

超短脉冲激光照射下光栅 Talbot 效应的实验研究*

王伟¹, 周常河²

(1 山东交通学院 数理系, 济南 250023)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:理论上研究了超短脉冲激光照射下光栅的 Talbot 效应, 得到了超短脉冲激光照射下光栅 Talbot 图像的性质. 实验上采用严格的实验方法(频率分辨光学开关装置测量超短脉冲激光、反射式扩束系统对超短脉冲进行扩束)很好地验证了理论分析结果. 理论分析和实验结果表明, 超短脉冲激光照射下光栅的 Talbot 图像的对比度会显著下降, 而且超短脉冲激光的脉宽越短, Talbot 距离越大, Talbot 图像的对比度会进一步下降.

关键词:超短脉冲激光; 光栅; 菲涅耳衍射; Talbot 效应

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3067-5

0 引言

当光栅被连续光的照射时, 在光栅后面的某些特定的距离处会重现光栅的像, 光学上把这种现象称为 Talbot 效应. 作为一种最基本的菲涅耳衍射光学现象之一, Talbot 效应由于具有广泛的应用而得到了深入的研究^[1-5]. 同时, 在过去的十几年里, 超短脉冲激光技术也得到了迅速的发展和广泛的研究^[6-7]. 于是, 研究超短脉冲激光照射下的 Talbot 效应变得非常有意义. 很多研究者已经开展了这方面的工作, 并且在理论上得到的超短脉冲激光照射下 Talbot 效应的主要特征^[8-9]. 本文将继续深入研究超短脉冲激光照射下的 Talbot 效应并首次在实验上很好地验证了理论结果. 由于 Talbot 效应和超短脉冲激光的广泛用途, 超短脉冲激光照射下的 Talbot 效应在也必定具有非常广泛的实际应用前景.

1 超短脉冲激光照射下光栅 Talbot 效应的理论分析

超短脉冲激光经过衰减器衰减、反射式扩束装置扩束后直接照射在光栅上, 在其后的 Talbot 距离 z 处放置一 CCD 相机探测其光强分布, 如图 1.

为了不失一般性, 假设超短脉冲激光的振幅在时间上呈高斯型分布, 可以将其表示为

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

式中 t 为时间, ω_0 为中心波长 λ_0 对应的中心频率,

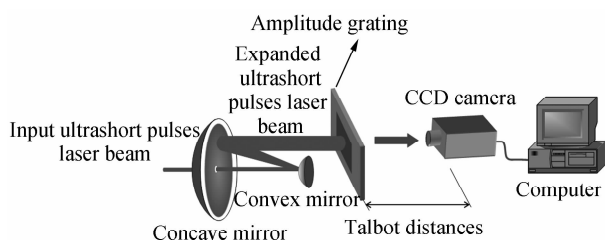


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

$\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, c 为真空中的光速, T 描述了超短脉冲激光的时间宽度, 它与激光脉冲的半高全宽 T_{FWHM} 之间的关系为

$$T = T_{\text{FWHM}}/2 \sqrt{\ln 2} \quad (2)$$

超短脉冲激光在频域上的振幅 $E(\omega)$ 可用 $E(t)$ 的傅里叶变换表示为

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i(\omega - \omega_0)t - \frac{t^2}{T^2}] dt = \frac{\Delta\tau}{4\sqrt{\pi \ln 2}} \exp\left[-\frac{\Delta\tau^2(\omega - \omega_0)^2}{8 \ln 2}\right] \quad (3)$$

式中 $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为超短脉冲激光的频率, λ 为 ω 对应的波长. 对于一单频光, 可以利用菲涅耳衍射积分公式来计算在物面后光场振幅分布为

$$U(x, y, z, \omega) = \frac{\exp(i\frac{2\pi}{\lambda}z)}{i\lambda z} \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1, \omega) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_1 x + y_1 y)\right] \cdot \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(x_1^2 + y_1^2)\right] dx_1 dy_1 \quad (4)$$

式中 $U_1(x_1, y_1, \omega)$ 和 $U(x, y, \omega)$ 分别代表物面和观测面上的振幅分布, 观测面和物面的距离为 z . 假设入射光栅为矩形振幅光栅, 其开口比为 $1/M$ (M 为正整数), 其透光率函数 $g(x)$ 可以表示为

* 国家杰出青年基金自然科学基金(60125512)和山东交通学院自然科学基金(Z200716)资助

Tel: 0531-80687404 Email: weiwang7712@hotmail.com

收稿日期: 2008-11-23

修回日期: 2009-06-02

$$g(x) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left(\frac{x-l d}{d/M} \right) \quad (5)$$

M 为光栅周期 d 与一个周期 d 内透明部分的宽度比. 可以将式(5)展成傅里叶级数形式为

$$g(x) = \sum_l A_l \exp \left[i \frac{2\pi l x}{d} \right] \quad (6)$$

式中 l 为傅里叶级次, $A_l = (1/M) \text{sinc}(l/M)$ 为傅里叶系数. 将式(6)代入式(4), 可得^[8-9]

$$U(x, z, \omega) = \frac{\exp(i \frac{2\pi z}{\lambda})}{\sqrt{i\lambda z}} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_l A_l \exp \left(i \frac{2\pi l x_0}{d} \right) \cdot \exp \left[-\frac{i\pi}{\lambda z} (x-x_1)^2 \right] dx_0 = \frac{\exp(i \frac{2\pi z}{\lambda})}{\sqrt{i\lambda z}} (1+i) \cdot \sqrt{\frac{\lambda z}{2}} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} A_l \exp \left(i \frac{2\pi l x}{d} \right) \exp \left(\frac{i 2\pi l^2 z}{2d^2/\lambda} \right) = \exp \left(i \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \sum_{l=-\infty}^{+\infty} A_l \exp \left(i \frac{2\pi l x}{d} \right) \exp \left(\frac{i 2\pi l^2 z}{2d^2/\lambda} \right) \quad (7)$$

式中 z 是观测平面到光栅平面的距离. 从式中可以看出在 $z = 2nd^2/\lambda$ 处 (n 为自然数), 光场分布和入射光栅一样, 即 Talbot 自成像. 设 $Z_T = 2d^2/\lambda$, 则在光栅后面 nZ_T 处出现光栅自成像, 光学上称 Z_T 为 Talbot 距离.

经过光栅后, 频域上的振幅可表示为

$$H(x, y, z, \omega) = E(\omega) U(x, y, z, \omega) \quad (8)$$

那么在时域上的振幅为

$$h(x, y, z, t) = F^{-1} \{ H(x, y, z, \omega) \} \quad (9)$$

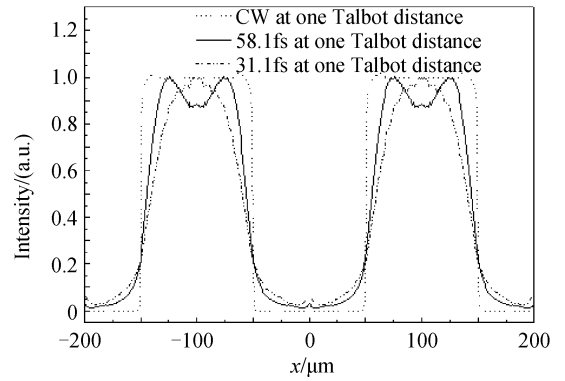
CCD 相机的响应时间远大于超短脉冲激光的脉宽. 因此利用 CCD 相机探测到的能量为时间上的平均光强

$$I(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} |h(x, y, z, t)|^2 dt \quad (10)$$

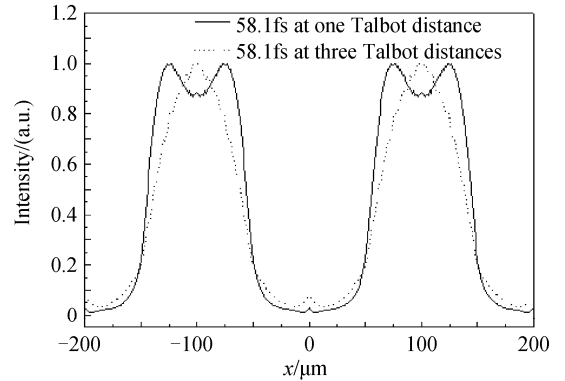
超短脉冲激光可以看作相对于中心频率对称分布的多种频率单频光的叠加而成, 考虑到帕瑟瓦尔 (Parseval) 定理, 并将式(3)和式(7)代入式(10)有^[8-9]

$$I_{\text{femto}}(x, z, \Delta\tau) = \frac{\Delta\tau^2}{8\ln 2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{\Delta\tau^2 (\omega - \omega_0)^2}{8\ln 2} \right] \cdot \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{l'=-\infty}^{+\infty} A_l A_{l'} \exp \left[i \frac{2\pi(l-l')}{d} x \right] \cdot \exp \left\{ \frac{i 2\pi [l^2 - (l')^2] z}{2d^2/\lambda} \right\} d\omega \quad (11)$$

式(11)中 l, l' 为傅里叶级次, $A_l, A_{l'}$ 为傅里叶系数. 假设 58.1 fs 的超短脉冲激光照射光栅的是开口比为 1/2、周期为 200 μm 的振幅光栅. 利用计算机数值模拟方法求解方程(11), 可以得到光强分布曲线, 如图 2.



(a) Under CW and ultrashort pulses illumination at one Talbot distance



(b) Under ultrashort pulses laser illumination at one and three Talbot distance

图 2 一倍 Talbot 距离处, 连续光和超短脉冲激光照射下光强分布曲线以及超短脉冲激光照射下, 一倍和三倍 Talbot 距离处光强分布曲线

Fig. 2 Intensity distribution of the Talbot images under CW and ultrashort pulses laser illumination at one Talbot distance and at one and three Talbot distances under ultrashort pulses laser illumination

从图 2 中可以看出, 超短脉冲激光照射下光栅后 Talbot 距离处的光强分布和连续光照射下的光强分布完全不同, 超短脉冲激光会带来衍射光强分布的强烈变形. 并且, 脉冲宽度越小带来的光强分布的变形越明显, 脉冲越宽其光强分布越接近连续光; 在相同脉宽的超短脉冲激光照射下, 更远的 Talbot 距离会带来更大的光强分布的变形.

2 实验验证

2.1 实验装置

为了在实验上验证上面的理论模拟结果, 采用的实验装置如图 1. 超短脉冲激光由相干公司生产的钛宝石振荡器 (Mira-Seed) 产生, 其中心波长为 800 μm , 该振荡器是由相干公司生产的 Verdi-6 的全固态激光器抽运. 超短脉冲激光经过扩束系统扩束后照射到光栅上. 为了避免超短脉冲激光经过介质后发生任何改变, 实验中采用了反射式扩束系统,

它包括一个曲率半径为 200 mm 的凹面反射镜和一个曲率半径为 10 mm 的凸面反射镜组成,其放大倍数为 20 倍. 实验中采用的光栅是开口比为 1/2、周期为 200 μm 的振幅光栅,放置在光栅后面 Talbot 距离处的 CCD 相机可以拍摄 Talbot 图像.

2.2 连续光和超短脉冲激光照射下的 Talbot 图像

利用实验室搭建好的二次谐波型频率分辨光学开关 (Second-harmonic Generation Frequency-Resolved Optical Gating, SHG-FROG) 装置来测量超短脉冲激光^[10],如图 3,可以测出振荡器产生超短脉冲激光的时域和谱域的宽度分别为 58.1 fs 和 27.03 nm. 另外,通过调节谐振腔和泵谱激光功率,该钛宝石振荡器也可以产生波长为 800 nm 的连续光.

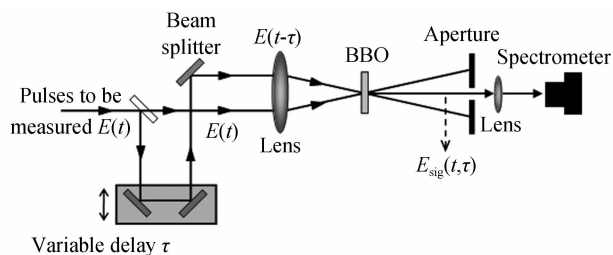
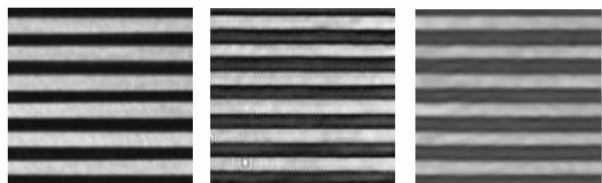


图 3 SHG-FROG 装置

Fig. 3 Schematic diagram of a SHG-FROG

利用 CCD 分别拍摄到连续光照射下一倍 Talbot 距离处,58.1 fs 的超短脉冲激光照射下一倍和三倍 Talbot 距离处的 Talbot 图像,如图 4. 利用图像处理软件,图 5 给出了图 4 中对应的 Talbot 图像的光强分布曲线.

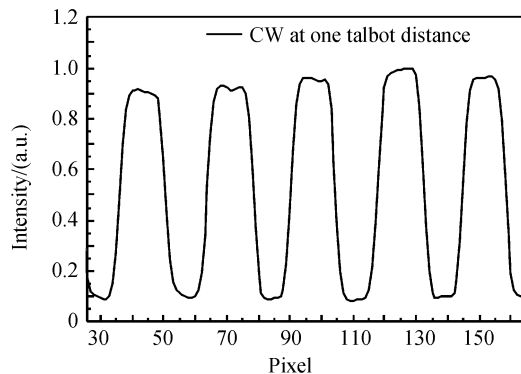
从图 4 和图 5 可以看出:连续光照射下光栅的 Talbot 图像的光强分布是明暗相间的均匀分布,这正是入射光栅的自成像. 和连续光照射下光栅的 Talbot 图像的光强分布相比,超短脉冲激光会带来 Talbot 图像光强分布的显著变形,它使得明暗相间的 Talbot 条纹的分界变得模糊,图像的对比度和



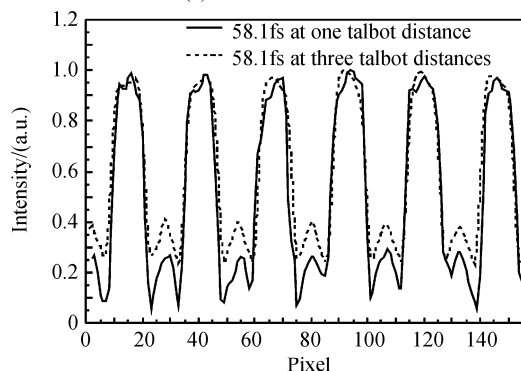
(a)Under CW illumination at one Talbot distance;(b)Under ultrashort pulses laser illumination (58.1 fs) at one Talbot distance;(c)Under ultrashort pulses laser illumination (58.1 fs)at three Talbot distance

图 4 连续光照射下的、超短脉冲激光 (58.1 fs) 照射下的一倍 Talbot 距离处的以及超短脉冲激光 (58.1 fs) 照射下的三倍 Talbot 距离处的 Talbot 图像

Fig. 4 Talbot images under CW illumination at one Talbot distance under ultrashort pulses laser illumination (58.1 fs) at one Talbot distance and under ultrashort pulses laser illumination (58.1 fs) at three Talbot distances



(a)Under CW illumination



(b)Under ultrashort pulses laser illumination

图 5 连续光照射下 Talbot 图像和超短脉冲激光照射下不同 Talbot 距离处光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of measured Talbot image under CW illumination and under ultrashort pulses laser illumination

衍射效率明显下降. 这是因为超短脉冲激光和多色光一样具有非常宽的光谱宽度,而 Talbot 距离和波长成反比关系,实验中的 Talbot 距离是根据超短脉冲激光的中心波长 800 nm 计算得到,而对于超短脉冲激光所具有宽光谱的其他波长而言,这个距离不再是其精确的 Talbot 距离,在此距离处也就不可能得到一个清晰的光栅自成像图像. 另外,从图 4 和图 5 中还可以看出:更远的整数 Talbot 距离会造成超短脉冲激光 Talbot 图像光强分布的更大变形. 这是因为再更远的 Talbot 距离处,宽光谱对应的 Talbot 距离与其中心波长的 Talbot 距离差别会更大. 另外,多色光照射下的 Talbot 图像在较远的 Talbot 距离处同样会产生类似的效应,其原因和上面的分析一样^[3].

2.3 不同的超短脉冲激光照射下的 Talbot 图像

通过调节振荡器的谐振腔和腔外压缩棱镜可以对超短脉冲激光进行压缩而获得更短的脉冲,利用 SGH-FROG 装置测量到的压缩后的超短脉冲激光的时域和谱域的宽度分别为 31.1 fs 和 34.1 nm. 在该超短脉冲激光照射下,CCD 相机拍摄了一倍 Talbot 距离处的图像,如图 6(a),图 6(b)给出了其光强分布曲线.

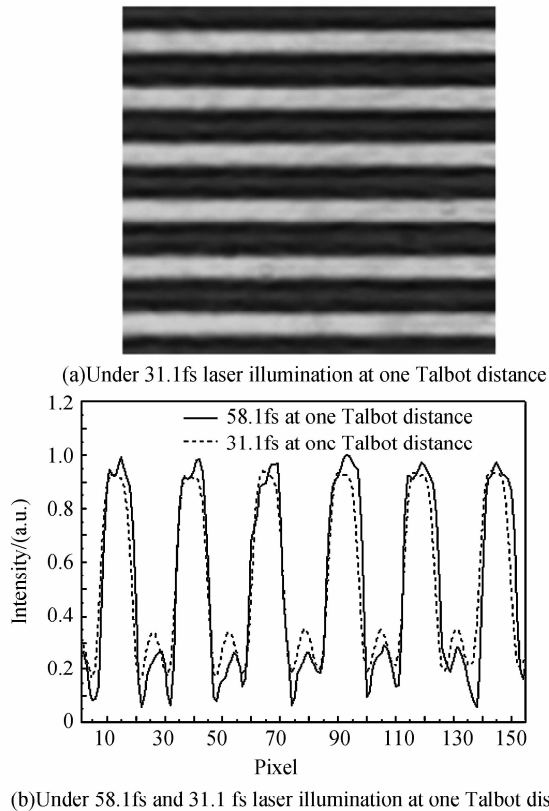


图6 脉宽为31.1 fs的超短脉冲激光照射下一倍Talbot距离处的Talbot图像和58.1 fs和31.1 fs的超短脉冲激光照射下Talbot图像的光强分布曲线

Fig. 6 Measured Talbot image under 31.1 fs laser illumination at one Talbot distance and Intensity distribution of the measured Talbot images under 58.1 fs and 31.1 fs laser illumination at one Talbot distance

从图6中可以看出具有更短脉宽的超短脉冲激光会带来Talbot图像光强分布的更大的变形,明暗条纹的对比度和衍射效率会进一步下降.这是因为一般而言,更短的超短脉冲激光具有更宽的光谱宽度.

3 结论

首先利用菲涅耳衍射理论分析了超短脉冲激光照射下光栅的Talbot图像的光强分布规律,给出了超短脉冲照射下光栅的Talbot效应的主要性质.实验上采用频率分辨光学开关装置测量超短脉冲激光和反射式扩束系统对超短脉冲进行扩束等严格的实验方法很好地验证了理论分析结果.理论分析和实验结果表明,超短脉冲激光照射下光栅的Talbot图像的对比度和衍射效率会显著下降,而且超短脉冲

激光的脉宽越短,Talbot距离越大,Talbot图像的对比度和衍射效率会进一步下降.理论分析结论和实验结果对于Talbot效应的实际应用具有重要的参考价值.

参考文献

- [1] LUCAS GARCÍA-RODRÍGUEZ, JOSÉ ALONSO, EUSEBIO BERNABÉU. Grating pseudo-imaging with polychromatic and finite extension sources[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(11): 2529-2541.
- [2] XI Peng, ZHOU Chang-he, DAI En-wen, *et al.* Generation of near-field hexagonal array illumination with a phase grating[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(4): 228-230.
- [3] ZHOU Chang-he, WANG Wei, DAI En-wen, *et al.* Simple principles of the talbot effect[J]. *Optics & Photonics News*, 2004, **15**(11): 46-50.
- [4] LU Yun-qing, ZHOU Chang-he, LUO Hong-xin. Talbot effect of a grating with different kinds of flaws[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, **22**(12): 2662-2667.
- [5] FENG Jie, ZHOU Ren-kui, ZHAO Jian-ke, *et al.* Relationship between talbot effect and geometrical imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2332-2335.
冯婕,周仁魁,赵建科,等.对Talbot自成像和几何成像关系的分析[J].光子学报,2008, **37**(11): 2332-2335.
- [6] GABOLDE P, TREBINO R. Self-referenced measurement of the complete electric field of ultrashort pulses [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(18): 4423-4429.
- [7] YANG Bing, YANG Yan-hua, ZHANG Hong-fang, *et al.* Instantaneous characteristics of diffraction and transmission of photorefractive grating illuminated by ultra-short 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.
- [8] WANG Huai-sheng, FU Shou-li, ZHENG Ying-dong. The temporal Talbot effect of a grating illuminated by an ultrashort pulsed-laser beam[J]. *Acta Photonica 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.
- [9] XI Peng, ZHOU Chang-he, DAI En-wen, *et al.* Novel method for ultrashort laser pulse-width measurement based on self-diffraction effect [J]. *Optics Express*, 2002, **10**(20): 1099-1104.
- [10] TREBINO R. Frequency-resolved optical gating: the measurement of ultrashort laser pulse[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002: 101-139.

Experimental Research on Talbot Effect Under Ultrashort Pulses Laser Illumination

WANG Wei^{1,2}, ZHOU Chang-he²

(1 Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

(2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Talbot effect of a grating under ultrashort pulses laser illumination is analyzed theoretically. In the experiment, ultrashort pulses laser is measured by a frequency-resolved optical gating (SHG-FROG) apparatus and the ultrashort pulses laser is expanded by a reflective expanded system. Experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. Theoretically and experimentally investigations indicate that the contrast of Talbot images under ultrashort pulses laser illumination are remarkable decreased. In addition, the contrast of Talbot images are further decreased at longer Talbot distance and under shorter ultrashort pulses laser illumination.

Key words: Ultrashort pulses laser; Grating; Fresnel diffraction; Talbot effect



WANG Wei received the Ph. D. degree from the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science. His major research interests focus on ultrafast optics and polarization optics. Currently he is an associate professor at Shandong Jiaotong University.