

# 频率啾啾高斯脉冲激光经体光栅的衍射特性

陈慧丽 闫爱民 胡志娟 石旺舟 金亚东 吕聪玲

(上海师范大学数理学院光电材料与器件重点实验室, 上海 200234)

**摘要** 利用描述脉冲激光与体光栅相互作用的耦合波方程, 系统研究了不同入射脉宽和啾啾参数的线性啾啾脉冲激光经体光栅衍射时, 频域内衍射光谱的振幅和相位变化特性。计算结果表明, 衍射啾啾脉冲振幅的光谱宽度受入射脉宽、啾啾参数和体光栅有效衍射谱宽的影响, 在体光栅有效衍射谱宽一定时, 随着入射脉宽的增大, 衍射谱宽减小, 衍射效率增大; 随着啾啾参数的增大, 衍射谱宽增大, 衍射效率降低; 对于衍射啾啾脉冲频谱的相位分布, 随着入射脉宽的增加和啾啾参数的减小, 相位变化幅度增大, 而且相位分布曲线呈现不对称特性。研究还发现, 适当选择体光栅的光栅矢量和入射角, 可以利用体光栅的布拉格衍射实现对线性啾啾脉冲激光的整形, 而且保持衍射脉冲的频率线性啾啾特性。

**关键词** 衍射; 衍射光学; 啾啾脉冲激光; 耦合波理论; 体光栅

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0605001

## Diffraction Properties of Frequency Chirped Gaussian Pulse Laser Beams through Volume Gratings

Chen Huili Yan Aimin Hu Zhijuan Shi Wangzhou Jin Yadong Lü Congling

(Key Laboratory of Optoelectronic Material and Device, College of Mathematics and Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract** Based on the coupled wave equations that describe the interaction of laser pulse with volume gratings, the diffraction properties of volume gratings illuminated by linear chirped pulse with various input pulse widths and chirped parameters are studied. The properties of the spectral intensity and phase of diffraction pulses are investigated. The calculations demonstrate that the diffraction spectral width is influenced by the input pulse width, chirped parameter and the spectral width of the volume grating. With the incident pulse width increasing, the diffraction spectral width is reduced, but the diffraction efficiency increases. With the increase of the chirped parameter, the diffraction spectral width is increased, but the diffraction efficiency decreases. The change of diffraction phase spectra is increased with the increase of the input pulse width and the decrease of the chirped parameter, and the curve of the phase spectral distribution is asymmetric. We also find that the Bragg diffraction of the volume grating can shape the linear chirped pulse laser, and keep perfectly the linear chirp characteristic of the diffraction pulse, when the grating vector and input angle are selected properly.

**Key words** diffraction; diffractive optics; chirped laser pulse; coupled wave theory; volume grating

**OCIS codes** 050.1970; 070.4790; 090.7330; 320.1590

## 1 引言

超短脉冲激光具有高时间分辨率和丰富的频谱, 在强场物理、超快成像和激光光谱学等领域得到

了广泛应用<sup>[1~3]</sup>。啾啾脉冲激光放大技术充分利用宽光谱特性将超短脉冲的脉冲功率大大提高。由于其宽光谱特性, 人们可使用透镜或光栅等光学色散

**收稿日期**: 2012-12-07; **收到修改稿日期**: 2013-01-31

**基金项目**: 国家自然科学基金(60907006)、上海市教委科研创新项目(13YZ063)、上海师范大学校级项目(SK201311, SK201214)和上海师范大学创新团队项目(DXL121)资助课题。

**作者简介**: 陈慧丽(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事衍射光学方面的研究。E-mail: chenhuili.shnu@gmail.com

**导师简介**: 闫爱民(1976—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事衍射光学和激光技术等方面的研究。

E-mail: yanaimin@shnu.edu.cn(通信联系人)

元件对啁啾脉冲激光进行整形<sup>[4,5]</sup>。因此,啁啾脉冲激光的传输和衍射特性研究对于拓展超短脉冲激光新型应用有重要意义。

McMullen<sup>[6]</sup>研究了啁啾脉冲激光经强色散光栅对衍射的传输特性,结果表明线性啁啾脉冲激光会发生严重形变。Chuang等<sup>[7]</sup>运用麦克斯韦方程和粒子数反转方程研究了啁啾脉冲激光的传输和放大特性,并通过实验验证了理论计算结果。余建军等<sup>[8]</sup>研究了正常色散光纤中的啁啾脉冲激光的时频域特性,计算和实验结果表明当入纤激光功率较大时,光纤非线性效应不可忽略。吴芳等<sup>[9]</sup>研究了啁啾激光脉冲在单模光纤中传输时啁啾和脉宽的变化以及相应的频谱相位变化。

体光栅是具有布拉格波长选择性的一种衍射光学元件,由于具有光学并行传输和处理、无干扰交叉传输、光束三维传播自由度以及空间和频率的多维复用等优点,被广泛应用于光波导、波分复用、信息存储和光开关等领域中。体光栅具有高衍射效率和大信息容量,因而在光学存储和彩色全息领域备受关注。超短脉冲激光经体光栅的衍射也引起了研究者的兴趣。Wang等<sup>[10]</sup>研究了体光栅参数对衍射谱宽的影响,考虑了入射光的偏振对衍射的影响<sup>[11]</sup>,梁玲亮等<sup>[12]</sup>研究了超短脉冲激光经体光栅衍射后的瞬时光强,但是他们仅考虑了无啁啾的高斯型脉冲经体光栅衍射时的光谱和脉冲特性,没有涉及入射脉冲频率啁啾激光的衍射特性。本文利用描述脉冲激光与体光栅相互作用的耦合波方程,系统研究了不同入射脉宽和啁啾参数的线性啁啾脉冲激光束经体光栅衍射时,频域内衍射光谱的振幅和相位变化特性。

## 2 啁啾脉冲激光衍射理论模型

采用的体光栅结构如图1所示。该体光栅在 $xy$ 面内无限大,光栅调制区域 $0 < z < d$ 的折射率为

$$n = n_0 + n_1 \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}), \quad n_1 \ll n_0, \quad (1)$$

式中 $K$ 为光栅矢量 $\mathbf{K}$ 的大小,且 $K = 2\pi/\Lambda$ , $\Lambda$ 为光栅间距; $n_0$ 和 $n$ 分别为光栅外均匀介质和光栅介质的折射系数, $n_1$ 为折射率调制度, $\varphi$ 为光栅矢量与 $z$ 轴的夹角。

一束高斯型线性啁啾脉冲激光,其光场的时域分布为

$$u_0(t) = \exp[-t^2/T^2] \exp[i(\omega_0 t + Ct^2/T^2)], \quad (2)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ 为脉冲的中心频率, $\lambda_0$ 为中心波

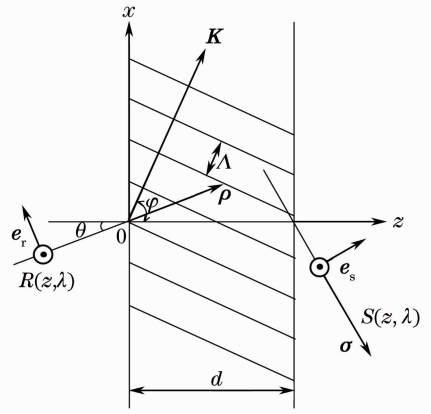


图1 体光栅衍射示意图

Fig. 1 Schematic of diffraction of volume grating

长, $c$ 为真空中的光速; $T = \Delta\tau/\sqrt{2\ln 2}$ , $\Delta\tau$ 为啁啾脉冲激光强度分布的脉冲半峰全宽, $C$ 为啁啾参数,其相应的频谱分布为

$$u_0(\lambda) = \sqrt{\frac{\pi}{1-iC}} T \exp\left\{-\frac{\left[\pi T c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)\right]^2}{1-iC}\right\}. \quad (3)$$

由于激光的发散角很小,假设脉冲光的所有频率成分都以中心频率 $\omega_0$ 对应的布拉格角 $\theta$ 入射,体光栅内的总光场写为

$$E(z, \lambda) = R(z, \lambda) \exp(-j\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) + S(z, \lambda) \exp(-j\mathbf{\sigma} \cdot \mathbf{r}), \quad (4)$$

式中 $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{\sigma}$ 分别为透射光和衍射光的传播矢量,且满足 $\mathbf{\sigma} = \mathbf{p} - \mathbf{K}$ 。

将(4)式代入波动方程,假设读出光和衍射光的振幅都为缓慢变化的函数,忽略它们的二阶导数<sup>[13]</sup>,并且只保留0级和-1级布拉格衍射项,得耦合波方程:

$$c_R R'(z, \lambda) + j\kappa S(z, \lambda) = 0, \quad (5)$$

$$c_S S'(z, \lambda) + j\varrho S(z, \lambda) + j\kappa R(z, \lambda) = 0, \quad (6)$$

式中 $\varrho(\omega) = \frac{K^2 \lambda_0}{4\pi n(\lambda_0)} - \frac{K^2 \lambda}{4\pi n(\lambda)}$ , $c_R = \cos \theta$ , $c_S = \cos \theta - K \cos \varphi/\beta$ , $\kappa = \pi n_1/\lambda$ 。

代入边界条件 $S(0, \lambda) = 0$ , $R(0, \lambda) = u_0(\lambda)$ ,解耦合波方程组,可得衍射和透射光束频谱分布为

$$S(d, \lambda) = -i u_0(\lambda) \sqrt{\frac{c_R}{c_S}} \exp(-i\xi) \frac{\sin(\gamma^2 + \xi^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2/\gamma^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

$$R(d, \lambda) = u_0(\lambda) \exp(-i\xi) \left[ \cos(\gamma^2 + \xi^2)^{1/2} + \frac{i \sin(\gamma^2 + \xi^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2/\gamma^2)^{1/2}} \right], \quad (8)$$

式中  $\xi = \vartheta d / (2c_s)$  为布拉格失配参数,  $\gamma = \kappa d / \sqrt{c_{RC} c_s}$  为耦合常数。

体光栅对脉冲高斯光束衍射的衍射效率为所有频率的衍射光的能量与所有频率的透射光波的能量和衍射光波的能量之和的比值, 即

$$\eta = P_d / (P_d + P_t), \quad (9)$$

式中

$$P_d = Z^{-1} \iint S(\omega) S^*(\omega) d\omega, P_t = Z^{-1} \iint R(\omega) R^*(\omega) d\omega.$$

体光栅对啁啾脉冲激光的有效衍射谱宽  $\Delta\lambda_G$  为衍射效率降低至其峰值的一半时波长的变化范围, 采用类似 Kogelnik 耦合波理论<sup>[13]</sup> 的方法, 将  $\xi$  做泰勒展开并保留一阶导数项, 可得

$$\vartheta = -\frac{\Delta\lambda\pi}{\Lambda^2} \frac{d}{d\lambda} \frac{\lambda}{n(\lambda)} \Big|_{\lambda_0}. \quad (10)$$

代入  $\xi = \vartheta d / (2c_s)$  可得

$$\Delta\lambda_G = 2\Delta\lambda \approx \frac{4\bar{\xi}\Lambda^2 \cos \theta n(\lambda_0)}{\pi d} \frac{v_g}{v_p}, \quad (11)$$

式中  $\Delta\lambda = |\lambda - \lambda_0|$ ,  $v_p = \frac{c}{n(\lambda_0)}$  为相速度,  $v_g =$

$\frac{c}{n(\lambda_0) - \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda} \Big|_{\lambda_0}}$  为群速度,  $\bar{\xi}$  为衍射效率降低至其

峰值的一半时  $\xi$  的近似值。

### 3 啁啾脉冲激光经体光栅衍射特性

#### 3.1 衍射脉冲振幅变化特性

取垂直偏振的线性啁啾高斯脉冲的中心波长为  $1.06 \mu\text{m}$ ,  $d=1 \text{ mm}$ ,  $\Lambda=3 \mu\text{m}$ ,  $n_1=2.5 \times 10^{-4}$ , 啁啾参数  $C=2$ , 入射脉冲宽度  $\Delta\tau$  分别取 36, 109, 328 fs, 与其相对应的入射脉冲谱宽  $\Delta\lambda_1$  与体光栅有效谱宽  $\Delta\lambda_G$  的关系如表 1 所示, 这些啁啾脉冲激光经体光栅作用的衍射光谱分布如图 2 所示,  $I_0$  表示入射光谱强度,  $I_s$  表示衍射光谱强度。当  $\Delta\tau=36 \text{ fs}$  时, 入射脉冲的谱宽远大于体光栅的有效衍射谱宽, 在图 2 中可以看出此时的衍射光谱宽度近似为体光栅的有效衍射谱宽; 当  $\Delta\tau=109 \text{ fs}$  时, 入射脉冲谱宽近似于体光栅的有效衍射谱宽, 此时的衍射谱宽近似等于体光栅的有效衍射谱宽; 当  $\Delta\tau=328 \text{ fs}$  时, 入射脉冲谱宽小于体光栅的有效衍射谱宽, 此时衍射谱宽近似等于入射脉冲谱宽。对一特定体光栅, 衍射效率随着入射脉宽的增大而增大, 且有饱和趋势, 如图 3 所示。

由上述讨论可知当  $C=2$ ,  $\Delta\tau=328 \text{ fs}$  时, 入射啁啾脉冲激光的各频谱成分均能经体光栅衍射。当

表 1 入射脉宽不同时入射谱宽与体光栅有效衍射谱宽的关系

Table 1 Relation between spectral width of input pulse and valid volume grating diffraction spectral width at different temporal widths of input pulses

$\Delta\tau / \text{fs}$	$\Delta\lambda_1 / \mu\text{m}$
36	$0.1026 \approx 3\Delta\lambda_G$
109	$0.0339 \approx \Delta\lambda_G$
328	$0.0113 \approx 1/3 \cdot \Delta\lambda_G$

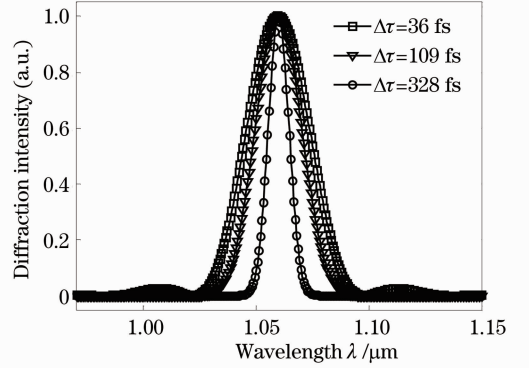


图 2 不同入射脉宽的啁啾脉冲激光衍射频谱强度分布  
Fig. 2 Spectral distributions of diffraction intensity for chirped pulses with different input pulse widths

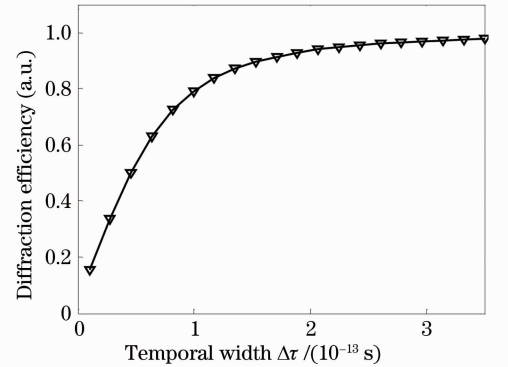


图 3 衍射效率随入射脉宽变化的曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency changing with temporal width of input pulses

$\Delta\tau=328 \text{ fs}$  时, 取啁啾参数  $C$  分别为 0, 2, 20, 衍射频谱如图 4 所示, 衍射谱宽随着啁啾参数  $C$  的增大而增大, 直到近似于体光栅的有效衍射谱宽。这是因为随着  $C$  的增大, 入射啁啾脉冲激光谱宽增大, 当入射脉冲谱宽大于体光栅的有效衍射谱宽时, 入射脉冲超过体光栅有效衍射谱宽的部分频谱成分不能被体光栅衍射。衍射效率与啁啾参数的关系如图 5 所示, 随着啁啾参数  $C$  的增大, 衍射效率降低。当  $C$  较小时, 对衍射效率的影响较大, 随着  $C$  的增

大衍射效率下降很快;当  $C$  较大时,对衍射效率的影响很小。

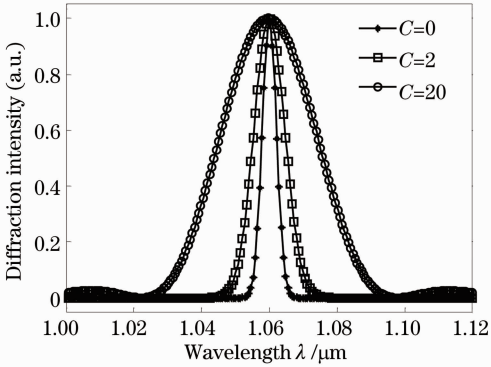


图 4 不同啁啾参数  $C$  的啁啾脉冲激光衍射频谱强度分布

Fig. 4 Spectral distributions of diffraction intensity for chirped pulses with different chirped parameters

### 3.2 衍射脉冲相位变化特性

对于线性啁啾脉冲激光,经体光栅的布拉格衍射后,3.1 节讨论了衍射频谱的振幅变化规律。由于入射脉冲激光是频率啁啾的,因此衍射频谱的相位变化特性的研究也是必要的。图 6(a)给出了不

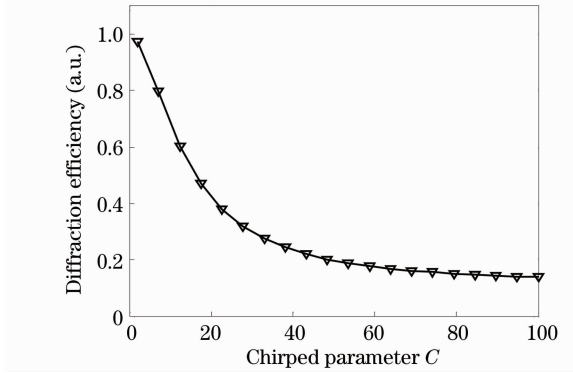
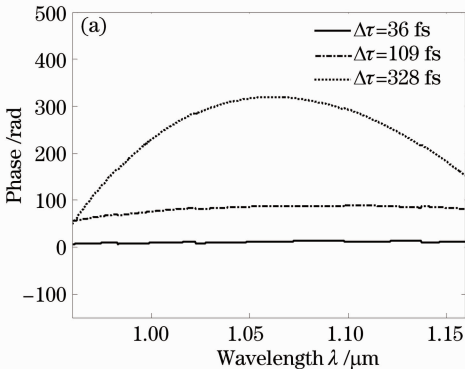


图 5 衍射效率随啁啾参数  $C$  的变化曲线

Fig. 5 Diffraction efficiency changing with chirped parameter  $C$  of input pulses

同入射脉宽时,啁啾脉冲激光衍射频谱相位的变化情况。可以看出随着入射脉冲宽度的增加,衍射脉冲相位的变化加大,而且与入射线性啁啾脉冲的相位分布相比,呈现了不对称性。图 6(b)给出了啁啾参数  $C$  变化时,啁啾脉冲激光衍射频谱的相位分布情况。可以看出随着啁啾参数  $C$  的增大,衍射脉冲频谱的相位变化幅度减小,也出现了类似图 6(a)中相位分布曲线不对称的性质,这是由于体光栅衍射后啁啾脉冲中心的漂移即群速度延迟特性造成的。

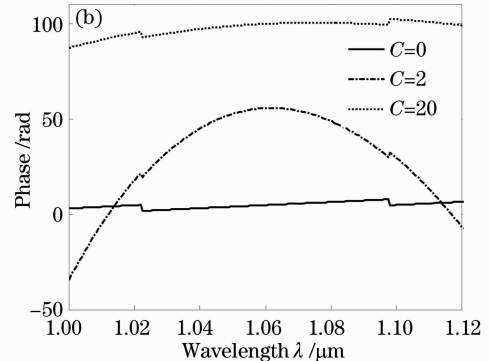


图 6 (a)不同入射脉宽,(b)不同啁啾参数的啁啾脉冲衍射相位分布

Fig. 6 Spectral distributions of diffraction phases for chirped pulses with (a) different input pulse widths and (b) different chirped parameters

根据文献[14],经体光栅衍射后,衍射光的群延迟定义为  $\tau_g = d\phi_s/d\omega$ ,  $\phi_s$  为衍射脉冲的相位。由(7)式可得线性啁啾脉冲激光经体光栅衍射后,衍射啁啾脉冲的群延迟为

$$\tau_g = k_1(\omega - \omega_0) - k_2 \frac{v_p}{v_g}, \quad (12)$$

式中  $k_1 = \frac{T^2 C}{2(1+C^2)}$  为入射脉冲的线性啁啾系数,

$$k_2 = \frac{Kcd \cos(2\varphi - \theta)}{4n(\omega)\omega^2 C_s^2}.$$

从(12)式可以看出,衍射脉冲的群延迟除了

与入射脉宽和线性啁啾系数有关,还与体光栅的光栅矢量、光栅厚度和材料的色散等特征参量相关。这些参量可使得衍射啁啾脉冲的频率产生非线性变化,从而导致相位畸变。当  $k_2=0$ ,即  $2\varphi - \theta = \frac{\pi}{2}$  时,衍射脉冲的群延迟和初始入射脉冲的频率线性啁啾形式相同,因此,适当选择体光栅的光栅矢量方向和入射角,可以用体光栅的布拉格衍射实现对线性啁啾脉冲激光的整形和滤波,而且保持衍射脉冲的频率线性啁啾特性,这对于利用频率线性啁啾的超短

脉冲激光的实际应用有非常重要的意义。

## 4 结 论

利用描述脉冲激光与体光栅相互作用的耦合波方程,系统研究了线性啁啾脉冲激光经体光栅衍射时,频域内衍射光谱的振幅和相位变化特性。计算结果表明,随着入射脉宽的增大,衍射谱宽减小,衍射效率增大;随着啁啾参数的增大,衍射谱宽增大,衍射效率降低;随着入射脉宽的增大和啁啾参数的减小,衍射啁啾脉冲频谱的相位变化幅度增大,相位分布曲线呈现不对称特性。在适当的光栅矢量和入射角时,可以利用体光栅的布拉格衍射实现对线性啁啾脉冲激光的整形,而且保持衍射脉冲的频率线性啁啾特性,这对于利用频率线性啁啾的超短脉冲激光的实际应用有非常重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 A. M. Weiner. Ultrafast optical shaping: a tutorial review [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(15): 3669~3692
- 2 Qu Fuqi, Hu Yihua, Leng Jiaofeng. Reflective tomography lidar imaging based on chirped pulse signal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 55~59  
瞿福琪, 胡以华, 冷蛟峰. 基于啁啾脉冲的反射层析激光雷达成像[J]. *光电工程*, 2012, **39**(4): 55~59
- 3 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (V): imaging resolution and antenna aperture function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 4 Guo Ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1582~1585  
郭爱林, 杨庆伟, 张福领等. 啁啾脉冲的光谱整形[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 5 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274  
郭爱林, 杨庆伟, 谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 6 J. D. McMullen. Analysis of compression of frequency chirped optical pulses by a strongly dispersive grating pair [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(5): 737~741
- 7 Y. H. Chuang, L. Zheng, D. D. Meyerhofer. Propagation of light pulses in a chirped-pulse-amplification laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(1): 270~280
- 8 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian. Chirp pulse propagation in normal dispersion fiber [J]. *J. Beijing University of Posts and Telecommunications*, 1997, **20**(3): 59~63  
余建军, 杨伯君, 管克俭. 啁啾脉冲在正常色散光纤中的传输[J]. *北京邮电大学学报*, 1997, **20**(3): 59~63
- 9 Wu Fang, Jiang Zeming, Huang Zhaoming. Analysis of chirped light pulse transmission through single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **23**(6): 495~499  
吴芳, 蒋泽明, 黄肇明. 单模光纤中光脉冲啁啾的分析[J]. *中国激光*, 1996, **23**(6): 495~499
- 10 C. H. Wang, L. R. Liu, A. M. Yan *et al.*. Pulse shaping properties of volume holographic gratings in anisotropic media [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(12): 3191~3196
- 11 Wang Chunhua, Liu Liren, Yan Aimin *et al.*. Diffraction properties of transmission photorefractive volume holographic grating read by an ultrashort pulsed laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 801~805  
王春花, 刘立人, 闫爱民等. 透射型光折变体全息光栅对超短脉冲激光光束衍射的特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 801~805
- 12 Liang Lingliang, Yan Xiaona, Han Feng *et al.*. Study on instantaneous diffraction and group time delay characteristics of a transmission volume holographic grating under ultra-short laser pulse readout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0505001  
梁玲亮, 阎晓娜, 韩峰等. 透射型体光栅对超短脉冲的瞬时衍射及其群时延的特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0505001
- 13 H. Kogelink. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 14 G. Zhang, W. Che, B. Han *et al.*. Recursion formula for reflectance and the enhanced effect on the light group velocity control of the stratified and phase-shifted volume index gratings [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2055~2066

栏目编辑: 李文喆