

基于轴棱锥的衍射光学元件设计及其光场分析

刘晓庆, 薛常喜

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 衍射光学元件具有小型化、轻量化等优点。依据传统轴棱锥的相位函数, 设计了衍射轴棱锥、螺旋轴棱锥和轴棱锥阵列三种衍射光学元件的相位函数; 根据角谱衍射理论, 建立了平行光入射衍射光学元件的光场分析模型, 数值分析了三种衍射光学元件在单色高斯激光束照射下的光场分布特性。模拟结果表明, 衍射轴棱锥与传统轴棱锥相比具有相同的光束传输特性, 可以在聚焦深度内产生无衍射贝塞尔光束; 螺旋轴棱锥产生贝塞尔光束的阶数与拓扑电荷数相同; 轴棱锥阵列可以产生无衍射贝塞尔光束阵列。所提衍射光学元件可以应用于激光加工以及成像等领域。

关键词 衍射; 衍射轴棱锥; 螺旋轴棱锥; 轴棱锥阵列; 无衍射贝塞尔光束

中图分类号 O438.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040501

Design of Diffractive Optical Elements Based on Axicon and Its Light Analysis

Liu Xiaoqing, Xue Changxi

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The diffractive optical elements have the advantages of miniaturization, lightweight and so on. Based on the phase function of transitional axicon, the phase functions of three kinds of diffractive optical elements such as diffractive axicon, helical axicon and axicon array are designed. By using the theory of angular spectrum diffraction, a light field analysis model for diffractive optical elements irradiated by parallel light is established. The light field distribution characteristics of three kinds of diffractive optical elements under monochromatic Gaussian beam illumination are numerically analyzed. The simulation results show that, the diffractive axicon has the same beam propagation performance compared with the transitional axicon, which can generate diffraction-free Bessel beam in the focal depth. The order of the Bessel beam generated by helical axicon is the same as the number of topological charges. Axicon array can generate an array of diffraction-free Bessel beam. The proposed diffractive optical elements can be used in the fields of laser processing and imaging.

Key words diffraction; diffractive axicon; helical axicon; axicon array; diffraction-free Bessel beam

OCIS codes 050.4865; 050.1940

1 引言

轴棱锥是 McLeod^[1]于 1954 年正式提出的, 其能将光线连续地会聚到沿轴线不同位置上, 具有大焦深等优点, 被广泛用于产生无衍射光束(正比于第

一类零阶贝塞尔函数)^[1-4], 产生的无衍射光束被广泛应用于光镊、成像等领域^[5-6]。但折射式轴棱锥在实际应用中需要小的底角来产生长距离的无衍射光束^[7], 而小底角的折射式轴棱锥又对加工精度及误差有很高要求^[8-9], 从而使轴棱锥在系统中很难对准

收稿日期: 2017-10-30; 收到修改稿日期: 2017-11-12

基金项目: 吉林省自然科学基金(20150101062JC)

作者简介: 刘晓庆(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事衍射光学元件的设计及其光场分析方面的研究。

E-mail: 972935367@qq.com

导师简介: 薛常喜(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事衍射光学及超精密加工方面的研究。

E-mail: xcx272479@sina.com(通信联系人)

且设计灵活性很低,加工成本高。并且,轴棱锥的顶点离轴加工误差会使衍射光斑分离,椭圆加工误差也会使衍射光斑偏离理想的无衍射光^[10-11]。由于衍射光学元件的固有优势,本文基于传统轴棱锥的相位函数设计三种衍射光学元件并分析其光场分布特性^[12]。由于理论上求解衍射光场分布解析式较为复杂和困难^[13],且遵循亥姆霍兹方程的角谱理论能够在频域上分析衍射轴棱锥精确的光场分布^[14],所以本文采用衍射角谱理论对三种衍射光学元件在单色高斯激光照射下的光场分布特性进行数值分析,为实际应用提供理论依据。

2 用于产生无衍射贝塞尔光束的衍射轴棱锥

传统折射式轴棱锥是一种非球面线聚焦透镜,被广泛用于产生无衍射贝塞尔光束。轴棱锥连续相位函数可以表示为:

$$\varphi(r) = \varphi_0 \left(1 - \frac{2r}{D} \right), \quad 0 \leq r \leq \frac{D}{2}, \quad (1)$$

式中 D 为轴棱锥的口径, φ_0 为中心位置的任意最大相位值, r 为径向坐标。

为了描述一个衍射元件,对传统轴棱锥的相位函数进行相位压缩。相位压缩过程的示意图如图 1 所示,图中 d 为衍射轴棱锥的周期, λ 为入射光波长, n 为材料折射率, $\lambda/(n-1)$ 为衍射轴棱锥的最大厚度值,虽然菲涅耳轴棱锥与衍射轴棱锥的结构形式相同,但其最大厚度值远远大于 $\lambda/(n-1)$ (即最大相位值远远大于 2π)。将菲涅耳轴棱锥的最大相位值设为 2π ,即具有相等周期衍射轴棱锥的相位函数为:

$$\varphi = \text{mod}[2\pi(1 - r/d)], \quad 0 \leq r \leq \frac{D}{2}, \quad (2)$$

式中 d 为衍射轴棱锥的周期, D 是衍射轴棱锥的口径, r 为径向坐标, $\text{mod}()$ 为相位压缩函数。等周期衍射轴棱锥光场分析示意图如图 2 所示,图中 L 表示聚焦深度, ω_0 为入射高斯光束的束腰半径, d 为衍射轴棱锥的周期, θ 为衍射角, $(x, y; 0)$ 平面为衍射面, $(x, y; z)$ 平面为观察面, L_1 为超过衍射轴棱锥聚焦深度的距离。

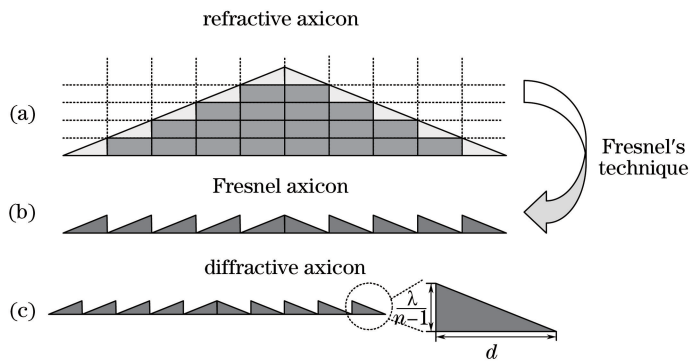


图 1 轴棱锥相位压缩示意图。(a) 折射轴棱锥; (b) 菲涅耳轴棱锥; (c) 衍射轴棱锥

Fig. 1 Schematic of phase compression of axicon. (a) Refractive axicon; (b) Fresnel axicon; (c) diffractive axicon

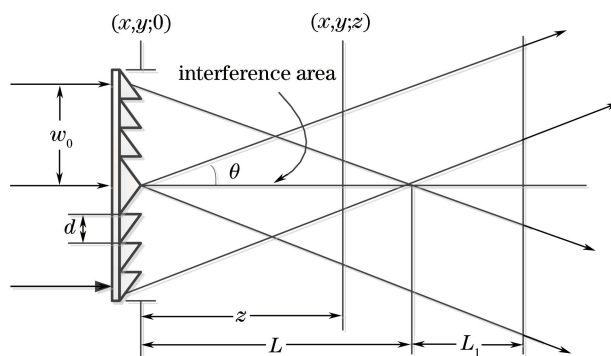


图 2 轴棱锥衍射的理论分析

Fig. 2 Theoretical analysis of the diffraction of axicon

由等周期衍射轴棱锥的相位函数 $\varphi = \text{mod}[2\pi(1 - r/d)]$ 可求得等周期衍射轴棱锥的透过率函数

$T = \exp(i\varphi)$, 设正入射在衍射轴棱锥上光波复振幅分布为 $u_1(x_0, y_0; 0)$, 其中 $x_0^2 + y_0^2 = r^2$, 则平行光

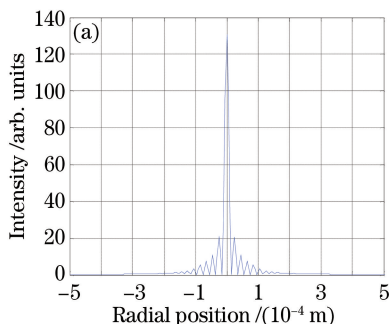
经过衍射轴棱锥后的复振幅分布为:

$$u(x_0, y_0; 0) = u_1(x_0, y_0; 0)T(x_0, y_0), \quad (3)$$

可以根据角谱衍射理论在频域上分析聚焦深度内的光场分布 $u(x, y; z)$, 可以表示为:

$$u(x, y; z) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[u(x_0, y_0; 0)]H(f_x, f_y)\}, \quad (4)$$

式中 \mathcal{F} 、 \mathcal{F}^{-1} 分别代表傅里叶变换与傅里叶逆变换, (f_x, f_y) 为频域坐标, $f_x = x/\lambda z$, $f_y = y/\lambda z$, $H(f_x, f_y)$ 为频域的传递函数。设入射高斯光波长为 780 nm, 垂轴光强 I 服从 $\exp(-2r^2/\omega_0^2)$ 的 e 指数分布, $\omega_0 = 0.6$ mm, 元件的孔径为 2 mm, 周期 $d = 40$ μm , 元件厚度 t 的公式为 $t = \lambda/(n-1)$, 由 $n =$



1.56, 计算得出 $t = 1.4$ μm , 聚焦深度 $L = \omega_0/\tan\theta = 30.8$ mm。

图 3 是在平行高斯激光照射下的衍射轴棱锥光场分布, 由图 3 可知衍射轴棱锥在聚焦深度内 $L/2$ 和 $L/4$ 处与传统轴棱锥相比同样可以产生无衍射贝塞尔光束分布, 并且 $L/2$ 和 $L/4$ 处的无衍射贝塞尔光束的中心最大光强值不同。由于衍射轴棱锥有较小的表面形貌并在聚焦深度内可以产生无衍射光束, 而无衍射光束具有在一定传播距离内强度及光斑尺寸保持不变、遇到障碍物会自重现等特性, 所以衍射轴棱锥应用在超精密测量、空间激光通信、粒子捕获、光束整形等方面具有优势。

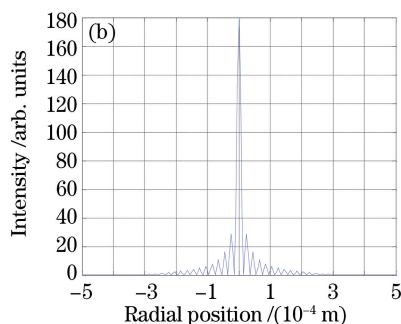


图 3 径向光强分布。(a) $L/4$ 处; (b) $L/2$ 处

Fig. 3 Radial intensity distributions. (a) Position at $L/4$; (b) position at $L/2$

3 螺旋轴棱锥

螺旋轴棱锥是由衍射轴棱锥与螺旋相位板沿平面胶合而成, 其结构如图 4 所示。

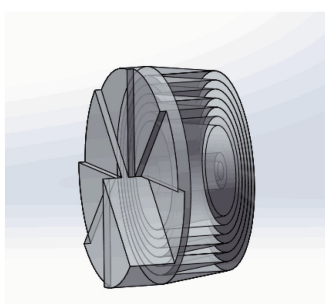


图 4 螺旋轴棱锥的结构图

Fig. 4 Structures schematic of helical axicon

在近似薄透镜的情况下, 衍射轴棱锥的透过率函数 $T_1(r) = \exp(i\varphi)$, 其中 $\varphi = \text{mod}[2\pi(1 - r/d)]$, 螺旋相位板的透过率函数 $T_2(\theta) = \exp(-i l \theta)$, 即螺旋轴棱锥的透过率函数可以表示为:

$$T(r, \theta) =$$

$$T_1(r)T_2(\theta) = \exp\{i \text{mod}[2\pi(1 - r/d)] - i l \theta\}, \quad (5)$$

$$0 \leq r \leq D/2, 0 \leq \theta \leq 2\pi,$$

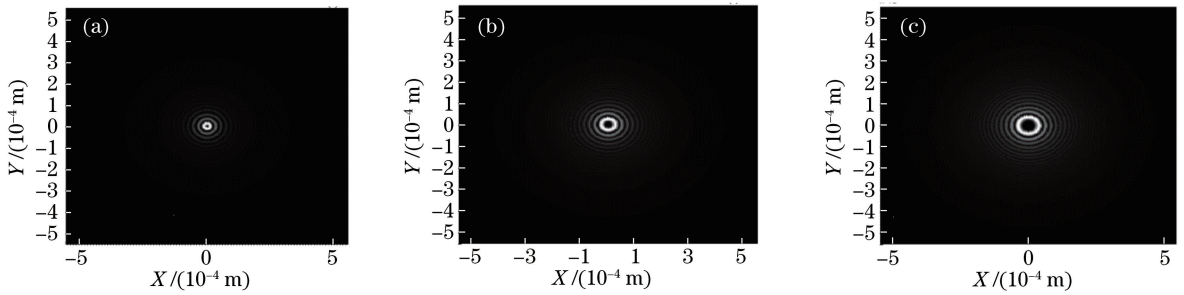
式中 d 为衍射轴棱锥的周期, r 为径向坐标, D 为衍射轴棱锥的口径, θ 为方位角, l 为螺旋相位板的拓扑电荷数。由(5)式可以看出螺旋轴棱锥的透过率函数为径向坐标 r 与方位角 θ 的函数。由(5)式根据角谱衍射理论可以得到螺旋轴棱锥后的光场分布 $u(x, y; z)$ 为:

$$u(x, y; z) =$$

$$\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[u_1(x_0, y_0; 0)T(r, \theta)]H(f_x, f_y)\}. \quad (6)$$

设入射光垂直入射螺旋轴棱锥, 入射高斯光波长为 780 nm, 垂轴光强 I 服从 $\exp(-2r^2/\omega_0^2)$ 的 e 指数分布, $\omega_0 = 0.6$ mm, 与螺旋相位板胶合的等周期衍射轴棱锥参数分别是孔径为 2 mm, 周期 d 为 40 μm , 由以上参数分析平行高斯激光通过螺旋轴棱锥 ($l = 1, 3, 5$) 后 5 mm 处的光强分布, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 螺旋轴棱锥产生的贝塞尔光束的阶数与拓扑电荷数 l 相同, 这样就可以通过控制螺旋相位板的拓扑电荷数来产生高阶贝塞尔函数。由于高阶贝塞尔光束为典型的涡旋光束, 其波阵面呈螺旋状, 中心光强为零, 所以螺旋轴棱锥在信息编码与传输和粒子囚禁等方面具有广泛应用。

图 5 螺旋轴棱锥后的光强分布。(a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=5$ Fig. 5 Intensity distribution behind helical axicon. (a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=5$

4 轴棱锥阵列

根据衍射轴棱锥的振幅透过率函数,设计一个 3×3 的轴棱锥阵列。根据列阵定理,单个衍射轴棱锥的透过率函数为 $T(x_0, y_0)$,轴棱锥阵列上有 3×3 个与其形状完全相同的衍射轴棱锥,且取向完全一致,也就是说每一个衍射轴棱锥都可以由其他任何一个通过平移得到。若取每一衍射轴棱锥的中心点 $O_n(\xi_n, \eta_n)$ ($n=1, 2, 3, \dots, 9$) 来代表该衍射轴棱锥的位置,则 3×3 的轴棱锥阵列的透过率函数 $T^1(x_0, y_0)$ 可以表示为:

$$T^1(x_0, y_0) = T(x_0, y_0) \sum_{n=1}^9 \delta(x_0 - \xi_n, y_0 - \eta_n), \quad (7)$$

由(7)式根据角谱衍射理论可以得到轴棱锥阵列后的光场分布 $u(x, y; z)$:

$$\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[u_1(x_0, y_0; 0)T^1(x_0, y_0)]H(f_x, f_y)\}. \quad (8)$$

设入射高斯光波长为 780 nm,垂轴光强 I 服从 $\exp(-2r^2/\omega_0^2)$ 的 e 指数分布, $\omega_0 = 3$ mm, 单个衍射轴棱锥的孔径为 1 mm, 周期 $d = 40 \mu\text{m}$ 。根据以上参数可求得轴棱锥的相位分布如图 6 所示。

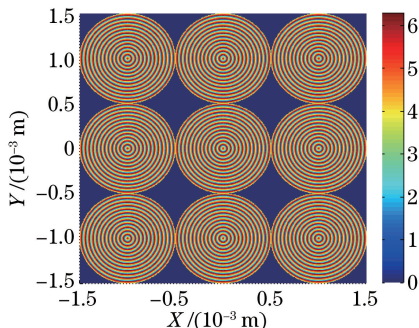


图 6 轴棱锥阵列的相位分布

Fig. 6 Phase distribution of axicon array

根据图 6 可知,轴棱锥阵列中包括 9 个口径为 1 mm 的等周期衍射轴棱锥,每个衍射轴棱锥中心的最大相位值为 2π 。依据角谱衍射理论可求得轴棱锥阵列后 5 mm 处的光强分布,如图 7 所示。

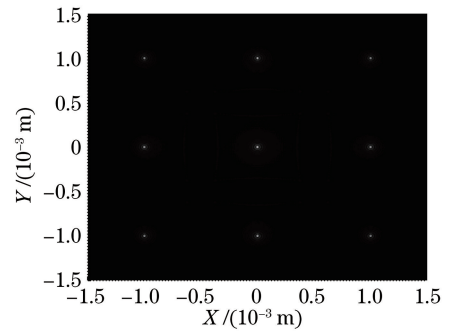


图 7 轴棱锥阵列后的光强分布

Fig. 7 Intensity distribution behind axicon array

由图 7 可知, 3×3 轴棱锥阵列可以产生一个 3×3 的无衍射贝塞尔光束阵列,这样的阵列光学元件在激光加工领域可以实现批量生产,具有很大优势。

5 结 论

折射式轴棱锥对加工精度及误差有很高要求,而具有相同相位函数的衍射光学元件有更小的表面形貌,且衍射光学元件各个部分产生各自的、与其他部分互不相干的相位,所以每个小部分的误差不会影响整体。以传统轴棱锥相位函数为基础,设计衍射轴棱锥、螺旋轴棱锥和轴棱锥阵列三种衍射光学元件的透过率函数,建立光场传播的数学模型,分析了三种衍射光学元件的光场分布特性。结果表明:衍射轴棱锥与传统轴棱锥相比在其聚焦深度内同样可以产生无衍射贝塞尔光束;螺旋轴棱锥产生的贝塞尔光束的阶数与其拓扑电荷数相等;轴棱锥阵列可以产生无衍射贝塞尔光束阵列。本研究结果可为激光精密加工、光学精密测量等领域的研究提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] McLeod J H. The axicon: a new type of optical element [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(8): 592-597.
- [2] McLeod J H. Axicons and their uses [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, 50(2): 166-169.
- [3] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [4] Jaroszewicz Z, Burvall A, Friberg T. Axicon-the most important optical element [J]. *Optics & Photonics News*, 2005, 16(4): 34-39.
- [5] Guo Z H, Liu Z T, Chen Q M, *et al.* Application and progress of laser shaping devices in optical tweezers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090004.
郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 等. 激光整形器件在光镊中的应用及进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090004.
- [6] He Y L, Xu H B, Wu F T. Study on the image information carried by the non-diffraction beam imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0611002.
何艳林, 徐浩博, 吴逢铁. 无衍射光束成像系统携带信息的研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0611002.
- [7] Skipetrov S E, Peusner J, Cerbino R, *et al.* Noise in laser speckle correlation and imaging techniques [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14519-14534.
- [8] Dépret B, Verperk P, Hennequin D. Characterization and modelling of the hollow beam produced by a real conical lens [J]. *Optics Communications*, 2002, 211(1-6): 31-38.
- [9] Akturk S, Zhou B, Pasquiou B, *et al.* Intensity distribution around the focal regions of real axicons [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(17): 4240-4244.
- [10] Hu R, Wu F T. Influence of axicon vertex off axis machining error on Bessel beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1205002.
胡润, 吴逢铁. 轴棱锥顶点离轴加工误差对贝塞尔光束的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1205002.
- [11] Zeng X H, Wu F T, Xing X X, *et al.* Influence of manufacture error with non-circular symmetry in an axicon on the Bessel beams quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(6): 809-813.
曾夏辉, 吴逢铁, 邢笑雪, 等. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响 [J]. *中国激光*, 2006, 33(6): 809-813.
- [12] Amako J, Yoshimura K, Sawaki D, *et al.* Laser-based microprocesses using diffraction-free beams generated by diffractive axicons [C]. *SPIE*, 2005, 5713: 497-507.
- [13] Zhang X S, He C, Han P P. Intensity distribution analysis of axicon lens by numerical angular spectrum method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1207001.
张旭升, 何川, 撒芑芑. 轴锥镜光强分布的角谱衍射数值分析法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1207001.
- [14] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics* [M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 1996: 55-61.