

文章编号: 1001-3806(2002)03-0231-03

高斯光束通过两种球差透镜的聚焦特性比较 *

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: 通过研究,比较了高斯光束通过两种不同球差透镜的聚焦特性。研究表明,高斯光束通过球差透镜的聚焦特性由球差透镜的类型、球差大小和光束的菲涅耳数共同决定。不同的球差透镜要实现无焦移聚焦和越过焦点的聚焦的条件是不同的。

关键词: 球差;聚焦特性;高斯光束

中图分类号: O435 **文献标识码:** A

Comparison of focusing properties of Gaussian beams passing through two kinds of spherically aberrated lenses

Ji Xiaoling^{1,2}, Lü Baida²

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

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

Abstract: The focusing properties of Gaussian beams passing through two types of spherically aberrated lenses are studied and compared. It is shown that the focusing properties depend on the type of the spherically aberrated lenses, the spherical aberration coefficient and Fresnel number. There are different conditions for different spherically aberrated lenses to achieve the focus without focal shift or beyond the geometrical focal point of the lens.

Key words: spherical aberration; focusing property; Gaussian beam

引 言

在激光材料加工、激光化学等应用中,常将激光光束聚焦后照到工件或样品上。因此,激光束的聚焦和焦移的问题长期以来备受关注。Wolf 等人首先提出焦移的概念^[1,2],目前又有人对球差透镜的超衍射极限聚焦和无焦移聚焦进行了研究^[3,4]。但不同的球差透镜对激光束聚焦特性的影响是不同的。笔者采用了两种球差透镜模型,即单个圆球差透镜和相同球差的两正交柱透镜^[5],从 Collins 公式出发^[6],通过大量的数值计算,研究比较高斯光束分别通过这两种球差透镜后轴上光强分布、轴上最大光强及其位置随球差的变化规律,以及轴上最大光强位置处横截面上的光强分布。研究表明,这两种球差透镜(利用负球差)均可实现超衍射极限聚

焦;选择适当的光束菲涅耳数、球差透镜的类型和球差系数,不但可实现无焦移聚焦,而且实际焦点还能越过透镜的几何焦点而位于其右方。但是,不同的球差透镜要实现无焦移聚焦和越过焦点的聚焦的条件是不同的。

1 分析模型

设入射高斯光束的场分布为:

$$E_0(x, y, 0) = \exp[-(x^2 + y^2)/w_0^2] \quad (1)$$

式中, w_0 为光束的束腰宽度。

不同的球差透镜其球差位相因子不同。对于单个圆球差透镜,其球差因子可表为^[5]:

$$i_1(x, y) = \exp[-ikS_1(x^2 + y^2)^2/w_0^4] \quad (2)$$

具有相同球差的两个正交柱透镜粘合成的透镜的球差因子可表示为:

$$i_2(x, y) = \exp[-ikS_1(x^4 + y^4)/w_0^4] \quad (3)$$

式中, S_1 为透镜的球差系数, $k = 2\pi/\lambda$ 为高斯光束的波数, λ 为光束的波长。

设入射高斯光束束腰位于球差透镜处,则由 Collins 公式可得到距透镜 z 处的场分布为^[6]:

* 激光技术国家重点实验室(华中科技大学)和重庆师范学院科研基金资助项目。

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。

收稿日期:2000-12-25;收到修改稿日期:2001-02-26

$$E(x_2, y_2, z) = \begin{bmatrix} -\frac{i}{B} \\ C \end{bmatrix} E_0(x_1, y_1, 0) \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 + y_1^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)]\right\} dx_1 dy_1 \quad (4)$$

式中, A, B, C, D 为由入射面至出射面的变换矩阵元。设圆透镜和两正交柱透镜的焦距均为 f , 则有:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

若令 $N_w = w_0^2 / f$ (6)

$$x = \frac{x_1}{\sqrt{f}}, y = \frac{y_1}{\sqrt{f}}, x = \frac{x_2}{\sqrt{f}}, y = \frac{y_2}{\sqrt{f}} \quad (7)$$

式中, N_w 为光束的菲涅耳数。

将(1), (5), (6)和(7)式代入(4)式可分别得到对应于(2), (3)式表示的两种不同球差透镜的出射场分布为:

$$E_1(x, y, z) = -\frac{i}{z/f} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{N_w}\right] \times \exp\left[-ikS_1 \frac{(x^2 + y^2)^2}{N_w^2}\right] \times \exp\left[-i\frac{1}{z/f} - 1(x^2 + y^2) - \frac{2(x^2 + y^2)}{z/f}\right] dx dy \quad (8)$$

$$E_2(x, y, z) = -\frac{i}{z/f} \exp\left[-\frac{x^2}{N_w}\right] \exp\left[-\frac{ikS_1 x^4}{N_w^2}\right] \times \exp\left\{-i\left[\frac{1}{z/f} - 1\right]x^2 - \frac{2fx}{z/f}\right\} \times \exp\left[-\frac{y^2}{N_w}\right] \exp\left[-\frac{ikS_1 y^4}{N_w^2}\right] \times \exp\left\{-i\left[\frac{1}{z/f} - 1\right]y^2 - \frac{2yy}{z/f}\right\} dy \quad (9)$$

光强分布为:

$$I_j(x, y, z) = E_j^*(x, y, z) E_j(x, y, z) \quad (j = 1, 2, \text{下同}) \quad (10)$$

轴上光强分布为:

$$I_j(0, 0, z) = E_j^*(0, 0, z) E_j(0, 0, z) \quad (11)$$

当 $S_1 = 0$ 时, (10)式过渡到理想光学系统的情形:

$$I(x, y, z) = \frac{1}{\left[1 - \frac{z}{f}\right]^2 + \left[\frac{z/f}{N_w}\right]^2} \times \exp\left[-\frac{2}{N_w} \frac{1}{\left[1 - \frac{z}{f}\right]^2 + \frac{(z/f)^2}{N_w^2}} (x^2 + y^2)\right] \quad (12)$$

由(12)式可得轴上光强分布为:

$$I(0, 0, z) = \frac{1}{(1 - z/f)^2 + [(z/f)/N_w]^2} \quad (13)$$

由 $dI(0, 0, z)/dz = 0$ 可得到轴上最大光强的位置:

$$z_{\max}/f = (N_w)^2 / [1 + (N_w)^2] \quad (14)$$

(14)式与文献[7]对应公式一致。将(14)式代入(13)式得到轴上最大光强值为:

$$I_{\max} = 1/[1 + (N_w)^2] \quad (15)$$

由(15)式可得几何焦点处的光强值为:

$$I_0 = (N_w)^2 \quad (16)$$

特例, 当 $N_w = 1.0$ 时, 几何焦点处的光强值 $I_{01} = 1$ 。

2 数值计算和分析

数值计算中, 轴上最大光强 I_{\max} 以无球差时几何焦点处的光强值 I_0 或 I_{01} 归一化, 轴上最大光强的位置 z_{\max} 以透镜焦距 f 归一化。

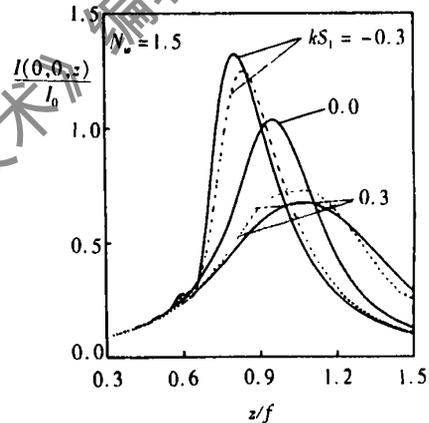


Fig. 1 Axial irradiance distribution $I(0, 0, z)/I_0$ of a Gaussian beam focused by a single circular spherically aberrated lens (—) and two identical but orthogonal spherically aberrated cylindrical lenses (---) respectively, $N_w = 1.5$

高斯光束通过单个圆球差透镜和相同球差的两正交柱透镜的聚焦特性比较的典型数值计算例示于图1至图3。图1为轴上光强分布比较($N_w = 1.5$)。可以看出, 无球差($kS_1 = 0$)时, 这两种球差透镜的轴上光强分布相同。当 $kS_1 = -0.3 < 0$ 时, 两种球差透镜的轴上光强均比无球差时为大, 轴上最大光强位置均朝透镜方向移动。即对于这两种球差透镜均可用负球差实现超衍射极限聚焦。当 $kS_1 = 0.3 > 0$ 时, 相对于无球差而言, 两种球差透镜的轴上最大光强均减小, 且轴上最大光强位置远离透镜。从图2也可得到相同的结论。图2为轴上最大光强及其位置随球差系数 kS_1 变化的比较。进一步分析图1和图2得到, 在相同负球差系数的条件下, 单个圆球差透镜对应的轴上最大光强及其位置朝透镜方向的位移均大于具有相同球差的两正交柱透镜对应的光强和位移。在相同正球差系数

的条件下,相对于具有相同球差的两正交柱透镜,单个圆球差透镜对应的轴上最大光强更小,最大光强位置离透镜更远(N_w 较小时除外。例如,图 2a 中, $N_w = 1.0$ 的情形)。从图 2 还可以看出,两种球差透镜均有: kS_1 越大,对光束的聚焦特性影响越大;光束的聚焦特性随着 N_w 的变化而改变。由于正球差使得轴上最大光强位置远离透镜,因此当 kS_1 增大到一定值时,就能实现无焦移聚焦(轴上最大光强点与几何焦点重合)和越过焦点的聚焦(轴上最大光强点越过几何焦点而位于其右方)。例如, $N_w = 1.5$ 的情形,单个球差圆透镜和具有相同球差的两正交柱透镜分别当 $kS_1 = 0.1$ 和 $kS_1 = 0.125$ 时,有 $z_{\max}/f = 1$ 。显然,后者需要更大的正球差。图 2 还表明,当 N_w 较小时(例如 $N_w = 1.0$),两种球差透镜均不能实现无焦移聚焦和越过焦点的聚焦。 z_{\max} 处的截面光强分布比较示于图 3。从图 3 可以看出,相同球差系数情况下,负球差($kS_1 = -0.3$)使得单个圆球差透镜对应的束宽小于相同球差的两正交柱透镜所对应的束宽,而正球差则反之。

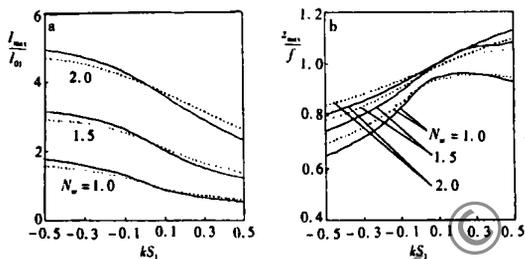


Fig. 2 a—axial maximum irradiance distribution $I(0,0,z)/I_0$ of a Gaussian beam focused by a single circular spherically aberrated lens (—) and two identical but orthogonal spherically aberrated cylindrical lenses (---) respectively as a function of spherical aberration kS_1 b—position of axial maximum irradiance z_{\max} of a Gaussian beam focused by a single circular spherically aberrated lens (—) and two identical but orthogonal spherically aberrated cylindrical lenses (---) respectively as a function of spherical aberration kS_1

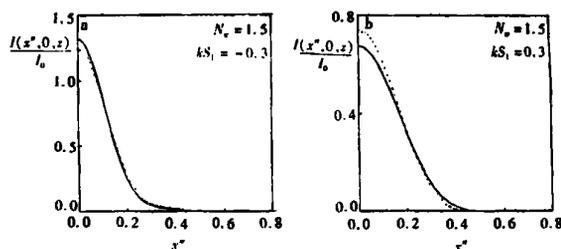


Fig. 3 Transverse irradiance distribution at the z_{\max} of a Gaussian beam focused by a single circular spherically aberrated lens (—) and two identical but orthogonal spherically aberrated cylindrical lenses (---) respectively, $N_w = 1.5$
a— $kS_1 = -0.3$ b— $kS_1 = 0.3$

3 结 论

研究得出的重要结论是,高斯光束通过球差透镜的聚焦特性由球差透镜的类型、球差大小和光束的菲涅耳数共同决定。相同球差系数 kS_1 的情况下,球差对单个圆球差透镜聚焦特性的影响比对相同球差的两个正交柱透镜的影响大。这是由于单个圆球差透镜的球差相位因子多了一个交叉项 $\exp(-i2kS_1x^2y^2/w_0^4)$ 。因此,对于相同的负球差系数 kS_1 ,单个圆球差透镜能获得更大的 I_{\max} 和更小的束宽(z_{\max} 处对应的);而要实现无焦移和越过焦点的聚焦,相同球差的两个正交柱透镜则需要更大的正球差系数 kS_1 。所得这些结论对光学系统的设计是有意义的。

参 考 文 献

- [1] Wolf E, Li Y. Opt Commun, 1981, 39: 205.
- [2] Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1981, 39: 211.
- [3] Yoshida A, Asakura T. Opt Commun, 1994, 109: 368.
- [4] Yoshida A, Asakura T. Opt Commun, 1996, 123: 694.
- [5] Martinez Herrero R, Piqero G, Mejias P M. Opt & Quant Election, 1995, 27: 173.
- [6] Collins S A. J O S A, 1970, 60: 1168.
- [7] Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1982, 42: 151.

(上接第 224 页)

以后缸孔磨损量小于 $0.01\text{mm}/10^5\text{km}$, 达到美国技术要求。使国产汽车的使用寿命成倍提高。减少了汽车尾气对环境的污染。促进了汽车产业的技术改造, 增强了我国汽车产品的竞争力, 为提高我国汽车产品的国

产化率解决了技术上的关键问题。3 年多的生产运行表明, 整个激光加工生产线稳定可靠。

参 考 文 献

- [1] 王家金. 激光加工技术. 北京: 计量出版社, 1992.