

# 波纹圆孔光栏的衍射及其设计

钱列加 龚伟 文国军 詹庭宇 朱宝强 张筑虹 范滇元  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 详细研究了波纹光栏(serrated aperture)的非涅耳衍射特征, 提出并论证了调幅型正弦波纹光栏能在较大的菲涅耳数范围内有效地抑制光束中央部分的衍射调制, 并给出这类波纹光栏用于高功率激光系统的设计程序。

**关键词** 大尺度衍射调制, 波纹光栏, 填充因子。

## 1 引 言

高功率激光器的设计中, 涉及到这样一个基本问题: 在抑制光束菲涅耳衍射调制及因此而产生的小尺度自聚焦(small-scale self-focusing)的前提下, 如何保证增益介质储能的充分利用, 即高的填充因子 FF(filling factor)<sup>[1]</sup>。由于圆孔边缘的索末菲尔德(Sommerfeld)波包在轴上各点都具有相同的位相, 它们会同时干涉相长或相消<sup>[2]</sup>, 致使轴上光强存在强烈的衍射调制, 即使不考虑小尺度自聚焦效应对其的增强作用, 它本身就会带来高功率激光器的损伤问题。为此, 可以使用像超高斯型的软边光栏来减少边缘衍射效应, 同时又保证较高的填充因子<sup>[3]</sup>。这样的软边光栏可以通过诸如感光乳胶、镀变透射率膜、玻璃磨砂<sup>[3,4]</sup>等方法实现。另外一类解决办法, 是通过圆孔光栏边缘的波纹调制来错乱索末菲尔德波包的位相, 从而减弱由此而产生的衍射调制<sup>[2]</sup>, 这就是本文要讨论的波纹光栏。它较为适用于高功率激光系统, 其特点是: 1) 抗损伤阈值高; 2) 因其是孔状, 它的插入或取出, 不影响光路的调整, 便于工程实用。目前, 此类新型光栏只有美国劳伦斯利弗莫尔实验室, 提到过其在 NOVA 装置上的使用<sup>[5]</sup>。本文详细地研究了这类新型波纹光栏的衍射特性, 从工程实用考虑出发, 注重其理论设计分析。

## 2 设计理论分析

在菲涅耳数并非很大时( $F \leq (a/4\lambda)^{2/3}$ , 一般情况  $F \leq 100$ ), 菲涅耳近似(或旁轴近似)是正确的<sup>[2]</sup>。在极坐标( $r, \theta$ )系统中, 菲涅耳积分可写成

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

$$T_1(r_0, \theta_0) = \begin{cases} 1 & (\text{光栏孔内}) \\ 0 & (\text{光栏孔外}) \end{cases} \quad (2)$$

式中假定入射光场是幅度为 1, 位相均匀的平面波,  $T(r_0, \theta_0)$  是光栏的透过函数,  $F = a^2/\lambda L$  为非涅耳数,  $a$  为孔半径,  $L$  为离光栏的观察距离,  $\lambda$  为光波波长。且径向半径  $r, r_0$  均是相对  $a$  的比值。

对圆孔波纹光栏的设计, 着重讨论大尺度衍射调制, 因小尺度衍射调制强度较弱且是高频成份, 能用空间滤波器抑制。设计遵循以下原则: 1) 能抑制硬边衍射调制, 使其小于 50% (峰值光强与平均值之比  $P/A \leq 1.5$ ), 2) 波纹调制应形状简单, 便于加工, 而且调制的深度及形状对衍射的影响应相对不敏感, 3) 调制深度  $\alpha$  足够小, 使得光束相对圆形的偏差不至太严重, 4) 具有较高的填充因子  $FF$ , 它被定义为

$$FF = \frac{\int \int |\bar{u}|^2 ds}{|u_{max}|^2 s} \quad (3)$$

式中  $s$  为边缘截止不导致严重衍射时的面积。虽然有了这些要求, 对波纹调制的形状及幅度的设计, 还需要有一定的判据或考虑出发点。否则, 将无以下手分析。本文提出以轴上光波幅度  $|\bar{u}(0)|$  是否满足

$$ABS\{|\bar{u}(0)| - 1\} \leq 5 \times 10^{-2} \quad (4)$$

$$\bar{u}(0) = \frac{iF}{2} \int_0^{2\pi} d\theta_0 \int_0^{r_0(\theta_0)} \exp\{-i\pi F r_0^2\} d(r_0^2) \quad (5)$$

作为设计分析的出发点(判据)。这是基于考虑到: 1) 对纯碎的圆孔衍射, 轴上光强的调制最为严重及 2) 轴上光强的计算相对较为简单, 便于理论分析。(4)式表明, 轴上光强的调制小于 10%, 它比设计要求(1)更严格, 是因为希望调制越小越好。

正弦状波纹调制  $r_0(\theta_0) = 1 + \alpha \sin m\theta_0$ , 此时考虑到  $\alpha \ll 1$  (设计要求调制深度  $\alpha$  足够小)

$$\begin{aligned} \bar{u}(0) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[(-i\pi F)(1 + \alpha \sin m\theta_0)^2] d\theta_0 \\ &= 1 - J_0(2\pi\alpha F) \exp(-i\pi F) \end{aligned} \quad (6)$$

$$|\bar{u}(0)|^2 = 1 + J_0^2(2\pi\alpha F) - 2J_0(2\pi\alpha F) \cos \pi F \quad (7)$$

式中  $J_0$  为零阶贝塞尔函数。如果  $\alpha = 0$ , 即纯碎的圆孔光栏  $|\bar{u}(0)|^2 = (1 - \cos \pi F)$ , 轴上光强在 0 至 4 间振荡。而存在正弦状周期波纹调制时, 轴上光强按(7)式变化。值得注意的一点是  $\bar{u}(0)$  与调制频率  $m$  无关, 考虑到希望光束的远场分布尽量与角度  $\theta$  不敏感,  $m$  应较大, 这里使用  $m = 50$ <sup>[6]</sup>。另外, 当  $2\pi\alpha F = 2.44$  ( $J_0$  的第一个零点)时, 它能完全抑制轴上光轴的调制, 另一方面, 此条件暗示特定的调制深度  $\alpha$ , 只能保证某一特定菲涅耳数  $F$  处衍射调制被抑制。这很容易使人们提出采用调幅型正弦调制波纹光栏, 以保证在较大的菲涅耳数  $F$  范围的, 衍射调制都将被有效地抑制。其一般形式可写为:

$$r_0(\theta_0) = 1 + \alpha \sin(m_1 \theta_0) \sin(m \theta_0) \quad (8)$$

其中调幅频率  $m_1 \ll m$ , 这样的光栏形状如图 1 所示。近似计算分析表明, 当菲涅耳数  $F$  属于下述范围内时, 相应的轴上光强满足(4)式。

$$ABS\{\pi F \alpha - 2.44\} \leq 0.5 \quad (9)$$

此条件(9)式与  $m_1$ 、 $m$  的取值无关, 允许的  $F$  范围主要取决于  $\alpha$ , 当  $\alpha=0.04$ , 则允许的  $F$  范围是在 15 至 25 间, 对  $\alpha=10$  mm, 这一范围对应的自由空间间隔约为 3 m。虽然这样的波纹光栏不能象通常的软边光栏那样在较大的近场范围内都能抑制衍射调制, 但可调整参数  $\alpha$ , 使得在所要求的区域内(通常在那里设置光学元件)抑制衍射。

对应形如(8)式的波纹圆孔光栏, 典型的轴上光振幅的数值计算, 如图 2 所示。轴上光振幅呈周期性衰减振荡, 在某些区域内振荡被抑制, 其第一个这样的区域( $F$  较小处)与(9)式给出的结果相吻。数值计算的另一结论是这一区域的大小取决于  $\alpha$ ,  $\alpha$  越小, 则区域范围越大, 这点也能从条件(9)式清楚地看出。

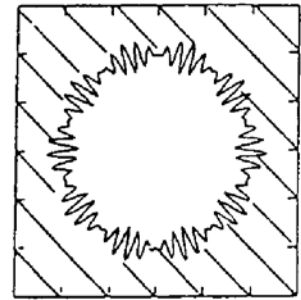


Fig. 1 The serrated aperture

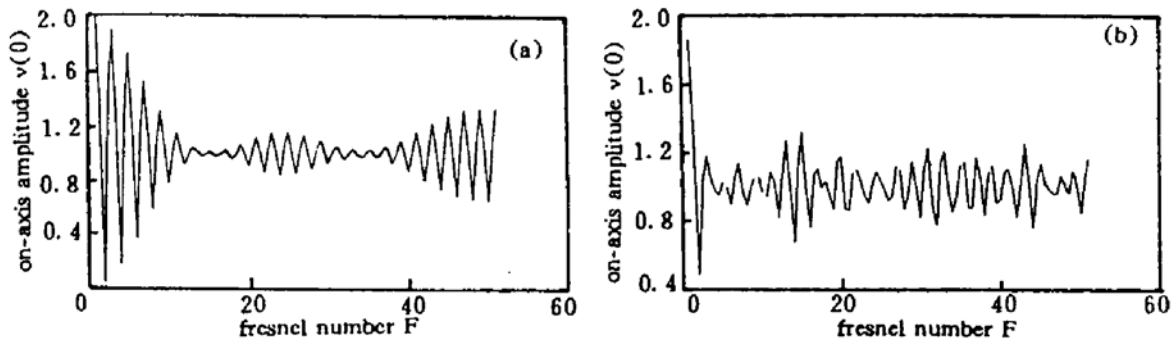


Fig. 2 The calculated on-axis amplitudes vs Fresnel numbers for a)  $r_0(\theta_0) = 1 + 0.05 \sin 5\theta_0 \sin 50\theta_0$  and b)  $r_0(\theta_0) = 1 + 0.175 \sin 5\theta_0 \sin 50\theta_0$

### 3 菲涅耳衍射的数值模拟计算

至此, 已提出并论证调幅型正弦调制波纹光栏, 能在较大的自由空间内抑制最为严重的轴上光强调制峰。本节将讨论光束横截面内的衍射特性, 注重对下述问题的分析: 1) 衍射光束的特征, 即填充因子  $FF$  及衍射调制  $FR$  (均对光强而言), 2) 衍射光束横截面与圆形的偏差, 3) 参数  $\alpha$  (或  $F$ ) 及波纹形状敏感度。为此, 给出菲涅耳衍射的部分数值模拟计算结果见图 3 和图 4。为保证较高的计算精度, 光束径向的取样点在  $3F$  至  $5F$  间。分析结果表明:

1) 在满足(9)式的  $F$  数范围内, 光束中央部分较为平坦, 衍射调制都被有效地抑制。而在边缘部分, 仍存在与硬边光栏相当的衍射调制约为 40%, 或以描述激光束空间光强均匀性的特征参数  $P/A$  表征为 1.4。填充因子均为 0.4 左右。

2) 对波纹形状相对不敏感, 正弦或三角形、梯形调制(相当于改变角度的取样点)不明显影响光束的衍射特征。另外, 如一波纹幅度稍高, 另一稍低的话, 也不显著影响计算结果。

3) 光束边缘存在一低幅度的次斑, 它由波纹光栏的边缘调制引起, 其幅度与调制深度  $\alpha$  有关,  $\alpha$  越小, 则幅度越小。它的存在影响了光束填充因子的进一步提高。

4) 对(9)式范围外的  $F$  数处, 光束中央部分存在一定的衍射调制, 最强的轴上光束调制,

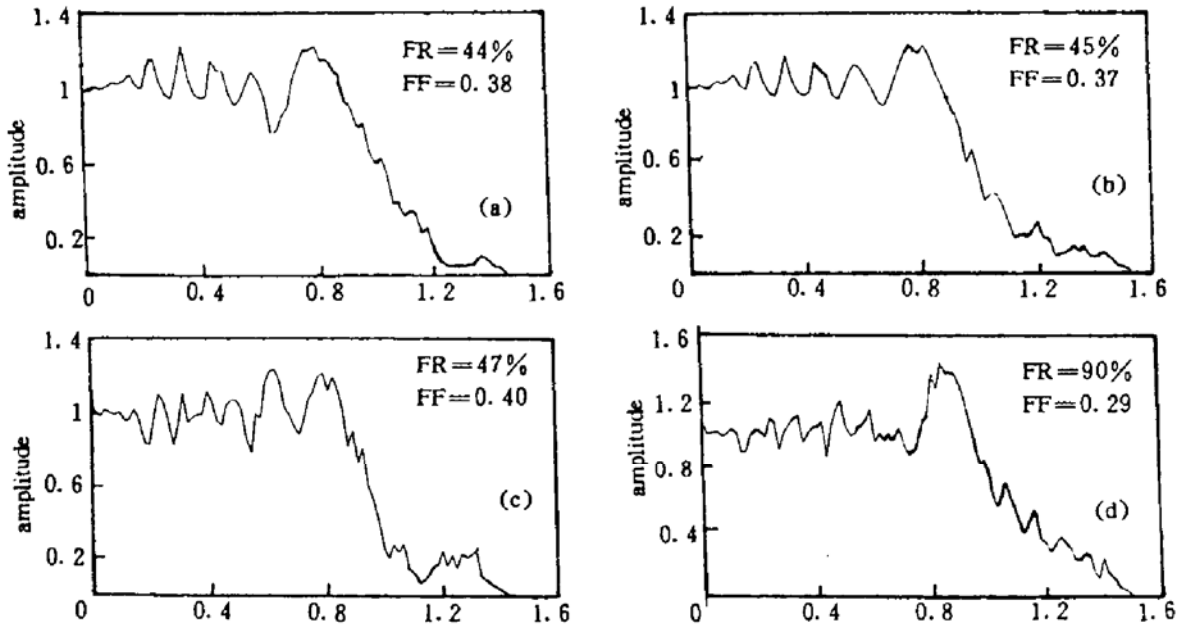


Fig. 3 The diffraction amplitudes of the serrated aperture  $r_0 = 0.05 \sin 5\theta_0 \sin 50\theta_0$  for a)  $F = 16$ ,  $\theta = 0^\circ$ , b)  $F = 16$ ,  $\theta = \pi/100$ , c)  $F = 19 \theta_*$ , and d)  $F = 25$ ,  $\theta = 0^\circ$

也可由第二部分的计算给出。而在光束边缘存在比硬边衍射更强的调制峰，影响其实际应用。

5) 衍射光束横截面近似为圆形(图 3(a)及 3(b))，即同一观察面内，不同方位角  $\theta$  的光场分布无明显差异，这与  $a \ll 1$  及选用高频调制( $u \gg 1$ )有关。

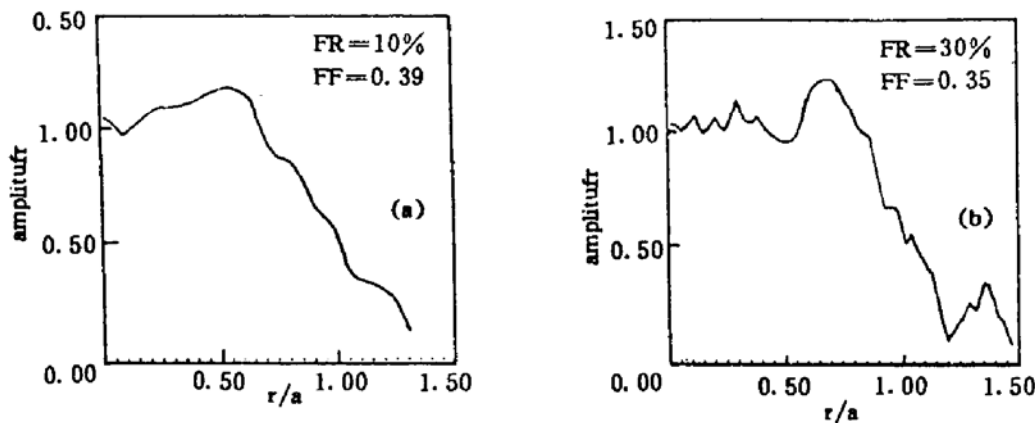


Fig. 4 The diffracted amplitudes of the serrated aperture  $r_0 = 0.175 \sin 5\theta_0 \sin 50\theta_0$ , for a)  $F = 5$ ,  $\theta = 0^\circ$  and b)  $F = 9$ ,  $\theta = 0^\circ$

**总 结** 本文提出并分析了调幅型正弦波纹光栅的衍射特性，它能有效地抑制衍射调制，并有适中的填充因子，能满足在高功率激光系统中的应用。其设计步骤可简单地归纳为如下二点：① 光栅形状如(8)式表示，其中  $m$  一般取 50 左右，而  $m_1 \ll m$ ，② 调制深度  $a \ll 1$ ，其具体数值可由所关心区域的  $F$  数范围决定，它们满足条件(9)式。文中所有的计算及讨论，都针对入射平面波(曲率半径  $R$  无穷大)而言。这些结论同样也适用于带有一定曲率半径的入射光束，只须将菲涅耳数定义为  $F = a^2/\lambda + a^2/\lambda R$ (对发散光束， $R > 0$ ； $a \ll L, R$ )<sup>[7]</sup>。这提供在保持光栅尺寸及观察距离的条件下，能改变菲涅耳数的可能性。在某些均匀照明应用中，它将非常有用，能使所关心区域的菲涅耳数变小，从而有更好的光束空间均匀性(见图 4(a))。

波纹光栏对截止高斯光束的衍射特性及远场分布特性的研究正在进行之中。

### 参 考 文 献

- [1] William W. Simmons, J. T. HUNT *et al.*, Light propagation through large laser system. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(9): 1727~1743
- [2] A. E. Siegman, *Lasers*, Oxford Univer. Press, California, 1986, 630~741
- [3] J. A. Glaze, High energy glass laser. *Opt. Eng.*, 1975, 15(2): 136~142
- [4] R. A. Haas, Theory of laser beam apodization with a graded random phase window. *Appl. Opt.*, 1988, 27(13): 2708~1718
- [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. *Appl. Opt.*, 1992, 31(27): 5799~5809
- [6] Y. Kim, H. Grebel, D. L. Jaggard, Diffraction by fractally serrated apertures. *J. Opt. Soc. Am(A)*, 1991, 8(1): 20~26
- [7] 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

## Serrated Circular Aperture and Its Design

Qian Liejia    Guong Wei    Wen Guojun    Zhan Tingyu  
Zhu Baoqiang    Zhang Zhuhong    Fan Dionyuan

(High Power Laser Physics Laboratory,

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

(Received 16 December 1993; revised 4 February 1994)

**Abstract** The features of Fresnel diffraction was fully characterized for the serrated aperture in this paper, we have proposed and demonstrated that modulated sinusoidal serrated aperture can effectively suppress the near-axis intensity ripples for a large scale of Fresnel numbers. The design procedure was also given for its application in the high powered laser systems.

**Key words** large-scale ripples, serrated aperture, filling factor.