

理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对 无衍射光束的聚焦特性

陈姿言, 何艳林, 陈婧, 吴逢铁

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析圆顶轴棱锥与理想轴棱锥对 Bessel 光束的聚焦特性. 基于广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分理论推导出 Bessel 光经过理想轴棱锥和圆顶轴棱锥后的光强表达式, 并对理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦的 Bessel 光束的传输特性进行描述, 数值模拟不同截面下的光强分布图和径向光强分布图. 研究表明: 圆顶轴棱锥和理想轴棱锥都可以产生周期性的局域空心光束(Bottle beam), 但是相比于理想轴棱锥, 圆顶轴棱锥所产生的 Bottle beam 周期较短, 并且中心光强较强, 暗斑尺寸较小.

关键词: 理想轴棱锥; 圆顶轴棱锥; 局域空心光束; 贝塞尔光束

中图分类号: O 436.1

文献标志码: A

由于无衍射光的特殊性质, 使它得到广泛的研究和应用, 国内外已用多种光学元件实现了近似无衍射贝塞尔光束. 轴棱锥是目前用于产生无衍射光束最常用的光学元件之一, 它是 1954 年由 Mcleod 提出来的非球面线聚焦透镜^[1-2], 利用轴棱锥产生无衍射光束具有转换效率高、光损伤阈值大, 可直接成腔等优点. 无衍射 Bessel 光束经轴棱锥聚焦后可直接产生局域空心光束(Bottle beam), 这是一种在传播方向上中心光强为零, 在此区域外三维空间都围绕着高强度的光. 理想轴棱锥是常用的产生 Bessel 光束的轴棱锥, 它聚焦无衍射 Bessel 光束能够产生周期性的 Bottle beam, 但其中心光斑最弱的地方光强并不为零, 散射作用较强, 对要囚禁的粒子有一定的损伤, 且其光强梯度不大. 由于理想轴棱锥对尖顶的加工要求精度非常高, 稍有误差可能就会变成圆顶轴棱锥^[3], 它的圆顶部分平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后, 产生多个具有高强梯度的 Bottle beam^[4]. 目前, 国内外已将轴棱锥对无衍射光的聚焦特性这个理论应用在各个领域. 何西等^[5-6]提出的新型 LED 透镜产生光学 Bottle beam 以及非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束; Craig Snoeyink 等^[7]提出的贝塞尔光束显微镜(BBM), 都为此项研究开辟了新的方向. 本文是通过对比理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光的聚焦特性进行比较, 分析各自产生周期性 Bottle beam 的优缺点.

1 理论分析与数值模拟

1.1 理想轴棱锥对无衍射光束的聚焦特性

光束入射到理想轴棱锥上的无衍射光束的光场分布^[8]为

$$E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r \cdot r_1). \quad (1)$$

式(1)中: $A_0 = 1$ 是复振幅常数; $k_r = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma$ 是径向波矢分量, γ 为轴棱锥底角; r_1 是径向坐标.

轴棱锥的透过率函数为 $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$, 用理想轴棱锥对无衍射 Bessel 光束进行聚焦,

收稿日期: 2014-10-29

通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学的研究. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015); 福建省科技创新平台计划项目(2012H2002); 福建省泉州市科技重点项目资助课题(2014Z127, 2012Z97)

可以得到轴棱锥后的光场分布为

$$E(r,z)=-\frac{ik}{z}\exp(ikz)\exp(ik\frac{r^2}{2z})\int_0^bE_1(r_1)J_0(\frac{krr_1}{z})(t(r_1)\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-ik(n-1)\gamma r_1)r_1dr_1. \tag{2}$$

光强分布为

$$I(r,z)=\frac{k^2}{z^2}|\int_0^bE_1(r_1)J_0(\frac{krr_1}{z})(t(r_1)\exp(\frac{ikr_1^2}{2z})r_1dr_1|^2. \tag{3}$$

式(3)中:波数 $k=2\pi/\lambda$; n 为轴棱锥的折射率; b 为无衍射光束入射到轴棱锥的光束半径. 根据式(3)取参量:波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$; 轴棱锥底角 $\gamma=1^\circ$; 轴棱锥折射率 $n=1.458$; 波数 $k=2\pi/\lambda$; $b=z_0(n-1)\beta$; $r=0.4\text{ mm}$. 两轴棱锥之间的距离 $f=300\text{ mm}$ 进行模拟仿真, 得到不同截面光强分布图和径向光强分布图, 如图 1 所示.

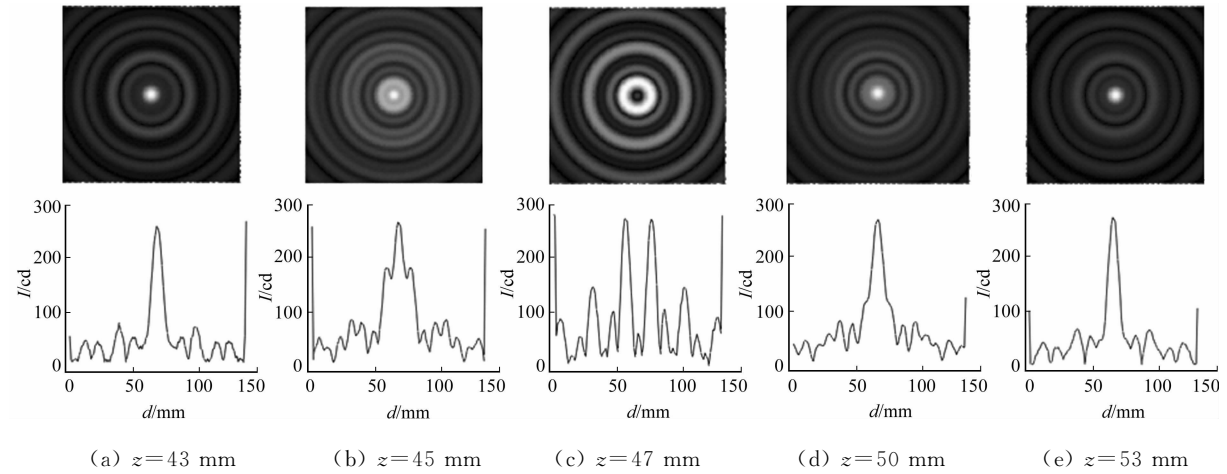


图 1 理想轴棱锥模拟所得不同距离的截面光强和径向光强分布图

Fig. 1 Intensity distribution of cross section at different propagation distance and intensity distribution of radial in simulation of ideal axicon

由图 1 可以看出:光斑经历了从轴上中心光强最强(图 1(a))到中心光强最弱(图 1(c))再到光斑中心光强最强的过程, 而图 1(e)中光斑又恢复到初始状态(图 1(a))的光斑, 其周期约为 10 mm .

1.2 圆顶轴棱锥的聚焦特性

圆顶轴棱锥如图 2(a)所示, 其聚焦的基本原理是利用圆顶部分平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉, 产生多个具有高强梯度的局域空心光束^[9].

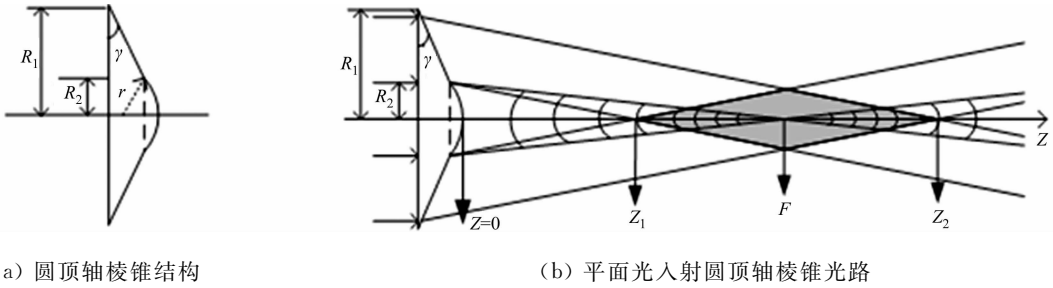


图 2 圆顶轴棱锥原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vaulted axicon

如图 2(b)所示, 当平面波入射圆顶轴棱锥时, 被分为两部分:第一部分为 $0<R<R_2$ 的区域, 经过该区域的光线被平凸透镜汇聚于焦点 F 处;第二部分为 $R_2<R<R_1$ 的区域, 该区域的光线经过底角为 γ 的轴棱锥产生锥面波^[10]. 根据柯林斯公式可求得两部分光场经圆顶轴棱锥变换后的场强分布^[11]分别为

$$E_1(r_2,z)=-\frac{ik}{z}\exp[ik(z+\frac{r_2^2}{2z})]\int_0^{R_2}E_0J_0(\frac{kr_1r_2}{z})\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-\frac{ikr_1^2}{2f})r_1dr_1, \tag{4}$$

$$E_2(r_2,z)=-\frac{ik}{z}\exp[ik(z+\frac{r_2^2}{2z})]\int_0^{R_2}E_0J_0(\frac{kr_1r_2}{z})\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-ik(n-1)\gamma r_2)r_2dr_2. \tag{5}$$

式(4)~(5)中: $k=2\pi/\lambda$ 为波矢; 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; n 为轴棱锥的折射率. 圆顶轴棱锥后的光场为 E_1 和 E_2 的相干叠加, 光强分布为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (6)$$

式(6)中: I 为光强; Z 为柱坐标系的轴向坐标. 取参量 $\lambda = 632.8 \text{ mm}$, $n = 1.458$, $\gamma = 1^\circ$, $R_1 = 4 \text{ mm}$, $R_2 = 1.4 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}$, 根据式(4)~(6)进行模拟仿真可得不同距离处的截面光强分布图和径向光强分布图, 如图 3 所示.

由图 3 可知: 光斑经历了从轴上中心光强最强(图 3(a))到中心光强最弱(图 3(c))再到光斑中心光强最强的过程^[12], 而图 3(e)中光斑又恢复到初始状态(图 3(a))的光斑, 其周期约为 8 mm .

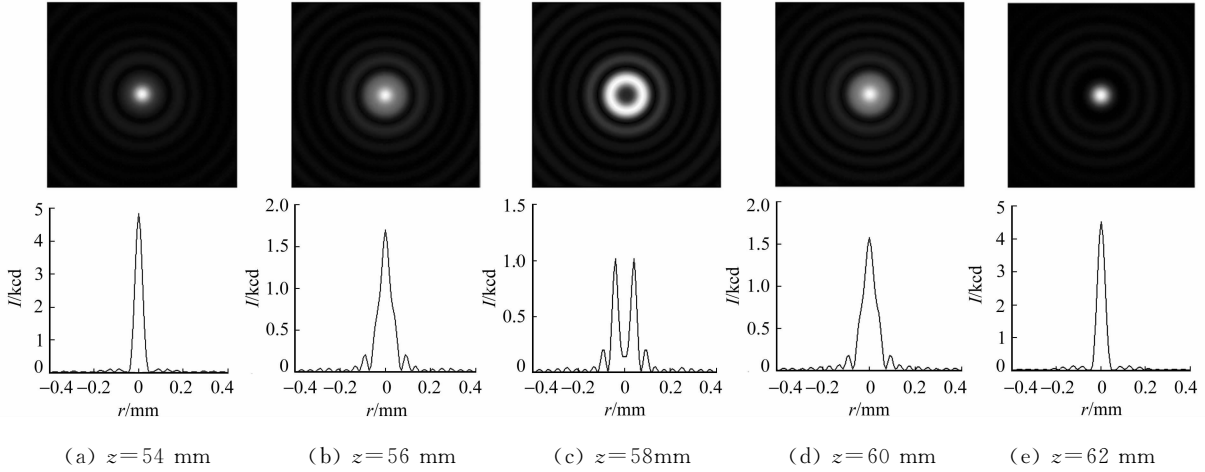


图 3 圆顶轴棱锥模拟所得不同距离的截面光强和径向光强分布图

Fig. 3 Intensity distribution of cross section at different propagation distance and intensity distribution of radial in simulation of vaulted axicon

2 比较与分析

理想轴棱锥与圆顶轴棱锥都可以产生 Bottle beam^[13], 但对比图 1 和图 3, 圆顶轴棱锥产生的 Bottle beam 中心光强相比理想轴棱锥较强, 更利于对粒子的囚禁, 并且圆顶轴棱锥圆顶部分形成的平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后, 可以产生多个具有高强梯度的局域空心光束^[14]. 而高强度梯度的局域空心光束可以对处于暗域处的粒子施以大的散射力, 将粒子稳固地囚禁在暗域处, 提高了囚禁粒子的效率. 从图 1 和图 3 中也可看出: 理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期, 为了更好地比较 Bottle beam 的周期, 将利用公式计算出理论值, 从而验证模拟值的正确性.

由文献[15]可知: 根据干涉产生局域空心光束的周期公式, 则有

$$Z_T = \left| \frac{2\pi}{k'_z - k_z} \right|. \quad (7)$$

式(7)中: $k_z = \sqrt{k^2 - [(n-1)\gamma k]^2}$ 为 Bessel 光束的轴向波矢分量; k'_z 为球面波的轴向波矢分量, 即

$$k'_z = k \frac{f}{\sqrt{f^2 + r^2}}. \quad (8)$$

由式(8)可以得出: 球面波的轴向波矢分量与径向距离 r 有关, 而在圆顶轴棱锥中 $r = (R_1 + R_2)/\gamma$.

利用式(7)和式(8)可以计算 Bottle beam 的周期, 则计算出理想轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期 $Z_T = 10.56 \text{ mm}$, 与图 1 模拟所得的周期 10 mm 基本相符. 计算出圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期 $Z_T = 7.67 \text{ mm}$, 与图 3 模拟所得的周期 8 mm 基本相符. 由此可以得出: 相比于理想轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期, 圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期较短, 对控制微粒的准确度更高, 更有利于 Bottle beam 对粒子的囚禁^[16].

3 结论

基于广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分理论推导出 Bessel 光经过理想轴棱锥和圆顶轴棱锥后的光强

表达式,并对理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光束的聚焦进行了分析.数值模拟了不同截面的光强分布和径向光强分布,并计算了理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦所产生的局域空心光束的周期.

将两类轴棱锥对比后得出,理想轴棱锥与圆顶轴棱锥都可以产生周期性的 Bottle beam,理想轴棱锥所产生的 Bottle beam 质量较好,而圆顶轴棱锥所产生的 Bottle beam 周期较短,对控制微粒的准确度更高,并且圆顶轴棱锥圆顶部分形成的平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后,产生多个具有高强梯度的局域空心光束,更利于对粒子的控制.

参考文献:

- [1] 杜团结,王涛,吴逢铁.轴棱锥对无衍射光束的线聚焦特性[J].物理学报,2013,62(13):134103.
- [2] 吴逢铁,陈婧,程治明.圆顶轴棱锥底角及焦距对局域空心光束的影响[J].强激光与粒子束,2013,25(3):569-573.
- [3] 程治明,吴逢铁,方翔,等.圆顶轴棱锥产生多个局域空心光束[J].物理学报,2012,61(21):2142011-2142015.
- [4] 江新光,吴逢铁,邱振兴.不同轴棱锥的光传输特性[J].光学学报,2009,29(6):1659-1663.
- [5] 何西,杜团结,吴逢铁.新型 LED 透镜产生光学 Bottle beam[J].物理学报,2014,63(7):074201.
- [6] 何西,吴逢铁,李攀,等.非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束[J].中国科学,2014,35(7):705-711.
- [7] SNEOYINK C, WERELEY S. Single-image far-field subdiffraction limit imaging with axicon[J]. Optics Letters, 2013,38(5):625-627.
- [8] 方翔,吴逢铁,程治明.产生不同类型局域空心光束的可拆式组合轴棱锥[J].光学学报,2012,32(8):08260021-08260025.
- [9] 谢晓霞,吴逢铁,李冬.双焦透镜对 Bessel 光束传输的影响[J].物理学报,2014,63(18):180201.
- [10] 李冬,吴逢铁,李攀,等.用于产生 Bessel 光的广义轴棱锥[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(5):500-504.
- [11] 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(8):191-193.
- [12] TATARKOVA S A, SIBBETT W, DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. Phys Rev Lett, 2003,91(12):038101(1-4).
- [13] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science, 2002,29(6):1101-1103.
- [14] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003,42(4):810-816.
- [15] 张前安,吴逢铁,郑维涛.新型锥透镜产生局域空心光束[J].物理学报,2011,60(9):094201.
- [16] TOPUZOSKI S. Fraunhofer diffraction of Laguerre-Gaussian laser beam by helical axicon[J]. Optics Communications, 2014,23(8):1016-1018.

Focal Characteristics of Ideal Axicon and Vaulted Axicon on Bessel Beams

CHEN Zi-yan, HE Yan-lin, CHEN Jing, WU Feng-tie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper analyzes the focal characteristics of the vaulted axicon and ideal axicon on Bessel beams. The expressions of light intensity of Bessel beam passing through an ideal axicon and a vaulted axicon are derived based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory. This paper also describes the transformation of Bessel beam focused by the ideal axicon and vaulted axicon, and numerically simulate the light intensity distribution graph and intensity distribution of radial in different cross sections. Studies show that vaulted axicon and ideal axicon could both produce periodical Bottle beams. However, compared to ideal axicon, the Bottle beams produced by a vaulted axicon have shorter cycle time, stronger central light intensity and smaller size of dark spots.

Keywords: ideal axicon; vaulted axicon; Bottle beam; Bessel beam