

新型锥透镜产生局域空心光束*

张前安 吴逢铁[†] 郑维涛 马亮

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2010年10月12日收到; 2010年11月6日收到修改稿)

首次提出产生局域空心光束(Bottle beam)的另一类新型锥透镜模型. 讨论了凹凸两种模型, 分别是在传统轴棱锥的底部磨削和胶合圆台结构形成. 研究表明平面波正入射新型凹锥透镜可产生单个 Bottle beam, 正入射新型凸锥透镜可形成具有周期性的 Bottle beam. 通过几何光学分析了产生 Bottle beam 的原理, 计算了 Bottle beam 的相关参数. 由衍射积分理论分析和模拟了新型锥透镜后的光强分布特性, 所得分析结果与几何光学分析基本符合.

关键词: 新型锥透镜, Bottle beam, 轴棱锥, Bessel 光

PACS: 42.15.Eq, 42.25.Bs, 42.25.-p

1. 引言

局域空心光束(Bottle beam)被描述为一束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束^[1-3], 具有极高的强度梯度. 因为 Bottle beam 可作为激光导管^[4]、光镊^[5,6]和光学扳手^[7,8]等工具, 还可以用于激光囚禁微观粒子和中性原子、分子、生物细胞等^[9-12], 实现对微粒非接触无损地操控, 同时几乎不影响粒子的周围环境, 在生命科学和纳米科技中有重要应用. 因此, 一直是研究的一个热点.

目前, 产生 Bottle beam 的方法有多种. 例如, Arlt 和 Padgett 提出的光学全息法^[2], Tai 等^[13]通过抽运光束和限制孔径的端面抽运固体激光器来产生 Bottle beam, Zhao 等^[14]提出了一种利用衍射光学元件来产生光链的方法. 随着光束整形技术的发展, Arlt 等^[2]利用高斯光束和拉盖尔-高斯光束干涉产生 Bottle beam, Monk 等^[15,16]发现利用轴棱锥透镜系统产生 Bessel 光并聚焦可以形成 Bottle beam, 我们研究小组对此也作了理论和实验研究^[17]. 近年来, Ahluwalia 等^[18]和吴逢铁等^[19,20]提出用单一元件-梯度轴棱锥和阶变折射率轴棱锥产生 Bottle beam. 但是梯度轴棱锥需要在锥面上加工出突变的锥角, 阶变折射率轴棱锥需要两种折射率不同的材

料特定组合才能加工, 因此都存在加工上的困难. 本文利用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, 提出了一种产生 Bottle beam 的新型锥透镜模型, 与以往产生 Bottle beam 的装置相比, 保留了轴棱锥的优点, 降低了新型锥透镜加工的难度. 下面具体从几何光学和衍射理论出发对新型锥透镜产生 Bottle beam 过程进行分析, 计算并模拟衍射光强分布.

2. 理论分析

一束平行光正入射到轴棱锥上将被转换为具有相同偏转角 φ (入射光与出射光的夹角)的锥面光波, 锥面波相干叠加就形成了近似无衍射 Bessel 光. 如图 1(a)所示, 轴棱锥后的菱形交叠区就是形成的近似无衍射区. 图 1(b)为形成的 Bessel 光纵向光强模拟图.

由几何关系得偏向角

$$\varphi \approx (n-1)\gamma. \quad (1)$$

最大无衍射距离

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

其中 R 为入射轴棱锥的光束半径, n 为轴棱锥的折射率, γ 轴棱锥的底角. 由(1)式可以看出, 在轴棱锥折射率均匀的情况下, 出射光束的偏向角 φ 与轴棱锥底角近似成正比关系.

* 国家自然科学基金(批准号:60977068)和泉州市科技重点项目(批准号:2009G4)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn

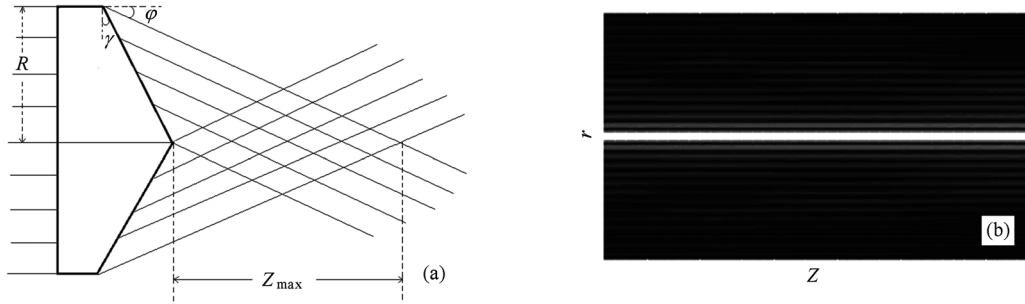


图1 (a)平面波通过锥透镜产生 Bessel 光束;(b)Bessel 光纵向光强分布模拟图

2.1. 新型凹锥透镜产生单个 Bottle beam

图2(a)为新型凹锥透镜模型,相当于底角为 γ_1 的传统轴棱锥磨削掉底部虚线部分形成,磨削掉部分为一圆台结构,底角为 γ_2 ,且 $\gamma_1 > \gamma_2$. 从剖面看,磨削掉部分为一个上底为 $2R_2$,下底为 $2R_1$,底角为 γ_2 的等腰梯形.

平面波入射该新型凹锥透镜时,光束半径 $0 < r \leq R_2$ 的区域相当于底角为 γ_1 的传统轴棱锥. 光束

半径 $R_2 < r \leq R_1$ 的区域相当于底角为 $\gamma_1 - \gamma_2$ 的传统轴棱锥. 由前面(1)式可知,出射光束的偏向角与轴棱锥底角近似成正比关系. 因此新型凹锥透镜 $0 < r \leq R_2$ 和 $R_2 < r \leq R_1$ 的区域对入射平面波将产生不同的偏向角,且 $0 < r \leq R_2$ 的部分产生较大的偏向角. 两部分具有不同偏向角的出射锥面波分别相干叠加,将形成两束 Bessel 光,而在两束 Bessel 光之间则出现了一个没有光通过的区域,即 Bottle beam,如图2(b)阴影部分所示.

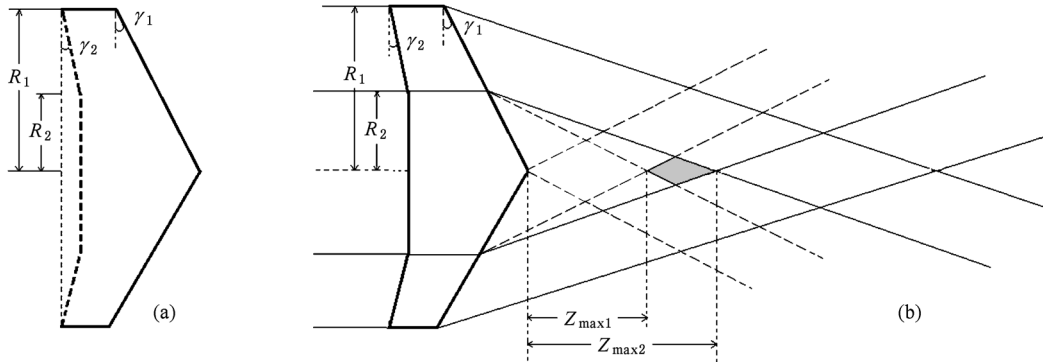


图2 (a)新型凹锥透镜模型;(b)新型凹锥透镜产生 Bottle beam 示意图

由图中几何关系可以看出,Bottle beam 的大小可以通过调节两部分出射锥面波偏向角的差值来调节. 由(1)式导出两部分出射锥面波偏向角差值为 $(n - 1)\gamma_2$,所以只需调节 γ_2 大小即可调整 Bottle beam 的大小. Bottle beam 在轴向的位置和长度由图2(b)中的 Z_{max1} 和 Z_{max2} 决定. 其中, Z_{max1} 是半径为 R_2 ,底角为 γ_1 的传统轴棱锥产生 Bessel 光的最大无衍射距离

$$Z_{max1} \approx R_2 / [(n - 1)\gamma_1]. \quad (3)$$

Z_{max2} 是半径为 R_2 ,底角为 $\gamma_1 - \gamma_2$ 的传统轴棱锥产生 Bessel 光的最大无衍射距离

$$Z_{max2} \approx R_2 / [(n - 1)(\gamma_1 - \gamma_2)]. \quad (4)$$

因此新型凹锥透镜产生 Bottle beam 的轴向长度

$$\Delta = Z_{max2} - Z_{max1} = \frac{R_2}{n - 1} \left(\frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2} - \frac{1}{\gamma_1} \right). \quad (5)$$

2.2. 新型凸锥透镜产生多个周期性 Bottle beam

图3(a)为新型凸锥透镜模型,相当于底角为 γ_1 的传统轴棱锥胶合虚线左面圆台结构形成. 从剖面看,胶合部分仍为一个上底为 $2R_2$,下底为 $2R_1$,底角为 γ_2 的等腰梯形.

平面波入射该新型凸锥透镜时,光束半径 $0 < r \leq R_2$ 的区域相当于底角为 γ_1 的传统轴棱锥. 光束

半径 $R_2 < r \leq R_1$ 的区域相当于底角为 $\gamma_1 + \gamma_2$ 的传统轴棱锥. 类似 2.1 节的分析, 入射光束在 $R_2 < r \leq R_1$ 的区域出射锥面波将有较大的偏向角, 因此 $0 < r \leq R_2$ 和 $R_2 < r \leq R_1$ 的区域产生的两束不同 Bessel 光将产生重叠, 如图 3(b) 阴影部分所示. 重叠的两

束 Bessel 光具有相同频率, 不同的径向波矢分量, 将产生相干叠加, 由文献[21]可知, 叠加区域将产生周期性的 Bottle beam. 叠加区的轴向长度由 $Z'_{\max 1}$ 和 $Z'_{\max 2}$ 决定. 其中, $Z'_{\max 1}$ 是半径为 R_2 , 底角为 $\gamma_1 + \gamma_2$ 的传统轴棱锥产生 Bessel 光的最大无衍射距离

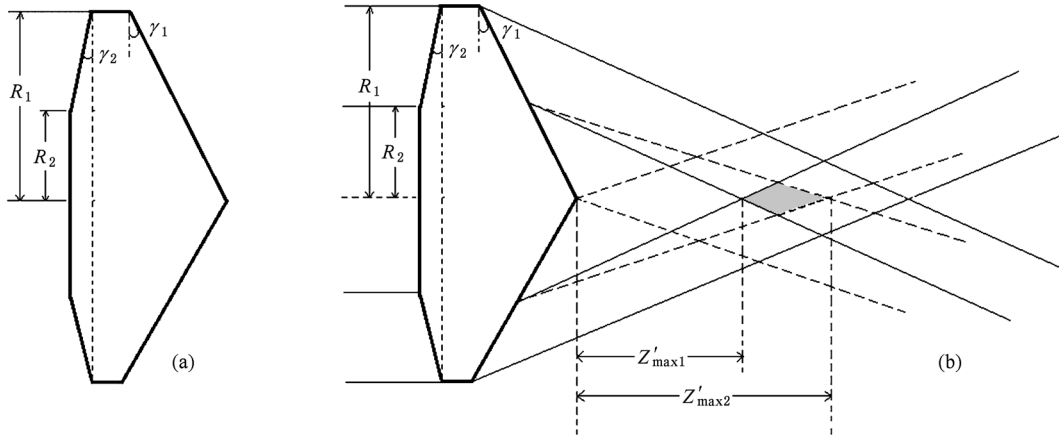


图3 (a) 新型凸锥透镜模型; (b) 新型凸锥透镜产生多个周期性 Bottle beam 示意图

$$Z'_{\max 1} \approx R_2 / [(n - 1)(\gamma_1 + \gamma_2)]. \quad (6)$$

$Z'_{\max 2}$ 是半径为 R_2 , 底角为 γ_1 的传统轴棱锥产生 Bessel 光的最大无衍射距离

$$Z'_{\max 2} \approx R_2 / [(n - 1)\gamma_1]. \quad (7)$$

因此产生周期性 Bottle beam 区域的轴向长度为

$$\Delta' = Z'_{\max 2} - Z'_{\max 1} = \frac{R_2}{n - 1} \left(\frac{1}{\gamma_1} - \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2} \right). \quad (8)$$

周期性 Bottle beam 的周期可表示为^[21]

$$Z_T = \left| \frac{2\pi}{k_{z1} - k_{z2}} \right|, \quad (9)$$

其中, 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 $k_{r1} = \frac{2\pi}{\lambda}(n - 1)\gamma_1$,

$$k_{r2} = \frac{2\pi}{\lambda}(n - 1)(\gamma_1 + \gamma_2).$$

由(8), (9)式知, 调节 γ_1 的大小可以调整周期性 Bottle beam 区域的位置、轴向长度和 Bottle beam 自再现周期.

3. 数值模拟

由轴棱锥的透过率 $t(r) = \exp(-ik(n - 1)\gamma r)$ 和柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式导出平面波经轴棱锥变换后的光场分布^[22]

$$E(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^R J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n - 1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (10)$$

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

平面波入射到新型锥透镜时, 出射光场分为两部分, 一部分是 $0 < r \leq R_2$ 部分形成的无衍射光场 E_1 , 另一部分是 $R_2 < r \leq R_1$ 部分形成的无衍射光场 E_2 , 由(10)式得 E_1 和 E_2 的光场表达式

$$E_1(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^{R_2} J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n_1 - 1)\gamma_{0 < r \leq R_2} r_1\right] r_1 dr_1, \quad (11)$$

$$E_2(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_{R_2}^{R_1} J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \times \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n_2 - 1)\gamma_{R_2 < r \leq R_1} r_1\right] r_1 dr_1, \quad (12)$$

其中, $\gamma_{0 < r \leq R_2}$ 为 $0 < r \leq R_2$ 部分等效轴棱锥底角, $\gamma_{R_2 < r \leq R_1}$ 为 $R_2 < r \leq R_1$ 部分等效轴棱锥底角. 总光场可以理解为 E_1 和 E_2 相干叠加的结果, 因此新型锥透镜后的光强分布可表示为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (13)$$

3.1. 新型凹锥透镜

选取参数 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $R_1 = 5 \text{ mm}$, $R_2 = 2 \text{ mm}$, $\gamma_1 = 8^\circ$, $\gamma_2 = 0.02^\circ$, $n = 1.5$. 则 $\gamma_{0 < r \leq R_2} = \gamma_1 = 8^\circ$, $\gamma_{R_2 < r \leq R_1} = \gamma_1 - \gamma_2 = 7.98^\circ$. 利用(11)—(13)式模拟出新型凹锥透镜后纵向光强分布,如图4所示. 由图4可以看出,新型凹锥透镜后沿光轴方向形成两束 Bessel 光,在两束 Bessel 光之间出现了一个 Bottle beam. 由几何光学导出的(3), (4)式计算得 Bottle beam 起点位置 $Z_{\text{max}1} = 28.648 \text{ mm}$, 终点位置 $Z_{\text{max}2} = 28.720 \text{ mm}$, Bottle beam 的轴向长度 $\Delta = 0.072 \text{ mm}$, 与图4衍射理论模拟结果基本吻合. 由(5)式可知,改变参数 R_2 或 γ_2 即可非常容易改变 Bottle beam 的尺寸.

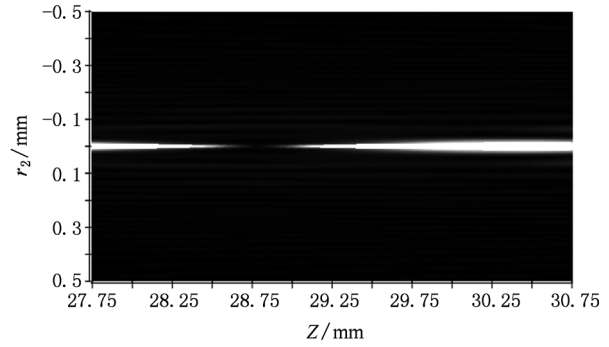


图4 新型凹锥透镜产生 Bottle beam 纵向光强分布图

图5模拟的是新型锥透镜后不同距离处横截面光强分布图. 随着传播距离的增加,先形成 Bessel 光,然后 Bessel 光演变成 Bottle beam,最后又演变成 Bessel 光的过程,与前面几何光学分析结果相符合.

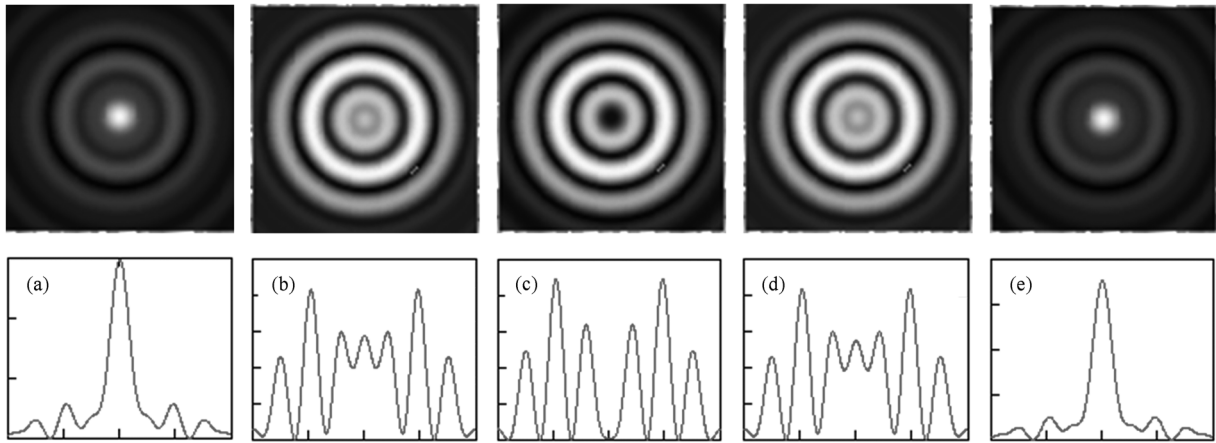


图5 新型凹锥透镜后不同距离处横截面光强分布图 (a) $z = 28.635 \text{ mm}$; (b) $z = 28.738 \text{ mm}$; (c) $z = 28.775 \text{ mm}$; (d) $z = 28.811 \text{ mm}$; (e) $z = 28.830 \text{ mm}$

3.2. 新型凸锥透镜

选取参数 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $R_1 = 8 \text{ mm}$, $R_2 = 3 \text{ mm}$, $\gamma_1 = 1^\circ$, $\gamma_2 = 0.5^\circ$, $n = 1.5$. 则 $\gamma_{0 < r \leq R_2} = \gamma_1 = 1^\circ$, $\gamma_{R_2 < r \leq R_1} = \gamma_1 + \gamma_2 = 1.5^\circ$. 利用(11)—(13)式模拟新型凸锥透镜后的纵向光强分布(图6). 由图6可以看出,在新型凸锥透镜后两束 Bessel 光重叠区域形成多个周期性 Bottle beam. 通过前面几何光学推导出的(6)—(9)式估算周期性 Bottle beam 区域起点位置 $Z'_{\text{max}1} = 229.18 \text{ mm}$, 终点位置 $Z'_{\text{max}2} = 343.78 \text{ mm}$, 产生周期性 Bottle beam 区域的轴向长度 $\Delta' = 114.60 \text{ mm}$, Bottle beam 再现周期 $Z_T = 13.25 \text{ mm}$, 与

图6衍射理论模拟结果基本符合. 进一步由(11)—(13)式模拟出周期性 Bottle beam 不同距离处横截面光强分布图(图7). 由图7可以看出,新型凸锥透镜后形成的 Bottle beam 具有明显的周期性.

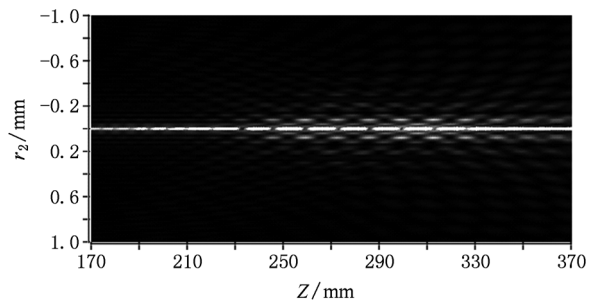


图6 新型凸锥透镜形成周期性 Bottle beam

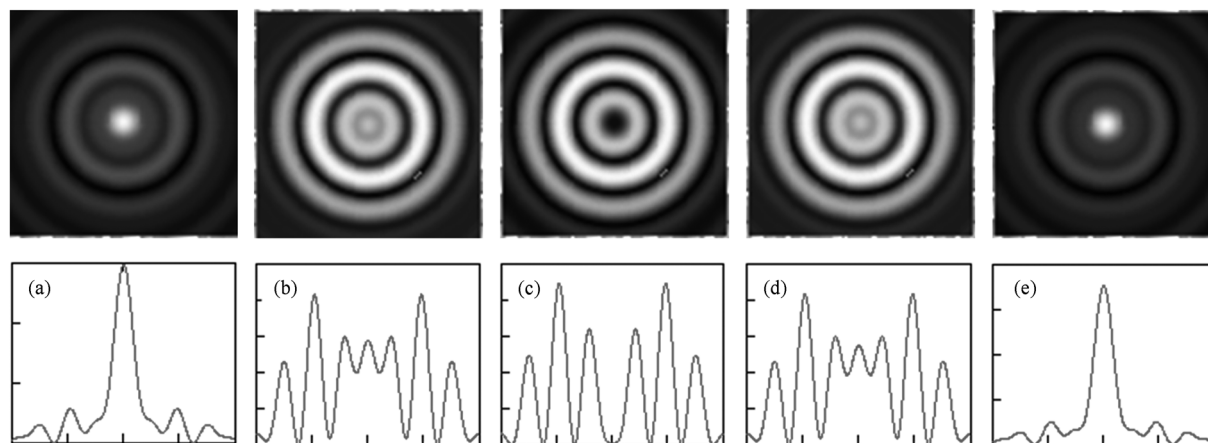


图7 周期性 Bottle beam 不同距离处横截面光强分布图 (a) $z=240$ mm; (b) $z=245.5$ mm; (c) $z=250$ mm; (d) $z=259$ mm; (e) $z=264$ mm

4. 结 论

提出了产生 Bottle beam 的新型锥透镜模型,通过在传统轴棱锥的基础上磨削掉和胶合圆台结构分别形成

凹凸两种类型,分别能够产生单个和多个周期性的 Bottle beam. 与以往产生 Bottle beam 的装置相比,通过单一元件即可获得尺寸可调的 Bottle beam,具有元件加工相对容易、结构简单、转换效率高、光损伤阈值高的优点. 为获取 Bottle beam 提供了一种简洁、有效的新途径.

- [1] Roe O, Lev K, Nir F, Nir D 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1113
- [2] Arlt J, Padgett M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 191
- [3] Bokor N, Davidson N 2007 *Opt. Commun.* **279** 229
- [4] Tatarkova S A, Sibbett W, Dholakia K 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 038101
- [5] Garces-Chavez V, McGloin D, Melville H, Sibbett W, Dholakia K 2000 *Nature* **419** 145
- [6] Li Q, Feng W L, Hu X M, Cao Q, Sha D G, Lin J M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 726
- [7] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, Sibbett W, Bryant P E, Dholakia K 2001 *Science* **292** 912
- [8] MacDonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, Arlt J, Sibbett W, Dholakia K 2002 *Science* **296** 1101
- [9] Xu S H, Li Y M, Lou L R 2006 *Chin. Phys.* **15** 1391
- [10] Zhou Q, Lu J F, Yin J P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 093202
- [11] Moffitt J R, Chemla Y R, Smith S B, Bustamante C 2008 *Annual Review of Biochemistry* **77** 205
- [12] Xu P, He X D, Wang J, Zhan M S 2010 *Opt. Lett.* **35** 2164
- [13] Tai P T, Hsieh W F, Chen C H 2004 *Opt. Express* **12** 5827
- [14] Zhao Y Q, Zhan Q W, Li Y P 2004 SPIE, Denver CO USA, Monday 02 August, 2004 p616—625
- [15] Monk S, Arlt J, Robertson D A, Courtial J, Padgett M J 1999 *Opt. Commun.* **170** 213
- [16] Arlt J, Dholakia K 2000 *Opt. Commun.* **177** 297
- [17] Zeng X H, Wu F T 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 3071
- [18] Ahluwalia B P S, Cheong W C, Yuan X C, Zhang L S, Tao S H, Bu J, Wang H 2006 *Opt. Lett.* **31** 987
- [19] Wu F T, Jiang X G, Liu B, Qiu Z X 2009 *Acta Phys. Sin.* **48** 2410 (in Chinese)[吴逢铁、江新光、刘彬、邱振兴 2009 物理学报 **48** 2410]
- [20] Ma L, Wu F T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6096 (in Chinese)[马亮、吴逢铁 2010 物理学报 **59** 6096]
- [21] Wu F T, Zeng X H 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 174 (in Chinese)[吴逢铁、曾夏辉 2008 光学学报 **28** 174]
- [22] Friberg A T 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 743

Bottle beam generated by novel axicon*

Zhang Qian-An Wu Feng-Tie[†] Zheng Wei-Tao Ma Liang

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

(Received 12 October 2010; revised manuscript received 6 November 2010)

Abstract

Novel axicon for generating bottle beam is proposed for the first time. We discuss concave and convex types, which are formed by grinding and scuffing a frustum of a cone on the bottom of a traditional axicon. The results show that when a plane wave illuminates on the concave axicon, a single bottle beam is formed. If the light illuminates on the convex axicon, periodic bottle beam is formed. The formation mechanism of the bottle beam is analyzed by geometrical optics, and the relevant parameters are also calculated. The transverse and the longitudinal intensity distribution are simulated by diffraction and interference theory. The results are basically consistent with the geometrical optics.

Keywords: novel axicon, Bottle beam, axicon, Bessel beam

PACS: 42.15.Eq, 42.25.Bs, 42.25.-p

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977068) and the Science and Technology Key Project of Quanzhou City (Grant No. 2009G4).

[†] Corresponding author. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn