

文章编号:1002-2082(2013)05-0768-04

双曲余弦-高斯光束经微小孔衍射的轴上光强特性

何 仲,康小平

(琼州学院 理工学院,海南 三亚 572022)

摘要:基于横截面上精确表述的光强和瑞利-索末菲衍射积分公式,通过数值计算分析双曲余弦-高斯光束经微小孔衍射的轴上光强特性,详细讨论了偏心参数 α 、微小孔的孔径 a 和束腰宽度与波长之比 w_0/λ 对双曲余弦-高斯光束轴上光强的影响。结果表明:双曲余弦-高斯光束的轴上光强分布依赖于偏心参数 α 、孔径 a 、 w_0/λ 参数和传输距离。

关键词:双曲余弦-高斯光束;轴上光强;微小孔;衍射

中图分类号:TN201; O436

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0501010

Axial light intensity characteristics of cosh-Gaussian beams diffracted by small aperture

HE Zhong, KANG Xiao-ping

(College of Science and Engineering, Qiongzhou University, Sanya 572022, China)

Abstract: Base on the accurate expression of light intensity on the cross section and Rayleigh-Sommerfeld diffraction integrals, the characteristics of axial light intensity of cosh-Gaussian beams diffracted by a small aperture were analyzed and discussed by numerical calculation, and the influences of decentered parameter α , the radius of small aperture a and the parameter w_0/λ on the axial light intensity of cosh-Gaussian beams were also discussed in detail. Results show that the axial light intensity of cosh-Gaussian beams depends not only on the decentered parameter α , the radius of small aperture a and parameter w_0/λ , but also on the transmission distance.

Key words: cosh-Gaussian beam; axial light intensity; small aperture; diffraction

引言

近场光学是伴随扫描近场光学细微术而发展起来的一个光学分支,它研究物体表面近场区域光与物质相互作用的各种复杂现象,如光的散射、反射、衍射、吸收和光谱学等等。随着纳米和近场光学的发展,光束在近场的光场分布和传输特性,例如:微小孔近场衍射作为对近场光学显微镜中光纤探针的模拟,对其衍射场的光场分布、能量传输、轴上光强等已开展了研究^[1-3]。近年来,正弦类高斯光束引起人们广泛的研究兴趣^[4]。正弦类高

斯光束是傍轴近似下波动方程的解,在理论上代表了较为广泛的一大类光束,如正(余)弦高斯光束和双曲正(余)弦高斯光束,在大气传输、遥感、远距离光通信以及激光光束聚焦特性等方面都有着极其重要的作用^[5-8]。尤其在实际应用中,光场通过光学系统时,经常受到光阑的作用,因此研究光束在有光阑限制光学系统中传输更有实际意义。本文基于光强的精确定义和瑞利-索末菲衍射积分公式^[9-11],以双曲余弦-高斯光束为例,对其经微小孔衍射的轴上光强作了详细的数值计算和分析,重点讨论了偏心参数、微小孔的孔径及束腰宽

收稿日期:2013-03-20; 修回日期:2013-04-18

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(208110),海南省自然科学基金项目(10801),琼州学院2010年度科研项目(QY515-201002)

作者简介:何仲(1964—),男,海南乐东人,高级实验师,主要从事光束的传输与变换研究及实验教学工作。

E-mail: hezhong2013@126.com. 通信作者,康小平, E-mail: xpk710@126.com

度与波长之比 w_0/λ 对其轴上光强的影响。

1 理论分析

双曲余弦-高斯光束经微小孔衍射的光学系统如图 1 所示。图中 RP_1 为入射面, RP_2 为出射面。

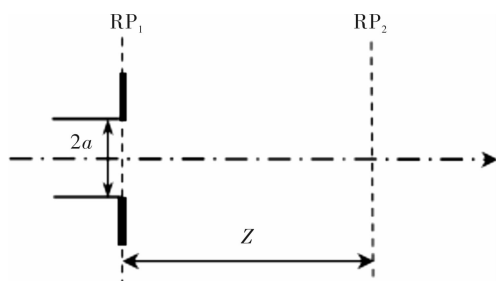


图 1 光学系统

Fig. 1 Optical system

在直角坐标系中, 双曲余弦-高斯光束在入射面 $RP_1 (z=0)$ 处的场分布^[4]为

$$E_0(x_0, y_0, 0) = \exp\left(-\frac{x_0^2}{w_0^2}\right) \cosh(\Omega_0 x_0) \times \exp\left(-\frac{y_0^2}{w_0^2}\right) \cosh(\Omega_0 y_0) \quad (1)$$

式中: w_0 为高斯振幅分布的束腰宽度; Ω_0 是与余弦部分有关的参数。

考虑在入射面 RP_1 处放置一半宽度为 a 的矩形微小孔光阑, 其透射率函数为

$$T_0(x_0, y_0) = \begin{cases} 1 & |x_0| \leq a, |y_0| \leq a \\ 0 & |x_0| > a, |y_0| > a \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 表示矩形光阑在 x 和 y 方向的半宽度。双曲余弦-高斯光束在光阑后表面的场分布可表示为

$$E(x_0, y_0, 0) = E_0(x_0, y_0, 0) T_0(x_0, y_0) \quad (3)$$

由瑞利衍射积分公式可知, 在出射面 RP_2 处的场分布^[11]为

$$E(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x_0, y_0, 0) \times \frac{\partial \exp(ikR)}{\partial z} dx_0 dy_0 \quad (4)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长;

$$R = \sqrt{z^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (5)$$

双曲余弦-高斯光束经微小孔衍射后, 根据横截面上光强的精确定义^[9-10], 光强表示为

$$I_j(x, y, z) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{ik} E^*(x, y, z) \frac{\partial}{\partial z} E(x, y, z) \right\} \quad (6)$$

式中: Re 表示取实部; $*$ 表示复共轭。

在(4)式中令 $x=y=0$ 并代入(6)式, 则得到

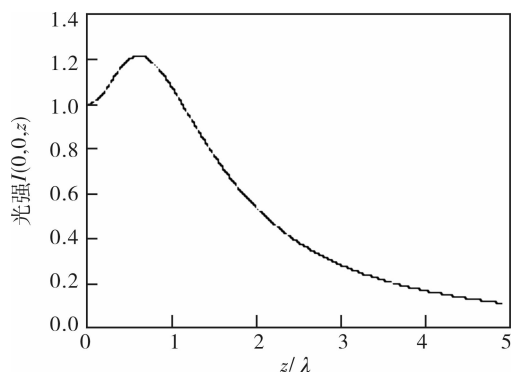
双曲余弦-高斯光束轴上的光场分布为

$$I_j(0, 0, z) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{ik} E^*(0, 0, z) \frac{\partial}{\partial z} E(0, 0, z) \right\} \quad (7)$$

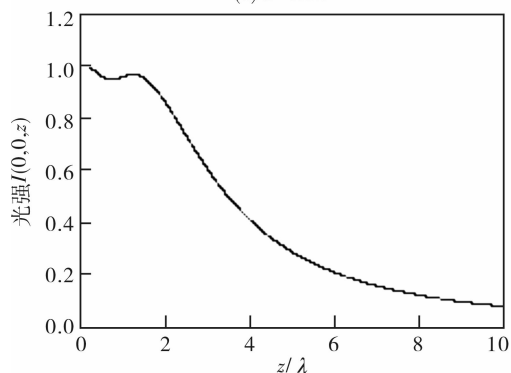
利用(7)式做数值计算, 即可分析双曲余弦-高斯光束通过矩形微小孔光阑衍射的轴上光强特性。

2 数值计算结果与分析

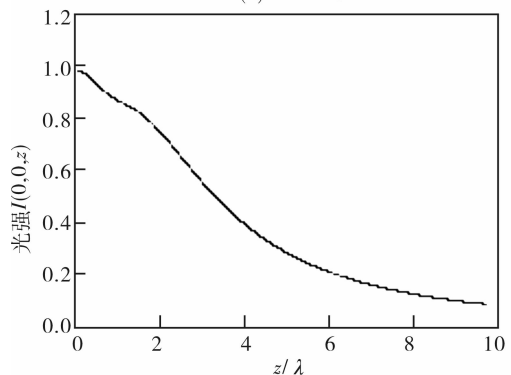
典型数值计算实例如图 2~图 4 所示。图 2 和图 3 为孔径 a 取不同值时, 双曲余弦-高斯光束轴上归一化光强与传输距离 z 的变化关系。图 2 中计算参数: $\alpha=0.3$, $w_0=\lambda$ 。由图 2 可知, 当孔径 a 取较小值时, 例如, $a=0.8\lambda$, 随着传输距离 z 的增大, 光强逐渐增大并达到最大值, 然后随距离 z 的增大又逐渐减小。当孔径 a 逐渐增大时, 例如,



(a) $a=0.8\lambda$



(b) $a=1.3\lambda$



(c) $a=1.5\lambda$

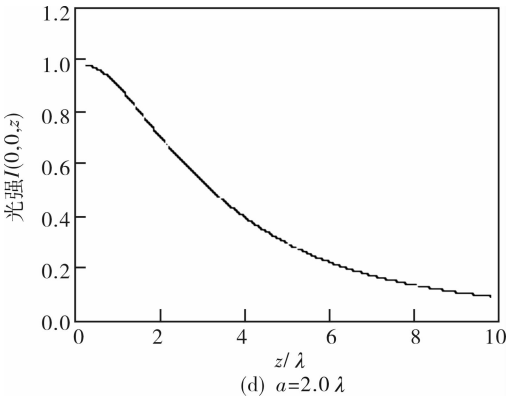


图 2 双曲余弦-高斯光束轴上光强分布
随 z/λ 的变化 ($a=0.3, w_0=\lambda$)

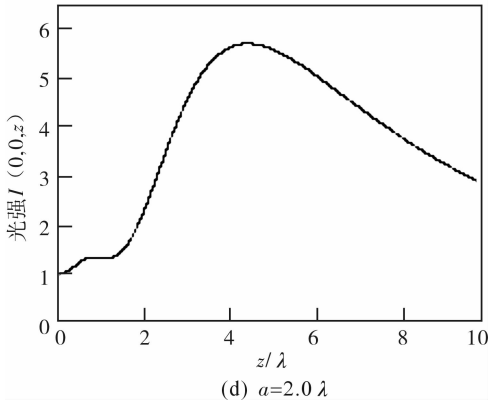
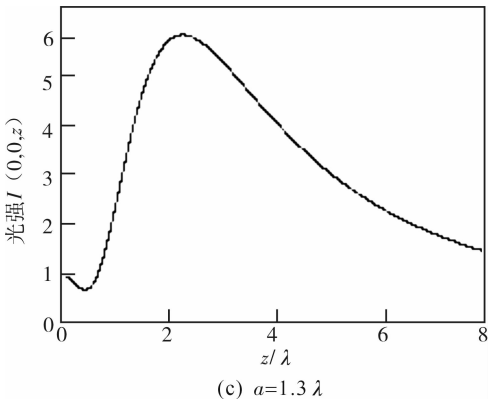
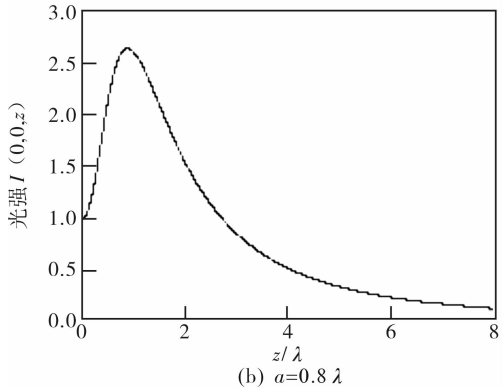
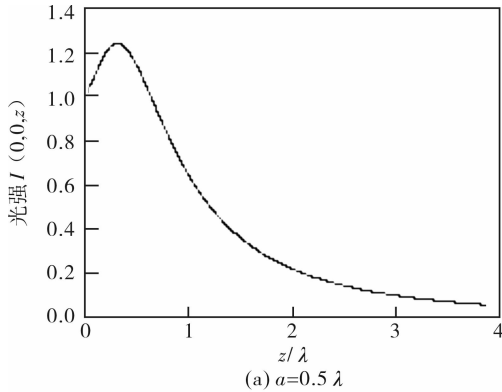


图 3 双曲余弦-高斯光束轴上光强分布随
 z/λ 的变化 ($a=2.0, w_0=\lambda$)

Fig. 3 Axial intensity distributions of cosh-Gaussian
beams versus $z/\lambda, a=2.0, w_0=\lambda$

$a=1.3\lambda$ 和 $a=1.5\lambda$, 该最大值随着距离 z 的增大而减小, 且光强的变化是非单调的。若进一步增大孔径 a , 如图 2(d) 所示, 光强随着传输距离 z 的增大单调减小。

图 3 中计算参数: $a=2.0, w_0=\lambda$ 。从图 3 中可以看出, 当孔径 a 取较小值时, 如图 3(a) 和 3(b) 所示, 光强随着传输距离 z 的增大而增大并达到最大值, 然后随距离 z 的增大又逐渐减小。图 3(c) 表明, 当孔径 a 较大时, 光强随着传输距离 z 的增大而减小, 达到极小值后又逐渐达到最大值, 然后随距离 z 的增大单调减小。增大孔径 $a=2.0\lambda$, 如图 3(d) 所示, 随着传输距离 z 的增大, 光强达到



最大值是非单调变化的。此外, 由图 3 还可知, 随着传输距离 z 的增大, 光强最大值的位置向着 z 增大的方向移动。

图 4 为束腰宽度 w_0 取不同值时, 双曲余弦-高斯光束轴上归一化光强与传输距离 z 的变化关系, 计算参数: $a=1.0, a=0.9\lambda$ 。从图 4 可以看出, 当

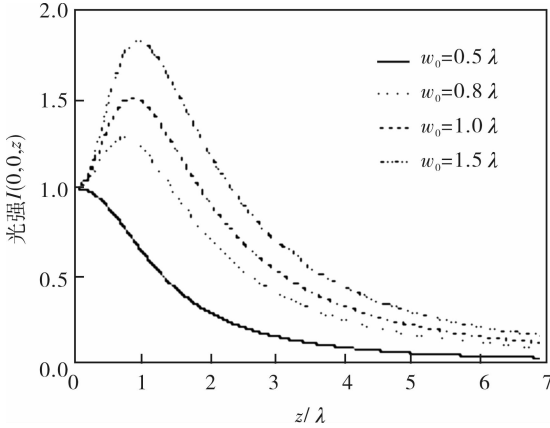


图 4 双曲余弦-高斯光束轴上光强分布随
 z/λ 的变化 ($a=1.0\lambda, a=0.9\lambda$)

Fig. 4 Axial intensity distributions of cosh-Gaussian
beams versus $z/\lambda, a=1.0\lambda, a=0.9\lambda$

束腰宽度取较小值时, 如 $w_0 = 0.5\lambda$, 光强随着距离 z 的增大而单调减小。若束腰宽度取较大值, 例如 $w_0 = 0.8\lambda, 1.0\lambda$ 和 1.5λ 时, 随着距离 z 的增大, 光强先增大, 在达到最大值后又逐渐减小。并且, 由图 2~图 4 还可知, 偏心参数和束腰宽度均影响光束的光强分布, 但偏心参数的变化对光强剖面的影响更为明显。

3 结 论

基于横截面上精确表述的光强和瑞利-索末非衍射积分公式, 通过数值计算分析了双曲余弦-高斯光束经微小孔衍射的轴上光强特性, 重点讨论了偏心参数 α , 孔径 a 和 w_0/λ 参数对双曲余弦-高斯光束轴上光强的影响。研究结果表明, 光强分布依赖于偏心参数 α , 孔径 a , w_0/λ 参数和传输距离, 它们决定双曲余弦-高斯光束的轴上光强特性。此外, 当偏心参数或束腰宽度较大时, 随着传输距离 z 的增大, 光强最大值的位置向着 z 增大的方向移动。本文所用方法可用于其他截断和无截断光束传输过程中光强特性的研究。

参考文献:

- [1] 邓小玖, 吴本科, 肖苏. 微小孔近场衍射的能量传输[J]. 光学学报, 2001, 21(12): 1432-1435.
DENG Xiao-jiu, WU Ben-ke, XIAO Su. Energy transmission of a small aperture in near-field diffraction[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(12): 1432-1435. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 刘秀梅, 王佳, 李达成. 纳米小孔光学近场分布的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(2): 30-33.
LI Xiu-mei, WANG Jia, LI Da-cheng. Optical near-field distribution of nanometric apertures [J]. Journal Tsinghua University: Sci. & Tech. Ed., 2001, 41(2): 30-33. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 周国泉, 赵道木, 王绍民. 平面波经小圆孔衍射的轴上光强特性 [J]. 光学学报, 2003, 23(1): 22-25.
ZHOU Guo-quan, ZHAO Dao-mu, WANG Shao-min. Characteristics of axial light intensity of planar wave diffracted by small circular aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 22-25. (in Chinese with an English abstract)
- [4] CASPERSON L W, HALL D G, TOVAR A A. Si-

- nusoidal-Gaussian beams in complex optical system [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(12): 3341-3348.
- [5] 宋宏远, 张廷蓉, 陈森会, 等. 余弦高斯光束在梯度折射率介质中的传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 890-894.
SONG Hong-yuan, ZHANG Ting-rong, CHEN Sen-hui, et al. Propagation properties of cosine-Gaussian beams in gradient-index medium [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 890-894. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 郝中骥, 刘莉. 余弦平方高斯光束通过无光阑透镜的梯度力[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 365-369.
HAO Zhong-qi, LIU Li. Gradient force pattern of cosine-squared Gaussian beams through lens without aperture [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 365-369. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 王海霞, 张百新, 丁超亮, 等. 非傍轴双曲余弦-高斯脉冲电磁光束远场特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1528-1532.
WANG Hai-xia, ZHANG Bai-xin, DING Chao-liang. Far-field properties of nonparaxial electromagnetic cosh-Gaussian pulsed beams [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1528-1532. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 康小平, 吕百达. 非傍轴矢量余弦-高斯光束两种光强表示的比较研究[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 168-172.
KANG Xiao-ping, LÜ Bai-da. Comparative study of two intensity expressions of nonparaxial vectorial Cosine-Gaussian beams [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(1): 168-172. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 曹清, 邓锡铭, 郭弘. 横截面上光强的精确表述[J]. 光学学报, 1996, 16(7): 897-902.
CAO Qing, DENG Xi-ming, GUO Hong. Accurate expression of light intensity at transverse plane [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(7): 897-902. (in Chinese with an English abstract)
- [10] CAO Qing, DENG Xi-ming. Power carried by scalar light beams [J]. Opt. Commun., 1998, 151(6): 212-216.
- [11] LUNEBURG R K. Mathematical theory of optics [M]. Berkeley California: University of California Press, 1966.