

局域空心光束尺寸变换的模拟及实验

张前安 吴逢铁 郑维涛 马亮

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 不同尺寸的局域空心光束可囚禁不同尺度的微粒, 在生命科学和纳米科技中具有重要的意义。提出了一种利用普通球面透镜望远系统来变换局域空心光束尺寸的新方法。利用几何光学方法进行了分析, 采用 ZEMAX 光学设计软件实现光线追迹进行模拟。实验中拍摄并测量了经望远系统变换前后的局域空心光束的尺寸。结果表明, 局域空心光束尺寸的变换比等于两个透镜的焦距比(望远系统的放大倍率), 理论分析和数值模拟与实验结果吻合。

关键词 几何光学; 局域空心光束; 透镜变换; 光线追迹

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402008

Simulated and Experimental Studies on Changing the Size of Bottle Beam

Zhang Qian'an Wu Fengtie Zheng Weitao Ma Liang

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

Abstract Bottle beams with different sizes can be used to trap particles at different scales. A new method of changing the size of bottle beam using a popular sphere lens telescope system is proposed. The analysis is based on the geometrical optics, and simulated by ray tracing with optical design software ZEMAX. The bottle beams were captured and measured before and after the telescope system. It is shown that the size conversion ratio of bottle beam corresponds to the ratio of focal length of the two lens (magnification of the telescope). The theoretic analysis and numerical stimulation agree well with the experimental results.

Key words geometric optics; bottle beam; lens transformation; ray tracing

OCIS codes 080.2740; 140.3300; 140.7010; 140.3295

1 引言

局域空心光束(Bottle beam)^[1,2]为一束沿光传输方向上有着局部三维封闭暗中空区域的光束。暗中空区域周围被光束包围,有着极高的强度梯度,可以实现对粒子的三维操控。近年来,局域空心光束在微粒诱捕和颗粒物光学操控等领域获得了广泛的应用,因此,一直是研究的热点^[3~6]。目前,产生局域空心光束的方法有多种。例如光学全息法^[7]、高斯光束和拉盖尔-高斯光束干涉法^[1,6],贝塞尔(Bessel)光相干涉法^[8,9]、新型锥透镜法^[4,10,11]、Bessel光聚焦法^[12,13]等。这些方法的不足之处是元件被

制造出来,所形成的局域空心光束尺寸就被确定而很难改变。若要得到另一尺寸的局域空心光束,需再做新的光学元件,这将是费时且代价昂贵的。另外,不同微粒的尺寸一般不同:例如原核细胞的直径平均 $1\sim 10\ \mu\text{m}$,真核细胞直径平均 $10\sim 100\ \mu\text{m}$,人卵细胞直径约 $0.2\ \text{mm}$ 。所以操控不同的微粒或者将微粒局限在不同大小的区域通常需要不同尺寸的局域空心光束。为解决此问题,本文提出了一种利用球面透镜构成的望远镜系统来改变局域空心光束尺寸的方法,只要改变望远镜系统的放大倍率,就可以方便地获得不同尺寸的局域空心光束。

收稿日期: 2010-11-25; **收到修改稿日期**: 2010-12-28

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: 张前安(1983—),男,硕士研究生,主要从事光束的传输与变换等方面的研究。E-mail: zhangqa@hqu.edu.cn

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

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(通信联系人)

2 理论分析及模拟

文献[12]以几何光学理论为基础,对由轴棱锥产生的 Bessel 光经正透镜聚焦后形成局域空心光束的情况进行了定性的理论和实验研究。如图 1 所

示,光束半径为 a 的平面波正入射到底角为 γ 的轴棱锥上,轴棱锥后形成近似无衍射 Bessel 光,设最大无衍射距离为 Z_{\max} 。焦距为 f_1 的透镜 L1 放置在距轴棱锥顶点 Z_0 处。

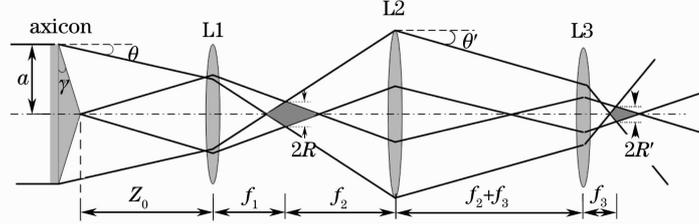


图 1 轴棱锥-透镜系统产生局域空心光束示意图

Fig. 1 Scheme of bottle beam generated by axicon-lens system

当 $f_1 < Z_0 < Z_{\max}$ 时, Bessel 光经透镜 L1 聚焦后形成局域空心光束,如图 1 中 L1 后面阴影区所示,且在 L1 后焦面上形成聚焦光环,光环尺寸决定了局域空心光束的最大暗域半径 R ,利用图 1 中几何关系求得

$$R = f_1 \tan \theta = f_1 \tan[\arcsin(n \sin \gamma) - \gamma], \quad (1)$$

式中 θ 为平行光经过轴棱锥后的会聚角, n 为轴棱锥的折射率。

若在轴棱锥-透镜系统形成的局域空心光束后适当距离处放置 L2 与 L3 组成的望远镜系统,使 L1 和 L2 焦点重合,如图 1 所示,则聚焦光环相当于一环形光源,刚好位于透镜 L2 的前焦面上,照射 L2 后形成一束新的 Bessel 光,新的 Bessel 光会聚角由图中几何关系求得 $\theta' = \arctan[(f_1/f_2) \tan \theta]$ ^[14]。Bessel 光经透镜 L3 聚焦后形成一个新的局域空心光束,如图 1 中 L3 后面阴影区所示。新局域空心光束的最大暗域半径为

$$R' = f_3 \tan \theta' = \frac{f_1 f_3 \tan[\arcsin(n \sin \gamma) - \gamma]}{f_2} = R |\beta|, \quad (2)$$

式中 $\beta = -f_3/f_2$ 为 L2 与 L3 组成的望远镜系统垂轴放大率。由(2)式可知,在产生局域空心光束的轴棱锥-透镜系统固定不变的情况下,只要换上不同放大倍率的望远镜系统,就可以对局域空心光束尺寸进行相应倍率的变换。当然也可以通过改变系统前端透镜 L1 的焦距来改变局域空心光束的尺寸。若 L2 和 L3 组成的望远镜系统发生一个小的离焦量,由图 1 可以看出, θ' 不会受到离焦的影响,所以(2)式仍然成立,即望远镜系统的离焦不会对局域空心光束的尺寸变换产生影响。例如, $\gamma = 0.5^\circ$, $n = 1.516$, $f_1 = 100$ mm, $f_2 = 150$ mm, $f_3 = 50$ mm, 则望远镜系统的垂轴放大率 $\beta = -1/3$ 。由(1)式和

(2)式可分别计算得经望远镜系统变换前后的局域空心光束的最大暗域尺寸分别为 $R = 450 \mu\text{m}$ 和 $R' = 150 \mu\text{m}$ 。

利用光学设计软件 ZEMAX 可以对该过程进行模拟,采用序列模式对轴棱锥建模,锥面采用标准表面面型,设置入射光束半径 $a = 10$ mm,锥面的曲率半径为 -0.05 ,选择 BK7 玻璃材料,轴棱锥厚度为 2 mm,二次曲率常数 $C = -1.313 \times 10^4$,如图 2 所示。图 2(a)为系统光路图,虚线框内分别为图 2(a)中(I)处和(II)处局部放大图。由局部放大图可以看出,轴棱锥-透镜系统形成的局域空心光束经望远镜系统变换后仍为局域空心光束。由图 2(b)和(c)可以看出,变换前局域空心光束的最大暗域半径约为 $450 \mu\text{m}$,经垂轴放大率 $\beta = -1/3$ 的望远镜系统变换后约为 $150 \mu\text{m}$,与(2)式计算结果吻合。若换上垂轴放大率 $\beta' = -1/10$ 的望远镜系统,变换后局域空心光束的最大暗域半径可达 $45 \mu\text{m}$ 。应指出的是,以上计算及模拟的望远镜系统都是开普勒型的(即两个正透镜构成),实际上也可以是伽利略型的(即一正一负透镜构成),且各参数之间的关系不变。

3 实 验

根据上面 ZEMAX 光线追迹的模拟参数进行实验。经准直扩束后的波长 $\lambda = 632.8$ nm 的 He-Ne 光束,正入射轴棱锥-透镜系统产生局域空心光束,形成的局域空心光束经过一球面透镜组成的望远镜系统变换。实验中元件的参数与模拟参数一致。局域空心光束的环形聚焦光斑投射到旋转屏上,用体视显微镜(可持续放大,最大放大倍数 $50\times$)和 CCD 照相机(可持续放大 $5\times$, $2560 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$)组成的系统拍摄其截面光强分布

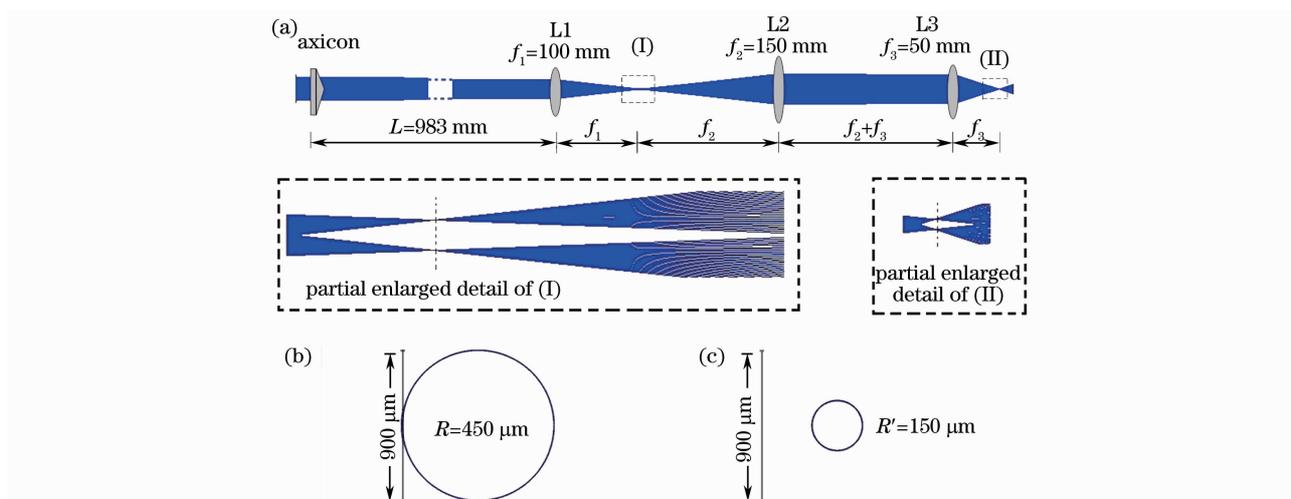


图 2 ZEMAX 模拟局域空心光束望远镜系统的变换。(a)系统光路图,(b)对应(I)图虚线处截面光强分布图, (c)对应(II)图虚线处截面光强分布图

Fig. 2 ZEMAX simulations of bottle beam transformed by a telescope system. (a) system layout, (b) cross sections intensity distribution of (I), (c) cross sections intensity distribution of (II)

图,实验光路如图 3 所示。

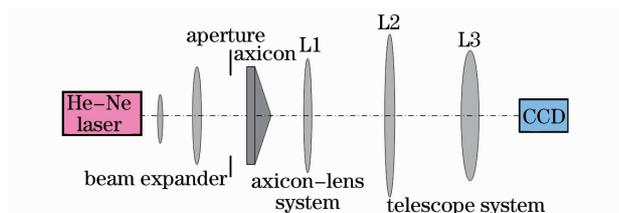


图 3 实验装置图

Fig. 3 Figure of experimental device

图 4 为望远镜系统变换前和变换后的局域空心光束的环形聚焦光斑拍摄图。用测微尺精确测量了望远镜系统变换前和变换后的局域空心光束的最大暗域半径 R 。测微尺的最小刻度为每格 $20 \mu\text{m}$ 。

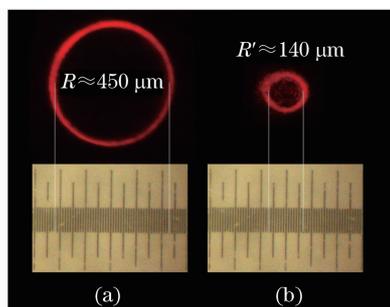


图 4 实验中拍摄的局域空心光束环形聚焦光斑图

(a)经望远镜系统变换前,(b)经望远镜系统变换后

Fig. 4 Ring-shaped focus spot of the bottle beams captured in experiment. (a) before transformed by the telescope system, (b) after transformed by the telescope system

测量结果显示,最大暗域半径 $R \approx 450 \mu\text{m}$ 的局域空心光束经垂轴放大倍率 $\beta = -1/3$ 的望远镜系统变换后,最大暗域半径变为 $R' \approx 140 \mu\text{m}$ 。局域空心光束最大暗域尺寸的变换比与望远镜系统放大倍率基本一致,与图 2 中光线追迹法模拟结果基本吻合。误差主要来自于望远镜系统的调节和测量误差。

4 结 论

提出了一种变换局域空心光束尺寸的新方法,利用望远镜系统的物像变换特性,只要换上不同倍率的望远镜系统,就可以方便地变换局域空心光束的尺寸。通过几何光线追迹法进行的模拟可以看到望远镜系统变换前、后的局域空心光束的尺寸与望远镜系统的放大倍率一致。实验中拍摄了经垂轴放大倍率 $\beta = -1/3$ 的望远镜系统变换前、后的局域空心光束的环形聚焦光斑,测量了最大暗域半径。实验结果与理论模拟基本吻合,证实了通过望远镜系统可以实现对局域空心光束尺寸的变换。研究结果对于利用局域空心光束操控不同尺度的微粒,在生命科学和纳米科技中的应用具有重要的意义。

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 J. H. Lin, M. D. Wei, H. H. Liang *et al.*. Generation of supercontinuum bottle beam using an axicon[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2940~2946

- 3 D. G. Grier. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810~816
- 4 B. P. S. Ahluwalia, X. C. Yuan, S. H. Tao *et al.*. Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(11): 113104
- 5 B. Shao, S. C. Esener, J. M. Nascimento *et al.*. Size tunable three-dimensional annular laser trap based on axicons[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3375~3377
- 6 L. Isenhower, W. Williams, A. Dally *et al.*. Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1159~1161
- 7 D. McGloin, G. Spalding, H. Melville *et al.*. Applications of spatial light modulators in atom optics[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2): 158~166
- 8 S. Chávez-Cerda, M. A. Meneses-Nava, J. M. Hickmann. Interference of traveling nondiffracting beams[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1871~1873
- 9 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
- 10 Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin *et al.*. Single bottle beam generated by a gradient axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2410~2414
吴逢铁, 江新光, 刘 彬 等. 梯度轴棱锥产生单个 bottle beam [J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2410~2414
- 11 Ma Liang, Wu Fengtie. A bottle beam generated by a step refractive index axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(9): 6069~6100
马 亮, 吴逢铁. 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束[J]. *物理学报*, 2010, **59**(9): 6096~6100
- 12 M. D. Wei, W. L. Shiao, Y. T. Lin. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3): 7~14
- 13 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
- 14 Zhao Bin, Li Zhu, Huang Dexiu. Transformation of non-diffracting beams by a telescope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 707~711
赵 斌, 李 柱, 黄德修. 无衍射光经望远镜系统的变换[J]. *光学学报*, 1998, **18**(6): 707~711