

doi:10.3788/gzxb20144312.1214003

# 超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅的时域特性

邱彪,张翔,封建胜,高帆,吴尚,张桂菊,邹快盛,袁孝

(苏州大学 现代光学技术研究所;江苏省先进光学制造技术重点实验室;  
教育部/江苏省现代光学技术重点实验室,江苏 苏州 215006)

**摘 要:**利用 Kogelnik 耦合波理论对超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅的时域衍射特性进行了研究,讨论了透射型体 Bragg 光栅的群延迟色散和光栅结构参数之间的关系,分析了群延迟色散和频谱剪切对衍射脉冲时域强度分布的影响.结果表明:当入射超短脉冲脉宽为 100 fs 时,经透射型体 Bragg 光栅衍射后的脉冲展宽主要源自光栅对入射脉冲的频谱剪切,当入射超短脉冲脉宽为 10 fs 时,衍射脉冲的展宽量不仅受频谱剪切的影响,而且与光栅的群延迟色散密切相关.

**关键词:**透射型体 Bragg 光栅;超短脉冲激光;耦合波理论;群延迟色散;衍射光强

中图分类号:

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1214003-5

## Time-domain Properties of Ultrashort Pulse Laser Diffracted by Transmitting Volume Bragg Gratings

QIU Biao, ZHANG Xiang, FENG Jian-sheng, GAO Fan, WU Shang,  
ZHANG Gui-ju, ZOU Kuai-sheng, YUAN Xiao

(*Institute of Modern Optical Technologies; Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province and Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*)

**Abstract:** The time-domain properties of ultrashort pulse laser through transmitting volume Bragg grating was studied with Kogelnik's coupled-wave theory. The dependence between group delay dispersion of transmitting volume Bragg grating and grating parameters was discussed. The influence of group delay dispersion and spectrum clipping on the intensity distribution of diffracted beam in time-domain was studied. The results show that the stretching of diffracted pulse is mainly from the spectrum clipping in the case of input pulse duration of 100 fs, and the stretching is influenced by spectrum clipping and group delay dispersion at the input pulse duration of 10 fs.

**Key words:** Transmitting volume Bragg grating; Ultrashort pulse laser; Coupled-wave theory; Group delay dispersion; Diffraction intensity

**OCIS Codes:** 090.7330; 140.7090; 160.5335; 260.2030; 050.1970; 320.5550

## 0 引言

透射型体 Bragg 光栅具有角度选择和波长选择性 (Wavelength Selectivity, WS), 在角选择滤波<sup>[1-3]</sup> 和光束合成<sup>[4-6]</sup> 等多方面有着广阔的应用前景. 飞秒级超短脉冲激光脉宽窄、频谱带宽大, 当它通过色散介质传输时

会产生时空畸变<sup>[7-9]</sup>. 因此, 研究超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅的衍射特性对于抑制时空畸变有重要的参考价值.

近年来, 人们对超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅的衍射特性已进行了广泛研究. 杨冰等<sup>[10]</sup> 讨论了超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅的瞬时衍射特

**基金项目:**国家自然科学基金 (Nos. 91023009, 61108024)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金 (Nos. 11176021, 11076021)、江苏省高校自然科学基金项目 (Nos. 10KJA140045, 09KJB140008) 和江苏省优势学科资助项目资助

**第一作者:**邱彪 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 Bragg 光栅、超短脉冲激光的时空畸变. Email: qb0923@126.com

**导师 (通讯作者):**袁孝 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为纳米结构光学器件制备、光电材料与激光技术. Email: xyuan@suda.edu.cn

**收稿日期:**2014-04-01; **录用日期:**2014-06-30

<http://www.photon.ac.cn>

性,分析了光栅结构参数对衍射脉冲时域光强分布的影响;梁玲亮等<sup>[11]</sup>讨论了光栅结构参数对衍射脉冲群时延的影响;王准生等<sup>[12]</sup>讨论了体光栅在超短脉冲激光照射下的塔尔博特效应;Siiman等<sup>[13]</sup>讨论了超短脉冲激光通过单块透射型体 Bragg 光栅后的脉冲波面倾斜现象;Qiu等<sup>[14]</sup>讨论了超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅衍射后的空间啁啾现象.然而有关透射型体 Bragg 光栅群延迟色散的研究,以及群延迟色散对衍射脉冲时域光强影响的研究均未见详细报道.本文根据 Kogelnik 耦合波理论,研究了透射型体 Bragg 光栅在波长 800 nm 处的群延迟色散(Group Delay Dispersion,GDD);分析了透射型体 Bragg 光栅的群延迟色散来源,以及和光栅结构参数之间的关系;并讨论了入射超短脉冲激光的脉冲宽度分别为 100 fs 和 10 fs 时,频谱剪切和群延迟色散对衍射脉冲时域光强分布影响.

## 1 理论分析

图 1 是超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅衍射示意图.其中  $\Lambda$  为光栅周期, $d$  为光栅厚度, $n_0$  是基底折射率, $K$  表示光栅常数( $K=2\pi/\Lambda$ ), $\theta_r$  是超短脉冲激光的入射角.入射超短脉冲激光具有高斯型分布,即

$$E_0(t) = \exp(-i\omega_0 t - t^2/T^2) \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  为脉冲的中心频率, $T = \Delta\tau/\sqrt{2\ln 2}$ , $\Delta\tau$  为高斯脉冲强度分布的半峰全宽.对应的频谱分布为

$$E_0(\omega) = \sqrt{\pi} T \exp[-T^2(\omega - \omega_0)^2/4] \quad (2)$$

根据 Kogelnik 的耦合波理论,光栅中存在的两束光分别为衍射光  $S(\omega, z)\exp(-ik_s \cdot r)$  和透射光  $R(\omega, z)\exp(-ik_R \cdot r)$ ,其中  $k_s$  和  $k_R$  分别为衍射射脉冲和透射射脉冲在光栅中的传输矢量, $\exp(-ik_s \cdot r)$  和  $\exp(-ik_R \cdot r)$  为衍射脉冲和透射脉冲传输过程中产生的相移因子.传输矢量可表示为

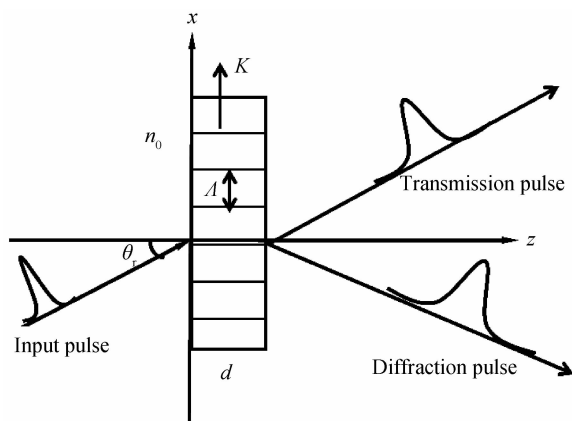


图 1 超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅衍射示意图  
Fig. 1 The diffraction of the transmitting volume Bragg grating under ultrashort pulse laser illumination

$$\begin{cases} \mathbf{k}_R = \beta \begin{pmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{k}_S = \beta \begin{pmatrix} \sin \theta - K \sin \varphi/\beta \\ 0 \\ \cos \theta - K \cos \varphi/\beta \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\beta = 2\pi n/\lambda$ , $\theta$  为布拉格角, $2\Lambda \sin \theta = \lambda/n$ .

耦合波方程为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} c_R R' + \alpha R = -i\kappa S \\ c_S S' + (\alpha + i\vartheta) S = -i\kappa R \end{cases} \quad (4)$$

式中  $c_s = \cos \theta - K \cos \varphi/\beta$ , $c_R = \cos \theta$ , $\varphi$  为光栅的倾斜角, $\alpha$  为吸收系数, $\vartheta = K \cos(\varphi - \theta) - K^2 \lambda/4\pi n$ , $\kappa = \omega n_1/(2c)$  为耦合系数.

把边界条件  $S(0, \lambda) = 0$ , $R(0, \lambda) = E_0(\omega)$  带入式(4),解方程可得

$$S(z, \omega) = -i\nu z \sqrt{\frac{c_R}{c_S}} \exp(i\xi z) \cdot \frac{\sin \sqrt{(\xi z)^2 + (\nu z)^2}}{\sqrt{(\xi z)^2 + (\nu z)^2}} E_0(\omega) \quad (5)$$

式中  $\xi = \pi^2 c(1/\omega - 1/\omega_0)/[\Lambda^2 n \cos \theta]$ , $\nu = \omega n_1/(2c \cos \theta)$ ,则由光栅结构引入的相移因子为  $-i \exp(i\xi z)$ .衍射脉冲光场随频率变化的表达式为

$$E_d(z, \omega) = S(z, \omega) \exp(-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}) \quad (6)$$

衍射脉冲光场随时间变化的表达式为

$$E_d(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_d(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (7)$$

衍射光强随时间变化关系为

$$I(z, t) = |E_d(z, t)|^2 \quad (8)$$

## 2 数值模拟与分析

选取基于光热敏折变玻璃的透射型体 Bragg 光栅,光栅矢量倾斜角为  $90^\circ$ ,光热敏折变玻璃的折射率和波长之间满足柯西色散公式(波长的单位为微米) $n^2(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda^2 + A_2/\lambda^4 + A_3/\lambda^6 + A_4/\lambda^8 + A_5/\lambda^{10}$  (9) 式中  $A_0 = 2.20959$ , $A_1 = -9.71400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ , $A_2 = 9.99400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , $A_3 = 1.37070 \times 10^{-4} \mu\text{m}^4$ , $A_4 = -2.40635 \times 10^{-6} \mu\text{m}^6$ , $A_5 = 2.96604 \times 10^{-7} \mu\text{m}^8$ .衍射光在光栅内经过的距离为  $L = d/\cos \theta$ .入射超短脉冲激光的中心波长为 800 nm,入射脉冲的脉冲宽度分别为 10 fs 和 100 fs.为了讨论方便,将衍射脉冲时域光强分布的中心位置平移到  $t=0$  处.

### 2.1 体 Bragg 光栅的群延迟色散

根据式(2)和式(6),可得超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅衍射后在  $z=d$  处的相位变化量.光栅结构引入的相位变化量为

$$\varphi_1(\omega) = \pi^2 c d (1/\omega - 1/\omega_0) / (\Lambda^2 n \cos \theta) + \pi/2 \quad (10)$$

传输过程光栅材料本身引入的相位变化量为

$$\varphi_2(\omega) = -\omega n d \cos \theta / c + (\beta \sin \theta - K) d \tan \theta \quad (11)$$

总的相位变化为

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \quad (12)$$

对式(12)在中心角频率处做级数展开,忽略高阶色散的影响,可得

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \varphi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \varphi''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + o(\omega - \omega_0)^3 \quad (13)$$

式中  $\varphi'(\omega_0)$  和  $\varphi''(\omega_0)$  分别为在中心角频率  $\omega_0$  处的群延时和群延迟色散。根据式(10)和式(11)可知,体 Bragg 光栅的群延迟色散和光栅周期、厚度有关。

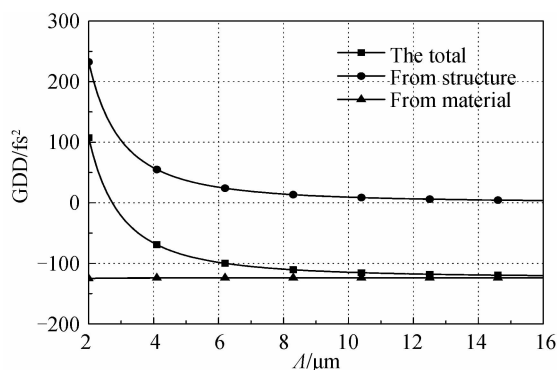


图2 群延迟色散随光栅周期变化关系曲线

Fig. 2 The dependence between group delay dispersion and grating period

当光栅厚度为 3 mm, 折射率调制度为 130 ppm 时, 体 Bragg 光栅的群延迟色散由光栅结构以及光栅材料色散两部分的贡献组成, 光栅结构引入正的群延迟色散, 且大小随光栅周期的增大而减小, 并逐渐趋近于零。光栅材料色散引入了负的群延迟色散, 当光栅周期为 2  $\mu\text{m}$  时, 其大小为 125  $\text{fs}^2$ ; 当光栅周期为 16  $\mu\text{m}$  时, 其大小为 124  $\text{fs}^2$ , 群延迟色散随光栅周期变化而减少的程度较小。因此, 透射型体 Bragg 光栅的群延迟色

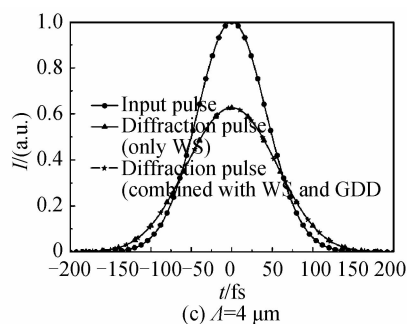
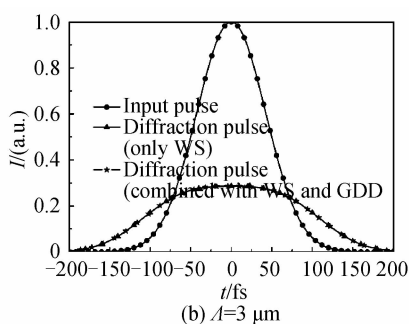
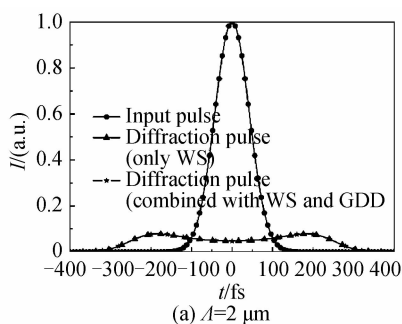


图4 不同光栅周期情况下, 衍射脉冲时域光强分布

Fig. 4 Intensity of the diffracted pulses at different grating period versus time

可见, 随光栅周期的增大, 衍射脉冲的峰值光强增大, 在时域上的展宽程度减小。这是由于随光栅周期增大, 光栅的波长选择性减弱, 衍射的频谱成分增多, 所以衍射脉冲的总光强增大, 对应到时域上, 衍射脉冲的展宽程度就会减小。

散随着光栅周期增大而从正值逐渐减小到负值, 并趋于一定值。

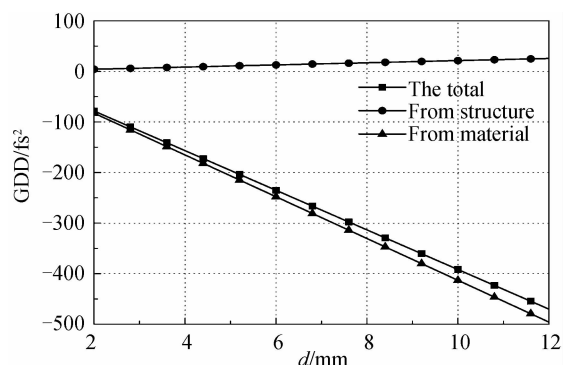


图3 群延迟色散随光栅厚度变化关系曲线

Fig. 3 The dependence between group delay dispersion and grating thickness

透射型体 Bragg 光栅的群延迟色散随光栅厚度变化关系如图 3。其中光栅周期为 12  $\mu\text{m}$ , 光栅引入了负群延迟色散, 其大小随着光栅厚度的增大而线性增大; 光栅结构引入了正的群延迟色散, 且大小随着光栅厚度的增大而略有增大; 光栅材料色散引入负的群延迟色散, 其大小随光栅厚度增加线性增大, 且增加速率远大于光栅结构引入的群延迟色散, 此时光栅材料色散贡献占光栅群延迟色散的主要部分。

## 2.2 入射脉冲 100 fs 时, 衍射脉冲时域光强分布

当透射型体 Bragg 光栅厚度为 3 mm, 折射率调制度为 130 ppm, 光栅周期分别为 2  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$  和 4  $\mu\text{m}$  时, 衍射脉冲时域光强分布如图 4。图 4 中“only WS”表示透射型体 Bragg 光栅波长选择性小于入射脉冲谱宽时引起的频谱剪切对衍射脉冲时域光强分布的影响; “combined with WS and GDD”表示由频谱剪切和透射型体 Bragg 光栅本身的群延迟色散共同作用对衍射脉冲时域光强分布的影响。

当透射型体 Bragg 光栅周期为 4  $\mu\text{m}$ , 光栅厚度分别为  $d=2 \text{ mm}$ 、 $d=4 \text{ mm}$  和  $d=6 \text{ mm}$ , 折射率调制度分别为  $n_1=200 \text{ ppm}$ 、 $n_1=100 \text{ ppm}$  和  $n_1=65 \text{ ppm}$  时, 衍射脉冲时域光强分布如图 5。

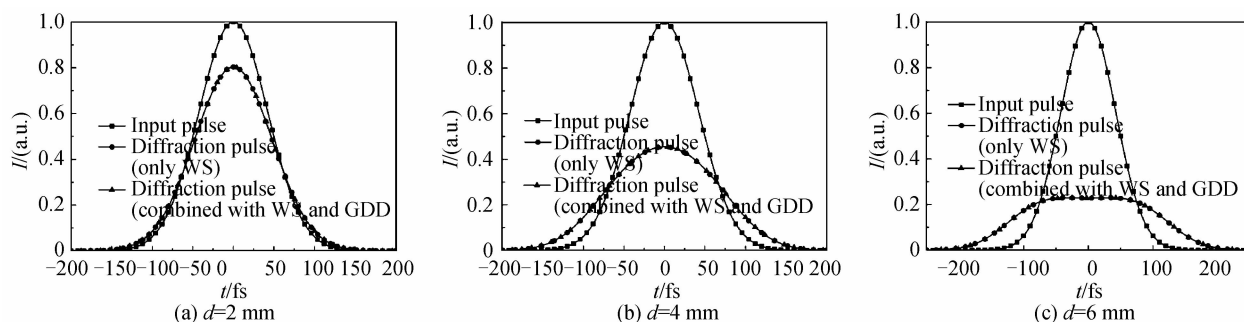


图5 不同光栅厚度情况下,衍射脉冲时域光强分布

Fig. 5 Intensity of the diffracted pulses at different grating thickness versus time

在图5中,随光栅厚度的增大,衍射脉冲被展宽的程度增大.这是由于随着光栅厚度的增大,光栅的波长选择性增强,被光栅衍射的频谱成分减少,从而衍射脉冲被展宽程度越来越大.当入射脉冲宽度为100 fs时,衍射脉冲在时域上的展宽主要源于光栅波长选择性对入射脉冲的频谱剪切.

### 2.3 入射脉冲10 fs时,衍射脉冲时域光强分布

当透射型体 Bragg 光栅厚度为3 mm,折射率调制度为130 ppm,光栅周期分别为10  $\mu\text{m}$ 、12  $\mu\text{m}$ 和16  $\mu\text{m}$ 时,衍射脉冲时域光强分布如图6所示.在图6(a)中,当光栅周期为10  $\mu\text{m}$ 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到19.2 fs,频谱剪切引入的展宽量为9.2 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到

25.1 fs,群延迟色引入的展宽量为5.9 fs;在图6(b)中,当光栅周期为12  $\mu\text{m}$ 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到14 fs,频谱剪切引入的展宽量为4 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到28.6 fs,群延迟色引入的展宽量为14.6 fs;在图6(c)中,当光栅周期为16  $\mu\text{m}$ 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到11 fs,频谱剪切引入的展宽量为1 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到32.6 fs,群延迟色引入的展宽量为21.6 fs.可见随着光栅周期的增大,频谱剪切引入的展宽量减小,群延迟色散引入的展宽量在增大,这是由于随着光栅周期的增大,衍射脉冲包含的频谱成分增多,光栅的群延迟色散对衍射脉冲展宽程度的影响增大.

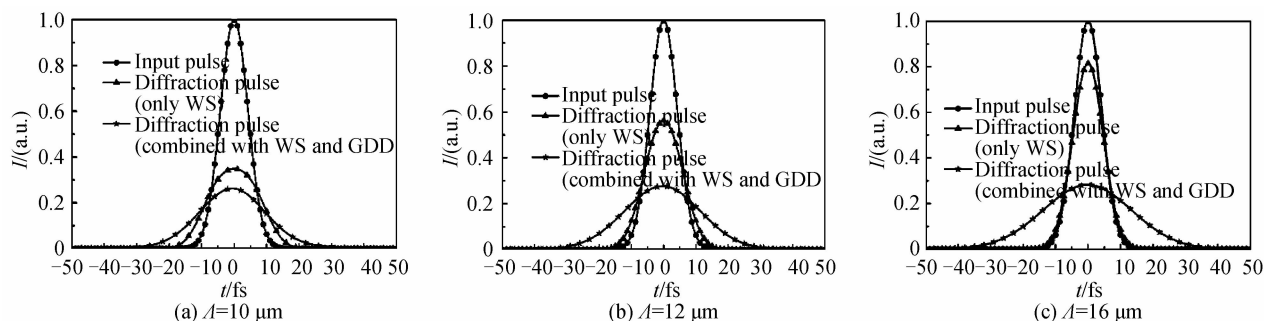


图6 不同光栅周期情况下,衍射脉冲时域光强分布

Fig. 6 Intensity of the diffracted pulses at different grating period versus time

当透射型体 Bragg 光栅周期为12  $\mu\text{m}$ ,光栅厚度分别为  $d=2$  mm、 $d=4$  mm和  $d=6$  mm,折射率调制度

分别为  $n_1=200$  ppm、 $n_1=100$  ppm和  $n_1=65$  ppm时,衍射脉冲时域光强分布如图7.

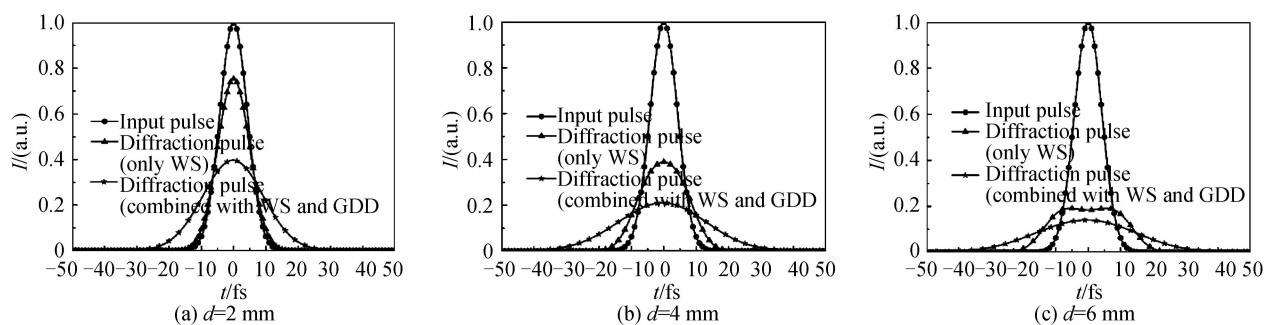


图7 不同光栅厚度情况下,衍射脉冲时域光强分布

Fig. 7 Intensity of the diffracted pulses at different grating thickness versus time

在图 7 中,当光栅厚度为 2 mm 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到 11.6 fs,频谱剪切引入的展宽量为 1.6 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到 22.3 fs,群延迟色散引入的展宽量为 10.7 fs;当光栅厚度为 4 mm 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到 18 fs,频谱剪切引入的展宽量为 8 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到 32.6 fs,群延迟色散引入的展宽量为 14.6 fs;当光栅厚度为 6 mm 时,由于频谱剪切,衍射脉冲被展宽到 28.5 fs,频谱剪切引入的展宽量为 18.5 fs,在频谱剪切和群延迟色散共同作用下衍射脉冲被展宽到 37.4 fs,群延迟色散引入的展宽量为 8.9 fs.可见随着光栅厚度的增大,频谱剪切引入的展宽量在增大,在群延迟色散作用下衍射脉冲进一步被展宽.随着光栅厚度的增大,虽然衍射脉冲包含的频谱成分减少,但群延迟色散随着光栅厚度的增加而线性增大,最终导致衍射脉冲进一步被展宽.

### 3 结论

采用 Kogelnik 耦合波理论,分析了透射型体 Bragg 光栅的群延迟色散特性,以及与光栅结构参数之间的关系.透射型体 Bragg 光栅的群延迟色散由光栅结构和光栅基底材料引入,它随着光栅周期增大而从正值逐渐减小到负值,并最终趋近于一定值;随着光栅厚度的增大,光栅引入负群延迟色散,其大小线性增大.讨论了不同脉宽的超短脉冲激光经透射型体 Bragg 光栅衍射后的时域光强分布.频谱剪切和光栅的群延迟色散都会引起衍射脉冲展宽,但两者引入的展宽量不同.当入射脉冲宽度为 100 fs 时,衍射脉冲展宽主要源自光栅波长选择性对入射脉冲的频谱剪切.当入射脉冲宽度为 10 fs 时,衍射脉冲的展宽量不仅受频谱剪切的影响,而且和光栅的群延迟色散有关,随着光栅周期的增大,频谱剪切引入的展宽量减少,而群延迟色散引入的展宽量在增大;当光栅厚度增大时,虽然衍射脉冲包含的频谱成分减少,但群延迟色散导致衍射脉冲进一步被展宽.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Xiang, YUAN Xiao, WU Shang, *et al.* Two-dimensional angular filtering by volume Bragg gratings in photothermorefractive glass[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(11): 2167-2169.
- [2] ZHANG Xiang, YUAN Xiao, FENG Jian-sheng, *et al.* Optimization of spatial filter with volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(3): 663-665.
- [3] 袁孝, 吴尚, 张翔, 等. 宽带角度选择激光滤波器: 中国, ZL201110001143.0[P]. 2003-06-29.
- [4] ANDRUSYAK O, SMIMOV V, VENUS G, *et al.* Beam combining of lasers with high spectral density using volume Bragg gratings[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(13): 2560-2563.
- [5] PU Shi-bing, JIANG Zong-fu, XU Xiao-jun. Numerical analysis of spectrum beam combing by volume Bragg grating[J]. *High Power Laser and particle Beams*, 2008, **20**(5): 721-724.  
蒲世兵, 姜宗福, 许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(5): 721-724.
- [6] ZHANG Xiang, GAO Fan, FENG Jian-sheng, *et al.* Wavelength combing with volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glasses[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(3): 030901.
- [7] AKTURK S, GU X, BOWLAN P, *et al.* Spatio-temporal couplings in ultrashort laser pulses[J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(9): 093001.
- [8] RULLIERE C. Femtosecond laser pulses: principles and experiments[M]. New York: Springer, 2005.
- [9] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] YANG Bing, YANG Yan-hua, ZHANG Hong-fang, *et al.* Instantaneous characteristics of diffraction and transmission of photorefractive grating illuminated by ultrashort pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 204-208.  
杨冰, 杨延华, 张洪方, 等. 超短脉冲光通过光折变体光栅衍射及透射光强的瞬时变化特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 204-208.
- [11] LIANG Ling-liang, YAN Xiao-na, HAN Feng, *et al.* Study on instantaneous diffraction and group time delay characteristics of a transmission volume holographic grating under ultrashort laser pulse readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 24-29.  
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): 24-29.
- [12] WANG Huai-sheng, FU Shou-li, ZHENG Ying-dong, *et al.* The temporal Talbot effect of a grating illuminated by an ultrashort pulse laser beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 152-156.  
王准生, 傅守利, 郑迎东, 等. 在超短脉冲激光照射下光栅的 Talbot 效应的研究. *光子学报*, 2002, **31**(2): 152-156.
- [13] SIIMAN L A, LUMEAU J, CANIONI L, *et al.* Ultrashort laser pulse diffraction by transmitting volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2572-2574.
- [14] QIU Biao, XIONG Bao-xing, WU Shang, *et al.* Analysis of the spatial chirp in the ultrashort pulsed finite beam diffraction by the volume Bragg grating[C]. SPIE, 2013, **9047**: 9047H.
- [15] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909-2947.