

文章编号: 0253-2239(2006)06-0801-5

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*

王春花 刘立人 闫爱民 刘德安

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究室, 上海 201800)

摘要: 在 Kogelnik 耦合波理论的基础上, 考虑光栅记录介质的色散效应的影响, 研究了光折变体全息光栅对不同偏振状态的超短脉冲激光光束衍射的性质, 讨论了高斯型入射脉冲激光光束的谱宽与光栅的有效衍射谱宽之比不同时, 衍射和透射光束的光谱宽度、时间宽度、波形和衍射效率的变化。结果表明, 光栅的有效衍射谱宽受光栅参量及入射条件的影响, 对衍射性质的影响很大, 且在考虑光栅记录介质的色散效应时减小。当入射脉冲的偏振方向垂直于入射面时, 光栅的有效衍射谱宽大于偏振方向平行于入射面的情形, 衍射效率在入射脉冲宽度较大时小于偏振方向平行于入射面的情形; 谱宽比较大时, 衍射光束的时间分布曲线产生展宽和变形, 且比偏振方向平行于入射面的情形展宽和变形得更加明显。

关键词: 物理光学; 衍射与光栅; 有效衍射谱宽; 耦合波理论; 光折变体全息光栅; 超短脉冲激光光束
中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Diffraction Properties of Transmission Photorefractive Volume Holographic Grating Read by an Ultrashort Pulsed Laser Beam

Wang Chunhua Liu Liren Yan Aimin Liu Dean

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: Considering the dispersion effect of the grating media, the coupled wave theory of Kogelnik was developed to study the diffraction properties of an ultra-short pulsed laser beam with different polarization states by a photorefractive volume holographic grating. The spectral and temporal width, the distortion of the diffraction and transmission pulse beam, as well as the diffraction efficiency were studied, as a transmission volume holographic grating was illuminated by an ultrashort Gaussian-shaped pulsed laser beam and the ratio of the input laser beam spectral width and the effective diffraction spectral width of the grating varied. It was investigated that the effective diffraction spectral width of the volume grating was affected by the parameters of the grating and the input conditions, and decreased by the dispersion effect of the grating media. The effective diffraction spectral width of the incident pulse with polarization perpendicular to the incident plane was larger than that of the pulse with parallel polarization state, and with a relatively long pulse duration the diffraction efficiency of the former was larger than that of the latter. With a relatively large spectral width ratio, there appeared expansion and distortion for the temporal distribution curve of the diffraction beam, which were more obvious for the beam with polarization perpendicular to the incident angle.

Key words: physical optics; effective diffraction spectral width; diffraction and grating; coupled-wave theory; photorefractive volume holographic grating; ultrashort pulsed laser beam

1 引 言

超短脉冲激光光束和体全息光栅在光通信和光

学信息处理等许多领域得到了广泛的应用, 目前所产生脉冲的持续时间已短至 $3.8 \text{ fs}^{[1]}$ 。虽然超短脉

* 国家自然科学基金(60177106)和国家科学技术部(2002CCA03550)资助课题。

作者简介: 王春花(1980~), 江苏人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事衍射光学、信息光学及光通信的研究。E-mail: chwang@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-06-23; 收到修改稿日期: 2005-08-25

冲激光束在自由空间以及经过简单光学元件的传输已被广泛研究^[2~8],但它经体全息光栅的传输特性最近才引起人们的重视^[9~13]。虽然体全息光栅的布拉格波长选择性使其在光学高密度存储和彩色全息处理中倍受关注,但也限制了入射脉冲激光中能被衍射的频谱成分,导致衍射和透射光束光谱宽度、脉冲宽度及波形的改变。Y. Ding 等提出改变体光栅的光栅周期及厚度,可以扩大体光栅对超短脉冲激光光束衍射的光谱范围。Shuyun Teng 等进一步考虑了光栅的色散效应。但对于形成光折变体全息光栅的材料,如 LiNbO₃ 晶体,需要考虑晶体的各向异性,对于不同偏振状态的入射脉冲激光光束,其衍射的效果也不相同。为此本文进一步考虑光栅记录介质的色散效应、折射率调制度及入射脉冲激光光束的偏振状态和光谱宽度的影响,拓展了 Kogelnik 的耦合波理论^[14],分析了超短脉冲激光光束经一维透射光折变体全息光栅衍射的性质,并给出了控制衍射和透射光束的谱宽、脉冲宽度及波形的的方法,比较了不同偏振状态的入射脉冲激光光束的谱宽和体全息光栅的有效衍射谱宽不同(特别是相近)时的衍射效果。

2 耦合波理论

通常取超短脉冲激光光束为高斯脉冲光束,表示为

$$u_0(t) = \exp(i\omega_0 t - t^2/T^2), \quad (1)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ 为脉冲的中心频率, λ_0 为中心波长, c 为真空中的光速, $T = \Delta\tau/\sqrt{2\ln 2}$, $\Delta\tau$ 为高斯脉冲强度分布的脉冲半峰全宽,光谱半峰全宽(FWHM)即谱宽为 $\Delta\lambda_l = 0.441\lambda_0^2/(c\Delta\tau)$,其频谱域的振幅分布为

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

对于如图 1 所示的光折变体全息光栅,设晶体光轴和 x 轴同向,记录光都为寻常光(o 光),晶体中的空间电荷场 E_{sc} 通过线性电光效应产生,且与光栅波矢 \mathbf{K} 同向。设超短脉冲激光光束在一维固定体全息光栅记录介质中以 Q 角入射,入射面平行于 xz 平面, d 为光栅的厚度,与 z 轴的夹角为 φ , Δ 为光栅间距。因为体全息光栅的布拉格波长选择性,不可能对每一个波长成分均满足布拉格衍射条件,可设 θ 为对应于中心波长的布拉格衍射角。对于 LiNbO₃ 晶体,当脉冲激光光束的偏振方向垂直于入射面时,在晶体中即为寻常光(o 光),光栅折射率调制度的

大小为 $n_{o1} = -\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{13}E_{sc}$;偏振方向平行于入射面时,在晶体中即为非常光(e 光),光栅折射率调制度的大小为 $n_{e1} = -\frac{1}{2n_r}(-\gamma_{13}n_o^4\sin^2\theta + \gamma_{33}n_e^4\cos^2\theta)E_{sc}$ 。其中 γ_{13} 和 γ_{33} 为 LiNbO₃ 晶体的电光系数, n_o 和 n_e 为晶体相应于中心波长的主折射率, $n_r = n_o n_e / \sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}$ 。

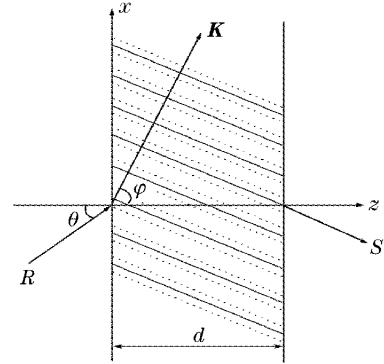


图 1 体全息光栅衍射的示意图

Fig. 1 Schematic of the diffraction of volume holographic grating

若忽略光栅中不同频率分量间的耦合,对于偏振方向垂直于入射面的超短脉冲激光光束中频率为 ω 、波长为 λ 的频率分量,采用类似与 Kogelnik 耦合波理论的近似方法,并利用边界条件 $S(0, \lambda) = 0$, $R(0, \lambda) = u_0(\lambda)$,解耦合波方程组

$$\begin{cases} c_R(\lambda)R' + \alpha(\lambda)R = -i\kappa S, \\ c_S(\lambda)S' + [\alpha(\lambda) + i\vartheta(\lambda)]S = -i\kappa R, \end{cases} \quad (3)$$

可得其衍射和透射光束频谱域的振幅分布

$$S(d, \lambda) = -i u_0(\lambda) \sqrt{\frac{c_R}{c_S}} \exp\left(-\frac{\alpha d}{c_R}\right) \times \exp(\xi) \frac{\sin(v^2 - \xi^2)^{1/2}}{(1 - \xi^2/v^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$R(d, \lambda) = u_0(\lambda) \exp\left(-\frac{\alpha d}{c_R}\right) \exp(\xi) \times \left[-\frac{\xi \sin(v^2 - \xi^2)^{1/2}}{(v^2 - \xi^2)^{1/2}} + \cos(v^2 - \xi^2)^{1/2} \right], \quad (5)$$

其中

$$c_R = \cos \theta, \quad c_S = \cos \theta - K \cos \varphi / \beta, \\ \vartheta = K \cos(\varphi - \theta) - \frac{K^2 \lambda}{4\pi n_o(\lambda)}, \quad \alpha(\lambda) = \frac{\mu c \sigma_0(\lambda)}{2n_o(\lambda)},$$

$$\kappa(\lambda) = \frac{\pi n_{o1}}{\lambda} - \frac{\mu c \sigma_1}{8n_o(\lambda)}, \quad v = \kappa d / \sqrt{c_S c_R},$$

$$\xi = \frac{d(\alpha/c_S - \alpha/c_R - i\vartheta/c_S)}{2}, \quad \beta = 2\pi n_o(\lambda)/\lambda;$$

$n_o(\lambda)$ 为光栅对波长 λ 的频率分量的平均折射率,可

依据赛耳迈耶尔色散公式^[15] 给出, $\epsilon_0(\lambda)$ 为自由空间的介电系数, $\sigma_0(\lambda), \sigma_1$ 分别为记录介质的电导率和其调制度。若光栅无倾斜, 并忽略光栅记录介质的吸收时, 衍射和透射光束频谱域强度分布为

$$I_S(d, \lambda) = |u_0(\lambda)|^2 v^2 \frac{\sin^2(v^2 - \xi^2)^{1/2}}{v^2 - \xi^2}, \quad (6)$$

$$I_R(d, \lambda) = |u_0(\lambda)|^2 - I_S(d, \lambda), \quad (7)$$

其中 $v = \frac{\pi d n_{o1}}{\lambda \cos \theta}$, $\xi = \frac{i C_0 \pi d (\lambda - \lambda_0)}{2 \Delta^2 \cos \theta}$, 是对 ϑ 作一级泰勒级数展开而得, $C_0 = [\lambda/n_o(\lambda)]' |_{\lambda=\lambda_0}$ 。显然不考虑色散效应的影响时, $C_0 = 1/n_o(\lambda_0)$, 与 Kogelnik 的耦合波理论一致。

对衍射和透射光束频谱域的振幅分布做时间逆傅里叶变换, 并取其模的平方, 即可得衍射和透射光束强度的时间分布表达式。定义衍射效率的频谱分布为 $\eta(\lambda) = I_S(d, \lambda)/I_0(d, \lambda)$, 其中 $I_0(d, \lambda) = u_0(d, \lambda) u_0^*(d, \lambda)$, 则其峰值为 $\eta_p = \sin^2[v(\lambda_0)]$ 。类似与 Kogelnik 耦合波理论中的方法, 由(6)式可得衍射效率降低为其峰值的一半时波长的变化范围为

$$\Delta \lambda_{go} = 2 \Delta \lambda_{o1/2} \approx 2 \times \frac{0.86 \cos \theta \Delta^2}{C_0 d}, \quad (8)$$

当 v 作较小的改变时, 衍射效率降低为其峰值的一半时(6)式中 ξ 虚部的近似值为 0.86, $\Delta \lambda_{go}$ 即为体全息光栅对垂直偏振的超短脉冲激光光束衍射的有效衍射谱宽。

若定义体光栅对超短脉冲激光光束衍射的衍射效率为所有频率的衍射光波的能量与所有频率的入射光波的能量之比, 则为

$$\eta = |c_S| \int I_S(d, \omega) d\omega / \left[|c_R| \int I_0(\omega) d\omega \right]. \quad (9)$$

类似的分析方法可用于只改变超短脉冲激光光束的偏振方向为平行于入射面的情形。若光栅无倾斜, 且不考虑光栅记录介质的吸收, 衍射和透射光束强度的频谱分布表达式形式上与(6)式、(7)式相同, 其中 $v = \frac{\pi d n_{e1} \cos 2\theta}{\lambda \cos \theta}$, $\xi = \frac{i C_e \pi d (\lambda - \lambda_0)}{2 \Delta^2 \cos \theta}$, $C_e = [\lambda/n_e(\lambda)]' |_{\lambda=\lambda_0}$ 。体光栅对平行偏振的超短脉冲激光光束衍射的有效衍射谱宽为

$$\Delta \lambda_{ge} = 2 \Delta \lambda_{e1/2} \approx 2 \times \frac{0.69 \Delta^2 \cos \theta}{c_e d}, \quad (10)$$

体光栅的衍射效率也由定义式(9)计算出。

对于化学计量熔体生长的 LiNbO₃ 晶体, 在温度为 293 K, 铌和锂的摩尔比近似为 1, $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$ 时, $C_0^{-1} = 2.1707$, $C_e^{-1} = 2.1013$ 。若不考虑色散效应的影响, 则 $C_0^{-1} = 2.2343$, $C_e^{-1} = 2.1554$, 由此可见

受色散效应的影响, 光栅的有效衍射谱宽变窄, 脉冲宽度变大, 即色散效应导致了脉冲的展宽。而且中心波长一定, 入射角度很小时, 相应的体全息光栅的有效衍射谱宽可看作与光栅的厚度成反比, 而与光栅周期的平方成正比, 且光栅参量一定时, $\Delta \lambda_{go} > \Delta \lambda_{ge}$, 入射脉冲的偏振方向垂直于入射面时, 光栅的有效衍射谱宽大于偏振方向平行于入射面的情形。因此, 虽然体全息光栅会限制被衍射的入射脉冲的谱宽, 但若选取较大的光栅周期和较小的光栅厚度, 并使入射光的偏振方向平行于入射面, 就能使通过体全息光栅衍射的光谱成分增多, 谱宽变大, 衍射效率增强。

3 谱宽比对衍射性质影响的数值分析

定义谱宽比 R_{bw} 为入射脉冲的谱宽和体全息光栅的有效衍射谱宽之比。 R_{bw} 不同, 其衍射效果也不同。对于在 LiNbO₃ 晶体内形成的光折变体全息光栅, 取 $d = 1 \text{ mm}$, $\Delta = 3 \mu\text{m}$, 空间电荷场为 $5.21 \times 10^6 \text{ V/m}$ 时, 可计算得 $n_{o1} = 2.50 \times 10^{-4}$, 相应的, $n_{e1} = 7.97 \times 10^{-4}$ 。对于中心波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光光束, 光栅的有效衍射谱宽近似为 $\Delta \lambda_{go} = 0.0338 \mu\text{m}$, $\Delta \lambda_{ge} = 0.0246 \mu\text{m}$ 。对于入射脉冲的偏振方向垂直于入射面的情形, 如图 2 所示, 其中 $I_0(\lambda)$ 和 $I_S(\lambda)$ 分别表示入射脉冲光和衍射光的强度频谱分布。在图 2(a)中, 当 $R_{bw} = 3$ 时, 入射脉冲的谱宽较大, 其衍射光束的曲线和 $R_{bw} = 1$ 时入射脉冲的曲线重合, 表明此时衍射光束的谱宽近似为光栅的有效衍射谱宽, 而当 $R_{bw} = 1/3$ 时, 衍射光束和入射光束的曲线重合, 表明其谱宽基本上不改变。但当 $R_{bw} = 1$ 时, 衍射光束的谱宽比入射脉冲的谱宽略小, 分别对应于图 2(b)中衍射光束时间分布曲线明显的展宽与变形, 基本保持不变和略有展宽三种情形, 并与图 2(c)和图 2(d)中透射光束频谱及时分布曲线的变化一致。在图 2(b)和图 2(d)中, 由于光栅对脉冲光束的传播在时间上的延迟, 使其时间分布曲线的峰值不在零点。对于入射脉冲激光光束的偏振方向平行于入射面的情形, 也有类似的结果, 如图 3 所示, 但脉冲展宽和变形的更为明显。

谱宽比 R_{bw} 不同时, 对于垂直和平行偏振的入射脉冲光, 其衍射光的谱宽的变化如图 4 所示。当 R_{bw} 较小时, 入射脉冲光的各频谱成分均能够经体全息光栅衍射, 所以衍射光束的谱宽即为入射脉冲光的谱宽; 而当 R_{bw} 较大时, 入射脉冲光的光谱带宽变大, 其频谱分布中愈来愈多的频谱成分不能通

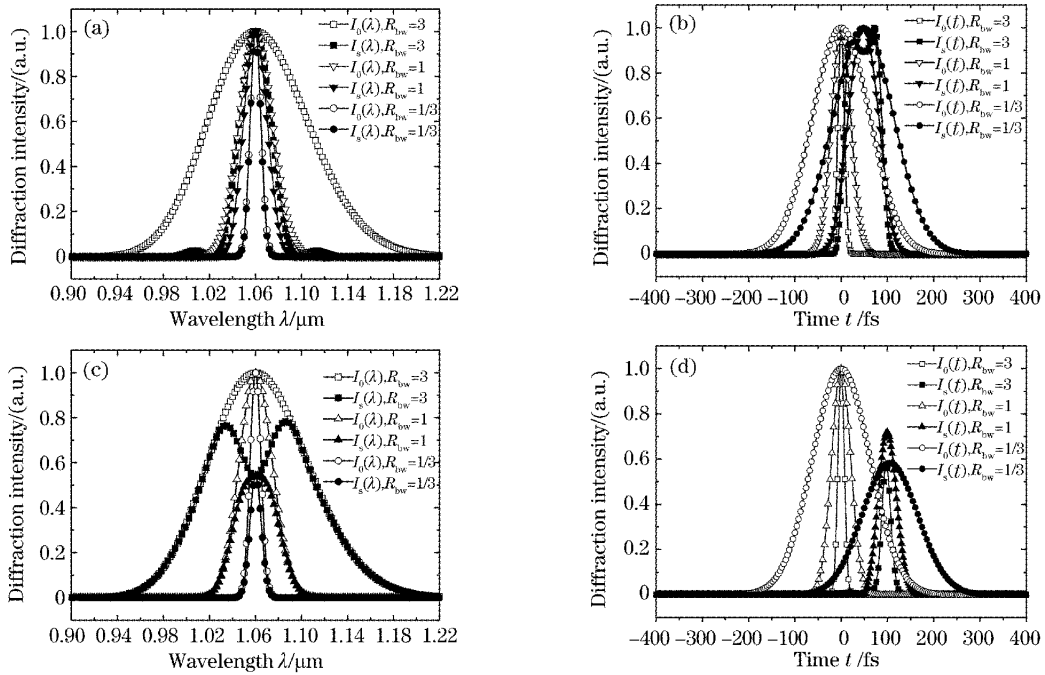


图 2 不同谱宽比的垂直偏振的超短脉冲光透射与衍射的频谱和时间分布曲线

Fig. 2 Spectral and temporal distributions of diffraction and transmission intensities for ultra-short pulse with perpendicular polarization at different ratios of spectral width

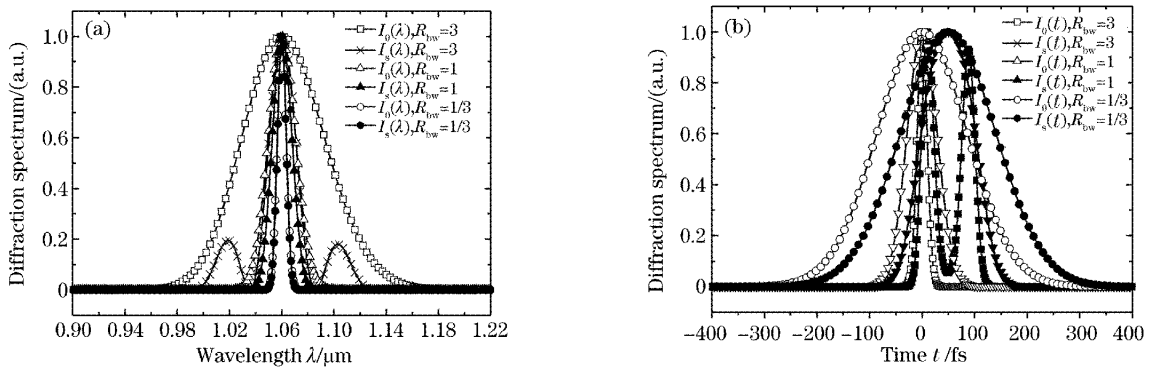


图 3 不同谱宽比的平行偏振的超短脉冲光衍射的频谱和时间分布曲线

Fig. 3 Spectral and temporal distributions of diffraction intensity for ultra-short pulse with parallel polarization at different ratios of spectral width

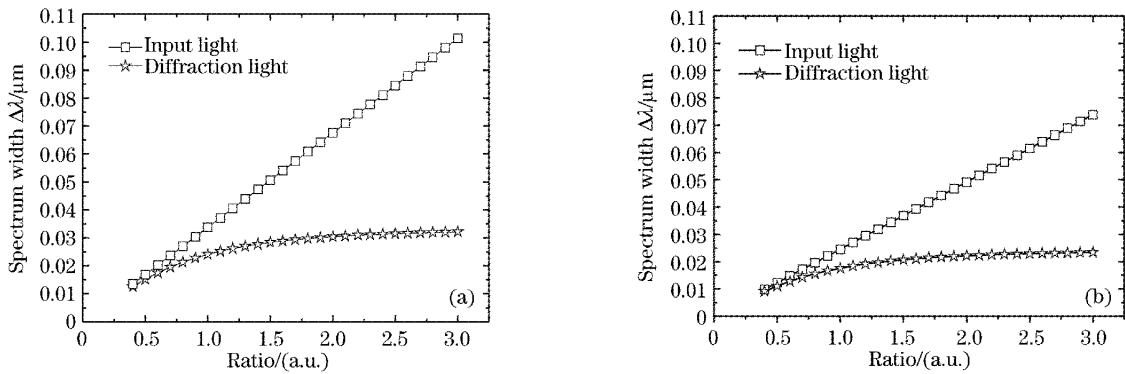


图 4 对于垂直(a)和平行(b)偏振的入射脉冲,衍射光束的谱宽随 R_{bw} 的变化曲线

Fig. 4 Relation curve of diffracted spectral width and R_{bw} for perpendicular (a) and parallel (b) polarized input Gaussian pulse

过体全息光栅衍射,其衍射光的谱宽基本上为体全息光栅的有效衍射谱宽,逐渐趋于近似值 $\Delta\lambda_{go} = 0.0338 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda_{ge} = 0.0246 \mu\text{m}$,而且和入射脉冲光的谱宽相差的也愈大,即通过光栅衍射后,愈不容易保持原来的谱宽和形状。

4 衍射效率的变化

对应于入射脉冲的不同脉宽,垂直和平行偏振的入射脉冲光的衍射效率的变化如图 5 所示,随着入射脉宽的增加, R_{bw} 逐渐变小,衍射效率逐渐增加,但变化逐渐趋于平缓,且平行偏振的入射脉冲光逐渐趋于一个较大的值。这是因为入射脉宽很大时,相应的 R_{bw} 非常小,入射脉冲光的各频谱成分均能通过体光栅,使其衍射效率逐渐趋于一个定值。

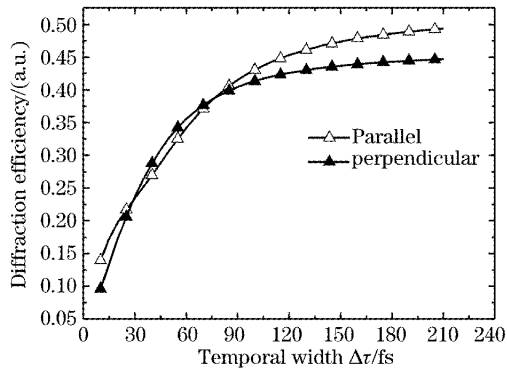


图 5 衍射效率随入射脉冲的脉宽变化的曲线

Fig. 5 Relation curves of diffraction efficiency and temporal width of the input pulse

5 结 论

拓展了 Kogelnik 的耦合波理论,分析了超短脉冲激光光束经透射型光折变体全息光栅衍射的特性。当入射脉冲激光光束的偏振方向垂直于入射面时,光栅的有效衍射谱宽较平行的情形大,衍射效率在脉宽较大时较平行的情形小。考虑色散效应的影响时,光栅的有效衍射谱宽变小,即色散效应使脉冲展宽。选取相应的光栅参量及入射条件也可以改变光栅的有效衍射谱宽。数值研究表明受色散效应、光栅参量等因素的影响,不同偏振状态的入射脉冲激光光束的衍射特性受谱宽比的影响很大,当谱宽比小于 1 时,脉冲的谱宽衍射后基本上保持不变,当谱宽比大于 1 时,衍射光将发生相应的展宽及变形。所以研究体全息光栅对超短脉冲光衍射的性质时,应综合考虑入射脉冲光的偏振状态、光栅的折射率

调制度、光谱宽度等因素,以得到满意的效果。

参 考 文 献

- 1 B. Schenkel, J. Biegert, U. Keller *et al.*. Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1987~1989
- 2 Yang Zhenjun, Hu Wei, Zheng Yizhou *et al.*. The ultrashort pulsed elegant Hermite-Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1571~1576 (in Chinese)
杨振军, 胡 巍, 郑一周等. 超短脉冲复宗量厄米高斯光束[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1571~1576
- 3 Xia Lan, Qian Liejia. Serrated-aperture apodizers of high-energy ultrashort pulse-laser beams[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 57~61 (in Chinese)
夏 兰, 钱列加. 高能飞秒激光光束锯齿光阑截趾整形[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 57~61
- 4 M. Gu, X. S. Gan. Fresnel diffraction by circular and serrated apertures illuminated with an ultrashort pulsed-laser beam[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(4): 771~778
- 5 Liu Zhijun, Lü Baida. Focusing of ultrashort pulsed Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 798~802 (in Chinese)
刘志军, 吕百达. 超短脉冲高斯光束通过透镜的聚焦特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 798~802
- 6 Wang Huaishen, Zhou Changhe, Li Jianlang *et al.*. Talbot effect of a grating under ultrashort pulsed-laser illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 320~323 (in Chinese)
王淮生, 周常河, 李建朗等. 光栅在超短脉冲激光照射下的塔尔博特效应[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 320~323
- 7 Teng Shuyun, Liu Liren, Zu Jifeng *et al.*. Equivalence of Talbot effect of the grating illuminated by the pulsed laser and continuous polychromatic light[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1177~1182 (in Chinese)
滕树云, 刘立人, 祖继锋等. 脉冲和连续多色光源照明下光栅泰伯效应的等价性[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1177~1182
- 8 R. Piestun, David A. B. Miller. Spatiotemporal control of ultrashort optical pulses by refractive-diffractive-dispersive structured optical elements[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1373~1375
- 9 D. Brady, Alan G. -S. Chen, G. Rodriguez. Volume holographic pulse shaping[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(8): 610~612
- 10 R. A. Athale, K. Raj. Fourier-plane filtering by a thick grating: a space-bandwidth analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(12): 880~882
- 11 Seunghoon Han, Bong-Ahn Yu, Seunghwan Chung *et al.*. Filter characteristics of a chirped volume holographic grating[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 107~109
- 12 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
- 13 Teng Shuyun. Applications of the diffraction in optical communication and optical information processing[D]. Shanghai: Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2004. 104~121 (in Chinese)
滕树云. 衍射光学在光通信和光学信息处理中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2004. 104~121
- 14 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 15 D. S. Smith, H. D. Riccius, R. P. Edwin. Refractive indices of lithium niobate[J]. *Opt. Commun.*, 1976, **17**(3): 332~335