

文章编号: 0258-7025(2008)03-0406-04

# 透镜焦距对局域空心光束尺寸的影响

刘彬 吴逢铁 刘岚

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 基于衍射理论导出由轴棱锥和透镜系统产生的局域空心光束的光传输公式,模拟了其三维(3D)光强及截面光强分布图。由衍射理论和几何光学方法详细分析了聚焦透镜的焦距对局域空心光束尺寸的影响,即在相同条件下,局域空心光束的尺寸随着透镜焦距的增大而增大。实验得到当焦距分别为50 mm,70 mm以及100 mm时,局域空心光束的径向暗域尺寸为200  $\mu\text{m}$ ,300  $\mu\text{m}$ 以及430  $\mu\text{m}$ 。理论计算、数值模拟与实验结果相吻合。

**关键词** 激光物理;局域空心光束;轴棱锥;透镜焦距

**中图分类号** O 436.1 **文献标识码** A

## Influence of Focal Length of Lens on Sizes of Bottle Beam

Liu Bin Wu Fengtie Liu Lan

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

**Abstract** Based on Huggens-Fresnel diffraction integral theory, the propagation formula of an optical bottle beam generated by an axicon-lens system was deduced. The three-dimensional (3D) and cross-section optical intensity distribution were simulated. Using the diffraction integral theory and geometry method, the influence of the focal length of the lens on the sizes of the bottle beam was analyzed in detail. The results show that the sizes of the bottle beam (including the bottle radius and bottle length) increase with the increase of the focal length of the lens under the same condition. In the experiment, the bottle radii of 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  and 430  $\mu\text{m}$  are obtained with the focal length of 50 mm, 70 mm and 100 mm respectively. The result fits well with theoretical calculation and numerical simulation.

**Key words** laser physics; bottle beam; axicon; focal length of lens

## 1 引言

近年来,随着激光技术的发展及其应用领域的拓展,光束整形技术也成为热门研究课题,人们利用各种方法产生了一系列新颖的光束。由于近年来空心光束在原子引导、原子囚禁、光学捕捉及光镊等方面的广泛应用,空心光束已成为现代光学研究的重要课题。

局域空心光束是空心光束的一种,它的传播方向上存在光强为零的区域,而在此区域外的三维(3D)空间都存在着高强度的光场<sup>[1]</sup>。由于局域空心光束具有三维封闭的暗中空区域和极高的强度梯度,它可作为激光导管<sup>[2]</sup>、光镊<sup>[3]</sup>和光学扳手<sup>[4]</sup>等工

具,还可用于囚禁微观粒子<sup>[5]</sup>以及实现全光学冷却与囚禁玻色-爱因斯坦凝聚<sup>[6]</sup>,在生命科学和纳米科技中<sup>[7]</sup>起着重要的作用。由于轴棱锥产生的无衍射光具有装置简单、转换效率高及光损伤阈值高<sup>[8]</sup>等显著优点,我们采用轴棱锥来产生近似无衍射光束。最近我们利用轴棱锥构成的贝塞耳谐振腔直接输出近似无衍射的高功率、纳秒贝塞耳-高斯光<sup>[9]</sup>。本文采用轴棱锥-透镜法来生成局域空心光束,首先利用轴棱锥产生近似无衍射光束,在无衍射光束的最大准直距离范围内加入一聚焦透镜,则在透镜后可产生局域空心光束。我们曾经利用干涉理论分析了局域空心光束的光强分布,描述了局域空心光束的形成

收稿日期:2007-07-09; 收到修改稿日期:2007-09-24

基金项目:国家自然科学基金(60477041)和福建省自然科学基金(A0710011, A0410017)资助项目。

作者简介:刘彬(1984—),女,新疆人,硕士研究生,主要从事光束传输与变换的研究。E-mail:pretty84@126.com

导师简介:吴逢铁(1958—),男,福建人,教授,博士,主要从事光束传输与控制、超短光脉冲及其非线性效应的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn (通信作者)

过程<sup>[10]</sup>。

本文首先利用衍射理论对局域空心光束的光强分布进行描述,模拟了不同透镜焦距的三维光强及截面光强分布图,由几何光学方法给出局域空心光束尺寸的表达式,包括局域空心光的半径和长度,由于局域空心光束的尺寸对实际应用至关重要,文章对影响尺寸的相关参量进行了详细的讨论。

## 2 理论分析与模拟

### 2.1 衍射理论对局域空心光束的描述及分析

用扩束准直的激光光束入射到轴棱锥后,在无衍射最大准直距离<sup>[11]</sup>范围  $z_{\max} = \frac{d}{(n-1)\gamma}$  内(其中  $d$  为入射到轴棱锥上的光束半径,  $n$  为轴棱锥的折射率,  $\gamma$  为轴棱锥的入射底角),形成一个如同两个有相同底边的角锥并以底边相结合在一起的四边形区域,此区域内为无衍射区域。将一聚焦透镜放在  $z_{\max}$  内,如果透镜的焦距满足  $f < z_{\max}$ ,则在透镜后可产生局域空心光束,如图 1 所示。

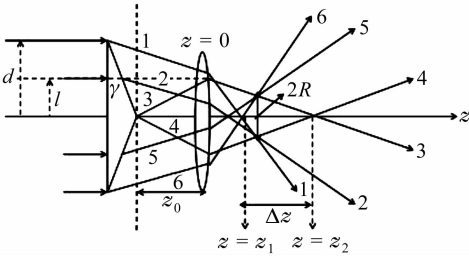


图 1 轴棱锥形成的局域空心光束的几何结构

Fig. 1 Geometrical scheme of bottle beam generated by axicon

光束在经过传输距离  $z$  以及焦距为  $f$  的透镜后,其传输矩阵为

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

若入射到透镜上的光场分布为  $E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r \cdot r_1)$ 。其中,  $A_0$  为复振幅常数,  $k_r$  为径向波矢分量,  $r_1$  为径向坐标,  $J_0$  为第一类零阶贝塞耳函数。应用柱坐标下广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式以及柯林斯公式的推广,可以得到聚焦后的光强分布<sup>[12]</sup>

$$I(r, z) = \left( \frac{k \cdot A_0}{z} \right)^2 \times \left\{ \left| \int_0^r J_0(k_r \cdot r_1) \cdot J_0\left(\frac{k \cdot r_1 \cdot r}{z}\right) \times \exp\left[\frac{i \cdot k \cdot (r_1)^2}{2z} - \frac{i \cdot k}{2f} \cdot (r_1)^2\right] r_1 dr_1 \right|^2 \right\}, \quad (2)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $z_0$  为聚焦透镜距轴棱锥的距离(坐标原点取在轴棱锥的锥尖)。

由(2)式进行三维和二维模拟,给出光传输过程中局域空心光束的形成过程,并讨论透镜焦距  $f$  对局域空心光束尺寸的影响。为了作图方便,对透镜的焦距  $f$  进行归一化,分别取  $f = 3, f = 5$  进行模拟,如图 2 所示。

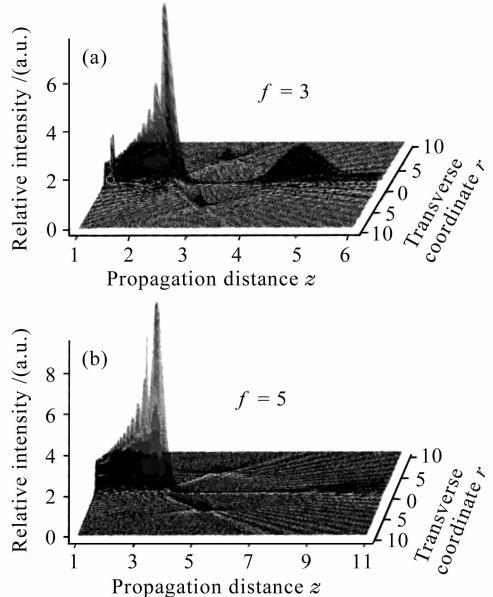


图 2 不同焦距下局域空心光束的三维光强模拟

Fig. 2 Simulation of 3D intensity of bottle beam with different focal lengths

从图 2 中可以看出在焦平面前方是锥波相干叠加形成的强度逐渐增加的近似无衍射贝塞耳光,这一部分区域对应几何图形 1 中  $z$  轴上 0 到  $z_1$  之间的锥形区域,随着距离  $z$  的增大,近似无衍射贝塞耳光逐渐演变成局域空心光束。图 2(a) 中在聚焦透镜的焦平面处( $z = 3$ )有两个突起的尖峰,在此处局域空心光束的径向暗域尺寸最大,即局域空心光的最大半径,并且亮环的光强最大。超过焦平面后,局域空心光束半径变小,之后出现近似无衍射贝塞耳光的重建现象(关于贝塞耳光的重建现象,我们将另文讨论)。由模拟图可以看出大的透镜焦距  $f$  形成的局域空心光束的尺寸也大。

为了更清楚地看到焦平面处不同焦距下局域空心光束尺寸的变化,模拟了不同焦距的透镜在其各自焦平面处的横截面光强分布图,图 3 是归一化后焦距  $f$  分别为 3, 5, 7 的横截面光强分布图。从图中可以看出横截面的光斑半径随着  $f$  的增大而增大。

### 2.2 几何光学法对局域空心光束的分析

局域空心光束的尺寸包括轴上暗域长度  $\Delta z$  和

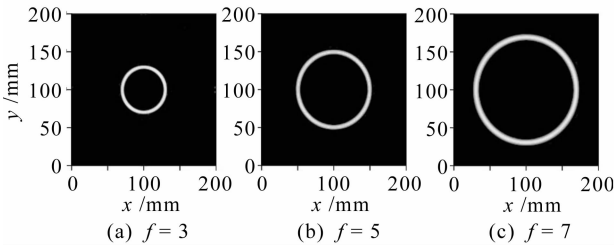


图 3 不同焦距下焦平面处的横截面光强分布的数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of cross section intensity distribution on the focal plane with different focal lengths

$$R = f(n - 1)\gamma. \quad (6)$$

$\Delta z$  和  $R$  随  $f$  的变化如图 4 所示,理论模拟的参数为:激光波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,光阑半径  $d = 3.5 \text{ mm}$ ,轴棱锥底角  $\gamma = 0.45^\circ$ ,折射率  $n = 1.516$ ,轴棱锥与透镜的距离为  $560 \text{ mm}$ (此条件下,在轴棱锥后的贝塞耳光最大准直距离为  $z_{\max} = 863.6 \text{ mm}$ )。

由图 4 可以看出,  $\Delta z$  和  $R$  都随  $f$  的增大而增大。根据 (5), (6) 式,取透镜的焦距  $f = 50 \text{ mm}$ ,  $70 \text{ mm}$  以及  $100 \text{ mm}$  分别计算出  $\Delta z$  和  $R$  的理论值,如表 1 所示。可见在相同条件下,局域空心光束的轴向和径向暗域尺寸  $\Delta z$  和  $R$  会随透镜焦距  $f$  的增大而增大。

表 1 不同焦距下的轴上暗域长度  $\Delta z$  和径向暗域尺寸  $R$  的理论值

Table 1 Theoretical value of bottle length  $\Delta z$  and bottle radius  $R$  with different focal lengths

$f/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$R/\mu\text{m}$
50	12	200
70	23	280
100	47	410

$$z_1 = \frac{d - (n - 1)\gamma z_0}{\frac{d}{f} + (1 - \frac{z_0}{f})(n - 1)\gamma} = \frac{f - \frac{z_0 f}{z_{\max}}}{1 + \frac{f}{z_{\max}} - \frac{z_0}{z_{\max}}}, \quad (3)$$

$$z_2 = \frac{z_0 f}{z_0 - f}, \quad (4)$$

$\Delta z = z_2 - z_1$  也称为局域空心光的长度。将 (4) 和 (3) 式相减可以得到

$$\Delta z = \frac{z_{\max}}{(\frac{z_0}{f^2} - \frac{1}{f})(\frac{z_{\max}}{f^2} + \frac{1}{f} - \frac{z_0}{f^2})}, \quad (5)$$

应用几何理论可以求出焦平面处径向暗域尺寸

### 3 实验结果与讨论

根据 2 节理论分析的数值进行实验,用准直扩束的激光光束 ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) 入射轴棱锥,光阑半径  $d = 3.5 \text{ mm}$ ,轴棱锥底角  $\gamma = 0.45^\circ$ ,折射率  $n = 1.516$ ,轴棱锥与透镜的距离  $z_0 = 560 \text{ mm}$ 。在  $z_0$  处分别放入  $f = 50 \text{ mm}$ ,  $70 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$  的聚焦透镜,聚焦光束投射到旋转屏上,用体视显微镜(可连续放大,最大放大倍数  $50\times$ )和 CCD 照相机(可连续放大  $5\times$ ,  $2560 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ )组成的系统,分别在不同透镜的焦平面处 ( $z = 50 \text{ mm}$ ,  $70 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$ ) 拍摄其截面光强分布光斑图。

为了更清楚地给出  $R$  随  $f$  增大而增大,用测微尺精确测量了  $R$  的尺寸。测微尺的最小刻度为  $20 \mu\text{m}$ 。空心光束的暗斑尺寸定义为:空心光束凹口内侧径向强度分布的半峰全宽<sup>[14]</sup>。利用此定义对实验拍摄的光斑图进行测量,图 5 为焦平面处的最大径向半径。不同焦距下的径向暗域尺寸  $R$  的测量值如表 2 所示。

可见,局域空心光束的径向暗域最大尺寸的实验测量与理论计算的结果吻合得很好,局域空心光束的径向暗域半径  $R$  会随  $f$  的增大而增大。至于局域空心光束的轴上暗域长度的测量,由于条件限制,实验中出现空心光的起点和终点比较模糊,还不能

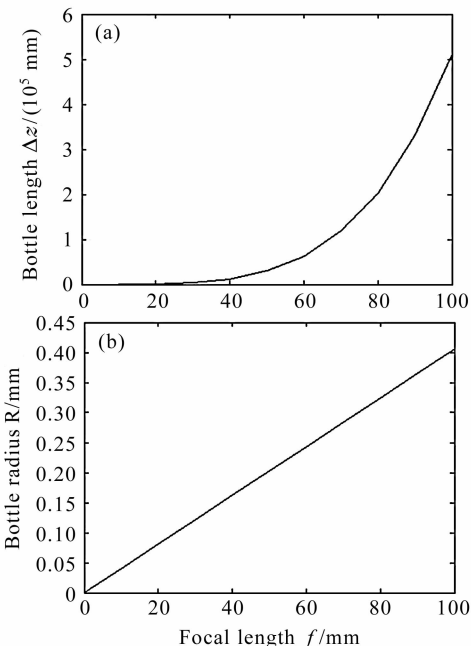


图 4  $\Delta z$  (a) 和  $R$  (b) 随  $f$  的变化曲线

Fig. 4 Graph of bottle length  $\Delta z$  (a) and bottle radius  $R$  (b) versus focal length  $f$

给出精确的读数。

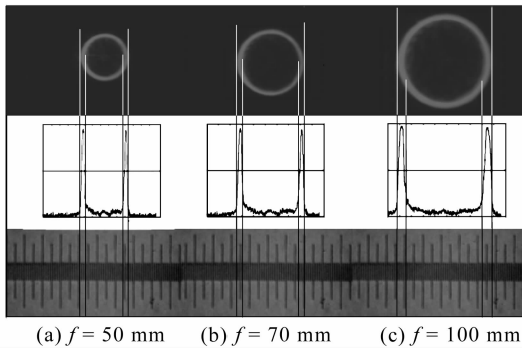


图 5 用测微尺对不同焦距下焦平面处径向暗域半径的测量

Fig. 5 Measurement of bottle radius on the focal plane with different focal lengths using the micrometer

表 2 不同焦距  $f$  下的径向暗域尺寸  $R$  的实验测量数据  
Table 2 Experimental measurement of bottle radius  $R$  in different focal lengths  $f$

$f / \text{mm}$	$R / \mu\text{m}$
50	200
70	300
100	430

## 4 结 论

根据衍射理论得出由轴棱锥和透镜系统产生局域空心光束的光传输公式,模拟了其三维及截面光强分布图,详细分析了透镜焦距对局域空心光束尺寸的影响,由体视显微镜和 CCD 照相机精确得到了由轴棱锥透镜系统产生的局域空心光束在焦平面处的径向暗域半径。在一定的条件下,理论计算与实验结果吻合得很好。鉴于不同尺寸的局域空心光束可囚禁不同尺寸的粒子,可以通过减小焦距来获得小的局域空心光束尺寸。例如当焦距为 5 mm 时,囚禁微粒的径向暗域半径为  $20 \mu\text{m}$ 。因此,只需要改变透镜的焦距,局域空心光束不仅可以囚禁大尺寸的粒子还可以囚禁小尺寸的粒子,这对微粒操作有很大的可控性。

## 参 考 文 献

- 1 J. Arlt, M. J. Padgett. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4):191~193
- 2 Svetlana A. Tatarkova, Wilson Sibbett, Kishan Dholakia. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3):038101-1~038101-4
- 3 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903):145~147
- 4 L. Paterson, M. P. MacDonald, J. Arlt *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle [J]. *Science*, 2001, **292**(5518):912~914
- 5 J. Arlt, V. Garcés-Chavez, W. Sibbett *et al.*. Optical micromanipulation using a Bessel light beam [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**:239~245
- 6 Tino Weber, Jens Herbig, Michael Mark *et al.*. Bose-Einstein condensation of cesium [J]. *Science*, 2003, **299**(5604):232~235
- 7 Alex Terray, John Oakey, David W. M. Marr. Microfluidic using colloidal devices [J]. *Science*, 2002, **296**(5565):1841~1844
- 8 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
- 9 吴逢铁,陈云彬,郭东栋等. 纳秒无衍射贝塞耳光脉冲参量的分析与测定[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1073~1076
- 10 Fengtie Wu, Yunbin Chen, Dongdong Guo. Nanosecond Bessel-Gauss pulse generated directly from an Nd:YAG axicon-based resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23):4943~4947
- 11 Zeng Xiahui, Wu Fengtie, Liu Lan. The description of bottle beam based on the interferential theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2):791~797
- 12 曾夏辉,吴逢铁,刘 岚. 干涉理论对 bottle beam 的描述[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2):791~797
- 13 Lü Baida, Zhang Bin, Cai Banwei *et al.*. The investigation of the diffraction free beam with a finite aperture [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, **39**(2):125~128
- 14 吕百达,张 彬,蔡邦维等. 有限束宽无衍射光束特性的研究[J]. *科学通报*, 1994, **39**(2):125~128
- 15 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
- 16 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
- 17 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
- 18 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3):337~380
- 19 印建平,刘南春,夏 勇等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3):337~380