

半凹旋转棱镜对光束的变换

沈学举 刘秉琦

(军械工程学院, 石家庄, 050003)

摘要: 对半凹旋转棱镜对光束的变换进行了详细的理论分析, 定量计算了变换光束的空间强度分布。结果表明经半凹旋转棱镜变换产生的光束具有近似“无衍射”性质。

关键词: “无衍射”光束 半凹旋转棱镜 旋转棱镜

Beam propagation and transformation properties of semi-concave axicon

Shen Xueju, Liu Bingqi

(College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang, 050003)

Abstract: Starting from the imaging properties, the imaging transformation properties of the semi-concave axicon is theoretically analyzed. Also the intensity distribution of the output beam is numerically calculated. The calculation has proved that the beam transformation through a semi-concave axicon has the characteristics called “approximate diffraction-free beam”.

Key words: “diffraction-free” beam semi-concave axicon axicon

一、引 言

自“无衍射”光束的概念提出以来^[1, 2], 由于它的“无衍射”性质及其应用前景^[3], 引起了广泛的兴趣。理论和实践都表明旋转棱镜(角锥透镜)^[4, 5]是产生“无衍射”光束简单、有效的器件, 可将单色平面波或高斯光束转换为“无衍射”光束, 在一有限距离内保持“无衍射”性质。单色平面波经旋转棱镜转换产生的“无衍射”光束传输距离一般为几十厘米^[4, 5]。在有些应用, 例如用于准直时, 希望其传输距离尽可能增加。本文将旋转棱镜的入射平面设计为一定曲率的凹球面, 称半凹旋转棱镜。对输出光束进行数据计算并和相同孔径及棱角的旋转棱镜比较表明: 由于球面对入射光束的发散作用, 使输出光束轴上光强减小, 传输距离增加, 光束为近似“无衍射”光束。

二、理 论 分 析

1. 半凹旋转棱镜成象性质

半凹旋转棱镜是将旋转棱镜的入射平面设计为一定曲率的凹球面。其截面图如图 1 所示, z 轴为光轴, 由折射定律得轴上点光源发出的光线经半凹旋转棱镜后出射光线相对于入射光线的偏向角为:

$$\delta = 2\arcsin\left[\frac{n\sin(1/2)(\alpha + \theta_0)\cos(1/2)(i'_1 - i_2)}{\cos(1/2)(i_1 - i'_2)}\right] - (\alpha + \theta_0) \quad (1)$$

式中, n 为棱镜折射率, α 为角锥棱角。各参量间满足:

$$\begin{cases} \sin\theta_0 = \rho/R \\ \sin i_1 = n\sin i'_1 \\ \sin i'_2 = n\sin i_2 \\ i_2 = \alpha + \theta_0 - i'_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ 为光线入射点到光轴垂直距离, R 为凹球面曲率半径, 为负值, i_1, i_1', i_2, i_2' 如图 1 所示。

当 α 很小, R 绝对值比棱镜孔径 a 大得多, 使 $|\theta_0| < \alpha$ 时, 单色平面波垂直入射, (1) 式近似为

$$\delta = (n - 1)[\alpha + \arcsin(\rho/R)] \quad (3)$$

由(3)式可知, 旋转棱镜 $R \rightarrow -\infty$, δ 为常数, 无穷远一点源发出光线, 其中以光轴为中心, 同一圆周上的光线会聚在象方同一点上, 不同半径圆周上光线会聚在光轴不同点上。即物方无穷远一点物在象方产生连续分布的轴上点象, 且这些点象在轴上均匀分布, 可获得轴上光强较强的“无衍射”光束。

对半凹旋转棱镜, 当 R 一定时, 由于 R 为负值, 随 ρ 增加, δ 减小。当 $\rho = a$ 时, 边缘光线偏向角最小。因此以光轴为中心, 同一圆周上光线 δ 相同, 会聚在象方光轴同一点上。不同半径圆周上光线 δ 不同, 会聚在轴上不同点上。同一点物在象方光轴上也形成一系列连续分布的点象。由于 δ 随 ρ 增加而减小, 这些点象沿轴向的分布密度比用旋转棱镜时小, 轴上光强将降低。连续分布的轴上象点长度即变换光束的传输距离为

$$z_{\max} = a/\tan \delta_{\min} \quad (4)$$

式中, δ_{\min} 由(1)或(3)式取 $\rho = a$ 求出, 由(3)式可看出, 当 $\rho = a$ 一定时, R 绝对值越大, δ_{\min} 越大, R 绝对值越小, δ_{\min} 越小。因此 R 绝对值越小, 传输距离越大。

参考文献[5]中旋转棱镜参数, 取 $\alpha = 4.3^\circ$, 棱镜孔径半

径 $a = 20\text{mm}$, 折射率 $n = 1.52$ 。由(1)式或(3)式得单色平面波垂直入射时, 边缘光线 $\delta_{\min} - R$ 曲线如图 2 所示。取一特例 $R = -1\text{m}$, 得单色平面波垂直入射时 $\delta - \rho$ 曲线如图 3 中曲线 2 所示。其中曲线 1 为 $R \rightarrow -\infty$ 即旋转棱镜的 $\delta - \rho$ 曲线。

2. 变换光束的强度分布

变换光束的强度空间分布由惠更斯-菲涅耳衍射积分求得。因为在薄透镜近似下, 去掉常数相因子, 曲率半径为 R 的球面复振幅透射系数^[6]为 $e^{ik(n-1)\rho^2/(2R)}$, 锥形旋转曲面的复振幅透射系数为^[7] $e^{-ik(n-1)\alpha\rho}$ 。因此, 半凹旋转棱镜的复振幅透射系数为:

$$t(\rho) = \begin{cases} e^{ik(n-1)[\rho^2/(2R) - \alpha\rho]} & \rho \leq a \\ 0 & \rho > a \end{cases} \quad (5)$$

在柱坐标系下, 单色平面波经半凹旋转棱镜后的强度分布为

$$I(r, z) = (k/z)^2 \left| \int_0^a \rho J_0(kr\rho/z) e^{ik[\rho^2/(2z) + (n-1)[\rho^2/(2R) - \alpha\rho]]} d\rho \right|^2 \quad (6)$$

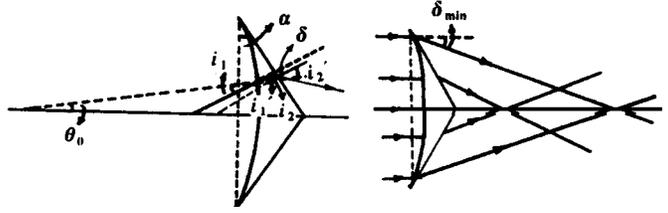


Fig. 1 Imaging properties of semi-concave axicon

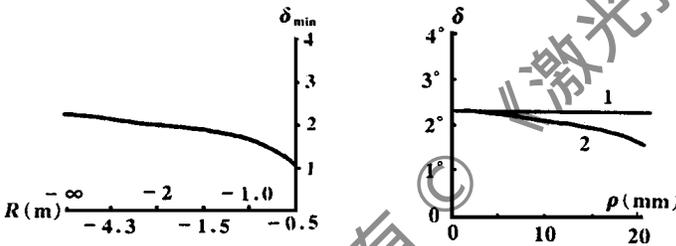


Fig. 2 $\delta_{\min} - R$ curve when monochromatic plane wave vertical incidencing

Fig. 3 $\delta - \rho$ curve when monochromatic plane wave vertical incidencing
1- $R = -\infty$ 2- $R = -1\text{m}$

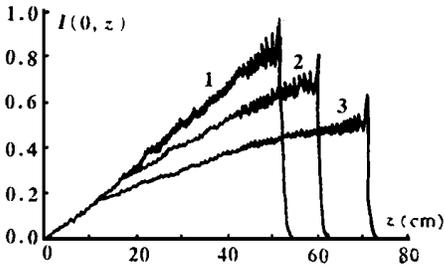


Fig. 4 Axial intensity $I(0, z)$ as a function of propagation distance z for a monochromatic plane wave passing through semi-concave axicon
 1- $R = -\infty$ 2- $R = -2m$ 3- $R = -1m$

坐标系如图1所示,式中, $I(r, z)$ 为 (r, z) 处强度, ρ 为入射面径向坐标。图4为 $\alpha = 4.3^\circ$, $a = 20\text{mm}$ 的旋转棱镜和 $R = -1m, -2m, \alpha = 4.3^\circ, a = 20\text{mm}$ 的半凹旋转棱镜由(6)式计算的变换光束轴上光强随 z 变化曲线。曲线1和曲线3比较,在传输距离内当 z 值较大时,光强下降20%左右,且曲线3光强随 z 增加变化较缓慢, z 大于40cm时,强度趋于恒值。传输距离由510mm增加为700mm。由(4)式和(6)式数值计算结果一致,如附表所示。

Table Propagation distance of Bessel beam versus curvature radius of semi-concave axicon

z_{max} (mm)	R (m)		
	∞	-2	-1
geometrical optics	510	600	700
δ_{min}	2.244°	1.945°	1.646°
numerical calculation	510.4	588.9	696

图5,图6为 $z = 200\text{mm}, 500\text{mm}$ 处,经 $R = -1m$ 的半凹旋转棱镜后输出光波横向光强度分布。随 z 增加轴上光强增加,中心光斑半径也增加。在300mm传输距离上,中心光斑半径增加约 $1\mu\text{m}$,光束中心光斑发散角约为 $2\mu\text{m}/300\text{mm} = 6.7 \times 10^{-6}$ (rad),因此,变换光束仍近似为“无衍射”光束。

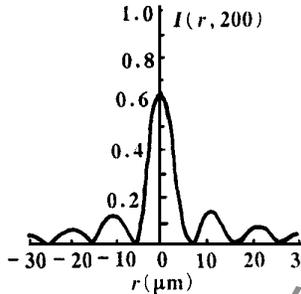


Fig. 5 Transverse intensity distribution at $z = 200\text{mm}$

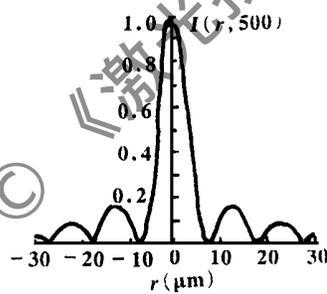


Fig. 6 Transverse intensity distribution at $z = 500\text{mm}$

三、结论

利用半凹旋转棱镜对单色平面波进行变换时,出射光具有近似“无衍射”性质。和相同孔径的旋转棱镜相比,轴上光强减小,但传输距离增加。一定条件下,将旋转棱镜设计为一定曲率和半凹旋转棱镜可

增加变换光束的传输距离。

参考文献

- 1 Dumin Miceli J J, Eberly J H. Phys Rev Lett, 1987; 58(15): 1499
- 2 Dumin J. J O S A(A), 1987; 4(4): 651
- 3 周静,施文敏,徐大雄 et al. 中国激光, 1994; 21(9): 745
- 4 蔡邦维,吕百达,张彬 et al. 中国激光, 1994; 21(1): 21
- 5 张彬,吕百达. 激光技术, 1996; 20(2): 14
- 6 梁铨廷. 物理光学. 北京:机械工业出版社, 1987: 240
- 7 Li Y, Platzer H. Opt Acta, 1983; 30(11): 1621

作者简介: 沈学举,男,1963年出生。硕士。主要从事激光技术等方面的教学和科研工作。

收稿日期: 1996-06-05 收到修改稿日期: 1996-10-14