

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

梁玲亮 阎晓娜 韩峰 曹澜 戴晔 杨希华

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

摘要 基于 Kogelnik 的体光栅耦合波理论, 推导了超短激光脉冲照射下透射型体光栅的耦合波方程, 并由此得到了衍射光场和瞬时衍射光强的表达式。研究结果发现, 体光栅的瞬时衍射光强分布与体光栅的结构参数, 如体光栅的光栅周期、光栅厚度以及体光栅材料的折射率调制度密切相关。通过调节这些光栅结构参量, 就可以对体光栅衍射脉冲进行控制和调节, 以实现脉冲整形。研究还发现衍射脉冲光相对于入射光脉冲, 在时间轴方向有负的正移, 这个正移量和体光栅的光栅周期与厚度相关。结合群速度概念, 从群时延的角度给出了对这一时间正移量的定量分析。

关键词 超快光学; 超短脉冲; 体光栅; 耦合波理论; 衍射; 群时延

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0505001

Study on Instantaneous Diffraction and Group Time Delay Characteristics of a Transmission Volume Holographic Grating under Ultra-Short Laser Pulse Readout

Liang Lingliang Yan Xiaona Han Feng Cao Lan Dai Ye Yang Xihua

(Department of Physics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Based on Kogelnik's coupled-wave theory, we derive the coupled-wave equations of a volume holographic grating (VHG) illuminated by ultra-short pulsed laser, and obtain its diffraction electric field and instantaneous diffraction intensity. It is found instantaneous diffraction intensity of volume grating is affected by the VHG's structural parameters, such as the grating spacing, grating thickness, and the refractive-index modulation of the VHG. By changing these parameters, diffracted characteristics could be controlled and this may be used in the pulse shaping. In simulation, we also find group time delay of the diffracted beam with respect to the readout pulse in the negative time axis and this time delay are affected by the grating spacing and thickness. With the concept of group velocity, we give a quantitative analysis about this time delay.

Key words ultrafast optics; ultrashort pulse; volume holographic grating; coupled-wave theory; diffraction; group time delay

OCIS codes 050.1960; 090.2890; 030.1670

1 引言

体光栅由于其高灵敏的角度选择性和波长选择性以及较高的衍射效率, 已经被广泛应用于光通

信^[1]、光信息存储^[2,3]和光谱学^[4]等多个方面。体光栅是指当记录光栅的材料厚度足够厚时, 记录材料在两束记录光波的干涉场中将会记录到三维的空间

收稿日期: 2010-10-14; 收到修改稿日期: 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(60908007, 10974132)和上海市重点学科基金(S30105)资助课题。

作者简介: 梁玲亮(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光折变体全息光栅以及超短脉冲激光等方面的研究。

E-mail: lianglinglianglll@shu.edu.cn

导师简介: 阎晓娜(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光信息处理以及非线性光学等方面的研究。

E-mail: xnyan@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

条纹,这样记录的光栅在衍射时遵守布拉格衍射,而不是如一般平面光栅的拉曼-奈斯衍射。体光栅分为透射型和反射型两种。

以往人们对体光栅衍射性质的研究,都是采用连续光作为读出光的,随着超短脉冲激光在光通信和光信息处理方面等广泛的应用,超短脉冲光通过体光栅的衍射和传播特性引起人们的关注。超短脉冲光可以看成是由一系列连续平面光波线性叠加而成,当它照射体光栅时,由于体光栅的布拉格选择性是针对不同频率的光波,其选择性是不同的,故而采用超短脉冲光读出与连续光读出所得到的衍射光谱有很大的不同。Ding 等^[5]研究了飞秒脉冲光读出体光栅时,通过调节光栅参数,如光栅周期和厚度等可以控制衍射光谱的范围。王淮生等^[6]对超短脉冲照射下光栅的瞬时 Talbot 效应作了分析。王春花等^[7,8]对于超短脉冲激光照射下透射型和反射型体光栅的衍射特性进行了详细的讨论。Wang 等^[9]讨论了在各向异性介质中,体光栅应用于脉冲整形方面的性质。前期对体光栅衍射性质的研究,多关注于其衍射场的频域分布,很少研究其在时域内的衍射情况。近年对于体光栅的瞬时衍射特性已经有了较深入的研究,杨冰等^[10]研究了超短脉冲光照射体光栅时,透射型体光栅的瞬时衍射光强分布随体光栅各参数的变化情况;在此基础上,杨晨等^[11]又讨论了在考虑材料色散的情况下的透射型体光栅的瞬时衍射光强随着各个光栅结构参数的分布;韩峰等^[12]重点讨论了折射率调制度的不同对透射型体光栅瞬时衍射光强的影响;郑光威等^[13,14]研究了在时域、空域中,反射型体光栅对超短脉冲高斯光束的衍射特性,并讨论了利用其实现连续光束的空间低通滤波。

对于体光栅的理论研究,主要是根据 Kogelnik^[15]的耦合波理论。本文在结合前期研究结果的基础上,以光折变 In:P:Fe 晶体记录的透射型体光栅为例,利用 Kogelnik 耦合波理论,讨论了时域范围内在飞秒脉冲激光照射下光折变体全息光栅衍射强度分布,重点借助于群速度时延的概念解释了体光栅瞬时脉冲的中心沿时间轴负平移的现象^[10~12]。

2 超短脉冲照射下体光栅的瞬时衍射特性

2.1 超短脉冲照射下体光栅瞬时衍射理论模型

本文讨论的体光栅是由两束平面光波记录的静态体光栅,光栅记录后用超短脉冲光进行读出,研究

读出后衍射光强随时间变化的特性与光栅参数之间的关系。

研究的透射型体光栅是由两束相干的平面光波对称入射到光折变晶体(光栅记录材料选择为光折变材料 In:P:Fe)上记录的。相干光的干涉条纹通过光折变效应,会在晶体中记录光折变体光栅 $\Delta n = \Delta n_0 \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r})$ 。其中 Δn_0 是由于光折变效应而引起的晶体折射率振幅的改变, \mathbf{K} 是光栅矢量,大小为 $2\pi/\Lambda$, Λ 为光栅周期。在体光栅的记录过程中,各个参数选择满足条件 $T \geq 10n_0\Lambda^2/(2\pi\lambda)$ ^[16],其中 T 是体光栅的厚度, n_0 是记录介质的背景折射率, λ 为记录光波长。

体光栅的记录和读出原理如图 1 所示,其中记录光 1 和 2 是平面光波,读出光是超短脉冲光,研究衍射光的性质。

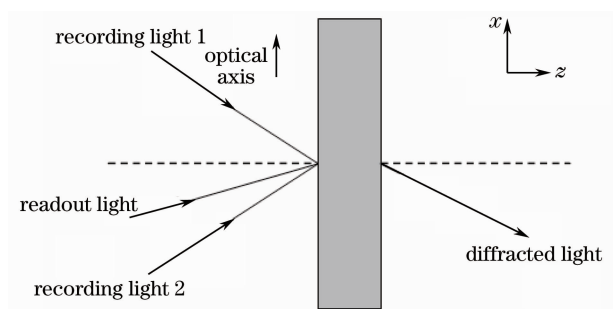


图 1 体光栅的记录和读出过程

Fig. 1 Volume holographic grating's recording and readout

设读出脉冲光的中心角频率是 ω_0 (相应的中心波长为 λ_0),选择合适的读出角度 θ_r 使得读出脉冲光的中心频率对应的光波分量满足体光栅的布拉格条件 $\Lambda = \lambda_0/(2n_0 \sin \theta_r)$ 。设读出脉冲光在时间上满足高斯分布

$$u(t) = \exp(-j\omega_0 t - t^2/\tau^2), \quad (1)$$

式中 $\tau = \Delta\tau/(2\sqrt{\ln 2})$, $\Delta\tau$ 是脉冲的半峰全宽。 $u(t)$ 所对应的频谱分布为

$$E_r(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(j\omega t) dt = \frac{\tau}{2\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{\tau^2(\omega - \omega_0)^2}{4}\right]. \quad (2)$$

根据 Kogelnik 的耦合波理论,可以得到超短脉冲中任意频谱分量都满足的耦合波方程:

$$\begin{cases} E'_i(z, \omega) = -j\nu E_d(z, \omega) \sqrt{C_S/C_R} \\ E'_d(z, \omega) + 2j\xi E_d(z, \omega) = -j\nu E_i(z, \omega) \sqrt{C_R/C_S} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\nu = \frac{\omega \Delta n_0}{2c \cos \theta'_r}$, $\xi = \frac{j\pi^2 c}{\Lambda^2 n_0 \cos \theta'_r} (1/\omega - 1/\omega_0)$, 而 θ'_r 为读出光波在晶体内的入射角, n_0 为晶体的平均折射率, c 为光波在自由空间的传播速度, ω 为读出分量的角频率。当 $\omega = \omega_0$ 时, $\xi = 0$ 。即 ξ 是由于偏离体光栅的布拉格条件而引起的偏移量。 $C_R = \cos \theta'_r$, $C_S = \cos \theta'_r - (K/\beta) \cos \varphi$, 分别为读出光和衍射光的倾斜因子, φ 是光栅条纹的倾斜角, $\beta = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$ 。

求解耦合波(3)式, 就可以得到衍射光光场随频率变化的表达式为

$$E_d(\omega, T) = -j\nu \exp(\xi T) \times \frac{\sin \sqrt{(\nu T)^2 - (\xi T)^2}}{\sqrt{(\nu T)^2 - (\xi T)^2}} \times E_r(\omega). \quad (4)$$

将(2)式代入(4)式中就得到了采用高斯脉冲入射体光栅的衍射场的频域分布表达式为

$$E_d(\omega, T) = -j\nu \exp(\xi T) \times \frac{\sin \sqrt{(\nu T)^2 - (\xi T)^2}}{\sqrt{(\nu T)^2 - (\xi T)^2}} \frac{\tau}{2\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{\tau^2(\omega - \omega_0)^2}{4}\right]. \quad (5)$$

对(5)式中的角频率分量做傅里叶变换, 就得到了衍射光场随时间变化的分布为

$$E_d(T, t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_d(\omega, T) \exp(-j\omega t) d\omega, \quad (6)$$

则衍射光强随时间的变化关系为

$$I_d(T, t) = |E_d(T, t)|^2. \quad (7)$$

根据前面得到的结果, 可以知道体光栅的瞬时衍射光强是与体光栅的结构参数以及入射脉冲光宽度等参数密切相关的。

2.2 超短脉冲照射下体光栅的瞬时衍射场光强分布

在数值模拟中, 各个参数的选择要满足 $T \geq 10n_0\Lambda^2/2\pi\lambda$, 其次考虑到通讯常用波段, 同时兼顾方便, 选择入射光波长与 1550 nm 接近的数值。各个参数的设置如下, $\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 4\pi \times 10^{14} \text{ rad/s}$, $n_0 = 3.134$, $\Delta\tau = 100 \text{ fs}$ 。下面主要讨论光栅周期 Λ , 光栅厚度 T 和光栅折射率调制度 Δn_0 3 个参数变化对体光栅瞬时衍射光强的影响。为了叙述方便, 先设定这 3 个参数的标准取值如下 $\Delta n_0 = 2 \times 10^{-5}$, $T = 5 \text{ mm}$, $\Lambda = 7 \mu\text{m}$, 即当讨论其中某个参数的变化时, 另外两个参数的取值固定为标准值。

2.2.1 光栅周期取不同的值时, 瞬时衍射光强的变化

图 2 给出了在不同的光栅周期下, 体光栅的瞬时衍射光强分布的变化。从图中可以看出随着光栅周期的减小, 体光栅的瞬时衍射光强的峰值也将减小, 而衍射脉冲的宽度在逐渐展宽。

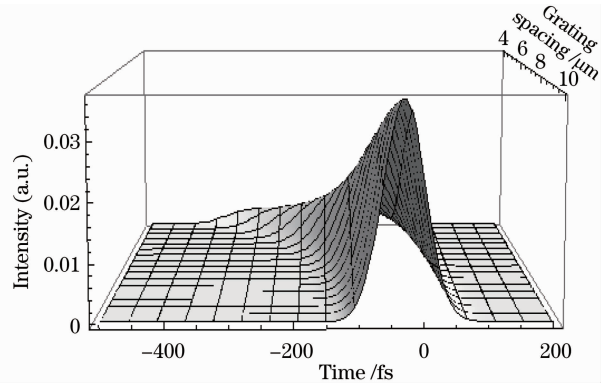


图 2 不同的光栅周期下, 体光栅衍射光的瞬时衍射光强
Fig. 2 Intensity of the diffracted beam of volume grating at different grating spacing versus time
根据体光栅的衍射效率公式

$$\eta = \nu^2 \text{sinc}^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2}),$$

其中布拉格失配量在一般情况下可以写作^[16]:

$$\xi = \Delta\theta K \sin(\phi - \theta_0) d / (2C_s) - \Delta\lambda K^2 d / (8\pi n C_s).$$

已知体光栅具有高度的波长选择性和角度选择性, 所以当波长或者角度稍微偏离, 造成布拉格条件不满足时就会引起衍射效率的大幅降低。其实, 这里是波长或角度稍微的偏离就会使和波长或角度相联系的布拉格失配因子增大。可以看出, 布拉格失配量和光栅周期的平方成反比, 和光栅厚度成正比, 也就是说当光栅周期减小或者是光栅厚度增加的时候, 布拉格失配量增加。本文主要考虑 $\Delta\theta = 0$ 的情况, 即入射脉冲光的入射角度满足布拉格条件, 不发生偏离。故这个时候布拉格失配参量

$$\xi = -\Delta\lambda K^2 d / (8\pi n C_s) = -\Delta\lambda (2\pi/\Lambda)^2 d / (8\pi n C_s),$$

可以知道光栅周期越小, 光栅厚度越大, 布拉格选择性也越强。

由上面的讨论可知, 当光栅周期减小的时候, 体光栅的布拉格选择性变强, 经过体光栅衍射后通过体光栅的光波的频率分量减少, 所以脉冲的总强度在逐渐减小, 而衍射脉冲在频域的宽度减小, 反映在时域上脉冲的宽度就会展宽。以上讨论实际上提供了一种办法可以通过调节体光栅的周期, 对衍射脉冲的宽度和形状进行整形。在图 2 中发现衍射脉冲的中心相对于时间轴的中心 0 点(也就是入射脉冲的对称点)有一个负的时间平移, 且光栅周期越小, 时间平移的绝对值就越大。

2.2.2 光栅厚度不同时, 瞬时衍射光强的变化

图 3 给出了体光栅厚度取不同值的情况下, 体光

栅瞬时衍射光强的变化。从图中可以看出,随着体光栅厚度的增加,衍射脉冲宽度变宽。原因是体光栅厚度越大时,光通过体光栅时,光与体光栅相互作用时间越长,这样体光栅的布拉格选择性就越强,经体光栅衍射出来的频谱分量就越少,频域宽度的减小,反映到时域脉冲的时间宽度就变宽了。同时发现在沿着时间轴方向,衍射脉冲的中心有一个负的时间平移,且光栅厚度越大,时间平移的绝对值就越大。

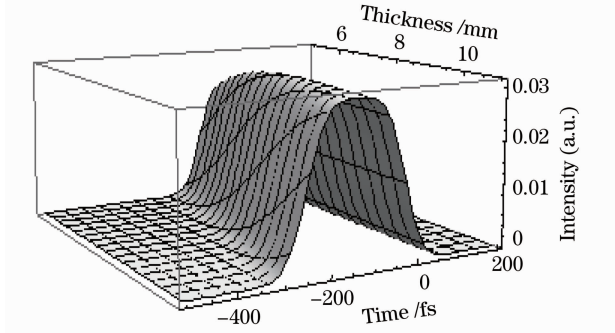


图 3 不同的光栅厚度下,体光栅衍射光的瞬时衍射光强
Fig. 3 Intensity of the diffracted beam of volume grating at different grating thickness versus time

2. 2. 3 光栅折射率调制度不同时,瞬时衍射光强的变化

图 4 给出了体光栅的材料折射率调制度在不同取值情况下,体光栅的瞬时衍射光强分布的变化。从图 4 中可以看出,随着光栅折射率调制度的增加,瞬时衍射脉冲的峰值强度先是逐渐增大,到最大后又开始减小。接着光强再次增大。关于体光栅折射率调制度对衍射脉冲的影响,详细内容可以参考文献[12]。

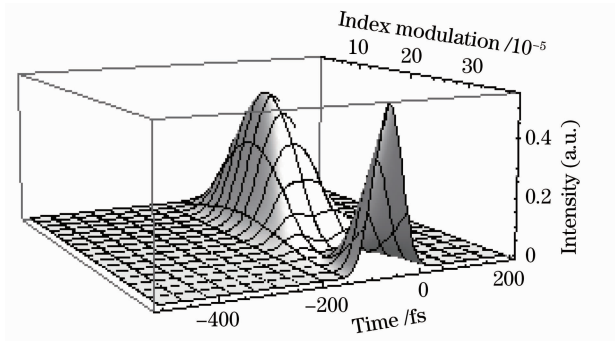


图 4 不同的光栅折射率调制度下,体光栅衍射光的瞬时衍射光强
Fig. 4 Intensity of the diffracted beam of volume grating at different grating refractive-index modulations versus time

在图 4 中同样发现衍射脉冲在时间轴上有平移(相对于入射脉冲的中心 0 点),但这种平移与图 2 和图 3 中有相同,也有不同。相同点是平移都是负值;不同点是在图 2 和 3 中,沿时间轴的平移是与光

栅周期与厚度有关的,但在图 4 中这种平移是与光栅材料的折射率调制度无关的。

3 超短脉冲下透射型体光栅的衍射光场的群时延的特性

3. 1 超短脉冲通过体光栅后衍射场的群时延理论

超短脉冲可以看成是不同频率的平面波的线性叠加。体光栅是周期性的结构,它对超短脉冲中的不同频率分量作用的性质是不同的,即周期性的体光栅对超短脉冲是高度色散的。利用体光栅的这种周期性结构的性质已有人实现了对光束群速度和群时延的控制^[17]。

文献[18,19]中,通过体光栅的衍射脉冲的群速度定义为长度 l 内相移的改变量对频率微分的倒数:

$$V_g = l \left(\frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad (8)$$

式中 l 是衍射光在体光栅内经过的距离,此时 $l = T / \cos \theta'_i$, ϕ 是衍射光经过体光栅的相位改变量。那么衍射光脉冲在体光栅中传播出来后,相应的群时延为

$$\tau = \frac{l}{V_g} = \frac{\partial \phi}{\partial \omega}. \quad (9)$$

3. 2 超短脉冲通过体光栅后衍射场的群时延的研究

3. 2. 1 光栅周期的变化对群时延的影响

图 5(a)给出了体光栅的衍射脉冲的群时延随着光栅周期的变化情况。可以看出群时延在所讨论的光栅周期变化范围内是一个负值,且其绝对值随着体光栅周期的增加而逐渐减小。为了更好地与图 2 中数值模拟的结果相比较,给出了光栅周期分别取 4, 7 和 10 μm 时衍射脉冲的瞬时衍射效率,如图 5(b)所示,从图中可以很好地看出脉冲中心对应的时间平移量,即群时延。通过比较,发现图 5(a), (b)之间是非常符合的。

3. 2. 2 光栅厚度变化对群时延的影响

图 6(a)给出了体光栅衍射脉冲光的群时延随着光栅厚度的变化情况。可以看出随着体光栅厚度的增加,衍射光群时延的绝对值在增大,且群时延仍然是一个负值。同样给出了光栅厚度分别取 $T=5, 8$ 和 11 mm 时,所对应的衍射脉冲的瞬时衍射光强度,如图 6(b)所示。将图 6(a), (b)相比较,发现这两者之间是吻合的。从图 6(a)还可发现,衍射脉冲的群时延是与体光栅厚度成线性关系的。

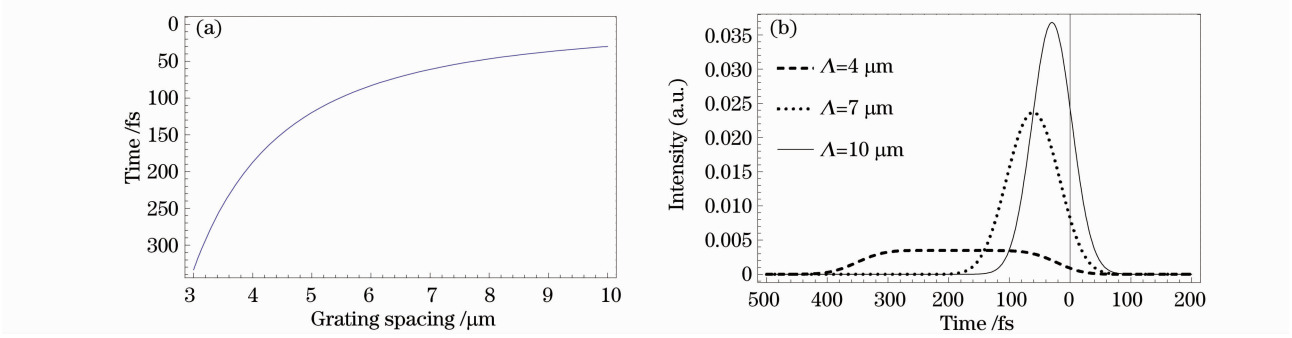


图 5 (a)不同的光栅周期下,体光栅衍射光群时延的变化,(b) $\Lambda=4, 7, 10 \mu\text{m}$ 时,体光栅瞬时衍射脉冲光强分布
Fig. 5 (a) Group time delay of diffracted beam at different grating spacing, (b) intensity of the diffracted beam of volume grating when $\Lambda=4, 7, 10 \mu\text{m}$ versus time

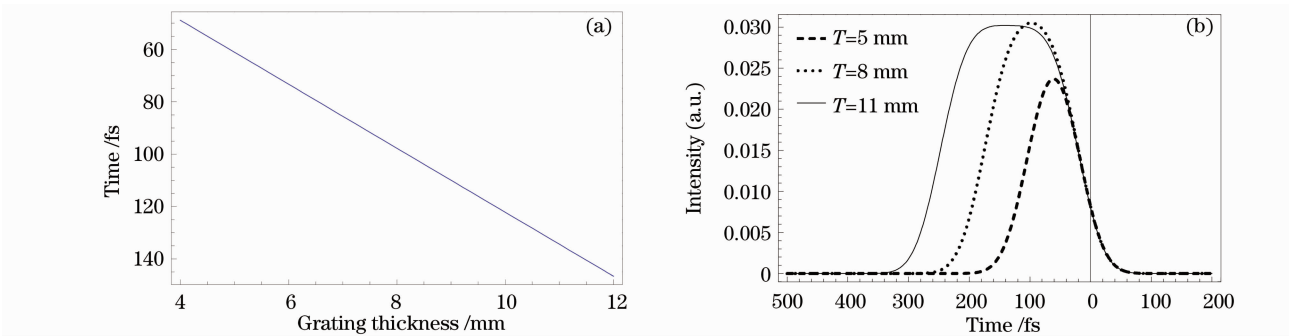


图 6 (a)不同的光栅厚度下,体光栅衍射光群时延的变化,(b) $T=5, 8, 11 \text{ mm}$ 时,体光栅瞬时衍射脉冲光强分布
Fig. 6 (a) Group time delay of the diffracted beam at different grating thickness, (b) intensity of the diffracted beam of volume grating when $T=5, 8, 11 \text{ mm}$ versus time

3.2.3 折射率调制度变化对群时延的影响

图 7(a)给出了体光栅对超短脉冲衍射后衍射

光的群时延随着体光栅材料的折射率调制度的变化情况。可以看出衍射脉冲的群时延是与体光栅的折

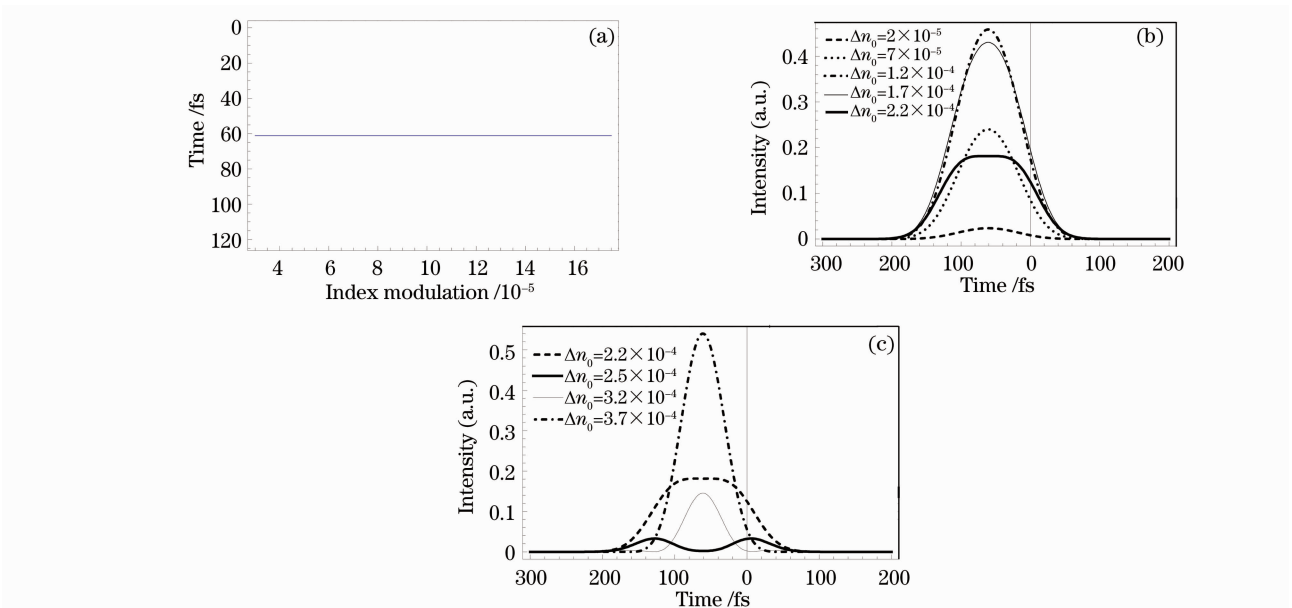


图 7 (a)不同的光栅折射率调制度下,体光栅衍射光群时延的变化;(b),(c)当 $\Delta n_0 = 2, 7, 12, 17, 22, 25, 32, 37 \times 10^{-5}$ 时,体光栅瞬时衍射光强度分布

Fig. 7 (a) Group time delay of the diffracted beam at different grating refractive index modulation; (b),(c) intensity of the diffracted beam of volume grating when $\Delta n_0 = 2, 7, 12, 17, 22, 25, 32, 37 \times 10^{-5}$ versus time

射率调制度无关的,也即衍射脉冲的群时延不随着光栅折射率调制的变化而改变。从图 7(b), (c) 也可以看出,当体光栅折射率调制度取几个特殊值时,体光栅的瞬时衍射光强度分布变化,脉冲强度曲线中心相对于坐标 0 点有平移,但是曲线彼此之间没有平移。这是与图 7(a) 的结论是完全相符的。由图 7 可见,在讨论的折射率调制度范围内,群时延是一个定值,且其值为负。这个定值由体光栅的结构参数,即体光栅的光栅周期和光栅厚度所决定的。

4 结 论

本文结合 Kogelnik 关于研究体光栅的耦合波理论,从耦合波方程出发,推导得到了飞秒脉冲通过体光栅后的瞬时衍射光强公式。并运用数值模拟方法详细探讨了体光栅瞬时衍射光强分布和体光栅的光栅周期,光栅厚度以及光栅材料折射率调制度的关系。结果发现飞秒脉冲照射下,体光栅的瞬时衍射光强分布与体光栅的光栅周期,光栅厚度以及光栅折射率调制度有密切关系。体光栅的瞬时衍射光强随着光栅周期的增加,时域脉冲宽度变窄,衍射脉冲强度增大;随着体光栅厚度的增大,时域脉冲宽度展宽,光强度变大;随着体光栅折射率调制度的改变,衍射脉冲由一个脉冲变成两个脉冲,之后又周期性地改变。以上结论表明可以通过调节体光栅这些结构参数达到控制衍射脉冲的形状、数目和强度的目的,相关研究成果可以应用于脉冲整形等方面。另外,讨论了瞬时衍射光强分布在时间轴的平移。发现在光栅参数变化的情况下,平移量都是负值,其绝对值随着光栅周期的增大而减小,随光栅厚度的增大而增大,与体光栅的折射率调制度没有关系。

参 考 文 献

- 1 A. Iocco, H. G. Limberger, R. P. Salathe *et al.*. Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1217~1221
- 2 J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang *et al.*. Volume holographic memory systems: techniques and architectures[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(8): 2193~2203
- 3 Geng Tao, Peng Feng, Sun Weiming *et al.*. Study on write-in method about multiple volume gratings diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 316~319
耿涛,彭峰,孙伟民等.多重体光栅等衍射效率写入方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 316~319
- 4 J. A. Arns. Holographic transmission gratings improve spectroscopy and ultrafast laser performances[J]. *SPIE*, 1995, **2404**: 174~181
- 5 Y. Ding, D. D. Nolte, Z. Zheng *et al.*. Bandwidth study of volume holography in photorefractive InP: Fe for femtosecond pulse readout at 1.5 μm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(11): 2763~2768
- 6 Wang Huaisheng, Fu Shouli, Zheng Yingdong. The temporal Talbot effect of a grating illuminated by an ultrashort pulse-laser beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **31**(2): 152~156
王淮生,傅守利,郑迎东.在超短脉冲照射下光栅的瞬时 Talbot 效应的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 152~156
- 7 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束衍射的特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 801~805
- 8 Wang Chunhua, Yan Aimin, Liu Liren *et al.*. Diffraction properties of reflection volume holographic grating illuminated by an ultrashort pulsed laser beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 980~984
王春花,闫爱民,刘立人等.反射型体全息光栅对超短脉冲激光束衍射的性质[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 980~984
- 9 C. Wang, L. Liu, A. Yan *et al.*. Pulse shaping properties of volume holographic gratings in anisotropic media[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(12): 3191~3196
- 10 Bing Yang, Xiaonan Yan, Yanhua Yang *et al.*. Study on the instantaneous characteristics of diffracted and transmitted light of static photorefractive grating illuminated by ultrashort pulse laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(7): 906~911
- 11 Chen Yang, Xiaonan Yan, Rong Zhu *et al.*. Diffraction study of volume holographic gratings in dispersive photorefractive material for femtosecond pulse readout [J]. *Optik*, 2010, **121**(12): 1138~1143
- 12 Han Feng, Yan Xiaona, Zou Hua *et al.*. Influence of refractive index modulation on diffraction pulse of volume grating read out by a femtosecond pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1560~1565
韩峰,阎晓娜,邹华等.飞秒脉冲照射下体光栅衍射脉冲受折射率调制度的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1560~1565
- 13 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Laser beam by reflecting volume grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3260~3266
郑光威,谭吉春,何焰蓝等.反射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3260~3266
- 14 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1554~1559
郑光威,谭吉春,何焰蓝等.反射型体相位光栅对连续激光束空间低通滤波[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1554~1559
- 15 Herwig Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2945
- 16 Chen Jiabi, Su Xianyu. Theory and Application of Optical Information Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 145~146
陈家璧,苏显渝.光学信息技术原理及应用[M].北京:高等教育出版社,2001. 145~146
- 17 S. Longhi, M. Marano, P. Laporta *et al.*. Propagation, manipulation, and control of picosecond optical pulses at 1.5 μm in fiber Bragg gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(1): 2742~2757
- 18 Shiuan Huei Lin, Ken Y. Hsu, Pochi Yeh. Experimental observation of the slowdown of optical beams by a volume-index grating in a photorefractive LiNbO₃ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(21): 1582~1584
- 19 Guoquan Zhang, Weiyue Che, Bin 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 grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **15**(5): 2055~2066