

文章编号: 0253-2239(2009)09-2557-04

# 轴棱锥——透镜系统的光束传输与变换

吴逢铁 卢文和 马宝田

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 对平面波经过轴棱锥——透镜系统的整个演绎过程进行详细的理论分析,数值模拟和实验验证。平面波经过轴棱锥产生横向光场不变的近似无衍射光,在最大无衍射距离内加入合适透镜将产生局域空心光束(Bottle beam),而空心光束的尺寸可通过改变透镜焦距进行控制。当光束继续传播,贝塞尔(Bessel)光发生自重建(Self-reconstruction),但重建的 Bessel 光将会发散,光强随着传播距离增大而迅速下降,且中心亮斑尺寸也迅速增大。通过引入另一聚焦透镜对光束进行修正,恢复了 Bessel 光束的无衍射的特性。利用显微镜-CCD 光束分析系统获得不同传播距离的截面光强分布,实验结果和理论分析及数值模拟相吻合。

**关键词** 光束传输;无衍射光;局域空心光束;自重建

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2557

## The Beam Propagation and Transformation in Axicon-Lens System

Wu Fengtie Lu Wenhe Ma Baotian

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract** A complete picture of the evolution of a plane wave passing through axicon-lens system was theoretical analyzed, numerical simulated and experimental demonstrated. A non-diffracting beam was obtained as plane wave passing axicon. A bottle beam can be generated if a focal lens kept within the maximum non-diffracting distance, and the size of the bottle beam easy adjusted by changing the focal length of the lens. As the beam further propagation, self-reconstruction of the Bessel beam generated. The divergence of the self-reconstruction beam causes the beam intensity decreasing and the bright spot size increasing as the beam propagating. A second focal lens was introduced to rectify the divergence of the self-reconstruction beam. The intensity profiles of the beam cross-section were captured using the optical system of the microscope and CCD camera. The theoretical analysis and numerical simulation were confirmed by the experimental results.

**Key words** beam propagation; non-diffracting beam; bottle beam; self-reconstruction

## 1 引言

无衍射贝塞尔(Bessel)光束具有中心主光斑尺寸小、准直距离长而不发散<sup>[1]</sup>,且通过障碍物具有光束重建的独特优点<sup>[2,3]</sup>,引起人们的广泛兴趣和关注。尤其在无衍射光束的最大准直范围内插入一个合适的聚焦透镜容易获得局域空心光束(Bottle beam)<sup>[4]</sup>,作为光镊,对微粒囚禁及在生命科学领域具有广阔的应用前景。人们已提出多种产生无衍射 Bessel 光的方法,其中利用轴棱锥(Axicon)产生 Bessel 光的方法具有装置简单,转换效率高<sup>[5]</sup>且抗损伤阈值高<sup>[6]</sup>等显著优点,轴棱锥的相关特性已得

到深入研究<sup>[7-10]</sup>。

本文主要研究轴棱锥-透镜系统(Axicon-lens system)的光束传输与变换。对系统产生的无衍射 Bessel 光,空心光束,Bessel 光重建,光束的矫正给出一个全程演绎过程,由衍射积分理论对过程进行数值模拟,并进行相关的实验验证。

## 2 理论分析与数值模拟

平行光入射轴棱锥产生无衍射 Bessel 光,其光场分布为

$$E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r r_1), \quad (1)$$

收稿日期: 2008-11-12; 收到修改稿日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(60477041)和福建省科学基金计划(A0710011)资助课题。

作者简介: 吴逢铁(1958—),男,博士,教授,主要从事光束传输与变换,短脉冲激光及非线性光学等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn (中国光学学会会员号: 3629212)

式中  $k_r$  和  $r_1$  分别为径向波矢和坐标,  $J_0$  为第一类零阶 Bessel 函数。在无衍射光的最大准直距离  $z_{\max} = \frac{a}{(n-1)\gamma}$  内(其中  $a$  为入射到轴棱锥的光束半径,  $n$  和  $\gamma$  分别为轴棱锥材料折射率和底角)插入焦距  $f < z_{\max}$  的透镜将产生空心光束, 之后 Bessel 光发生重建。简单的几何光路如图 1 所示。

利用广义 Huygens-Fresnel 衍射积分, 透镜聚焦后的场分布<sup>[11]</sup>:

$$E_2(r_2) = \frac{-i}{\lambda B} \exp(ikL) \int_0^b E_1(r_1) 2\pi J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B}\right) \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(r_1)^2 + D(r_2)^2]\right\} r_1 dr_1, \quad (2)$$

式中波数  $k = 2\pi/\lambda$ , 光束传输矩阵

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{z+l}{f} & z+l \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

可导出透镜后的光强分布为

$$I(r, z) = \left(\frac{kA_0}{z+l}\right)^2 \left| \int_0^b J_0(kr_1 r) J_0\left(\frac{kr_1 r}{z+l}\right) \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2(z+l)} - \frac{ik}{2f}(r_1)^2\right] r_1 dr_1 \right|^2, \quad (4)$$

为了给出一个完整的光束演绎过程, 利用(4)式进行数值模拟, 得到三维光强分布, 如图 2 所示。

由图 2 可见, 刚开始透镜后的光束为 Bessel 光, 随着光束沿  $z$  轴传输, 同心圆环增多, 之后空心光束形成。空心光束的径向尺寸  $R$  (Bottle radius)

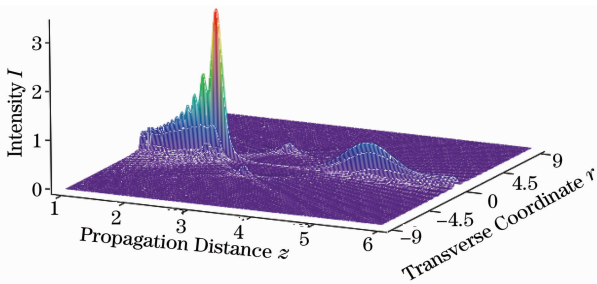


图 2 透镜聚焦后的光强分布

Fig. 2 Optical intensity distribution after focusing

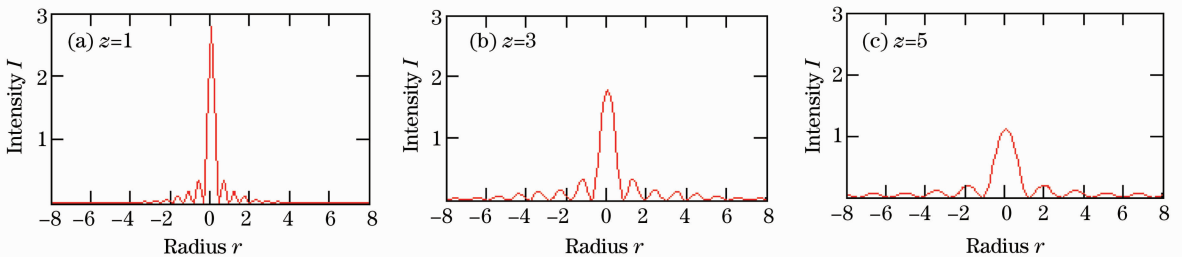


图 3 重建 Bessel 光的截面光强分布

Fig. 3 Optical intensity distribution of the reconstruction beam

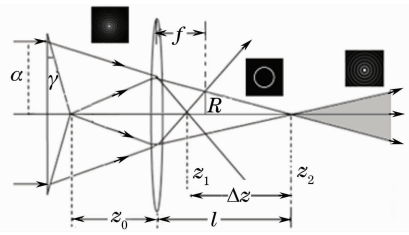


图 1 平行光通过 Axicon-lens 系统的几何光路图

Fig. 1 Geometrical diagram of the plane wave passing through an axicon-lens system

随  $z$  的增加而增大, 在透镜焦平面处  $R$  达到最大, 随后  $R$  开始变小, 之后 Bessel 光束开始重建。

下面我们将主要关注以下两个问题。第一是空心光束的尺寸, 第二是重建 Bessel 光的发散问题。由简单几何关系可得到焦平面处空心光束的最大径向尺寸(Max. Bottle Radius)为<sup>[12]</sup>

$$R = f(n-1)\gamma, \quad (5)$$

空心光束的长度(Bottle length),

$$\Delta z = z_2 - z_1 =$$

$$\frac{z_{\max}}{(z_0/f^2 - 1/f)(z_{\max}/f^2 + 1/f - z_0/f^2)}. \quad (6)$$

可知  $R$  和  $\Delta z$  都随着透镜焦距  $f$  的增大而增大, 也就是说空心光束的尺寸随  $f$  的增大而增大。另一方面由光强式(4)对不同轴向距离  $z$  的重建 Bessel 光进行模拟, 结果如图 3 所示。可见随着  $z$  的增大,

Bessel 光的中心亮斑尺寸增大,且强度逐渐衰减。可知,重建 Bessel 光随着传播距离的增大而发散。

为了解决重建 Bessel 光的发散问题,在聚焦透

镜  $f$  后面  $z = f + f'$  处放置另一透镜  $f'$ , 矫正后的光束传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f+f' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

当满足  $f = f'$ , 则

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 2f-z \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

将(8)式代入(2)式得到矫正后光强分布式

$$I(r, z) = E(r, z)E(r, z)^* = \left( \frac{kA_0}{2f-z} \right)^2 \left| \int_0^b J_0(kr_1 r) J_0\left(\frac{kr_1 r}{2f-z}\right) \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{4f-2z}\right] r_1 dr_1 \right|^2, \quad (9)$$

利用(9)式进行数值模拟,得到矫正后的三维光强分布图,如图 4 所示,其中透镜焦距归一化,取  $f = f' = 3$ 。

另一方面,模拟了  $z=0, 2, 4$  处的截面光强分布,如图 5 所示。

结果显示发散的 Bessel 光得到矫正,光束传输保持无衍射特性。

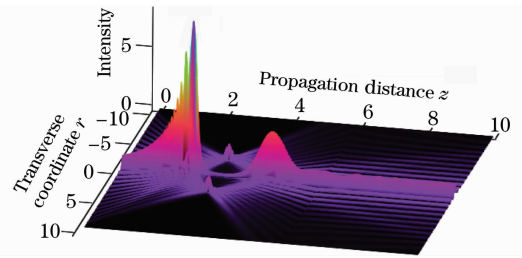


图 4 光束矫正后的三维强度分布图

Fig. 4 The 3D intensity distribution of the rectified beam

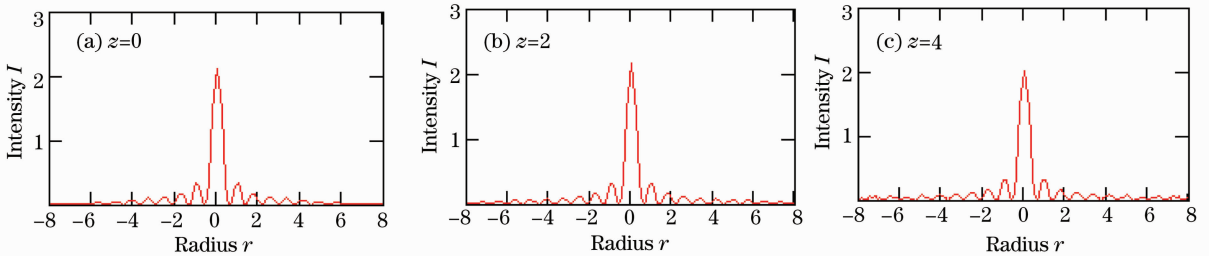


图 5 矫正后 Bessel 光的截面光强分布

Fig. 5 Optical intensity distribution of the rectified beam

### 3 实验与讨论

下面将通过实验对上述的理论分析和模拟进行验证。波长为 632.8 nm He-Ne 激光扩束准直后正入射到轴棱锥上(其折射率  $n = 1.516$ , 底角  $\gamma = 0.5^\circ$ )。利用体视显微镜(可连续放大,最大放大倍数 50 倍)和 CCD 照相机(可连续放大 5 倍,分辨率 2560 pixel  $\times$  1920 pixel)组成的系统拍摄截面光强分布图。

首先实验了透镜焦距对空心光束尺寸的影响。直径 7 mm 的平行 He-Ne 光正入射轴棱锥,在  $z_0$  处分别放置  $f=50, 70, 100$  mm 的聚焦透镜,在透镜焦平面处分别拍摄和测定最大空心光束的半径  $R$ 。实

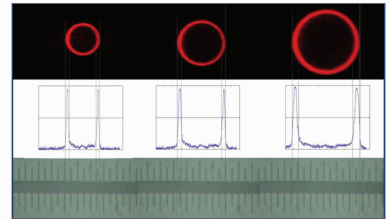


图 6 不同焦距透镜的焦平面处径向暗域半径的测量

Fig. 6 Measurement of the bottle radius on the focal plane with different focal lengths

验拍摄图见图 6,利用测微尺精确测量了  $R$  值,测微尺的最小刻度为 20  $\mu\text{m}$ 。结果列于表 1 并和(5)式计算出来的理论值进行比较。

表 1 的数据显示实验结果与理论计算基本吻

合,同时指出利用不同焦距  $f$  的透镜可获得不同尺寸的空心光束,可对不同大小的粒子进行微操控。

表 1 不同焦距透镜的空心光束半径  $R$

Table 1 The bottle radius  $R$  with different focal lengths

| $f / \text{mm}$ | $R / \mu\text{m}$<br>(theoretical value) | $R / \mu\text{m}$<br>(experimental value) |
|-----------------|--|---|
| 50              | 200                                      | 200                                       |
| 70              | 280                                      | 300                                       |
| 100             | 410                                      | 430                                       |

另一方面对重建 Bessel 光进行探讨,实验给出了重建 Bessel 光修正前后的不同轴向位置  $z$  ( $z_0$  为聚焦透镜位置)的截面光强分布并进行比较。实验参数为  $a = 7 \text{ mm}$ ,  $f = 70 \text{ mm}$ ,  $f' = 70 \text{ mm}$ ,  $z_0 = 750 \text{ mm}$ 。图 7 和图 8 分别为修正前后的重建 Bessel 光。

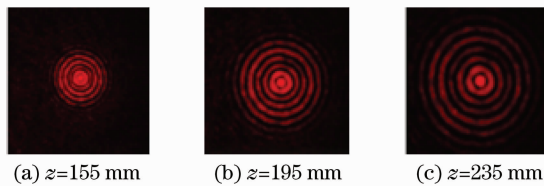


图 7 聚焦后重建 Bessel 光在不同  $z$  平面的光强分布  
Fig. 7 Optical intensity distribution of the reconstruction Bessel beam in different  $z$  planes

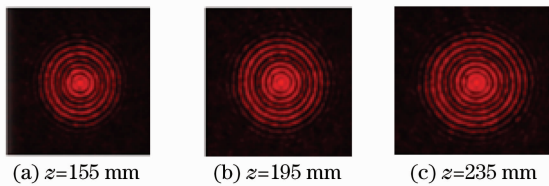


图 8 修正光束在不同  $z$  平面的光强分布  
Fig. 8 Optical intensity distribution of the rectified beam in different  $z$  planes

图 7 指出随着传播距离  $z$  的增大,中心光斑变大,光束发散,光强衰减,实验结果与图 3 的理论模拟吻合。图 8 给出的修正光束显示随着光束的传播,中心光斑半径大小及强度几乎不变,光束恢复了无衍射特性,实验结果与图 5 的理论模拟吻合。

## 4 结 论

本文给出了平行光束通过轴棱锥-透镜系统光束的传输与变换。光束通过轴棱锥产生了近似无衍

射 Bessel 光,该光束经过聚焦透镜可产生空心光束,且空心光束的尺寸可通过改变透镜焦距  $f$  进行控制,容易获得不同尺寸的空心光束。随着光束的传输空心光束后将产生 Bessel 光束的重建,但是重建 Bessel 光发生发散,其中心亮斑尺寸增大,光强减小。引入另一聚焦透镜,恢复了光束的无衍射特性。研究结果在精确测量,粒子微操作等方面具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffractive-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 2 V. Garcés Chavez, D. McGloin, H. Melville. Simultaneous Micro-manipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. *Nature*, 2002, **419**(3): 145~147
- 3 Liu Bin, Wu Fengtie, Jiang xinguang. Particles manipulation in multi-plane using non-diffracting Bessel beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 379~382  
刘 彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射 Bessel 光束多层面操控微粒[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 379~382
- 4 Wu Fengtie, Zeng Xiahui. Bottle beam with Talbot effect generated by interfering Bessel beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 174~178  
吴逢铁, 曾夏辉. 相干贝塞尔光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 174~178
- 5 M. de Angelis, L. Cacciapuoti, G. Pierattini *et al.*. "Axisly symmetric hollow beams using refractive conical lenses," [J]. *Opt. & Laser. Eng.* 2003, **39**: 283~291
- 6 Wu Fengtie, Chen Yinbin, Guo Dongdong. "Nanosecond pulsed Bessel-Guass beam generated directly from a Nd: YAG axicon-based resonator"[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4943~4947
- 7 Wu Fengtie, Jiang Xinguang. Experiments and Theory of facular lattice generated by a diffractive axicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2250~2254  
吴逢铁, 江新光, 刘 彬 等. 衍射轴棱锥产生光学点阵的理论和实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2250~2254
- 8 O. Brzobohaty, T. Cizmar, Zemanek. "High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon" [J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(17): 12688~12700
- 9 Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin *et al.*. Single Bottle beam generated by a double-axicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **48**(4): 2410~2415  
吴逢铁, 江新光, 衍射梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam[J]. *物理学报*, 2009, **48**(4): 2410~2415
- 10 Zeng Xiahui, Wu Fengtie. Effect of Elliptical Manufacture Error of an Axicon on the Diffraction-free Beam Patterns [J]. *Opt. Eng.*, 2008, **47**(8): 083401-1~6
- 11 Baida Lu, Wenlong Huang, Bin Zhang *et al.*. "Focusing properties of Bessel beams," [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **131**: 223~228
- 12 Min Dar Wei, Wen Long Shiao, Yi Tse Lin. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3): 7~14