

# 液体轴棱锥产生尺寸可调的单个局域空心光束

程治明 吴逢铁 张前安 郑维涛

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 提出产生尺寸可调单个局域空心光束(bottle beam)的一种液体轴棱锥新模型。从几何光学角度分析了液体轴棱锥产生局域空心光束的原理,同时利用衍射理论加以模拟验证。得出:注入液体折射率大于轴棱锥材料折射率时可产生单个局域空心光束。通过光学设计软件 TracePro 建立液体轴棱锥模型并模拟其光束传输变换特性。计算和模拟不同折射率的液体对局域空心光束尺寸、位置的影响,结果表明,液体折射率越小,所获得的局域空心光束尺寸越小,理论分析与软件模拟结果基本吻合。

**关键词** 几何光学;液体轴棱锥;局域空心光束;折射率

**中图分类号** O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1008001

## Liquid Axicon for Generating Single Bottle Beam with Size Adjustable

Cheng Zhiming Wu Fengtie Zhang Qian'an Zheng Weitao

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

**Abstract** A new model of liquid axicon for producing a single bottle beam with tunable size is proposed. In the aspect of geometrical optics, it analyses the principle that how the liquid axicon produces the bottle beam is analysed, and meanwhile, the diffracting theory is used to simulate and demonstrate. It is concluded that liquid axicon can produce single bottle beam when the liquid refractive index of the injected liquid is higher than that of the axicon material. Through optics software TracePro the model of liquid axicon is established and the properties of the transmission conversion of the light beam are simulated. The influence upon the size, location of the bottle beam with different refractive index is calculated and simulated, and the conclusion shows that, the lower the liquid refractive index is, the smaller the size of bottle beam is, and the theoretical analysis basically corresponds with the simulation result.

**Key words** geometric optics; liquid axicon; bottle beam; refractive index

**OCIS codes** 080.2740; 160.4670; 220.2740; 260.1960

## 1 引 言

局域空心光束(bottle beam)是一种沿光传播方向上有着强度为零的三维封闭区域,并且周围围绕着高强度的光,形成极高的强度梯度。对于处在暗域的微粒存在因光压而产生的束缚力,可作为激光导管<sup>[1]</sup>、光镊<sup>[2]</sup>和光学扳手<sup>[3]</sup>等工具,还可以用于激光囚禁微观粒子和中性原子、分子和生物细胞

等<sup>[4~6]</sup>,在生命科学和纳米科技中有着重要的应用。因此,一直是研究的一个热点。另外,由于被操控的微粒尺寸不同,因此对局域空心光束的尺寸会有不同的要求,这也使得对局域空心光束尺寸变换的研究具有较大的实用价值。

目前,产生局域空心光束的方法有多种。例如轴棱锥透镜系统产生贝塞尔光后,通过透镜聚焦可

**收稿日期**: 2011-04-14; **收到修改稿日期**: 2011-05-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977068)、泉州市科技重点项目(2009G4)和华侨大学重点建设项目资助课题。

**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)

以形成单个局域空心光束<sup>[7]</sup>,两束同频率且具有不同径向波矢分量的贝塞尔光相干可形成周期性的局域空心光束<sup>[8]</sup>,本课题组对此也作了一些理论和实验研究,并在此基础上提出了梯度轴棱锥<sup>[9]</sup>、阶变折射率轴棱锥<sup>[10]</sup>等一系列产生局域空心光束的新型光学元件,实现了单一元件即可产生单个或多个周期性的局域空心光束。但这些元件的不足之处在于元件制造出来之后其参量是单一固定的,由此它们产生的局域空心光束尺寸也就固定了,而囚禁不同的微观粒子通常需要不同尺寸的局域空心光束,为解决这一问题,本文提出了一种产生局域空心光束的新型光学元件——液体轴棱锥。这种轴棱锥保留了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%)的优点,同时在液体轴棱锥中注入液体,由于液体具有流动性,易于更换,通过更换不同折射率的液体,可以得到不同尺寸的局域空心光束,以满足对不同尺寸微粒操控的要求,大大提高了轴棱锥的利用率,也增强了局域空心光束的实用性,在某种层面上也大大降低了元件的制造成本。从几何光学的角度出发对液体轴棱锥产生局域空心光束原理进行分析,导出了局域空心光束尺寸与元件参量的关系,通过光学设计软件 TracePro 建立液体轴棱锥模型并模拟其光束变换特性,分析了在注入不同折射率的液体时轴棱锥产生局域空心光束的尺寸与折射率的关系。理论与软件模拟结果基本吻合。

## 2 理论分析

### 2.1 元件设计

传统轴棱锥如图 1(a)所示,液体轴棱锥是在传统轴棱锥底部去除一个同顶角而不同底面半径的小轴棱锥,再与一个在中心挖去一小圆柱的同底面半径圆柱胶合而成,如图 1(b)示,其中虚线包围的内部空腔和上方的小孔(半径很小,对光束变换的影响可以忽略)用于注入特定折射率的液体。

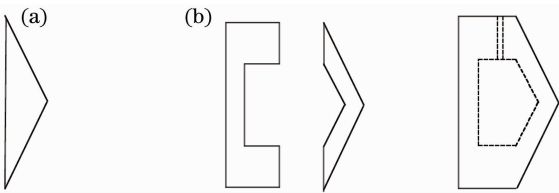


图 1 (a) 传统轴棱锥;(b) 液体轴棱锥

Fig.1 (a) Traditional axicon; (b) liquid axicon

### 2.2 液体轴棱锥产生单个局域空心光束

如图 2 所示,若在液体轴棱锥的空腔内注入液

体的折射率  $n_2$  大于腔体折射率  $n_1$ ,当平面波垂直入射时,光束在半径  $R_2 < r \leq R_1$  的区域相当于底角为  $\gamma$  的传统轴棱锥。光束半径  $0 < r \leq R_2$  的区域垂直入射到内部液体中后还要经过两次折射(经液体折射到轴棱锥中,再经轴棱锥折射到空气中),如图 3 所示。

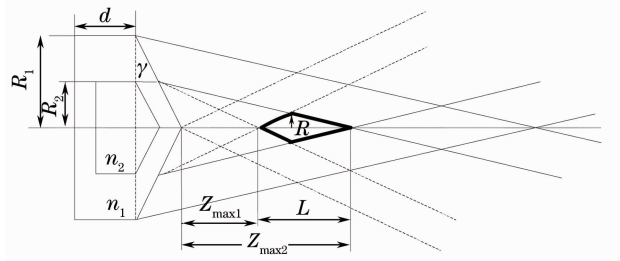


图 2 液体轴棱锥产生单个局域空心光束

Fig.2 Single bottle beam generated by a liquid axicon

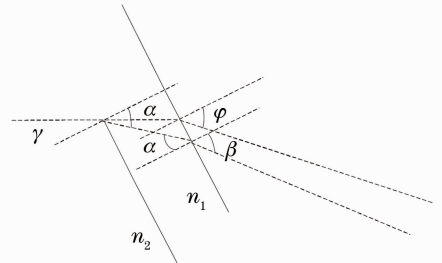


图 3 光路图

Fig.3 Optical path diagram

由折射定律分析可得

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \varphi} = \frac{1}{n_1}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n_1} \end{cases} \quad (2)$$

由(1)和(2)式联立可得

$$\varphi = \arcsin(n_1 \sin \gamma), \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin(n_2 \sin \gamma), \quad (4)$$

由于  $n_1 < n_2$ ,光在从液体折射到轴棱锥中时是从光密到光疏,可能会发生全反射。由(2)式中第一式知要避免全反射的发生必须  $n_2 < \frac{n_1}{\sin \gamma} \approx 2.9872$ 。因为  $n_1 < n_2$ ,所以有  $\varphi < \beta$ 。即  $0 < r \leq R_2$  的区域比  $R_2 < r \leq R_1$  的区域对入射光线有更强的偏折能力,因此会产生单个的局域空心光束。并且  $\varphi$  只与轴棱锥材料的折射率有关, $\beta$  可随液体折射率的变化而变化: $n_2$  越大, $\beta$  越大,局域空心光束尺寸越大;反之, $n_2$  越向  $n_1$  逼近,局域空心光束尺寸越小。从而可以通过更换不同折射率的液体获得不同尺寸的局

域空心光束。

局域空心光束的起点位置  $Z_{\max 1}$  和终点位置  $Z_{\max 2}$  均可用几何关系得出

$$Z_{\max 1} = R_2 \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \gamma\right) + d + R_2 \tan \gamma, \quad (5)$$

$$Z_{\max 2} = R_2 \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \gamma\right) + d + R_2 \tan \gamma. \quad (6)$$

其长度  $L$  为

$$L = Z_{\max 2} - Z_{\max 1} = R_2 \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \gamma\right) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \gamma\right) \right], \quad (7)$$

局域空心光束的宽度  $R$  为

$$R = \frac{R_2 \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \gamma\right) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \gamma\right) \right]}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \gamma\right) + \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \gamma\right)}. \quad (8)$$

### 3 实验模拟

#### 3.1 产生单个局域空心光束

采用 TracePro 软件仿真。轴棱锥材料选用 BK7, 其折射率  $n_1 = 1.51872$ , 选用的内部液体折射率  $n_2 = 1.594$ 。  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $R_1 = 10 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ 。用光线追迹得到图像如图 4 所示, 在两束光线相交的棱形区域产生了局域空心光束。

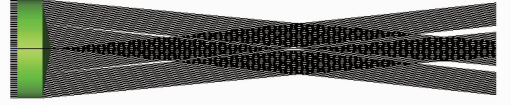


图 4 单个局域空心光束光路追迹图

Fig. 4 Optical path tracing for a single bottle beam

图 5 中取了几个不同位置的截面图及剖面曲线可以更清楚地看到局域空心光束随传输距离的变化过程。实验模拟测得的数据与(1)~(8)式计算所得数据的比较如表 1 所示。

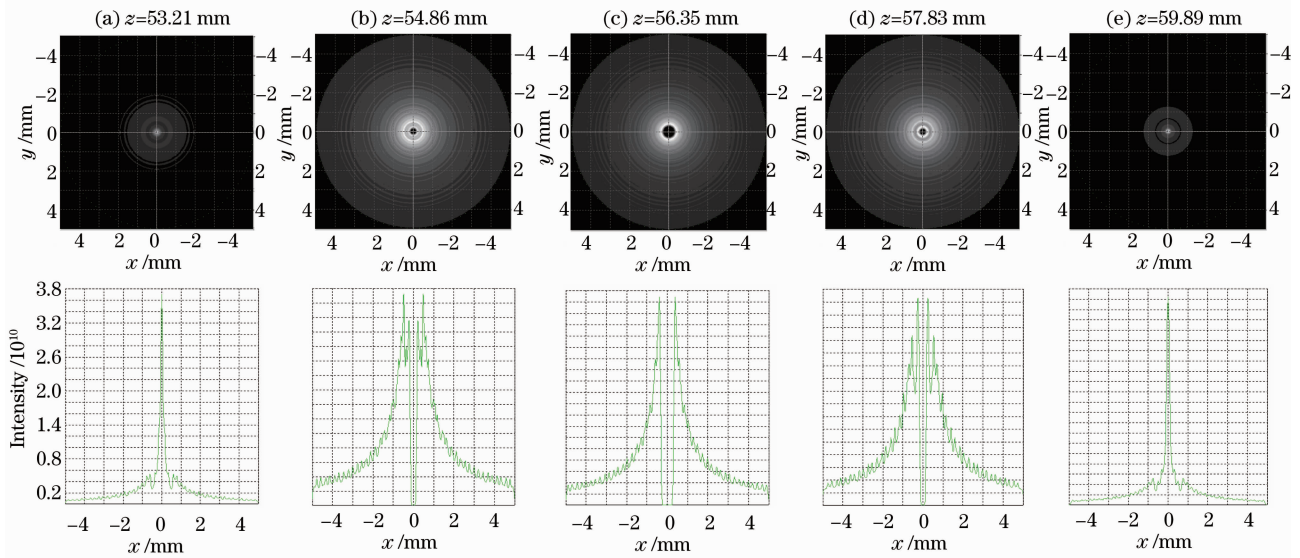


图 5 不同位置局域空心光束的截面及剖面图

Fig. 5 Cross section profiles of bottle beam at different positions

表 1 理论计算与实验模拟所得局域空心光束尺寸比较

Table 1 Size comparison of the bottle beam between calculation and simulation

	Starting point $Z_{\max 1}$ /mm	Ending point $Z_{\max 2}$ /mm	Length $L$ /mm	Width $R$ /mm
Theoretical calculation	52.9013	59.9473	7.0460	0.3446
Simulation	52.8674	59.9398	7.0724	0.3528

理论计算与实验模拟结果基本吻合。

从衍射理论分析亦可看出轴上光强的变化。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  $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$  导出<sup>[11]</sup>

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

式中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  是波矢的模,  $\gamma$  和  $n$  分别为轴棱锥的底角和折射率,  $R$  为入射光束半径。

平面波垂直入射到液体轴棱锥时, 出射光场则分为两部分, 一部分是  $0 < r \leq R_2$  部分形成的光场  $E_1$ , 另一部分是  $R_2 < r \leq R_1$  部分形成的光场  $E_2$ , 由  $E_1$  和  $E_2$  的光场表达式

$$E_1(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^{R_2} \left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n_2-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (10)$$

$$E_2(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_{R_2}^{R_1} \left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n_1-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (11)$$

得到轴棱锥之后区域的总光场即为  $E_1$  和  $E_2$  的相干叠加, 因此液体轴棱锥后的光强分布可表示为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (12)$$

根据(10)~(12)式可用 MathCAD 进行光场的衍射模拟, 相关参数的选取与 TracePro 模拟选取的参数一致。得到轴上的光强分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出产生局域空心光束的位置与几何光学模拟结果基本吻合。

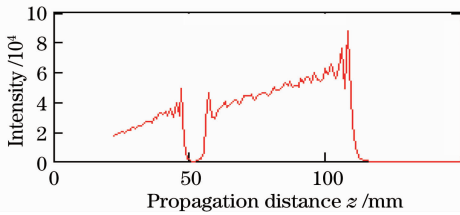


图 6 轴上光强分布

Fig. 6 Intensity distribution on axis

### 3.2 不同折射率的液体产生不同尺寸的局域空心光束

为讨论不同折射率液体注入轴棱锥对局域空心光束尺寸的影响, 分别选折射率为 1.68, 1.64 和 1.60 的三种液体进行模拟并对比, 如图 7 所示。所取参量除液体折射率  $n_2$  外均与 3.1 中模拟实验所取参量相同。

表 2 给出了模拟实验的参量结果。从中可以看出:

表 2 不同折射率液体注入轴棱锥中产生的局域空心光束尺寸比较

Table 2 Size comparison for several bottle beams generated in liquid axicons filled with different refractive indexes

Liquid refractive index $n_2$	Starting point $Z_{\max 1}$ /mm	Ending point $Z_{\max 2}$ /mm	Length $L$ /mm	Width $R$ /mm
1.68	46.7319	59.8643	13.1544	0.6953
1.64	49.3836	59.8673	10.4837	0.5472
1.60	52.3810	59.8681	7.4871	0.3906

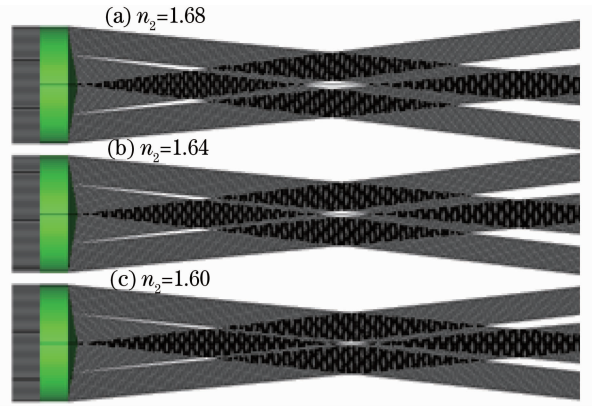


图 7 几种不同折射率液体轴棱锥产生单个局域空心光束的模拟

Fig. 7 Simulation for several bottle beams generated in different refractive indexes in liquid axicons

1) 所产生的三个局域空心光束的尺寸随折射率的变化而变化, 折射率最大的图 7(a) 局域空心光束的尺寸最大, 而折射率最小的图 7(c) 局域空心光束的尺寸最小。由此可以得出在  $n_1 < n_2$  时, 局域空心光束的尺寸随液体折射率减小而减小。

2) 从图中可以看出, 局域空心光束的起点随折射率变化, 但终点在误差范围内可视为不变。

以上两点均与 2.2 中分析的吻合。

据此, 证明可以通过更换不同折射率的液体来达到改变局域空心光束尺寸的目的。

## 4 结 论

提出了产生局域空心光束的新模型——液体轴棱锥。适当更换其中的液体,能够产生单个的局域空心光束,并能满足获得不同尺寸局域空心光束的要求。与以往产生局域空心光束的装置相比,液体轴棱锥通过单一元件即可获得尺寸可调的局域空心光束,具有转换效率高,光损伤阈值高,可多次使用并能方便地调节的优点。为获取尺寸可调的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 S. A. Tatarkova, W. Sibbett, K. Dholakia. Brownian particle in an optical potential of the washboard type[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 038101
- 2 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145~147
- 3 Q. Li, W. L. Feng, X. M. Hu *et al.*. Theoretical study of the trapping efficiency of an optical tweezers array system [J]. *Chinese Phys. B*, 2008, **17**(2): 726~735
- 4 Q. Zhou, J. F. Lu, J. P. Yin. Matter-wave interference in an axial triple-well optical dipole trap [J]. *Chinese Phys. B*, 2010, **19**(9): 093202-8
- 5 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
- 6 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
- 7 Lu Wenhe, Wu Fengtie. Geometric optics analysis on the bottle beam generated from an axicon-lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2924~2927  
卢文和, 吴逢铁. 轴棱锥透镜系统产生 Bottle-beam 的几何光学解释[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2924~2927
- 8 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
- 9 Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin *et al.*. Single bottle beam generated by a gradient axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2410~2415  
吴逢铁, 江新光, 刘 彬 等. 梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam [J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2410~2415
- 10 Ma Liang, Wu Fengtie, Ma Baotian. A bottle beam generated by a step refractive index axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **49**(9): 6096~6100  
马 亮, 吴逢铁, 马宝田. 阶变折射率轴棱锥产生局域空心束 [J]. *物理学报*, 2010, **49**(9): 6096~6100
- 11 A. T. Friberg. Stationary-phase analysis of generalized axicons [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(4): 743~750