

产生多个高光强梯度局域空心光束的理论实验

程治明 吴逢铁 方 翔 范丹丹

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 在实验中用贝塞尔光束与球面波叠加得到多个具有高强度梯度的局域空心光束(BB)。用衍射理论分析了贝塞尔光束与球面波叠加的光场,借助软件对两光场相干叠加的光强分布进行了模拟,结果表明在球面波的焦点附近能够形成多个高强度梯度的 BB。实验中贝塞尔光束和球面波分别用轴棱锥和透镜对平行光聚焦获得,使两光场在同一传播轴上相干叠加,在球面波焦点附近观察到多个 BB。通过对比可知,贝塞尔光束与球面波叠加所得 BB 比用两束贝塞尔光束干涉产生的 BB 在暗域处具有更大的光强梯度,更有利于稳定的粒子囚禁。

关键词 局域空心光束;贝塞尔光束;球面波;相干

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1114001

Theory and Experiment of Generating Multi-Bottle Beam with Higher Light-Intensity Gradient

Cheng Zhiming Wu Fengtie Fang Xiang Fan Dandan

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

Abstract Multi-bottle beam with higher light intensity gradient is generated by superposition of Bessel beam and spherical wave in experiment. The field is analyzed with diffraction theory, and according to the result of simulation by software, multi-bottle beam nearby the focus of spherical wave is obtained. In experiment, Bessel beam and spherical wave are generated by axicon and convex lens, respectively, multi-bottle beam is obtained nearby focus as two light waves superposed on the same axis. Comparison of the intensity distribution of bottle beam (BB) generated by the two methods shows that BB generated by interference of Bessel beam and spherical wave has higher intensity gradient in the dark area, which is superior in particles imprisonment.

Key words bottle beam; Bessel beam; spherical wave; coherence

OCIS codes 260.1960; 140.3460; 290.5825; 290.5850

1 引 言

局域空心光束(BB)由于其传播方向上存在局部暗域,故而这种特殊的光束在许多领域具有潜在的应用价值^[1~3]。早在 2000 年 Arlt 等^[4]就用全息法得到 BB,至今对于 BB 的研究仍然非常活跃^[4,5],Xu 等^[6]用失谐的蓝光 BB 囚禁了单个铷原子;Shvedov 等^[7]成功采用 BB 囚禁并操控空气中的微粒;Zhang 等^[8]用 BB 对俘获了纳米量级的 C₆₀ 微

粒;Li 等^[9]用波长为 532 nm 的绿光产生的 BB 实现了对铯原子的囚禁及量子态控制。可见 BB 在粒子操作和微纳米技术方面有极高的应用价值,故而一直是研究的热点。

BB 的暗域光强几乎为零,周围环绕着高强度的光,形成一个封闭的三维暗域空间,当粒子处于该空间时将被囚禁,受周围光的散射力的作用不能逃出暗域。到目前为止已经研究出多种产生 BB 的方

收稿日期: 2012-04-25; **收到修改稿日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(60977068, 61178015)、福建省自然科学基金(2012J01278)和泉州市科技重点项目(2011G9)资助课题。

作者简介: 程治明(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光传输与光束变化的理论和技术等方面的研究。

E-mail: tkgg_8795@sina.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: fengtie@hqu.edu.cn(通信联系人)

法,如 Ahluwalia 等^[10]提出用双轴棱锥产生自成像的 BB, Wei 等^[11]用轴棱锥透镜系统得到了单个 BB,而后该方法得到进一步发展^[12,13]。单个 BB 中只存在一个这样的暗域,而自成像 BB 中存在多个,可进行多层面的粒子进行囚禁,极具应用前景。然而由于实验有时并不能够得到理想的 BB,而是在其暗域处的光强可能不为零,此时处于暗域中的粒子除受暗域处轴外光散射力外还会受到暗域中的光对它的散射力,因此暗域处轴上光强与暗域周围光强梯度的大小对粒子囚禁的效率影响甚大。本文采用贝塞尔光束与球面波相干叠加,先从理论上进行分析和模拟,模拟结果显示在球面波焦点附近得到了多个 BB。然后设计实验,分别用平行光入射轴棱锥和凸透镜得到贝塞尔光束和球面波,在叠加区域观察到 BB。把实验中得到的 BB 与 Wu 等^[14]用两贝

塞尔光束干涉得到的 BB 进行比较,发现贝塞尔光束与球面波叠加产生的 BB 暗域附近光强梯度更大,在粒子囚禁及操控方面更具优势。

2 理论分析

平行光垂直入射轴棱锥即可在一段距离内得到贝塞尔光束,如图 1(a)所示,波长为 λ 的平行光入射底角为 γ 的轴棱锥,在轴棱锥后一段距离 z_{\max} 内形成贝塞尔光束,由几何关系可知

$$z_{\max} = \frac{R}{(n-1)\gamma}, \quad (1)$$

式中 R 为平行光入射轴棱锥的光束半径, n 为轴棱锥材料的折射率。平行光入射聚焦透镜将被汇聚到焦点处,此时可把汇聚的光场近似等效于球面波,焦点即为场源,如图 1(b)所示。

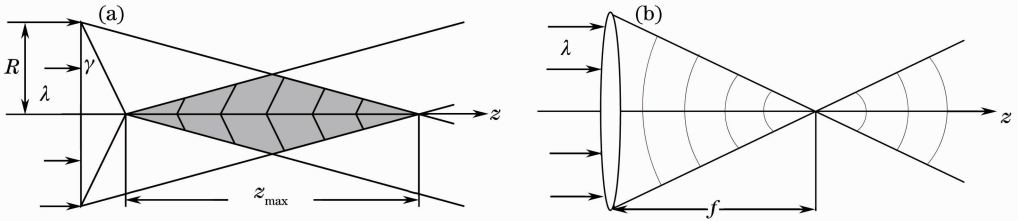


图 1 (a) 轴棱锥得到贝塞尔光束; (b) 透镜得到球面波

Fig. 1 (a) Bessel beam generated by axicon; (b) spherical wave generated by lens

轴棱锥的透过率函数为

$$t(r) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\gamma r] & 0 < r < R \\ 1 & r > R \end{cases}. \quad (2)$$

结合 Collins 公式可得轴棱锥后的光场分布^[15]

$$E_1(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp\left[ik\left(z + \frac{r_2^2}{2z}\right)\right] \int_0^R E_0 J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (3)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数; r_1, r_2 分别为圆顶轴棱锥入射面和光场接收面的径向坐标; E_0 为入射光场, 可视为常量 1。

光束通过透镜再在自由空间中传播一段距离 z 后的 ABCD 变换矩阵 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 f 为透镜焦距, 将(4)式代入 Collins 公式可得透镜后的光场分布

$$E_2(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp\left[ik\left(z + \frac{r_2^2}{2z}\right)\right] \int_0^R E_0 J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z} - \frac{ikr_1^2}{2f}\right) r_1 dr_1, \quad (5)$$

取轴棱锥和凸透镜处在轴上的同一位置并且光的传播方向一致, 为使贝塞尔光束能与球面波叠加, 要求

$$f < z_{\max}, \quad (6)$$

叠加区域的光场为贝塞尔光束和球面波的相干叠加, 对应的光强为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (7)$$

对贝塞尔光束和球面波干涉的光强分布进行模拟, 光源采用 He-Ne 激光器 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 轴棱锥材料采用石英玻璃 $n = 1.458$, 底角 $\gamma = 1^\circ$, 入射轴棱锥光束半径 $R = 5 \text{ mm}$ 。按(1)式计算可得贝塞尔光束最大无衍射距离 $z_{\max} = 625.5 \text{ mm}$, 按(6)式要求

可取焦距 $f=300$ mm。设轴棱锥和透镜在轴上的同一距离, 并取该处为零点, 根据(3)、(5)和(7)式进行模拟可得光强的轴向分布如图 2 所示, 可以看出在焦点 $z=300$ mm 附近形成了 BB, 能量也集中在该区域。图 3 为光束的截面光强分布图, 在暗域处 [如图 3(b)、(d) 示] 轴外第一个亮环远比其他亮环光强大, 可见 BB 在暗域周围的光强主要分布在第一个亮环。

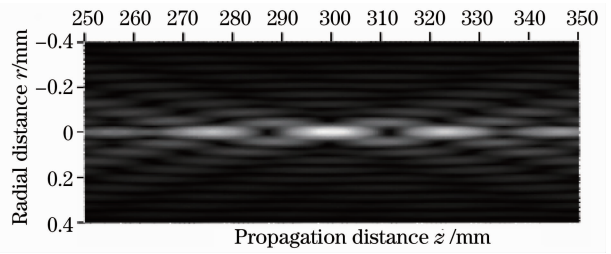


图 2 光强轴向分布图

Fig. 2 Intensity distribution along propagation distance

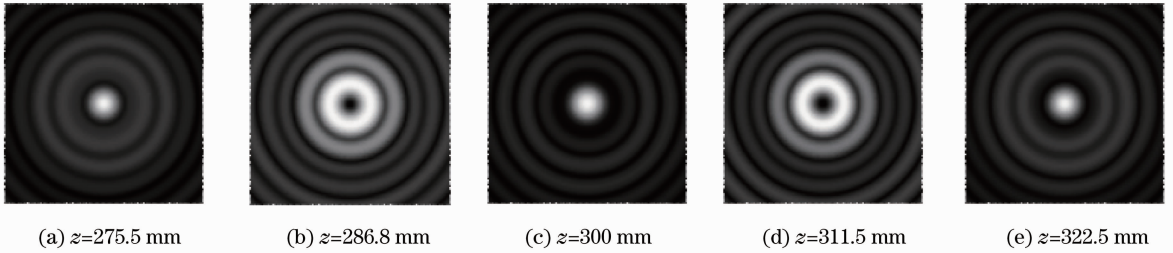


图 3 截面光强分布图

Fig. 3 Intensity distribution of cross section

在满足(6)式的条件下取不同的焦距进行模拟, 图 4 为平面波经透镜聚焦的轴上光强分布图, 从图中可以看出当焦距增大时, 轴上光强分布的半峰全宽也随之增加, 从而与贝塞尔光束叠加的区域也随之增大, 因此得到的 BB 暗域数量可能会增加。分别取透镜焦距 $f=250$ 、 300 和 350 mm 对 BB 的轴向光强进行模拟, 如图 5 所示, 可见随着焦距的增大 BB 暗域数量依次增加, 与从图 4 中分析得到的结论相吻合。

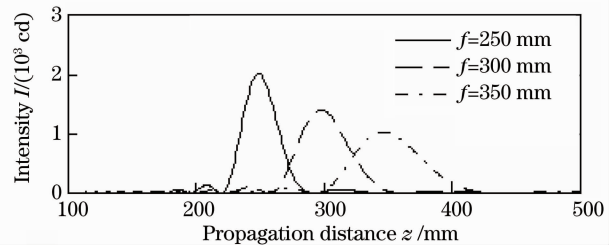


图 4 不同焦距的聚焦后的轴上光强分布

Fig. 4 Intensity distribution of the focused beam with different focal length on axis

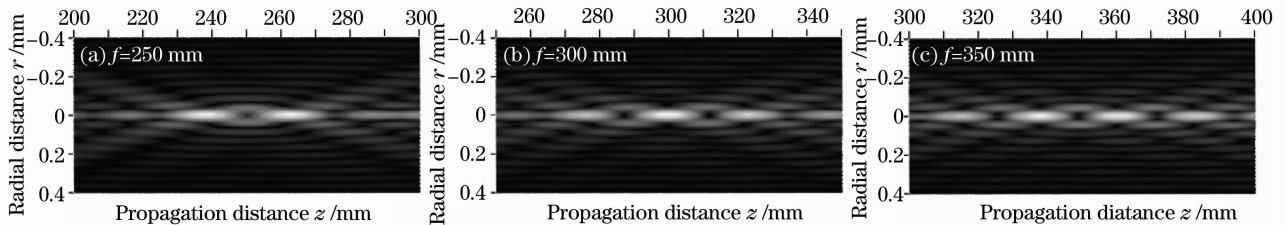


图 5 光强轴向分布图

Fig. 5 Intensity distribution along propagation distance

3 实验验证

实验装置如图 6 所示, 其中由焦距为 $f_1=15$ mm、 $f_2=190$ mm 的两凸透镜构成望远镜系统, 对光束进行准直扩束, P 为孔径光阑, 平行光经分束器 BS_1 后分成两束光分别向不同的方向传播: 第一束光由反射镜 M_1 反射后透过轴棱锥, 再由分束器 BS_2 反射; 第二束光经反射镜 M_2 反射后通过凸透

镜聚焦再透过分束器 BS_2 。第一束光经轴棱锥后形成贝塞尔光束, 第二束光被凸透镜聚焦形成近似的球面波, 两光场在交叠区域相干叠加。用与电脑连接的 CCD 对光束进行观察和记录。

激光器为 He-Ne 激光器, 波长 $\lambda=632.8$ nm, 光阑 P 的半径 $R=5$ mm, 凸透镜焦距 $f=300$ mm, 轴棱锥材料采用石英玻璃 $n=1.458$, 底角 $\gamma=1^\circ$ 。

调整凸透镜和轴棱锥的位置,使两者与分束器 BS_2 的距离相等,取透镜的位置为光的传播轴的上零点,则轴棱锥可等效于在零点处。取与图 3 中理论模拟

相同的位置,用 CCD 拍得光强的截面分布图如图 7 所示。

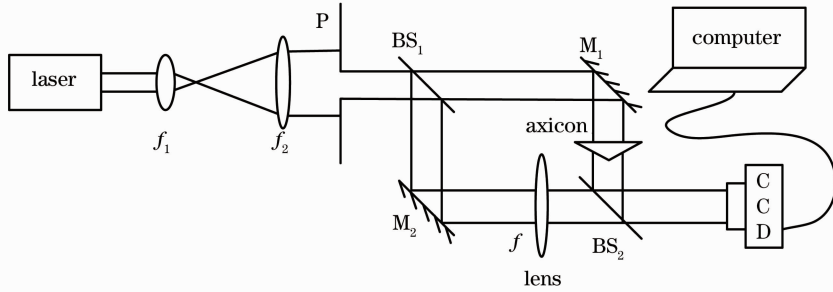


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

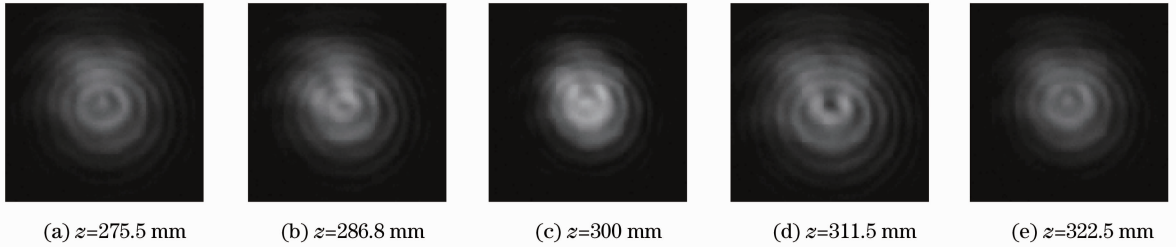


图 7 实验拍得截面光强分布图

Fig. 7 Intensity distribution at cross section in experiment

与图 3 用理论模拟得到的截面光强分布图基本吻合,表明用贝塞尔光束与球面波叠加能够形成多个 BB。

4 光强梯度的比较

吴逢铁等分别用底角为 1° 和 0.5° 的轴棱锥产生贝塞尔光束,再用两束贝塞尔光叠加得到自成像 BB,在 BB 的研究方面具有积极的影响。为了与吴等实验所得 BB 具有可比性,实验中采用的轴棱锥底角为 1° 。图 8(a) 为吴等用两束贝塞尔光束干涉得到的 BB 光强梯度最大处的截面光强图以及与之对应的径向光强分布曲线图,该曲线图是通过计算机软件分析所得:在图 8(a) 的截面光强图中取过中心点的一条直线,将线上各点亮度值转化为一组矩阵元,以矩阵元素的亮度值作为纵坐标,线上各点位置为横坐标绘出曲线图。图 8(b) 为贝塞尔光束与球面波叠加所得 BB 暗域位置的截面光强分布和对应的径向光强分布曲线图。

从图 8 中可以看出用两束贝塞尔光束干涉产生的 BB 暗域处的相对光强值约为 123,轴外第一个亮环的相对光强值约为 182,相差 59;而用贝塞尔光束

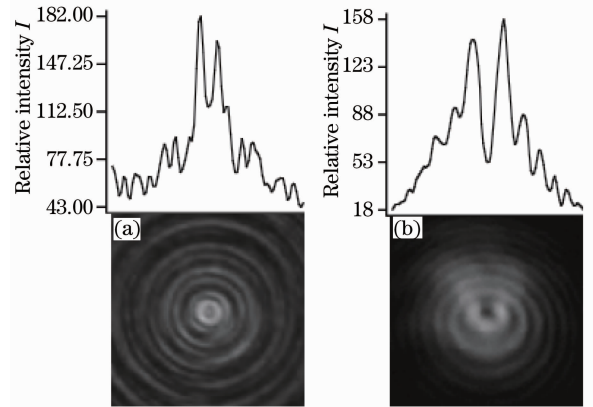


图 8 截面光强图及曲线图。(a) 两束贝塞尔光干涉所得; (b) 贝塞尔光束和球面波干涉所得

Fig. 8 Intensity distribution at cross section and curve. (a) Generated by interference of two Bessel beams; (b) generated by interference of Bessel beam and spherical wave

与球面波干涉得到的 BB 暗域处及轴外第一个亮环的相对光强值分别约为 53 和 158,相差 105,梯度比前者提高近一倍。可见用贝塞尔光束与球面波干涉得到的 BB 在暗域处的光强梯度更大,提高了粒子囚禁的效率。

5 结 论

在实验中用贝塞尔光束与球面波叠加得到多个 BB。分别用轴棱锥和凸透镜产生贝塞尔光束和球面波,再将两光场叠加。用衍射理论分析并借助软件模拟了叠加后的光强分布,结果表明两光场叠加可产生多个 BB,实验所得与理论吻合。将所得 BB 与两贝塞尔光束相干所得 BB 对比表明贝塞尔光束与球面波叠加能够提高暗域处的光强梯度,更有利于稳定的粒子囚禁,在微操作方面具有积极意义。

参 考 文 献

- 1 S. A. Tatarikova, W. Sibbett, K. Dholakia. Brownian particle in an optical potential of the washboard type[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 038101
- 2 J. R. Moffitt, Y. R. Chemla, S. B. Smith *et al.*. Recent advances in optical tweezers [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2008, **77**: 205~228
- 3 Zhou Qi, Lu Jifa, Yin Jianping. Matter-wave interference in an axial triple-well optical dipole trap [J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(9): 093202
- 4 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
- 5 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Zhang Qian'an *et al.*. Liquid axicon for generating single bottle beam with size adjustable[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1008001
程治明, 吴逢铁, 张前安等. 液体轴棱锥产生尺寸可调的单个局域空心光束[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1008001
- 6 Xu Peng, He Xiaodong, Wang Jin *et al.*. Trapping a single atom

- in a blue detuned optical bottle beam trap[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2164~2166
- 7 Vladlen G. Shvedov, Cyril Hnatovsky, Andrei V. Rode *et al.*. Robust trapping and manipulation of airborne particles with a bottle beam[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17350~17356
- 8 Zhang Peng, Zhang Ze, Prakash Jai *et al.*. Trapping and manipulating aerosols with optical bottle beams generated by Moiré technique [C]. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, 2011
- 9 G. Li, S. Zhang, L. Isenhower *et al.*. Crossed vortex bottle beam trap for single-atom qubits[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(5): 851~853
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Zhang Qian'an *et al.*. New method of generating self-imaged optical bottle beams and particles captured[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(9): 094201
程治明, 吴逢铁, 张前安等. 自成像局域空心光束产生的新方法及其粒子俘获[J]. *物理学报*, 2012, **61**(9): 094201
- 14 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Liu Bin. Generation of self-imaged optical bottle beam by using axicons[C]. *SPIE*, 2010, **7721**:
- 15 A. T. Friberg. Stationary-phase analysis of generalized axicons [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(4): 743~750

栏目编辑：李文喆