

文章编号: 1001-3806(2014)05-0655-05

锥台和轴棱锥系统产生的尺寸可调局域空心光束

吴志伟

(泉州师范学院 物理与信息工程学院, 泉州 362000)

摘要: 为了解决现有光学系统产生局域空心光束尺寸不易调整的问题,提出了一种由不同底角的锥台和正轴棱锥组合而成的新型光学系统。采用衍射积分和汉克尔波理论对该系统的光束变换特性进行了分析,可知平面波通过新型光学系统后将产生局域空心光束,且通过改变两个光学元件之间的相对位置可以调节局域空心光束的尺寸。在此基础上结合几何光学理论给出局域空心光束相关参量的计算公式;并采用光学分析软件 TRACEPRO 模拟了新型光学系统中局域空心光束不同位置处的光强分布及其随锥台与正轴棱锥之间距离的变化。结果表明,软件模拟的结果与理论分析的结果基本一致,新型光学系统能够产生尺寸可调的局域空心光束。

关键词: 激光技术;局域空心光束;衍射积分;轴棱锥

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.017

Bottle beam with adjustable size generated by a frustum and axicon system

WU Zhiwei

(Institute of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal College, Quanzhou 362000, China)

Abstract: In order to adjust the size of bottle beam which was not adjustable flexibly in a current optical system, a novel optical system composed of one frustum and one axicon with different conical angle was proposed. The beam transformation property of this new system was analyzed by diffraction integral and Hankel wave theory. When a plane wave passes through the novel optical system, a bottle beam is formed and the size of bottle beam can be adjusted by changing the relative position between both the optical elements. Based on the analysis, the relevant parameters of bottle beam were also calculated by geometrical optics. The intensity distribution of bottle beam in different positions after the novel optical system was simulated by TRACEPRO software and the intensity distribution with the change of the relative position between frustum and axicon was also analyzed. The result of simulation is consistent with the result of theoretical analysis. The conclusion shows that bottle beam with adjustable size can be generated by the novel optical system.

Key words: laser technique; bottle beam; diffraction integral; axicon

引 言

局域空心光束^[1]是一种 3 维梯度光学势阱,沿着光束传播方向形成 3 维封闭的中空区域,周围被高强度梯度的光束所包围。其在生命科学和介观物理学领域具有广泛的应用前景,可应用于纳米、微米量级微粒的无损捕获和研究。目前产生局域空心光束的方法有很多种^[2-8],但是都存在共同的不足:

光学元件参量一旦确定,由此产生的局域空心光束的尺寸也就固定了,无法适应不同尺寸微粒的需要。参考文献[9]和参考文献[10]中提出两种对局域空心光束尺寸进行调节的方法:(1)参考文献[9]中通过具有两种不同折射率的轴棱锥(其一部分为普通光学玻璃,一部分为可更换液体)产生局域空心光束,所产生局域空心光束的尺寸可由两部分折射率之差调节;(2)参考文献[10]中通过望远系统对已有局域空心光束进行尺寸变换,变换后局域空心光束的尺寸与望远系统的放大倍率成正比。

作者在前人研究的基础上,提出一种不同的方案产生局域空心光束,并对其尺寸进行调节。该方案采用正轴棱锥对一束正入射的平行光和一束由锥面波形成的环状光束进行线聚焦产生局域空心光束,所产生局域空心光束的尺寸可由环状光束的内

基金项目:福建省教育厅省属高校科研专项资助项目(JK2013038);泉州师范学院信息功能材料福建省高等学校重点实验室(培育)基金资助项目

作者简介:吴志伟(1981-),男,硕士,讲师,主要从事光束传输与变换等方面的研究。

E-mail: wzwq@126.com

收稿日期:2013-09-25;收到修改稿日期:2013-10-15

半径尺寸调节。该系统由 2 个光学元件构成：一个是锥台，用于形成一束平行光和一束锥面波，另一个是正轴棱锥；改变锥台与正轴棱锥之间的距离即可改变入射正轴棱锥的环状光束的内半径尺寸，达到调节局域空心光束尺寸的目的。

1 理论分析

新型光学系统如图 1 所示，将锥台和正轴棱锥依次放置于光具座，首先是锥台，之后为正轴棱锥。正轴棱锥应放置于锥台所产生的近似无衍射区域之后（如图 2 所示），且正轴棱锥的底角应大于锥台的底角。

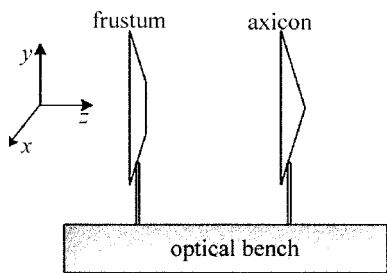


Fig. 1 Structure diagram of novel optical system and coordinate system

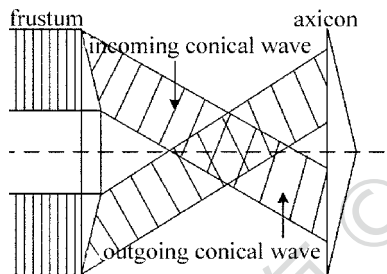


Fig. 2 Schematic diagram of the generation of conical wave

当一束平行光正入射锥台底部，经过锥台的变换，光束分为两部分：中间和外围环形部分。中间部分的光束保持原有性质正入射正轴棱锥的底部；外围环形部分光束在锥台作用下以一定倾角汇聚于光轴形成近似无衍射区域，之后分离，以相同的倾角入射正轴棱锥的底部。

可以采用汉克尔波理论分析正轴棱锥对外围环形部分光束的变换作用。平行光经过圆锥面的变换形成两束锥面波：出射锥面波和入射锥面波，如图 2 所示。出射锥面波和入射锥面波可以分别用第 1 类零阶汉克尔函数 $H_0^{(1)}$ 和第 2 类零阶汉克尔函数 $H_0^{(2)}$ 表示^[11]。则正轴棱锥对外围环形部分光束的变换可以等效为正轴棱锥对出射锥面波的变换。

$$\begin{aligned} H_0^{(1)}(k_r, r) \exp(-ik_z z) &= \\ [J_0(k_r, r) + iN_0(k_r, r)] \exp(-ik_z z) & \quad (1) \\ H_0^{(2)}(k_r, r) \exp(-ik_z z) &= \end{aligned}$$

$$[J_0(k_r, r) - iN_0(k_r, r)] \exp(-ik_z z) \quad (2)$$

式中， r 为径向坐标， z 为纵向（即光束传播方向）坐标， k_r 和 k_z 分别为径向和纵向的波矢分量， J_0 为 0 阶贝塞尔函数， N_0 为 0 阶诺依曼函数。

振幅为 1 的平行光通过锥台后产生的出射锥面波可以表示为：

$$H_0^{(1)}(k_r, r) = J_0(k_r, r) + iN_0(k_r, r) = \sqrt{J_0^2(k_r, r) + N_0^2(k_r, r)} \exp\left[i \arctan\left(\frac{N_0(k_r, r)}{J_0(k_r, r)}\right)\right] \quad (3)$$

式中， $k_r = k(n-1)\delta$ ， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数， λ 为光束波长， n 为锥台的折射率， δ 为锥台的底角。可以通过合理选择参量使 $k(n-1)\delta r$ 为一个较大的数，则(3)式中的零阶贝塞尔函数和零阶诺依曼函数可以用其渐进式来近似表示：

$$\begin{aligned} J_0(k_r, r) &\approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} \cos\left(k_r r - \frac{\pi}{4}\right) \\ N_0(k_r, r) &\approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} \sin\left(k_r r - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式可得：

$$\begin{aligned} H_0^{(1)}(k_r, r) &= \sqrt{J_0^2(k_r, r) + N_0^2(k_r, r)} \times \\ &\exp\left[i \arctan\left(\frac{N_0(k_r, r)}{J_0(k_r, r)}\right)\right] \approx \\ &\sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} \exp\left(ik_r r - i\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

根据衍射积分的理论，出射锥面波通过正轴棱锥后的输出光场分布为：

$$\begin{aligned} E(r, z) &= -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \times \\ &\int_a^b H_0^{(1)}(k_r, r_1) J_0\left(\frac{krr_1}{z}\right) t(r_1) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) r_1 dr_1 \end{aligned} \quad (6)$$

光强分布为：

$$I(r, z) = \frac{k^2}{z^2} \left| \int_a^b H_0^{(1)}(k_r, r_1) J_0\left(\frac{krr_1}{z}\right) \times t(r_1) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) r_1 dr_1 \right|^2 \quad (7)$$

式中， $t(r_1) = \exp[-ik(n-1)\theta r_1]$ 为正轴棱锥的透过率函数， θ 为正轴棱锥的底角， n 为正轴棱锥的折射率（为了方便分析，假设锥台和正轴棱锥采用相同的光学材料）； a 和 b 分别为出射锥面波入射到正轴棱锥底部的内外半径。

将(5)式代入(7)式可得：

$$I(r, z) \approx \frac{k^2}{z^2} \left| \int_a^b \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r_1}} \exp(ik_r r_1) J_0\left(\frac{krr_1}{z}\right) \times \right.$$

$$\exp[-ik(n-1)\theta r_1] \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) r_1 dr_1 \Big|^2 \approx \frac{k^2}{z^2} \left| \int_a^b \sqrt{\frac{2}{\pi k r_1}} J_0\left(\frac{k r r_1}{z}\right) \exp[-ik(n-1)(\theta-\delta)r_1] \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) \sqrt{r_1} dr_1 \right|^2 \quad (8)$$

对(8)式的精确解析难以得到,可以采用稳相法求其近似解,求得稳相点为:

$$r_1 = (n-1)(\theta-\delta)z \quad (9)$$

进一步求出其光强分布为:

$$I(r,z) \approx \frac{4(\theta-\delta)}{\delta} \times J_0^2[k(n-1)(\theta-\delta)r] \quad (10)$$

由(10)式得到:外围环形部分光束通过正轴棱锥后会在其后形成零阶贝塞尔光束。由(9)式可以求出其有效范围为 $a/[(n-1)(\theta-\delta)] \sim b/[(n-1)(\theta-\delta)]$, 如图3中的 ABCD 所示,其中 $a = L(n-1)\delta - R_1$, $b = L(n-1)\delta - R_2$, R_1 为锥台底部半径, R_2 为锥台顶部半径。

中间部分的光束入射正轴棱锥后的光强分布可以表示为:

$$I(r,z) = \lambda z k^2 (n-1)^2 \theta^2 \times J_0^2[k(n-1)\theta r] \quad (11)$$

其有效范围为 $0 \sim R_2/[(n-1)\theta]$, 如图3中的 EFGH 所示。

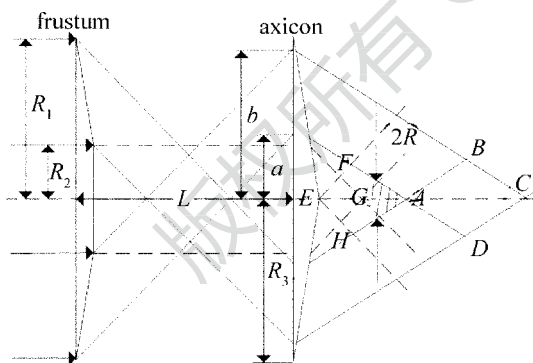


Fig. 3 Schematic diagram of the generation of bottle beam

由以上分析可以看出,平行光通过新型光学系统后的光强分布。首先在 $0 \sim R_2/[(n-1)\theta]$ 和 $a/[(n-1)(\theta-\delta)] \sim b/[(n-1)(\theta-\delta)]$ 这两块区域内光束都为零阶贝塞尔光束,具有近似无衍射发散的特性,但存在一定差异:(1) $0 \sim R_2/[(n-1)\theta]$ 范围内光束的中心光斑半径^[12-13]为 $0.383\lambda/[(n-1)\theta]$, 而 $a/[(n-1)(\theta-\delta)] \sim b/[(n-1)(\theta-\delta)]$ 范围内光束的中心光斑半径为 $0.383\lambda/$

$[(n-1)(\theta-\delta)]$, 因为 $\theta-\delta < \theta$, 所以 $a/[(n-1)(\theta-\delta)] \sim b/[(n-1)(\theta-\delta)]$ 范围内光束中心光斑的尺寸较大;(2)由(10)式和(11)式可以看出, $a/[(n-1)(\theta-\delta)] \sim b/[(n-1)(\theta-\delta)]$ 范围内光束在传播方向上的光强近似不变与传播距离无关,而 $0 \sim R_2/[(n-1)\theta]$ 范围内光束在传播方向上的光强随传播距离的增大而增大。

当 $a/[(n-1)(\theta-\delta)] > R_2/[(n-1)\theta]$ 时,两块近似无衍射区域没有交集,其中间部分会形成单个局域空心光束,如图3所示。例如可以取入射平行光半径 1mm, 锥台底部半径 $R_1 = 1\text{mm}$, 顶部半径 $R_2 = 0.5\text{mm}$, 锥台底角 $\delta = 0.04\text{rad}$, 正轴棱锥底部半径 $R_3 = 3\text{mm}$, 正轴棱锥底角 $\theta = 0.26\text{rad}$, 锥台和正轴棱锥的折射率 $n = 1.51509$, 锥台和正轴棱锥之间的距离 $L = 120\text{mm}$ 。可以求得两块近似无衍射区域的有效范围近似为: $(0 \sim 3.7\text{mm})$, $(13.3\text{mm} \sim 17.9\text{mm})$, 由此可知两块近似无衍射区域的中间会形成局域空心光束,且其长度近似为 9.6mm。

根据图3可以进一步计算出局域空心光束的相关参量。

局域空心光束的长度 H:

$$H = \frac{L(n-1)\delta - R_1}{(n-1)(\theta-\delta)} - \frac{R_2}{(n-1)\theta} \quad (12)$$

局域空心光束的最大半径 R:

$$R = \frac{H}{\left[\frac{1}{(n-1)\theta} + \frac{1}{(n-1)(\theta-\delta)} \right]} = \frac{\left[\frac{L(n-1)\delta - R_1}{(n-1)(\theta-\delta)} - \frac{R_2}{(n-1)\theta} \right]}{\left[\frac{1}{(n-1)\theta} + \frac{1}{(n-1)(\theta-\delta)} \right]} \quad (13)$$

由(12)式和(13)式可以看出,通过改变锥台和正轴棱锥之间的距离 L 就可以方便调节局域空心光束的长度和最大半径。

2 光学系统仿真

利用光学设计软件 TRACEPRO 建立新型光学系统的物理模型,如图4所示。根据所建立的模型模拟了平行光入射新型光学系统产生局域空心光束的物理过程和光束在不同位置处的截面光强分布。在此基础上,对局域空心光束的相关参量随锥台和正轴棱锥之间距离的变化进行验证。模拟采用的参量如下:入射光束为均匀分布的圆形平行光,波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$, 光束半径为 1mm, 锥台底部半径 $R_1 =$



Fig. 4 TRACEPRO model of the novel optical system

1mm, 顶部半径 $R_2 = 0.5\text{mm}$, 锥台底角 $\delta = 0.04\text{rad}$,

正轴棱锥底部半径 $R_3 = 3\text{mm}$, 正轴棱锥底角 $\theta = 0.26\text{rad}$, 锥台和正轴棱锥材料选择 BK7 光学玻璃, 锥台和正轴棱锥之间的距离 $L = 120\text{mm}$ 。模拟结果如图 5 所示。

在系统其它参量保持不变的条件下, 改变锥台

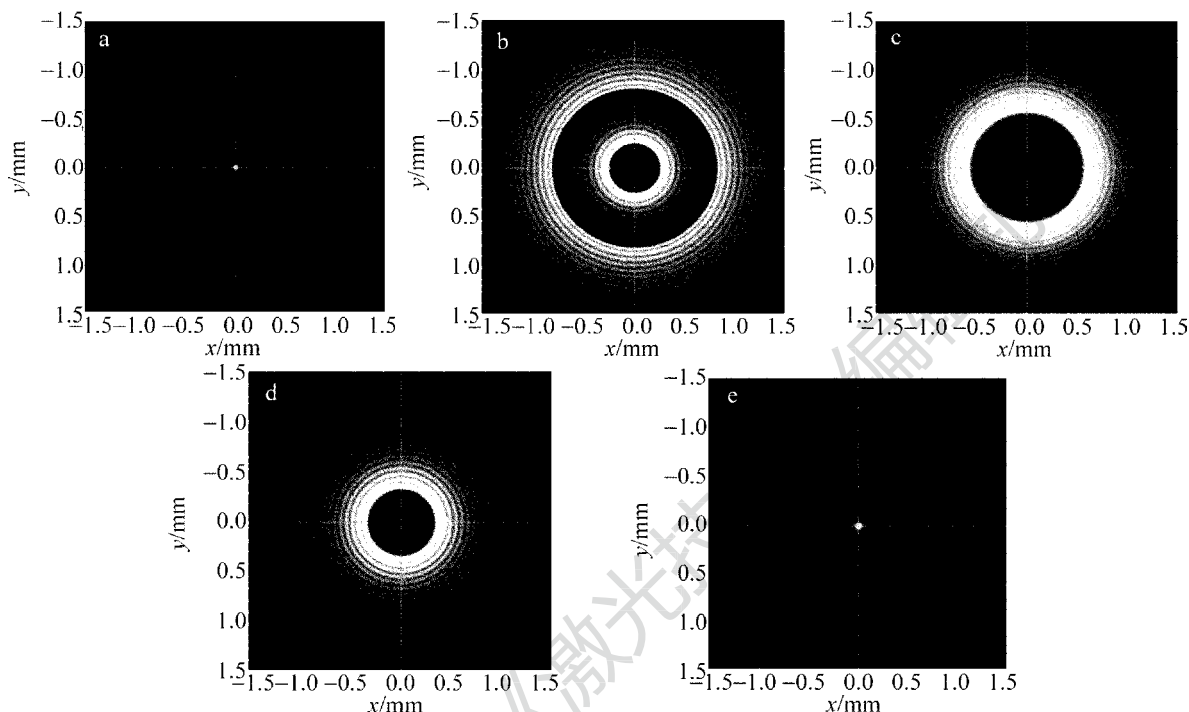


Fig. 5 Intensity distribution on transverse section at different positions with $L = 120\text{mm}$

a— $z = 124\text{mm}$ b— $z = 126\text{mm}$ c— $z = 128\text{mm}$ d— $z = 130\text{mm}$ e— $z = 133.5\text{mm}$

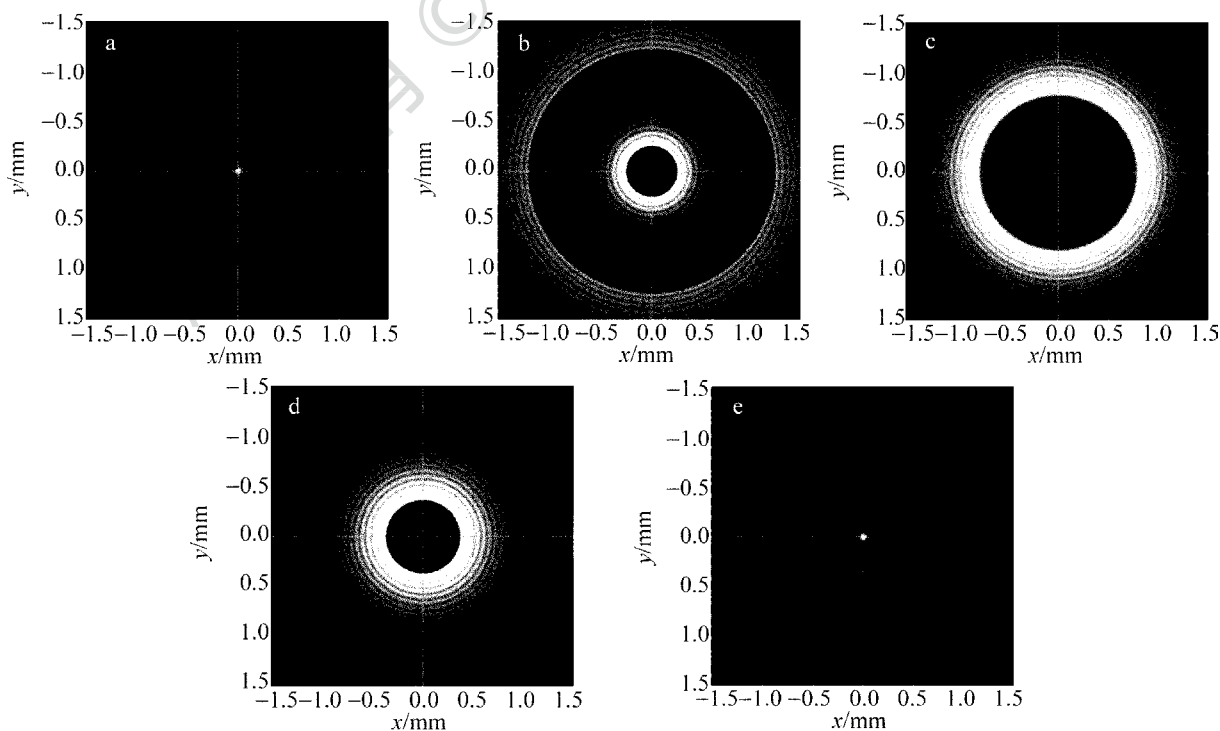


Fig. 6 Intensity distribution on transverse section at different positions with $L = 140\text{mm}$

a— $z = 143.5\text{mm}$ b— $z = 146\text{mm}$ c— $z = 149.5\text{mm}$ d— $z = 153\text{mm}$ e— $z = 156.5\text{mm}$

和正轴棱锥之间的距离 L , 对系统进行重新模拟。当 $L = 140\text{mm}$ 时, 模拟结果如图 6 所示。

软件模拟的结果表明: (1) 新型光学系统后光轴上的光强分布在一定范围内呈现一个由强逐渐减弱、再逐渐增强的过程, 这一范围所处的 3 维空间是一个由具有一定强度梯度的光束所封闭的区域, 这样的光强分布特性符合局域空心光束的描述, 即平行光通过新型光学系统可以产生单个局域空心光束; (2) 软件模拟局域空心光束的相关参量与理论分析的结果基本上是一致的; (3) 在系统元件结构参量不变的条件下, 随锥台和正轴棱锥之间距离的增加, 所产生局域空心光束的长度和最大半径也随之变大。

3 结 论

通过光线追迹和衍射积分的理论对平行光正入射新型光学系统后的光强分布进行分析。结果表明: (1) 在一定条件下, 锥面波通过正轴棱锥的变换, 可以产生零阶贝塞尔光束, 且在近似无衍射范围内其在传播方向上的光强近似不变与传播距离无关; (2) 新型光学系统可以产生单个尺寸可调局域空心光束。相比现有产生局域空心光束的光学系统, 新的光学系统具有一定优势: 系统结构简单、调校方便; 不必更换光学元件就可以产生各种不同尺寸的局域空心光束, 降低了成本。作为一种产生局域空心光束的光学系统, 其在工程和科学研究上都具有较好的应用前景。

参 考 文 献

[1] ARLT J, PADGETT M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam

[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(4): 191-193.

- [2] CHENG Zh M, WU F T, FANG X, *et al.* Multi-bottle beam generated by vaulted axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(21): 212-217 (in Chinese).
- [3] AHLUWALIA B P S, YUAN X C, TAO S H. Generation of self-imaged optical bottle beams[J]. *Optics Communications*, 2004, 238(1/3): 177-184.
- [4] PHILIP G M, VISWANATHAN N K. Generation of tunable chain of three-dimensional optical bottle beams via focused multi-ring hollow Gaussian beam[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2010, A27(11): 2394-2401.
- [5] FANG X, WU F T, CHENG Zh M. Detachable combined axicon for generating different types of bottle beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 230-235 (in Chinese).
- [6] MA L, WU F T. New combined positive axicon for generating bottle beam[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1988-1991 (in Chinese).
- [7] ZHANG Q A, WU F T, ZHENG W T, *et al.* Bottle beam generated by novel axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 320-325 (in Chinese).
- [8] ZHENG W T, WU F T, ZHANG Q A, *et al.* Geometric optics analysis on periodic bottle beam generated by a gradient axicon[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(8): 1259-1262 (in Chinese).
- [9] CHENG Zh M, WU F T, ZHANG Q A, *et al.* Liquid axicon for generating single bottle beam with size adjustable[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 94-98 (in Chinese).
- [10] ZHANG Q A, WU F T, ZHENG W T, *et al.* Simulated and experimental studies on changing the size of bottle beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 46-49 (in Chinese).
- [11] CHAVEZ-CERDA S, MCDONALD G S, NEW G H C. Non-diffracting beams: travelling, standing, rotating and spiral waves [J]. *Optics Communications*, 1996, 123(1): 225-233.
- [12] LIU L, HAO Zh Q. Propagation of sinh-Gaussian beams in gradient-index medium[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 126-129 (in Chinese).
- [13] HAN Y D, SH X J, WANG L. Transmission characteristics of flattened Gaussian beams passing through a misaligned optical system[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 704-707 (in Chinese).