

文章编号: 0253-2239(2010)09-2549-05

环形光束产生局域空心光的几何光学分析与实验

马宝田 吴逢铁 卢文和 马亮

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 提出一种用环形光束产生局域空心光的新方法,即用环形光束垂直入射锥透镜底面,沿光轴方向就会产生局域空心光。用几何光学分析模拟了环形光束产生的局域空心光的过程和传输方向上不同位置的截面光强分布,推导了局域空心光暗域的横向和径向大小的计算式,分析了影响局域空心光暗域的大小的因素,并给出相关的实验结果,实验与理论基本吻合。与双锥透镜、锥透镜-透镜产生局域空心光相比,这种方法结构简单,元件容易加工,具有重要的应用价值。

关键词 几何光学; 环形光束; 锥透镜; 局域空心光; 贝塞尔光束

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103009.2549

Geometric Optics Analysis and Experiment of Bottle Beam Generated by Using Annular Beam

Ma Baotian Wu Fengtie Lu Wenhe Ma Liang

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

Abstract A new way to generate bottle beam by using annular beam is presented. When annular beam illuminates perpendicularly bottom surface of axicon, bottle beam is generated along the optical axis behind the axicon. Process of generating bottle beam and transverse intensity distribution at different location on optical axis are analyzed by using geometrical optics. Formulas for calculate bottle beam sizes are deduced and the factors affecting bottle beam sizes are discussed. The results of contrast experiment agree approximately with theoretical analysis. Compared with double-axicon and axicon-lens, this method for generating bottle beam is simple in operation and the optical elements processing is easy, so it is important in applications.

Key words geometrical optics; annular beam; axicon; bottle beam; Bessel beam

1 引言

近年来,随着激光应用技术的发展,中心强度为零的空心激光束(Hollow beam)和局域空心光(Bottle beam)越来越受到人们的关注。空心激光束是一种管状空心光束,例如贝塞尔-高斯(Bessel-Gaussian)光束和高阶贝塞尔(Bessel)光束。局域空心光是一种局域空心光,在传输方向上存在着光强低,甚至为零的局部区域,这一区域的空间三维边界的光强较高^[1,2]。空心光束因具有旋转角动量,轨道角动量和暗区域尺寸小等优点,使其在激光光学、

二元光学、计算机全息、材料光学和生物医药等领域有着广泛的应用^[3]。

关于产生局域空心光的技术已有很多报道,主要包括应用激光束的机械角扫描^[4,5],应用光学衍射元件如空间相位板^[1]和振幅调制器^[2],使用干涉仪聚焦两束曲率半径相反的高斯光束^[6],利用两束Bessel光束的干涉^[7~8]。由于锥透镜产生Bessel光的方法具有装置简单、转换效率高且抗损伤阈值高^[9]等显著优点,锥透镜在产生局域空心光方面的也得到了广泛研究。如用透镜-锥透镜系统聚焦超

收稿日期: 2009-11-06; **收到修改稿日期:** 2009-12-22

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

作者简介: 马宝田(1969—),男,硕士研究生,主要从事无衍射光束的产生、传输与变换等方面的研究。

E-mail: xll0398@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)

高斯光束^[10], 利用锥透镜-透镜聚焦 Bessel 光束产生局域空心光^[11,12], 利用双锥透镜直接产生周期再现的局域空心光^[13]等。

本文提出了一种用环形光束产生局域空心光的新方法。运用几何光学分析模拟了环形光束产生局域空心光的基本原理和传输方向上不同位置的截面光强分布, 分析了影响局域空心光暗域大小的因素以及和多环形光束产生多局域空心光的情形。

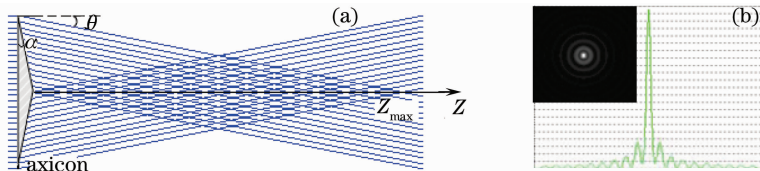


图 1 (a) 平面波通过锥透镜产生 Bessel 光束; (b) 光斑及径向光强分布

Fig. 1 (a) Axicon transforms incident plane wave into Bessel beam; (b) beam pattern and radial intensity distribution of Bessel beam

从几何光学的角度进行分析, 如图 1(a) 所示, 假设折射锥透镜很薄, 其底角为 α (Axicon 平面与圆锥母线的夹角)、折射率为 n 光线通过锥透镜时将偏折 θ 角 (折射光线与入射光线的夹角), 当锥透镜底角 α 很小时, 由斯涅耳(Snell)定律可得

$$\theta = (n - 1)\alpha. \quad (1)$$

图 1(a) 中的菱形部分是锥面波的叠加区域, 在这区域内是近似无衍射 Bessel 光束, Z_{\max} 称为最大无衍射距离, 由几何近似可得

$$Z_{\max} = R / [(n - 1)\alpha], \quad (2)$$

式中 R 为入射光束半径。

2.2 环形光束产生局域空心光

环形光束用经过望远镜系统准直扩束的高斯光束照射如图 2(a) 所示菲林片来获得, 菲林片上的黑色区域对入射光完全吸收, 无色区域对入射光完全透过。 R_1 为中心光束半径或者说是吸光环带内径,

2 理论分析模拟环形光束产生局域空心光

2.1 锥透镜产生 Bessel 光束

如图 1 所示, 将一束平行的激光垂直射入锥透镜底面, 平面波经过锥透镜的转换, 变成了一组波矢落在一个锥面上的平面波, 在这组平面波的叠加的菱形区域得到的即是近似无衍射 Bessel 光束。

R_2 为环形光束内径或者说是吸光环带外径, R 为环形光束外径, 菲林片置于锥透镜底面, 且与其同心。

将一束半径大于 R 的平行激光垂直射入如图 2(a) 所示菲林片得到的环形光束, 垂直入射锥透镜, 光束的传输情况如图 2(b)。对比图 2(b) 和图 1(a) 会发现, 在原来的 Bessel 光束区域内部产生了一个局域空心部分, 这是一个光强为零的暗区域, 也就是环形光束产生的局域空心光。局域空心光暗域的周围共分 I ~ V 五个部分, I 和 II 是平面波, III, IV 和 V 是 Bessel 光束。

从图 2(b) 可以看出, 局域空心部分的位置和大小由 R_1 和 R_2 决定, 即产生环形光束的菲林片上的黑色吸光环带宽度决定。分别用 Z_i 和 Z_f 表示局域空心部分的起始位置和终止位置, 则可得

$$Z_i = R_1 / [(n - 1)\alpha], \quad (3)$$

$$Z_f = R_2 / [(n - 1)\alpha], \quad (4)$$

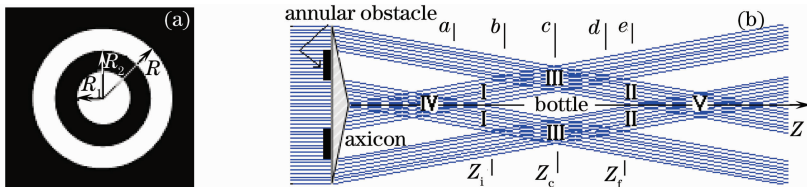


图 2 (a) 产生环形光束的菲林片; (b) 环形光束通过锥透镜产生局域空心光

Fig. 2 (a) Film roll to generate annular beam; (b) axicon transforms incident annular beam into bottle beam

(4) 式减去 (3) 式即可得到局域空心部分的轴向长度 L 的表达式:

$$L = Z_f - Z_i = R_2 / [(n - 1)\alpha] - R_1 / [(n - 1)\alpha] = (R_2 - R_1) / [(n - 1)\alpha], \quad (5)$$

局域空心部分的中心位置

$$Z_c = Z_i + L/2 = (Z_i + Z_f) / 2 =$$

$$(R_1 + R_2) / [2(n - 1)\alpha]. \quad (6)$$

取锥透镜中心为 z 轴原点, 取光线传输方向为 z 轴正方向, 则局域空心部分的径向半径 r 与传输距离 Z 的具体关系为

$$r = \begin{cases} (Z - Z_i)(n - 1)\alpha, & Z_i \leq Z \leq Z_c \\ (Z_f - Z)(n - 1)\alpha, & Z_c \leq Z \leq Z_f \end{cases} \quad (7)$$

局域空心部分的最大径向半径,由几何关系容易得到

$$r_{\max} = (R_2 - R_1)/2. \quad (8)$$

从(3)~(8)式可以看出,如果锥透镜参量不变,局域空心部分的起始位置、终止位置分别由 R_1 和 R_2 决定,中心位置由 $(R_1 + R_2)$ 决定,轴向长度和最大径向半径由 $(R_2 - R_1)$ 决定。如果产生环形光束的非林片图形参量不变,局域空心部分的起始位置、终止位置、中心位置、轴向长度和最大径向半径由锥透镜底

角 α 和折射率 n 决定。因此,只要改变环形光束的非林片上黑色吸光环带内径 R_1 和外径 R_2 或者改变锥透镜底角 α 和折射率 n 就可以改变局域空心部分在光轴上的位置和大小。

图 3(a)~(e)是图 2(b)光轴上 a 点 $z_a = 600$ mm, b 点 $z_b = 800$ mm, c 点 $z_c = 1000$ mm, d 点 $z_d = 1200$ mm 和 e 点 $z_e = 1300$ mm 的光斑图,模拟选用参数为: $\lambda = 632.8$ nm, $\alpha = 0.5^\circ$, $n = 1.458$, $R_1 = 3$ mm, $R_2 = 5$ mm, $R = 6$ mm。

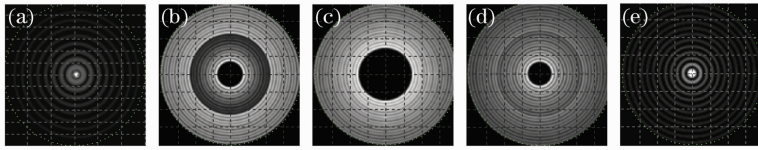


图 3 数值模拟得到的光轴上不同位置的光斑

Fig. 3 Beam pattern at four positions on optical axis by numerical simulation

如果使用双环光束[如图 4(a)]和锥透镜,则可在激光传输轴上得到两个局域空心 I,II 和一个以光轴为

对称轴的环状的局域空心区域 III,如图 4(b)所示。

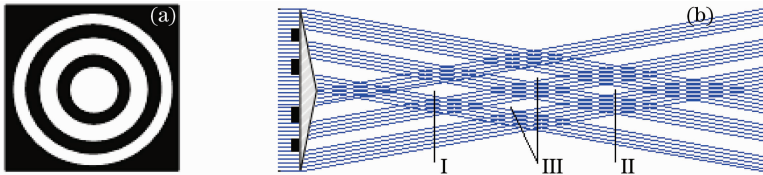


图 4 (a)产生双环光束的非林片;(b)双环形光束通过锥透镜产生多个局域空心光

Fig. 4 (a) Film roll to generate double annular beam; (b) axicon transforms incident double annular beam into several localized bottle beam

3 实 验

用环形光束产生局域空心光的实验装置如图 5 所示。仪器主要包括 He-Ne 激光器,凸透镜 L_1 焦距 $f = 15$ mm,凸透镜 L_2 焦距 $f = 190$ mm,图 2(a)

所示的产生环形光束的非林片 ($R = 6$ mm, $R_1 = 3$ mm, $R_2 = 5$ mm),锥透镜,体视显微镜(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)。

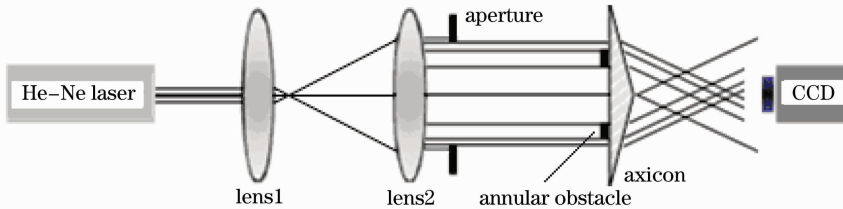


图 5 环形光束通过锥透镜产生局域空心光的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of axicon transforms incident annular beam into localized bottle beam

由(3),(4)和(6)式分别算出局域空心部分起点 $Z_i = 750$ mm,中心 $Z_c = 1000$ mm,终点 $Z_f = 1250$ mm,长度 $L = 500$ mm,最大径向半径 $r_{\max} = 1$ mm。把体视显微镜和 CCD 照相机沿光轴方向缓慢移动,可以观察到在中空区域两端是贝塞尔光束,

中空区域的光轴上有一丝亮线,从亮线两端往中间光强由大逐渐变小。实验中对整个“中空区”范围的截面光强逐点观察,图 6(a)~(e)分别为是用体视显微镜和 CCD 照相机拍摄的光轴上不同位置 $z = 600, 800, 1000, 1200$ 和 1300 mm 位置的无衍射贝

塞尔光及局域空心光的截面光斑图。图 6(a)和(e)为局域空心部分之前和之后的无衍射贝塞尔光,图 6(b)和(d)为局域空心部分的开始阶段和结束阶段,图 6(c)为局域空心部分中央的光斑。对比图 3 和

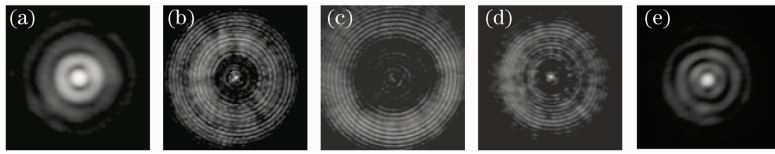


图 6 环形光束产生的局域空心光的实验图

Fig. 6 Experimental images of localized bottle beam pattern generated by using annular beam

实验得到的中空区域轴线上存在一丝亮线,是由环带边缘存在的衍射效应引起的,而理论模拟用的是几何光学,没有考虑光的衍射效应,所以模拟得到的中空光场是完全的暗区,中空区域轴线上不存在一丝亮线,如图 3 所示。很明显,衍射效应^[14]的存在会影响中空光质量,中空光束中心光强不全为零这一现象对光镊囚禁粒子是不利的,但只要中空光束中心光强较弱,能够与周围高强度激光形成一定的梯度力,仍可做光镊囚禁微粒。通过衍射理论可知,内环半径越小,环带越窄,衍射效应对中空光的影响越明显,反之,则影响较小。因此,增大内环半径和环带宽度可减小衍射效应的影响。要利用中空光束的光压“陷阱”捕获微粒需要中空尺寸小,从(5)式和(8)式可知,中空尺寸是可控的,要使中空尺寸变小,可通过增大锥透镜底角和减小环带宽度来实现,而减小环带宽度,又会增大衍射效应对中空光的影响。实验中,当环带宽度 $R_2 - R_1 = 0.5 \text{ mm}$ 时,仍然可以得到局域空心光束,其中空部分长度和最大径向半径都是 $R_2 - R_1 = 2 \text{ mm}$ 时的 $1/4$,即中空部分长度 $L = 125 \text{ mm}$,最大径向半径 $r_{\max} = 0.25 \text{ mm}$ 。同时,由于环带变窄引起的衍射效应对中空光的影响是:中空区域轴线上的亮线与 $R_2 - R_1 = 2 \text{ mm}$ 时比较,亮线中间部分的光强变大了。如果再用更大角度的锥透镜,比如取锥透镜底角 $\alpha = 30^\circ$,折射率 $n = 1.458$,则中空部分长度 $L = 2.1 \text{ mm}$,最大径向半径 $r_{\max} = 0.25 \text{ mm}$ 。

4 结 论

提出了一种产生局域空心光的新方法,即用平行光束通过菲林片产生的环形光束,入射锥透镜产生局域空心光。保持锥透镜参量不变,局域空心光的径向尺寸和轴向尺寸都与产生环形光束的菲林片吸光环带宽成正比。如果使用双环光束或多环光束

图 6 相同位置的光斑光强分布,可以看出,除了实验得到的中空区域轴线上存在亮线以外,理论模拟与实验结果基本吻合。实验证实,环形光束通过锥透镜能够产生局域空心光。

照射锥透镜,则可在激光传输方向上得到三个局域空心区域或更多局域空心区域。该方法结构简单,使用光学元件容易加工制造,具有重要的应用价值。

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 T. Freegrade, K. Dholakia. Cavity-enhanced optical bottle beam as a mechanical amplifier [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(1): 013413~013420
- 3 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. *Progr. in Phys.*, 2004, **24**(3): 336~380
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): 336~380
- 4 P. Rudy, R. Egnisman, A. Rahman *et al.*. An all optical dynamical dark trap for neutral atoms [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(2): 159~165
- 5 N. Friedman, L. Khaykovich, R. Ozeri *et al.*. Compression of cold atoms to very high densities in a rotating-beam blue-detuned optical trap [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(3): 031403~031406
- 6 D. Yelin, B. E. Bouma, G. J. Tearney. Generating an adjustable three-dimensional dark focus [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 661~663
- 7 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe *et al.*. Experiment study on bottle beam generated by interfering Bessel beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2899~2901
吴逢铁, 刘彬, 卢文和等. 贝塞尔光束相干产生局域空心光束的实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2899~2901
- 8 S. Chavez-Cerda, E. Tepichin, M. A. Meneses-Nava *et al.*. Experimental observation of interfering Bessel beams [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(13): 524~529
- 9 Wu Fengtie, Chen Yinbin, Guo Dongdong. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4943~4947
- 10 Wei Mingdar. Generation of bottle beam by focusing a super-Gaussian beam using a lens and an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 19~23
- 11 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥——透镜系统的光束传输与变换 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 12 Liu Bin, Wu Fengtie, Liu Lan. Influence of focal length of lens on sizes of bottle beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):

406~409

刘 彬, 吴逢铁, 刘 岚. 透镜焦距对局域空心光束尺寸的影响 [J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 406~409

- 13 B. P. S. Ahluwalia, W. C. Cheong, X. C. Yuan *et al.*. Design and fabrication of a double-axicon for generation of tailorable self-imaged three-dimensional intensity voids[J]. *Opt. Lett.*, 2006,

31(7): 987~989

- 14 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