

文章编号: 1000-5013(2007) 02-0143-04

多色高斯光束照射下透镜轴棱锥的聚焦特性

陈 媛, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 从菲涅耳衍射积分公式出发, 推导多色高斯光束被球差透镜衍射后光强分布的解析公式, 进行数值模拟和物理分析. 结果表明, 光谱半宽 σ 小的多色高斯光束照射透镜轴棱锥时, 不同观察面的光强分布均为 J_0^2 的形式. 随观察平面远离透镜轴棱锥, 横向光强第 1 零点半径逐渐增大; 但当 σ 取值较大时, 横向光强分布不再是 J_0^2 的形式, 且横向光强的零点不再明显. 对于轴上光强而言, 多色高斯光束提高轴上光强分布的均匀性.

关键词: 透镜轴棱锥; 多色高斯光束; 衍射; 光强分布

中图分类号: O 436

文献标识码: A

近年来, 轴棱锥作为一种产生轴上焦线的光学元件, 已经引起了人们的关注. 具有相位延迟功能的轴棱锥, 只要对其相位延迟项赋以适当的对数表达式, 就可以实现轴上光强分布的均匀化, 从而获得特定宽度的均匀焦线^[1, 2]. 然而, 最近的研究发现, 球差透镜与轴棱锥有着极其相似的特性, 因此称为透镜轴棱锥. 文[1] 利用高斯光束照射环形光阑与球差透镜组成的光学系统, 产生特定宽度的均匀焦线. 一定宽度的均匀焦线, 在激光热处理、光束准直、度量、校准等方面都具有非常诱人的应用前景^[2-10], 但是, 利用单色光源照射透镜轴棱锥而获得的轴上光强抖动得比较厉害^[1]. 本文利用多色高斯光束照射透镜轴棱锥, 提高轴上光强分布的均匀性. 同时, 分析了多色高斯光束的光谱半宽对衍射场轴上光强、横向光强分布的影响, 并将其与单色高斯光束经透镜轴棱锥衍射后的光强分布情况进行了比较.

1 理论模型

一中心波长为 λ_0 的多色高斯光束, 经负球差透镜轴棱锥聚焦, 如图 1 所示. 环形光阑的内、外径分别为 R_1 和 R_2 , 球差透镜的焦距为 f , 球差系数为 β . 因此, 透镜球差可表示为^[1].

$$T(\rho) = \begin{cases} \exp[ik(\beta \rho^4 - \rho^2/2f)], & \rho \in R_1, R_2, \\ 0 & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

上式中, ρ 为透镜平面的位置矢量. 当 β 取正值时, 透镜为正球差透镜; 当 β 取负值时, 透镜为负球差透镜. 本文我们仅考虑负球差透镜的情况.

假设入射的高斯光束的束腰正好位于透镜平面处 ($z = 0$), 透镜平面处的光场可表示为

$$U_0(\rho) = A_0 \exp(-\rho^2/w^2), \quad (2)$$

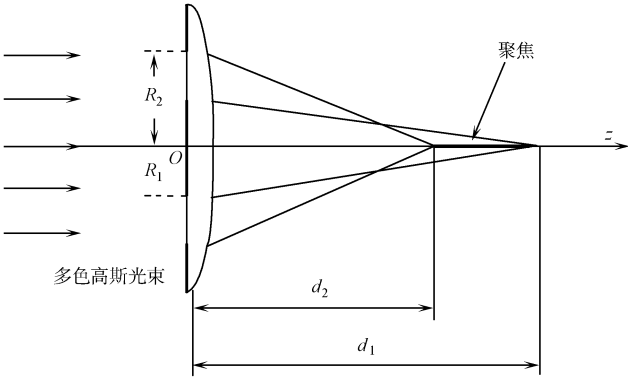


图 1 球差透镜聚焦示意图

Fig. 1 Illustrating the focusing of the lens axicon

收稿日期: 2006-10-09

作者简介: 陈 媛(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事光束传输的研究; 通信作者: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, E-mail: jixing@hqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60747041)

其中, A_0 表示 $\rho=0$ 处的光强, w 为高斯光束的束腰宽度.

根据菲涅尔衍射积分, 单色高斯光束照射透镜轴棱锥时聚焦场中的光强分布可表示为

$$I(r, \lambda, z) = \left(\frac{kA_0}{z}\right)^2 \left| \int_{R_1}^{R_2} J_0(k\rho/z) \exp(-\rho^2/w_0^2) T(\rho) \exp(ik\frac{\rho^2}{2z}) \rho d\rho \right|^2, \tag{3}$$

其中, λ 为入射的单色高斯光束的波长; k 为波数, $k=2\pi/\lambda$

$$I(r, z, \lambda) = \left(\frac{kA_0}{z}\right)^2 \left| \int_{R_1}^{R_2} J_0(k\rho/z) \exp(-\rho^2/w^2) \exp[ik\phi(\rho, z)] \rho d\rho \right|^2, \tag{4}$$

并且有

$$\phi(\rho, z) = \beta\rho^4 - \left(\frac{1}{2f} - \frac{1}{2z}\right)\rho^2. \tag{5}$$

下面, 我们考虑多色高斯光束照射透镜轴棱锥的情况. 假设入射的多色高斯光束的频率分布 $S(v)$ 为高斯线型的, 将它转化成波长的分布^[10], 有

$$S(\lambda) = \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2\lambda_0^2}{\sigma^2\lambda^2}\ln 2\right]. \tag{6}$$

其中, $\sigma = \Delta v \lambda_0^2/c$, c 为光速; λ_0 为入射光的中心波长; Δv 是中心频率与源频率 $S(v)$ 峰值的一半所对应的频率的间隔. 那么, 多色高斯光束照射透镜轴棱锥时, 聚焦场中的光强分布可表示为

$$I(r, z) = \int S(\lambda) I(r, \lambda, z) d\lambda \tag{7}$$

上式中, 积分扩展到全部光谱区域.

根据方程(3)~(7), 我们数值模拟了聚焦场的光强分布, 并将通过数值模拟的结果, 来证明多色高斯光束大大提高了轴上光强分布的均匀性.

2 数值结果

将多色高斯光束被透镜轴棱锥衍射后的光强分布情况, 与单色高斯光束被透镜轴棱锥衍射后的光强分布情况进行比较, 可以发现, 多色高斯光束大大提高了轴上光强分布的均匀性. 多色高斯光束的光谱半宽 σ 是影响整个聚焦场光强分布的一个重要参数, 我们正是通过改变它来实现轴上光强分布的均匀化的. 接下来, 通过一系列的图来说明, 多色高斯光束的光谱半宽对衍射场轴上光强、横向光强分布的影响.

对于单色高斯光束而言, 可以通过选择合适的束腰宽度, 来实现轴上焦线光强分布的均匀化^[11]. 但是焦线上光强抖动得仍然比较厉害, 如图 2 所示. 在这里, 所选取的参数分别为 $\lambda_0 = 60 \text{ nm}$, $f = 300 \text{ nm}$, $\beta = -6.667 \times 10^{-5}$, $w = 5.45 \text{ mm}$. 根据式(7)进行数值模拟, 光强的分布情况如图 3 所示. 在图 3 中, 随着光谱半宽 σ 的增大, 轴上光强逐渐实现均匀化. 这里, 可假设入射的多色高斯光束的中心波长为 $\lambda_0 = 0.6 \text{ }\mu\text{m}$, 式(7)的积分范围为 $(\lambda_0 - 3\sigma, \lambda_0 + 3\sigma)$ ^[10], 对应的光谱半宽 σ 的取值(nm)分别为 5.5, 33.9 和 184. 可以发现, 当 $\sigma = 184 \text{ nm}$ 时, 焦线上光强的抖动就基本消失了, 如图 3(c) 所示. 根据方程 $\sigma = \Delta v \lambda_0^2/c$, 可以算出 $\sigma = 184 \text{ nm}$, $\Delta v \approx 0.15 \text{ PHz}$. 在实际应用中, 184 nm 的高斯光束可由超短脉冲激光器产生.

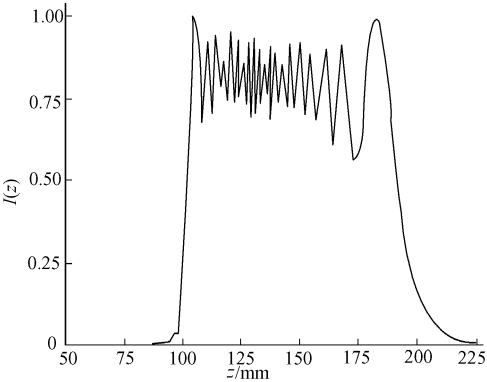


图 2 单色高斯光束衍射后的轴上光强分布
Fig. 2 The axial intensity of the focal segment when the lens axicon is illuminated by monochromatic Gaussian beam

下面, 我们讨论多色高斯光束被透镜轴棱锥衍射后横向光强分布情况. 将其与单色高斯光束照射透镜轴棱锥的情况进行比较, 如图 4 所示. 图中选取的观察平面距透镜轴棱锥为 150 mm, 对应的光谱半宽 σ 的取值(nm)分别为 5.5, 33.9 和 184. 当 $\sigma = 5.5 \text{ nm}$ 时, 横向光强分布为 J_0^2 的形式, 随 σ 取值的增大横向光强的零点逐渐消失, 如图 4(a) 所示.

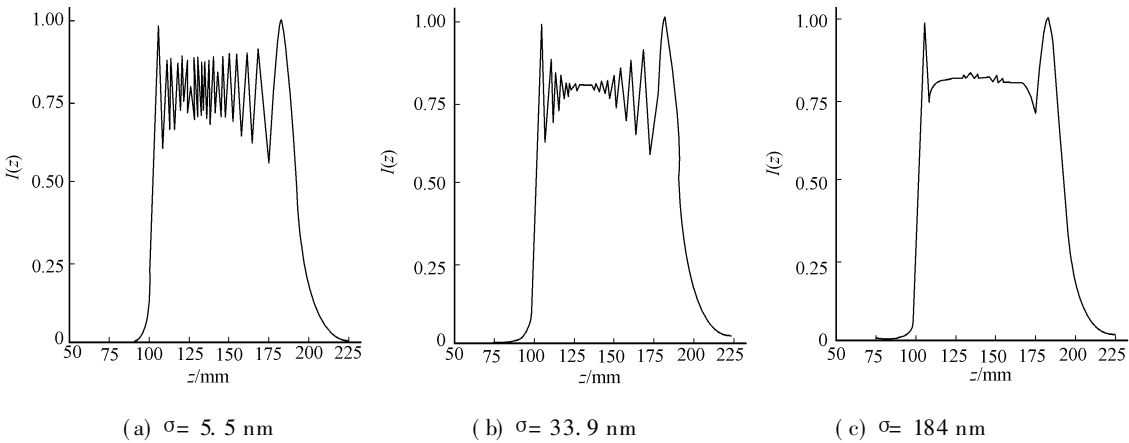


图 3 多色高斯光束衍射后的轴上光强分布

Fig. 3 The axial intensity of the focal segment when the lens axicon is illuminated by polychromatic Gaussian beam

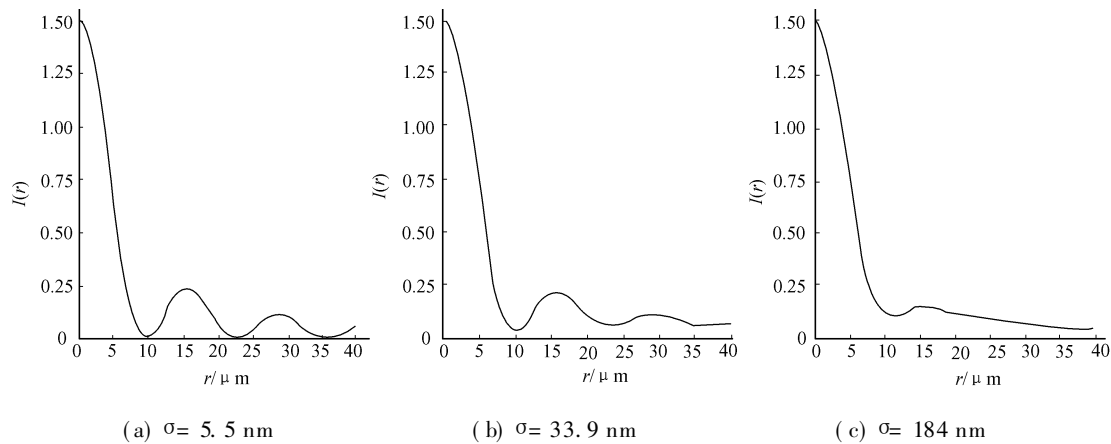


图 4 多色高斯光束的横向光强分布与光谱半宽的关系

Fig. 4 The lateral intensity of the lens axicon illuminated by a polychromatic Gaussian beam with different half width value

通过三维光强分布图, 可以更加直观地展示整个聚焦场光强分布情况(图 5). 图 5(a) 为单色高斯光

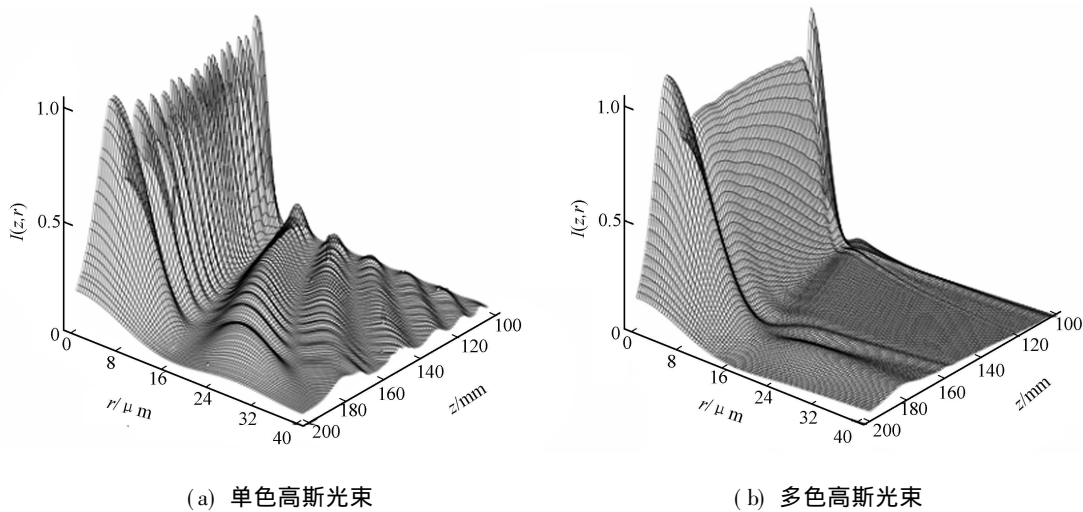


图 5 聚焦场光强分布情况

Fig. 5 The three dimensional distribution of intensity

束照射透镜轴棱锥时, 聚焦场光强分布情况, 表明聚焦场横向光强第 1 零点半径随 z 值的增大而增大的规律. 图 5(a) 的参数取值与图 2 相同. 图 5(b) 为多色高斯光束照射透镜轴棱锥时, 聚焦场光强分布情况, 图中光谱半宽 σ 的取值为 184 nm. 其他参数与图 3(c) 相同. 当 σ 取值较大时, 横向光强分布不再是

J_0^2 的形式, 横向光强的零点也不再明显.

3 结束语

文中研究的是多色高斯光束经负球差透镜衍射后的光强分布情况, 并将其与单色高斯光束照射透镜轴棱锥的情况进行了比较. 着重分析了多色高斯光束的光谱半宽对衍射场轴上光强、横向光强分布的影响. 经分析可以发现, 光谱半宽 σ 的值为比较小的多色高斯光束照射透镜轴棱锥时, 不同观察面的光强分布均为 J_0^2 的形式. 随观察平面远离透镜轴棱锥, 横向光强第 1 零点半径逐渐增大. 这与单色高斯光束照射透镜轴棱锥的情况类似. 但当 σ 取值较大时, 横向光强分布不再是 J_0^2 的形式, 并且横向光强的零点不再明显. 对于轴上光强而言, 多色高斯光束则大大提高了轴上光强分布的均匀性.

参考文献:

[1] PU J r xiong, ZHANG Hui hua , NEMOTO S. Lens axicons illuminated by Gaussian beams for generation of uniform axial intensity Bessel fields[J]. Opt Eng, 2000, 39(3): 803-806.
[2] SOCHAKI J, BARA S, JAROSZEWICZ Z, et al. Phase retardation of the uniform intensity axicons[J]. Opt Lett, 1992, 17: 7-9.
[3] SOCHAKI J, JAROSZEWICZ Z, STARONSKI L R, et al. Annular aperture logarithmic axicon[J]. Opt Soc Am A, 1993, 10: 1765-1768.
[4] HONKANEN M, TURUNEN J. Tandem systems for efficient generation of uniform axial intensity Bessel fields [J]. Opt Commun, 1998, 154: 368-375.
[5] FRIBERG A T. Stationary-phase analysis of generalized axicons[J]. Opt Soc Am, 1996, 13: 743-750.
[6] DAVIDSON N, FRIESEM A A, HASMAN E. Holographic axicons: high resolution and long focal depth[J]. Opt Lett, 1991, 16: 523-525.
[7] PHPOV S Y, FRIBERG A T. Linear axicons in partially coherent light[J]. Opt Eng, 1995, 34: 2567-2573.
[8] STARONSKI L R, SOCHACKI J, JAROSZEWICZ Z, et al. Lateral distribution and flow of energy in uniform intensity axicons[J]. Opt Lett, 1992, 17: 7-9.
[9] JAROSZEWICZ Z, MORALES J. Lens axicons: systems composed of a diverging aberrated lens and a perfect converging lens[J]. Opt Soc Am A, 1998, 15: 2383-2390.
[10] JAROSZEWICZ Z, ROMAN-DOPAZO J F. Uniformization of the axial intensity of diffraction axicons by polychromatic illumination[J]. Appl Opt, 1996, 35(7): 1025-1030.

Focused Characteristics of a Lens Axicon Illuminated
by Polychromatic Gaussian Beams

CHEN Yuan, PU J r xiong

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

Abstract: Starting from Fresnel diffraction integral, we deduced the optical intensity distribution in the Fresnel zone of the diffraction field of the annular aperture lens axicon. A numerical calculation and physical analysis is performed to investigate the intensity distribution of the diffraction field. It is shown that when is small the pattern of the transverse intensity of different observing plane can be described by like pattern. While the observing plane is far away from lens axicon the radius of first zero order of the transverse intensity increases. However, with the increment of the minimum transverse intensity do not equal to zero any more. For axial intensity, polychromatic Gaussian beam resulted in significant improvement in the uniformity of the distribution of the axial intensity in comparison with the monochromatic Gaussian beam.

Keywords: lens axicon; polychromatic gaussian beam; diffraction; optical intensity distribution

(责任编辑: 黄仲一)