脉冲传输 50 m 后的特性。与图 3 比较

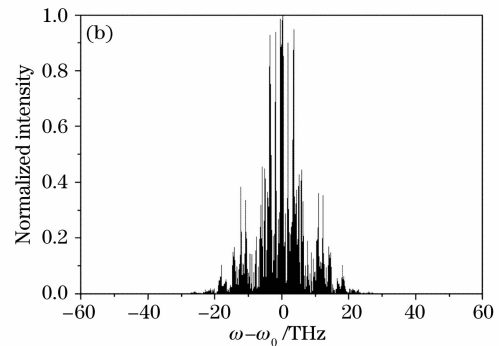
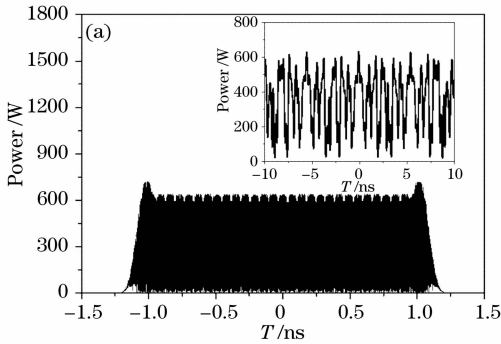


图 4 仅考虑 SPM,GVD 效应在单模光纤中传输 50 m 后堆积啁啾脉冲特性。(a) 时域特性,(b) 频域特性

Fig. 4 Characteristics of the stacking pulse after 50 m propagation in single mode fiber by considering SPM and GVD in (a) time domain, (b) frequency domain

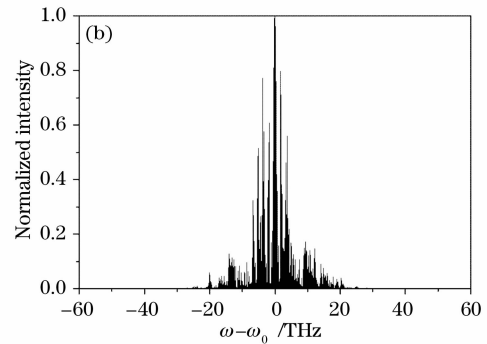
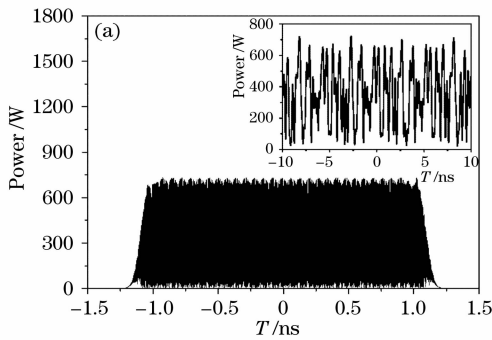


图 5 考虑 SPM,GVD,TOD 效应在单模光纤中传输 50 米后堆积啁啾脉冲特性。(a) 时域特性,(b) 频域特性

Fig. 5 Characteristics of the stacking pulse after 50 m propagation in single mode fiber by considering SPM, GVD and TOD in (a) time domain, (b) frequency domain

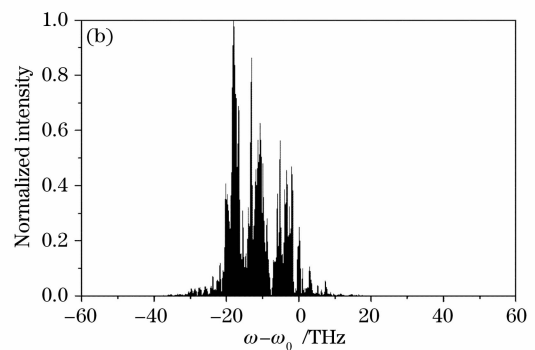
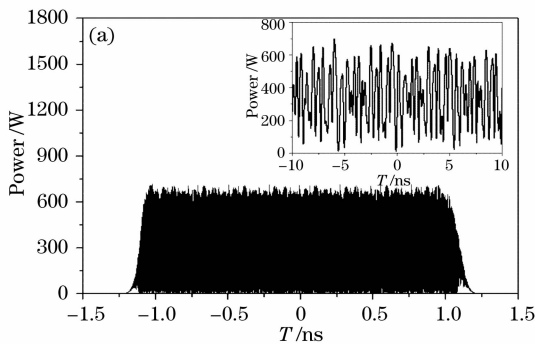


图 6 考虑 SPM,GVD,TOD,RIFS 效应单模光纤中传输 50 米后堆积啁啾脉冲的特性。(a) 时域特性,(b) 频域特性

Fig. 6 Characteristics of the stacking pulse after 50 m propagation in single mode fiber by considering SPM, GVD, TOD and RIFS in (a) time domain, (b) frequency domain

可看出频谱是对称于载频  $\omega_0$  的,但 SPM 效应将脉冲频谱展宽到近 40 THz;在时域上脉宽与图 3 相同,但在脉冲前后沿附近有一高功率区域。

图 5 是考虑 SPM,GVD 及 TOD 时堆积啁啾脉冲传输 50 m 后的特性。与图 4 比较,脉冲前后沿高功率峰消失,而频域中的高频分量强度略有提高。由于光纤的 TOD 参量较小,谱域的变化不大。

图 6 是考虑 SPM, GVD, TOD 及 RIFS 时堆积啁啾脉冲传输 50 m 后的特性。与图 5 比较时域特性基本不变, 但频谱的中心角频率明显下移, 这是由于脉冲内 Raman 散射造成的。由于 SPM 效应展宽了频谱, 脉冲内高频分量通过 Raman 散射向低频分量转移能量, 使脉冲的中心角频率下移。图 6 与图 3 比较略有变化, 这是自陡效应(SS)带来的, 计算结果表明自陡效应对堆积啁啾脉冲的传输特性影响不大。

## 4 结 论

本文分析了高功率堆积啁啾脉冲在单模光纤中的传输特性。对于线性啁啾高斯脉冲(啁啾系数为 59.5)堆积而成的高峰值功率(800 W)脉冲在单模光纤传输 50 m 后, 非线性效应与色散效应相互作用对时域脉冲包络形状和脉宽没有太大影响, 但对脉冲能谱密度的分布影响较大, 谱宽从 2 THz 扩展到近 40 THz (角频率), 中心角频率下移了约 10 THz。在各种物理效应中, SPM 使谱宽大大增加; RIFS 使中心频率产生较大的下移; 而 TOD, SS 的作用较小。为了保持堆积啁啾脉冲的特性, 必须抑制 SPM 与 RIFS 效应。

## 参 考 文 献

- 1 Y. H. Chuang, T. J. Kessler, S. Skupsky. Laser-beam pulse shaping using dispersive filtering[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1870**: 34~46
- 2 J. K. Lawson, D. R. Speck, C. Bibeau *et al.*. Temporal shaping of third-harmonic pulses on the NOVA laser system[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24): 5061~5068

- 3 J. D. Lindl, W. C. Mead. Two dimensional simulation of fluid instability in laser fusion pellets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **34**(20): 1273~1276
- 4 J. E. Rothenberg. Two-dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct drive inertial confinement fusion[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 634~644
- 5 J. Soures, S. Kupan, J. Hoose. High power Nd:glass laser for fusion applications[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(9): 2081~2094
- 6 C. E. Thomas, L. D. Siebert. Pulse shape generator for laser fusion[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(2): 462~465
- 7 Z. Sui, H. H. Lin, J. J. Wang *et al.*. A compact nanosecond-pulse shaping system based on pulse stacking in fibres[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8): 2074~2076
- 8 J. J. Wang, H. H. Lin, Z. Sui *et al.*. Temporal pulse shaping by chirped pulse stacking in fiber time delay lines[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6287**: 62870G
- 9 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470
- 林宏免, 隋展, 王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 10 Cao Wenhua, Liu Songhao, Liao Changjun *et al.*. Picosecond chirped pulse compression in single-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(2): 180~185
- 曹文华, 刘颂豪, 廖常俊等. 单模光纤中皮秒啁啾脉冲压缩[J]. *光学学报*, 1995, **15**(2): 180~185
- 11 Wu Fang, Jiang Zemin, Huang Zhaoming. Chirp analysis for optical pulse transmission in single-mode fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(6): 495~499
- 吴芳, 蒋泽民, 黄肇明. 单模光纤中光脉冲啁啾的分析[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(6): 495~499
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 4th edition, San Diego: Academic Press, 2007. 32~41
- 13 K. Nakajima, M. Ohashi. Dopant dependence of effective nonlinear refractive index in GeO<sub>2</sub>- and F-doped core single-mode fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4): 492~494
- 14 T. J. Whitley, R. Wyatt. Alternative Gaussian spot size polynomial for use with doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**: 1325~1327