

## 球差透镜对超高斯光束光束质量影响的研究\*

季小玲<sup>a, b</sup> 吕百达<sup>a</sup>

(<sup>a</sup>四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

(<sup>b</sup>重庆师范学院物理学与信息技术系, 重庆, 400047)

**摘要:** 根据束宽的传输方程, 采用双曲线拟合的方法, 计算了超高斯光束通过球差透镜后的  $M^2$  因子。同时还研究有球差的超高斯光束在透镜几何焦面和实际焦面上的桶中功率 (PIB)。以  $M^2$  因子和 PIB 作为光束质量评价的参数, 进行了详细的数值计算来说明球差对超高斯光束光束质量的影响, 并与有球差的高斯光束做了比较。得出了一些有实际应用意义的结果。

**关键词:** 球差 光束质量  $M^2$  因子 桶中功率 超高斯光束

## Effect of spherically aberrated lens on the quality of super-Gaussian beams

Ji Xiaoling<sup>a, b</sup>, L Baida<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(<sup>b</sup> Dept. of Physics and Information Technology, Chongqing Teachers College, Chongqing, 400047)

**Abstract:** Based on the beam propagation equation, the hyperbolic-fit method is used to calculate the  $M^2$  factor of super-Gaussian beams passing through a spherically aberrated lens. The power in the bucket (PIB) at the geometrical and real focal planes of super-Gaussian beams with spherically aberration is also studied. With  $M^2$  factor and PIB as the criteria for laser beam quality, detailed numerical calculations are performed to illustrate the effects of the spherically aberrated lens on the beam quality of super-Gaussian beams. The result is useful for some practical application.

**Key words:** spherical aberration beam quality  $M^2$  factor power in the bucket (PIB) super-Gaussian beam

\* 激光技术国家重点实验室资助。

- 6 Perez J M, Steinsneider J, Stallcup R E *et al.* A P L, 1994; 65(10): 1216
- 7 Glorieux P, Lepers C, Corbalan R *et al.* Opt Commun, 1995; (118): 309
- 8 高锦岳, 张汉壮, 国秀珍 *et al.* 光学学报, 1990; 10(3): 220
- 9 Balestri S, Ciofini M, Meucci R *et al.* Phys Rev A, 1991; 44(9): 5894
- 10 陈南鹏, 张立根, 吕可诚 *et al.* 光学学报, 1990; 10(3): 239
- 11 Tredice J R, Arecchi F T. Optical Society America B, 1985; 2(1): 173
- 12 常胜江, 傅汝廉, 巴恩旭. 中国激光, 1994; 21(3): 193
- 13 Tachikawa M, Tani K, Shimizu T. Optical Society America B, 1988; 5(5): 1077
- 14 Barsella A, Alcantara P Jr, Guidoni L *et al.* Opt Commun, 1995; (117): 455
- 15 黄勇林, 巴恩旭. 物理学报, 1993; 42(6): 930

作者简介: 叶莉华, 女, 1974年9月出生。博士研究生。现主要从事激光技术及应用方面的研究工作。

# 引 言

一些光学元件例如用于准直和聚焦激光的透镜会出现球差, 高功率激光的热效应和高功率激光束通过吸收介质时的热晕也会产生球差<sup>[1]</sup>。球差使波前发生畸变, 导致光强分布发生变化。因此, 球差会影响光束质量。光束传输因子( $M^2$  因子)和桶中功率(PIB)是描述光束质量常用的两个重要参数<sup>[2]</sup>。文献[3]指出, 光学系统的球差对光场的影响可用一个相位因子  $\exp(-ik\Phi)$  描述, 并举出球差元件加准直透镜的特例, 使出射光束的束腰位于光学系统出射面上, 从而简化了  $M^2$  因子的计算。但在一般情况下, 解析计算是困难的。

作者根据自由空间中光束的传输方程, 利用多点拟合的方法, 通过数值计算, 研究了超高斯光束通过球差透镜后的  $M^2$  因子随球差的变化规律, 研究了球差对超高斯光束在透镜几何焦面和实际聚焦面上的桶中功率的影响。并且, 以  $M^2$  因子和 PIB 作为光束质量评价的参数, 进行了详细的数值计算, 与有球差的高斯光束的相应结果做了比较, 分析了球差对超高斯和超高斯光束光束质量影响的差异, 得出了一些有实际应用意义的结果。

## 1 计算方法

如图 1 所示, 波长为  $\lambda$ (波数为  $k=2\pi/\lambda$ )、光腰宽度为  $w_0$  的超高斯光束通过焦距为  $f$  的透镜 L, 设入射光束光腰在透镜处, 则入射参考面  $RP_1$  处激光的场分布为:

$$E_0(r', 0) = A_0 \exp[-(r'/w_0)^n] \quad (1)$$

式中,  $A_0$  为常数;  $n$  为超高斯光束的阶数;  $r'$  为径向坐标。

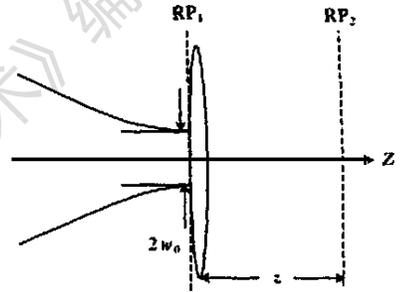


Fig. 1 Super-Gaussian beam passing through a spherical aberrated lens

根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式<sup>[4]</sup>, 得到出射参考面  $RP_2$ (距透镜  $z$  处)的超高斯光束衍射光场分布:

$$E(r, z) = \frac{i}{\lambda B} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E_0(r', 0) \exp(-ikC_4 r'^4) \exp\left[-\frac{ik}{2B}(Ar'^2 - 2r'r' \cos(\theta - \theta') + Dr^2)\right] r' dr' d\theta \quad (2)$$

式中,  $\exp(-ikC_4 r'^4)$  为球差相位因子,  $C_4$  称为球差系数<sup>[6]</sup>,  $r$  为径向坐标,  $A, B, C, D$  为由  $RP_1$  至  $RP_2$  的变换矩阵元, 且有:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

把(3)式代入(2)式, 可得:

$$E(r, z) = \frac{2\pi i}{\lambda} \exp(-\frac{ik}{2z}r^2) \int_0^{\infty} E_0(r', 0) \exp(-ikC_4 r'^4) \exp\left[-\frac{ik}{2z}(1 - z/f)r'^2\right] J_0\left(\frac{kr'r'}{z}\right) r' dr' \quad (4)$$

式中,  $J_0$  为零阶 Bessel 函数。

光强分布为:

$$I(r, z) = E(r, z) E^*(r, z) \quad (5)$$

利用二阶矩表达式<sup>[2]</sup>

$$\overline{r^2}(z) = \int_0^{\infty} I(r, z) r^3 dr / \int_0^{\infty} I(r, z) r dr \quad (6)$$

可求出不同  $z$  处光束束宽:

$$w(z) = \sqrt{2\overline{r^2}(z)} \quad (7)$$

将不同位置处的束宽代入自由空间中光束的传输方程:

激光技术 jgjs@sina.com

$$w^2(z) = w_0^2 + M^2 \theta^2 (z - z_0)^2 \quad (8)$$

用多点拟合法,可求出该光束的光腰宽度  $w_0$ 、远场发散角  $\theta$ 、光腰位置  $z_0$ 、以及光束的传输因子  $M^2$ 。

除了  $M^2$  因子以外,桶中功率从光束分布的能量集中度来衡量光束的质量<sup>[2]</sup>。桶中功率定义为:

$$P = \int_0^a I(r, f) r dr / \int_0^\infty I(r, f) r dr \quad (9)$$

(9) 式为光学系统几何焦面上的桶中功率。但超高斯光束通过球差透镜后,要发生焦移,且球差不同,焦移量亦不同<sup>[5]</sup>。设轴上最大光强点位置  $z_q$  所在横截面为实际焦面。将(9)式中的  $f$  换成  $z_q$ , 则得到实际聚焦面上的桶中功率。

### 2 数值计算和分析

本文中数值计算所用光束的波长均为  $1.064\mu\text{m}$ , 透镜焦距均为  $200\text{mm}$ , 超高斯光束阶数为  $10$ 。其余参数见图。

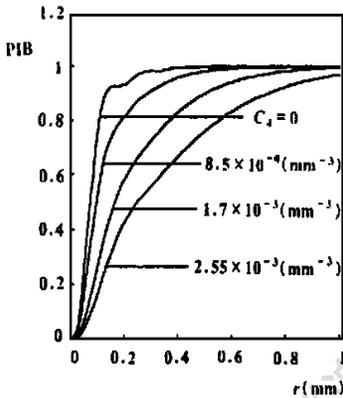


Fig. 2 PIB curves of a super-Gaussian beam at the geometric focal plane  $w_0 = 0.8\text{mm}$

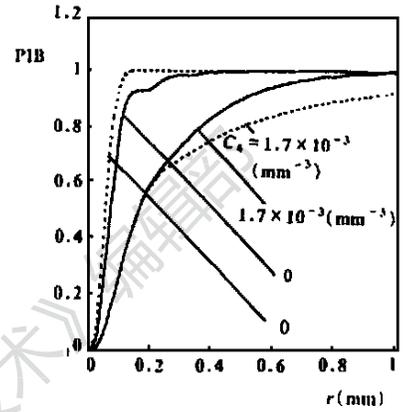


Fig. 3 PIB curves of a super-Gaussian beam and a Gaussian beam at the geometric focal plane  $w_0 = 0.8\text{mm}$ , solid line- super-Gaussian beam, dotted line- Gaussian beam

图 2 为不同球差情况下,超高斯光束在透镜几何焦面上的桶中功率(PIB)曲线。图 2 表明,球差使超高斯光束在透镜几何焦面上的 PIB 降低,且球差越大,其对应的 PIB 越小,光束质量越差。相同球差和束宽情况下,超高斯与高斯光束在透镜几何焦面上 PIB 的比较示于图 3。从图 3 可以看出,当无球差时,超高斯光束的 PIB 低于高斯光束的 PIB;但在有球差情况下,当  $r < 0.2\text{mm}$  时,超高斯与高斯光束的 PIB 近似相同;当  $r >$

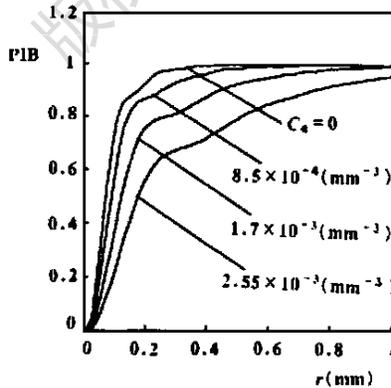


Fig. 4 PIB curves of a super-Gaussian beam at the real focal plane  $w_0 = 0.8\text{mm}$

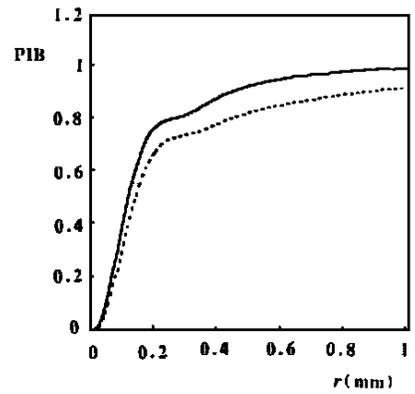


Fig. 5 PIB curves of a super-Gaussian beam and a Gaussian beam at the real focal plane  $C_4 = 1.7 \times 10^{-3}(\text{mm}^{-3})$ ,  $w_0 = 0.8\text{mm}$ , solid line- super-Gaussian beam, dotted line- Gaussian beam

0.2mm 时,超高斯的 PIB 明显比高斯光束的 PIB 大。图 4 为不同球差情况下,超高斯光束在

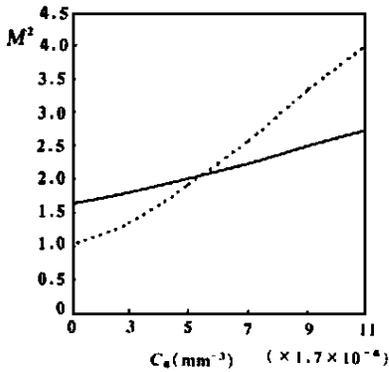


Fig. 6  $M^2$  factor of a super-Gaussian beam and a Gaussian beam as a function of spherical aberration coefficient  $C_4$   $w_0 = 0.7$  mm, solid line— super-Gaussian beam, dotted line— Gaussian beam

实际焦面上的 PIB 曲线。可以看出,其变化与几何焦面上的类似,但几何焦面上的 PIB 比实际焦面上的 PIB 随球差变化大。在球差和束宽相同的情况下,超高斯与高斯光束在实际焦面上桶中功率的比较示于图 5。这时,超高斯光束的 PIB 比高斯光束的大。图 6 为超高斯和高斯光束通过球差透镜后,光束的传输因子  $M^2$  随球差系数  $C_4$  的变化曲线。由图可知,球差使光束的  $M^2$  因子增加,光束质量变差;球差越大,光束质量越差。从图 6 还可以看出,虽然无球差时超高斯光束的  $M^2$  因子比高斯光束的大,但当球差达到一定值后,超高斯光束的  $M^2$  因子就比高斯光束的  $M^2$  因子小。这是因为随着球差的增大,超高斯光束的  $M^2$  因子增加比高斯光束的要小,这与文献[3]讨论所得结果在定性上一致。

### 3 结 论

我们采用  $M^2$  因子和 PIB 作为光束质量评价参数,在一般情况下研究了球差透镜对超高斯光束光束质量的影响。计算表明,球差使光束的 PIB 降低。球差越大,PIB 越小,光束质量越差。球差和束宽相同的情况下,超高斯光束的 PIB 高于高斯光束的 PIB。其物理原因是,球差使超高斯比高斯光束在远场的能量集中度高。球差使光束的  $M^2$  因子增大。球差越大,  $M^2$  越大,光束质量越差。相同束宽的情况下,高斯光束的  $M^2$  因子随球差的增大而增大的速度高于超高斯光束,球差对高斯光束光束质量的影响比对超高斯光束的影响为大。在实际工作中,常使用未消球差的透镜,因此,我们所用方法和所得结果对实际激光光学系统的设计有参考意义。

### 参 考 文 献

- Whinnery J R, Miller D T, Dabby F. A P L, 1968; 13:284~ 286
- Sigman A E. OSA TOPS, 1998; (17): 184~ 199
- Sigman A E. Appl Opt, 1993; 32( 30): 5893~ 5901
- Collins S A. J O S A, 1970; 60( 7): 1168~ 1177
- Pu J X, Nemoto S. Optik, 1999; 110( 5): 217~ 222

作者简介:季小玲,女,1963年11月出生。硕士,副教授。现从事激光光学的教学与科研工作。

收稿日期:2000-03-23