

文章编号: 0253-2239(2010)08-2417-05

一种产生无衍射贝塞尔光束的新型组合锥透镜

马 亮 吴逢铁 黄启禄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 提出一种可产生无衍射贝塞尔(Bessel)光束的新型光学元件——组合锥透镜,由正、负轴棱锥胶合在一起设计而成。其变换光束特性与单个正轴棱锥相同,等效底角由正、负轴棱锥底角之差决定,因此可通过较大底角的正、负轴棱锥组合得到更小角度的底角,以获得更长距离的无衍射光,解决了单个正轴棱锥小角度加工困难的技术问题。推导出组合锥透镜的 $ABCD$ 传输矩阵,数值模拟平面波通过组合锥透镜后的光场为无衍射 Bessel 光束,并从几何光学角度用 Zemax 软件模拟组合锥透镜后的光场分布,与正轴棱锥后的光场进行了比较。研究结果为实现无衍射 Bessel 光束开辟一条新的途径。

关键词 几何光学; 组合锥透镜; 轴棱锥; 无衍射贝塞尔光束

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2417

A New Type of Combined Axicon for Generating Non-Diffracting Bessel Beams

Ma Liang Wu Fengtie Huang Qilu

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

Abstract A new type of optical element——combined axicon is proposed for generating non-diffracting Bessel beams. This element is designed with gluing positive and negative axicon. Its property is the same as single positive axicon for beam transformation, and equivalent conical angle is decided by the conical angle difference of positive and negative axicon. Therefore, we can get smaller conical angle by combining positive and negative axicon with comparatively large conical angle for each axicons, and also get non-diffracting beam with longer distance. The technical problem of the small conical angle which is hard to machining is solved. The $ABCD$ matrix of the combined axicon is deduced. It shows that the combined axicon can transform plane wave to Bessel beam by numerical calculation. The optical field distribution behind combined axicon is also simulated by Zemax software, and compared with single positive axicon. Research results open a new way for generating non-diffracting Bessel beams.

Key words geometrical optics; combined axicon; axicon; non-diffracting Bessel beams

1 引 言

贝塞尔(Bessel)光束因无衍射、能够自重建^[1]等特性受到广泛关注,目前无衍射光的产生方法主要分为主动式和被动式两大类,主动式是利用谐振腔直接产生无衍射光,实验方面有少量的报道^[2~4];被动式是依靠光学元件将其他类型光束转换为无衍射 Bessel 光束,常用的光学元件有轴棱锥,透镜轴棱锥及衍射元件^[5~7]等,用轴棱锥产生无衍射 Bessel 光束具有装置简单,转换效率高等优点,因此得到深入研究^[8]。且轴棱锥-透镜系统产生空心光

束(Bottle beam)^[9,10]在光镊,精密操控等方面有着广阔的应用前景。

在无衍射光束的实际应用中往往需要长距离的无衍射光,根据最大无衍射距离公式^[11] $Z_{\max} = a/[(n-1)\gamma]$ 可知,在入射光束尺寸 a 一定情况下,最大无衍射距离 Z_{\max} 与底角 γ 成反比,即底角越小的轴棱锥形成的无衍射距离越长。但底角越小的轴棱锥对加工技术要求越高,成本也越高。且角度过小时,轴棱锥在加工过程中很容易产生误差,如轴棱锥椭圆加工误差会产生畸变无衍射光束^[12],限制了

收稿日期: 2009-09-29; 收到修改稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和泉州市科技重点项目(2009G4)资助课题。

作者简介: 马 亮(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光谐振腔产生无衍射光的理论和技术等方面的研究。

E-mail: maliango77@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教学与研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(通信联系人)

无衍射光的广泛应用。本文提出利用两种不同底角的正、负轴棱锥胶合在一起,设计出组合锥透镜这种新型光学元件,用它实现无衍射 Bessel 光束,通过控制两个底角可以得到不同距离的无衍射光。推导组合锥透镜的 ABCD 传输矩阵,并通过数值模拟其后光场为无衍射光,用 Zemax 光学软件模拟了平行光束通过组合锥透镜和正轴棱锥后的光场分布,并进行了比较,发现这种新光学元件特性与正轴棱锥一样,且其等效底角由正、负轴棱锥底角之差决定,可通过较大底角的正、负轴棱锥组合以得到更长距离的无衍射光,这种元件不必局限于特别小的角度,对加工技术要求不高,为无衍射光的广泛应用创造了条件。

2 理论分析

组合锥透镜是在正、负轴棱锥基础上设计而成的,因此简单介绍正、负轴棱锥,并推导它们的 ABCD 传输矩阵。人们通常把正轴棱锥称为折射式轴棱锥,负轴棱锥称为反射式轴棱锥^[13],本文统一用正、负轴棱锥。

2.1 正、负轴棱锥

被动式实现无衍射光最常用的光学元件即为正轴棱锥,它的锥面凸向外部,反之则为负轴棱锥,其结构示意图见图 1,可以发现负轴棱锥对光束具有发散作用,且发散后的光束仍然保持平行。

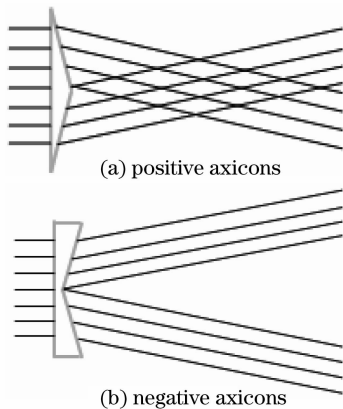


图 1 正、负轴棱锥结构示意图

Fig. 1 Structure scheme of positive and negative axicons

文献^[13]用几何光线追迹的方法推导了双轴棱锥的 ABCD 传输矩阵,在正、负轴棱锥近似薄透镜情况下用同样的方法推导单个正、负轴棱锥的传输矩阵。

图 2 为垂直入射光线通过正、负轴棱锥折射的示意图。入射光线的径向坐标分别为 r_1 和 r_2 ,角向

坐标(与光轴的夹角)分别为 θ_1, θ_2 ,出射光线的径向坐标分别为 r'_1, r'_2 ,角向坐标分别为 θ'_1, θ'_2 。(下标 1 代表正轴棱锥,2 代表负轴棱锥,下同)

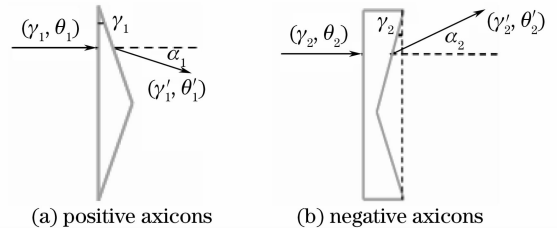


图 2 光线通过正、负轴棱锥折射示意图

Fig. 2 Refraction of a ray passing through axicons

从图 2 可以看出

$$\begin{cases} r'_i = r_i, \\ \theta'_i = \theta_i \mp \alpha_i, \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

正轴棱锥为负号,负轴棱锥为正号。式中偏转角 $\alpha_i = (n-1)\gamma_i$,其中 γ_i 为轴棱锥的底角, n 为材料的折射率,将(1)式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} r'_i \\ \theta'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mp (n-1)\gamma_i/r_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ \theta_i \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

因此可以得出正、负轴棱锥的 ABCD 传输矩阵分别为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_1/r_1 & 1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)\gamma_2/r_2 & 1 \end{bmatrix}$ 。

2.2 组合锥透镜

组合锥透镜的结构图如图 3 所示,可以把组合锥透镜分成 I 和 II 两部分, I 是正轴棱锥,其底角为 γ_1 ; II 是负轴棱锥,其底角为 γ_2 。

这种新设计的元件相当于 I 和 II 两部分紧密胶合在一起, II 部分的出射光线即是 I 的入射光线,即 I 和 II 部分的入射光线和出射光线的径向坐标均相等,即

$$r_1 = r'_1 = r_2 = r'_2. \quad (3)$$

因此 I 和 II 两部分的传输矩阵可以分别写为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_1/r_1 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)\gamma_2/r_1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

组合锥透镜的 ABCD 传输矩阵可以写为 I 和 II 两部分的传输矩阵之积:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_1/r_1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)\gamma_2/r_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)(\gamma_1 - \gamma_2)/r_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma/r_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$, γ, r_1 分别为组合锥透镜的等效底

角和径向坐标。

观察组合锥透镜的 $ABCD$ 传输矩阵,可以发现它的传输矩阵与正轴棱锥的传输矩阵相同,通过控制正、负轴棱锥底角 γ_1 和 γ_2 可得到合适的 γ 并使之大于 0,因此可以把组合锥透镜看成底角为 γ 的正轴棱锥。例如取材料的折射率 $n = 1.5$, I 和 II 两部分的底角分别为 $\gamma_1 = 5^\circ, \gamma_2 = 4.5^\circ$,求得组合锥透镜的等效底角 $\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 = 0.5^\circ$,即两个底角分别为 5° 和 4.5° 的组合锥透镜就等效于一个底角 $\gamma = 0.5^\circ$ 的正轴棱锥。

角度越小的元件对加工技术和精度要求就越高,这种组合锥透镜的等效底角由正、负轴棱锥的底角之差决定,即可通过较大底角的正、负轴棱锥组

合,使其特性与小角度的正轴棱锥相同。实现了通过较大角度的正、负轴棱锥元件也能产生长距离的无衍射光束,因此这种元件在实际产生无衍射光束过程中可以被广泛应用。

3 数值模拟

假设一束平面波通过组合锥透镜,如图 3 所示,当波在 Z 方向传播距离为 z 时,则传输矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,将传输矩阵元素 $A = 1, B = z, D = 1$ 代入柱坐标系下的广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式:^[14]

$$E_2(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{B}\right) \exp(ikz) \int_0^R E_1 J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B}\right) \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_1^2 + Dr_2^2)\right] r_1 dr_1, \quad (5)$$

可得

$$E_2(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z}\right) \exp(ikz) \int_0^R E_1 J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r_1^2 + r_2^2)\right] r_1 dr_1. \quad (6)$$

已知正轴棱锥的振幅透射率 $t_1(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma_1 r]$,负轴棱锥的振幅透射率 $t_2(r) = \exp[ik(n-1)\gamma_2 r]$ ^[15],因此组合锥透镜的振幅透射率为

$$t(r) = t_1(r) \cdot t_2(r) = \exp[-ik(n-1)(\gamma_1 - \gamma_2)r] = \exp[-ik(n-1)\gamma r], \quad (7)$$

则经过组合锥透镜变换后的光场为

$$E(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{z}\right) \int_0^R E_1 J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1. \quad (8)$$

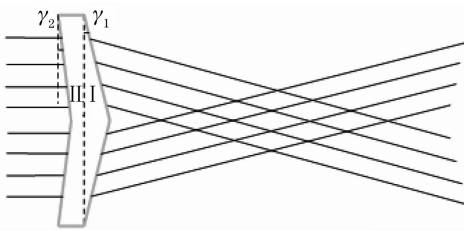


图 3 组合锥透镜结构示意图

Fig. 3 Structure scheme of combined axicon

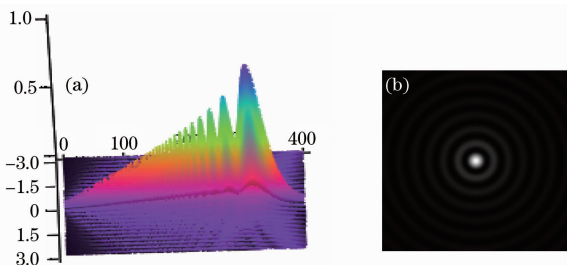


图 4 平面波通过组合锥透镜的光场分布

Fig. 4 Light field distribution behind the combined axicon illuminated by a plane wave

利用(8)式数值模拟最大无衍射距离内的光场分布。图 4(a)为光场三维分布图,图 4(b)为 $z = 200$ mm 处的二维光斑图,模拟参数取 $R = 3$ mm, $\gamma = 1^\circ, n = 1.5, \lambda = 632.8$ nm, $E_1 = 1$ 。

4 几何光学对组合锥透镜产生无衍射光的分析

Zemax 软件对光线进行仿真是基于几何光学的光线追迹原理,利用几何光学分析光束传输特性,对组合锥透镜后的光线分布进行模拟仿真,可以很直观地发现它后面的光场分布和单个正轴棱锥后的光场一样。从几何光学方面进一步证实了这种新型光学元件的特性与正轴棱锥相同。

采用 Zemax 软件模拟了正轴棱锥和组合锥透镜后的光场分布见图 5,模拟过程中取材料折射率 $n = 1.5$;图 5(a)中的正轴棱锥底角 $\gamma = 2^\circ$;图 5(b)中组合锥透镜的两个底角 $\gamma_1 = 6^\circ, \gamma_2 = 4^\circ$,等效底角 $\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 = 2^\circ$ 。图中阴影区域即为无衍射 Bessel

光,可以发现组合锥透镜和正轴棱锥产生无衍射 Bessel 光的机理一样,且它们产生的无衍射光的距离相等,与上文理论分析的结果一致。

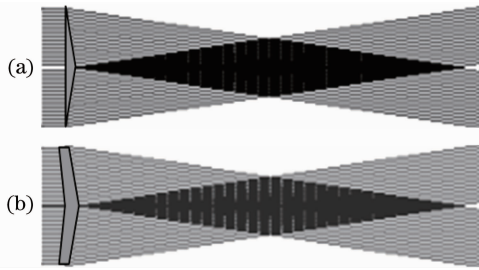


图 5 几何光学对轴棱锥和组合锥透镜的光线追迹图

Fig. 5 Ray trace scheme of axicon and combined axicon by geometrical optics

根据上文的理论分析,通过改变组合锥透镜的两个底角,以得到不同的偏转角,实现不同距离的无衍射 Bessel 光。利用 Zemax 软件模拟,模拟参数取值如下:材料折射率 $n=1.5$;图 6(a)中 $\gamma_1=7^\circ, \gamma_2=5^\circ$,等效底角 $\gamma=\gamma_1-\gamma_2=2^\circ$;图 6(b)中 $\gamma_1=8^\circ, \gamma_2=5^\circ$,等效底角 $\gamma=\gamma_1-\gamma_2=3^\circ$ 。图 6 为给定参数的组合锥透镜的光线追迹图,且图 6(a)和(b)中光线起始点到终点的距离相等。

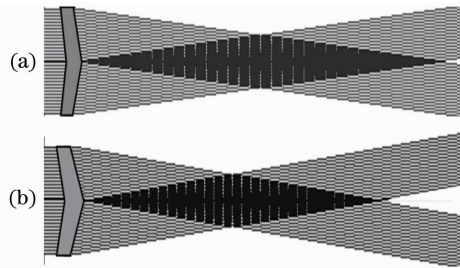


图 6 几何光学对不同底角的组合锥透镜的光线追迹图

Fig. 6 Ray trace scheme of combined axicon with different conical angle by geometrical optics

通过对比图 6(a)和(b)发现改变组合锥透镜的两个不同底角,可以得到不同距离的无衍射光,且最大无衍射距离与等效底角成反比关系,与前文分析结论一致,几何光学对其光线追迹图证实了这一结论。

5 结 论

设计出一种新的光学元件,以实现无衍射 Bessel 光束,推导了其 ABCD 传输矩阵,数值模拟平面波通过这种元件后的光场三维分布和二维光斑图,证实为无衍射 Bessel 光束,从几何光学角度分析其产生无衍射光的机理,并与传统的轴棱锥元件进行对比。这种元件产生无衍射光的特性与两个底角之差有关,因此通过控制两个不同的底角,可以得

到不同特性的无衍射光,且两个底角不必局限于特别小的角度,降低了对加工技术的要求,研究结果为被动式实现无衍射光提供新的方法。

参 考 文 献

- 1 Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin *et al.*. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3125~3128
吴逢铁,江新光,刘彬等.轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析[J].*物理学报*, 2009, **58**(5): 3125~3128
- 2 F. T. Wu, Y. B. Chen, D. D. Guo. Nanosecond Bessel-Gauss pulse generated directly from an Nd:YAG axicon-based resonator[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4943~4947
- 3 A. Hakola, S. C. Buchter, T. Kajava *et al.*. Bessel-Gauss output beam from a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4~6): 335~340
- 4 Anatol N. Khilo, Eugeny G. Katranji, Anatol A. Ryzhevich. Axicon-based Bessel resonator: analytical description and experiment[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(8): 1986~1992
- 5 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560
吴逢铁,卢文和,马宝田.轴棱锥——透镜系统的光束传输与变换[J].*光学学报*, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 6 Anna Burvall, Katarzyna Kolacz, Zbigniew Jaroszewicz. Simple lens axicon[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4838~4844
- 7 Pertti Paakkonen, Janne Simonen, Marko Honkanen *et al.*. Two-element diffractive systems for generation of Bessel fields[J]. *J. Mod. Opt.*, 2002, **49**(11): 1943~1953
- 8 Wu Fengtie, Chen Yunbin, Guo Dongdong *et al.*. Parameters analysis and measurement of nanosecond diffraction-free Bessel laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1073~1076
吴逢铁,陈云彬,郭东栋等.纳秒无衍射贝赛耳光脉冲参数的分析与测定[J].*中国激光*, 2007, **34**(8): 1073~1076
- 9 Liu Lan, Wu Fengtie. Description of bottle beam and reconstruction of Bessel beam based on diffraction integral theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 370~374
刘岚,吴逢铁.衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J].*光学学报*, 2008, **28**(2): 370~374
- 10 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe *et al.*. Experiment study on bottle beam generated by interfering Bessel beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2899~2901
吴逢铁,刘彬,卢文和等.贝塞耳光束相干产生局域空心光束的实验研究[J].*中国激光*, 2009, **36**(11): 2899~2901
- 11 J. Rogel-Salazar, G. H. C. New, S. Chavez-Cerdal. Bessel-Gauss beam optical resonator[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(1~6): 117~122
- 12 Jiang Xinguang, Wu Fengtie, Liu Bin. Modification of aberration nondiffraction beams in manufacture error of elliptical axicon[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1538~1542
江新光,吴逢铁,刘彬.轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光束的修正[J].*中国激光*, 2007, **34**(11): 1538~1542
- 13 Julio C. Gutiérrez-Vega, Rodolfo Rodríguez-Masegosa, Sabino Chávez-Cerda. Bessel-Gauss resonator with spherical output mirror: geometrical- and wave-optics analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(11): 2113~2122
- 14 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: High Education Press, 2003. 12
吕百达. *激光光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 12
- 15 Feng Guoying, Lü Baida, Cai Bangwei. Transformation properties of laser beams passing through axicon system and their applications[J]. *Laser Technol.*, 1996, **20**(3): 138~143
冯国英,吕百达,蔡邦维.轴棱锥光学系统对激光束的变换和应用[J].*激光技术*, 1996, **20**(3): 138~143