

# 基于激光光束质量测量的超消色差物镜设计

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** 在激光光束质量测量时,为了避免每次测量不同波长激光都要对聚焦透镜的焦平面位置进行标定,降低测量误差,研究和设计了覆盖紫外至近红外波段的超消色差物镜。基于波像差的理论,推导了超消色差物镜初始结构求解的方程组。应用光学设计软件Zemax设计了工作波段为350~1100 nm的宽光谱超消色差物镜,焦距为200 mm,入瞳直径为25 mm。给出了光学系统图、纵向像差曲线、焦移曲线及调制传递函数(MTF)曲线。设计结果表明,采用该方法设计的物镜,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26.3  $\mu\text{m}$ ,基本固定了焦平面的位置;在截止频率范围内的MTF均接近衍射极限,满足了紫外至近红外波段激光光束质量的测量要求。

**关键词** 光学设计;超消色差;波差法;激光光束质量;Zemax

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.012203

## Design of Superachromatic Lens Based on Laser Beam Quality Measurement

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 quality of different wavelengths, in order to avoid the calibration of focal plane position and reduce the measurement error, the superachromatic lens is researched and designed covering the ultraviolet to the near infrared band. Based on the theory of wave aberration, the equations for the initial structure of the superachromatic lens are derived. The superachromatic lens of wide spectral range is designed by the optical design software Zemax. Its waveband is 350~1100 nm, the focal length is 200 mm and the entrance pupil diameter is 25 mm. The structure of optical system, longitudinal aberration, focal shift curve and modulation transfer function (MTF) are given. Design results show that the spherical aberration curves of different wavelengths at 0.707 aperture intersect at one point approximately, achieving the superachromatism; the focal shift in the working waveband is only 26.3  $\mu\text{m}$ , and the focal plane position is fixed basically; the MTF is close to the diffraction limit in the range of cutoff frequency, meeting the measurement requirement of laser beam quality from ultraviolet to near infrared.

**Key words** optical design; superachromatism; waveaberration method; laser beam quality; Zemax

**OCIS Codes** 220.1000; 080.3620; 140.3295

## 1 引言

随着科学技术的发展,激光技术在国民经济建设中起到了举足轻重的作用。研究和测量激光的空间能量分布,给出激光光束质量客观、准确的测量结果,对激光技术的应用有着极其重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

激光光束质量测量仪器中的聚焦物镜对测量结果的准确性起到了决定性的作用。以往聚焦物镜采用单片的平凸透镜,校正像差的能力有限,每次测量不同波长的激光光束质量时,需要对聚焦物镜的焦平面位

收稿日期: 2013-09-29; 收到修稿日期: 2013-10-12; 网络出版日期: 2013-12-18

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

置进行标定,测量步骤繁琐,易于引入测量误差。对于像激光光束质量测量仪这类工作波段较宽的仪器,其中所采用的光学系统有必要进行超消色差设计。

对超消色差的研究目前主要采用特殊色散的光学材料,其缺点是价格昂贵、物理化学性能不稳定,且加工困难<sup>[3]</sup>。

本文以几何光学为依据,以波像差理论为基础,结合激光光束质量测量用聚焦物镜的特点,应用光学设计软件 Zemax,在波差法复消色差研究的基础上,设计了宽光谱超消色差物镜。同时,为了满足高功率激光光束质量测量的要求,在物镜的设计中避免了胶合元件的使用<sup>[4]</sup>。

## 2 基本理论

一般光学系统对工作波段两边缘的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  波长光消色差,而长焦距、宽光谱、高像质要求的光学系统在消色差的前提下,还需要使  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  光的公共像点与主波长  $\lambda_0$  光的像点重合,即复消色差<sup>[5-6]</sup>。对于激光光束质量测量仪用聚焦物镜,需要其对工作波段内任一激光波长的焦距相同,仅做到复消色差是不能满足要求的,应使各个波长  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$  的光均消色差,即超消色差。

光学系统的色差是由光学材料对不同波长光的折射率不同引起的,色差的校正与光焦度的分配有关。薄透镜的光焦度公式为

$$\varphi = (n - 1)\Delta\rho, \quad (1)$$

式中  $n$  为玻璃材料对主波长  $\lambda_0$  的折射率,  $\Delta\rho = (\rho_1 - \rho_2)$  称为曲率差,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为透镜前、后表面的曲率。

假设光学系统中有  $i$  片透镜,则光焦度的分配公式可写为

$$\phi = \sum \phi_i = \sum (n_i - 1)\Delta\rho_i. \quad (2)$$

根据波像差理论,对于轴上光而言,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  光在出瞳处两个波面之间的波色差为<sup>[7]</sup>

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{1}{2} \sum_1^k C_1 = -\frac{1}{2} \sum_1^k \frac{\phi}{v} h^2, \quad (3)$$

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

结合(1)式和(3)式可以解出波像差与曲率差之间的关系为

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta\rho_i (\delta n_{\lambda_1, \lambda_2})_i, \quad (4)$$

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

## 3 基于激光光束质量测量的超消色差物镜设计

### 3.1 技术要求

超消色差物镜的设计要求如下:

焦距:  $f' = 200$  mm; 入瞳直径:  $D = 25$  mm; 工作波段: 350~1100 nm。

### 3.2 物镜初始结构的求解

根据技术要求,采用四片单透镜,选取四种典型波长  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  进行消色差。假设系统中的透镜为密接薄透镜,根据(2)式和(4)式得到每片透镜的光焦度  $\varphi$  与每片透镜的曲率差  $\Delta\rho$  之间的方程组:

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f'} = \sum (n_i - 1)\Delta\rho_i \\ W'_{\lambda_0, \lambda_1} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta\rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_1})_i = 0 \\ W'_{\lambda_0, \lambda_2} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta\rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_2})_i = 0 \\ W'_{\lambda_0, \lambda_3} = -\frac{h^2}{2} \sum \Delta\rho_i (\delta n_{\lambda_0, \lambda_3})_i = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $i=1,2,3,4$ 。

在整个工作波段范围内,选取接收器量子效率较高且较常用的 He-Ne 激光器波长  $\lambda_0 = 632.8$  nm 作为主波长,并取  $\lambda_1 = 350$  nm,  $\lambda_2 = 800$  nm 和  $\lambda_3 = 1100$  nm。

在玻璃的选择方面,为了减小高级像差,得到较小的曲率和入射角,在 Schott 玻璃库中选择色散较小的 FK51 作为第一块正透镜的玻璃材料,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 LAK9、KZFN2 和 BAK2,查出每种玻璃材料对以上四种波长的折射率,代入(5)式,求得四片玻璃的光焦度  $\varphi$  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

	Lens1	Lens2	Lens3	Lens4
$\varphi / \text{mm}^{-1}$	0.018676	-0.014194	0.000972	-0.000454
$\Delta\rho / \text{mm}^{-1}$	0.03848	-0.025046	0.001217	-0.000712

### 3.3 物镜设计结果

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,得到的光学系统结构如图 1 所示。系统结构简单,由四片单透镜组成,避免了使用胶合元件对高功率激光光束质量测量的限制。



图 1 超消色差物镜光学系统结构

Fig.1 Structure of the superachromatic lens optical system

图 2 为纵向像差曲线,给出了 355, 532, 632.8, 808, 980, 1064 nm 六种典型激光波长的纵向像差。可以看出,632.8 nm 主波长光线在全孔径处剩余球差仅为 0.53  $\mu\text{m}$ ,在 0.707 孔径处六条谱线的曲线基本交于一点,实现了在工作波段范围内超消色差的设计。

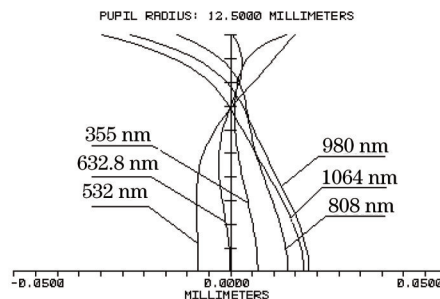


图 2 超消色差物镜纵向像差

Fig.2 Longitudinal aberration of the superachromatic lens

图 3 为焦移曲线,在 350~1100 nm 波段内,最大焦移为 26.3  $\mu\text{m}$ ,其体现在 CCD 探测面上的光斑变化为 0.1315  $\mu\text{m}$ ,远小于探测面的像素尺寸,即焦平面基本不变。

图 4 为调制传递函数(MTF)曲线,在整个截止频率范围内的 MTF 均接近理论衍射极限,设计结果满足要求。

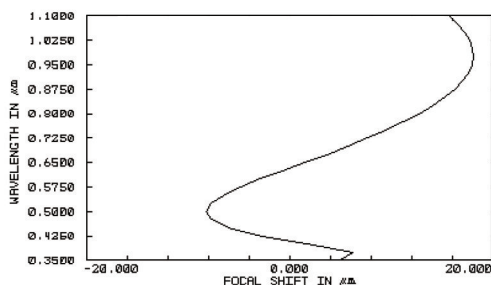


图 3 超消色差物镜焦移曲线

Fig.3 Focal shift curve of the superachromatic lens

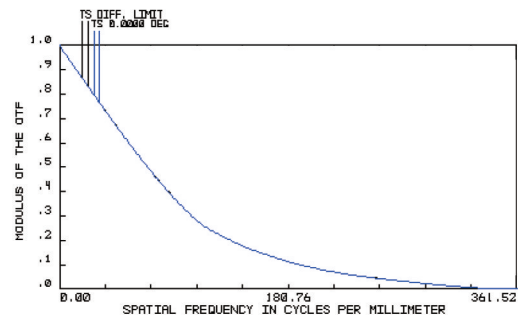


图 4 超消色差物镜调制传递函数曲线

Fig.4 MTF curve of the superachromatic lens

## 4 结 论

结合激光光束质量测量用聚焦物镜的特点,依据波差法理论,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,对初始结构进行优化设计,得到了满足测量激光光束质量要求的超消色差物镜。同时,为了满足高功率激光光束质量测量的要求,在物镜的设计中避免了胶合元件的使用。

### 参 考 文 献

- 1 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408001.  
贺元兴, 李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408001.
- 2 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.
- 3 Marek Zajac, Jerzy Nowak. Correction of chromatic aberration in hybrid objectives[J]. Optik, 2002, 113(7): 299-302.
- 4 Jia Yong, Gao Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022003.  
贾 勇, 高云国. 反射式激光扩束器的切换变倍技术[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022003.
- 5 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.
- 6 Rosete-Aguilar M. Correction of secondary spectrum using standard glasses[C]. SPIE, 1996, 2774: 378-386.
- 7 Li Yuyao, Tang Yong, Lin Zhaoheng, *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3183-3185.  
李玉瑶, 唐 勇, 林昭珩, 等. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3183-3185.