

热光源产生贝塞尔光束的理论实验

程治明 吴逢铁 郑维涛 张前安 范丹丹

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 利用热光源获得了近似贝塞尔光束。对多波长光波同时入射轴棱锥的情形进行分析和数值模拟, 结果显示轴棱锥后会形成近似贝塞尔光束, 但受光场非相干叠加的影响截面光强对比度降低。实验采用卤素灯杯作为产生贝塞尔光束的热光源, 针对热光源相干性差的特点设计出一套光学系统, 提高光波的空间相干性, 再使光波平行透过轴棱锥得到了近似贝塞尔光束。将实验结果与数值计算对比, 发现实验所得贝塞尔光束的特性与理论基本吻合, 但最大无衍射距离较理论计算所得的短, 并对此进行了分析。

关键词 衍射; 贝塞尔光束; 热光源; 轴棱锥

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0726001

Theory and Experiment of Bessel Beam Generated by Thermal Light Source

Cheng Zhiming Wu Fengtie Zheng Weitao Zhang Qian'an Fan Dandan

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

Abstract Bessel-like beam is generated by using thermal light source. The incident condition for the light waves with multi-wavelength passing through axicon simultaneously is analyzed and simulated. The results show that Bessel beam can be generated behind the axicon, but the contrast of the cross section light intensity drops because of the incoherent superposition of the multi-wavelength light waves. In our experiment, halogen light cup is used as thermal light source for generating Bessel beam. A set of optical system is designed to improve the spatial coherence of the light waves, and the Bessel-like beam is generated after the light waves passing the axicon. Comparing the experimental result with the numerical simulation, it is found that Bessel beam obtained from experiment is basically in accord with the numerical calculation. Besides the maximum diffraction-free distance is shorter in the experiment, which is analyzed at the end of the paper.

Key words diffraction; Bessel beam; thermal light source; axicon

OCIS codes 260.1960; 080.2740; 080.4298; 050.1970

1 引 言

自 1987 年 Durnin^[1] 提出无衍射贝塞尔这一麦克斯韦方程组在自由空间的特殊解以来, 对贝塞尔光束的研究取得了突飞猛进的进展。贝塞尔光束因其中心有着极大的光强且在传输过程中不分散, 同时光束遇到障碍物具有自重建^[2] 等特性引起国内外学者的极大兴趣。产生贝塞尔光束的常用方法有环缝

法^[1,3]、球差透镜法^[4]、计算机全息法^[4,5] 和轴棱锥法^[6] 等, 其中轴棱锥具有结构简单、光损伤阈值高和能量转换效率高(几乎高达 100%) 的优点, 使得轴棱锥产生贝塞尔光束的方法最为实用, 这也是在实验中采用轴棱锥的一个重要原因。贝塞尔光束的高强度、不分散、自重建特性使其在粒子囚禁^[7]、粒子的光学引导^[8] 以及最近提出的光学拉力^[9] 等领域得到了广

收稿日期: 2011-12-30; 收到修改稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(60977068, 61178015)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金(SG001102)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

泛应用。人们在微观粒子进行研究的时候需要对粒子进行囚禁操作^[10]，贝塞尔光束就可以用于产生局域空心光束^[11,12]以囚禁粒子。

传统的贝塞尔光束产生都只是用激光作为光源，由于激光具有良好的相干性，产生贝塞尔光束的参量与理论分析十分吻合。而非相干光源产生贝塞尔光束在国内并未涉足，国外也只有很少的相关文献，其中采用的方法有环缝法^[13]、全光纤法^[14]和空间光调制器法^[15]等。用非相干光源产生贝塞尔光束可以大幅度降低光源成本，产生的贝塞尔光束同样可以用于粒子囚禁和光学引导，并且非相干光贝塞尔光束在光学相干断层扫描上具有自愈能力，比相干光更有优势。可见用非相干光产生贝塞尔光束有重大的实际意义和极高的学术价值。本文用几何光学对多波长光束平行入射轴棱锥的情形作了分析，结合衍射理论进行数值模拟，均得到多波长光束平行入射轴棱锥能够产生贝塞尔光束的结论。在用

衍射理论模拟时取三个有代表性的波长对应的光场进行非相干叠加，从模拟的结果可以看出多波长光波入射时截面光强的亮暗对比度会下降。实验采用卤素灯杯作为光源，经一套光学系统后透过轴棱锥，在轴棱锥后面观察到了贝塞尔光束，与理论基本吻合。该方法结构简单、造价低廉、便于实用，在对非相干贝塞尔光束的研究与实用中具有指导意义。

2 理论分析

激光经准直扩束成平面波后入射轴棱锥的几何光路图，如图 1(a)所示，光波经轴棱锥后由于锥面的折射，在其后形成一个有无数平面波叠加的区域，由于激光具有良好的相干性，在交叠区域的光具有相同频率、不同的径向波矢分量，产生相干叠加，形成贝塞尔光束^[16]。图 1(a)中 R 为入射到轴棱锥底面的光束半径， γ 为轴棱锥的底角， z_{\max} 为贝塞尔光束的最大无衍射距离。

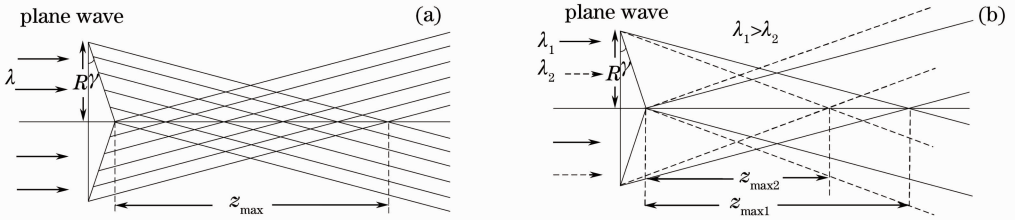


图 1 光波经轴棱锥折射光路图。(a)单波长光波入射；(b)两种波长光波入射

Fig. 1 Optical pathway diagram of light wave passing axicon. (a) Single-wavelength incident light waves; (b) double-wavelength incident light waves

当入射轴棱锥的光束为多波长光波时，不同波长的光波在交叠区域将产生非相干叠加；而相同波长的光波是相干的，将产生相干叠加，形成贝塞尔光束。图 1(b)为两种波长 λ_1 和 λ_2 的平面光波一并入射到轴棱锥后的折射光路图，由简单的几何推导可得贝塞尔光束的最大无衍射距离公式

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

式中 $n(\lambda)$ 为波长为 λ 的光波对轴棱锥材料的折射率， R 为入射轴棱锥的光束半径， γ 为轴棱锥的底角。如图 1(b) 中所示，因 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，对应的折射率

$n(\lambda_1) < n(\lambda_2)$ ，故 $z_{\max1} > z_{\max2}$ 。区域内存在两种波长的光波产生的贝塞尔光束，两者是非相干的，在重叠区域独立传播，对彼此的光束特性不造成影响。但不同波长光波各自干涉所形成的贝塞尔光束截面干涉图样亮暗间隔不同，对截面光强的对比度可能会产生一定影响。

单波长平面波经轴棱锥变换后的光场分布可由柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式和轴棱锥的透过率函数 $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$ 导出^[17]

$$E(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^R \left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (2)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数， r_1 为轴棱锥入射面的径向坐标， r_2 为接收面的径向坐标。当入射光为多波长光场时折射率会随波长变化，(2)式可改写为

$$E(r_2, z, \lambda) = \left(-\frac{ik(\lambda)}{z}\right) \exp[ik(\lambda)z] \exp\left(\frac{ik(\lambda)r_2^2}{2z}\right) \int_0^R \left(\frac{k(\lambda)r_1 r_2}{z}\right) \times \exp\left\{\frac{ik(\lambda)r_1^2}{2z} - ik(\lambda)[n(\lambda) - 1]\gamma r_1\right\} r_1 dr_1, \quad (3)$$

不同波长的光波在轴棱锥后的衍射光场非相干叠加,即

$$I(r_2, z) = \sum_{\lambda} |E(r_2, z, \lambda)|^2. \quad (4)$$

在实验中,采用一卤素灯杯作为非相干的热光源,此灯杯为雷士照明公司生产的 MR16(额定电压 12 V,功率 50 W),测得该灯杯的光谱图如图 2 示。

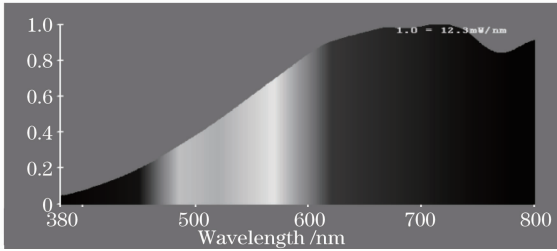


图 2 卤素灯光谱图

Fig. 2 Spectrogram of halogen lamp

取其中三种特殊波长 $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 700 \text{ nm}$ 进行模拟,采用的轴棱锥材料为光学石英玻璃,底角 $\gamma = 1^\circ$ 。对应的三种波长的折射率分别为 $n_1 = 1.46318$ 、 $n_2 = 1.46013$ 、 $n_3 =$

1.45517。三种光波衍射光场叠加光强可写成

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z, \lambda_1)|^2 + |E_2(r_2, z, \lambda_2)|^2 + |E_3(r_2, z, \lambda_3)|^2, \quad (5)$$

将参量代入(3)式及(5)式进行数值模拟。

图 3 为光波经过轴棱锥后 70 mm 处的模拟图,其中图 3(a)~(c)分别为 $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 550 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 700 \text{ nm}$ 的光波经轴棱锥后形成的贝塞尔光束截面光强图和径向光强分布图,图 3(d)为三种波长形成的贝塞尔光束累加后截面光强分布图。由图 3(a)~(c)对比可以看出波长较长的光波产生的贝塞尔光束截面图中亮环与暗环间隔较大,从图 3(d)中可以看出三种波长形成的贝塞尔光束叠加后截面光强对比度有所下降,但仍基本保持贝塞尔光束特性。如果用(4)式对图 2 中光谱进行依次叠加,则图 3(d)中截面光强的对比度将下降更大。图 4 为根据(3)式及(5)式模拟所得轴棱锥后不同位置处的截面光强图,可以看出虽然外围环的亮暗对比度下降,但光束在传输过程中基本保持贝塞尔光束不发散的特性。

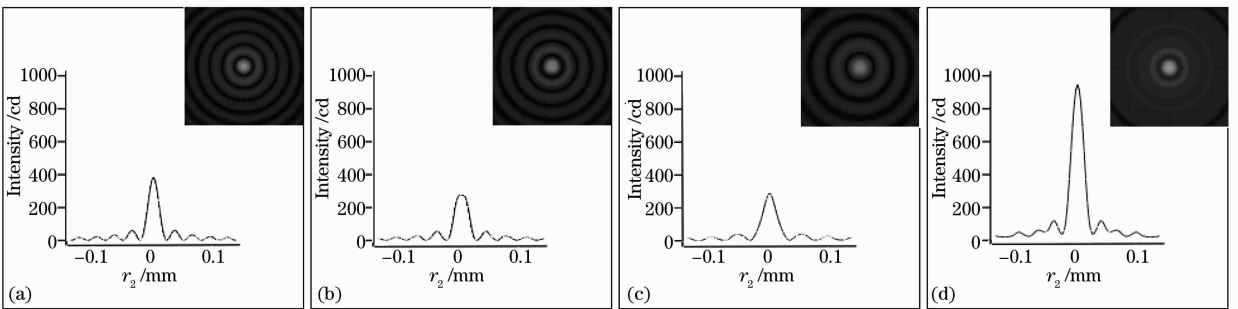


图 3 径向及截面光强分布图

Fig. 3 Intensity distribution at radial and cross sections

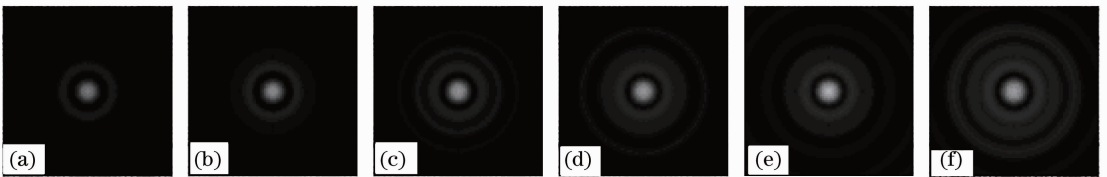


图 4 模拟所得不同位置处的截面光强分布图。(a) $z = 40 \text{ mm}$; (b) $z = 50 \text{ mm}$; (c) $z = 60 \text{ mm}$; (d) $z = 70 \text{ mm}$; (e) $z = 80 \text{ mm}$; (f) $z = 90 \text{ mm}$

Fig. 4 Intensity distributions in simulation at cross section of different distances. (a) $z = 40 \text{ mm}$; (b) $z = 50 \text{ mm}$; (c) $z = 60 \text{ mm}$; (d) $z = 70 \text{ mm}$; (e) $z = 80 \text{ mm}$; (f) $z = 90 \text{ mm}$

3 实 验

普通的热光源相干性很差,在光路中插入光阑可提高光场的空间相干性,使透过轴棱锥后产生的贝塞尔光束质量更好。图5为实验装置图,图中 P_1 、 P_2 均为直径 $D=0.1\text{ mm}$ 的光阑, L_1 、 L_2 是焦距分别为 $f_1=70\text{ mm}$ 、 $f_2=190\text{ mm}$ 的凸透镜,轴棱锥的材料为石英玻璃,底角 $\gamma=1^\circ$ 。卤素灯杯出射的白光经光阑 P_1 再经 L_1 聚焦到光阑 P_2 ,得到空间相干性较好的近似点光源,经 L_2 后形成平行光入射轴

棱锥,在轴棱锥后的接收面观察到光束的截面光强图(图6)。可见在此区域内形成了较理想的贝塞尔光束。

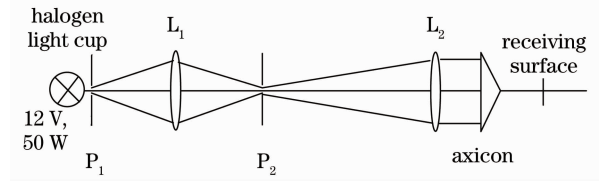


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Diagram of experimental device

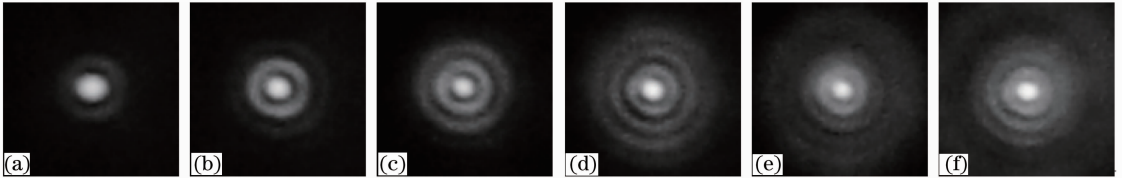


图6 实验所得不同位置光束截面光强分布图。(a) $z=40\text{ mm}$; (b) $z=50\text{ mm}$; (c) $z=60\text{ mm}$; (d) $z=70\text{ mm}$; (e) $z=80\text{ mm}$; (f) $z=90\text{ mm}$

Fig. 6 Intensity distributions in experiment at cross section of different distances. (a) $z=40\text{ mm}$; (b) $z=50\text{ mm}$; (c) $z=60\text{ mm}$; (d) $z=70\text{ mm}$; (e) $z=80\text{ mm}$; (f) $z=90\text{ mm}$

实验中经 L_2 后入射轴棱锥的光斑半径约为 $R=1\text{ mm}$,将 n_1 、 γ 和 R 代入(1)式,得 $z_{\max}=123.71\text{ mm}$ (代入 n_2 或 n_3 时 z_{\max} 相差不大)。实验中拍得距轴棱锥 $100\sim 120\text{ mm}$ 处截面光强图如图7所示,从图7中观察到光束在传播过程中渐渐失去了贝塞尔光束的特性,这比理论计算的最大无衍射距离短。其原因可能是多波长的光波在轴棱锥后形成贝塞尔光束区域的非相干叠加降低了亮环与暗环间的对比度,使图像变得模糊,如图3(d)示,并且在传播过程中模糊程度逐渐上升。对于这点的改善,将在今后的研究中细述。

的非相干叠加,光束的截面光强图中亮环与暗环对比度会下降。实验采用卤素灯杯作为产生贝塞尔光束的热光源,光波经一套光学系统后透过轴棱锥,在轴棱锥后观察到了较为理想的贝塞尔光束。实验结果与数值模拟基本吻合。实现了用热光源和轴棱锥的组合产生贝塞尔光束,为光学粒子囚禁和光学引导提供了一种廉价而实用的方法。

参 考 文 献

- 1 J Durnin, Exact solutions for nondiffracting beams. I. the scalar theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4): 651~654
- 2 Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao *et al.*. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, **41**(10): 1131~1137
- 3 张前安, 吴逢铁, 郑维涛等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重重建特性[J]. *中国科学 物理学 力学 天文学*, 2011, **41**(10): 1131~1137
- 3 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 4 J. Turunen, A. Vasara, A. T. Friberg. Holographic generation of diffraction-free beams [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19): 3959~3962
- 5 A. Vasara, J. Turune, A. T. Friberg. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(11): 1748~1757
- 6 C. J. Gutiérrez-Vega, R. Rodríguez-Masegosa, S. Chávez-Cerda. Bessel-Gauss resonator with spherical output mirror: geometrical-and wave-optics analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(11): 2113~2122
- 7 D. G. Grier. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2003, **424**(6950): 810~816
- 8 S. A. Tatarkova, W. Sibbett, K. Dholakia. Brownian particle

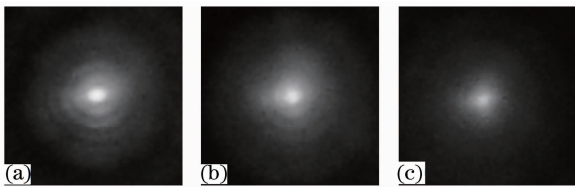


图7 光束截面光强图。(a) $z=100\text{ mm}$; (b) $z=110\text{ mm}$; (c) $z=120\text{ mm}$

Fig. 7 Intensity distributions of beam at cross section. (a) $z=100\text{ mm}$; (b) $z=110\text{ mm}$; (c) $z=120\text{ mm}$

4 结 论

分别从几何光学和衍射理论进行分析,得知多波长光束平行入射轴棱锥时能够产生贝塞尔光束,从衍射理论模拟的结果可以看出由于多波长光场间

- in an optical potential of the washboard type[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 038101
- 9 J. Chen, J. Ng, Z. F. Lin *et al.*. Optical pulling force[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**: 531~534
- 10 R. Qi, X. L. Yu, Z. B. Li *et al.*. Non-Abelian Josephson effect between two $F=2$ spinor Bose-Einstein condensates in double optical traps[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(18): 185301
- 11 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
- 12 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
- 13 L. Basanoa, P. Ottonello. Demonstration experiments on nondiffracting beams generated by thermal light [J]. *AAPT*, 2005, **73**(9): 826~830
- 14 X. Zhu, A. S. Lzgen, H. Wei *et al.*. White light Bessel-like beams generated by miniature all-fiber device[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(12): 11365~11374
- 15 J. Leach, G. M. Gibson, M. J. Padgett *et al.*. Generation of achromatic Bessel beams using a compensated spatial light modulator[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5581~5587
- 16 G. Scott, N. McArdle. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(12): 2640~2643
- 17 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