

文章编号 1004-924X(2007)08-1203-05

# 高斯光束经望远镜和薄透镜组合系统的聚焦特性

周 城

(济南大学 理学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 运用  $q$  参数和  $ABCD$  定律, 推导了高斯光束经望远镜和薄聚焦透镜组合系统的聚焦特性的变化规律, 并对其进行了数值模拟计算。利用平凹腔 He-Ne 激光器对模拟结果进行了验证, 在相同距离下, 与单一薄透镜的聚焦性能进行了比较。结果表明, 随着距离 (70~400 mm) 的增加, 两者的聚焦效果相差增大, 最大为 30 倍; 随着距离 (70~400 mm) 的减小, 两者的聚焦效果相差减小; 经望远镜和薄聚焦透镜组合系统聚焦的高斯光束束腰处光斑半径随距离 (70~400 mm) 变化的最大值为  $0.043 \mu\text{m}$ 。因此, 在实际聚焦过程中, 应选用望远镜和薄聚焦透镜组合系统, 且距离尽可能地小或为零。

**关键词:** 高斯光束; 望远镜和薄透镜组合系统; 聚焦特性

中图分类号: TN 241; TH703 文献标识码: A

## Focusing properties of Gaussian beams through a telescope-lens compound system

ZHOU Cheng

(School of Science, Jinan University, Jinan 250022, China)

**Abstract:** The beam conversional properties of Gaussian beams through a telescope-lens system were deduced based on parameter  $q$  and  $ABCD$  law. The properties of the system were simulated and calculated, and the results were testified by the focusing experiment through a He-Ne laser with plate-co-cave cavity. The focusing beam radius' ratio between the telescope-lens compound system and the single lens increases via length (70~400 mm) increasing, and the maximum ratio is 30, meanwhile the ratio between the telescope-lens compound system and the single lens decreases via length (70~400 mm) shorting, but the maximum difference of the focusing beam radius' is  $0.043 \mu\text{m}$ . Experiment results suggest that choosing the telescope-lens compound system as focusing optical elements and setting the length in the shortest or zero will get a upstanding focusing purpose.

**Key words:** Gaussian beam; telescope-lens compound system; focusing property

## 1 引言

激光作为一种单色性好、相干性好、方向性好和高亮度的光源,被广泛应用于记录和读出 CD 光盘、全息、新型的信息存储技术、光通信、光互连、高密度计算机芯片和激光微加工等领域中。为了提高储存的信息量和密度能量,通常需要高斯光束的光斑半径越小越好。目前,主要研究课题集中在单透镜的聚焦<sup>[1-2]</sup>、凹凸透镜的聚焦<sup>[3-5]</sup>、双凸透镜的聚焦<sup>[6-8]</sup>和自聚焦透镜等<sup>[9]</sup>。

本文运用  $q$  参数和  $ABCD$  定律,详细推导了高斯光束经望远镜和薄聚焦透镜组合系统的聚焦特性的变化规律,并进行了数值模拟计算。在相同距离  $l$  下,与单一薄透镜的聚焦性能进行了比较。结果发现,随着距离  $l$  的减小,两者的聚焦效果相差减小;但经望远镜和薄聚焦透镜组合系统聚焦的高斯光束束腰处光斑半径随距离  $l$  的变化不是很明显。最后实验验证了该结论的正确性。

## 2 理论分析

设高斯光束的束腰半径为  $\omega_0$ ,距望远镜系统前透镜的距离为  $l$ ,望远镜系统两透镜间的距离为  $d$ , $d=f_1+f_2-\Delta$ , $f_1$  和  $f_2$  分别为两透镜的焦距,经望远镜系统后高斯光束束腰半径为  $\omega_0'$ ,距

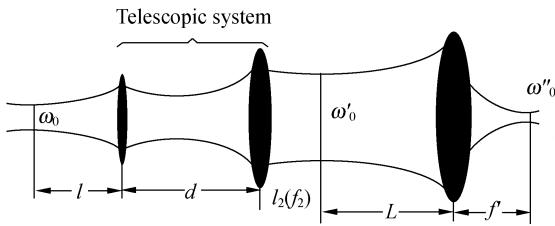


图 1 聚焦系统装置图

Fig. 1 Setup of optical focusing system

望远镜系统后透镜的距离为  $l_2$ ,此时该束腰距焦距为  $f'$  的聚焦透镜的距离为  $L$ ,经聚焦透镜后高斯光束的束腰半径为  $\omega_0''$ ,如图 1 所示。望远镜系统的传输矩阵为<sup>[6]</sup>

$$m = \begin{pmatrix} M_T + \frac{\Delta}{f_1} & d \\ -\frac{\Delta}{f_1 f_2} & \frac{1}{M_T} + \frac{\Delta}{f_2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

利用  $q$  参数和  $ABCD$  定律,可求得高斯光束经望

远镜系统后的光斑半径为

$$\omega_0' = \omega_0 \left| M_T + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta l_2}{f_1 f_2} \sqrt{1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{f_1 f_2}{\Delta} \left( \frac{1}{M_T} + \frac{\Delta}{f_2} \right) - l \right]^2} \right|, \quad (2)$$

即,

$$\frac{\omega_0'}{\omega_0} = \left| M_T + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta l_2}{f_1 f_2} \sqrt{1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{f_1 f_2}{\Delta} \left( \frac{1}{M_T} + \frac{\Delta}{f_2} \right) - l \right]^2} \right|, \quad (3)$$

令,

$$F(\Delta, l_2) = \left( M_T + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta l_2}{f_1 f_2} \sqrt{1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{f_1 f_2}{\Delta} \left( \frac{1}{M_T} + \frac{\Delta}{f_2} \right) - l \right]^2} \right)^2, \quad (4)$$

一般情况下,透镜焦距  $f_1$  和  $f_2$  是确定的,在入射高斯光束的束腰距望远镜系统前透镜距离  $l$  不变的情况下,只有  $\Delta$  和  $l_2$  是变量,若  $F(\Delta, l_2)$  取极值,须

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\Delta, l_2)}{\partial \Delta} = 0 \\ \frac{\partial F(\Delta, l_2)}{\partial l_2} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

解得,

$$\begin{cases} \Delta = \frac{f_1^2 (f_1 - l)}{\left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 + (l - f_1)^2} \\ l_2 = f_2 \end{cases}. \quad (6)$$

因此,只有经望远镜系统后的高斯光束束腰在望远镜系统后透镜的焦平面上时, $\omega_0'/\omega_0$  才取最大值。将式(6)代入式(3)得最大值为

$$M_{\max} = \frac{\omega_0'}{\omega_0} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left( \frac{l - f_1}{\left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)} \right)^2}. \quad (7)$$

利用  $q$  参数和  $ABCD$  定律,可求得高斯光束经薄聚焦透镜后,其光斑半径为

$$\omega_0'' = \left[ \frac{1}{\omega_0'^2} \left( 1 - \frac{L}{f'} \right)^2 + \left( \frac{1}{f'} \right)^2 \left( \frac{\pi \omega_0'}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

束腰位置在聚焦透镜右侧  $L'$  处,则,

$$L' = f' + \frac{(L - f') f'^2}{(L - f')^2 + \left( \frac{\pi \omega_0'^2}{\lambda} \right)^2}, \quad (9)$$

在  $L=0$  且  $f' \ll \frac{\pi \omega_0'^2}{\lambda}$  时,  $L' = f'$

$$\omega_0'' = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0}, \quad (10)$$

联立式(7)和式(10)得望远镜系统和薄聚焦透镜变换后高斯光束束腰处光斑半径为

$$\omega_0'' = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0} = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0 \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left( \frac{l - f_1}{\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}} \right)^2}}, \quad (11)$$

当  $l \gg f_1$  时, 式(11)可改写为

$$\omega_0'' = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0} = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0 \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda l}{\pi \omega_0^2} \right)^2}}, \quad (12)$$

而  $\Delta \approx 0$ 。

总之, 束腰半径为  $\omega_0$  的高斯光束, 其束腰距望远镜系统前透镜的距离为  $l$ , 经两透镜间距离为  $d = f_1 + f_2$  的望远镜系统变换后, 其高斯光束束腰半径  $\omega_0'$  的最大值距望远镜系统后透镜的距离为  $f_2$ , 此时该束腰位于焦距为  $f'$  的聚焦透镜前焦平面上, 经聚焦透镜变换后高斯光束的束腰位置在聚焦透镜右侧  $f'$  处, 其束腰半径  $\omega_0''$  为式(12)。若只用薄聚焦透镜, 在  $(l + d + f_2) \gg f'$  时,

$$\omega_0'' = \frac{\lambda f'}{\pi \omega_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{\lambda(l + f_1 + 2f_2)}{\pi \omega_0^2} \right]^2}}. \quad (13)$$

### 3 数值模拟与实验

以平凹腔 He-Ne 激光器输出 632.8 nm 波长的高斯光束作为入射光, 该耦合输出镜为平面镜, 腔长为 295 mm, 凹面镜的曲率半径  $R = 2\,000$  mm。图 2 是用 CCD 相机拍摄的束腰处光斑图, 测得其输出光斑束腰半径为 0.378 mm。

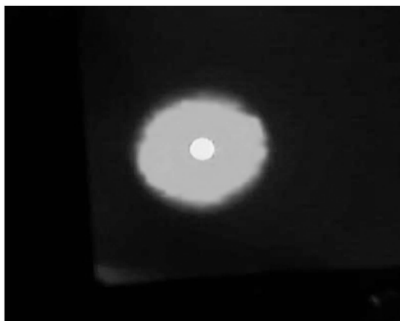


图 2 激光器输出光束的束腰光斑  
Fig. 2 Waist spot of laser output beam

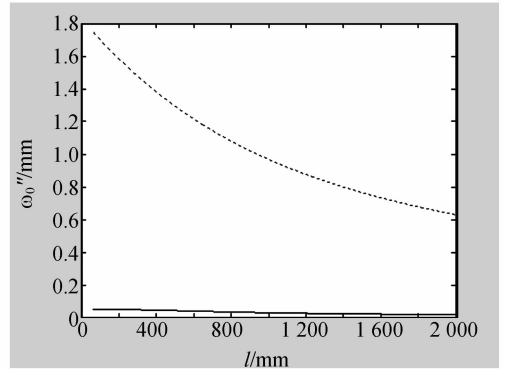


图 3 束腰半径随距离的变化曲线  
Fig. 3 Curve of beam waist radius via length

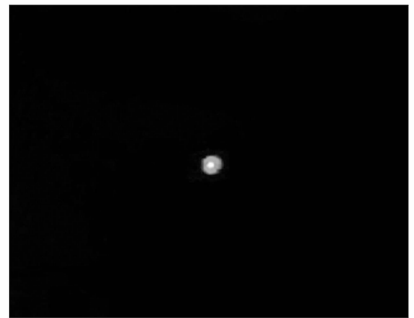


图 4 经望远镜和薄透镜组合系统变换后的束腰光斑  
Fig. 4 Waist spot through telescope-lens compound system

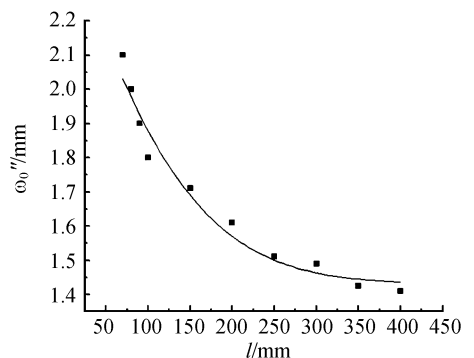


图 5 经薄透镜聚焦的束腰处光斑半径随距离的变化  
Fig. 5 Curve of beam waist radius via length through lens

取  $f_1 = 6.4$  mm,  $f_2 = 300$  mm,  $f' = 4.5$  mm, 根据式(12), (13), 模拟计算聚焦后高斯光束的束腰半径  $\omega_0''$  随到聚焦系统距离  $l$  的变化规律, 如图 3 所示, 图中实线是经望远镜和薄聚焦透镜组合系统

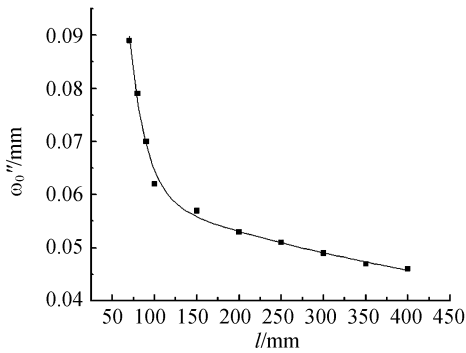


图 6 经望远镜和薄透镜系统聚焦的束腰处光斑半径随距离的变化

Fig. 6 Curve of beam waist radius via length through telescope-lens system

变换的曲线,点线是经薄聚焦透镜变换的曲线。由图可知,随着距离  $l$  的增加,两者的聚焦效果相差增大;随着距离  $l$  的减小,两者的聚焦效果相差减小;而经望远镜和薄聚焦透镜组合系统聚焦的高斯光束束腰处光斑半径随距离  $l$  的变化不是很明显,因此在实际应用中距离  $l$  可尽可能地小。图 4 是用 CCD 相机拍摄的经望远镜和薄聚焦透

镜组合系统变换后束腰处的光斑图。图 5 是实验测得的经薄透镜聚焦的束腰处光斑半径随距离  $l$  的变化曲线,图 6 是实验测得的经望远镜和薄聚焦透镜组合系统聚焦的束腰处光斑半径随距离  $l$  的变化曲线。

## 4 结 论

运用  $q$  参数和 **ABCD** 定律,详细推导了高斯光束经望远镜和薄聚焦透镜组合系统的聚焦特性的变化规律,并进行了数值模拟计算。最后利用平凹腔 He-Ne 激光器对模拟结果进行了验证。在相同距离  $l$  下,与单一薄透镜的聚焦性能进行了比较,随着距离  $l$  (70~400 mm) 的增加,两者的聚焦效果相差增大,最大为 30 倍;随着距离  $l$  (70~400 mm) 的减小,两者的聚焦效果相差减小;经望远镜和薄聚焦透镜组合系统聚焦的高斯光束束腰处光斑半径随距离  $l$  (70~400 mm) 变化的最大值为  $0.043 \mu\text{m}$ 。因此,在实际聚焦过程中,应选用望远镜和薄聚焦透镜组合系统,且距离  $l$  应尽可能地小或为零。

## 参考文献:

- [1] HERGEN E, WILLIAM M D, WILLIAM M Y, *et al.*. Performance of a Cr:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(9): 2508-2512.
- [2] 刘志军,吕百达.超短脉冲高斯光束通过透镜的聚焦特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 798-802.  
LIU ZH J, LV B D. Focusing of ultrashort pulsed gaussian beams by a lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 798-802. (in Chinese)
- [3] 周南润,陶向阳,吕百达.高斯光束经复合光学系统的聚焦特性[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(4): 497-500.  
ZHOU N R, TAO X Y, LV B D. Focusing properties of gaussian beams through a compound optical system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4): 497-500. (in Chinese)
- [4] 季小玲,吕百达.高斯光束通过双焦透镜的聚焦特性[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(6): 679-682.  
JI X L, LV B D. Focusing properties of gaussian beams passing through a bifocal lens[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6): 679-682. (in Chinese)
- [5] 刘金环.高斯光束的光学变换[J]. *光学精密工程*, 1994, 2(3): 15-21.  
LIU J H. Optical transform of gaussian beam[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(3): 15-21. (in Chinese)
- [6] 孔桂华,欧家鸣.高斯光束通过离焦望远镜系统的变换[J]. *云南师范大学学报*, 2004, 24(2): 42-57.  
KONG G H, OU J M. Gaussian beam propagation through a defocusing telescopic system[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2004, 24(2): 42-57. (in Chinese)
- [7] 李红艳,俞士胜,任向军,等.激光共振电离质谱计用光入射系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 461-465.  
LI H Y, YU SH SH, REN X J, *et al.*. Development of light incidence system for laser resonance ionization mass spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 461-465. (in Chinese)
- [8] 常军,翁志成,姜会林,等.宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 55-57.

CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1):55-57. (in Chinese)

[9] 张大勇,周寿桓,梁峰,等.LD 光束经自聚焦透镜变换后的特性研究[J]. *激光与红外*, 2002, 32(3):171-176.

ZHANG D Y, ZHOU SH H, LIANG F, *et al.*. Study on the characteristic of LD output beam transformed by grin [J]. *Laser and Infrared*, 2002, 32(3):171-176. (in Chinese)

作者简介:周 城(1974—),男,山东夏津人,济南大学理学院讲师,主要从事激光器件和非线性频率变换技术的研究。

E-mail: cczhoucheng@sina.com