

# 利用波纹光阑和空间滤波器改善光束近场分布

文国军 钱列加 丘悦 吕君孝 范滇元 邓锡铭

(中国科学院上海光机所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

**提要** 详细研究了波纹光阑的非涅耳衍射特性, 提出并论证了利用波纹光阑和空间滤波器的结合使用能进一步有效地改善光束近场分布、抑制光束总体的衍射调制、提高光束填充因子。

**关键词** 衍射调制, 波纹光阑, 空间滤波器, 填充因子

## 1 引言

文献[1]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(Filling Factor)。在波纹光阑边缘引入周期性起伏的波纹调制, 虽然能有效地错乱 Sommerfeld 波包的位相<sup>[2~6]</sup>, 达到抑制轴上光强调制的效果, 但同时又引入了高频衍射调制, 限制了波纹光阑的实用性。本文研究了利用空间滤波器和波纹光阑的结合使用, 改善光束的低频和低频空间分布的可能性。理论和数值分析表明通过适当地选择波纹光阑和空间滤波器参数, 完全可以消除波纹光阑边缘衍射造成的强度高频调制, 同时又能有效地抑制大尺度低频衍射, 获得与超高斯光束几乎相同的空间分布和填充因子。进一步表明波纹光阑在高功率激光器中具有广泛的应用前景。

## 2 波纹光阑

在实际应用中, 光学器件总是放在光阑后的某一位置上, 因此我们只对适当大菲涅耳数对应的一定区域内的光强分布感兴趣。参见图 1 光路, 在柱坐标系  $(r, \theta)$  中, 菲涅耳积分可写成

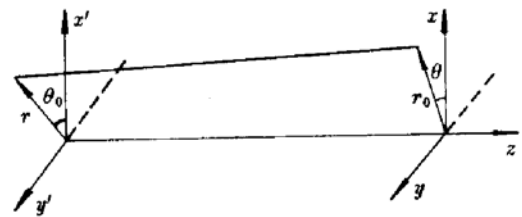


Fig. 1 The cardinal points and planes of an optical system

$$u(r, \theta) = iF \int_0^{2\pi} d\theta_0 \int_0^{\infty} T(r_0, \theta_0) \exp\{-i\pi F[r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)]\} r_0 dr_0 \quad (1)$$

这里假定入射光场是振幅为 1、位相均匀的平面波。 $T(r_0, \theta_0)$  为光阑的透过函数

$$\begin{aligned} T(r_0, \theta_0) &= 1 \text{ if } r_0 < r(\theta) \\ &= 0 \text{ if } r_0 > r(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

对于圆孔衍射, 轴上光强调制最为严重, 波纹光阑的作用首先是要有效地抑制轴上光强起伏。

轴上光强可表示为

$$u(0) = 1 - (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \exp - i\pi Fr^2(\theta_0)d\theta_0 \tag{3}$$

对于最简单的正弦状波纹光阑,  $r(\theta_0) = 1 + \alpha \sin m\theta_0$ , 则

$$|u(0)|^2 = 1 + J_0^2(2\pi\alpha F) - 2J_0(2\pi\alpha F)\cos \pi F \tag{4}$$

式中  $J_0$  是零阶贝塞尔函数。当  $2\pi\alpha F = 2.44$  ( $J_0$  的第一个零点) 时, 波纹光阑能完全抑制轴上光强调制。此条件暗示对于特定的调制深度  $\alpha$ , 只能保证在某一特定的菲涅耳数  $F$  处轴上光强的衍射调制被抑制。为了在较大范围内都能发挥波纹光阑的作用, 采用调幅型正弦(或余弦)波纹光阑无疑是一种有效的方法。其一般形式可写为

$$r_0(\theta_0) = 1 + \alpha \sin m_1\theta_0 \sin m\theta_0 \tag{5}$$

$\alpha = 0.1, m_1 = 4, m = 40$  的波纹光阑的通光孔径如图 2。平面波通过此波纹光阑后轴上光强的分布如图 3 所示。显然, 当  $F > 20$  时, 轴上光强的衍射调制被大幅度地降低。但从光束近场分布图 4(a)、图 5(a) 和图 6(a) 来看, 波纹光阑在抑制轴上光束调制的同时也带入了小尺度的高频振幅调制, 其调制强度由  $FR$  值衡量

$$FR = (I_{\max} - I_{\text{ave}})/I_{\text{ave}} \tag{6}$$

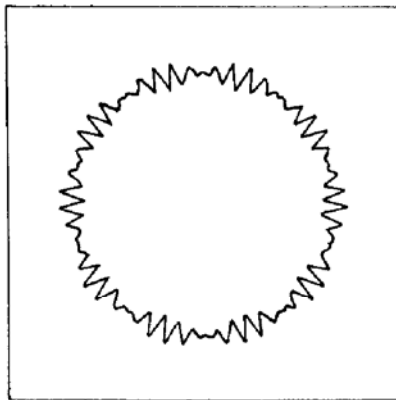


Fig. 2 The serrated aperture

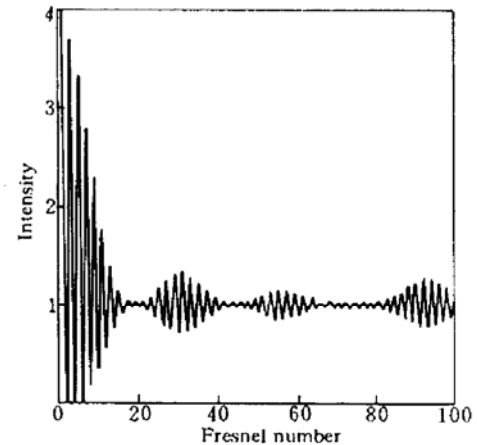


Fig. 3 The axis intensity versus Fresnel number for  $r_0 = 1 + 0.1 \times \sin 4\theta_0 \sin 40\theta_0$

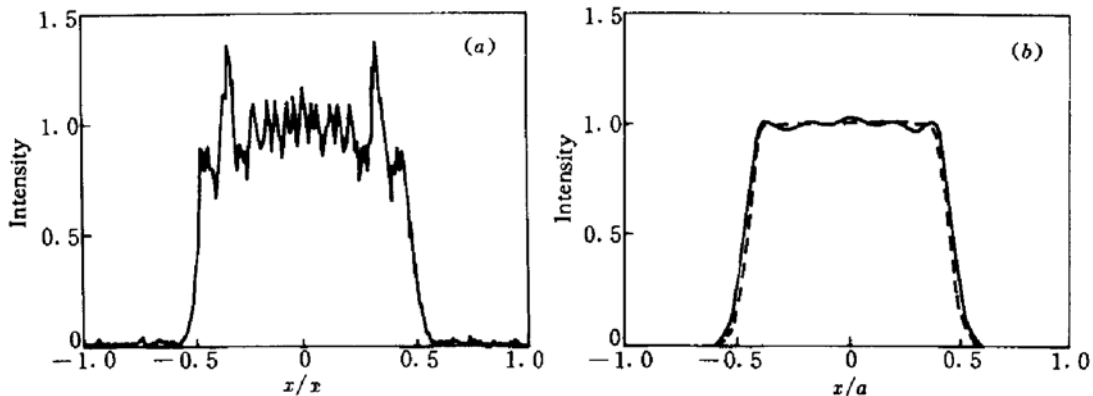


Fig. 4 The diffracted amplitudes of the serrated aperture  $r_0 = 1 + 0.1 \times \sin 4\theta_0 \sin 40\theta_0$  for  $F = 15$  (a) without spatial filter; (b) with spatial filter (solid line) and 12th the super-Gauss beam (dashed line)

高功率激光系统中另一个衡量激光束使用通光口径的物理量是填充因子, 它被定义为

$$FF = (\iint |u|^2 ds) / (|u|_{\max}^2 S) \tag{7}$$

式中  $S$  为边缘截止不导致严重衍射时光束的面积。由图 7 可以看出若仅使用波纹光阑,  $FF$  仍限制在较低的水平, 而  $FR$  未有效地抑制。由于材料负载强度与峰值功率密度紧密相关, 因此激光系统的输出功率受到限制, 不能发挥波纹光阑在高功率激光器中的应有作用。

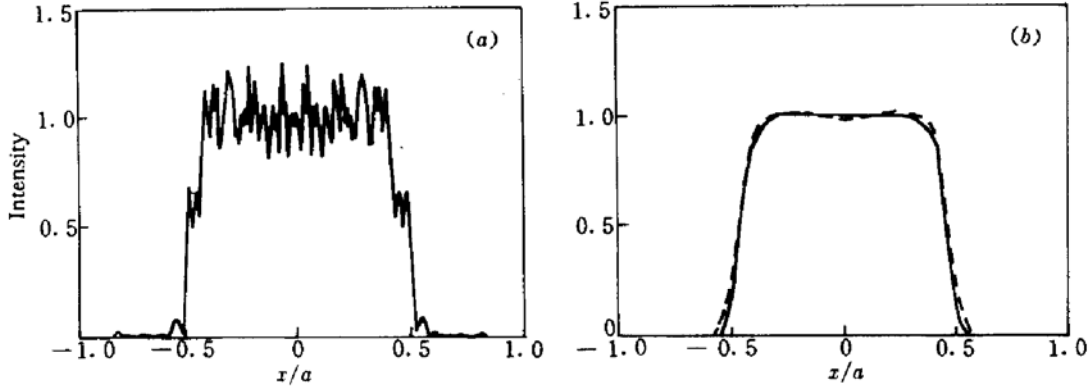


Fig. 5 The diffracted amplitudes of the serrated aperture  $r_0 = 1 + 0.1 \times \sin 4\theta_0 \sin 40\theta_0$  for  $F = 25$  (a) without spatial filter; (b) with spatial filter (solid line) and the 12th super-Gauss beam (dashed line)

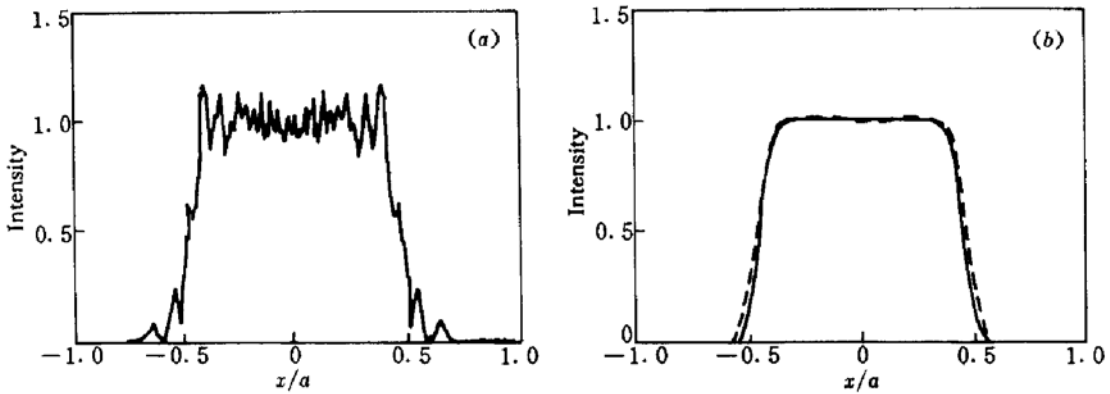


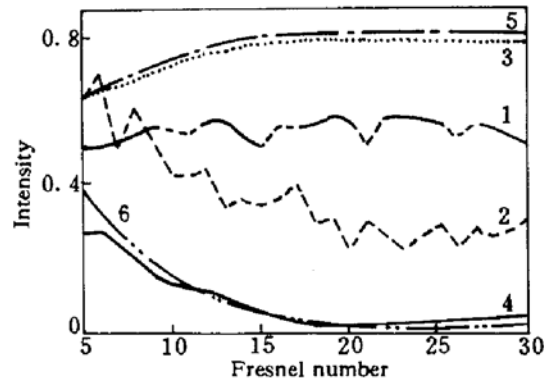
Fig. 6 The diffracted amplitudes of the serrated aperture  $r_0 = 1 + 0.1 \times \sin 4\theta_0 \sin 40\theta_0$  for  $F = 30$  (a) without spatial filter; (b) with spatial filter (solid line) and the 12th super-Gauss beam (dashed line)

Fig. 7  $FF$  and  $FR$  versus Fresnel number for

$$r_0 = 1 + 0.1 \times \sin 4\theta_0 \sin 40\theta_0$$

- 1; without spatial filter;
- 2; with spatial filter;
- 3; 12th super-Gauss beam;

- ①  $FF$  without space filter;      ②  $FR$  without space filter;
- ③  $FF$  with space filter;        ④  $FR$  with space filter;
- ⑤  $FF$  of the 12th super-Gauss;   ⑥  $FR$  of 12th super-Gauss



### 3 波纹光阑与空间滤波器结合使用

针对波纹光阑在抑制轴上光强调制的同时, 带入了小尺度的高频振幅调制这一问题, 自然考虑到利用空间滤波器来消除这种小尺度调制。具体的设计方法是紧跟波纹光阑再在光路中插入空间滤波器, 隔离高频分量, 使高频振幅调制不向下一级光学器件传播。空间滤波器相对孔径(或截止频率)的选择应以尽量滤掉下一级光学器件最敏感的空间频率分量为原则, 从而达到在滤掉高频成分的同时又不扰动主聚焦光斑的分布和强度。这样波纹光阑和空间滤波器

结合使用即保证了抑制光束大、小尺度的振幅调制,又能获得极高的填充因子,且波纹光阑和空间滤波器造成的能量损耗也较低。对平面波入射滤波小孔,一般以 3~4 倍衍射极限为佳。

在图 4,图 5,图 6 中,分别给出了在  $F = 15, 25, 30$  时,平面波通过波纹光阑未加空间滤波器和加上空间滤波器以及 12 阶超高斯光束的近场分布。可以发现,在光路中加入空间滤波器后,小尺度的光强调制基本被抑制,其衍射特性和 12 阶超高斯光束相当。从菲涅耳数等于 15 到 30 之间,填充因子  $FF$  提高了 0.6 倍, $FR$  下降了近十倍,见图 7。结合波纹光阑的作用,在菲涅耳数为 25 附近的区域内,大、小尺度的振幅调制都基本消除,见图 6(b)。当菲涅耳数较小时(相对于  $\alpha$ ),波纹光阑对大尺度衍射调制的抑制作用变弱。说明了波纹光阑和空间滤波器结合使用不会明显影响光束的远场衍射特性,从而也不会影响光束的聚焦特性。对于更大的菲涅耳数,由于受到计算能力的限制,不能给出相应的空间分布图。但可以根据式(4)和图 3,图 4 判断,其光束应具有和图 6(b) 接近相同的空间分布、填充因子和调制强度。

当然,我们必须注意到在光路中加入波纹光阑和空间滤波器将损失一部分的激光能量。这是任何光阑和空间滤波器结构在改善光束横向分布时不可避免的问题。对此,我们进行了严格的计算,并和普通的圆形光阑进行了比较。当空间滤波器小孔为 3 倍衍射极限时,光束经波纹光阑后被空间滤波器截止的能量只有 3% 左右。而采用普通的圆形光阑截止能量高达 10%。

以上的分析和计算都表明利用波纹光阑和空间滤波器的结合使用,可以明显改善光束的近场衍射特性。虽然不能和 12 阶的超高斯光束在总的传播范围内完全相同,但至少在一定范围内能获得与之接近相同的  $FF$  和  $FR$  值。同时由于波纹光阑加空间滤波器这种结构基本不存在损伤问题,因此将在高功率激光系统中具有及其广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 钱列加, 龚 伟, 文国军 等. 波纹圆孔光阑的衍射及其设计. 光学学报, 1995, 15(1): 117~121
- 2 William W. Simmons, J. J. Hunt, W. E. Warren. Light propagation through large laser systems. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(9): 1727~1743
- 3 A. E. Siegman. Lasers. California: Oxford U. Press, 1986. 630~741
- 4 J. A. Glaze. High energy glass lasers. *Opt. Eng.*, 1975, 15(2): 136~142
- 5 Y. Kim, H. Grebel, D. L. Jaggard. Diffraction by fractally serrated apertures. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1991, 8(1): 20~26
- 6 A. J. Campillo, J. E. Pearson, S. L. Shapiro *et al.*. Fresnel diffraction effects in the design of high power laser systems. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 23(2): 85~87

## Improve the Light Beam Uniformity by Using a Serrated Circular Aperture and a Space Filter

Wen Guojun Qian Liejia Qiu Yue Lu Junxiao Fan Dianyuan Deng Ximing

(National Laboratory on High Power Laser and Physics,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** The features of Fresnel diffraction are studied of the serrated aperture in this paper. We have proposed and demonstrated that using a serrated circular aperture and a spatial filter could effectively improve the light beam uniformity and suppress the intensity ripples for a large Fresnel numbers.

**Key words** intensity ripples, serrated aperture, spatial filter, filling factor