

梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam^{*}

吴逢铁[†] 江新光 刘 彬 邱振兴

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2008 年 5 月 12 日收到, 2008 年 6 月 19 日收到修改稿)

首次提出一种新的梯度轴棱锥模型, 这种梯度轴棱锥在传统的轴棱锥基础上, 将轴棱锥顶点的锥角设计成具有一定的梯度. 平面波入射到这种梯度轴棱锥, 其衍射场会形成两个区域的 Bessel 光, 并且在这两个 Bessel 光之间形成一个 Bottle beam(局域空心光束). 由于 Bottle beam 具有三维封闭的空心区域和极高的强度梯度, 可用作激光导管、光镊和光学扳手等, 在生命科学和纳米科技中有重要应用. 从几何光学角度分析了梯度轴棱锥形成单个 Bottle beam 的原理, 由衍射及相干理论, 分析和模拟了纵向剖面光强分布和横截面光强分布. 研究结果对梯度轴棱锥的设计和具有指导意义.

关键词: 梯度轴棱锥, Bottle beam, 轴棱锥, Bessel 光

PACC: 4225, 4225F, 4240D

1. 引 言

自 McLeod 在 1954 年提出光学元件轴棱锥^[1]以来, 有关它的研究主要集中在两个方面: 一方面是轴棱锥的设计^[2], 另一方面是轴棱锥的应用研究^[3-7]. 轴棱锥已被应用于很多领域, 包括计量学^[3]、谐波的产生^[4]、光学相干层析成像技术^[5]等等, 而轴棱锥最广泛的应用是用来产生近似无衍射光^[6,7]. 这种新型 Bessel 光束具有无衍射特性和自重建特性, 人们已经对其进行了多方面的研究^[8,9]. 产生 Bessel 光束的常见方法有环缝法、全息法、谐振腔法、球面像差法和轴棱锥法, 其中利用轴棱锥产生 Bessel 光具有装置简单、转换效率高、显著优点^[6,10]. 因此, 人们对于轴棱锥本身特性对产生无衍射光的影响也进行了多方面的研究, 包括加工误差^[11,12]和设计方法^[13]等. Bottle beam^[14]具有三维封闭的暗中空区域和极高的强度梯度, 可作为激光导管、光镊和光学扳手等工具, 还可用于激光囚禁微观粒子(如微米粒子、纳米粒子、自由电子以及生物细胞)和中性原子、分子等, 而且, Bottle beam 具有非常高的强度梯度, 可用于有效冷却中性原子、分子, 甚至还可用于实现全光学冷却和囚禁玻色-爱因斯坦凝聚, 这些将对生命科

学和纳米科技起重要作用^[15,16]. 2002 年 Garcés-Chavez 报道了利用 Bessel 光的自重建特性实现二维空间上多层面微粒操控^[17], 而 Bottle beam 可以对微粒进行全方位三维操控, 研究结果开辟了 Bottle beam 在光镊领域的全新应用空间^[18]. 本文提出了一种新的梯度轴棱锥设计模型, 入射光经过这种梯度轴棱锥, 衍射场会直接形成单个 Bottle beam. 以往产生 Bottle beam 的实验装置相对比较复杂^[19,20], 而利用梯度轴棱锥产生 Bottle beam 方法简单直接, 转换效率高. 下面将从几何光学和衍射理论出发对梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam 进行分析, 计算并模拟衍射光强分布.

2. 理论分析

图 1 是梯度轴棱锥和传统轴棱锥的模型, 其中梯度轴棱锥的顶角 γ_2 大于其底角 γ_1 . 当平面波入射轴棱锥时, 将由锥面折射形成锥面波矢分布, 而近似无衍射光束可被认为是环绕光轴周围的正负锥面波的叠加^[6]. 根据此原理, 对于梯度轴棱锥, 入射光可以分成两个部分, 一部分被顶点附近的锥面折射形成无衍射光, 另一部分被靠近底部的锥面折射形成另外一束无衍射光. 我们可以利用最大无衍射距

* 国家自然科学基金(批准号: 60477041)和福建省自然科学基金(批准号: A0710011)资助的课题.

[†] E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn

离的估算来判断这两束无衍射光的位置, 从而确定空心光的位置.

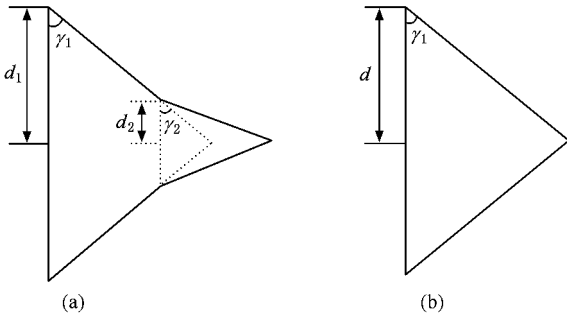


图1 梯度轴棱锥(a)和传统轴棱锥(b)模型

轴棱锥产生无衍射光最大的无衍射传输距离 z_{\max} 定义^[8]为

$$z_{\max} \approx d[(n-1)\gamma], \quad (1)$$

其中 d 是入射轴棱锥的光束半径, n 为轴棱锥的折射率, γ 是轴棱锥的底角. 这里选择具体的参量数值计算: $d_2 = 2.5 \text{ mm}$, $d_1 = 5 \text{ mm}$, $n = 1.5$, $\gamma_1 = 0.5^\circ$, $\gamma_2 = 0.55^\circ$. 由这些参数可以计算得到

$$z_{\max1} \approx d_1[(n-1)\gamma_1] = 1.146 \text{ m},$$

$$z_{\max2} \approx d_2[(n-1)\gamma_2] = 0.521 \text{ m},$$

$$z_{\max3} \approx d_2[(n-1)\gamma_1] = 0.573 \text{ m}.$$

这里, $z_{\max1}$ 是锥角 $\gamma_1 = 0.5^\circ$, 入射光束半径为 d_1 时轴棱锥形成的最大无衍射距离; $z_{\max2}$ 是锥角 $\gamma_2 = 0.55^\circ$, 入射光束半径为 d_2 时轴棱锥顶点部分形成的最大无衍射距离; $z_{\max3}$ 是锥角 $\gamma_1 = 0.5^\circ$, 入射光束半径为 d_2 时轴棱锥形成的最大无衍射距离(见图2).

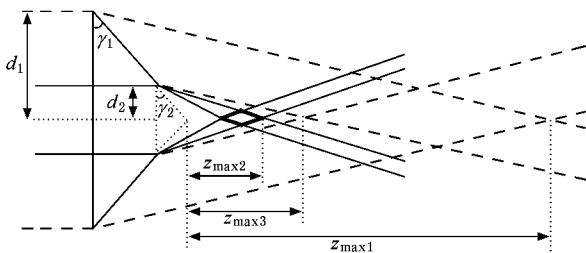


图2 梯度轴棱锥形成 Bottle beam 的示意图

由计算可知, $z_{\max2} < z_{\max3} < z_{\max1}$, 当 $z < z_{\max2}$ 时, 图2实线部分为轴棱锥顶点部分形成的无衍射光; 当 $z_{\max3} < z < z_{\max1}$ 时, 图2虚线部分为轴棱锥底端部分形成的无衍射光, 而在 $z_{\max2} < z < z_{\max3}$ 区域出现了一个没有光的空心区域. 图2为梯度轴棱锥形成的

空心光的示意图. 从图中可以明显看出, 轴棱锥顶点部分形成了实线部分表示的无衍射光, 底端部分形成了虚线部分表示的无衍射光, 图中间被加粗黑体线包围的区域就是一个 Bottle beam.

利用菲涅耳衍射积分理论可以计算平面波经过轴棱锥的衍射光场. 已知轴棱锥的振幅透过率为

$$t(\rho) = \exp(ik(n-1)\gamma\rho), \rho < d, \quad (2)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 是波矢, λ 为入射光波长, γ 是轴棱锥底角, d 为入射光斑半径. 则由轴棱锥形成的无衍射光场可以表示为^[21]

$$E(r_2, z) \propto \frac{1}{\lambda z} \int_0^d \rho \exp\left\{ik\left[\frac{\rho^2}{2z} - (n-1)\gamma\rho\right]\right\} \times J_0\left(\frac{kr_2\rho}{z}\right) d\rho. \quad (3)$$

利用稳相法可以简化(3)式为

$$E(r_2, z) \propto \sqrt{\lambda z} \exp\left[-ik\frac{(n-1)^2\gamma^2}{2}\right] \times J_0[k(n-1)\gamma]. \quad (4)$$

从(4)式可以明显看出, 轴棱锥形成的衍射场分布近似为 Bessel 分布.

对梯度轴棱锥而言, 轴棱锥底端部分形成的无衍射光场可以表示为

$$E_1(r_1, z) \propto \frac{1}{\lambda z} \int_{d_2}^{d_1} \rho \exp\left\{ik\left[\frac{\rho^2}{2z} - (n-1)\gamma_1\rho\right]\right\} \times J_0\left(\frac{kr_1\rho}{z}\right) d\rho. \quad (5)$$

而顶点部分形成的无衍射光场可以表示为

$$E_2(r_2, z) \propto \frac{1}{\lambda z} \int_0^{d_2} \rho \exp\left\{ik\left[\frac{\rho^2}{2z} - (n-1)\gamma_2\rho\right]\right\} \times J_0\left(\frac{kr_2\rho}{z}\right) d\rho. \quad (6)$$

梯度轴棱锥的整个光场分布, 可以认为是顶点部分形成的无衍射光束和底端部分形成的无衍射光束相干叠加的结果, 因此其光强分布可以表示为

$$I(r, z) = |E_1(r_1, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (7)$$

3. 数值模拟

利用(3)(5)–(7)式可以分别模拟相应的纵向剖面光强分布图. 模拟参数取值如下: $d_2 = 2.5 \text{ mm}$, $d_1 = 5 \text{ mm}$, $\gamma_1 = 0.5^\circ$, $\gamma_2 = 0.55^\circ$, $\lambda = 6328 \text{ nm}$, $n = 1.5$.

图 3 模拟的是随轴向距离变化的纵向光强分布. 其中图 3(a) 是理想轴棱锥形成的近似无衍射光束的纵向剖面光强分布图, 图 3(b) 给出了轴棱锥底端部分折射形成的近似无衍射光, 图 3(c) 是轴棱锥顶点部分折射形成的近似无衍射光, 图 3(d) 是梯度轴棱锥折射形成的整个光强分布情况. 从纵向光强模拟分布图可以看出, 理想轴棱锥折射形成近似无

衍射光. 把梯度轴棱锥分成两个部分进行模拟, 同样可以得到相应区域的近似无衍射光. 光束经过梯度轴棱锥折射后的整个光强分布(见图 3(d)), 前、后部分都是近似无衍射光, 在近似无衍射光之间形成了一个 Bottle beam, 这与前面几何分析的结果相吻合, 也进一步说明了理论分析的正确性.

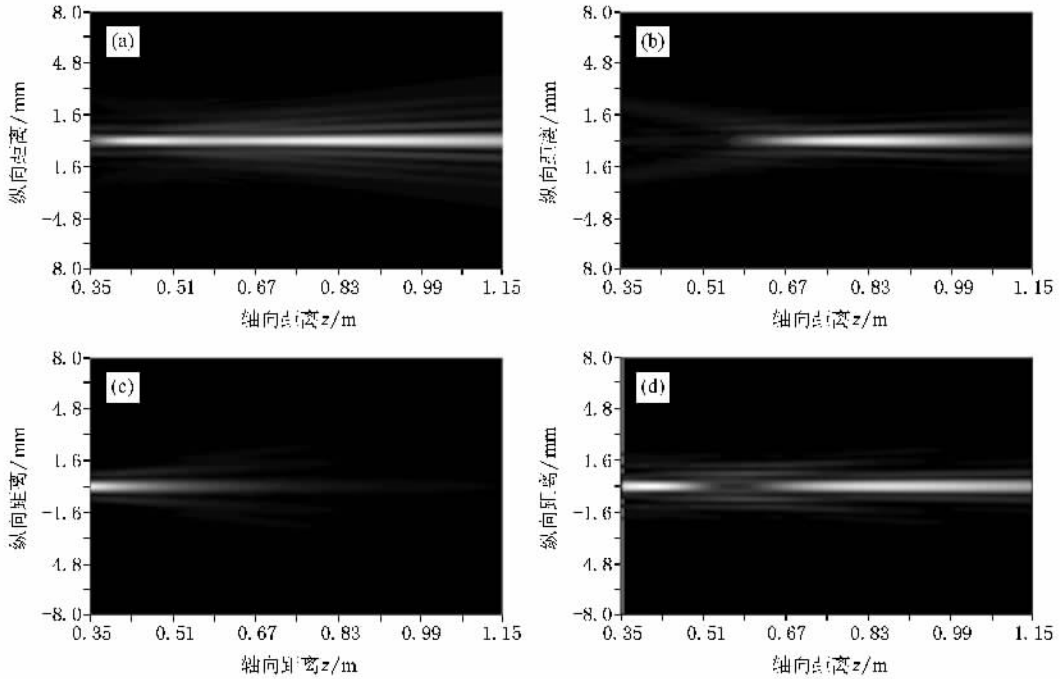


图 3 轴棱锥不同锥面形成的无衍射光的纵向光强模拟图 (a) 理想轴棱锥 (b) 梯度轴棱锥底端部分 (c) 梯度轴棱锥顶点部分 (d) 梯度轴棱锥

图 4 模拟的是 Bessel 光及形成的 Bottle beam 的截面光强分布图. 其中图 4(a) 和 (e) 描述的是 Bottle

beam 附近两端的 Bessel 光的横向光强分布; 图 4(b) 和 (d) 模拟的是无衍射光渐变成 Bottle beam 过程中

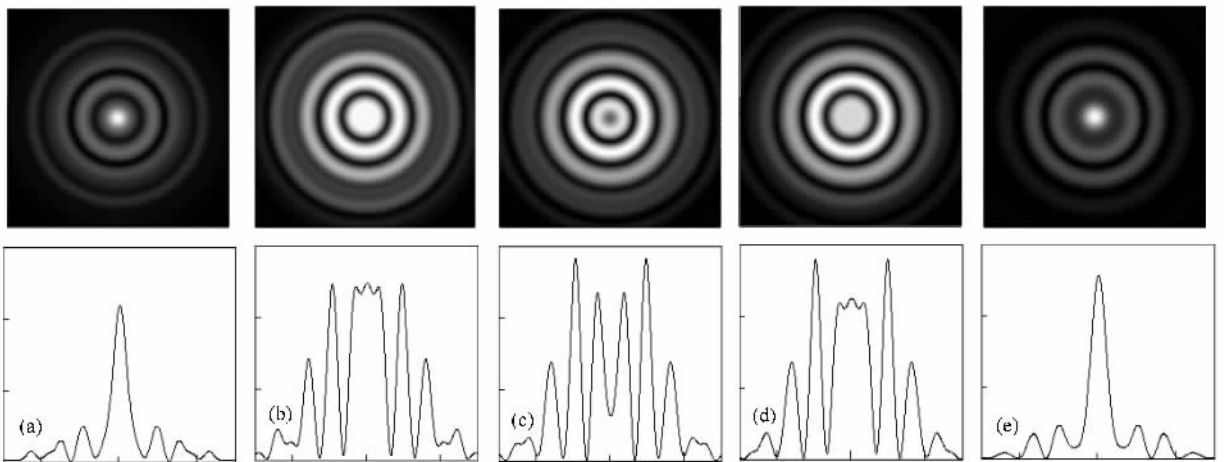


图 4 Bessel 光及形成 Bottle beam 在传播轴上不同位置的截面光强分布特性图 (a) $z = 0.500 \text{ m}$ (b) $z = 0.536 \text{ m}$ (c) $z = 0.568 \text{ m}$ (d) $z = 0.591 \text{ m}$ (e) $z = 0.652 \text{ m}$

两个状态的截面光强分布,而在它们中间距离 $z = 0.568 \text{ m}$ 处的图 4(c) 描述的是 Bottle beam 的截面光强分布和特性.从截面光强分布可以看到,中心形成了 Bottle beam 强度梯度,但 Bottle beam 中心光强度并不完全为零.从几何图中可以看出,中心应该没有光分布,这与衍射理论近似处理有关.

从模拟图形可知,梯度轴棱锥可以形成两片无衍射区域,并且在中间可以形成一个 Bottle beam.这也从另外一个角度说明了 Bessel 光具有自再现特性^[8,17],轴棱锥顶点部分形成的无衍射 Bessel 光不会影响轴棱锥底部形成的无衍射 Bessel 光,因此如果在 Bottle beam 的位置即空心部分放置一个障碍物,后面还会形成无衍射光束,表现出来的就是无衍射光束的自再现特性.图 2 描述的几何光路示意图能形象地说明 Bottle beam 的位置及其形成原理.我

们选择了相应的模拟参数值进行仿真模拟,从模拟纵向光强剖面图和横向截面光强分布图可以看出,确实可以形成单个 Bottle beam,理论分析模拟和几何分析结果基本吻合.

4. 结 论

提出一种轴棱锥的设计模型,把轴棱锥设计成双梯度的锥表面,形成梯度轴棱锥模型.从几何上分析了利用这种梯度轴棱锥产生 Bottle beam 的形成原理,模拟仿真其横向和纵向光强分布图.这种利用高转换效率的轴棱锥产生 Bottle beam 的装置简单,转换效率高,并且容易控制,大大提高了 Bottle beam 的实用性.

- [1] McLeod J H 1954 *J. Opt. Soc. Am.* **44** 592
- [2] Jaroszewicz Z ,Sochacki J ,Kolodziejczyk A 1993 *Opt. Lett.* **18** 1893
- [3] Davis J A ,Carcole E ,Cottrell D M 1996 *Appl. Opt.* **35** 2159
- [4] Shinozaki K ,Xu C ,Sasaki H ,Kamijoh T 1997 *Opt. Commun.* **133** 300
- [5] Ding Z ,Ren H ,Zhao Y ,Nelson J S ,Chen Z 2002 *Opt. Lett.* **27** 243
- [6] Herman R M ,Wigginset T A 1991 *J. Opt. Soc. Am. A* **8** 932
- [7] Wu F T ,Chen Y B ,Guo D D 2007 *Appl. Opt.* **46** 4943
- [8] Megloin D ,Dholakia K 2005 *Contemp. Phys.* **46** 15
- [9] 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]
- [10] Zeng X H ,Wu F T ,Liu L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 791 (in Chinese) [曾夏辉、吴逢铁、刘 岚 2007 物理学报 **56** 791]
- [11] Jiang X G ,Wu F T ,Liu B 2007 *Chin. J. Lasers.* **34** 1538 (in Chinese) [江新光、吴逢铁、刘 彬 2007 中国激光 **34** 1538]
- [12] Jiang X G ,Wu F T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4202 (in Chinese) [江新光、吴逢铁 2008 物理学报 **57** 4202]
- [13] Yuan X C ,Ahluwalia B P S ,Cheong W C ,Bu J ,Niu H B ,Peng X 2007 *J. Opt. A :Pure Appl. Opt.* **9** 329
- [14] Arlt J ,Padgett M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 191
- [15] Kawata S ,Sun H B ,Tanaka T ,Takada K 2001 *Nature.* **412** 697
- [16] Terray A ,Oakey J ,Marr D W M 2002 *Science* **296** 1841
- [17] Garces-Chavez V ,McGloin D *et al* 2002 *Nature* **419** 145
- [18] Chen C H ,Tai P T ,Hsieh W F 2004 *Appl. Opt.* **43** 6001
- [19] Ahluwalia B P S ,Yuan X C ,Tao S H 2004 *Opt. Commun.* **238** 177
- [20] Lin J H ,Wei M D 2007 *Opt. Express* **15** 2943
- [21] Friberg A T 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 743

Single bottle beam generated by a gradient axicon^{*}

Wu Feng-Tie[†] Jiang Xin-Guang Liu Bin Qiu Zhen-Xing

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

(Received 12 May 2008 ; revised manuscript received 19 June 2008)

Abstract

A new model of double-axicon was proposed for the first time. Based on the traditional axicon, a gradient on the vertex of an axicon was designed. When a plane wave illuminates the gradient axicon, two Bessel beams are formed and a Bottle beam generated between the Bessel beams. Bottle beams could be used as optical pipes, optical tweezers, optical spanners, and so on. Because the dark focus is surrounded in all directions by regions of higher intensity, and it shows important application perspective in life science and nanotechnology. The formation mechanism of the single Bottle beam was analyzed by geometrical optics. The transverse and longitudinal intensity distribution were also calculated and simulated using diffraction and interference theory, respectively. The result shows its significance in providing a guidance for the design and application of the gradient axicon.

Keywords : gradient axicon , bottle beam , axicon , Bessel beam

PACC : 4225 , 4225F , 4240D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60477041) and the National Science Foundation of Fujian Province , China (Grant Nos. A0710011).

[†] E-mail : ftwu@public.qz.fj.cn