

# 体光栅能量振荡与脉冲分裂的研究

陈飘然 阎晓娜\* 王 燕 戴 晔 杨希华 马国宏

上海大学理学院物理系, 上海 200444

**摘要** 基于修正的 Kogelnik 耦合波方程, 研究了飞秒脉冲通过正弦型体光栅衍射后的动态衍射特性—能量振荡和脉冲分裂现象随光栅参数和读出脉冲参数的变化。结果发现, 体光栅的折射率调制度和读出脉冲的中心波长对能量振荡的周期有影响, 而体光栅的周期对能量振荡周期没有影响, 但会影响脉冲波包中心连线与时间轴的夹角。通过双光束干涉、群速度和群时延对出现的现象进行了解释。在衍射后期, 衍射脉冲分裂为双脉冲, 双脉冲间隔与体光栅的厚度和折射率调制度有关, 但与体光栅周期无关, 通过光场传播的局域化特性对其进行了解释。

**关键词** 光学器件; 体光栅; 衍射; 飞秒脉冲; 能量周期振荡; 脉冲分裂

中图分类号 O426

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0105002

## Study on the Energy Oscillation and Pulse Splitting in Volume Grating

Chen Piaoran Yan Xiaona Wang Yan Dai Ye Yang Xihua Ma Guohong

*Department of Physics, School of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

**Abstract** Based on the modified coupled-wave equations of Kogelnik, the dynamical diffraction properties, energy oscillation and pulse splitting of a sinusoidal volume holographic grating (VHG) illuminated by a femtosecond pulse with respect to the grating parameters and readout pulse parameters are studied. Result shows that the refractive index modulation of VHG and central wavelength of the readout pulse will affect the energy oscillation period, while the grating period has no effect on the energy oscillation period, but it will affect the angle between the line connected by centers of diffracted wave packets and the time axis. Based on group velocity and group delay, explanations on these phenomena are given. In the latter stage, diffracted pulse splits into two pulses, the pulse interval between them depends on the thickness and refractive index modulation of the VHG, and independent of the grating period, we explain it with the localization property of light field propagation.

**Key words** optical devices; volume holographic grating; diffraction; femtosecond pulse; periodical energy oscillation; pulse splitting

**OCIS codes** 050.1940; 230.1950; 090.7330; 320.5550

## 1 引 言

1943年, Borrmann等<sup>[1]</sup>在研究 X 射线通过单晶衍射时首次发现了动态衍射效应—脉冲分裂和能量振荡现象, A R Lang 等<sup>[2]</sup>于 1959 年实验证实了该现象的存在, 1964 年 Batterman 等<sup>[3]</sup>对他们的理论和实验工作进行了总结。1968 年, C G Shull 等<sup>[4]</sup>在研究中子束通过单晶硅的布拉格衍射时也发现了能量的周期性振荡条纹, 并由条纹周期测定了硅原子散射幅度。近年, 科学家发现这种能量振荡和脉冲分裂现象是广泛存在的, 在 X 射线通过光子晶体衍射时也会有能量振荡, 通过改变光子晶体的厚度可以使 X 射线沿负折射方向出射, 从而实现负折射率效应<sup>[5]</sup>。此外, 微波入射一维 Si 光子晶体时在衍射波和透射波中也观察到了能量振荡, 通过

收稿日期: 2015-07-03; 收到修改稿日期: 2015-09-07

基金项目: 上海市自然科学基金(13ZR1414800, 14ZR1415400)、上海市科委重点项目(14JC1402100)

作者简介: 陈飘然(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒脉冲入射体光栅衍射特性方面的研究。

E-mail: 523175662@qq.com.

导师简介: 阎晓娜(1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事体光栅衍射及脉冲整形等方面的研究。

E-mail: xnyan@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

改变晶体厚度可以控制输出方向,实现全光开关<sup>[6]</sup>。2009年和2012年,V A Bushuev等<sup>[7-8]</sup>从理论和实验上研究了飞秒脉冲入射线性光子晶体后,衍射和透射脉冲能量随传播距离出现的能量振荡和脉冲分裂效应。一维光子晶体可看做是阶跃型体光栅,既然在光子晶体中可观察到动态衍射效应,从原理上来说在体光栅中也应该可以观察到。

体光栅由于具有高的衍射效率和布拉格选择性等特性<sup>[9]</sup>,在光谱仪<sup>[10]</sup>,波分复用<sup>[11]</sup>,光刻<sup>[12]</sup>以及波前控制<sup>[13]</sup>等方面获得了广泛的应用。2006年,Maria L Calvo等<sup>[14]</sup>首次在体光栅中通过实验观察到了衍射波能量随读出角度的振荡现象。他们认为体光栅折射率调制度的过调制效应是引起能量振荡的原因。前期有人从理论上研究了超短脉冲通过透射体光栅的衍射特性<sup>[15-16]</sup>,但没有发现能量振荡和脉冲分裂现象。本课题组前期在研究飞秒脉冲通过体光栅的衍射时,发现如果折射率调制度选得足够大,那么在衍射前期体光栅内会出现衍射和透射波的能量随传播距离的周期性振荡现象;在衍射后期,衍射和透射波都将分裂为双脉冲,并对能量振荡和脉冲分裂的机制进行了初步讨论,但对光栅参数和读出脉冲参数对能量振荡和脉冲分裂的影响还没有讨论<sup>[17]</sup>。

本文在前期工作的基础上,进一步研究体光栅参数,如光栅周期、厚度、折射率以及读出脉冲中心波长对能量振荡的周期和脉冲传播的倾角以及脉冲分裂的影响,并分析产生影响的物理机制。

## 2 飞秒脉冲入射体光栅理论解释

用飞秒脉冲光读出已记录好的体光栅,推导对任意频谱分量都适用耦合波方程,得到瞬时衍射和透射光场及光强表达式。

首先利用两束相干平面波在光折变材料内利用光折变效应记录体光栅,设体光栅折射率具有余弦分布  $n = n_0 + \Delta n \cos(Kx)$ , 其中  $n_0$  是记录材料的背景折射率,  $\Delta n$  是最大折射率调制度,  $K$  是光栅矢量,沿  $x$  轴方向。光栅波数为  $2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  是光栅周期。然后用飞秒脉冲对记录的体光栅进行读出,设读出脉冲光的中心角频率为  $\omega_0$ (相应中心波长为  $\lambda_0$ ),选择合适的读出角度  $\theta_r$ (晶体内读出角为  $\theta_r'$ )使读出脉冲的中心角频率分量满足体光栅的布拉格条件  $\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta_r'}$ 。

设读出的飞秒时间脉冲具有高斯分布:

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

其中参数  $T$  与脉冲的半峰全宽  $\Delta t$  的关系为  $T = \Delta t / (2\sqrt{\ln 2})$ 。  $E_r(t)$  所对应的频谱分布为

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

由(2)式可见,读出高斯脉冲在频域仍是高斯分布,且具有一定频谱宽度。

由于记录的是体光栅,因此在晶体内只有一个透射波和一个衍射波,二者之间的能量耦合及传输满足耦合波方程,

$$\cos \theta_r' \frac{dE_t(\omega, z)}{dz} = -i\kappa E_d(\omega, z), \quad (3)$$

$$\cos \theta_r' \frac{dE_d(\omega, z)}{dz} - i \frac{2\pi c K^2}{4\pi n_0} \left( \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega_0} \right) E_d(\omega, z) = -i\kappa E_t(\omega, z), \quad (4)$$

其中  $E_t(\omega, z)$  和  $E_d(\omega, z)$  分别是透射和衍射波光场的复振幅分布随角频率和传播距离的变化,耦合系数  $\kappa = \omega \cdot \Delta n / 2c$ 。

求解耦合波方程(3)和(4)并代入初始条件,得到衍射场的频谱表达式为

$$E_d(\omega, z) = -i\nu \cdot z \exp(\xi \cdot z) \frac{\sin \sqrt{(\nu \cdot z)^2 - (\xi \cdot z)^2}}{\sqrt{(\nu \cdot z)^2 - (\xi \cdot z)^2}} E_r(\omega). \quad (5)$$

透射场的频谱表达式为

$$E_t(\omega, z) = \exp(\xi \cdot z) \left[ \cos \sqrt{(\nu \cdot z)^2 - (\xi \cdot z)^2} - \xi \cdot z \frac{\sin \sqrt{(\nu \cdot z)^2 - (\xi \cdot z)^2}}{\sqrt{(\nu \cdot z)^2 - (\xi \cdot z)^2}} \right] E_r(\omega), \quad (6)$$

其中  $\nu = \frac{\omega_0 \Delta n}{2c \cos \theta_r}$  是体光栅的增益系数,  $\xi = \frac{i\pi^2 c}{\Lambda^2 n_0 \cos \theta_r} \left( \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega_0} \right)$  是由偏离布拉格条件引起的失调量。当读出频谱分量的角频率等于中心角频率时,  $\xi=0$ 。

(5)式和(6)式进行逆傅里叶变换,得到体光栅输出面上瞬时衍射和透射光场表达式,

$$\begin{aligned} E_d(z,t) &= \int_{-\infty}^{\infty} E_d(z,\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \\ E_t(z,t) &= \int_{-\infty}^{\infty} E_t(z,\omega) \exp(-i\omega t) d\omega . \end{aligned} \quad (7)$$

进一步得到瞬时衍射光强和透射光强的表达式为:

$$\begin{aligned} I_d(z,t) &= |E_d(z,t)|^2 \\ I_t(z,t) &= |E_t(z,t)|^2 . \end{aligned} \quad (8)$$

下面基于(8)式讨论瞬时衍射光强和透射光强随光栅厚度、周期、折射率调制度以及读出脉冲中心波长等参数的变化,重点讨论体光栅参数对能量振荡及脉冲分裂的现象。

### 3 飞秒脉冲通过体光栅衍射后的能量振荡及脉冲分裂现象

基于(8)式讨论飞秒脉冲通过体光栅衍射后瞬时衍射光强和透射光强在体光栅内的演化情况。数值模拟所用参数为:飞秒脉冲的中心波长为  $1.5 \mu\text{m}$ ,光栅周期  $\Lambda=7.3 \mu\text{m}$ ;光栅材料为光折变材料,背景折射率为  $n_0=3.134$ ,折射率调制度  $\Delta n=1.25 \times 10^{-2}$ 。

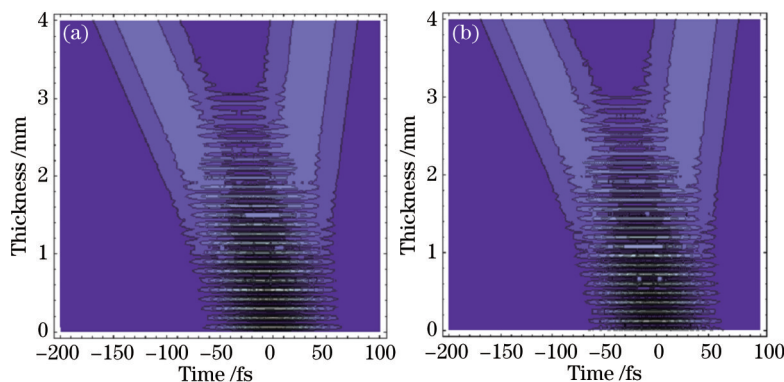


图1 飞秒脉冲入射体光栅后的 (a) 衍射光强和 (b) 透射光强随传播距离的时空动态演化图

Fig.1 Temporal-spatial dynamical evolution of (a) diffracted intensity and (b) transmitted intensity of a femtosecond pulse diffracted by a VHG

图1是根据(8)式得到的飞秒脉冲入射体光栅后,在体光栅内衍射脉冲和透射脉冲的强度随传播距离和时间的变化图。由图可见,在衍射初期,即传播距离不大的情况下,衍射和透射脉冲的强度都出现了振荡现象。在衍射后期,衍射和透射脉冲都分裂为两个脉冲,且随着传播距离的增加,两个脉冲之间的时间间隔也在增加。

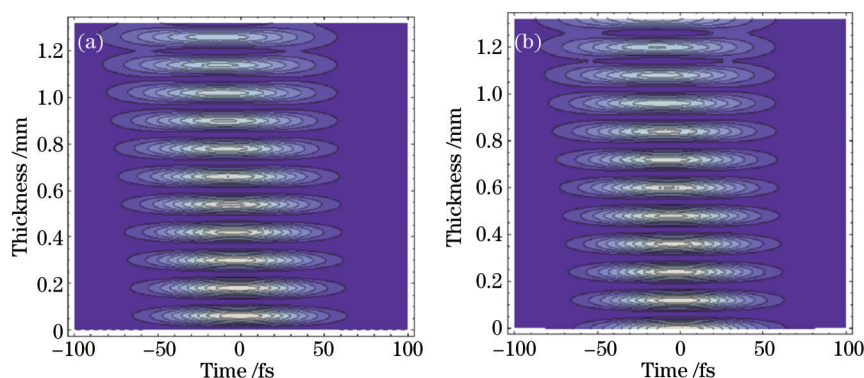


图2 当体光栅厚度在0~1.3 mm 区间变化时,体光栅内的(a) 衍射光和 (b) 透射光的能量周期性振荡

Fig.2 Periodical energy oscillation of (a) diffracted intensity and (b) transmitted intensity in the initial stage of diffraction when the VHG thickness is in the range of 0 mm to 1.3 mm

为了能更清晰地观察衍射初期的能量振荡现象,图2描述的是当体光栅厚度为1.3 mm时的衍射和透射光强分布。由图可见,衍射脉冲和透射脉冲的能量都是周期性振荡的,且二者之间存在耦合作用,表现为当透射脉冲的能量达到最大值时,衍射脉冲能量为零,而当衍射脉冲能量达到最大值时透射脉冲能量为零。

下面讨论光栅参数和读出脉冲参数对振荡周期和脉冲分裂的影响。

## 4 光栅参数和脉冲参数对能量振荡的影响

### 4.1 体光栅的折射率调制度对能量振荡的影响

图3描述的是当体光栅的折射率调制度分别为 $7.5 \times 10^{-3}$ 和 $2.5 \times 10^{-3}$ 时,衍射脉冲强度随传播距离和时间的变化。由图2(a)和图3可见,改变体光栅的折射率调制度会使能量振荡周期发生变化。当折射率调制度减小时,能量振荡周期相应增大。

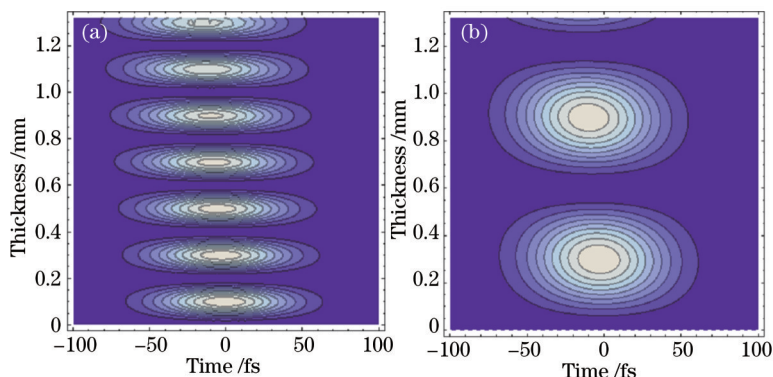


图3 折射率调制度分别为(a)  $7.5 \times 10^{-3}$ 和(b)  $2.5 \times 10^{-3}$ 时,衍射光强随传播距离和时间的变化

Fig.3 With the different refractive index modulation of (a)  $7.5 \times 10^{-3}$  and (b)  $2.5 \times 10^{-3}$  diffracted intensities with respect to time and thickness

图4是根据(8)式得到的瞬时衍射光强随传播距离的变化。由图可见,当体光栅的折射率调制度分别为 $1.25 \times 10^{-2}$ 、 $7.5 \times 10^{-3}$ 、 $2.5 \times 10^{-3}$ 时,能量振荡周期分别为0.12、0.2、0.6 mm,这是与图2(a)和图3所示结果一致的。

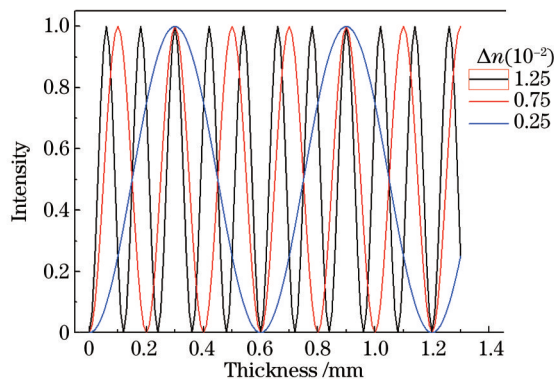


图4 在不同折射率调制度下衍射光强随厚度的变化

Fig.4 Diffracted intensity with respect to the grating thickness on different refractive index modulations

### 4.2 读出脉冲的中心波长对能量振荡的影响

图5是读出脉冲中心波长不同时,衍射脉冲光强分布随传播距离和时间的变化。由图可见,入射脉冲的中心波长对能量振荡的周期有影响。当中心波长分别为 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 时,能量振荡周期分别为0.11 mm和0.12 mm。

### 4.3 体光栅周期对能量振荡的影响

图6是体光栅周期不同时,衍射脉冲光强分布随传播距离和时间的变化。结果发现,体光栅周期对能量振荡周期没影响,但对波包中心连线与时间轴的夹角有影响,表现为沿传播方向上一个波包相对于前一个波包产生了一个时间延迟。



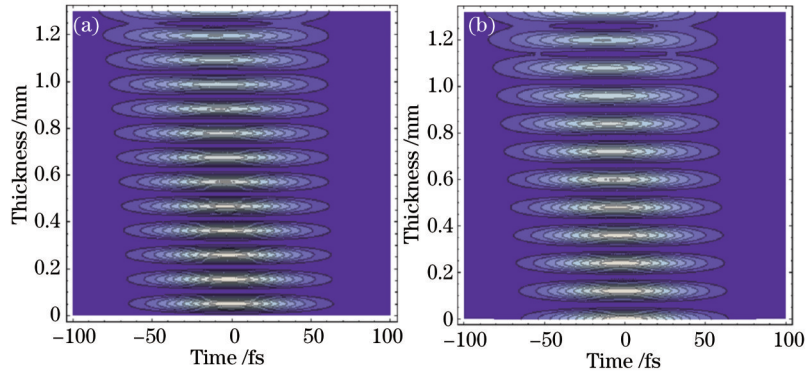


图5 中心波长为 (a) 1.31 μm 和 (b) 1.5 μm 情况下,衍射脉冲强度的时空动态演化

Fig.5 Temporal-spatial dynamical evolution of diffracted intensity when the readout central wavelength is (a) 1.31 μm and (b) 1.5 μm

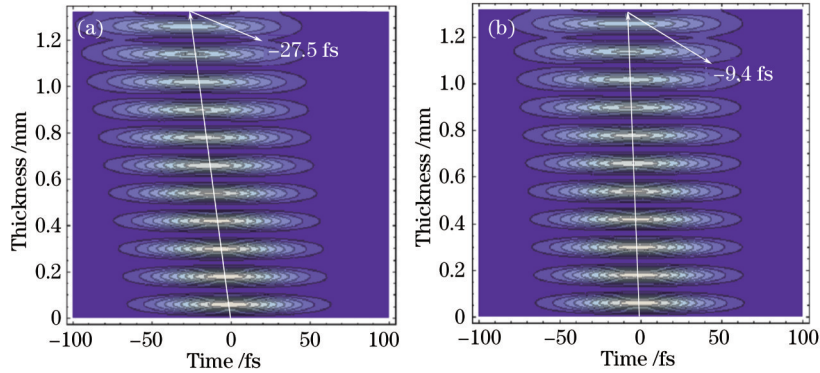


图6 光栅周期为(a)5.3 μm 和(b)9.3 μm 情况下衍射脉冲强度随传播距离和时间的变化

Fig.6 Diffracted intensity with respect to time and thickness of the VHG when the grating period is (a) 5.3 μm and (b) 9.3 μm

由图6可见,当光栅周期  $\Lambda=5.3 \mu\text{m}$  时,在光栅厚度为 1.3 mm 的输出端衍射脉冲的波包中心相对于时间轴零点的时间延迟为  $-27.5 \text{ fs}$ ,当光栅周期  $\Lambda=9.3 \mu\text{m}$ ,时间延迟为  $-9.4 \text{ fs}$ 。

#### 4.4 体光栅参数和脉冲参数对能量振荡周期影响的解释

根据参考文献[7]可知,飞秒脉冲入射到体光栅后,在体光栅内将耦合出4个脉冲—2个衍射脉冲和2个透射脉冲。在衍射初期,4个脉冲沿同一方向传播且彼此没有分开,因此两两相干形成干涉条纹,分别对应于衍射脉冲和透射脉冲,脉冲的能量振荡即是干涉条纹。根据双光束干涉条件,能量最大处就是干涉相长的位置,能量最小处就是干涉相消的位置。相邻两个干涉极大值对应的相位差为  $2\pi$ ,它与折射率调制度和振荡周期  $d_s$  之间的关系为

$$\Delta\varphi = 2\pi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n d_s. \quad (9)$$

由(9)式可见,衍射和透射脉冲的能量振荡周期与折射率调制度和读出脉冲的中心波长有关,与光栅周期无关,这与4.1~4.3节的分析一致。

固定读出脉冲中心波长为  $1.5 \mu\text{m}$ ,当  $\Delta n=1.25 \times 10^{-2}$ 、 $7.5 \times 10^{-3}$ 、 $2.5 \times 10^{-3}$  时,由(9)式可得振荡周期分别为 0.12 mm、0.2 mm、0.6 mm,这与图3和图4的数值模拟结果相一致。固定体光栅的折射率调制度为  $\Delta n=1.25 \times 10^{-2}$ ,当  $\lambda_0=1.31 \mu\text{m}$  和  $\lambda_0=1.5 \mu\text{m}$  时,能量振荡周期分别为 0.108 mm 和 0.12 mm,这与图5的模拟结果一致。

由(9)式可知,体光栅的周期对能量振荡周期没有影响,但由图6可见,体光栅周期改变时会改变衍射脉冲波包中心连线与时间轴的夹角,表现为在输出端衍射脉冲相对于时间轴零点有时间延迟,关于时间延迟随光栅周期变化可以通过群速度和群时延来讨论。

体光栅由于具有周期性结构而具有色散特性,因此不同频谱分量具有不同的相速度,波包的群速度代表波包整体运动速度,定义为<sup>[18]</sup>

$$V_g = d \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad (10)$$

其中  $d$  是体光栅长度,  $\varphi$  是衍射光场的相位改变量,  $\omega$  为光场的频率。

衍射脉冲在体光栅中传播  $d$  长度后的群时延为

$$\tau = \frac{d}{V_g} = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \quad (11)$$

由(5)式和(11)式可以得到衍射脉冲通过厚度为  $d$  的体光栅后的群时延为

$$\tau = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} = \frac{\pi^2 c d}{\Lambda^2 n_0 \cos \theta_1 \omega^2} \quad (12)$$

由(12)式可见,衍射脉冲相对于时间轴零点的群时延是与光栅周期  $\Lambda$  有关的,而与折射率调制度  $\Delta n$  和读出脉冲中心波长无关的,这与 4.1~4.3 节分析结果一致。

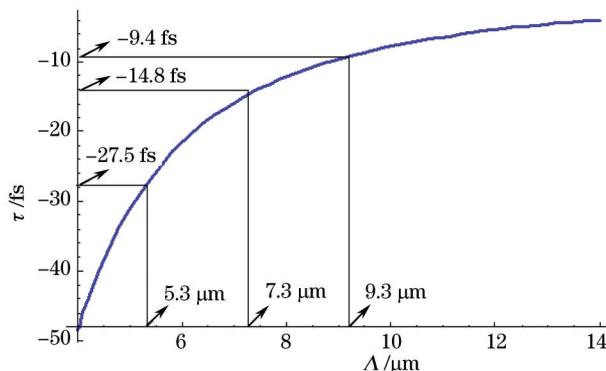


图7 衍射脉冲群时延随光栅周期  $\Lambda$  的变化曲线

Fig.7 Relation between pulse interval of the diffracted dual pulses and the grating period  $\Lambda$

图7是根据(12)式得到的衍射脉冲时延随光栅周期的变化曲线。可以看到,随着光栅周期  $\Lambda$  增加,衍射脉冲的群时延在减小。当光栅周期分别为 5.3、7.3、9.3  $\mu\text{m}$  时,衍射脉冲相对于时间轴零点的群时延分别为 -27.5、-14.8、-9.4 fs,这与图2和图6数据吻合。

## 5 光栅参数对脉冲分裂的影响

上一节讨论了能量振荡随光栅参数的变化,本节讨论光栅参数对脉冲分裂的影响。

### 5.1 体光栅参数对分裂后双脉冲间隔的影响

由图1可见,飞秒脉冲入射体光栅后,衍射脉冲和透射脉冲在传播一定距离后都会分裂为双脉冲,分裂后双脉冲的中心在时间轴上会有一个时间间隔。在确定的传播距离处,两个衍射脉冲与两个透射脉冲的时间间隔是相同的。

图8是基于衍射光强表达式(8)式得到的瞬时衍射光强随光栅参数—厚度、折射率调制度和光栅周期的变化。由图可见,在不同光栅参数情况下,衍射脉冲都出现了双脉冲。

在图8(a)中,双脉冲的时间间隔随体光栅的厚度增加而增加。当体光栅厚度分别为 5 mm,双脉冲峰值间隔为 208 fs。图8(b)中折射率调制度减小时,双脉冲间隔也相应减小,当折射率调制度为  $7.5 \times 10^{-3}$  时,双脉冲间隔为 175 fs。图8(c)中当体光栅的周期分别为 6.3  $\mu\text{m}$ 、7.3  $\mu\text{m}$ 、8.3  $\mu\text{m}$  时,双脉冲的间隔均为 290 fs,即体光栅的周期不影响分裂后双脉冲的间隔。

### 5.2 体光栅参数对脉冲间隔影响的解释

由前面讨论可知在体光栅内有4个脉冲,两个衍射脉冲和两个透射脉冲。衍射初期4个脉冲相干叠加,产生能量振荡。衍射后期,衍射和透射脉冲在传播到一定距离后发生分裂,根据文献[7]可知,脉冲出现分裂是由于同一方向传播的两个脉冲分别在不同折射率的介质中传播,由于介质折射率不同导致群速度不同,从而在传播相同距离  $d$  后产生时间间隔,间隔量与折射率调制度的关系为

$$\Delta \tau = \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} = \frac{dn_1}{c} - \frac{dn_2}{c} = \frac{d}{c} \Delta n \quad (13)$$

由(13)式可知,脉冲在传播过程中产生的间隔取决于在体光栅中传播的距离以及折射率调制度,与光栅

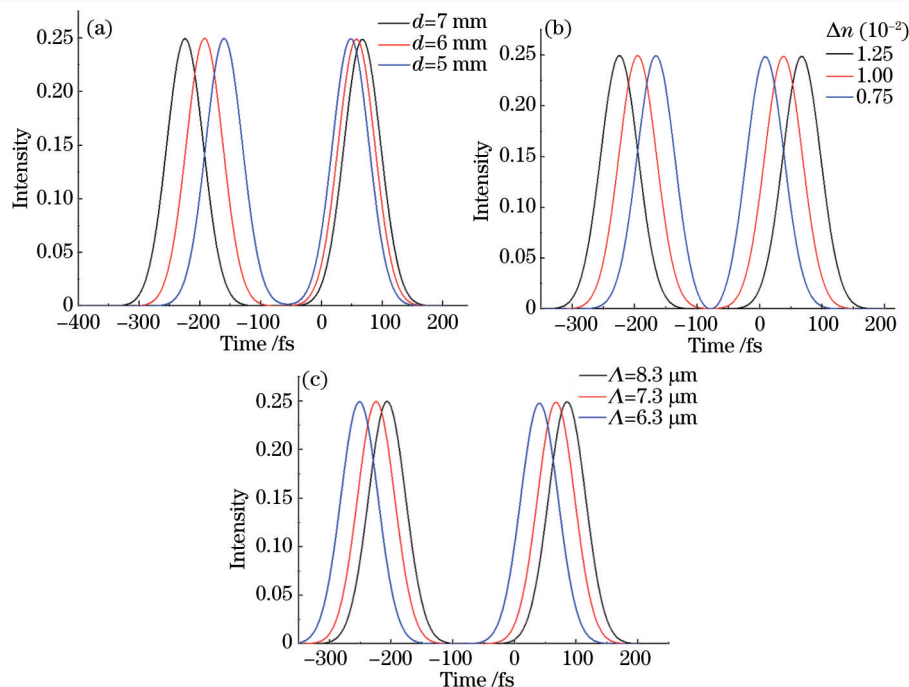


图 8 飞秒脉冲通过体光栅衍射后在输出端的瞬时衍射光强随 (a) 体光栅厚度; (b) 体光栅的折射率调制度; (c) 体光栅周期的变化

Fig.8 Instantaneous diffraction intensity at the output plane with respect to the (a) grating thickness;

(b) refractive index modulation;(c) grating period

周期无关,这与 5.1 节的分析结果相一致。把图 8 数值模拟的相应数值代入(13)式,计算发现由(13)式得到的间隔量与图 8 的数值模拟结果一致,说明可以用光场传播局域性来解释脉冲分裂。

## 6 总 结

基于 Kogelnik 的耦合波理论,讨论了飞秒脉冲入射体光栅时所产生的能量振荡以及脉冲分裂现象与体光栅参数和读出脉冲的关系。飞秒脉冲入射体光栅后,在体光栅内部产生 4 个脉冲,其中两个脉冲沿着衍射方向传播,两个脉冲沿着透射方向传播。在衍射的初期,4 个脉冲相互重合产生干涉,从而观察到周期性的能量振荡现象,振荡的周期与折射率调制度和读出脉冲中心波长有关,与光栅周期无关。在衍射后期,无论衍射脉冲还是透射脉冲均会分裂成两个脉冲,双脉冲间隔与折射率调制度和厚度有关,与体光栅周期无关,这是因为两个脉冲一个在高折射率中传播,一个在低折射率中传播,它们具有不同的群速度,在到达出射面时会产生一定的时延。

## 参 考 文 献

- 1 Borrmann G. Uber extinktions diagramme von Quarz[J]. Phys Zeits, 1941, 42: 157-162.
- 2 A R Lang. Studies of individual dislocations in crystals by X-ray diffraction micrography[J]. Appl Phys, 1959, 30(11): 1741-1748.
- 3 Boris W. Batterman, Henderson cole. Dynamical diffraction of X rays by perfect crystals[J]. Reviews of Modern Physics, 1964, 36(3): 681-716.
- 4 C G Shull. Observation of pendellösung fringe structure in neutron diffraction[J]. Physical Review Letters, 1968, 21: 1585-1589.
- 5 Vito Mocella. Negative refraction in photonic crystals: thickness dependence and pendellösung phenomenon[J]. Opt Express, 2005, 13 (5): 1361-1367.
- 6 Sergeye. Svyakhovskiy, Oleg A. Aktsipetroy, Anton I. Maydykovskiy. Pendellösung effect in one-dimensional porous silicon photonic crystals[C]. Optical Society of America Frontiers in Optics, 2011: FThU4.
- 7 V A Bushuev, V I Mantsyzov, A A Skorynin. Diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal[J]. Physical Review A, 2009, 79(5): 053811-053815.
- 8 A A Skorynin, V A Bushuev, B I Mantsyzov. Dynamical Bragg diffraction of optical pulses in photonic crystals in the Laue geometry: diffraction-induced splitting, selective compression, and focusing of pulses[J]. Experimental and Theoretical Physics, 2012, 115(1):

- 9 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[C]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48: 2909-2947.
- 10 Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. A spectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608004.  
任 重, 刘国栋, 黄 振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608004.
- 11 Yu Junhong, Guo Linhui, Meng Huicheng, *et al.*. Numerical simulation study on dense spectral combing based on reflection volume bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1115001.  
余俊宏, 郭林辉, 孟慧成, 等. 基于反射式 Bragg 体光栅的密集光谱合束数值模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1115001.
- 12 Hu Jin, Pu Donglin, Wei Guojun, *et al.*. A method of dot-matrix holography based on the diffraction grating and spatial light modulator [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609006.  
胡 进, 浦东林, 魏国军, 等. 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609006.
- 13 Yang Chao, Yu Haili, Zhang Shanwen, *et al.*. Active control technology to correct the quality of the grating wave-front[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108002.  
杨 超, 于海利, 张善文, 等. 光栅刻划机衍射波前质量的主动控制校正方法[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108002.
- 14 Marial Calvo, P Cheben, O Martinez-Matos, *et al.*. Experimental detection of the optical Pendellösung effect[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(8): 084801.
- 15 Zheng Guangwei, Liu Li, He Yanlan, *et al.*. Diffraction properties of ultra - short pulsed Gaussian laser bean by transmission volume grating[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 127-131.  
郑光威, 刘 莉, 何焰蓝, 等. 透射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 126-131.
- 16 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.
- 17 X Yan, L Gao, Y Dai, *et al.*. Periodical energy oscillation and pulse splitting in sinusoidal volume holographic grating[J]. Opt Express, 2014, 22(15): 18527-18536.
- 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 LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. Opt Lett, 2000, 25(21): 1582-1584.

栏目编辑: 韩 峰