

用于产生 Bessel 光的广义轴棱锥

李冬^{1,2}, 吴逢铁^{1,2}, 李攀^{1,2}, 何西^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析菲涅尔轴棱锥、二元相位型衍射轴棱锥和透镜轴棱锥等 3 种广义轴棱锥的相位函数,以及它们与线性轴棱锥和对数轴棱锥两种基本轴棱锥的相位函数关系. 研究表明:广义轴棱锥的相位函数是两种基本轴棱锥的相位函数演变而来,通过调整广义轴棱锥的结构参数可使它们具有基本轴棱锥的主要光传输特性. 菲涅尔轴棱锥不仅拥有基本轴棱锥的光传输特性,且结构紧凑,光吸收损耗小;二元相位型衍射轴棱锥设计自由度大,不仅保证高的衍射效率且光谱特性好;透镜轴棱锥制造简单,成本低,易于进行大尺寸制作.

关键词: Bessel 光束; 轴棱锥; 相位函数; 光传输

中图分类号: O 436.1 **文献标志码:** A

无衍射(Bessel)光束^[1]在自由空间传播时保持光强分布不变,并具有中心光斑小、光强度集中及自重建^[2-5]等一系列特性. 早期的研究者指出,无衍射光束可以应用于高精度准直、测量^[6-7]和光学微操作^[8-10]等领域,近年来,人们又发现 Bessel 光束可应用于厚介质成像、相干断层扫描^[11]及光学拉力^[12]等领域. 目前,已经有多种方法可以产生无衍射光束,如环缝-透镜法^[13]、计算机全息法^[14]、轴棱锥法^[15-22],等等. 其中,利用轴棱锥产生 Bessel 光的方法具有结构简单、转换效率高和光损伤阈值大等优点^[23]. 用于产生 Bessel 光的轴棱锥有传统的折射轴棱锥^[24]、菲涅尔轴棱锥^[25]、二元相位衍射轴棱锥^[26]、透镜轴棱锥^[18]、光纤轴棱锥^[27]等. 然而,从光学元件相位函数的角度分析,可以发现这些轴棱锥的相位函数都是从线性轴棱锥和对数轴棱锥这两种基本轴棱锥^[28]的相位函数演变而来. 前者的相位函数是空间径向坐标的线性函数,而后的相位函数是空间径向坐标的对数函数. 本文分别介绍 3 种广义轴棱锥,研究它们的相位函数与两种基本轴棱锥的相位函数的关系.

1 用于产生 Bessel 光的两种基本的轴棱锥

在无衍射光的应用中,一般利用轴棱锥的线聚焦特性来产生近似 Bessel 光,如图 1 所示. 这就要求得到的近似 Bessel 光的性质尽可能地接近理想 Bessel 光束的性质,即中心光斑强度和光斑大小不随传播距离改变. 基于此, A. Burnal 等^[28]根据几何光学的能量守恒方法,分别设计了线性轴棱锥和对数轴棱锥,它们的相位函数分别为

$$\varphi_{\text{linear}}(\rho) = (a\rho^2 + b)^{1/2}, \tag{1}$$

$$\varphi_{\text{log}}(\rho) = -a\log(b\rho^2 + c). \tag{2}$$

式(1)~(2)中: a, b, c 由轴棱锥的结构参数决定. 式(1)中的相位函数与径向坐标成线性关系,故相位函

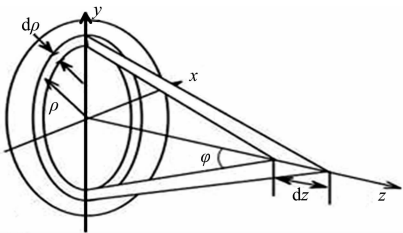


图 1 轴棱锥线聚焦产生 Bessel 光
Fig. 1 Generation of Bessel beam based on line focusing

数具有式(1)形式的轴棱锥称为线性轴棱锥;而式(2)中相位函数与径向坐标成对数关系,故相位函数具有式(2)形式的轴棱锥称为对数轴棱锥. 由于相位函数的不同,它们的光学传输特性也不相同.

在平面波入射情况下,两种基本的轴棱锥产生的 Bessel 光的轴上光场强度分布特性图,如图 2 所示. 图 2 中, I_n 为归一化光强度. 从图 2 可知:线性轴棱锥产生的 Bessel 光束的中心光斑强度(I_n)随着传播距离(z)线性增强,而对数轴棱锥产生的 Bessel 光的中心光斑的光强度几乎不随传播距离变化.

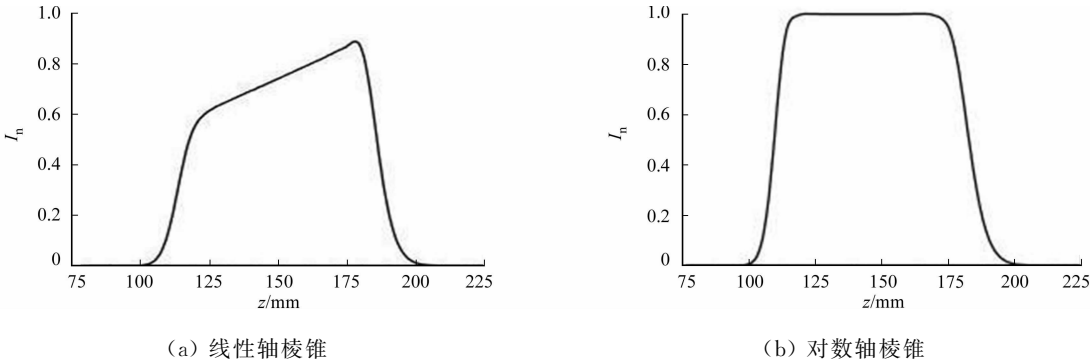


图 2 基本轴棱锥产生 Bessel 光场的轴上强度分布

随着 Bessel 光在光学准直测量、成像及生物工程等领域的广泛应用,为了在不同的应用环境下得到合适的 Bessel 光场,以上述两种基本轴棱锥为基础的多种广义轴棱锥被提出并用于产生具不同分布特性的 Bessel 光场.

2 用于产生 Bessel 光的几种广义轴棱锥

2.1 菲涅尔轴棱锥

Golub 等^[25]根据菲涅透镜的设计原理设计了菲涅尔轴棱锥,如图 3 所示. 它的外形与衍射光学元件很相似,但却是一个纯粹的折射光学元件,其相位函数为

$$\varphi(\rho) = -(n-1)\gamma(\rho-d_i), \quad d_i \leq \rho \leq d_{i+1}, \quad [d_i, d_{i+1}] \subset [0, R]. \quad (3)$$

式(3)中: $[d_i, d_{i+1}]$ 为第 i 个环带区域; $d_{i+1}-d_i$ 为三角形沟槽环带的宽度; γ 为三角形沟槽的倾角; ρ 是菲涅尔轴棱锥的径向坐标.

菲涅尔轴棱锥产生的 Bessel 光场,如图 4 所示. 从图 4(b)可知:菲涅尔轴棱锥产生的 Bessel 光场的轴上光强分布特性与传统轴棱锥产生的 Bessel 光场十分相近. 实际上,由式(3)也可知,菲涅尔轴棱锥的相位函数是传统轴棱锥相位函数的分段化的结果. 因此,上述菲涅尔轴棱锥是线性轴棱锥. 为了得到更均匀轴上光强分布,可根据对数轴棱锥的相位函数设计并制造出相对应的菲涅尔对数轴棱锥.

2.2 二元相位型衍射轴棱

Bialic 等^[26]应用二元光学技术设计制造了二元相位圆形光栅轴棱锥(BPCA),其模型如图 5 所示. 它的透过率函数为

$$T_{\text{bin}}(\rho) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp(-ik \sin(\theta_m) \rho). \quad (4)$$

式(4)中: $c_m = 2i/(\pi m)$; $\sin \theta_m = m\lambda/d$, m 是衍射阶数, θ_m 是衍射角, d 是光栅的周期.

当波长为 λ 的平面单色光波入射时,将在轴棱锥后的第一衍射级上产生 Bessel 光场. 式(4)表明: BPCA 的透过率函数是由无穷多个具有线性相位函数 $\varphi(\rho) = -\sin(\theta_m)\rho$ 的轴棱锥透过率函数叠加而成,因此二元衍射性光栅轴棱锥也是以基本的线性轴棱锥为基础设计的.

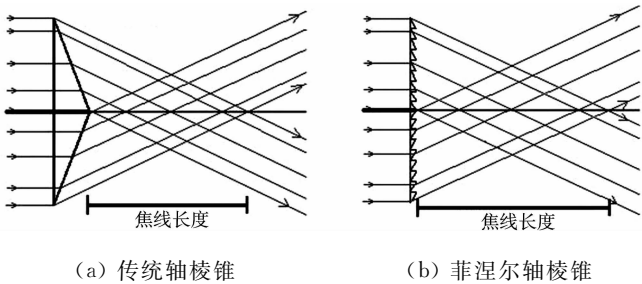
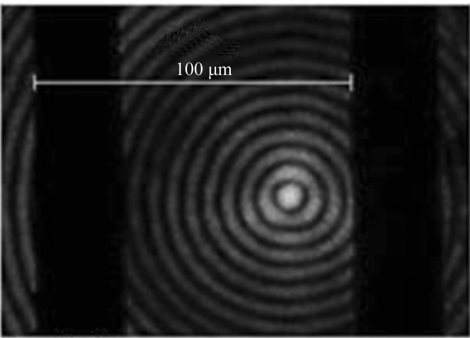
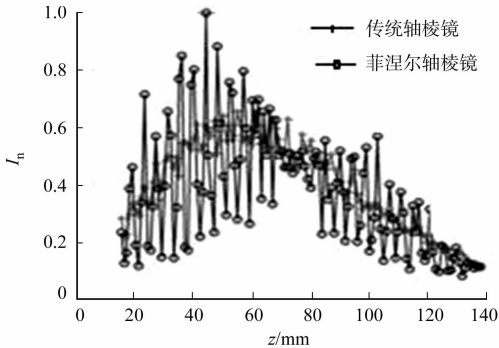


图 3 传统轴棱锥与等效的菲涅尔轴棱锥

Fig. 3 Traditional axicon and an equivalent Fresnel axicon



(a) 径向光场分布



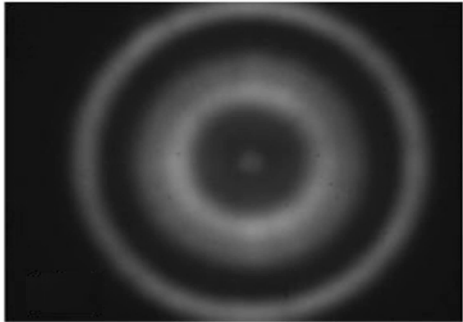
(b) 轴上光强分布

图 4 高斯光照射下菲涅尔轴棱锥产生的 Bessel 光场分布

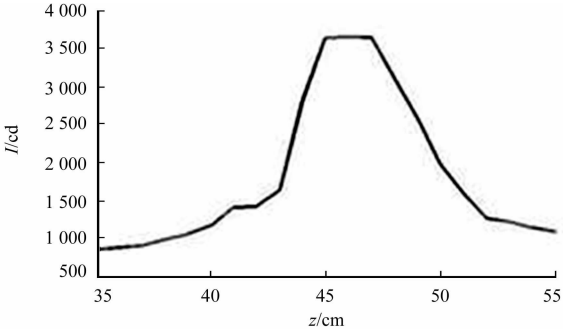
Fig. 4 Bessel beam distribution by Fresnel axicon illuminated by Gaussian beam

为了得到更好的光学传输特性，Bialic 等^[26]在同一基底上刻蚀了多个同圆心但具有不同周期的 BPCA，即多通道环形线性衍射轴棱锥 (MALDAS). 由两个不同周期的 BPCA 组成的双通道环形衍射轴棱锥 (DALDAS)，如图 6 所示.

利用 MALDAS 产生 Bessel 光场分布，如图 7 所示. 从图 7 可知：MALDAS 不仅具有轴棱锥的长焦深特性，而且具有光栅的光谱选择特性，可用于轴棱锥的多光谱成像系统. 二元衍射型轴棱锥的设计有很大的自由度，常根据衍射光场的要求，利用最优化算法找到轴棱锥的最佳相位分布，再通过微细加工制造成元件. 这些元件体积小，易于集成，可实现许多球面或非球面光学元件不能实现的光束传输功能.



(a) 横向分布



(b) z 轴方向的光强分布

图 7 利用 MALDAS 产生 Bessel 光场分布

Fig. 7 Optical field distribution of Bessel beam generated by MALDAS

2.3 透镜轴棱锥

由发散透镜和聚焦透镜胶合成的透镜轴棱锥，如图 8 所示. 从图 8 可知：透镜轴棱锥是由两个简单的球面透镜组合而成，这两种透镜(BK7 和 SF2)的折射率分别为 1.515 09 和 1.643 79，利用这种轴棱锥产生 Bessel 光不仅结构简单而且成本低. Jaroszewicz 等^[18-19]通过改变发散透镜和聚焦透镜的不同组合方式改变透镜轴棱锥系统的高阶球差，并利用透镜轴棱锥系统的高阶球差逼近对数轴棱锥的相位函数，使得透镜轴棱锥拥有对数轴棱锥的近似性质. 用高阶球差表示的透镜轴棱锥的相位函数为

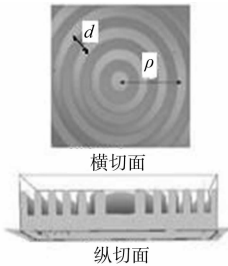


图 5 二元相位圆形光栅轴棱锥
Fig. 5 Binary phase circular
grating axicon

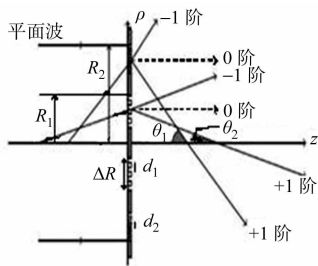


图 6 双通道环形线性衍射轴棱锥
Fig. 6 Double annular linear
diffractive axicon

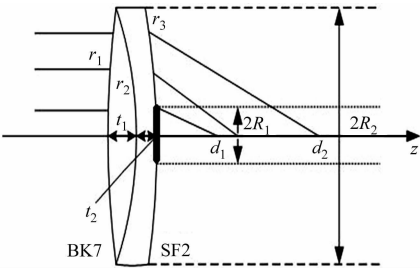


图 8 透镜轴棱锥
Fig. 8 Lens axicon

$$\varphi(\rho) = \rho^2/2f + \beta\rho^4 - \gamma\rho^6 + \cdots.$$

(5)

式(5)中: ρ 是双胶合透镜的径向坐标; f 是透镜轴棱锥的傍轴等效焦距; β 和 γ 分别是双胶合透镜的三阶和五阶球差系数.

通过数值模拟得到的透镜轴棱锥产生的无衍射光场分布,如图 9 所示. 图 9 中, I 为光强度. 计算结果表明:尽管透镜轴棱锥产生的 Bessel 光场没有完全达到对数轴棱锥的效果,但它已经具有对数轴棱锥的主要性质. 透镜轴棱锥设计的巧妙之处在于利用了球面透镜的球差,因此制造工艺简单且易于大尺寸制作. 为了使透镜轴棱锥的性质更接近对数轴棱锥,可以采用更复杂的透镜系统来代替对数轴棱锥.

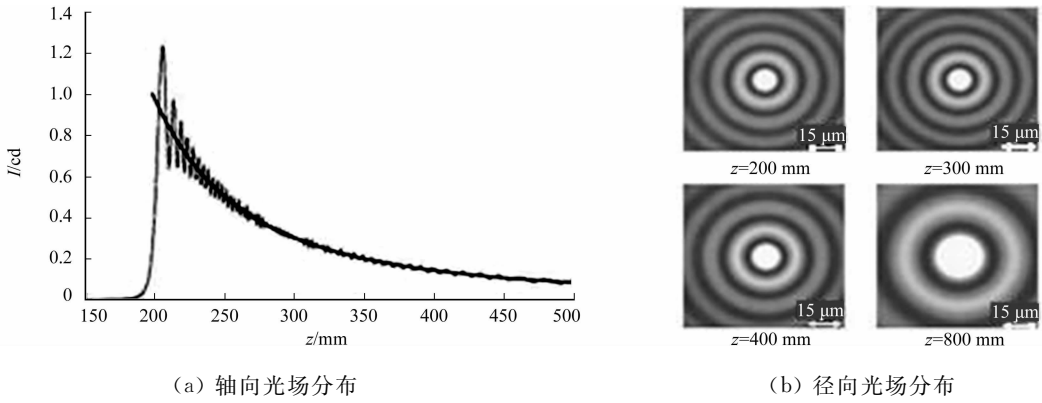


图 9 利用数值模拟得到的透镜轴棱锥产生的 Bessel 光场强度分布

Fig. 9 Numerical simulation of the Bessel beam field intensity distribution generated from a lens axicon

3 结论

分析了 3 种广义轴棱锥的相位函数,得出其相位函数都是由两种基本轴棱锥的相位函数演变而来的结论. 根据它们的结构特性,介绍了 3 种广义轴棱锥的光传输特性,发现可以通过调节结构参数来改善它们的光传输特性.

研究表明:菲涅尔轴棱锥结构紧凑,吸收损耗低,制造成本低但易受外界温度和压力影响而变形;多环形孔径线性衍射轴棱锥等二元相位型轴棱锥有很大的设计自由度,可以根据衍射场分布的要求来设计制造,体积小,易于集成化但是制造工艺复杂;透镜轴棱锥制造工艺简单,可以制造大尺寸元件;但它产生的 Bessel 光束的质量较不理想.

由于无衍射光具有许多优良的特性,在很多方面得到的广泛的应用,根据应用环境的不同设计制造不同的轴棱锥来产生满足要求的无衍射光场很有实用意义.

参考文献:

[1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffractive-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.

[2] FAHRBACH F O, SIMON P, ROHRBACH A. Microscopy with self-reconstructing beams[J]. Nat Photonics, 2010, 4(11): 780-785.

[3] 张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(10): 1131-1137.

[4] 范丹丹, 吴逢铁, 程志明, 等. 障碍物后周期性 Bottle beam 的自重建[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 244104.

[5] FAHRBACH F O, ROHRBACH A. Propagation stability of self-reconstructing Bessel beams enables contrast-enhanced imaging in thick media[J]. Nature Communications, 2012, 3: 632-639.

[6] FORTIN M, PICHE M, BORRA E. Optical tests with Bessel beam interferometry[J]. Optics Express, 2004, 12(24): 5887-5895.

[7] ALEXEEV I, KIM K Y, MILCHBERG H M. Measurement of the superluminal group velocity of an ultrashort Bessel beam pulse[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(7): 073901.

[8] GARCÉS-CHÁVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.

- [9] 程治明,吴逢铁,张前安,等. 自成像局域空心光束产生的新方法 & 粒子俘获[J]. 物理学报,2012,61(9):094201.
- [10] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature,2003,424(6950):810-816.
- [11] LEE K S,ROLLAND J P. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range[J]. Optics Letters,2008,33(15):1696-1698.
- [12] CHEN Jun,NG J,LIN Zhi-fang,et al. Optical pulling force[J]. Nature Photonics,2011,5(9):531-534.
- [13] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams (I): The scalar theory[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(4): 651-654.
- [14] VASARA A,TURUNEN J,FRIBERG A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. JOSA A,1989,6(11):1748-1754.
- [15] SCOTT G,MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. Optical Engineering,1992,31(12):2640-2643.
- [16] 郑维涛,吴逢铁,张前安. 双轴棱锥产生长距离近似无衍射光的新技术[J]. 物理学报,2012,61(14):144-201.
- [17] 程治明,吴逢铁,方翔,等. 圆顶轴棱锥产生多个局域空心光束[J]. 物理学报,2012,61(21):214201.
- [18] BURVALL A,KOLACZ K,JAROSZEWICZ Z,et al. Simple lens axicon[J]. Applied Optics,2004,43(25):4838-4844.
- [19] 张前安,吴逢铁,马亮,等. 透镜轴棱锥产生 ns 近似无衍射 Bessel 光脉冲[J]. 光电子·激光,2011,22(6):901-904.
- [20] PONNAN S,CHELLADURAI M,BALASUNDARAM R K,et al. Generation of a strong uniform transversely polarized nondiffracting beam using a high-numerical-aperture lens axicon with a binary phase mask[J]. Applied Optics,2013,52(4):849-853.
- [21] 马宝田,吴逢铁,马亮. 非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光[J]. 物理学报,2010,59(9):6213-6218.
- [22] PARSA S,FALLAH H R,RAMEZANI M,et al. Theoretical and experimental investigation of generating pulsed Bessel-Gauss beams by using an axicon-based resonator[J]. Applied Optics,2012,51(31):7475-7481.
- [23] 吴逢铁,张前安,郑维涛,等. 效轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束[J]. 中国激光,2011,38(12):1202004.
- [24] MCLEOD J H. The axicon: A new type of optical element[J]. J Opt Soc Am,1954,44(8):592-597.
- [25] GOLUB I. Fresnel axicon[J]. Optics Letters,2006,12(31):1890-1892.
- [26] BIALIC E,DE LA TOCNAYE J L D. Multiple annular linear diffractive axicons[J]. JOSA A,2011,28(4):523-533.
- [27] TAGUCHI K. Two-dimensional cell trapping using single axicon fiber without physical contact[J]. Key Engineering Materials,2012,523-524:1070-1075.
- [28] BURVALL A. Axicon imaging by scalar diffraction theory[D]. Kista: KTH,2004:68.

Generalized Axicons Used to Generate Bessel Beam

LI Dong^{1,2}, WU Feng-tie^{1,2}, LI Pan^{1,2}, HE Xi^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The phase functions of three kinds generalized axicons including Fresnel axicons, binary axicons and lens axicons are analyzed and the relations of phase functions between them and two kinds of basic axicons namely, the linear axicons and the logarithmic axicons are demonstrated. The research results Indicate that the phase functions of generalized axicons are derived from the phase functions of the two basic axicons, and the generalized axicons can obtain the main optical beam transmission properties of the basic axicons through adjusting their structure parameters. Fresnel axicon not only keeps the optical propagation properties of traditional axicon, but also shows more compact with less absorption loss. Binary axicon can be designed in order to generate a given optical field, both a good diffractive efficiency and spectrum property are provided. Lens axicon is easy to manufacture with larger aperture and less expensive.

Keywords: Bessel beam; axicons; phase function; beam transmission