

文章编号: 1000-5013(2008)02-0161-06

局域空心光束的描述

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: 分析几何光学理论、干涉理论和衍射理论对局域空心光束传输特性的描述. 对由轴棱锥-透镜系统产生的局域空心光束的描述进行对比分析, 并给出相关的实验. 几何光学属于近轴近似下的光学, 与实际情况有所差异. 干涉理论的分析方法比几何光学方法精确, 能够数值计算出聚焦透镜置于最大准直距离之外及在聚焦透镜焦平面以后的光束行为, 得到与几何光学分析所得出的, 当 $z_0 < f < z_{\max}$ 将产生中空光束的不同结论. 衍射理论分析法清晰展示局域空心光束及无衍射光束重建的特性.

关键词: 局域空心光束; 传输特性; 轴棱锥; 几何光学; 干涉理论; 衍射理论

中图分类号: O 436

文献标识码: A

局域空心光束(Bottle Beam)是在光束的传播方向上有着强度为零的区域, 且在此区域外三维空间都围绕着高强度的一种特殊空心光束^[1]. 由于它具有三维封闭的暗中空区域和极高的强度梯度, 因此可作为激光导管^[2]、光镊^[3]和光学扳手^[4-5]等的工具, 还可用于激光囚禁微观粒子和中性原子、分子^[6]等. 目前, 实验上已有多种方法可以产生局域空心光束. 为了实现一个可控制的, 具有较大体积的单束空心光束原子囚禁, Cacciapuoti 等^[7]采用几何法产生了纵横比可调的局域空心光束. Kulin 等^[8]也通过类似方法, 产生了一内径和轴向长度分别为 1.5 mm 和 150 mm, 具有拉长菱形暗中空区域的局域空心光束, 相应的暗中空区域体积为 80 mm³, 可以囚禁至少 10⁸ 个冷原子. Herman 等^[9]提出了一种利用球差透镜和投影透镜来产生并放大空心光束的新方法, 并进行了理论分析与研究. Vinas 等^[10]提出并在实验上研究了一种利用计算全息圆形波带片产生局域空心光束的新方法, 这种优化设计的全息波带片可用于产生一个暗斑尺寸更小的聚焦局域空心光束. 轴棱锥是产生旋转轴对称光束的简单光学元件, 它具有转换效率高、光损伤阈值大^[11-12]、可直接成腔^[13-14]等优点. 此外, 利用两个不同底角的轴棱锥产生的 Bessel 光束进行相干, 可直接产生具有 Talbot 效应的局域空心光束^[15]. 对轴棱锥的加工误差, 也有相关的研究^[16-17]. 本文讨论采用轴棱锥-透镜系统法产生的局域空心光束, 同时对其相关特性进行理论和实验的描述.

1 局域空心光束的形成理论

一束平行激光光束垂直入射到轴棱锥上产生无衍射光束, 其最大准直距离 $z_{\max} = a/(n-1)\varphi$. 其中, a 是入射到轴棱锥镜上的光束半径, n 是轴棱锥的折射率, φ 轴棱锥的底角. 在最大准直距离内插入一个合适的聚焦透镜, 透镜后就形成了完整局域空心光束, 如图 1 所示. 透镜位置为 $z = 0$, 透镜与轴棱锥顶点的距离为 z_0 , 在 $z = z_1$ 处形成了局域空心光束的暗中空区域的起点, 在 $z = z_2$ 处形成

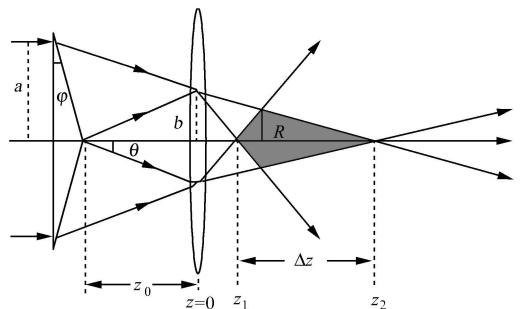


图 1 产生局域空心光束的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the generation of a bottle beam

收稿日期: 2007-11-06

作者简介: 吴逢铁(1958), 男, 教授, 博士, 主要从事激光光束的传输与变换、短脉冲激光技术与非线性光学研究.

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn.

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

了局域空心光束 的暗中空区域的末点,在焦平面上形成了直径为 $2R$ 的亮环.

2 几何光学理论对局域空心光束的描述

Wei 等^[18]以几何光学理论为基础,对轴棱锥产生的无衍射光束经正透镜聚焦后形成局域空心光束、中空光束(Hollow Beam)、圆柱形光束(Cylindrical Beam)的情况,进行了定性的理论分析和实验研究.图 2 是满足 $f < z_0 < z_{\max}$ 条件下产生局域空心光束的示意图.采用傍轴光线追踪的方法,可得出局域空心光束区域的起点和末点的位置 z_1 和 z_2 ,即

$$z_1 = \frac{a - (n - 1) \varphi_0}{\frac{a}{f} + (1 - \frac{z_0}{f})(n - 1) \varphi} = \frac{f - \frac{z_0 f}{z_{\max}}}{1 + \frac{f}{z_{\max}} - \frac{z_0}{z_{\max}}},$$
$$z_2 = \frac{z_0 f}{z_0 - f}.$$

$\Delta z = z_2 - z_1$ 为局域空心光束的长度,取不同的 z_0 获得不同的 Δz .在 $0 < z < z_1$ 和 $z > z_2$ 光束交叠区域形成了类似无衍射光束,这在透镜后的阴影区域就形成了完整的局域空心光束,在焦平面上的成像为直径 $2R$ 的亮环.其中, R 为局域空心光束的最大半径. R 可以根据图 1 并利用简单的几何关系求得,有

$$R = f \theta = f(n - 1) \varphi.$$

当满足条件 $z_0 < f < z_{\max}$ 时,将产生中空光束.由图 2 可知,若 $z_0 < f$, z_2 将成虚像,此时形成中空光束,且随着传输距离的增大,中空光束的区域也逐渐增大.其中, β 为中空光束在焦平面的发散角.根据光束 3 和 4 可以简单求得

$$\beta = \varphi(n - 1)(1 - \frac{z_0}{f}).$$

当 $z_0 = f$ 时, $\beta = 0$,此时形成在焦平面后的暗中空区域半径不变的圆柱形光束.

在研究光束传播的过程中,几何光学为最直接的方式.然而,几何光学属于近轴近似下的光学,由于是近似的结果,会与实际情况有所差异,而且几何理论只能做一些定性的分析,并不能对光强分布做精确的计算.

3 干涉理论对局域空心光束的描述

采用干涉理论,提出一种新的解析表达.这种解析表达适合于描述轴棱锥和聚焦透镜组成的光学系统所产生的局域空心光束光场分布及其演化过程.同时,指出了几何光学描述存在的局限性.

3.1 理论分析

设入射到轴棱锥光是高斯光束,其场分布为

$$E(\rho) = \exp(-\frac{\rho^2}{w_0^2}).$$

上式中, w_0 为高斯光束束腰, ρ 为场的径向距离.当入射光垂直照射到底角为 φ ,厚度为 d 的轴棱锥上,聚焦透镜后的光场被认为是两个半高斯光束的干涉叠加形成的,如图 3 所示.那么,透镜后光场中任意位置 (r, z) 的场分布,是由 E_1 和 E_2 干涉叠加形成的. E_1 和 E_2 的场分布分别为

$$E_1 = \exp[-(\frac{w_1}{w_0})^2],$$

$$E_2 = \exp[-(\frac{w_2}{w_0})^2].$$

上两式中, w_1 和 w_2 分别是光线 1 和光线 2 到光轴的距离, z 轴为光轴.两光束在位置 (r, z) 处的光程差

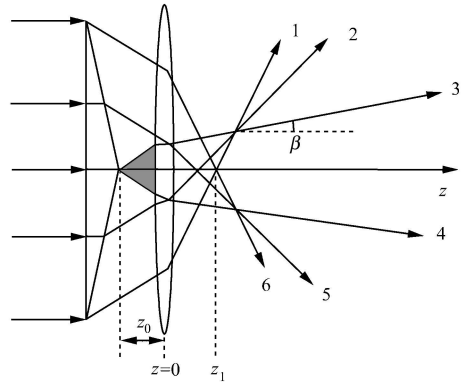


图 2 产生中空光束的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the generation of a hollow beam

可表达为

$$\Delta = n_1(d_1 - d_2) + (r_1 - r_2) + n_2(d_3 - d_4) + (r_1' - r_2').$$

上式中, n_1 和 n_2 分别是轴棱锥和聚焦透镜的介质折射率, $d_1, d_2, d_3, d_4, r_1, r_2, r_1', r_2'$ 所表示的距离如图 3 所示, 且这些参数的详细表达式见文[19]. 那么, 可得到在位置 (r, z) 处的光强分布为

$$I(r, z) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta).$$

在上式中, λ 为波长, r 为柱坐标系中径向距离, z 轴被定义为传播光轴, z 为向距离, 坐标原点取在透镜后表面与光轴相交处(图 3).

3.2 数值计算及分析

根据 (r, z) 处的光强分布式数值模拟了平行高斯光束, 经底角 $\varphi=1^\circ$ 、折射率 $n=1.516$ 的轴棱锥和焦距 $f=150\text{ mm}$ 、折射率 $n=1.516$ 的聚焦透镜所组成的光学系统沿激光束传播方向形成的局域空心光束. 其中, 轴棱锥顶点与透镜前表面间的距离为 $z_0=120\text{ mm}$, 满足 $z_0 < f < z_{\max}$ ($z_{\max} \approx 777\text{ mm}$) 条件. 数值模拟的局域空心光束沿光轴在 $z=110\sim 190\text{ mm}$ 距离内纵向三维光强分布图, 如图 4 所示. 从图 4 可以看到, 此时的光束轴棱锥和聚焦透镜所组成的光学系统所

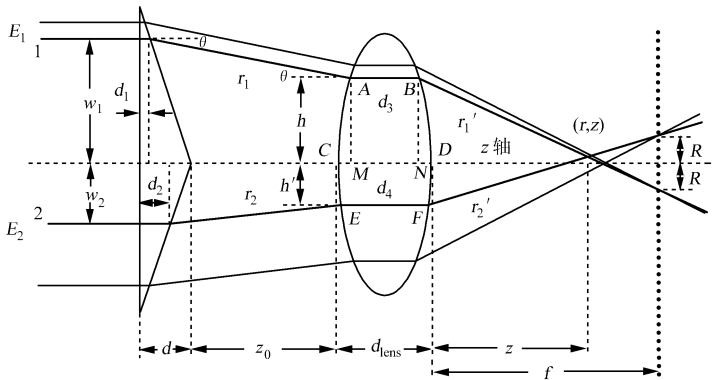


图 3 生成局域空心光束几何图

Fig. 3 Geometrical diagram of the generation of a bottle beam

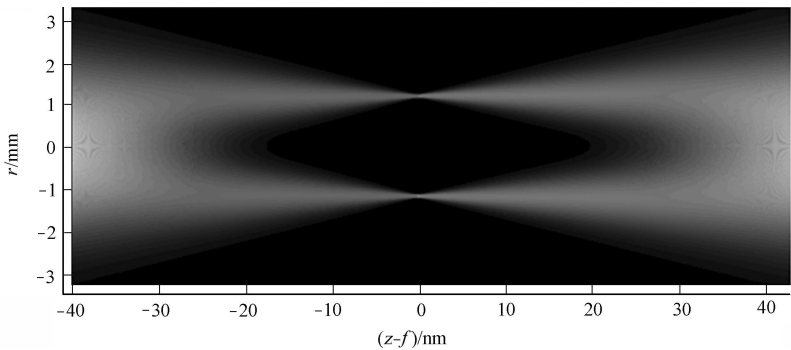


图 4 局域空心光束沿光轴的纵向三维光强分布

Fig. 4 3D intensity distribution of the bottle beam

产生的光束依然为局域空心光束. 这是属于 $z_0 < f < z_{\max}$ ($z_{\max} \approx 777\text{ mm}$) 的情况. 上述结论用几何光学是得不到的, 结果同几何光学所描述的, 在 $z_0 < f < z_{\max}$ 产生中空光束完全不同. 用几何光学所得出的结论存有偏差原因在于, 几何光学只适用于研究光的直线传播问题, 而不适用于研究光的波动特性(衍射、干涉等). 很显然, 光通过轴棱锥和聚焦透镜所组成的光学系统, 一定存在衍射和干涉, 用几何光学研究光通过轴棱锥和聚焦透镜所组成的光学系统后的光束行为, 存有偏差是在所难免的.

尽管干涉理论对局域空心光束的描述较为精确, 但是在实验中所拍摄的光斑并非完全与理论模拟一致. 根据上面的理论模拟看到, 局域空心光束的暗中空区域是“黑心”的, 而实验中发现, 暗中空区的中心位置仍然有一定的光存在.

4 衍射理论对局域空心光束的描述

利用衍射理论可以更精确描述完整的局域空心光束的光强分布, 展示了局域空心光束的精细完整结构. 利用衍射理论, 可以十分清晰地描述类似无衍射光束的重建现象, 这是干涉理论所做不到的.

4.1 理论分析

入射到透镜上的无衍射光束的光场及传输矩阵为

$$E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r r_1),$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z}{f} & z \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}.$$

利用柯林斯公式的推广,在柱坐标下的广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式可以得到经过聚焦透镜后的光场为

$$E(r,z) = \frac{-ik}{z} \cdot A_0 \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \cdot \int_0^b J_0(k_r r_1) J_0\left(\frac{k r_1 r}{z}\right) \cdot \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f} \cdot (r_1)^2\right] r_1 dr_1.$$

在上式中, A_0 是复振幅常数, k_r 是径向波矢分量, r_1 是径向坐标, J_0 是第一类零阶贝塞尔函数, f 是聚焦透镜的焦距. 由图 1 可以得出, $b = z_0(n-1) \cdot \beta$, z_0 是聚焦透镜到轴棱锥的距离. 依据上式可以得到聚焦后的光强分布为

$$I(r,z) = \left(\frac{kA_0}{z}\right)^2 \cdot \int \left| \int_0^b J_0(k_r r_1) \cdot J_0\left(\frac{k r_1 r}{z}\right) \cdot \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f} \cdot (r_1)^2\right] r_1 dr_1 \right|^2.$$

4.2 数值计算与分析

利用光强表达式对局域空心光束光强分布进行数值模拟,结果如图 5 所示. 图 5 是模拟随着 z 的

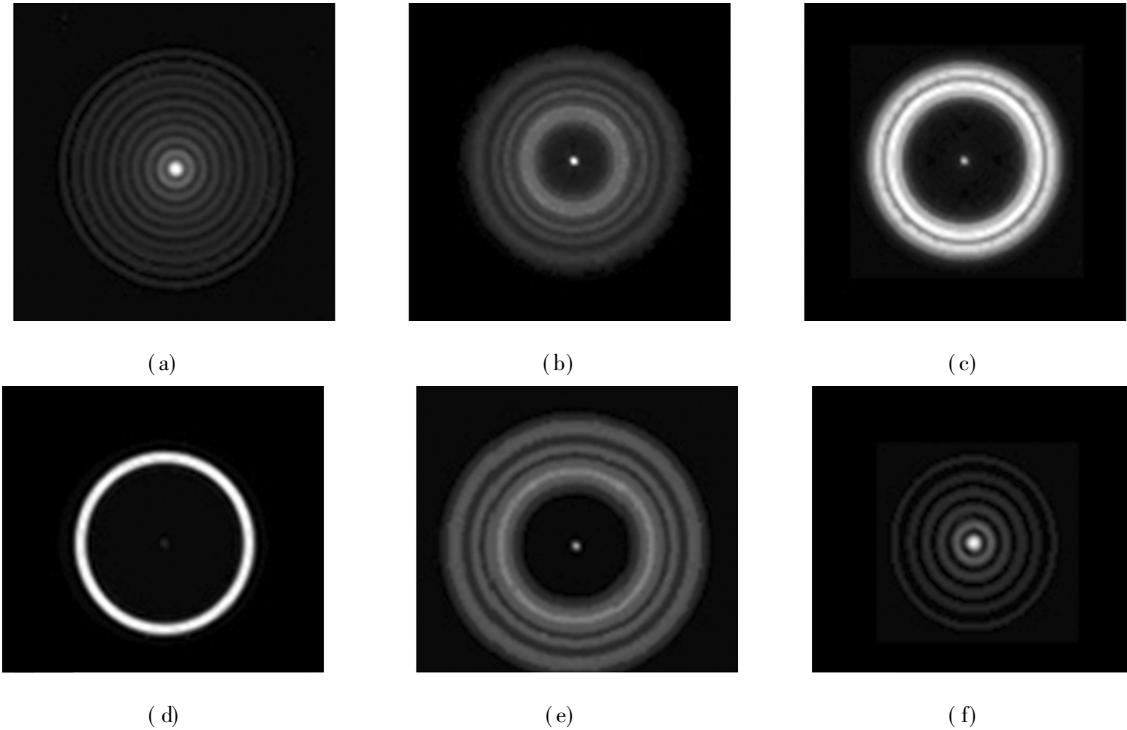


图 5 局域空心光束在不同位置的光束截面

Fig. 5 The profiles of the bottle beam in different positions

增大在不同横截面的局域空心光束的光强分布. 沿光轴随着 z 的逐渐增大, 类似无衍射光束逐渐演变成有着强度为零的暗中空区域. 当到达焦平面处, 形成一个亮度最大的亮环, 此时暗域半径达到最大. 随着 z 的增大, 暗域的半径逐渐变小, 接着暗域消失, 出现了类似无衍射光束的重建现象, 构成了完整的局域空心光束. 从图 5 中可以看到, 在暗中空区域中心有一个小小的亮点, 且越靠近焦平面处亮度越小. 在焦平面处几乎看不到此亮点, 但事实上它仍然存在, 在实验中也证实亮点的存在^[20]. 这一现象是聚焦透镜对有限光束的衍射作用所形成^[21], 用相干理论无法得到. 该亮点是局域空心光束在实际应用中的不利因素, 应设法消除.

5 聚焦透镜焦距对局域空心光束半径的影响

由于不同局域空心光束尺寸可以囚禁不同尺寸的微粒, 因此需要对影响局域空心光束半径相关参

量进行研究^[22]. 由几何理论得知, 局域空心光束半径为

$$R = f\theta = f(n-1)\varphi.$$

上式表示局域空心光束半径与聚焦透镜焦距成正比关系. 用测微尺对不同透镜焦距 f 产生不同局域空心光束半径 R 进行测量, 测微尺的最小刻度为 $20\text{ }\mu\text{m}\cdot^{-1}$. 空心光束的暗斑尺寸 (DSS) 的定义: 空心光束凹口内侧径向强度分布的半高宽度 (FWHM)^[23]. 利用此定义, 对实验拍摄的光斑图进行测量. 图 6

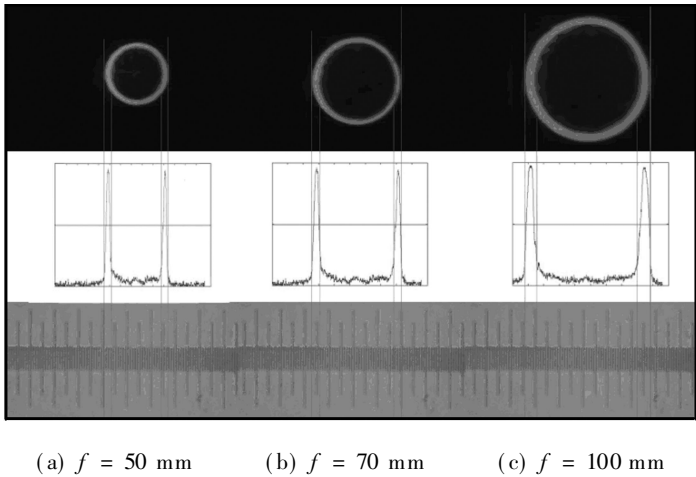


图 6 不同焦距焦平面下径向暗域半径的测量

Fig. 6 The measurement of bottle radius in different focal plane

为焦平面处的最大径向半径的测量, R 的实验值 (R_{exp}) 与理论值 (R_{th}), 如表 1 所示. 从实验分析可以看出, 局域空心光束半径的大小几乎与聚焦透镜的焦距成正比增大, 实验数据因光路误差和测量误差与理论稍有不同, 但在误差范围内, 实验结果与理论值是相符的.

表 1 R 的实验值与理论值

Tab. 1 The experimental and theoretical values of R

| f/mm | 50 | 70 | 100 |
|------------------------------|-----|-----|-----|
| $R_{\text{th}}/\mu\text{m}$ | 200 | 280 | 410 |
| $R_{\text{exp}}/\mu\text{m}$ | 200 | 300 | 430 |

6 结束语

局域空心光束在微观粒子 (如微米粒子、纳米粒子、自由电子、生物细胞、分子等) 的精确、非接触操纵和控制中有着广泛的应用, 局域空心光束的研究已经成为一个很重要的课题. 本文对由轴棱锥透镜系统产生的局域空心光束的描述进行了综述, 基于几何光学理论、干涉理论和衍射理论, 分别对局域空心光束传输特性进行详细的探讨, 给出了相关的实验, 并且对这几种理论描述进行了对比分析. 数值模拟了完整的局域空心光束光强分布, 给出了局域空心光束的精细结构. 从其结构图中发现此类局域空心光束的暗域中心光强并不为零, 这也是它在应用中的不利因素, 在实际应用中要设法消除暗域中心的亮点. 研究所得到的结论, 将对局域空心光束在实际应用方面提供有益的帮助和理论指导.

参考文献:

[1] ARLT J, PADGETT M J. 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] TATARKOVA S A, SIBBETT W, DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(038101): 1-4.

[3] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. Nature, 2002, 419: 145-147.

[4] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle [J]. Science, 2001, 292: 912-914.

[5] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. Science, 2002, 296: 1101-1103.

[6] GRIER D G. A revolution in optical manipulation [J]. Nature, 2003, 424: 810-816.

- [7] CACCIAPUOTI L, ANGELIS D, MPIERATTINI G, et al. Single beam optical bottle for cold atoms using a conical lens[J]. Eur Phys J, 2001, D14(3): 373-376.
- [8] KULIN S, AUBIN S, CHRISTE S, et al. A single hollow-beam optical trap for cold atoms [J]. J Opt (B): Quantum Semiclass Opt, 2001, 3(1): 353-357.
- [9] HERMAN R M, WIGGINS T A . Hollow beams of simple polarization and storing atoms[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(1): 116-121.
- [10] VINAS S B, JAROSZEWICZ Z, KOŁODZIEJCZYK A, et al. Zone plates with black focal spots[J]. Appl Opt, 1992, 31(2): 192-198.
- [11] 吴逢铁, 陈云彬, 郭东栋, 等. 纳秒无衍射 Bessel 光脉冲参量的分析与测定[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1073-1076.
- [12] 吴逢铁, 郭东栋, 陈云彬, 等. 基于轴棱锥的主被动方式产生短脉冲高功率近似无衍射光[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1692-1697.
- [13] WU Feng-tie, CHEN Yir-bin, GUO Dong-dong. Nanosecond pulsed Bessel Gauss beam generated directly from a Nd: YAG axicon-based resonator[J]. Appl Opt, 2007, 46(22): 4943-4947.
- [14] 郭东栋, 吴逢铁, 陈云彬, 等. 贝塞尔-高斯谐振腔的设计、模拟和实验[J]. 强激光与粒子束, 2008, (1): 26-30.
- [15] 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.
- [16] 江新光, 吴逢铁, 刘 彬. 轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光的修正[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1538-1542
- [17] 曾夏辉, 吴逢铁, 邢笑雪, 等. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 809-813.
- [18] WEI Ming-dar, SHIAO Wen-long, LIN Yi-tse. Adjustable generation of bottle beam and hollow beams using an axicon[J]. Optics Commun, 2005, 248: 7-14.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 362-368.
- [22] 刘 彬, 吴逢铁, 刘 岚, 等. 透镜焦距对 bottle beam 尺寸的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 406-409.
- [23] 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.

The Descriptions of the Bottle Beam

WU Feng-tie, LIU Lan

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

Abstract: The propagation properties of the bottle beam were described based on geometrical optical theory, interferential theory and diffraction theory. The description methods of the bottle beam generated from axicon lens system were compared and analyzed, and the relative experimental results were given. Geometrical optics is the near axis approximation optics and exist the errors. Interferential theory describes the bottle beam more rigorous from other aspect. The beam propagation behavior behind the focal plane of the focal lens can be numerical simulated, and the different conclusion to geometrical optics was obtained which showed that the bottle beam existence when condition $z_0 < f < z_{\max}$ was satisfied. Diffraction theory clearly reveals the properties of the bottle beam and the reconstruction of non-diffraction beam.

Keywords: bottle beam; propagation property; axicon; geometrical optical theory; interferential theory; diffraction theory

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)