

旋转棱镜对激光束的变换特性

蔡邦维 吕百达 张彬 冯国英

王碧华

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

(自贡化工研究设计院, 自贡 643000)

提要 应用旋转棱镜和组合光学系统能够将高斯光束变换成“无衍射”贝塞尔(Bessel)光束,并能实现实心光束和环状光束的相互变换。本文对旋转棱镜及其组合系统的成像特征作了详细理论分析和实验研究,得到二者相一致的结果,证实了该光学系统在激光技术中有广泛的应用前景。

关键词 角锥光束变换器,无衍射贝塞尔光束,环状光束

1 引言

随着激光加工、非稳腔激光器、高功率管状激光器、X光激光器的迅速发展,要求将激光光束按需要进行传输变换。例如,将实心横截面光束变换为环状光束、平面或径向细环聚焦光束以及作相反的变换,或者将高斯光束变换成“无衍射”的贝塞尔光束等。显然,采用一般球面系统光束变换器不能达到上述目的。J. H. Mcleod对旋转棱镜的成像特性曾作过简单定性介绍,但当时还没有提出“无衍射”贝塞尔光束概念^[1]。我们在本文中对用旋转棱镜作光束变换器的参数关系作了定量分析,并用自制的光束变换器对He-Ne, CO₂激光的传输变换特性进行了实验验证,结果表明,旋转棱镜光学系统能实现多种形式的光束传输变换,而且转换效率高,在激光打孔、圆柱形工件热处理、焊接、切片、高精度准直技术中都具有非常诱人的应用价值。

2 旋转棱镜的聚焦特性

旋转棱镜(Axicon)因通过轴线的横截面呈双棱镜型,所以也称为轴棱镜。它是一种锥形光学部件,本文中我们简称为角锥透镜,具有会聚和发散光束的作用。但是,它与球面透镜的聚焦特性则完全不同。正锥透镜的横截面如图1(a)所示, z 轴是光轴,从轴上点光源 S 发出的光线通过该部件折射后以等偏向角 δ 与 z 轴相交。

根据折射定律可得折射光线相对于入射光线的偏角为

$$\delta = 2\sin^{-1}[n\sin(\varphi/2)] - \varphi \quad (1)$$

当 φ 很小时($\varphi < 0.17$ rad),有

$$L' = \frac{L\text{tg}u}{\text{tg}(\delta - u)} = \frac{L\text{tg}u'}{\text{tg}[(n-1)\varphi - u]} \quad (2)$$

* 本项工作得到自贡市科委资助。

收稿日期: 1993年4月6日, 收到修改稿日期: 1993年5月20日

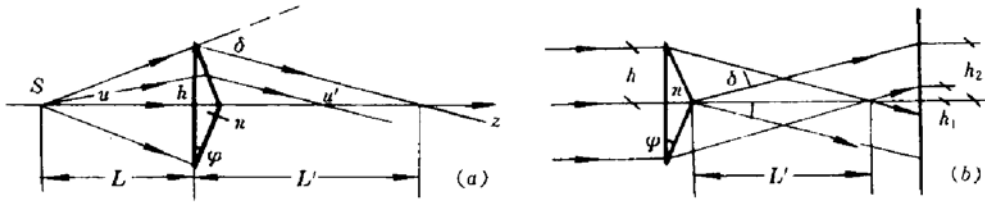


Fig. 1 Focusing properties of positive axicon

式中 n 是角锥透镜材料的折射率, φ 是它的棱角, L 是物距, u 是物方孔径角, u' 是像方孔径角, L' 是像距。(2) 式表明, 同一点光源物方孔径角 u 相同的光线通过正锥透镜后在 z 轴上有一个焦点, 不同 u 角的光线通过正锥透镜后都在 z 轴聚焦, 无数焦点产生一条与 z 轴互相重合的连续细线。

如图 1(b) 所示, 半径为 h 的平行光束通过正锥透镜后所有折射光线与 z 轴相交仍然形成连续的焦线, 当 φ 很小时, 不计正锥透镜的厚度, 焦线的长度为

$$L' = h / [(n - 1)\varphi] \tag{3}$$

聚焦线的最大长度为

$$L_{max}' = h_{max} / [(n - 1)\varphi] \tag{4}$$

显然, 通光口径 h 愈大, 棱角 φ 愈小, 焦线愈长。在聚焦区 L_{max}' 内, 出射光线相互交叠产生干涉, 形成细长的聚焦光场, 而且在大准直范围内具有相当大的光功率密度, 因而可以作为染料激光器、X 光激光器的泵浦光和钻深孔的激光束。 L_{max}' 内的场分布, 可通过解波动方程

$$[\nabla^2 - (1/c^2)(\partial^2/\partial t^2)]E(r, t) = 0 \tag{5}$$

求得^[2]

$$E(r, t) = J_0(\alpha r) \exp[i(\beta z - \omega t)] \tag{6}$$

(6) 为方程(5)的一个特解, 式中 ∇ 为拉普拉斯算子, r 为位置坐标, t 为时间, J_0 为零阶贝塞尔函数, $r^2 = x^2 + y^2, \alpha^2 + \beta^2 = (\omega/c)^2 = k^2$ 。显然, (6) 式中的振幅部分只是 r 的函数, 与传播方向坐标 z 无关, 即是说在贝塞尔光区范围内 L_{max}' 内, 垂直于 z 轴横平面上的光强不随传输距离改变而发生变化, 此现象称为“无衍射”特性, 其光束称为无衍射贝塞尔光束^[3,4]。数值计算结果表明, z 值接近 L_{max}' 时, 横平面光强呈振荡变化。

根据贝塞尔函数的特性, 可得光束的中心光斑直径

$$D = 4.81/\alpha = 4.81\lambda / [2\pi(n - 1)\varphi] \tag{7}$$

式中, λ 为入射光波长。当 $z > L_{max}'$, 出射光束不再交叠而形成发散的环状光束, 环的大小随 z 的增大而变大, 环的宽度为

$$\Delta h = z \text{tg} \delta - (z - L') \text{tg} \delta \approx h_{max} \tag{8}$$

在传输过程中, 环的宽度保持不变, 且等于入射平行光束的半径。

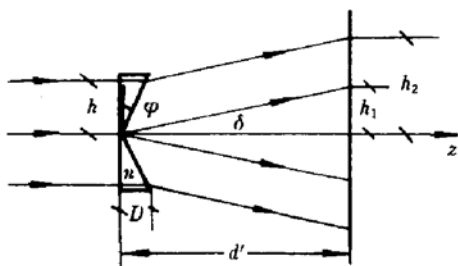


Fig. 2 Negative transmitting axicon

平行光束通过负锥透镜也都以等角 δ 偏离光轴而发散, 变换为发散的环状光束, 如图 2 所示。图 2 中 φ 为锥角, D 为锥深度, 环外径 $h_2 = (L' - D) \text{tg} \delta + h$, 内径 $h_1 = L' \text{tg} \delta$, 当 φ 很小, 且不计角锥透镜的厚度时, 圆环光束的宽度为

$$\Delta h = h - D(n - 1)\varphi \approx h \tag{9}$$

Δh 只与入射光束直径和角锥透镜的参数有关, 与传输距离 z 无关。环宽仍为一常数。

3 角锥透镜组合系统

如图 3 所示,将棱角 φ 相同的正、负角锥透镜组合,可构成一种新型的环形光束扩束器。

平行光束通过该组合系统后,变换成准直的环状光束,反之,亦可将准直的环状光束变成实心平行光束,调节正、负角锥透镜间隔 d ,可使出射光束环径连续变化,但环的宽度仍保持不变。容易证明:放大率与组合系统参数间的关系可表示为

$$M = 1 + (d\varphi/h)(n - 1) \quad \varphi < 0.17 \text{ rad} \quad (10)$$

当 $d = 0, M = 1$ 时,组合系统无放大作用,所起的作用与普通光学窗口相同。随着 d 的增大,放大倍数增大,其最大值 M_{\max} 受输出正锥透镜孔径的限制,由(10)式可确定 d 的最大值。该组合系统在对光束施行变换过程中,能量损失非常小,可应用于将非稳腔激光器、管状固体激光器输出的环状光束变成实心平行光束和作为高功率管状固体激光放大系统中的扩束器。

在上述组合系统中再增加一支球面正透镜,应用范围还可以进一步扩展,如图 4 所示的组合系统能将实心平行光束变换成细圆环。聚焦圆环的半径由下式确定

$$R_0 = [d\varphi(n - 1) / (1 + \varphi^2)] \quad (\varphi < 0.17 \text{ rad}) \quad (11)$$

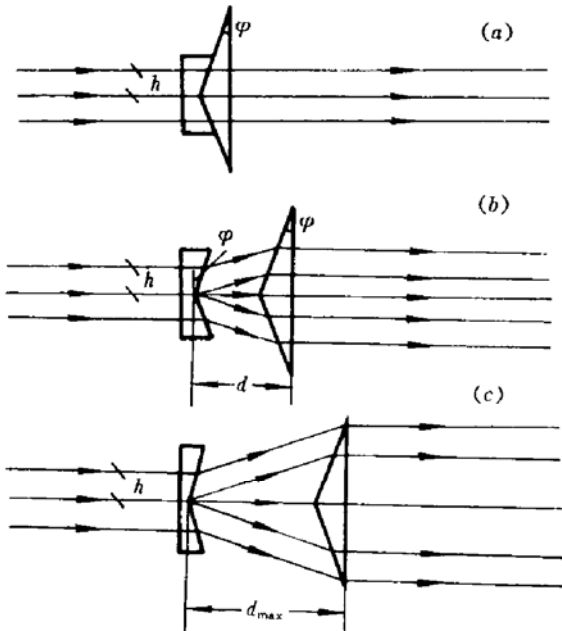


Fig. 3 The axicon beam expander

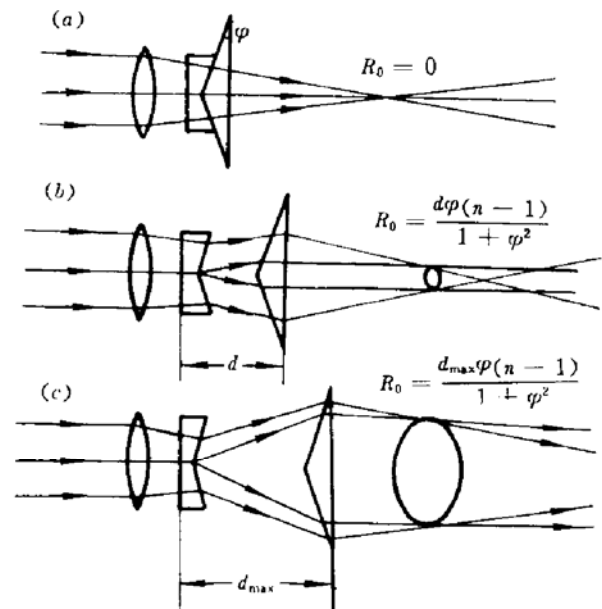


Fig. 4 Changing ring diameters by combination of a lens and axicon

式中, d 是正、负角锥透镜间隔, ϕ 是棱角, 改变 d , 可任意调节 R_0 的大小。当 $d = 0, R_0 = 0$; 但是 R_0 在最大值 R_{\max} 受正锥透镜孔径的限制, 所以对应一最大 d_{\max} 值。在激光钻孔、切割、焊接、环形工件热处理技术中, 采用图 4 的光束变换器, 可对大直径工件直接进行加工, 既不需要移动聚焦激光束, 也不需要移动被加工工件。因此, 可克服使用昂贵的激光扫描和旋转工作台等精密机械装置, 而且加工的环孔径可在几微米到几厘米的范围内进行调节。

4 实验结果

测定角锥透镜对光束变换特性的实验装置如图 5 所示。

功率 10 mW 的 He-Ne 激光经望远镜扩束成直径为 $2h$ 的准直平行光束后, 正入射到被测角锥透镜上, 变成线聚焦光束、环状光束, 用光屏 4 或探测器 5 分别测量光斑尺寸和光强分布。

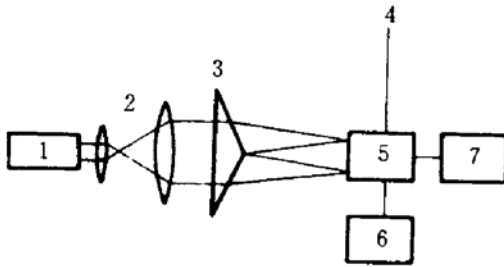


Fig. 5 Experimental arrangement

1 - laser; 2 - expander; 3 - axicon; 4 - screen
5 - detector; 6 - scanning driver; 7 - recorder

5 硅光电管(3DU33)前面,用同步电机驱动精密导轨丝杆沿垂直光轴横向扫描,图 6 是在 $L = 105 \text{ mm}$ 处横平面上的光强分布,中心亮斑光功率密度很高。实验曲线(a)与数值计算曲线(b)相符合。

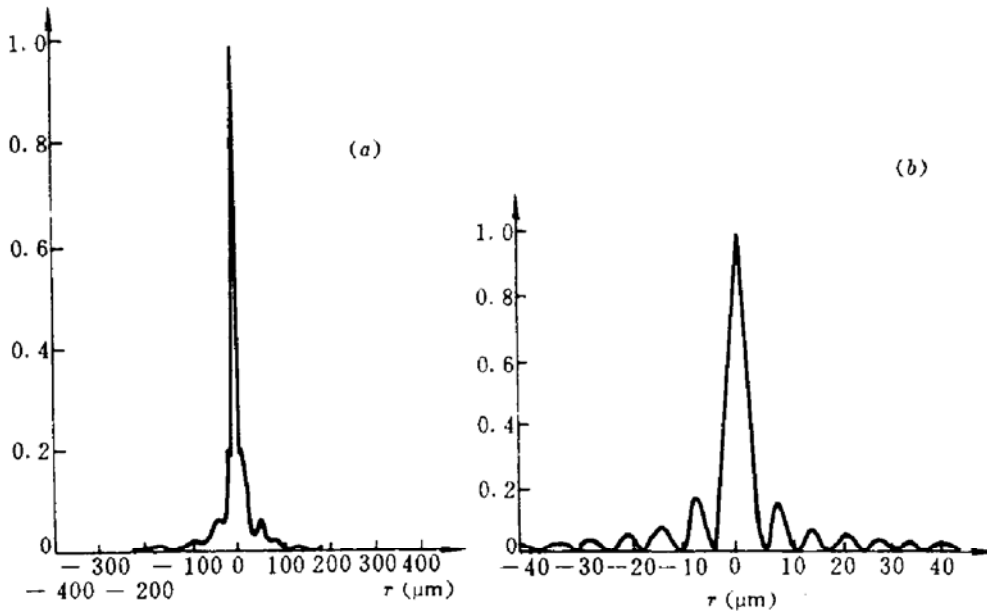


Fig. 6 Intensity distributions of Bessel beam

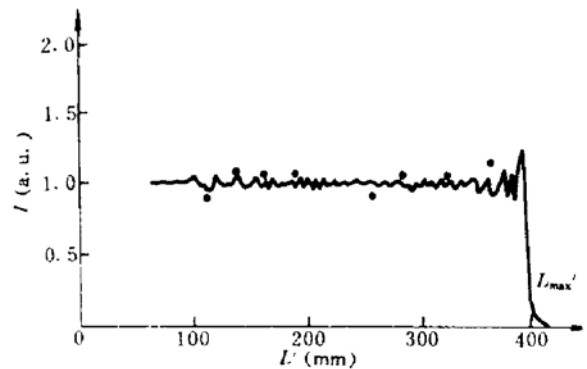
(a) Experimental beam profile; (b) Calculated beam profile

图 7 表示在 L_{\max}' 范围内轴上光强 $I(I \propto EE^*)$ 随 L' 的变化规律, $L' < 350 \text{ mm}$ 时,横平面上的光强分布基本保持不变,当 L' 靠近 L_{\max}' 时光强振荡加剧。图中曲线是数值计算结果,实验测定值用黑圆点表示,二者基本吻合,由此验证了在贝塞尔光区内光强分布与传输距离 z 无关,具有“无衍射”特性。

当 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,由(7)式计算的中心亮斑尺寸为 $D_{\text{Theory}} = 10.2 \mu\text{m}$,对横向扫描距离进行定标后,取不同位置经多次测量值为 $D_{\text{Exp.}} = 14.5 \pm 1.0 \mu\text{m} = \bar{D} + a \cdot \bar{D}$ 为平均值, a 为均方根偏差。测量结果表明,中心光斑尺寸基本不变,在贝塞尔光区内实现了细长线聚焦。

4.1 正锥透镜聚焦参数的测量

正锥透镜由本文作者自行设计加工, $\varphi = 50 \text{ mm}$,材料为 K_9 玻璃(或 KCl 晶体),棱角 $\varphi = 5.3^\circ$,准直平行光束直径 $2h = 39 \text{ mm}$,移动光屏,直接接收变换光束光斑,观察到从角锥顶点 O 到 L_{\max}' 范围内,任一横截面上都为等强度亮斑,由(4)式计算聚焦线最大长度 $L_{\max}' = 391 \text{ mm}$,实验测定值为 378 mm , $O \sim L_{\max}'$ 内的光强分布,采用小孔扫描法测量,小孔直径为 $26 \mu\text{m}$,置于探测器

Fig. 7 The axial intensity I of Bessel beam as a function of distance

5 硅光电管(3DU33)前面,用同步电机驱动精密导轨丝杆沿垂直光轴横向扫描,图 6 是在 $L = 105 \text{ mm}$ 处横平面上的光强分布,中心亮斑光功率密度很高。实验曲线(a)与数值计算曲线(b)相符合。

4.2 转换效率测量

用激光功率计测量经角锥透镜变换前后的激光功率,得到未镀膜角锥光束变换器的转换效率 $\eta = 84.7\%$,镀膜增透膜后, η 可大于 92% 。

4.3 环状光束的测量

将光屏置于 L_{\max}' 外,聚焦亮斑消失,接收到环状光束,继续增大 z ,环径变大,但环的宽度保持为常数值,如图 8(a) 所示。环宽测量值为 18.5 mm ,与理论计算值 19.5 mm 相一致。

用负锥透镜作实验,同样也得到环状光束宽度保持不变的结果。

图 8(b) 是平行光束通过图 4 组合光学系统变换器后,在焦面上摄得的细环照片,改变正、负角锥透镜间隔 d ,环径可按要求连续变化。

将上述实验扩展到红外波段,用 CO_2 激光作光源,经硒化锌透镜扩束器扩束,正入射到 KCl 晶体角锥透镜上亦可得到相同结果。图 8(c) 是红外激光在木板上烧蚀的圆环照片。

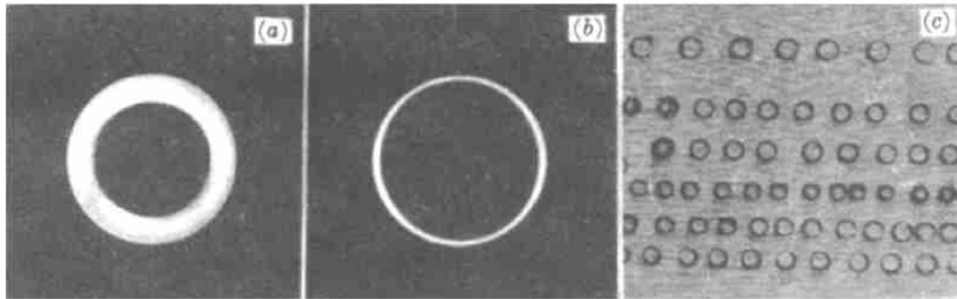


Fig. 8

(a) annular beam; (b) annular focusing beam; (c) burned rings by CW CO_2 at wood plate

参 考 文 献

- 1 J. H. Mcleod. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, 44 : 592
- 2 J. Durnin *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, A4 : 651
- 3 J. Durnin *et al.*, *Appl. Opt.*, 1988, 27 : 3959
- 4 吕百达 等. *光学学报*, 1993, 13(9) : 840

Propagation and Transformation Properties of Axicon Optical Systems for Laser Beams

Cai Bangwei Lü Baida Zhang Bin Feng Guoying

(Dept. of Opto-Electronic Sci. & Tech., Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract Using axicon-based optical devices can realize such transformations as Gauss' beam into a diffraction-free Bessel beam, solid beam and annular beam converting each other. In this paper, the combining optical systems are analyzed theoretically and studied experimentally in detail, both of the results are in agreement. It is shown that the axicon-beam converters have wide applications in laser techniques.

Key words axicon beam transformation, diffraction-free Bessel beam, annular beam