

基于相移光纤光栅积分特性的超短光脉冲整形

刘文楷¹, 刘成园^{2*}, 董小伟²

¹北方工业大学计算机学院, 北京 100144;

²北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144

摘要 基于传输矩阵法和耦合模理论, 分析相移光纤光栅的传输函数以及透射谱特性, 结果表明相移光纤光栅具有较好的积分特性, 并且相移光纤光栅的积分阶数与所插入的相移点数成正比。基于相移光纤光栅一阶积分特性设计出一种光脉冲整形结构, 该结构可将高斯型超短光脉冲整形成平顶脉冲或对称三角形光脉冲。通过进一步调整结构中的加权系数, 该系统还可输出非对称三角形光脉冲。当输入的高斯型光脉冲的脉宽发生 $\pm 10\%$ 的波动时, 仍然可以得到效果较好的平顶脉冲和三角形光脉冲, 故所设计的光脉冲整形系统具有较好的稳定性。

关键词 光纤光学; 相移光纤光栅; 传输矩阵法; 积分特性; 脉冲整形

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0306005

Ultrashort Optical Pulse Shaping Based on Integral Characteristics of Phase-Shifted Fiber Grating

Liu Wenkai¹, Liu Chengyuan², Dong Xiaowei²

¹College of Computer, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

²School of Electronic and Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

Abstract The transmission functions and the characteristics of transmission spectra of phase-shifted fiber gratings are analyzed based on the transmission matrix method and the coupled mode theory. The results show that the phase-shifted fiber gratings have superior integral property, and the integral order is proportional to the number of inserted phase-shifted points. The pulse shaping structure is designed based on the first-order integral characteristic of phase-shifted fiber grating, which can shape the Gaussian ultrashort optical pulse into a flat-topped pulse or a symmetrical triangular light pulse. The system can output asymmetric triangular light pulses by further adjusting the weighting coefficients in the proposed structure. When the pulse width of the input Gaussian light pulse fluctuates $\pm 10\%$, the flat-topped pulse and triangular light pulse with high quality can be obtained, which proves that the designed pulse shaping system has high stability.

Key words fiber optics; phase-shifted fiber grating; transmission matrix method; integral characteristic; pulse shaping

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 320.5390; 050.2770

1 引 言

超短光脉冲具有脉冲宽度极短、脉冲强度高、光谱带宽极宽等特点, 被广泛应用于分子动力学、非线性光谱学、超快信息光子学等领域^[1-2]。随着超短光脉冲在各领域应用范围的扩大, 实际应用中超短光脉冲的波形有一定的要求^[3]。超短光脉冲整形

技术通过改变已有光学脉冲的幅度、相位、频率等参数来实现超短光脉冲的整形, 从而产生任意波形的超短光脉冲^[4]。

目前有多种基于光纤光栅的超短光脉冲整形方法。利用超结构光纤光栅^[5] (SSFBG) 作为滤波器进行整形的原理比较简单, 但是这种方法反射带宽较窄, 在脉冲时域很窄时不能满足整形要求。利用

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61007007)、北方工业大学长城学者后备计划(CCXZ2013007)

作者简介: 刘文楷(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光子器件及集成技术方面的研究。E-mail: liuwk@ncut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lcylcf0398@163.com

相移光纤光栅设计的微分器也可以进行超短光脉冲整形,但是微分过程是在反射谱的透射窗口谷底附近进行,能量损失较大^[6]。Krcmarik 等^[7]利用长周期光纤光栅使输出脉冲达到飞秒级别,将输入为双曲型信号整形为抛物线型信号,但不能实现其他输出类型信号的合成。Zhang 等^[8]利用双阵列光纤光栅实现了对高斯脉冲的任意光脉冲整形,但是使用的光栅较多,结构较为复杂。

随着光纤光栅制作技术的发展和进步,目前光纤光栅的制作技术成熟,光栅精度较高,误差较小,可被广泛用于光脉冲整形中^[9]。本文利用传输矩阵法和耦合模理论对相移光纤光栅进行研究,分析插入相移点后光纤光栅的幅频响应和相频响应曲线,并利用相移光纤光栅的一阶积分特性构造出脉冲积分整形系统,通过对高斯型输入脉冲进行时域积分整形,可获得平顶脉冲和三角形脉冲。

2 基本原理

相移光纤布拉格光栅是在均匀光纤光栅间插入多个相移点形成的,结构如图 1 所示, L_i ($i = 1, 2, \dots$) 为 i 段子光栅的长度, φ_i ($i = 1, 2, \dots$) 为第 i 段子光纤光栅插入时的相位。

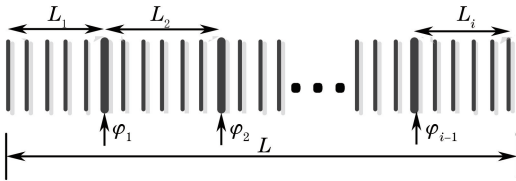


图 1 相移光纤光栅结构

Fig. 1 Structure of phase-shifted fiber gratings

可用传输矩阵方法结合模式耦合理论来描述相移光纤布拉格光栅结构,其中对于长度为 L 的相移光纤光栅输出电场强度与输入电场强度的关系为^[10]

$$\begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} = \mathbf{T}^\Sigma \begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $E_A(0)$ 和 $E_A(L)$ 分别为光纤光栅的前向输入电场和前向输出电场, $E_B(0)$ 和 $E_B(L)$ 分别为光纤光栅的后向输入电场和后向输出电场,初始边界条件为 $E_A(0) = 1, E_B(L) = 0$, \mathbf{T}^Σ 为总传输矩阵,它与每段子光栅的关系为^[11]

$$\mathbf{T}^\Sigma = \mathbf{T}_1 \cdot \Phi_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \Phi_2 \cdots \Phi_{i-1} \cdot \mathbf{T}_i, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ 为第 i 段子光栅的传输矩阵。传输矩阵 \mathbf{T}_i 的元素可表示为^[12]

$$T_{11} = T_{22}^* =$$

$$\left[\cosh(\gamma L_i) + j \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \right] \exp\left(-j \frac{2\pi n_{\text{eff}} L_i}{\lambda_c}\right), \quad (3)$$

$$T_{12} = T_{21}^* = -j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L_i) \exp\left(-j \frac{2\pi n_{\text{eff}} L_i}{\lambda_c}\right), \quad (4)$$

式中, $k = \pi \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$ 为光纤光栅的耦合系数, Δn_{eff} 为调制深度, λ 为光波波长,传播系数 $\gamma = (k^2 - \sigma^2)^{1/2}$, 光纤光栅模式之间的失谐量 $\sigma = \beta - \pi / \Lambda \approx (n_{\text{eff}} / c) \cdot (\omega - \omega_c)$ (其中 β 为光栅模式, Λ 为调制周期), λ_c 为中心波长, n_{eff} 为有效折射率, c 为光在真空中的速度, ω 为光波频率, ω_c 为中心频率。 $\Phi_i =$

$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix}$ 为第 i 段的相位传输矩阵,可表示为^[13]

$$\begin{cases} \Phi_{11} = \Phi_{22}^* = \exp(-j\varphi_i/2) \\ \Phi_{12} = \Phi_{21}^* = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

结合(1)~(5)式可以得到相移光纤光栅的透射谱^[14]

$$H = \frac{1}{T_{22}^\Sigma} = |H| \exp(j\varphi_i), \quad (6)$$

式中 $|H|$ 是相移光纤光栅透射谱的幅度。

在均匀光纤布拉格光栅中插入一个相移点时, $\mathbf{T}^\Sigma = \mathbf{T}_1 \cdot \Phi_1 \cdot \mathbf{T}_2$, 一阶相移光纤光栅的透射谱 H 为

$$H = \frac{1}{T_{22}^\Sigma} \approx A \left[j \frac{n_{\text{eff}}}{ck} (|r_1| + |r_2|) (\omega - \omega_c) + \frac{n_{\text{eff}}^2}{c^2 k^2} |r_1| |r_2| (\omega - \omega_c)^2 - |r_1| |r_2| \exp(-j\varphi) - 1 \right], \quad (7)$$

式中, $r_i = j \tanh(kL_i)$ ($i = 1, 2$), $|r_1| \approx |r_2| \approx 1$, A 是常数。当满足 $\sigma \rightarrow 0, \gamma \approx k, |\omega - \omega_c| \ll ck / n_{\text{eff}}$ 条件时,(7)式分母中的第 2 项相对于第 1 项为无穷小量。当插入 $\varphi = \pi$ 的 1 个相移点时,(7)式分母的第 3 项与第 4 项相抵消,因此可以得到透射谱 $H \approx \frac{F_1}{j(\omega - \omega_c)}$, F_1 为系数。可以看出一阶相移光纤光栅等价于一阶积分器,具有一阶积分特性。

在均匀的光纤光栅中插入 2 个相移点时, $\mathbf{T}^\Sigma = \mathbf{T}_1 \cdot \Phi_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \Phi_2 \cdot \mathbf{T}_3$, 得到二阶相移光纤光栅的透射谱

$$H = \frac{1}{T_{22}^\Sigma} \approx \frac{D}{-3(\omega - \omega_c)^2 + j \frac{n_{\text{eff}}}{ck} (\omega - \omega_c)^3}, \quad (8)$$

式中 D 是常数。当 $\sigma \rightarrow 0, \gamma \approx k, |\omega - \omega_c| \ll ck / n_{\text{eff}}$ 时,(8)式分母中的第 2 项相对于第 1 项为无穷小

量。当插入 $\varphi = \pi$ 的 2 个相移点时,透射谱 $H \approx \frac{F_2}{[j(\omega - \omega_c)]^2}$, F_2 为系数。可以看出二阶相移光纤光栅等价于二阶积分器,具有二阶积分特性。

假设相移光纤光栅的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.452$, 调制周期 $\Lambda = 534.89 \text{ nm}$, 调制深度为 $\Delta n_{\text{eff}} = 2.6 \times 10^{-3}$, 相移光纤光栅的中心波长为 1550 nm , 则在均匀光纤光栅中分别插入 1 个或 2 个相移点后,得到

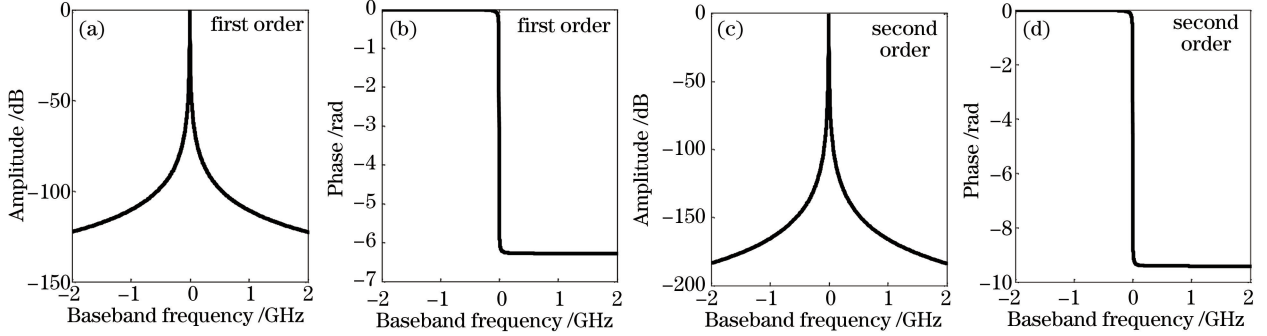


图 2 相移光纤光栅积分特性的幅频响应和相频响应。(a)一阶相移光纤光栅幅频响应;(b)一阶相移光纤光栅相频响应;(c)二阶相移光纤光栅幅频响应;(d)二阶相移光纤光栅相频响应

Fig. 2 Amplitude-frequency response and phase-frequency response of phase-shifted fiber grating.

(a) Amplitude-frequency and (b) phase-frequency responses of first-order phase-shifted fiber grating; (c) amplitude-frequency and (d) phase-frequency responses of second-order phase-shifted fiber grating

为了检验相移光纤光栅的积分性能,采用数值仿真,利用相移光纤光栅的积分特性对半峰全宽为 100 ps 的高斯脉冲的一阶和二阶微分进行积分,仿真结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,理想高斯

相移光纤光栅积分特性的幅频响应和相频响应曲线如图 2 所示。由图 2 可看出,该相移光纤光栅结构中所需的 π 相移可以位于沿着光栅长度的任意位置,只要每个均匀的子光栅足够长,即每段光纤光栅的长度 $L_i \gg 1.1 \text{ mm}$, 以便确保其上述条件 $|r_1| \approx |r_2| \approx 1$ 。随着插入相移点的增多,幅频响应曲线越来越尖锐,而相频响应曲线变化不大,均在中心频率处发生相位跳变。

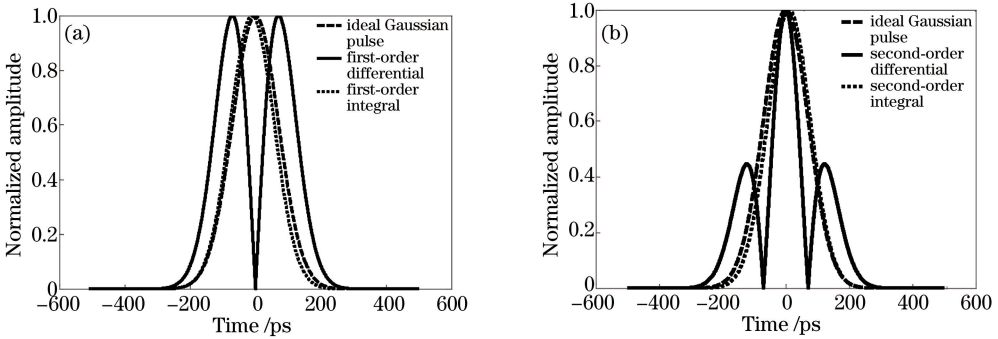


图 3 相移光纤光栅的积分验证。(a)一阶相移光纤光栅;(b)二阶相移光纤光栅

Fig. 3 Integral test of phase-shifted fiber gratings. (a) First-order phase-shifted fiber grating; (b) second-order phase-shifted fiber grating

理想时域积分器的响应为无穷阶跃函数^[15], 因此要求实际器件应有增益补偿机制。为了使整形系统简单方便,只利用相移光纤光栅的一阶积分特性对高斯型输入脉冲进行整形,整形结构如图 4 所示。该结构中一阶积分器是由插入 1 个相移点的光纤光栅构成, delayer 为延时器, k_1 和 k_2 均为加权系数。

脉冲的一阶微分和二阶微分经过一阶、二阶相移光纤光栅积分后的输出脉冲与原来的理想高斯脉冲几乎重叠,说明相移光纤光栅能够有效地对高斯型输入脉冲进行时间积分。

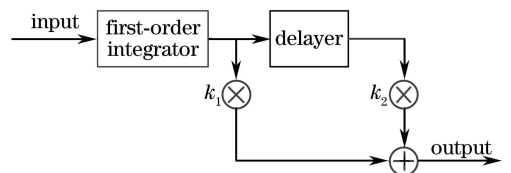


图 4 脉冲整形结构

Fig. 4 Structure of the pulse shaper

3 分析与讨论

设计的脉冲整形结构主要基于相移光纤光栅的一阶积分特性,因此当半峰全宽为 100 ps 的高斯脉冲 $a_0(t) = \exp(-t^2/\tau^2)$ 通过一阶相移光纤光栅后,积分效果如图 5 所示。从图 5 可以看出,一阶相移

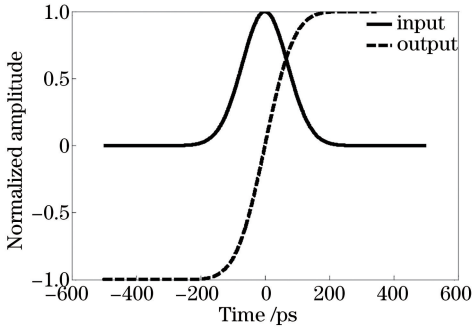


图 5 高斯脉冲的一阶积分

Fig. 5 First-order integral of Gaussian pulses

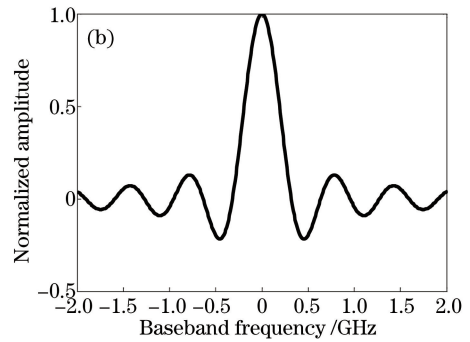
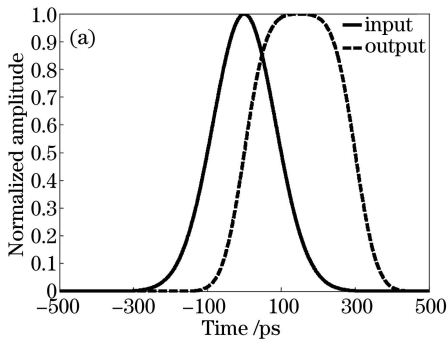


图 6 整形后的平顶脉冲。(a)时域;(b)频域

Fig. 6 Flat-topped pulse after shaping. (a) Time domain; (b) frequency domain

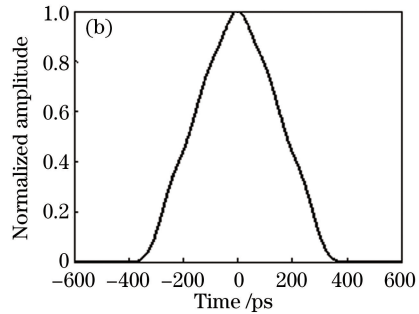
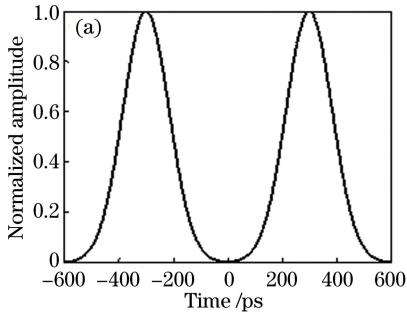


图 7 (a)输入的高斯脉冲;(b)整形后的三角形脉冲

Fig. 7 (a) Input Gaussian pulse; (b) triangular pulse after shaping

输入的脉冲宽度仍为 100 ps,调整系数为 $k_1 = 1, k_2 = -2$ 时,得到如图 8(a)所示的近似非对称三角形光脉冲,当调整系数 $k_1 = 2, k_2 = -1$ 时,得到如图 8(b)所示的近似非对称三角形光脉冲,这使得三角形超短波光脉冲在光通信领域的应用前景更加广阔。

光纤光栅可以将高斯脉冲积分成阶梯状脉冲。

令该系统的输入 $a_0(t)$ 为半峰全宽为 100 ps 的高斯脉冲,经过一阶积分后的输出脉冲为 $a_1(t)$,经过延时器后的输出脉冲为 $a_2(t)$,则系统输出脉冲 $a(t) = k_1 a_1(t) + k_2 a_2(t)$ 。当系数 $k_1 = 1, k_2 = -1$ 时,该整形系统的输出平顶脉冲的时域见图 6(a)。由于脉冲的频域也是反映脉冲性能的重要因素之一,因此,图 6(b)给出平顶脉冲的频域,可以看出平顶脉冲的能量主要集中在中心频率处,旁瓣迅速衰减,因此平顶脉冲能够被较好地应用在光通信中。

当系数 $k_1 = 1, k_2 = -1$ 时,并输入 2 个连续的高斯脉冲[见图 7(a)]时,则经过图 4 的整形系统后可近似得到对称三角光脉冲[见图 7(b)]。对称三角光脉冲在时域范围内具有前后沿恒定变化的特性,可以用于实现波长转换、光开关实验等^[16-17]。

当系数不变时,如果输入脉冲宽度发生 $\pm 10\%$ 的波动时,即输入脉冲的半峰全宽分别为 110 ps 和 90 ps 时,整形系统的输出波形如图 9 所示。由此可见,当输入脉冲脉宽发生 $\pm 10\%$ 波动时,该系统仍然可以输出效果较好的平顶脉冲和三角形脉冲,故该系统具有良好的稳定性。

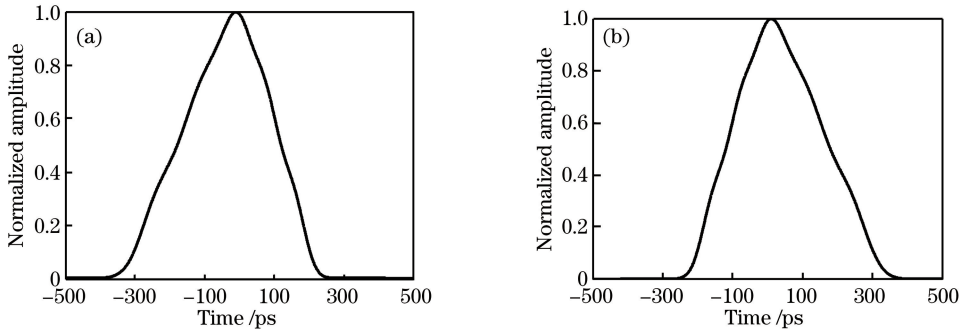


图 8 非对称的三角形脉冲。(a) $k_1=1, k_2=-2$; (b) $k_1=2, k_2=-1$

Fig. 8 Asymmetric triangular pulse. (a) $k_1=1, k_2=-2$; (b) $k_1=2, k_2=-1$

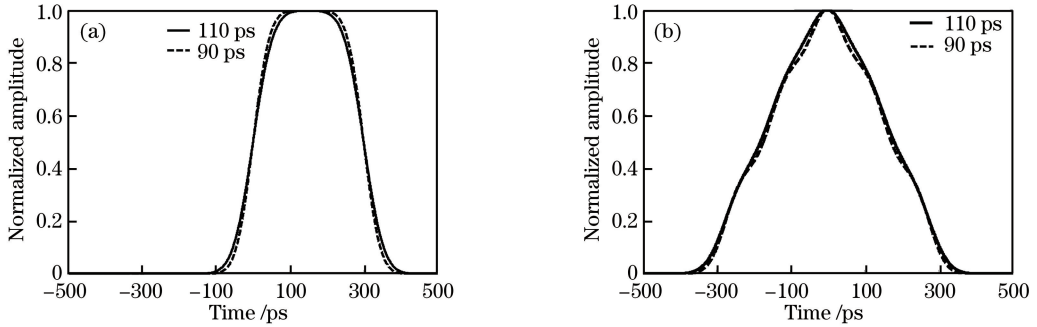


图 9 输入信号的波动对输出脉冲的影响。(a)平顶脉冲;(b)三角形脉冲

Fig. 9 Effect of the input signal fluctuation on the output pulse. (a) Flat-topped pulse; (b) triangular pulse

4 结 论

以相移光纤光栅为研究对象,结合模式耦合理论以及传输矩阵法,分析了相移光纤光栅的光谱特性,证明了相移光纤光栅的积分特性,并运用相移光纤光栅的一阶积分特性以及延时器设计出了新的整形结构。结果表明,本文设计的新整形结构可将高斯脉冲整形形成平顶脉冲和三角形脉冲,且得到较好的波形效果,可用于光开关实验、全光波长转换等光通信领域。调整结构中的系数,使输出的三角形光脉冲形状得以变化。当输入脉冲宽度发生波动时,该系统仍可得到效果较好的平顶脉冲和三角形光脉冲,验证了系统的稳定性,因此该整形结构可被更好地应用到更多的领域。

参 考 文 献

[1] Yao Y H, Lu C H, Xu S W, *et al.* Femtosecond pulse shaping technology and its applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184201.
姚云华, 卢晨晖, 徐淑武, 等. 飞秒激光脉冲整形技术及其应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184201.

[2] Li R X, Cheng Y, Leng Y X, *et al.* *Frontiers in ultrafast optics and ultra-intense laser technology*[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, 46(9): 1236-

1254.
李儒新, 程亚, 冷雨欣, 等. 超快光学与超强激光技术前沿研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(9): 1236-1254.

[3] Liang J C, Zhang A L. FBG array-based optical arbitrary waveform generation[J]. *Study on Optical Communications*, 2015(4): 46-48.
梁久灿, 张爱玲. 基于 FBG 阵列的任意波形产生装置[J]. *光通信研究*, 2015(4): 46-48.

[4] Liu Q, Ye Q, Cai H W, *et al.* Progress of pulse shaping technology using optical fiber devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(12): 120603.
刘琼, 叶青, 蔡海文, 等. 基于光纤器件的脉冲整形技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(12): 120603.

[5] Jia B H, Sheng Q Q, Feng D Q, *et al.* Study on the theory of super-structured fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(3): 247-251.
贾宝华, 盛秋琴, 冯丹琴, 等. 超结构光纤布拉格光栅的理论研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(3): 247-251.

[6] Dong X W, Guo P, Liu W K. Ultrashort optical pulse shaping based on phase-shifted fiber gratings differentiators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2): 0206007.

- 董小伟, 郭盼, 刘文楷. 基于相移光纤光栅微分器超短光脉冲整形 [J]. 光子学报, 2016, 45 (2): 0206007.
- [7] Krčmarík D, Slavík R, Park Y, *et al.* Nonlinear pulse compression of picosecond parabolic-like pulses synthesized with a long period fiber grating filter [J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7074-7087.
- [8] Zhang A L, Li C X. Dynamic optical arbitrary waveform generation with amplitude controlled by interference of two FBG arrays [J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23074-23081.
- [9] Dostovalov A V, Wolf A A, Parygin A V, *et al.* Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule [J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16232-16237.
- [10] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [11] Ruan Y, Pei L, Qi C H, *et al.* Research on *V-I* transfer matrix method for analyzing fiber gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3268-3271.
阮义, 裴丽, 祁春慧, 等. 光纤光栅的 *V-I* 传输矩阵法研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3268-3271.
- [12] Kulishov M, Azaña J. Design of high-order all-optical temporal differentiators based on multiple-phase-shifted fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6152-6166.
- [13] Berger N K, Levit B, Fischer B, *et al.* Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2007, 15 (2): 371-381.
- [14] Asghari M H, Azaña J. Design of all-optical high-order temporal integrators based on multiple-phase-shifted Bragg gratings [J]. Optics Express, 2008, 16 (15): 11459-11469.
- [15] Zhang L, Ning T G, Li H M, *et al.* Performance analysis and experiment research on optical temporal integrator [J]. Electro-Optic Technology Application, 2016, 31(4): 50-59.
张磊, 宁提纲, 李红梅, 等. 光时域积分器的性能分析与实验研究 [J]. 光电技术应用, 2016, 31(4): 50-59.
- [16] Zhang Y, Pei L, Wang Y Q, *et al.* Optimization of optical triangular pulses generator based on chirped fiber Bragg grating [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1306-1310.
张岩, 裴丽, 王一群, 等. 基于啁啾 FBG 的三角形光脉冲发生器的优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1306-1310.
- [17] Yuan J, Ning T G, Li Y Q, *et al.* Triangular light pulse generation technology for all-optical signal processing [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(5): 60-64.
袁瑾, 宁提纲, 李月琴, 等. 面向全光信号处理的三角形光脉冲产生技术 [J]. 光电技术应用, 2014, 29 (5): 60-64.