

# 轴棱锥 - 透镜系统产生局域空心光束中心亮斑的消除\*

张前安 吴逢铁<sup>†</sup> 郑维涛

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2011年3月9日收到; 2011年4月21日收到修改稿)

提出利用相位调制的新方法, 在光路中插入螺旋相位板, 使局域空心光束 (Bottle beam) 中心变为相位奇点, 在使用轴棱锥 - 透镜系统产生 Bottle beam 时, 消除了衍射等因素导致 Bottle beam 内部的轴上光强, 这利于用 Bottle beam 构建空心光镊系统. 理论分析及数值模拟与实验结果符合很好.

**关键词:** 物理光学, 局域空心光束, 衍射理论, 轴上光强

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Fx, 42.25.Gy, 87.80.Cc

## 1 引言

激光光镊自 1970 年由 Ashkin 等<sup>[1]</sup> 提出以来, 作为一种无直接接触、可产生和检测微小力以及精确测量微小位移的物理工具, 在生命科学和纳米科学等领域得到了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>. 传统的光镊系统一般通过聚焦高斯激光束实现梯度力势阱来俘获微观粒子, 作用在粒子上的力主要包含二个分量: 由电场梯度引起的梯度力分量和由粒子吸收光子所产生的光散射力分量. 其中梯度力分量直接指向光束焦点, 构成一囚禁力, 将粒子囚禁在焦点附近; 而散射力沿着光束传播的方向, 通常对光学囚禁是有害的. 另外, 传统光镊系统只能工作在光束焦点附近, 高度聚焦的高斯光束也可能对生物微粒造成严重的热损伤<sup>[5]</sup>.

局域空心光束 (Bottle beam) 是一种沿光传播方向上有着强度极低 (甚至为零) 的三维封闭区域的光学势阱<sup>[6-8]</sup>, 具有极高的强度梯度. 如果采用 Bottle beam 构建空心光镊系统, 则能够把粒子囚禁在中心附近的暗中空区域, 囚禁效率可望更好. 这是因为 Bottle beam 中的轴向光强极低, 由光吸收导致的轴向光散射力非常小. 此外, 由于粒子被囚禁在 Bottle beam 中心附近, 由光吸收引起的粒子热损伤也非常小<sup>[5]</sup>. 再者, 聚焦高斯光束构成的光镊

只能囚禁相对折射率大于 1 的微观粒子, 而 Bottle beam 囚禁粒子的相对折射率不仅可大于 1, 也可小于 1<sup>[9]</sup>. 目前, 产生 Bottle beam 的方法有多种, 例如, 轴棱锥 - 透镜系统产生 Bessel 光并聚焦可以形成单个 Bottle beam<sup>[10-12]</sup>, 两束同频率且具有不同径向波矢分量的 Bessel 光相干可行成周期性的 Bottle beam<sup>[13,14]</sup>, 两束同频率且不同束腰半径的基模高斯光束干涉也可以形成 Bottle beam<sup>[15]</sup>, 新型锥透镜产生 Bottle beam<sup>[16,17]</sup> 等. 轴棱锥 - 透镜系统产生 Bottle beam 结构简单, 产生的 Bottle beam 具有极高的强度梯度, 但是由于衍射效应等因素的影响, Bottle beam 内部的轴上光强通常不为零, 形成一个亮斑<sup>[10,11,18]</sup>, 这对于利用 Bottle beam 构建空心光镊系统是不利的, 且有效消除此中心亮斑的方法国内外尚无报道. 本文提出利用相位调制的新方法, 在光路轴插入螺旋相位板, 使 Bottle beam 内部的轴上变为相位奇点, 因此轴上光强为零, 从而很好地消除了 Bottle beam 的轴上亮斑. 理论分析和数值模拟与实验结果符合很好.

## 2 理论分析及数值模拟

### 2.1 轴棱锥 - 透镜系统产生 Bottle beam

平行光垂直入射到轴棱锥上产生近似无

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068, 61178015)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金 (批准号: SG 001102) 和泉州市科技重点项目 (批准号: 2011G9) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

衍射 Bessel 光, 其最大无衍射距离<sup>[12]</sup>  $Z_{\max} = R/[(n-1)\gamma]$ , 其中  $R$  是入射光束的半径,  $n$  是轴棱锥的折射率,  $\gamma$  是轴棱锥底角. 在最大无衍射距离内插入一个合适的聚焦透镜, 透镜后即可产生 Bottle beam<sup>[10,12]</sup>, 如图 1 阴影部分所示.

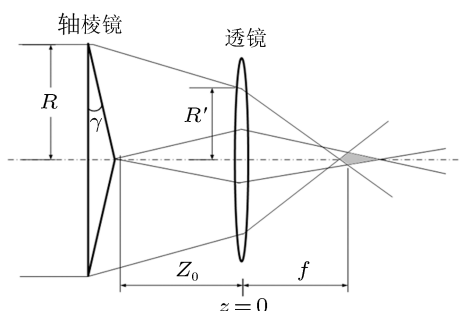


图 1 轴棱锥 - 透镜系统产生 Bottle beam 的几何原理图

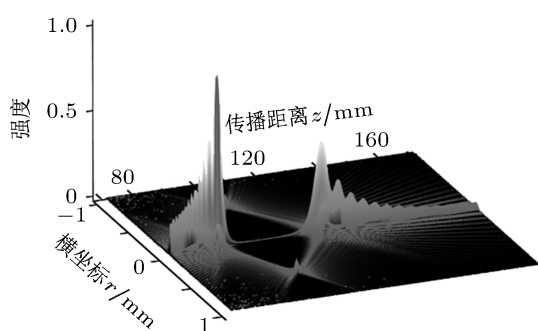


图 2 聚焦透镜后的三维光强分布

由傍轴近似可得 Bottle beam 轴上起点和终点位置为<sup>[12]</sup>

$$z_1 = \frac{f - z_0 f / Z_{\max}}{1 + f / Z_{\max} - z_0 / Z_{\max}}, \quad (1)$$

$$z_2 = \frac{z_0 f}{z_0 - f}. \quad (2)$$

入射到透镜上的 Bessel 光束光场可表示为

$$E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r r_1), \quad (3)$$

式中,  $A_0$  是复振幅常数,  $r_1$  是径向波矢分量,  $J_0$  为第一类零阶 Bessel 函数,  $k_r$  为波矢的径向分量. Bessel 光束经过焦距为  $f$  的聚焦透镜并传输距离为  $z$  时的传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{z}{f} & z \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

利用柯林斯公式的推广, 在柱坐标系下的广义惠更斯 - 菲涅耳衍射积分公式可以得到经过聚焦透镜后的光场<sup>[11]</sup>

$$E(r, z) = \frac{-ik}{z} A_0 \exp(ikL) \times \exp\left(\frac{ik}{2z} r^2\right) \int_0^{R'} J_0(k_r r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f}(r_1)^2\right] r_1 dr_1, \quad (5)$$

式中,  $R'$  为光束在聚焦透镜上的投射半径. 由图 1 可以得出  $R' = R - z_0(n-1)\gamma$ .

聚焦透镜后的光强分布为

$$I(r, z) = \left(\frac{kA_0}{z}\right)^2 \left| \int_0^{R'} J_0(k_r r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f}(r_1)^2\right] r_1 dr_1 \right|^2. \quad (6)$$

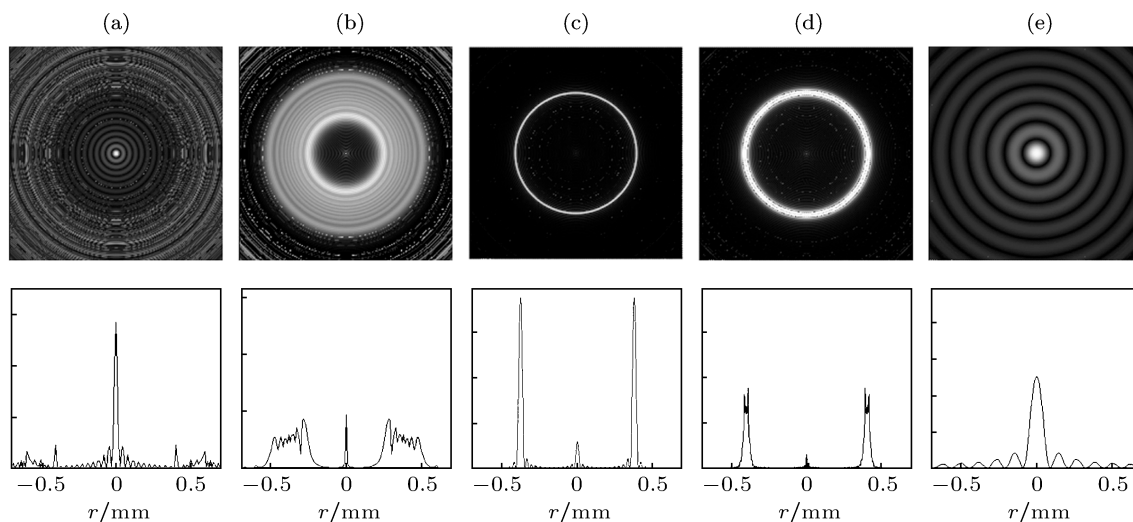


图 3 聚焦透镜后不同距离处截面光强分布 (a)  $z = 50$  mm; (b)  $z = 95$  mm; (c)  $z = 100$  mm; (d)  $z = 102$  mm; (e)  $z = 250$  mm

选取参数：光阑半径  $R = 5 \text{ mm}$ ，波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ，轴棱锥底角  $\gamma = 0.5^\circ$ ，轴棱锥折射率  $n = 1.516$ ，聚焦透镜焦距  $f = 100 \text{ mm}$ 。则轴棱锥后的最大无衍射距离  $Z_{\text{max}} = 1.11 \times 10^3 \text{ mm}$ 。取  $z_0 = 650 \text{ mm}$ ，由 (1) 和 (2) 式可得 Bottle beam 起点和终点位置  $Z_1 = 82.2 \text{ mm}$ ， $Z_2 = 118.2 \text{ mm}$ 。利用 (6) 式可以对聚焦透镜后的光强分布进行模拟，结果如图 2 和图 3 所示。

由图 3 可以看出，聚焦透镜后一小段距离内形成近似零阶 Bessel 光束特性的光强分布，随着传输距离的增加，光束出现开口，并在聚焦透镜的焦平面处开口达到最大，继续传播后开口变小并最后闭合，又恢复了近似零阶 Bessel 光束特性的分布。在前后两束近似零阶 Bessel 光束之间形成一个局域分布的近似中空光束，即 Bottle beam。按照图 1 几何光学分析可知，轴棱锥 - 透镜系统形成的 Bottle beam 内部应该是没有光束通过的，即内部光强为零。但是由图 2 衍射理论分析可见，Bottle beam 内部的轴上还有微弱的光强分布。图 3 为对应于图 2 的不同距离处截面光强分布，由图 3 可以更加清楚地看到 Bottle beam 内部轴上的光强分布，可见 Bottle beam 并不完全是中空的。

### 2.2 加入 SPP 的轴棱锥 - 透镜系统产生 Bottle beam

在上述轴棱锥 - 透镜系统的基础上，若在轴棱锥前面加入拓扑电荷数为  $n$  的螺旋相位板 (SPP)，则平面波经过 SPP 后就变成了带有螺旋相位因子  $e^{in\phi}$  的涡旋光束 [19]，轴上为相位奇点，轴上光强为零。涡旋光束经轴棱锥聚焦可以形成近似的高阶 Bessel 光束，以聚焦透镜处为  $z$  轴起点，则

入射到聚焦透镜上的高阶 Bessel 光束光场可表示为 [20,21]

$$E'_1(r_1) = A_0 J_n(n, k_r r_1) e^{in\phi}, \quad (7)$$

其中  $J_n$  为  $n$  阶 Bessel 函数， $\phi$  为方位角。

再次利用柯林斯公式的推广，在柱坐标系下的广义惠更斯 - 菲涅耳衍射积分公式可以得到经过聚焦透镜后的光场 [22]

$$E'(r, z) = \frac{-ik}{z} A_0 \exp(ikL + in\phi) \times \exp\left(\frac{ik}{2z} r^2\right) \int_0^{R'} J_n(k_r r_1) J_n\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f}(r_1)^2\right] r_1 dr_1, \quad (8)$$

相应的光强分布为

$$I'(r, z) = \left(\frac{kA_0}{z}\right)^2 \left[ \left| \int_0^{R'} J_n(k_r r_1) J_n\left(\frac{kr_1 r}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ik(r_1)^2}{2z} - \frac{ik}{2f}(r_1)^2\right] r_1 dr_1 \right|^2 \right]. \quad (9)$$

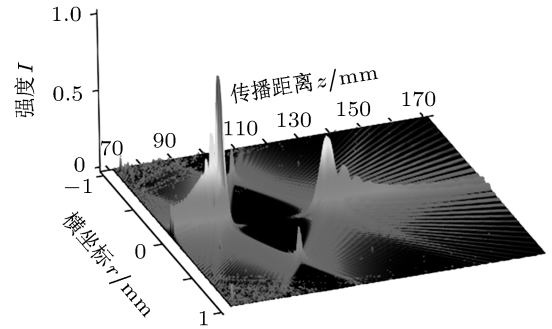


图 4 加入 SPP 后聚焦透镜后的三维光强分布

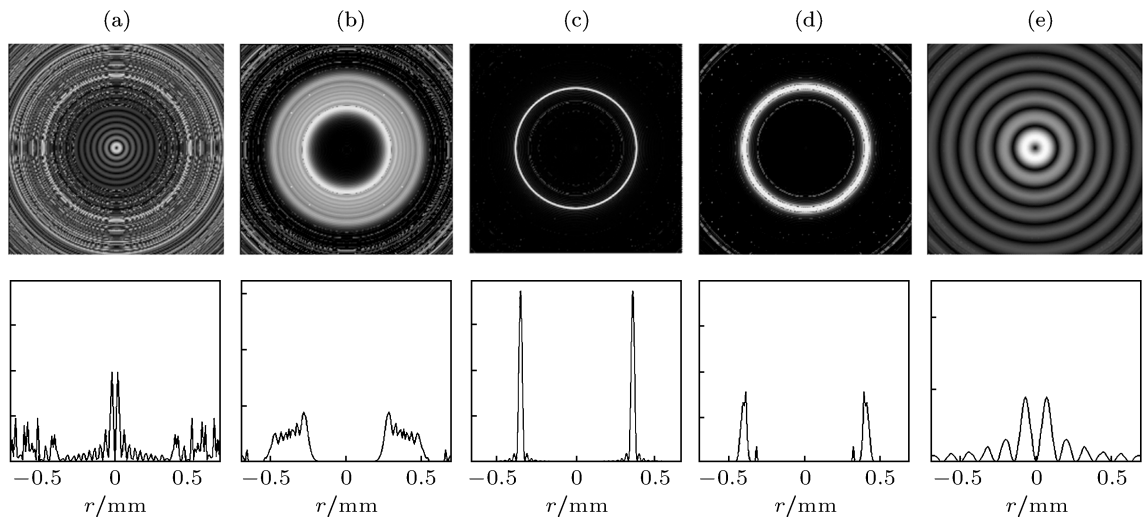


图 5 加入 SPP 后聚焦透镜后不同距离处截面光强分布 (a)  $z = 50 \text{ mm}$ ; (b)  $z = 95 \text{ mm}$ ; (c)  $z = 100 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 102 \text{ mm}$ ; (e)  $z = 250 \text{ mm}$

令加入的 SPP 的拓扑电荷数  $n = 1$ , 其他参数与 1.1 部分相同, 利用 (9) 式可以模拟得聚焦透镜后的光强分布如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 3 对比可以看出, 加入 SPP 后, Bottle beam 基本形状保持不变, 但是由于 SPP 引入的螺旋相位因子使得轴上变为相位奇点, 因此 Bottle beam 内部轴上光强变为零, Bottle beam 前后也呈两束近似一阶 Bessel 光束特性的分布. 图 5 为加入 SPP 后对应于图 3 相同位置处的截面光强分布. 可以清楚地看出 Bottle beam 内部的轴上光强被很好地消除, 形成几乎中空的 Bottle beam.

### 3 实验验证

实验装置如图 6 所示, 实验参数与数值模拟参数相同. 在未加入图 6 虚线框内的 SPP 情况下, 利

用 OPHIR 公司 SP620U 型 CCD 成像系统拍摄截面光强图, 选择聚焦透镜处为  $z$  轴起点位置. 图 7 为实验拍摄对应于图 3 数值模拟的不同位置处截面光强分布图, 在  $z = 95 \text{ mm}$  和  $z = 102 \text{ mm}$  处轴上亮斑清晰可见, 聚焦透镜焦平面处轴上光斑因相对光强太弱而检测不到, 与理论模拟图 3 基本符合.

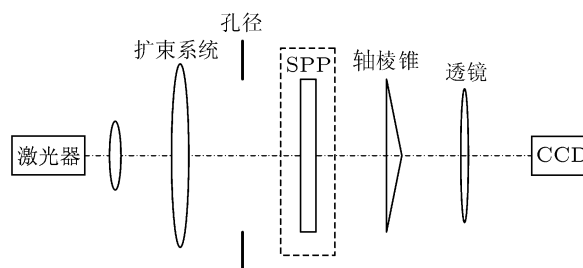


图 6 实验装置图

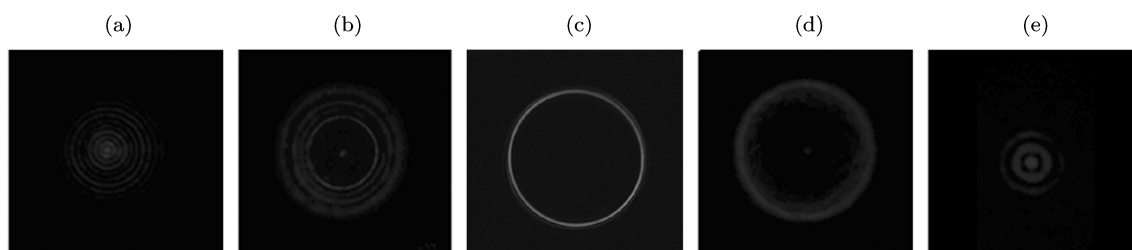


图 7 实验拍摄聚焦透镜后不同距离处截面光强分布 (a)  $z = 50 \text{ mm}$ ; (b)  $z = 95 \text{ mm}$ ; (c)  $z = 100 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 102 \text{ mm}$ ; (e)  $z = 250 \text{ mm}$

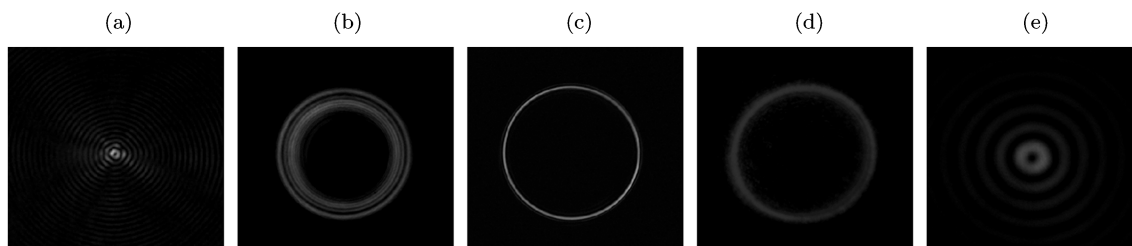


图 8 实验拍摄加入 SPP 后聚焦透镜后不同距离处截面光强分布 (a)  $z = 50 \text{ mm}$ ; (b)  $z = 95 \text{ mm}$ ; (c)  $z = 100 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 102 \text{ mm}$ ; (e)  $z = 250 \text{ mm}$

保持上述实验装置不变, 在光阑和轴棱锥之间加入拓扑电荷数  $n = 1$  的 SPP, 如图 6 虚线框部分所示. 再次利用 CCD 成像系统拍摄对应于图 5 的不同位置截面光强分布图, 在  $z = 95 \text{ mm}$  和  $z = 102 \text{ mm}$  处轴上亮斑已被消除 (图 8), 与图 5 模拟结果符合.

### 4 结论

轴棱锥 - 透镜系统形成 Bottle beam 时, 由于

衍射等因素的影响常导致 Bottle beam 内部的轴上光强不为零. 基于柱坐标下的柯林斯公式, 分析并模拟了轴棱锥 - 透镜系统形成 Bottle beam 的过程. 从模拟结果发现, 轴棱锥 - 透镜系统形成的 Bottle beam 内部的轴上确实存在微弱光强. 本文提出在光路中插入螺旋相位板的方法引入螺旋相位因子, 使轴上变为相位奇点, 从而很好地消除了 Bottle beam 内部的轴上光强. 理论分析及模拟与实验结果符合很好, 研究结果对于 Bottle beam 在构建空心光镊系统方面具有一定的实用价值.

- [1] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156  
 [2] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810  
 [3] Moffitt J R, Chemla Y R, Smith S B 2008 *Annu. Rev. Biophys.* **77** 205  
 [4] Brunner M, Dobnikar J, Grünberg H H V, Bechinger C 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 078301  
 [5] Qiu J P, Liu N C, Xia Y, Yun M 2004 *Progress in Physics* **24** 336 (in Chinese) [印建平, 刘南春, 夏勇, 恽旻 2004 物理学进展 **24** 336]  
 [6] Ozeri R, Khaykovich L, Friedman N, Davidson N 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1113  
 [7] Arlt J, Padgett M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 191  
 [8] Bokor N, Davidson N 2007 *Opt. Commun.* **279** 229  
 [9] Ahluwalia B P S, Yuan X C, Tao S H, Cheong W C, Zhang L S, Wang H 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 113104  
 [10] Chávez C S, New G H C 2000 *Opt. Commun.* **181** 369  
 [11] Lü B D, Huang W, Zhang B, Kong F, Zhai Q 1996 *Opt. Commun.* **131** 223  
 [12] Wei M D, Shiao W L, Lin Y T 2005 *Opt. Commun.* **248** 7  
 [13] Ahluwalia B P S, Yuan X C, Tao S H 2004 *Opt. Commun.* **238** 177  
 [14] Wu F T, Liu B, Lu W H, Ma B T 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 2899 (in Chinese) [吴逢铁, 刘彬, 卢文和, 马宝田 2009 中国激光 **36** 2899]  
 [15] Isenhower L, Williams W, Dally A, Saffman M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1159  
 [16] Wu F T, Jiang X G, Liu B, Qiu Z X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 43 (in Chinese) [吴逢铁, 江新光, 刘彬, 邱振兴 2009 物理学报 **58** 43]  
 [17] Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T, Ma L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094201 [张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 马亮 2011 物理学报 **60** 094201]  
 [18] Lü B D, Huang W L, Zhang B 1995 *Opt. Commun.* **119** 6  
 [19] Kotlyar V V, Almazov A A, Khonina S N, Soifer V A 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 849  
 [20] Arlt J, Dholakia K 2000 *Opt. Commun.* **177** 297  
 [21] Jarutis V, Paskauskas R, Stabinis A 2000 *Opt. Commun.* **184** 105  
 [22] Lu X H, Chen X M, Zhang L, Xue D J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 2155

## Eliminating the center spot of bottle beam generated by axicon-lens system\*

Zhang Qian-An Wu Feng-Tie<sup>†</sup> Zheng Wei-Tao

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

(Received 29 March 2011; revised manuscript received 21 April 2011)

### Abstract

When generating a bottle beam by using an axicon-lens system, diffraction factors often cause a bright spot in the center of bottle beam. This central bright spot is unfavorable for the using of bottle beam in constructing hollow optical tweezers system. In the article, we propose a new method of phase modulation, by adding a spiral phase plate to optical path to make the bottle beam center have phase singularity, thereby eliminating the bright spot well. Theoretical analysis and numerical stimulation are shown to agree with the experimental results.

**Keywords:** physical optics, Bottle beam, diffraction theory, axial intensity

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Fx, 42.25.Gy, 87.80.Cc

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977068, 61178015), the High Power Laser Physics Key Laboratory Open Foundation of China (Grant No. SG001102), and the Science and Technology Key Project of Quanzhou, China (Grant No. 2011G9).

<sup>†</sup> E-mail: fengtie@hqu.edu.cn