

利用锯齿光栏获得超高斯型光束

姚裕贵 徐世祥 孟绍贤 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘 要 提出了一种超高斯型透射率锯齿光栏的设计。通过模拟计算研究了它的衍射传输特性。

光束通过这种光栏, 并滤波后得到空间平滑分布的理想超高斯型光束。

关键词 超高斯类软边光栏, 锯齿光栏, 空间滤波器。

1 引 言

用超高斯型的软边光栏可获得大口径的超高斯型光束。这样的软边光栏有感光乳胶、径向变化透射率膜、玻璃磨砂等类型^[1, 2]。但它们都有抗破坏阈值低、影响光路的调整或加工复杂等缺点, 使它们在高功率激光领域的应用受到限制。最近作者设计出一种超高斯锯齿光栏 SGSA (Super-Gaussian serrated aperture), 配合空间滤波器, 可获得超高斯型光束, 并已通过理论计算得到证实。在高功率激光系统设计中, 希望激光在传输过程中既有高的填充因子, 又不至于产生剧烈的菲涅尔衍射调制。一般来说, 高斯光束可避免衍射调制, 但是填充因子太小, 只有 0.15。虽然平顶光束的填充因子是 1, 可是衍射调制剧烈, 如图 1 所示。理论上, $n = 5 \sim 6$ 的超高斯光束 $I = I_0 \exp[-(r/r_0)^n]$ 最适合高功率激光传输。 $n = 5$ 的超高斯光束填充因子为 0.41, 衍射调制也很小, 如图 2 所示。超高斯型锯齿光栏是用金属制作, 能克服软边光栏的弊病, 因此可以在高功率激光系统中使用。激光先扩束照射超高斯型光栏, 然后进入空间滤波器滤波, 就能得到平滑的超高斯型光束, 它的高功率激光系统传输中不产生空间高频衍射调制。本文对这种超高斯型锯齿光栏的衍射特性和设计进行研究。

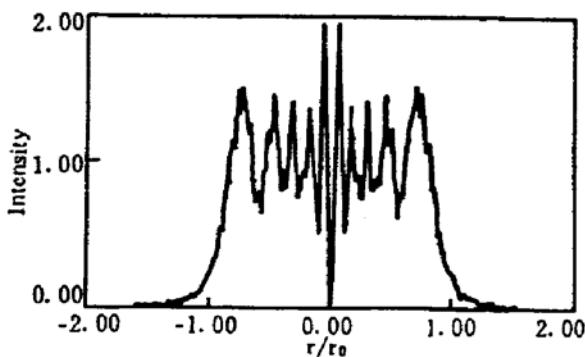


Fig. 1 The diffraction of circle aperture for $F = 10$

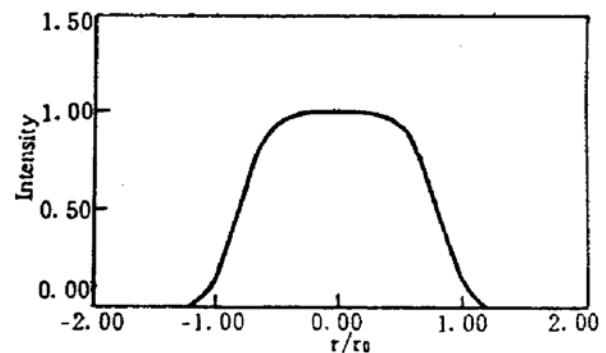


Fig. 2 The profile of Super-Gaussian beam $I(r) = I_0 \exp(-r/r_0)^n$, $n = 5$

2 理论分析

小波纹锯齿光栏也能部分提高光束的填充因子和抑制衍射调制^[3],但是并不能得到空间分布平滑的近平顶光束,因而并不令人满意。作者设计了一种超高斯形锯齿光栏,它配合空间滤波器的使用能够直接使光变成 n 级超高斯光束。超高斯形锯齿光栏和空间滤波器的相对位置如图 3 所示。锯齿光栏位于物面。

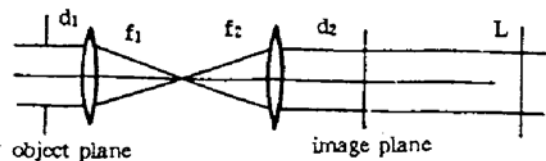


Fig. 3 The experimental set-up

此光学系统的传输矩阵为:

$$t = \begin{vmatrix} -m & -md_1 - m^{-1}d_2 + f_1 + f_2 \\ 0 & -1/m \end{vmatrix}. \quad (1)$$

其中 $m = f_2/f_1$ 。对于超高斯形锯齿光栏,可以采用如下方法设计:

$$N\Delta(r)I(r) = 2\pi r I_0 \exp[-(r/r_0)^n]. \quad (2)$$

其中 $I(r)$ 为输入光场的光强分布, N 代表光栏的锯齿个数, n 为超高斯级数, r_0 为光强下降至

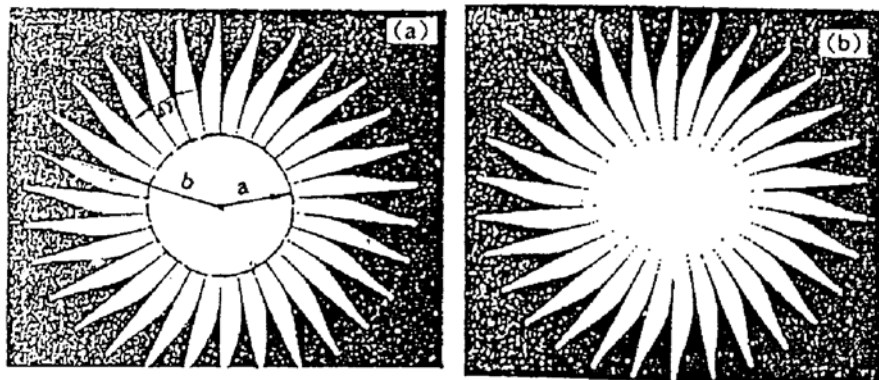


Fig. 4 The Super-Gaussian serrated aperture $\Delta(r) = 2\pi r \cdot I_0 \exp(-r/r_0)^n / [N \cdot I(r)]$

(a) Incidenting with a plane wave $I(r) = I_0$, $N = 30$, $n = 5$, $0.5 < r/r_0 < 1.3$, (b) Incidenting with a Gaussian beam $I(r) = I_0 \exp(-r/\omega_0)^2$ ($\omega_0 = 3r_0$), $N = 30$, $n = 5$, $0.5 < r/r_0 < 1.3$

中心值的 e^{-1} 时的径向距离, $\Delta(r)$ 是通光锯齿在半径 r 处的弧长(见图 4), 于是有

$$\Delta(r) = 2\pi r I_0 \exp[-(r/r_0)^n] / N I(r). \quad (3)$$

锯齿根部和顶部的径向距离分别为 a 、 b ($a < b$), 显然 $a < r < b$, 且 a 、 b 值共同反映了锯齿对光栏的调制幅度。

用平面波角谱理论作为理论分析的基础, 这里只对适当大小的菲涅尔区间感兴趣 ($F > 10$)。菲涅尔数 $F = r^2/(\lambda L)$, 由于空间滤波器的中继成像作用, L 定义为离光栏像面的距离, 像面可以通过 $ABCD$ 矩阵的 $B = 0$ 求得。 λ 为光波波长。运用光传输理论能得到 L 处的光强分布为:

$$U(f_x, f_y, L) = U_0(f_x, f_y, 0) * T(f_x, f_y) t(x/\lambda f, y/\lambda f) \exp[j2\pi\lambda L(f_x^2 + f_y^2)] \quad (4)$$

$$U(x, y, L) = \int U(f_x, f_y, L) \exp(j2\pi f_x x + j2\pi f_y y) dx dy \quad (5)$$

同样, $U_0(f_x, f_y, 0)$ 和 $T(f_x, f_y)$ 分别是 $U(x, y, 0)$ 和 $T(x, y)$ 的傅里叶变换, 其中 $*$ 代表卷积。 $t(x, y)$ 、 $T(x, y)$ 分别代表滤波小孔和超高斯型锯齿光栏的透过率函数。

$$T(x, y) \text{ 或 } t(x, y) = \begin{cases} 1 & (\text{光栏孔内}) \\ 0 & (\text{光栏孔外}) \end{cases}$$

可以设想通过这种超高斯形锯齿光栏后的光空间频谱是级数为 n 的超高斯光频谱加上高频部分，只要 N 足够大，这两种谱是可以分开的。这样利用空间滤波器滤去高频部分就可得到较为理想的超高斯型光束。

从以上讨论知： $N\Delta(r)$ 为半径为 r 处的实际通光弧长，所以欲得到级数较高的超高斯光场，在入射光场一定时，光栏在半径 r 处的实际通光弧长 $N\Delta(r)$ 由相应的(2)式决定。由于 N 越大，其光场频谱的高频分量与基频分量分得越开，故 N 应足够大，所以应设法减少 $\Delta(r)$ 。

3 数值模拟

程序采用基于平面波角谱理论的快速傅里叶算法编制，它的部分计算结果已用基于菲涅尔理论的二维积分自适应算法的程序验证。

下面的结论都是在平面波入射变换到 $n=5$ 的超高斯型光束条件下进行的模拟。

超高斯锯齿光栏形状如图 4 所示。

超高斯锯齿光栏的空间谱见图 5，可以看出它的低频部分和超高斯型光的频谱一样，这和作者设想是一致的。

图 6 是光通过超高斯锯齿光栏后经过空间滤波器传播到一定菲涅尔距离的场图。滤波小孔半径 $r = 5 \times 0.61\lambda f/r_0$ ，从图上可以看出：

1) 利用这种光栏确实可以得到超高斯型光束。

2) 从图 6(a)可看出，光束传输到 $F = 10$ (实线)和 $F = 40$ (虚线)的空间轮廓基本不变。也就是说在空间滤波器后这种超高斯光束传输是稳定的，而且它的填充因子是高的，衍射调制 $< 10\%$ 。

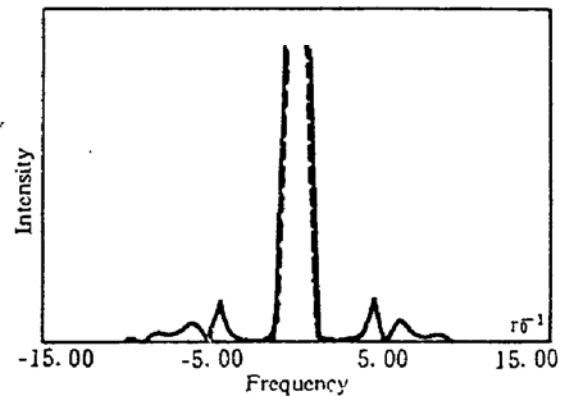


Fig. 5 The solid line: spatial frequency of a plane wave through the SGSA $\Delta(r) = 2\pi r \cdot I_0 \exp(-r/r_0)^n / [N \cdot I(r)]$, $N = 30$, $n = 5$, $0.5 < r/r_0 < 1.3$

The dotted line: spatial frequency of Super-Gaussian beam $I(r) = I_0 \exp(-r/r_0)^n$, $n = 5$

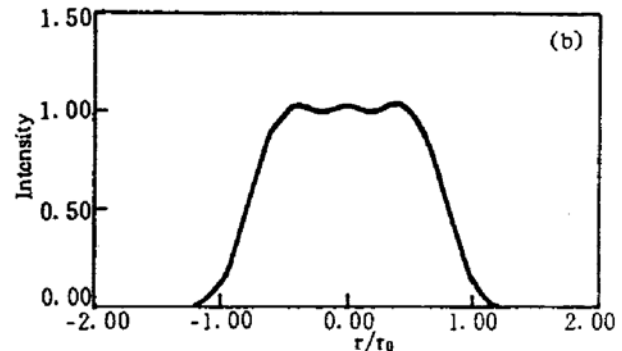
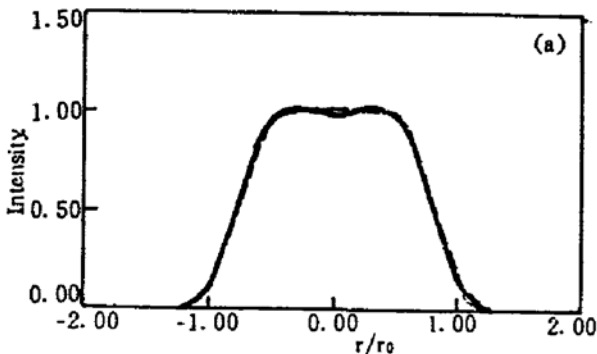


Fig. 6 The spatial profile produced by a plane wave through the SGSA after the spatial filter

$$\Delta(r) = 2\pi r \cdot I_0 \exp(-r/r_0)^n / [N \cdot I(r)], N = 30, n = 5, r_s = 5 \times 0.61 \lambda f_1 / r_0$$

(a) $0.5 < r/r_0 < 1.3$, $F=10$ (solid curve), $F=40$ (dotted curve), (b) $0.7 < r/r_0 < 1.2$

3) 图 6(a)和图 6(b)分别是在 $0.5 < r/r_0 < 1.3$ 和 $0.7 < r/r_0 < 1.2$ 条件下得到的 $F = 10$ 处光强分布，从结果可以看出两者光强分布包络基本一致。换句话说，光栏锯齿的调制深度稍有变化对变换后的光束影响不大。

作为对比，还设计了用高斯光束入射 ($\omega = 3r_0$) 相对应的光栏，见图 3(b)。从图上可以看

出它和用平面波入射相对应的光栏形状基本一致。这也从侧面证明了这种光栏对波面并不敏感。从上面分析可知锯齿光栏加工精度要求不高,这对它在高功率激光系统中的使用是有益的。

结 论 锯齿光栏配合空间滤波器确实可以得到超高斯型光束,在提高填充因子的同时也能抑制衍射调制。且这种光栏加工简单,价格适宜。这种超高斯光栏在高功率激光系统中的应用正在实验之中。

参 考 文 献

- [1] J. A. Glaze, High energy glass lasers. *Opt. Engng.*, 1975, 15(2): 136~142
- [2] R. A. Haas, Theory of laser beam apodization with a graded random phase window. *Appl. Opt.*, 1988, 27(13): 2708~2718
- [3] 钱列加等, 波纹圆孔光栏的衍射用其设计. *光学学报*, 1995, 15(1): 117~121

The Super-Gaussian Beam Using Serrated Aperture

Yao Yugui Xu Shixiang Meng Xiaoxian Lin Zunqi

(*Shanghai Institute of Optics and Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 27 April 1994; revised 15 June 1994)

Abstract The design of a super-Gaussian serrated aperture (SGSA) is proposed in this paper. The diffraction features are characterized for the special serrated aperture by using numerical computation. Light beam through the SGSA can be transformed into almost ideal super-Gaussian beam after passing the spatial filter.

Key words super Gauss soft-aperture, serrated aperture, spatial filter.