

# 宽波段超消色差聚焦光学系统设计

李玉瑶 王菲\* 车英

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 对激光光束参数进行测量时,为了解决聚焦光学系统对不同波长激光焦平面位置不同的问题,简化测量步骤,降低测量误差,设计了宽波段超消色差聚焦光学系统。依据波色差理论,推导了超消色差设计的初始结构求解方程组。应用光学设计软件 ZEMAX 设计了工作波段为 350~1100 nm 的超消色差光学系统,焦距为 250 mm,入瞳直径为 25 mm。给出了设计结果的纵向像差曲线和焦移曲线,经分析表明,采用该方法设计的光学系统,在 0.707 孔径处不同波长光线的球差曲线基本相交于一点,实现了超消色差;工作波段内的焦移仅为 38.2  $\mu\text{m}$ ,基本固定了焦平面的位置,满足了紫外至近红外波段激光光束参数的测量要求。

**关键词** 光学设计;超消色差;波色差;激光光束参数

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s116004

## Design of Superachromatic Focusing Optical System for Wide Spectrum

Li Yuyao Wang Fei Che Ying

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** When measuring the laser beam parameter, in order to solve the problem of different laser wavelengths have different focal positions for focusing optical system, simplify the measurement procedure and reduce the measurement error, the superachromatic focusing optical system for wide spectrum is designed. Based on the theory of wavefront chromatic aberration, the equations for the initial structure of the superachromatic system are derived. The superachromatic system is designed by the optical design software ZEMAX. It's waveband is 350~1100 nm, the focal length is 250mm and the entrance pupil diameter is 25 mm. The longitudinal aberration and the focal shift curve of design results are given. Analysis shows that the spherical aberration curves of different wavelengths at 0.707 aperture intersect at one point approximately, which achieve the superachromatic. The focal shift in the working waveband is only 38.2  $\mu\text{m}$ , and the focal plane position is fixed basically, which meets the measurement requirement of laser beam parameter from ultraviolet to near infrared.

**Key words** optical design; superachromatic; wavefront chromatic aberration; laser beam parameter

**OCIS codes** 080.3620; 140.3295; 220.1000

## 1 引 言

近年来,随着激光技术的不断发展及激光产品的不断涌现,对激光光束各种参数客观、精确、简便的测量提出了新的要求,科学地评价激光光束质量对激光技术的发展及高端激光产品的研发有着极其重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

目前,ISO 规定采用  $M^2$  因子对激光光束质量进行评价,而该方法测量中所采用聚焦光学系统对测量结果的准确性起决定作用<sup>[3]</sup>。以往的聚焦光学系统结构简单,校正像差的能力有限,对不同的激光光束焦平面位置不同。因此,每次测量不同激光波长的光束参数时,需要对聚焦光学系统的焦平面进

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 吉林省科技支撑计划(20100275,201101098)

作者简介: 李玉瑶(1982—),女,博士研究生,主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。

E-mail: liyuyao1983@163.com

导师简介: 车 英(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电测控技术方面的研究。E-mail: cheying@cust.com

\* 通信联系人。E-mail: feewang@163.com

行重新标定,测量步骤繁琐,易于引入测量误差。本文针对这种宽工作波段的光学系统,进行超消色差设计,使工作波段范围内不同波长的焦平面位置基本固定。

## 2 聚焦光学系统参数的确定

聚焦光学系统示意图如图 1 所示,  $f'$  为聚焦光学系统的焦距,  $\Delta l$  为采样间隔, 设入射到透镜上的光斑尺寸  $D$  为 2 mm, 则:

$$\tan \theta = \frac{D}{2f'} = \frac{1}{f'}, \quad (1)$$

$$\Delta l \cdot \tan \theta = \frac{\Delta l}{f'}. \quad (2)$$

接收器件采用像元尺寸为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$  的 1/3 inch CCD (1 inch = 2.54 cm), 当采样间隔  $\Delta l$  为 2 mm 时, 可以计算得到聚焦光学系统的焦距为  $f' = 250 \text{ mm}$ 。

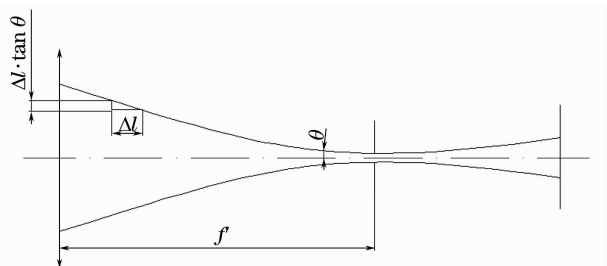


图 1 聚焦光学系统示意图

Fig. 1 Sketch map of focusing optical system

## 3 波差法超消色差的理论依据

用于激光光束参数测量的聚焦光学系统, 由于其光谱范围较宽, 仅对工作波段内的三种波长复消色差并不能满足高精度测量的要求, 需要对工作波段范围内所有波长  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$  的光均消色差<sup>[4-6]</sup>。

根据薄透镜理论, 假设光学系统中有  $i$  片透镜, 则光焦度的分配公式为:

$$\varphi = \sum \varphi_i = \sum (n_i - 1) \Delta \rho_i, \quad (3)$$

式中  $n$  为玻璃材料对主波长  $\lambda_0$  的折射率,  $\Delta \rho$  称为曲率差。

依据波色差理论, 将两种色光  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  在出瞳处两个波面间的波色差表示为

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{1}{2} \sum_1^k C_1 = -\frac{1}{2} \sum_1^k \frac{\varphi h^2}{v}, \quad (4)$$

式中  $C_1$  为初级位置色差分布系数,  $h$  为透镜的投射高度,  $v = (n - 1) / (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2})$ 。

结合(3)式和(4)式可以解出波像差与曲率差之

间的关系为

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta \rho_i (\delta n_{\lambda_1, \lambda_2})_i, \quad (5)$$

式中  $\delta n_{\lambda_1, \lambda_2} = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ 。

根据上式, 可以推广得到对多种波长消色差时, 每片透镜的光焦度  $\varphi$  与每片透镜的曲率差  $\Delta \rho$  之间的方程组:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{1}{f'} = \sum (n_i - 1) \Delta \rho_i, \\ W'_{\lambda_0, \lambda_1} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta \rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_1})_i = 0, \\ W'_{\lambda_0, \lambda_2} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta \rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_2})_i = 0, \\ \vdots \\ W'_{\lambda_0, \lambda_m} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta \rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_m})_i = 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $i = 1, 2, 3, 4$ 。

## 4 超消色差聚焦光学系统设计

在 350 ~ 1100 nm 的工作波段范围内, 选取中间波长  $\lambda_0 = 725 \text{ nm}$  作为主波长, 选取  $\lambda_1 = 350 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 600 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 850 \text{ nm}$  和  $\lambda_4 = 1100 \text{ nm}$  作为校正色差的典型波长。

在系统结构方面采用 4 片单透镜, 避免使用胶合元件, 以满足高功率激光光束参数测量的要求。从 SCHOTT 玻璃库中选用 FK51 作为第一块正透镜的玻璃材料, 以获得较小的曲率和入射角, 减小高级色差。其余三片透镜的玻璃材料依据初级色差的校正原则, 分别选择 LAKN22、F5 和 PK2, 查出每种玻璃材料对以上 4 种波长的折射率, 代入(6)式, 求得 4 片玻璃的光焦度  $\varphi$  与曲率差  $\Delta \rho$  如表 1 所示。

表 1 每片透镜的光焦度与曲率差

Table 1 Focal power and curvature difference of each lens

|       | $\varphi / \text{mm}^{-1}$ | $\Delta \rho / \text{mm}^{-1}$ |
|-------|----------------------------|--------------------------------|
| Lens1 | 0.014841                   | 0.030698                       |
| Lens2 | -0.012333                  | -0.019123                      |
| Lens3 | 0.00199                    | 0.003343                       |
| Lens4 | -0.000498                  | -0.00097                       |

将以上求得的初始结构输入光学设计软件 ZEMAX 中进行优化设计, 在保证主波长焦距的前提下, 需要对全孔径的球差和工作波段内各个波长在 0.707 孔径处的色差进行校正与平衡。通过批量添加操作数使结构参数自动优化设计, 得到设计结果的纵向像差曲线如图 2 所示, 给出了 355、532、632.8、808、980、1064 nm 6 种典型激光波长的纵向像差。在

0.707 孔径处 6 种波长的球差曲线基本交于一点, 实现了在工作波段范围内超消色差的设计。

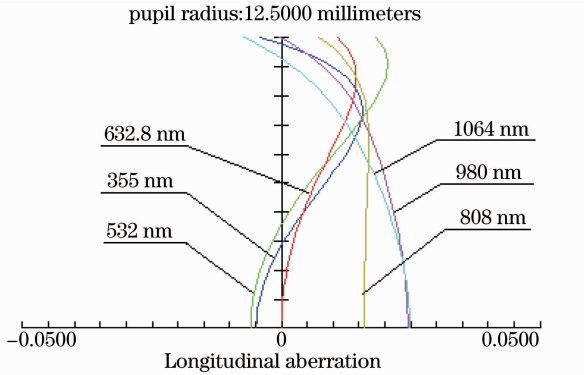


图 2 纵向像差曲线

Fig. 2 Longitudinal aberration curve

图 3 为焦移曲线, 在 350~1100 nm 波段内, 最大焦移为 38.2  $\mu\text{m}$ , 根据 (2) 式可计算出体现在 CCD 探测面上的光斑尺寸变化量为 0.1528  $\mu\text{m}$ , 远小于探测面的像元尺寸, 即焦平面基本不变。

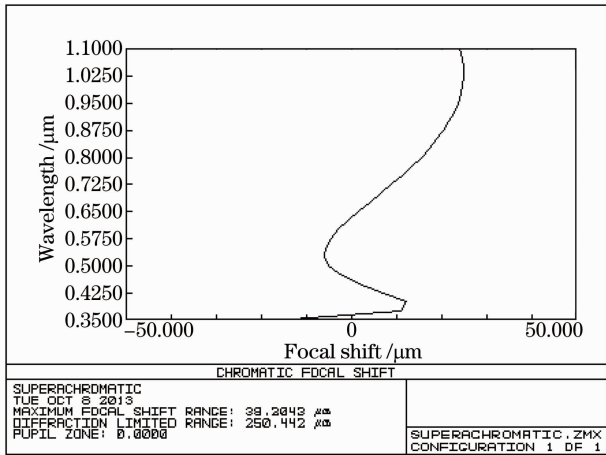


图 3 焦移曲线

Fig. 3 Focal shift curve

## 5 结 论

依据波像差理论, 结合激光光束参数测量用聚焦光学系统的特点, 推导出对多种波长同时消色差的超消色差光学系统初始结构求解方程, 应用光学设计软件 ZEMAX 对系统结构参数进行优化设计, 得到了满足测量激光光束参数要求的宽光谱超消色差光学系统, 使工作波段内不同波长的焦平面位置基本不变, 简化了测量步骤, 提高了测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Zhongxun, Pan Yiming, Yin Shaoyun, *et al.*. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222004.  
王仲勋, 潘一鸣, 尹韶云, 等. 长焦深、高分辨率激光加工聚焦透镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222004.
- 2 Gao Chunqing, Weber Horst. On the problems of the beam propagation factor  $M^2$ [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(2): 240-242.  
高春清, Weber Horst. 激光光束传输因子  $M^2$  的一些问题[J]. 光子学报, 2001, 30(2): 240-242.
- 3 Grebenschikov O A, Zalesskii V B, Naumov V V. Dual-beam laser analyzer for inhomogeneities in active regions of multielement photodetectors[J]. Applied Spectroscopy, 2006, 73(2): 313-316.
- 4 Liu Yingqi, Long Funian. Optical design of apochromatic objective of wide spectral and long focal[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 419-425.  
刘莹奇, 龙夫年. 宽光谱长焦距物镜的复消色差设计[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 419-425.
- 5 Rosete-Aguilar M. Correction of secondary spectrum using standard glasses[C]. SPIE, 1996, 2774: 378-386.
- 6 Liu Juanjuan, Guo Banghui, Wu Hongshen, *et al.*. Design of 300 ~ 1100 nm band-waveband optical system [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(10): 1766-1769.  
刘娟娟, 郭帮辉, 吴宏圣, 等. 300~1100 nm 宽波段光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1766-1769.

栏目编辑: 韩 峰