

文章编号: 0253-2239(2010)06-1618-04

# 透镜轴棱锥产生近似无衍射贝塞尔光束

卢文和 吴逢铁 郑维涛

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 利用两个带球差的球面透镜进行胶合, 通过对其像差的控制与优化, 设计出一个类似轴棱锥的双透镜系统即透镜轴棱锥, 它可以产生具有贝塞尔光主要特性的光束。与轴棱锥相比, 它具有加工容易、制造成本低和孔径大等优点。利用光学设计软件模拟了平行光经过透镜轴棱锥产生贝塞尔光的演变过程, 并从实验上对光沿光轴传播时在不同距离  $z$  处的贝塞尔光的光斑进行了拍摄, 理论分析与实验吻合。

**关键词** 几何光学; 无衍射光束; 光线追迹; 透镜轴棱锥; 球差

中图分类号 O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1618

## Generation of Non-Diffraction Bessel-Liked Beam Using a Lens Axicon

Lu Wenhe Wu Fengtie Zheng Weitao

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

**Abstract** The design of an axicon-liked cemented doublet-lens system (lens axicon) made of two spherical aberration lenses through controlling and optimizing the spherical aberration of the surface is presented. The lens axicon has the main Bessel beam properties. Compared with axicon, this element is inexpensive and easy to manufacture even with large apertures. The evolution of the generated Bessel beam using lens axicon is simulated by using optical-design software. In the experiment, the Bessel beam patterns are captured in different propagation position. And the experimental results fit well with the theoretical simulation.

**Key words** geometrical optics; non-diffracting beam; ray tracing; lens axicon; spherical aberration

### 1 引言

无衍射贝塞尔光<sup>[1,2]</sup>是近年来研究的一个热点, 它由于具有中心光斑小、传输中保持光强分布不变、光强高度集中和自重建<sup>[3]</sup>等特性而引起人们的广泛关注, 在高精度定向、光镊和原子引导等领域取得重大成果。实验上产生贝塞尔光的光学元件有很多, 比如环缝-透镜, 计算机全息图、球差透镜和轴棱锥等。

轴棱锥装置由于具有结构简单、转换效率高、光损伤阈值高等优点<sup>[4,5]</sup>而被广泛应用。轴棱锥的相关特性已得到深入研究<sup>[6~8]</sup>。但是由于它是锥体结构, 存在加工难度大、成本高等缺点。本文利用带球差的透镜设计出类似轴棱锥的光学元件来产生近似贝塞尔光, 它是由两个球差透镜粘合而成的双透镜

系统, 称为透镜轴棱锥<sup>[9~11]</sup>。通过计算像差, 利用光学设计软件进行像差优化, 最后得出符合设计要求的表面曲率, 使得平行光通过透镜轴棱锥后产生具有贝塞尔光特性的光场。Jaroszewicz 等<sup>[12]</sup>曾利用衍射理论对透镜轴棱锥进行理论分析, 本文提出一种新的诠释方法, 利用几何光学的光线追迹法形象地描述了透镜轴棱锥产生贝塞尔光的演变过程及其形成原理, 并从实验上进行验证。

### 2 模拟分析

光波在无源的自由空间传播时, 其电场  $E$  满足标量亥姆霍兹(Helmholtz)波动方程

$$\left(\nabla - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E(r, t) = 0. \quad (1)$$

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和泉州市科技计划(2009G4)资助课题。

作者简介: 卢文和(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事光束传输与变换等方面的研究。E-mail: lwh610@163.com

导师简介: 吴逢铁(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(通信联系人)

其解为

$$E(\rho, \varphi, z, t) = \exp[i(\beta z - \omega t)]J_0(\alpha \rho), \quad (2)$$

式中  $\alpha = k_r, \beta = k_z, \alpha$  和  $\beta$  分别为径向和纵向的波矢分量,  $\beta^2 + \alpha^2 = k^2 = (\omega/c)^2, k$  为波数,  $c$  为光速,  $\omega$  为光波的频率,  $\rho, \varphi, z$  分别为柱坐标中的径向距离、方位角及轴向距离, 其中  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 。(2)式描述

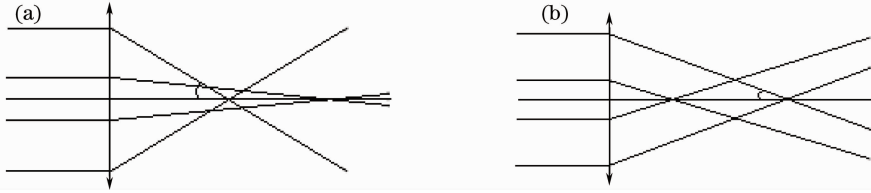


图 1 带正球差的透镜(a)和带负球差的透镜(b)

Fig.1 Lenses with (a) a positive spherical aberration and (b) a negative spherical aberration

所有的会聚单透镜具有正球差, 发散单透镜具有负球差, 但发散单透镜具有负的屈光力, 为了同时满足负球差及正屈光力, 采用由两种不同材料的带球差会聚透镜和发散透镜粘合而成的双透镜系统, 即透镜轴棱锥。通过像差计算, 利用光学设计软件进行优化<sup>[9]</sup>, 使平行光通过该系统后的出射光波对  $z$  轴具有相同的倾角  $\theta$ , 且具有从  $0 \sim 2\pi$  不同的方位角, 使得这一分布的波矢位于一个锥体。在子午面内则表现为两束平行光, 它们与  $z$  轴具有相同的倾角  $\theta$ , 这两束平行光的交叠区域即为贝塞尔光, 如图 2 所示。

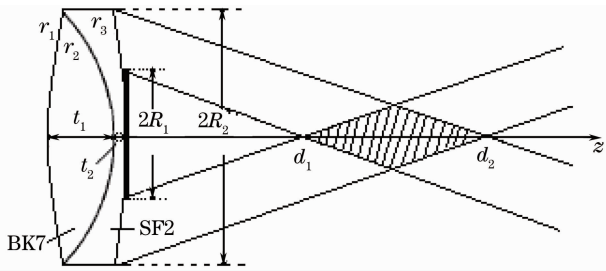


图 2 透镜轴棱锥产生贝塞尔光的几何光路图

Fig.2 Geometrical scheme of Bessel beam generated by lens axicon

图 2 中, 由于旁轴光线受球差影响较小, 因此要将其挡去以获得较高质量的贝塞尔光。从简单的几何关系可知  $R_1/R_2 = d_1/d_2, d_1$  到  $d_2$  的棱形区域即为贝塞尔光区域。设计中定  $d_1 = 200 \text{ mm}, d_2 = 400 \text{ mm}, R_1 = 5 \text{ mm}, R_2 = 10 \text{ mm}, t_1 = 6 \text{ mm}, t_2 = 4 \text{ mm}$ , 玻璃材料分别使用 BK7 和 SF2。利用光学设计软件进行像差优化, 最后得出三个面的曲率半径为  $r_1 = 52.36 \text{ mm}, r_2 = -14.25 \text{ mm}, r_3 = -131.53 \text{ mm}$ 。用几何光学光线追迹法对透镜轴棱锥产生贝塞尔光进

的光束为理想的无衍射贝塞尔光。

正球差透镜[如图 1(a)所示], 入射光线离轴越远, 其出射光线与光轴夹角越大, 而负球差透镜[如图 1(b)所示], 离轴不同的入射光线, 其出射光线与光轴夹角可以做到基本保持不变。

行模拟, 模拟结果如图 3 所示。

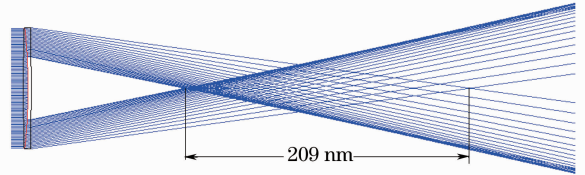


图 3 透镜轴棱锥产生贝塞尔光的几何光线追迹图

Fig.3 Geometrical ray tracing of Bessel beam generated by lens axicon

图 3 描述的是一平行光经透镜轴棱锥后, 由于像差的原因, 在子午面上会产生两组近近平行光, 它们的交叠部份(菱形区域)即产生近似贝塞尔光区域。软件数据显示, 该区域纵向距离约为 209 mm。从图 3 中可见, 入射光线离光轴越近, 受像差的影响越小, 这些光线与光轴的夹角  $\theta$  变化较大, 因此要设法将其挡去。采用半径  $R_1 = 5 \text{ mm}$  的障碍物置于透镜轴棱锥的最后曲面的中心处。当改变障碍物的大小, 发现菱形区域的纵向距离也随之改变, 如图 4 所示。

图 4(a)中的障碍物的半径相对于图 3 的变大了, 而菱形区域的纵向长度变短, 即近似贝塞尔光的最大准直距离变小。相反, 若减少障碍物的半径, 则菱形区域的纵向长度变长, 如图 4(b)所示。由于旁轴光线受像差的影响小, 所以障碍物的半径不能太小, 否则得到的出射光线在子午面上不能保证是近近平行光。

当平行光通过透镜轴棱锥时, 其衍射积分公式<sup>[12]</sup>如下:

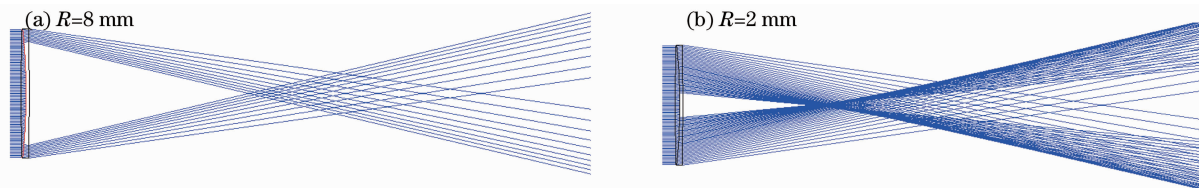


图 4 不同档板的透镜轴棱锥产生贝塞尔光的几何光线追迹图

Fig. 4 Geometrical ray tracing of Bessel beam generated by lens axicon with different radius of obstacle

$$I(\rho, z) = I_0(k/z)^2 \left| \int_{R_1}^{R_2} \exp[ikf(r)] J_0(kr\rho/z) r dr \right|^2, \quad (3)$$

式中

$$f(r) = r^2(1/2z - 1/2s) + \beta r^4, \quad (4)$$

$$\beta = (d_2 - d_1)/4d_1d_2(R_2^2 - R_1^2), \quad (5)$$

$$s = d_1d_2(R_2^2 - R_1^2)/(d_2R_2^2 - d_1R_1^2), \quad (6)$$

$J_0$  为零阶贝塞尔函数,  $\rho$  为径向坐标,  $z$  为光轴坐标, 波数  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射平行光的波长。对(3)~(6)式进行数值模拟, 选取的参数(与图 3 的模拟参数一样)为  $d_1 = 200$  mm,  $d_2 = 400$  mm,  $R_1 = 5$  mm,  $R_2 = 10$  mm,  $\beta = 8.333 \times 10^{-6}$  mm<sup>-3</sup>,  $s = 171.429$  mm,  $\lambda_0 = 632.8$  nm, 结果如图 5 所示。

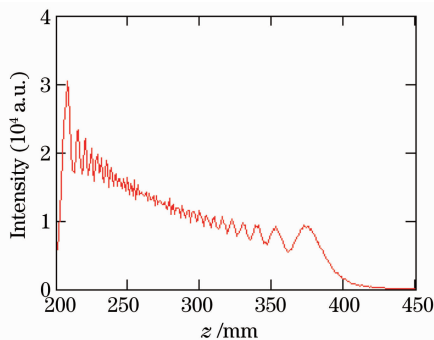


图 5 透镜轴棱锥轴上光强分布

Fig. 5 On-axis intensity for the lens axicon

图 5 为平行光经透镜轴棱锥产生的光束的轴上光强分布。从图 5 可以看出, 光束沿  $z$  轴传播过程, 由于透镜轴棱锥中心被一个半径为 5 mm 的圆形障碍物挡光, 因此在前面一段距离内轴上光强为零, 当传播到  $z=200$  mm 处轴上光强突然剧增, 随着光束沿  $z$  轴的继续传播, 轴上光强逐渐下降, 直至  $z=400$  mm 时, 光强降至零。图 3 是利用几何光学的光线追迹法进行模拟, 模拟结果表明, 平行光经透镜轴棱锥后, 在其后一段距离内形成一个菱形区域, 即贝塞尔光区。通过软件测得该区域的长度即最大无衍射距离约为 209 mm, 这与利用衍射理论模拟的结果(图 5)是吻合的。

光沿  $z$  轴传播时, 中心光斑的大小<sup>[12]</sup>

$$\rho_0(z) = c \lambda \sqrt{4\beta s z^3 / (z - s)}, \quad (7)$$

式中  $c=0.3827$  为常数。模拟时选取的参数与模拟图 3 的参数一样, 结果如图 6 所示。

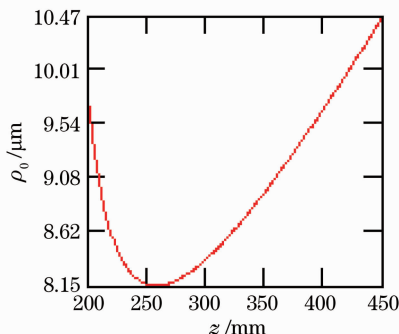


图 6 透镜轴棱锥产生的贝塞尔光的中心光斑大小

Fig. 6 Radius of the central spot of the Bessel beam generated by lens axicon

图 6 中可以看到, 光束沿  $z$  轴传播时, 中心光斑逐渐变小, 当  $z=256$  mm 时, 中心光斑的半径  $\rho_0 = 8.15$   $\mu\text{m}$  达最小, 然后随着光束的继续传播, 中心光斑又逐渐变大。这一点从图 4 中也可以发现, 无论障碍物半径大小是多少, 在子午面上的两束平行光并非完全平行, 这些光线与光轴的夹角  $\theta$  随着光束的传播而发生变化, 从而导致中心光斑随着光束的传播而发散。

### 3 实 验

实验中, 采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光经由焦距分别为 15 mm 和 100 mm 的倒望远镜系统扩束准直, 再经过圆形光阑后正入射到透镜轴棱锥上(图 7), 光阑半径  $R$  为 10 mm, 透镜轴棱锥是由两种玻璃材料 BK7 和 SF2 组成的双透镜, 其最右边的面上贴有一个半径  $R_1 = 5$  mm 的圆形障碍物。再利用旋转屏进行成像接收, 用体视显微镜和 CCD 照相机组成的系统拍摄, 结果如图 8 所示。

图 8 为贝塞尔光在最大无衍射距离内光沿  $z$  轴传输时在不同  $z$  处的横向光强分布。在  $z=200$  mm 处开始形成清晰的贝塞尔光[如图 8(a)所示], 此时中心光斑比较大, 随着光沿光轴继续传播,

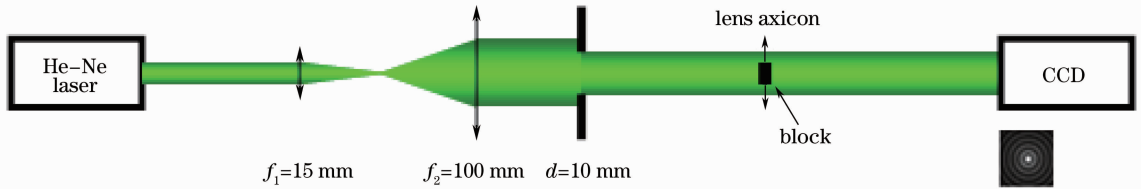


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

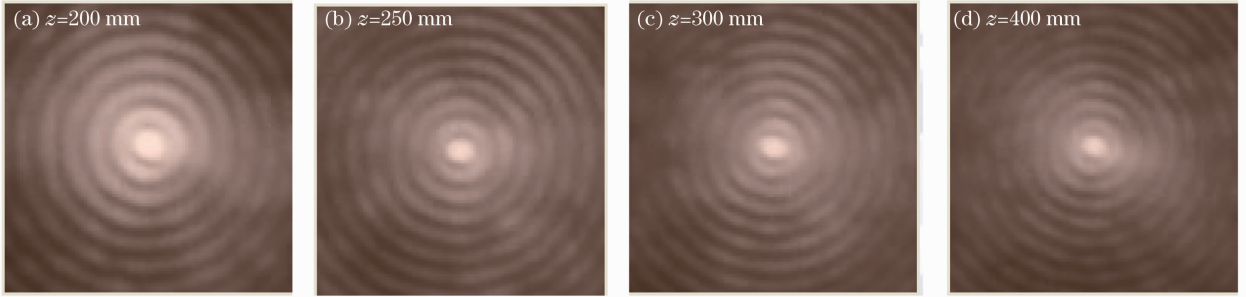


图 8 在不同位置的贝塞尔光的横向光强分布实验图

Fig. 8 Transverse intensity distributions of the Bessel beam in different propagation position

在  $z=250$  mm 处,中心光斑达到最小[如图 8(b)所示],然后随着光束的继续传播到  $z=300$  mm[如图 8(c)所示], $z=400$  mm[如图 8(d)所示],中心光斑又逐渐变大。实验中观察到的结果与模拟的结果比较吻合。

## 4 结 论

设计了一个由凸透镜和凹透镜组成的双透镜,即透镜轴棱锥,并分别由几何光学的光线追迹法和衍射理论进行模拟和实验。结果显示,利用透镜轴棱锥可以产生类似轴棱锥的贝塞尔光的主要特性。贝塞尔光的最大无衍射距离,决定于圆形障碍物的半径大小,半径越大,最大无衍射距离越短,但是贝塞尔光的光束质量较好;半径越小,最大无衍射距离越大,但是其光束质量较差。

## 参 考 文 献

- 1 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 2 J. Durnin. Exact solutions for nondiffracting beams I. The scalar theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1987, **4**(4): 651~654
- 3 Liu Lan, Wu Fengtie. Description of bottle beam and reconstruction of Bessel beam based on diffraction integral theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 370~374
- 刘 岚, 吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 370~374

- 4 Wu Fengtie, Chen Yunbin, Guo Dongdong *et al.*. Parameters analysis and measurement of nanosecond diffraction-free Bessel laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1073~1076
- 吴逢铁, 陈云彬, 郭东栋 等. 纳秒无衍射贝塞尔光脉冲参量的分析与测定[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1073~1076
- 5 Fengtie Wu, Yunbin Chen, Dongdong Guo. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4943~4947
- 6 Wu Fengtie, Jiang Xinguang. Experiments and theory of facular lattice generated by diffractive axicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2250~2254
- 吴逢铁, 江新光. 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
- 7 O. Brzobohaty, T. Cizmar, P. Zemanek. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12688~12700
- 8 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, 刘 彬 等. 衍射双轴棱锥产生单个 Bottle beam[J]. *物理学报*, 2009, **48**(4): 2410~2415
- 9 A. Burvall, K. Kořacz, Z. Jaroszewicz. Simple lens axicon[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4838~4844
- 10 J. Sochacki, A. Kolodziejczyk, Z. Jaroszewicz *et al.*. Nonparaxial designing of generalized axicons[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25): 5326~5330
- 11 L. R. Staronski, J. Sochacki, Z. Jaroszewicz *et al.*. Lateral distribution and flow of energy in uniformintensity axicons[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(11): 2091~2094
- 12 Z. Jaroszewicz, J. Morales. Lens axicons: systems composed of a diverging aberrated lens and a perfect converging lens[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(9): 2383~2390