

文章编号: 0258-7025(2005)07-0933-04

小尺寸波纹光阑的实验研究

凌 磊, 楼祺洪, 漆云凤, 叶震寰, 董景星, 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道了在光路中使用小尺寸波纹光阑代替圆孔光阑的研究结果。应用菲涅耳衍射光强分布理论以及光轴上光强分布理论对波纹光阑在一定条件下的作用范围进行了分析。用 CCD 成像系统对实验结果进行记录。结果表明实际与理论能较好地吻合。从光路的实际使用效果看, 对比圆孔光阑, 应用波纹光阑在其作用范围内实现了对光束衍射调制的抑制和填充因子的提高。

关键词 激光技术; 波纹光阑; 菲涅耳衍射; 衍射调制; 填充因子

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Experimental Research on Little-Size Serrated Aperture

LING Lei, LOU Qi-hong, QI Yun-feng,

YE Zheng-huan, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong

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

Abstract The experimental demonstration of the little-size serrated aperture instead of circular aperture in the laser system is given. The intensity distributing and the contributing range for using the serrated aperture are analyzed based on Fresnel diffraction theory. The pictures are recorded by charge coupled device (CCD) system. The intensity ripples of Fresnel diffraction are suppressed and the filling factor is improved by using the serrated aperture.

Key words laser technique; serrated aperture; Fresnel diffraction; intensity ripples; filling factor

1 引 言

在高功率激光器设计中, 有一些关键性的问题需要解决, 其中的两个基本问题是: 1) 如何使激光增益介质的能量得到充分利用, 即高的填充因子; 2) 在高光束能量条件下, 如何有效避免光束由于自身菲涅耳衍射^[1]调制而产生的区域高能量分布, 损坏激光器件。文献[2, 3]报道了利用波纹光阑器件能有效地抑制圆孔光阑衍射造成的轴上光强调制, 并能获得极高的光束空间填充因子。文献[4]则报道了利用空间滤波器和波纹光阑结合, 能使波纹光阑在有效抑制轴上光强调制的同时, 又能优化由于波纹光阑的使用, 而同时引入的空间高频衍射调制, 使光束的近场分布得到改善。目前提到使用过此类光阑的有美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的 NOVA 装

置^[5]和日本大阪大学的 GEKKO Ⅱ装置^[6]。但文献资料均以理论计算和计算机的近场模拟光强分布为主, 实验时也仅涉及到大尺寸光斑, 而不涉及实测光斑质量。为了验证波纹光阑在实际使用中的效果, 本文使用平均直径为 10 mm, 调制深度为 1 mm 的小尺寸波纹光阑, 在波长为 632.8 nm 的 He-Ne 连续激光和波长为 308 nm 的 XeCl 准分子脉冲激光的辐照下, 对近场光束填充率和轴上光强衍射调制进行了实验分析, 并将实验数据与以前文献的理论推导结果进行了比较。

2 理论分析

根据文献[7, 8]的理论推导, 圆孔菲涅耳衍射光强解析表达式为

收稿日期: 2004-06-03; 收到修改稿日期: 2004-11-12

基金项目: 国家 863 计划(2004AA846020)和国家自然科学基金(10334110)资助项目。

作者简介: 凌 磊(1979—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究实习员, 主要从事准分子激光、激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: linglei@mail.siom.ac.cn

$$I_p = D^2 I_0 \left\{ 1 - 2J_0 \left(2F\pi \frac{\rho}{a} \right) \cos \left[\left(1 + \frac{\rho^2}{M^2 a^2} \right) MF\pi \right] + J_0^2 \left(2F\pi \frac{\rho}{a} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中 D 为振幅衰减系数, J_0 为零阶贝塞尔函数, 菲涅耳系数 $F = a^2 / (\lambda L)$, a 为衍射孔半径, L 为衍射孔到接收屏距离, λ 为入射波长, ρ 为接收屏上衍射光斑任一点 P 至中心点 P_0 的距离, 当以平面波入射时, $M = 1$ 。

由(1)式可以看到, 衍射光斑上光强分布只与距离 ρ 有关, 同光强点为圆周分布, 即产生圆环状衍射光斑。对于光轴上点, $D = 1, \rho = 0$, 则(1)式变为

$$I_p = I_0 [2 - 2\cos(\pi F)]. \quad (2)$$

由(1), (2)式还可看出, 当 F 变化时, 光轴上点的光强波动幅度最大, 而接收屏上其他各点的光强波动幅度均小于光轴上点。

当使用波纹光阑代替圆孔光阑在一定的菲涅耳系数 F 范围内抑制衍射接收屏上光强波动时, 考虑当光强波动幅度最大的光轴上的点波动被抑制时, 整个衍射光斑波动被抑制的情况。为此, 当只考虑光轴上点的光强波动的情况时, 根据文献[2~4]的理论推导, 对于入射光场振幅为 1 的平面波, 在经过光阑传输后, 其轴上光波振幅可表示为

$$u(0) = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[-i\pi F r^2(\theta_0)] d\theta_0, \quad (3)$$

对于一般边缘正弦调制的波纹光阑

$$r(\theta_0) = a[1 + \beta \sin(m\theta_0)], \quad (4)$$

代入式(3), 得轴上光强为

$$|u(0)|^2 = 1 + J_0^2(2\pi\beta F) - 2J_0(2\pi\beta F) \cos(\pi F), \quad (5)$$

当波纹光阑调制深度 $\beta = 0$ 时, 即对应普通的半径为

a 的圆孔光阑情况, 此时轴上光强 $|u(0)|^2 = [2 - 2\cos(\pi F)]$ 与(2)式一致, 其值在 $0 \sim 4$ 之间变动。当 J_0 取其零点时, 即当 $2\pi\beta F = x_m^0 (x_m^0 = 2.4048, 5.5201, 8.6537, \dots)$ 时, 光强 $|u(0)|^2 = 1$, 此时波纹光阑能够完全抑制光轴上的光强调制。但此条件却限定了特定的调制深度 β , 也限定了特定的菲涅耳系数 F 。解决这一问题的方法是使用边缘调幅型的正弦调制波纹光阑, 以保证菲涅耳系数可变, 而通过调整适当的光阑参数, 使轴上光强平滑区出现在光路中适当范围内。则实验中使用的波纹光阑一般公式

$$r(\theta_0) = a[1 + \beta \sin(m_1 \theta_0) \sin(m\theta_0)], \quad (6)$$

当考虑在此波纹光阑条件下, 轴上光波振幅波动小于 10% 的区域, 即

$$||u(0)| - 1| \leq 5 \times 10^{-2}, \quad (7)$$

此时由近似计算分析得菲涅耳系数要满足条件

$$|\pi\beta F - x_m^0| \leq 0.5, \quad (8)$$

此条件与 m_1, m 均无关, 而只与光阑的实际平均半径 a , 相对调制深度 β 和菲涅耳系数 F 有关。

在光阑的实际参数取 $a = 0.01 \text{ m}, \beta = 1\%, m_1 = 5, m = 50$ 时, 也就是说 $r(\theta_0) = 0.01[1 + 0.01\sin(5\theta_0)\sin(50\theta_0)]$ 时, 理论计算图和实际制作的波纹光阑示意图如图 1 所示。由(8)式及菲涅耳系数定义式, 取 J_0 的第一个零点 $x_1^0 = 2.4048$ 时, 在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 条件下, 波纹光阑影响范围是距光阑 $1.7 \sim 2.6 \text{ m}$, 而在 $\lambda = 308 \text{ nm}$ 条件下, 则是 $3.5 \sim 5.4 \text{ m}$, 此为该条件下的理论极限最大距离。而当 J_0 取第 7 个零点 $x_7^0 = 21.2116$ 时, 在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 条件下, 波纹光阑影响范围是距光阑 $0.73 \sim 0.76 \text{ m}$, 而在 $\lambda = 308 \text{ nm}$ 条件下, 则是 $1.50 \sim 1.57 \text{ m}$ 。

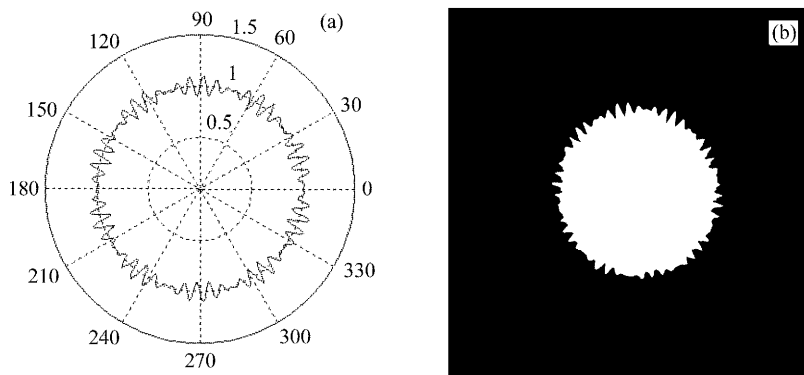


图 1 波纹光阑图

(a) 理论计算图; (b) 实际制作图

Fig. 1 Serrated aperture

(a) theoretical calculation; (b) real serrated aperture

可见当 J_0 取越靠后的零点时, 相应的作用距离也更靠近光阑, 而其作用范围也就越短。实际使用时, 可根据实验条件确定作用范围和作用距离, 选择合适参数的波纹光阑。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 其中激光器使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 连续激光器, 输出光斑直径为 1 mm, 以及波长为 308 nm 的 XeCl 准分子脉冲激光器, 工作频率为 50 Hz, 输出光斑大小为 4 mm × 5 mm。衰减器主要作用是使入射到 CCD 中的光强不至于使 CCD 饱和。为使入射光阑的光斑大小和光阑的实际尺寸相匹配, 使用了共焦透镜系统对光束进行放大, 放大后光斑尺寸略大于使用的光阑尺寸。为了制作边缘精细的小尺寸波纹光阑, 采用不同于传统的乳胶感光、镀变透射率膜、玻璃磨砂等方法, 而是使用激光振镜雕刻系统, 在钛薄片上直接刻蚀得到。光阑处采用边缘调幅型正弦调制波纹光阑和半径与其平均半径对应的圆孔光阑作比较。光路末端使用的是美国 SPIRICON 公司生产的 COHJ4800 CCD 成像探测系统。

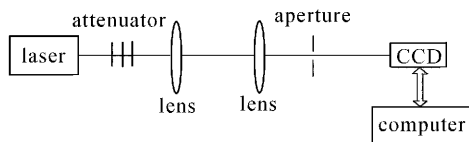


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

3.2 实验现象、结果及讨论

3.2.1 He-Ne 激光源

当光源为 He-Ne 激光器时, 使用焦距分别为 3 cm 和 100 cm 的共焦透镜系统, 在波纹光阑作用范围内, 使用 CCD 成像系统, 得到光束经过圆孔光阑和波纹光阑后的光斑图样如图 3 所示。

从图 3(a), (b) 中, 可明显看到 He-Ne 激光通过圆孔光阑所产生的干涉圆环, 而在图 3(c), (d) 中, 由于波纹光阑边缘的不规则形状, 打乱了光阑边缘到原相干点的等光程性, 所以未见到干涉环。

3.2.2 XeCl 准分子激光源

当光源为 XeCl 准分子激光器时, 使用焦距分别为 15 cm 和 100 cm 的共焦透镜系统, 在波纹光阑作用范围内, 得到光束经过圆孔光阑和波纹光阑后

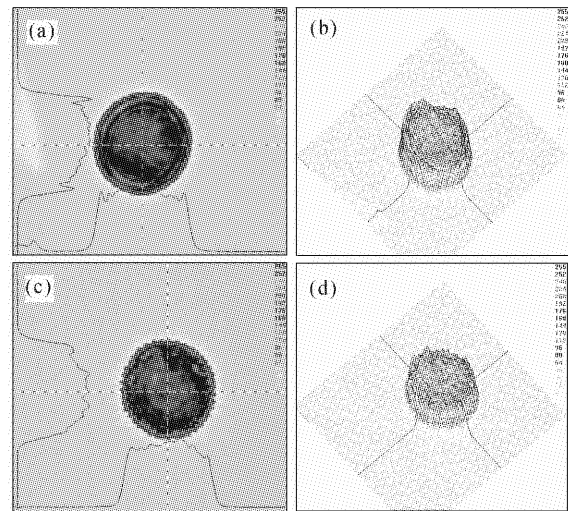


图 3 He-Ne 激光辐照下圆孔和波纹光阑衍射光强分布图

使用圆孔光阑时的(a)平面图和(b)立体图;

使用波纹光阑时的(c)平面图和(d)立体图

Fig. 3 He-Ne laser irradiating circular and serrated apertures

plane pic (a) and solid pic (b) with circular aperture;
plane pic (c) and solid pic (d) with serrated aperture

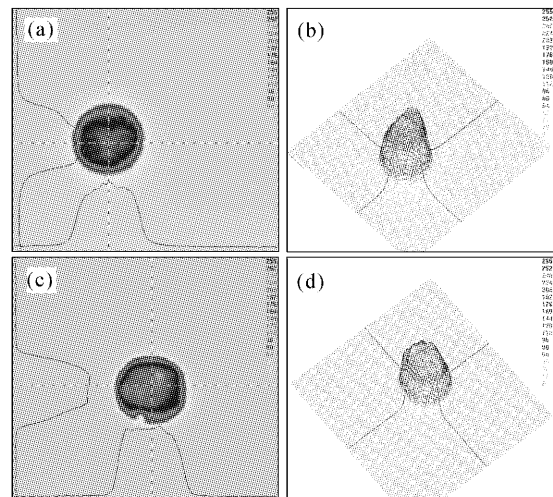


图 4 XeCl 激光辐照下圆孔和波纹光阑衍射光强分布图

使用圆孔光阑时的(a)平面图和(b)立体图;

使用波纹光阑时的(c)平面图和(d)立体图

Fig. 4 XeCl laser irradiating circular and serrated apertures

plane pic (a) and solid pic (b) with circular aperture;
plane pic (c) and solid pic (d) with serrated aperture

的光斑图样如图 4 所示。

对比图 4 中的(a), (b)和(c), (d), 可明显看到, 光束通过波纹光阑传输[(c), (d)], 比通过圆孔光阑的[(a), (b)]边缘要陡峭, 顶端要平坦, 即使用波纹

光阑时光束有更高的填充因子。

3.2.3 He-Ne 和 XeCl 准分子激光图样比较

比较 He-Ne 激光图样和 XeCl 准分子激光图样,在使用圆孔光阑时,图 3 有干涉圆环产生而图 4 没有,这是由于 He-Ne 激光的空间相干性较好,而 XeCl 准分子激光由于其出光机理决定了其相干性差,难以出现干涉现象。而在使用波纹光阑时,可以看到 XeCl 准分子激光在通过波纹光阑后其填充因子比它通过圆孔光阑时有显著提高而 He-Ne 激光则几乎没有什么改变,这是由于 He-Ne 激光光束强度为高斯分布,而 XeCl 准分子激光则为平顶分布,圆孔光阑对平顶分布的光束填充因子影响较大,而波纹光阑则能对填充因子有明显提高。

4 结 论

实验验证了波纹光阑对比圆孔光阑在实际使用中对光束自身衍射调制的改进和光束填充因子的提高,而对于在理论推导^[2~4]中出现的空间高频分量,在小尺寸波纹光阑的实验中几乎没有观察到,认为是由于光阑尺寸原因引起的。这为小尺寸波纹光阑在小型高功率激光器件上的应用提供了依据。

参 考 文 献

1 A. J. Campillo, J. E. Pearson, S. L. Shapiro *et al.*. Fresnel

diffraction effects in the design of high-power laser systems [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(2):85~87

2 Min. 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

3 Qian Liejia, Gong Wei, Wen Guojun *et al.*. Serrated circular aperture and its design [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1):117~121

钱列加,龚伟,文国军等. 波纹圆孔光阑的衍射及其设计[J]. *光学学报*, 1995, **15**(1):117~121

4 Wen Guojun, Qian Liejia, Qiu Yue *et al.*. Improve the light beam uniformity by using a serrated circular aperture and a space filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(6):435~438

文国军,钱列加,丘悦等. 利用波纹光阑和空间滤波器改善光束近场分布[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(6):435~438

5 C. Bibeau, D. R. Speck, R. B. Ehrlich *et al.*. Power, energy, and temporal performance of the Nova laser facility with recent improvements to the amplifier system [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(27):5799~5809

6 Bontoux Thierry, Saiki Taku, Kanabe Tadashi *et al.*. Beam pattern and filling factor improvement for a cassegrain three-pass amplifier using a new shape of optimized serrated apertures [C]. *SPIE*, 1997, **3047**:1000~1008

7 Wang Peng, Xu Yuguang, Yu Qinyue *et al.*. Intensity space distribution near image point of optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):160~166

王鹏,徐毓光,余勤跃等. 光学系统像点附近的光强空间分布[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2):160~166

8 Wang Peng, Xu Yuguang, Yu Qinyue. Physical meaning of analytic expression for Fresnel diffraction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(1):72~73

王鹏,徐毓光,余勤跃. 菲涅耳衍射解析表达式的物理意义[J]. *光子学报*, 1999, **28**(1):72~73