

文章编号: 1001-3806(2002)02-0132-03

高斯光束通过环状球差透镜后的光束质量*

季小玲^{1,2} 吕百达²

(¹四川师范大学电子工程学院, 成都, 610066) (²四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 以桶中功率(PIB)及 β 值为光束质量评价参数, 分析了环状球差透镜的遮拦比、球差系数等参数对高斯光束光束质量的影响。值得指出的是: (1) 由于焦移, 在实际焦面比几何焦面上可得到更大的 PIB; (2) 适当选用负球差环状透镜可实现 $\beta < 1$, 于是可获得比通过无球差环状透镜更高的能量集中度。

关键词: 环状球差透镜; 高斯光束; 桶中功率(PIB); β 值

中图分类号: O435 文献标识码: A

Beam quality of Gaussian beams passing through a spherically aberrated annular lens

Ji Xiaoling^{1,2}, L Baida²

(¹ College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, 610066)

(² Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: With power in the bucket (PIB) and β parameter to characterize beam quality, the effect of some parameters, such as spherical aberration coefficient C_4 and obscure ratio ϵ , on the beam quality of Gaussian beams is analyzed. It is worthwhile to note that PIB is larger at the actual focal plane than that at the geometrical plane due to focal shift, and that β can become less than 1 when a negative spherically aberrated annular lens is properly selected, hence a higher energy density beam can be achieved compared with the case of the annular lens without spherical aberration.

Key words: annular spherically aberrated lens; Gaussian beams; power in the bucket (PIB); β parameter

引言

在激光的实际应用中, 除了对输出激光功率(或能量)、效率和稳定性等有要求外, 光束质量也是一项重要指标。事实上, 研究激光束传输变换规律也以光束质量控制为主要目的。在激光发展的历史中, 曾针对不同的应用目的提出不同的参数, 例如聚焦斑尺寸、远场发散角、 β 值、斯特列尔(strehl)比、光束传输因子(M^2 因子)和桶中功率(PIB)等, 作为衡量光束质量优劣的标准^[1-3]。其中, M^2 因子在无光阑限制的近轴光学系统中完全由光束自身的分布唯一确定, 而与光学系统参数无关, 是一个传输不变量, 且同时反映光束的近场和远场分布特性, 在数学上又具有严密性, 因此, 是评价激光光束质量的一个重要参数。另一方面, 有球差的透镜对高斯光束传输和 M^2 因子的影响在文献中已做了许多研

究^[4-6]。但是对于强截断光束, 其空间频率域中的二阶矩不收敛, 因此, 不能用 M^2 因子对其光束质量进行评价。在许多实际工作中, 激光束能量集中度是衡量光束质量的重要参数。我们以 PIB 及 β 值为光束质量评价参数, 用详细的数值计算例说明了环状球差透镜对高斯光束光束质量的影响, 得出一些对实际工作有用的重要结论。

1 分析模型

设入射面处($z=0$)高斯光束的场分布为:

$$E_0(r) = \exp[-(r^2/w_0^2)] \quad (1)$$

式中, w_0 为光束的束腰宽度。

球差使光束的波前发生畸变。光束通过球差元件后, 球差对光束的影响可用相位因子 $\varphi(r)$ 描述^[5]: $\varphi(r) = \exp(-ikC_4r^4)$ (2) 式中, C_4 称为球差系数。 $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

在柱坐标系下, 入射场为 $E_0(r, 0)$ 的光束通过遮拦比为 ϵ 的环状球差透镜的传输行为用 Collins 公式表示为:

* 激光技术国家重点实验室资助项目。

作者简介: 季小玲, 女, 1963 年 11 月出生。硕士, 副教授。现从事激光光学的科研与教学工作。

$$E(r, z) = \frac{ik}{z} \exp\left[-\frac{ik}{2z}r^2\right] \int_{\epsilon a}^a E_0(r_0, 0) \varphi(r_0) \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}\left(1-\frac{z}{f}\right)r_0^2\right] J_0\left(\frac{kr_0 r}{z}\right) r_0 dr_0 \quad (3)$$

式中, z 为透镜到考察面的距离, f 是透镜的焦距, a 为圆环透镜的外半径, J_0 是零阶 Bessel 函数。

将(1)式和(2)式代入(3)式, 用数值计算方法, 可求出高斯光束通过环状球差透镜后的场分布 $E(r, z)$, 由此得到光强分布 $I(r, z)$ 为:

$$I(r, z) = E(r, z) E^*(r, z) \quad (4)$$

PIB 定义为在远场对给定的桶尺寸内所围功率占总功率的份数^[2], 即:

$$PIB = \int_0^b I(r, f) r dr \bigg/ \int_0^\infty I(r, f) r dr \quad (5)$$

式中, b 为桶的半径, $I(r, f)$ 为透镜后焦面处的光强。然而, 由于存在焦移, 实际的焦面位移与几何焦面($z = f$) 并不重合, 且环状球差透镜的遮拦比的大小和球差都要改变焦移量。设轴上最大光强点位置 z_{max} (以透镜为参考) 所在横截面为实际焦面。将

(5) 式中的 f 换成 z_{max} , 则得到实际焦面上的 PIB。

(5) 式中的 C_4 取 0, 则得到无球差时的 PIB。

在实际应用中, β 参数常被用来描述光束质量, β 定义为^[3]:

$$\beta = \sqrt{A_m/A_0} \quad (6)$$

式中, A_m, A_0 分别为在远场实际光束和理想光束 (比较基准) 的焦斑面积, 其等效焦斑半径为 PIB 曲线上 63% 功率点处对应值。针对我们讨论的环状光束, 定义 β_1 : 将外半径为 a 的实心高斯光束 ($C_4 = 0$) 取为理想光束; β_2 : 将与实际光束相同的外半径 a 和遮拦比 ϵ 的环状高斯光束 ($C_4 = 0$) 取为理想光束。

2 数值计算和分析

为了研究高斯光束通过环状球差透镜后在几何焦面和实际焦面上的 PIB 随着遮拦比和球差的变化规律, 作者做了大量的数值计算, 其主要结果总结于图 1~ 图 3, 所用参数为 $\lambda = 1.06\mu\text{m}, w_0 = 0.7\text{mm}, f = 200\text{mm}$ 。

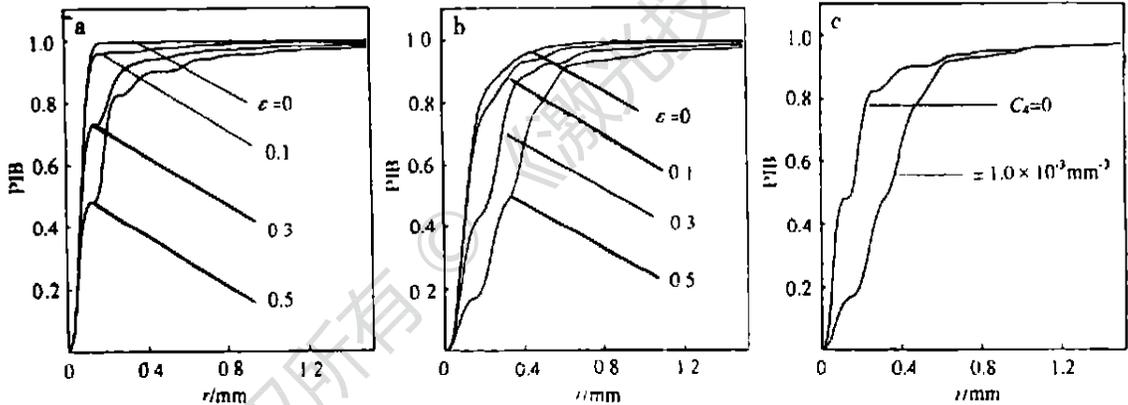


Fig. 1 PIB curves of a Gaussian beam passing through an annular lens with and without spherical aberration at the geometrical focal plane
a- $C_4 = 0$ b- $C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$ c- $\epsilon = 0.5$

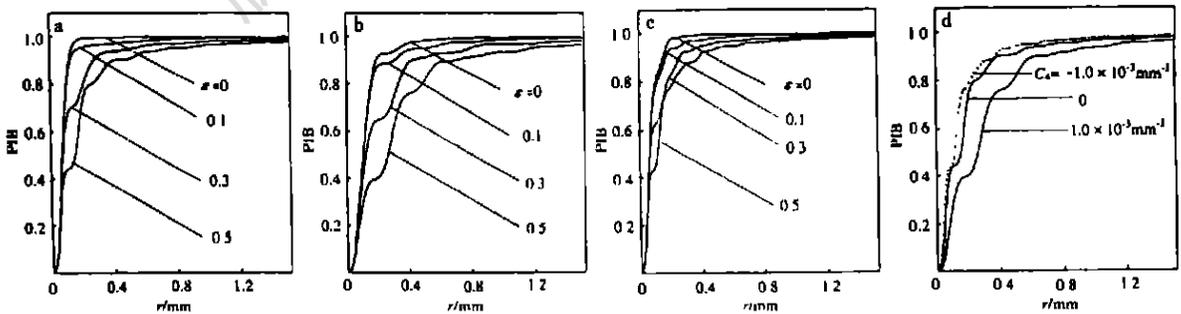


Fig. 2 PIB curves of a Gaussian beam passing through an annular lens with and without spherical aberration at the actual focal plane
a- $C_4 = 0$ b- $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$ c- $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$ d- $\epsilon = 0.5$

图 1 给出了几何焦面上的 PIB 曲线。可以看出, 对于正球差、负球差和无球差环状透镜, 高斯光束在透镜几何焦面的 PIB 随着 ϵ 的增大而降低。

图 1b、图 1c 还表明, 在几何焦面上, 相同球差系数绝对值的正、负球差对应的 PIB 曲线重合, 且无球差时的 PIB 大于有球差时的 PIB。实际焦面上的

PIB 曲线示于图 2。图 2a~ 图 2c 说明, 不论透镜具有正球差、负球差, 还是无球差, PIB 也均随着透镜的遮拦比 ϵ 的增加而降低。即 ϵ 越大, 光束能量集中度越差。图 2d 表明, $\epsilon=0.5$ 时, 相同球差系数绝对值的正、负球差对应的实际焦面上的 PIB 曲线是分开的, 且负球差透镜的 PIB 最大(虚线), 无球差透镜的次之, 正球差透镜的 PIB 最小。这说明正球差使光束的能量集中度降低, 而选择合适的负球差环状透镜, 可获得比理想光学系统(无球差)能量集中度更高的光束。高斯光束通过环状球差透镜后在实际焦面和几何焦面上的 PIB 曲线的比较($\epsilon=0.5$ 时)示于图 3。该图说明, 负球差对应的实际焦面上的 PIB 大于相同球差系数绝对值的正球差对应的实际焦面上的 PIB 和几何焦面上(正、负球差)的 PIB。当 $r < 0.6\text{mm}$ 时, 正球差对应的实际焦面上的 PIB 大于相同球差系数绝对值对应的几何焦面的 PIB, 而当 $r > 0.6\text{mm}$ 时, 几何焦面上的 PIB 则大于正球差对应的实际焦面上的 PIB。

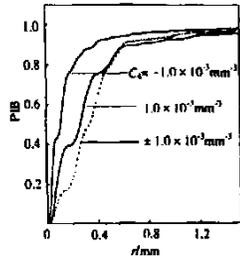


Fig. 3 PIB curves for a Gaussian beam passing through an annular lens with spherical aberration at the actual focal plane (—) and at the geometrical focal plane(---) $\epsilon=0.5$

利用(6)式对高斯光束通过不同遮拦比 ϵ 和球差系数 C_4 的环状球差透镜后光束的 β 参数的计算总结于表 1。可以看出, 几何焦面和实际焦面上的 β_1 均随着 ϵ 的增大而增大。分别就 $\beta_j (j=1, 2)$ 而言, 负球差对应的实际焦面上的 β_j 最小, 正球差对应的实际焦面上的 β_j 次之, 相同球差系数绝对值的正、负球差对应的几何焦面上 β_j 最大。一般情况下, $\beta_2 < \beta_1$ 。此外, 负球差环状透镜对应的实际焦面上的 $\beta (\beta_1 \text{ 和 } \beta_2)$ 还可能小于 1。例如, 对 $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$, 当 $\epsilon=0$ 时, $\beta_1 = 0.880 < 1$; $\epsilon=0.1$ 时, $\beta_1 = 0.895 < 1, \beta_2 = 0.882 < 1$; $\epsilon=0.5$ 时, $\beta_2 = 0.727 < 1$ 。

3 小 结

为实际工作的需要和回避硬边光阑的衍射造成的 M^2 因子发散的问题, 我们采用 PIB 和 β 作为光束质量评价参数, 研究了环状球差透镜对高斯光束光束质量的影响。研究表明, 高斯光束通过环状球差透镜后, 其衍射光强将随着透镜的遮拦比 ϵ 和球差系数 C_4 的变化而变化。光束在实际焦面和几何焦面上的桶中功率均随着透镜的遮拦比 ϵ 的增加而降低, β_1 随 ϵ 的增大而增大。 ϵ 一定的情况下, 在几何焦面上, 相同球差系数绝对值的正、负球差对应的 PIB 曲线相同, 且无球差时的 PIB 大于有球差时的 PIB。 ϵ 一定的情况下, 在实际焦面上, 负球差环状透镜的 PIB 最大, 无球差环状透镜的次之, 正球差环状透镜的 PIB 最小。因此, 采用合适的负球差环状透镜在实际焦面上可得到最大的 PIB。通过选取适当参数的负球差环状透镜可实现 $\beta_1, \beta_2 < 1$, 即可获得比通过理想光学系统(无球差)能量集中度更高的光束。

参 考 文 献

[1] Siegman A E. SPIE, 1990, 1224: 2~ 4.
 [2] Siegman A E. OSA T OPS, 1998, 17: 184~ 199.
 [3] Garay A. SPIE, 1988, 888: 17.
 [4] Siegman A E. Appl Opt, 1993, 32(30): 5893~ 5901.
 [5] Alda J, Alonso J, Bernabeu E. J O S A, 1997, A14(10): 2737~ 2747.
 [6] Pu J X. J Modern Optics, 1998, 45(2): 239.

Table 1 Calculated β_1 and β_2 parameters

ϵ	0	0.1	0.3	0.5
β_1, β_2				
β_1 (at the geometrical focal plane, $C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	1.774	1.873	3.549	5.156
β_1 (at the actual focal plane, $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	1.575	1.609	2.223	4.069
β_1 (at the actual focal plane, $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	0.880	0.895	1.316	1.703
β_2 (at the geometrical focal plane, $C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		1.851	3.049	2.150
β_2 (at the actual focal plane, $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		1.585	1.857	1.738
β_2 (at the actual focal plane, $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		0.882	1.099	0.727