

产生不同类型局域空心光束的可拆式组合轴棱锥

方 翔 吴逢铁 程治明

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 提出一种产生尺寸可调局域空心光束的新型光学元件——可拆式组合轴棱锥, 这种新型光学元件是在传统轴棱锥的中部沿其轴线方向贯通开设一圆孔, 在圆孔内嵌设一第二轴棱锥组成。通过更换不同底角的第二轴棱锥(或第一轴棱锥), 可形成不同尺寸的单个局域空心光束或周期性局域空心光束。从几何光学出发分析了产生局域空心光束的原理, 计算了局域空心光束的相关参量。由衍射积分理论分析和模拟了新型光学元件的光强分布特性。几何光学和衍射理论所得分析结果基本吻合。

关键词 几何光学; 局域空心光束; 新型光学元件; 轴棱锥

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0826002

Detachable Combined Axicon for Gennerating Different Types of Bottle Beam

Fang Xiang Wu Fengtie Cheng Zhiming

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

Abstract A new optical component named detachable combined axicon for generating size adjustable bottle beam is proposed. This new type of optical element is opened a circular hole in the central part of the traditional axicon along the axis. Then a sencond axicon which is maded of common glass materials is embed in the circular hole. Single bottle beams or periodic bottle beams of different size can be generated by the way of replacing the second axicon (or the first axicon) of different base angle in this new optical element. Based on the geometrical optics, the principle of the generation of bottle beam is analysed and the related paramaters of the bottle beam are calculated. According to the Fresnel diffraction integral theory, the intensity distribution of the beam passing through this new optical element is simulated. The results of experiments coincide exactly with the thery discussed above.

Key words geometric optics; bottle beam; new optical element; axicon

OCIS codes 260.1960; 080.2740; 160.4670; 220.2740

1 引 言

近年来,随着激光应用技术的发展,各种中心强度为零的激光光束相继产生,正在形成一个所谓空心光束的大家族。局域空心光束作为其中的一员,因在光传播方向上具有三维封闭的暗中空区域和极高的强度梯度,而被广泛用于微粒诱捕和光学微操

控等领域^[1~3]。因此,如何方便简洁的获取尺寸合适的局域空心光束成为近年来来的一个研究热点。

目前,局域光束的获取方法已有众多报道,如光学全息法^[4]、贝塞尔光相干法^[5~7]、贝塞尔光聚焦法^[8,9]和新型锥透镜法^[10~12]等。光学全息法技术比较成熟,但是全息片的抗损伤阈值比较低,限制了局

收稿日期: 2012-02-27; **收到修改稿日期**: 2012-03-30

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: 方 翔(1986—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与变换的理论和技術等方面的研究。

E-mail: asjna@163.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、短脉冲技术和非线性光学等方面的研究。

E-mail: fengtie@hqu.edu.cn(通信联系人)

域空心光束的强度;贝塞尔光相干法可以形成周期性的局域空心光束,但是需要两束具有不同径向波矢分量的贝塞尔光完全同轴相干,而贝塞尔光束为线聚焦形成,中心光斑极小(几十微米至几百微米),因此光路调试极其困难;贝塞尔光聚焦法结构简单,由轴棱锥产生贝塞尔光经过一正透镜聚焦即可行成单个局域空心光束,局域空心光束的最大暗域半径 $R=f(n-1)\gamma$,因此轴棱锥和聚焦透镜参数确定以后,局域空心光束的尺寸也就无法改变了;新型锥透镜法通过单一元件即可获得局域空心光束,具有结构简单、转换效率高、光损伤阈值高的优点。但是新型锥透镜一般都是一个特殊的整体结构,也存在局域空心光束的尺寸无法改变的缺点,不利于操控不同尺寸的微粒或者将微粒局限在不同大小的区域。为了解决这些问题,本文提出了一种产生局域空心光束的新型光学元件——可拆式组合轴棱锥。这种新型光学元件是在传统轴棱锥的中部沿其轴线方向贯通开设一圆孔,在圆孔内嵌设一第二轴棱锥组成。通过更换不同底角的第二轴棱锥(或第一轴棱锥),可以形成不同尺寸的单个局域空心光束或周期性局域空心光束。这种新型光学元件的结构是基于现有传统轴棱锥的简单组合,因此也具有传统轴棱锥结构简单,光损伤阈值高,能量转换效率高(几乎高达100%)等优点。

2 元件设计

一束平行光正入射到传统轴棱锥上将被转换成具有相同偏转角 φ (入射光与出射光的夹角)的锥面波,锥面波相干叠加形成近似无衍射贝塞尔光束。如图1所示,轴棱锥后的菱形区域为近似无衍射区。

由几何关系得偏转角

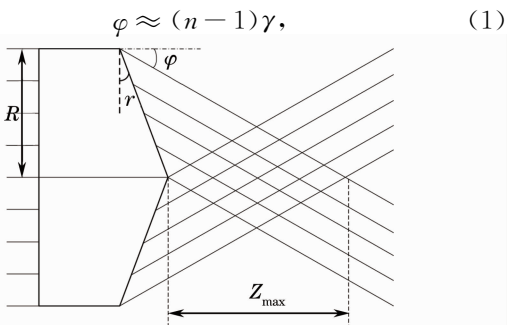


图1 平面波通过轴棱锥产生贝塞尔光束
Fig. 1 Generation of Bessel beam as plane wave passes through axicon

最大无衍射距离

$$Z_{\max} \approx \frac{R}{\varphi} = \frac{R}{(n-1)\gamma}, \quad (2)$$

式中 R 为入射轴棱锥的光束半径, n 为轴棱锥的折射率, γ 为轴棱锥的底角。由(1)式可以看出,出射光束的偏转角 φ 与轴棱锥底角 γ 近似成正比关系。根据这一关系,在底角为 γ_1 的传统轴棱锥的中部轴线方向贯通开设一圆孔,如图2所示,在圆孔内嵌设一底角为 γ_2 ($\gamma_2 \neq \gamma_1$) 的第二轴棱锥,就可形成一种新型光学元件——可拆式组合轴棱锥。

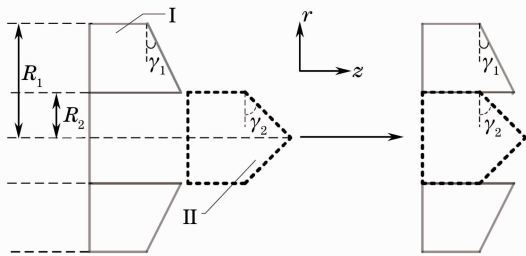


图2 可拆式组合轴棱锥的结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of detachable combined axicon

3 几何光学分析

当平面波垂直入射可拆式组合轴棱锥时,入射到 I、II 两部分的平面波将分别被转换为两束具有不同偏转角的出射锥面波。不同偏转角的出射锥面波分别相干叠加,形成两束无衍射贝塞尔光,如图3所示。

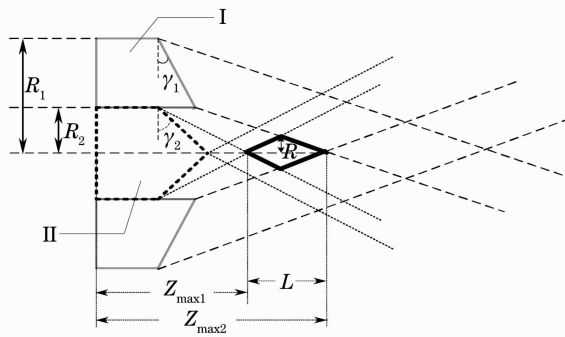


图3 可拆式组合轴棱锥形成局域空心光束示意图
Fig. 3 Scheme of bottle beam generated by detachable combined axicon

1) 当 $\gamma_1 < \gamma_2$ 时,由于经过 II 部分的出射锥面波的偏转角比 I 部分的偏转角大,因此 I、II 两部分产生的无衍射贝塞尔光之间会形成一段没有光通过的区域,即局域空心光束,如图3中粗线标注的菱形区域所示。由图3中的几何关系可以看出,局域空心光束的起点位置在 $Z_{\max1}$ 的后端点,结束位置在

$Z_{\max 2}$ 的前端点。其中 $Z_{\max 2}$ 是由半径为 R_2 ，底角为 γ_2 的第二轴棱锥产生的贝塞尔光的最大无衍射距离。由(2)式可得

$$Z_{\max 2} \approx \frac{R_2}{(n-1)\gamma_1}, \quad (3)$$

式中 $Z_{\max 1}$ 为半径为 R_2 ，底角为 γ_1 的第一轴棱锥产生的贝塞尔光的最大无衍射距离。由(2)式可得

$$Z_{\max 1} \approx \frac{R_2}{(n-1)\gamma_2}, \quad (4)$$

因此组合轴棱锥产生局域空心光束的轴向长度 L 为

$$L = Z_{\max 2} - Z_{\max 1} = \frac{R_2}{n-1} \left| \frac{1}{\gamma_1} - \frac{1}{\gamma_2} \right|, \quad (5)$$

由几何关系得出局域空心光束的最大暗域半径 R 为

$$R \approx R_2 \frac{L}{Z_{\max 1} + Z_{\max 2}} = R_2 \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (6)$$

2) 当 $\gamma_1 > \gamma_2$ 时，入射平面波经过第二轴棱锥将形成较小偏转角的锥面波，因此 I、II 两部分产生的无衍射贝塞尔光将产生交叠，交叠的两束光具有相同频率，不同的径向波矢分量。由文献[7]可知，交叠的两束贝塞尔光干涉将产生周期性的局域空心光束。

周期性局域空心光束的周期可表示为

$$E(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^R \left(\frac{kr_1 r_2}{z} \right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (8)$$

平面波垂直入射到可拆式组合轴棱锥时，出射光场则分为两部分，一部分是由 $0 < r \leq R_2$ 区域的底角为 γ_2 的轴棱锥形成的无衍射光场 E_1 ，另一部分是由 $R_2 < r \leq R_1$ 区域的底角为 γ_1 的轴棱锥形成的无衍射光场 E_2 ，由(8)式得 E_1 和 E_2 的光场表达式

$$E_1(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^{R_2} \left(\frac{kr_1 r_2}{z} \right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma_2 r_1\right] r_1 dr_1, \quad (9)$$

$$E_2(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_{R_2}^{R_1} \left(\frac{kr_1 r_2}{z} \right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma_1 r_1\right] r_1 dr_1, \quad (10)$$

总光场为 E_1 和 E_2 的相干叠加，因此可拆式组合轴棱锥后的光强分布可表示为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2, \quad (11)$$

取参量 $n=1.51509$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $\gamma_1=0.5^\circ$, $\gamma_2=1^\circ$, $R_1=10 \text{ mm}$, $R_2=5 \text{ mm}$ 。由(11)式可模拟出可拆式组合轴棱锥后的三维光强分布，如图4所示。其中介于两个最大光强值之间的阴影部分，即为与图3菱形区域相对应的局域空心光束的三维光强

$$Z_T = \left| \frac{2\pi}{k_{z1} - k_{z2}} \right|, \quad (7)$$

式中轴向波矢分量 $k_{z1} = \sqrt{k_1^2 - k_{r1}^2}$, $k_{z2} = \sqrt{k_2^2 - k_{r2}^2}$ ，波数 $k_1 = k_2 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，径向波矢分量 $k_{r1} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_1$, $k_{r2} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_2$ 。

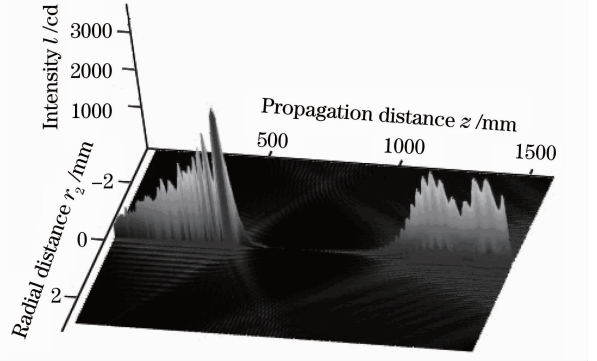


图4 轴向光强三维分布图

Fig. 4 3-D distribution of intensity on axis

4 衍射理论分析与实验模拟

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射率函数 $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$ 导出^[13]

分布。

4.1 可拆式组合轴棱锥产生不同尺寸的单轴局域空心光束

可拆式组合轴棱锥的材料选用 BK7，折射率 $n=1.51509$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 。通过 $\gamma_1=2^\circ, 3^\circ$, $R_1=10 \text{ mm}$ 的第一轴棱锥和 $\gamma_2=4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ$, $R_2=5 \text{ mm}$ 的第二轴棱锥的简单组合，即可形成 10 种不同尺寸的局域空心光束，如表 1 所示。

表 1 不同尺寸的单个局域空心光束
Table 1 Different sizes of single bottle beam

unit: mm

$\gamma_2 / (^\circ)$	4	5	6	7	8
$\gamma_1 = 2^\circ$	$L = 139.043$	$L = 166.852$	$L = 185.391$	$L = 198.633$	$L = 208.565$
	$R = 1.667$	$R = 2.143$	$R = 2.500$	$R = 2.778$	$R = 3.000$
$\gamma_1 = 3^\circ$	$L = 46.348$	$L = 74.156$	$L = 92.695$	$L = 105.938$	$L = 115.869$
	$R = 0.714$	$R = 1.250$	$R = 2.00$	$R = 2.273$	$R = 2.273$

由表 1 可发现,第一轴棱锥底角固定时,局域空心光束的最大暗域半径 R 及轴向长度 L 随着第二轴棱锥底角的增大而增大;第二轴棱锥底角固定时,局域空心光束的最大暗域半径 R 及轴向长度 L 随着第一轴棱锥底角的增大而减小。

为 $\gamma_1 = 3^\circ$ 的可拆式组合轴棱锥进行光线追迹,可得到平面波经过可拆式组合轴棱锥后在最大宽度 R 处形成的局域空心光束横截面光强分布图及剖面图(如图 5 所示)。

通过(9)~(11)式,用 MathCAD 软件可模拟出平面波通过可拆式组合轴棱锥后的轴上光强分布

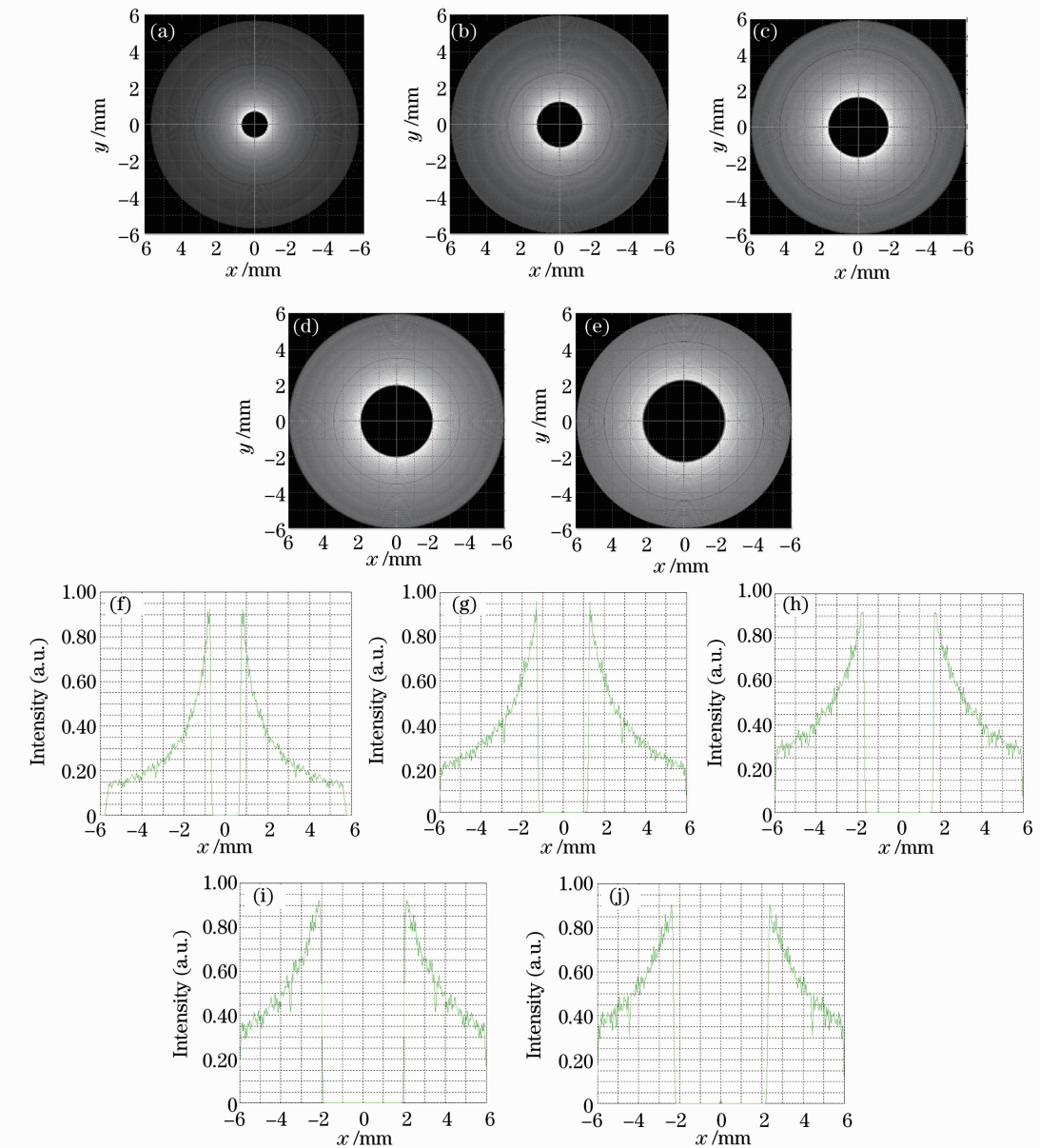


图 5 局域空心光束的横截面光强分布图及剖面图

Fig. 5 Cross section distribution of the intensity of bottle beam

(如图6示)。由图5、图6,可发现改变参数 γ_2 (或 γ_1)即可改变局域空心光束的最大暗域半径 R 及轴向长度 L : γ_2 越大(或 γ_1 越小),局域空心光束尺寸

越大; γ_2 越小(或 γ_1 越大),局域空心光束尺寸越小。即更换不同底角的第二轴棱锥(或第一轴棱锥)获得不同尺寸的局域空心光束。

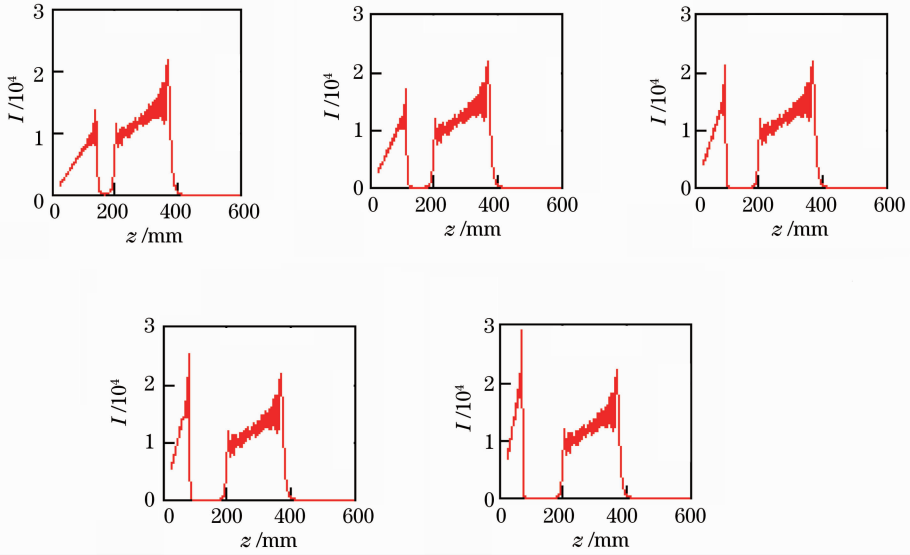


图6 轴上光强分布图

Fig. 6 Distribution of intensity on axis

4.2 可拆式组合轴棱锥产生不同尺寸的多个周期性局域空心光束

选取参数 $n=1.51509$, $\lambda=632.8\text{ nm}$, $\gamma_1=3^\circ$, $\gamma_2=2.4^\circ$, $\gamma'_2=2.6^\circ$, $R_1=10\text{ mm}$, $R_2=5\text{ mm}$ 。由(9)~(11)式可模拟出底角为 $\gamma_1=3^\circ$ 和 $\gamma_2=2.4^\circ$ 的

轴棱锥组合后的纵向光强分布如图7(a)所示,底角为 $\gamma_1=3^\circ$ 和 $\gamma'_2=2.6^\circ$ 的轴棱锥组合后的纵向光强分布如图7(b)所示。从中可以看出,在可拆式组合轴棱锥后两束贝塞尔光重叠区域形成多个周期性局域空心光束。

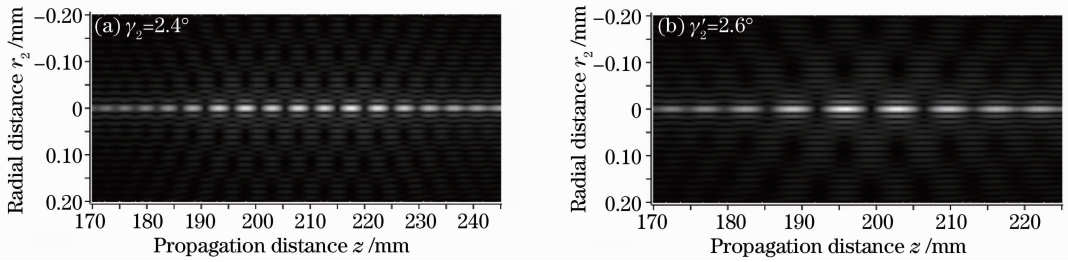


图7 可拆式组合轴棱锥产生周期性局域空心光束的纵向光强分布图

Fig. 7 Optical intensity distribution of periodic bottle beam generated by detachable combined axicon

通过(3)~(5)式、(7)式,可计算出周期性局域空心光束区域的起点位置 $Z_{\max 1}$ 、终点位置 $Z_{\max 2}$ 、轴向长度 L 及再现周期 Z_T ,如(12)式所示。与图7衍射理论模拟结果基本吻合。

$$\begin{cases} \gamma_2 = 2.4^\circ, & Z_{\max 1} = 231.739\text{ mm} & Z_{\max 2} = 185.391\text{ mm} & L = 46.348\text{ mm} & Z_T = 4.832\text{ mm} \\ \gamma'_2 = 2.6^\circ, & Z_{\max 1} = 213.913\text{ mm} & Z_{\max 2} = 185.391\text{ mm} & L = 28.522\text{ mm} & Z_T = 6.989\text{ mm} \end{cases}, (12)$$

由上述分析可知,改变第二轴棱锥底角 γ_2 (或第一轴棱锥底角 γ_1)的大小即可改变周期性局域空心光束区域的位置、相干区域的轴向长度和局域空心光束自再现周期。

5 结 论

提出了一种可产生不同类型局域空心光束的新型光学元件——可拆式组合轴棱锥,通过更换不同底角的第二轴棱锥(或第一轴棱锥),可形成不同尺寸的单个局域空心光束或不同参量的周期性局域空

心光束。从几何光学出发分析了产生局域空心光束的原理,利用衍射理论进行数值模拟,所得结果与几何光学分析结果基本吻合。与以往产生局域空心光束的装置相比,可拆式组合轴棱锥可获得尺寸可调的局域空心光束,同时还具有元件加工相对容易、结构简单、容易操控等优点。为获取局域空心光束提供了一种简洁、有效、实用的新途径。

参 考 文 献

- 1 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2000, **419** (4903): 145~147
- 2 Q. Zhou, J. F. Lu, J. P. Yin. Matter-wave interference in an axial triple-well optical dipole trap [J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19** (9): 093202
- 3 P. Xu, X. D. He, J. Wang *et al.*. Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35** (13): 2164~2166
- 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 H. S. Lee, B. W. Stewart, K. Choi *et al.*. Holographic nondiverging hollow beam [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49** (6): 4922~4927
- 6 J. L. Chaloupka, D. D. Meyerhofer. Characterization of a tunable, single-beam ponderomotive-optical trap [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 713~722
- 7 Wu Fengtie, Zeng Xiahui. Bottle beam with Talbot effect generated by interfering Bessel beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 174~178
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
- 8 Ming-Dar Wei, Wen-Long Shiao, Yi-Tse Lin. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3): 7~14
- 9 Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao *et al.*. Simulated and experimental studies on changing the size of bottle beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402008
张前安, 吴逢铁, 郑维涛等. 局域空心光束尺寸变换的模拟及实验 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402008
- 10 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
- 11 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
- 12 Ma Liang, Wu Fengtie. Bottle beam generated by reconstruction of Bessel beam with an annular obstacle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202011
马 亮, 吴逢铁. 环形障碍物后的无衍射光重建产生局域空心光束 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202011
- 13 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