

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0406-03

双曲余弦高斯光束的聚焦特性

彭润伍

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要 使用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分推导出双曲余弦高斯光束通过透镜聚焦的解析传输公式, 从所得公式出发研究了聚焦光强随偏心参数的变化, 讨论了光束的偏心参数和菲涅耳数对焦移的影响。研究得出偏心参数取恰当数值时光束达到最佳聚焦效果。

关键词 激光物理; 焦移; 双曲余弦高斯光束; 偏心参数; 菲涅耳数

中图分类号 TN241

文献标识码 A

Focusing Properties of Cosh-Gaussian Beams

PENG Run-wu

(State Key Laboratory of High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

Abstract Using the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral, the propagation expression of Cosh-Gaussian (ChG) beams passing through a thin lens is derived. The focused intensity distributions and dependence of focal shift upon decentered parameter and Fresnel number are analyzed. It is found that optimal focusing of ChG beams is achieved when the decentered parameter is appropriate value.

Key words laser physics; focal shift; Cosh-Gaussian(ChG) beam; decentered parameter; Fresnel number

1 引言

对激光束聚焦可使光束功率密度更高、光斑尺寸更小, 这在实际中例如激光加工、惯性约束聚变等方面得到广泛应用。因此, 光束的聚焦特性一直是感兴趣的研究课题, 尤其是 Li 和 Wolf^[1,2]明确提出焦移概念后, 对光束的聚焦特性展开了一系列的深入研究^[3-6]。近年来, Gasperson 和 Hall 提出双曲余弦高斯光束(ChG)也是波动方程的近轴解^[7]并讨论了其传输特性^[7,8]。本文对 ChG 光束的聚焦特性进行了研究, 得出了一些对实际应用有意义的结果。首先推导了 ChG 光束的聚焦光强分布, 然后讨论了聚焦 ChG 光束的焦移和最佳聚焦问题。

2 理论分析

2.1 聚焦 ChG 光束的光强分布

在入射面($z=0$)处设有表达式为^[7]

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

的 ChG 光束通过无光阑限制的薄透镜光学系统。式中 w_0 为高斯光束的束腰宽度, Ω_0 是与双曲余弦部分相关的参数。由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分得观察面的场分布为^[9]

$$E(x, y, z) = \frac{ik}{2\pi B} \exp(-ikz) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_0, y_0, 0) \times \exp\left[-\frac{ik}{2B} [A(x_0^2 + y_0^2) - 2(x_0 x + y_0 y) + D(x^2 + y^2)]\right] dx_0 dy_0 \quad (2)$$

其中 $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $f(f>0)$ 为薄透镜的焦距, z 为薄透镜与观察面的距离。式中的变换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将(1)式, (3)式代入(2)式并积分可得

$$E(u, w, z) = \frac{-i\pi N_w}{z/f + (1-z/f)i\pi N_w} \exp\left[\frac{z/f}{z/f + (1-z/f)i\pi N_w} \frac{a^2}{2} - \frac{i\pi N_w(1-i\pi N_w)}{z/f + (1-z/f)i\pi N_w} (u^2 + w^2)\right] \times \cosh\left[\frac{i\pi N_w}{z/f + (1-z/f)i\pi N_w} au\right] \cosh\left[\frac{i\pi N_w}{z/f + (1-z/f)i\pi N_w} aw\right] \quad (4)$$

作者简介: 彭润伍(1971-), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事高功率激光研究。

E-mail: pengrunwu@sina.com

式中 $u=x/w_0, \varpi=y/w_0$, 并且

$$N_w = \frac{w_0^2}{\lambda f} \quad (\text{与高斯光束有关的菲涅耳数}) \quad (5)$$

$$a = w_0 \Omega_0 \quad (\text{偏心参数}) \quad (6)$$

聚焦 ChG 光束的光强为

$$I(u, \varpi, z) = |E(u, \varpi, z)|^2 \quad (7)$$

2.2 ChG 光束的聚焦

在 Li 和 Wolf 的研究中^[1,2], 轴上光强极大的位置 z_{\max} (即实际焦面位置) 由

$$dI(u, \varpi, z)/dz=0 \quad (8)$$

决定, 相对焦移为

$$\Delta z_f = (z_{\max} - f)/f \quad (9)$$

该方法不能比较光束束腰的大小, 也就不能比较不同参数时的聚焦效果。用 Greene 和 Hall^[6]提出的新方法: 包含了光束 80% 光强的区域的半宽即为光束束腰宽度 w_{\min}, w_{\min} 对应的轴上位置 $z=z_{\max}$ 即实际焦面位置。即实际焦面位置 z_{\max} 满足

$$\int_{-w/w_0}^{w/w_0} \int_{-w/w_0}^{w/w_0} I(u, \varpi, z) du d\varpi / \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(u, \varpi, z) du d\varpi = 0.8 \quad (10)$$

由上式则可得光束束腰宽度 w_{\min} 和实际焦面位置 z_{\max} , 然后再由式(9)得出焦移。

3 结果与讨论

从以上公式得到图 1 的 ChG 光束实际焦平面位置 z_{\max} 处的光强分布 ($N_w=1$)。从图可看出, 随 a 增大光强愈集中于中心, 但同时光强分布出现旁瓣, 且 a 越大, 旁瓣的数目越多, 其包含的功率增大。文献[8]得出 $a=1.44$ 时在入射面光束获得平顶分布, 然而光束传输到焦面时其形状已发生改变, 呈高斯分布。

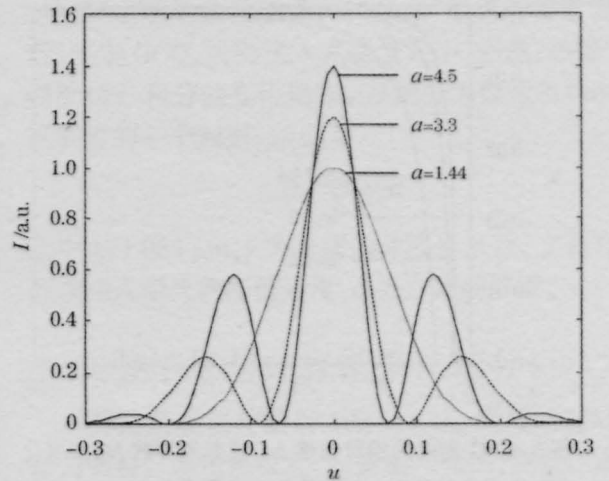


图 1 ChG 光束实际焦面的光强分布
Fig.1 Intensity distributions of ChG beams at the real focal plane

图 2 是 ChG 光束沿 z 轴传输的剖面等照线图 ($N_w=1$)。图中表明 a 对光束沿 z 轴传输的光强分布有着明显的影响。 a 越大, 光强越向 $u=0$ 的轴中心靠近, 但同时导致轴外出现极大值点。并且光强相对几何焦面 $z=f$ 呈非对称分布, 光束在几何焦面之前达到最大光强, 即最大光强相对几何焦点向透镜方向移动, 说明存在负焦移。相对焦移 Δz_f 随菲涅耳数 N_w 的变化示于图 3, $|\Delta z_f|$ 随 a 和 N_w 的减小而增大, 随二者的增大而减小。

如图 4 所示 ($N_w=4$), 束腰宽度 w_{\min} 随 a 的变化是非单调的。从图中看出 a 较小时 w_{\min} 随 a 的增大而减小, 在 $a=3.3$ 时达到最小值。由于旁瓣的出现以及其光功率的增大, 在 $a>3.3$ 时束腰宽度变宽。即当 $a=3.3$ 时可获得最佳聚焦效果, 由计算得知不同菲涅耳数时获得最佳聚焦效果的偏心参数是相同的。

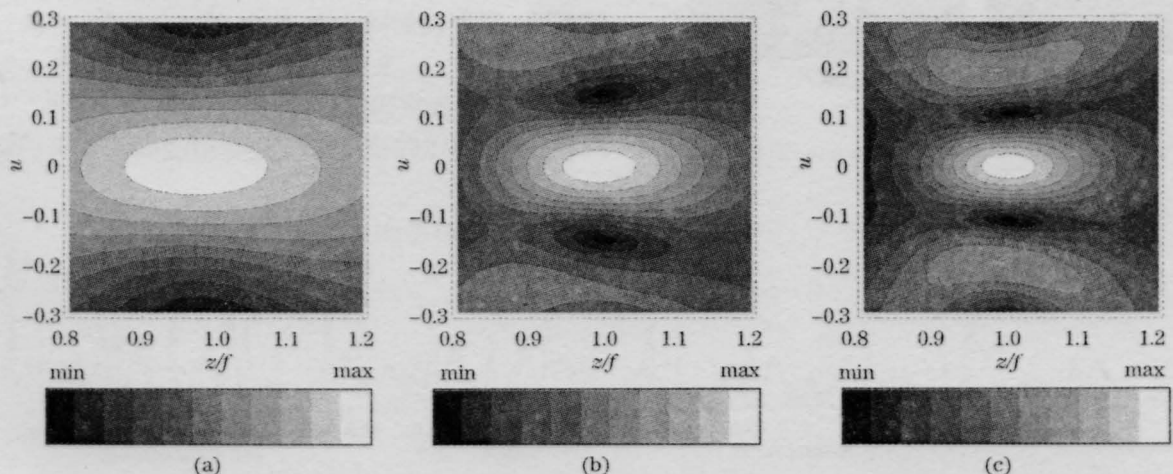


图 2 ChG 光束沿 z 轴剖面的等照线图 (a) $a=1.44$; (b) $a=3.3$; (c) $a=4.5$
Fig.2 Contour lines of the intensity of ChG beams along the z axis

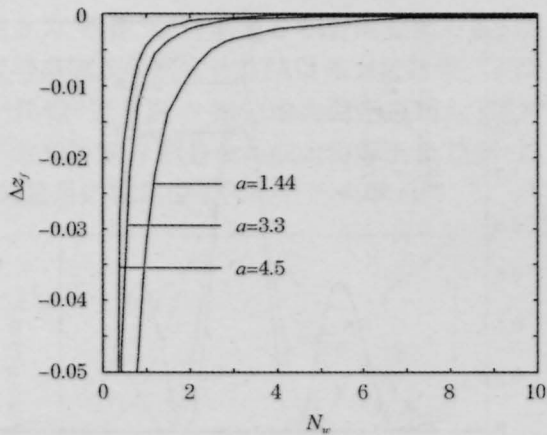


图3 ChG光束的相对焦移 Δz_f 随菲涅耳数 N_w 的变化
Fig.3 Relative focal shift Δz_f of ChG beams versus Fresnel number N_w

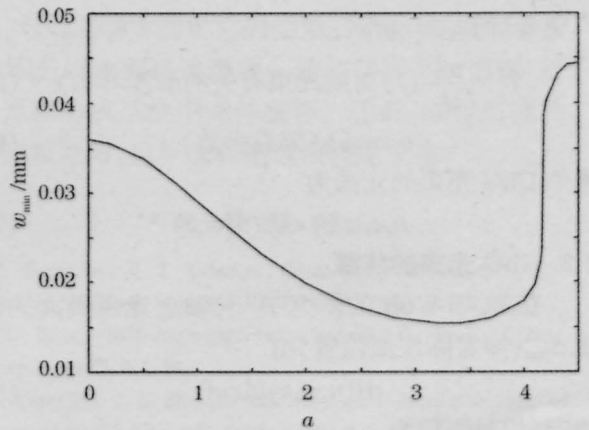


图4 ChG光束束腰宽度 w_{\min} 随偏心参数 a 的变化
Fig.4 Waist width w_{\min} of ChG beams versus decentered parameter a

参 考 文 献

- 1 Y. Li, E. Wolf. Focal shifts diffracted converging spherical waves[J]. *Opt. Commun.*, 1981, **39**: 211-215
- 2 Y. Li, E. Wolf. Focal shift in focused truncated Gaussian beams [J]. *Opt. Commun.*, 1982, **42**:151-156
- 3 W. H. Carter. Focal shift and concept of effective Fresnel number for a Gaussian laser beam[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**: 1989-1994
- 4 W. H. Carter, M. F. Aburdene. Focal shift in Laguerre-Gaussian beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**: 1949-1952
- 5 R. Borghi, M. Santarsiero, S. Vicalvi. Focal shift of focused flat-topped beams [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **154**: 243-248
- 6 P. L. Greene, D. G. Hall. Focal shift in vector beams[J]. *Opt. Express*, 1999, **4**:411-419
- 7 L. W. Casperson, D. G. Hall. Sinusoidal-Gaussian beams in complex optical system[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**:3341-3348
- 8 B. Lü, H. Ma, B. Zhang. Propagation properties of cosh-Gaussian beams[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**:165-170
- 9 S. A. Collins. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**: 1168-1177