

光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计

马敬^{1,3}, 齐月静^{2,3}, 卢增雄^{2,3*}, 苏佳妮², 杨光华^{2,3}, 齐威², 张清洋², 陈进新²

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

³中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 根据光谱共焦位移传感器的工作原理及线性轴向色散条件, 选择 3 种色散物镜用玻璃材料 N-KZFS11、N-SF66 和 N-PK52A, 并结合像差理论设计了由 3 个单透镜和 2 个双胶合透镜组合成的线性色散物镜初始结构。利用 Zemax 光学设计软件对色散物镜的初始结构进行优化和公差分析。结果表明: 在 450~650 nm 波长范围内, 各波长弥散斑均远小于艾里斑, 色散物镜测量范围可达 1.05 mm, 轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 达 0.997, 理论分辨率可达 105 nm。

关键词 光学设计; 光谱共焦位移传感器; 色散物镜; 线性度; 公差分析

中图分类号 TH741; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704009

Design of Linear Dispersive Objective for Chromatic Confocal Displacement Sensor

Ma Jing^{1,3}, Qi Yuejing^{2,3}, Lu Zengxiong^{2,3*}, Su Jiani², Yang Guanghua^{2,3},
Qi Wei², Zhang Qingyang², Chen Jinxin²

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, the working principle of the chromatic confocal displacement sensor and the conditions of linear axial dispersion were applied for the optimal selection of three kinds of glass materials, namely N-KZFS11, N-SF66, and N-PK52A, which were combined with the theory of aberration to design the initial structure of a linear dispersive objective composed of three single lenses and two double cemented lenses. Then, the Zemax software was used to optimize the initial structure of the dispersive objective and analyze its tolerance. The results indicate that within the wavelength range from 450 nm to 650 nm, the blur spot at each wavelength is much smaller than the Airy spot. The measurement range of the dispersive objective is up to 1.05 mm, the linear determination coefficient R^2 between the axial dispersion and wavelength is 0.997, and the theoretical resolution could reach 105 nm.

Key words optical design; chromatic confocal displacement sensor; dispersive objective; linearity; tolerance analysis

OCIS codes 220.3620; 180.1790; 110.4234; 280.4788

1 引言

光栅横向剪切干涉法是测量光刻投影物镜波像差的重要方法^[1-2], 在该方法中, 剪切光栅和探测器之间的倾斜量是影响波像差测量精度的重要因素, 需采用位移传感器对二者之间的夹角进行精密测量

和标定。相比于其他位移传感器^[3-6], 光谱共焦位移传感器具有对被测表面材料、纹理、粗糙度等要求低, 测量精度高和抗杂散光能力强等优点^[7-8], 更适合用于剪切光栅与探测器之间夹角的精密测量。

色散物镜是光谱共焦位移传感器的核心部件, 国内外学者围绕其设计开展了一些研究工作。

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-01-29; 录用日期: 2019-02-18

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02205-007)

* E-mail: lzengx103@163.com

Pruss 等^[9]以氙灯(450~700 nm)为光源,采用衍射元件作为色散元件,设计了色散范围为 0.74 mm 的色散物镜,但衍射元件的球差较大且校正困难。Miks 等^[10]详细推导了线性轴向色散的理论公式,但未实际设计色散物镜。朱万彬等^[11]采用一个单透镜和一个双胶合透镜的结构设计了色散物镜,其色散范围为 1.173 mm,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 为 0.9859,理论分辨率只有 3 μm 。刘乾等^[12]采用正负透镜组分离结构设计了色散范围为 1 mm、理论分辨率优于 0.5 μm 的色散物镜,但其轴向色散与波长之间的相对非线性度为 4.6%,会对测量系统的分辨率和精度产生较大影响。田雨等^[13]采用由两种玻璃材料组成的 4 个单透镜结构,设计了轴向色散与波长之间线性判定系数 R^2 为 0.9972 的色散物镜,但其色散范围仅约为 0.15 mm。武芑樾等^[14]采用 4 片密接透镜的形式,设计了轴向色散与波长之间线性判定系数 R^2 为 0.952 的色散物镜,其色散范围仅约为 0.091 mm。为了满足剪切光栅及探测器之间夹角精密测量的需求,色散物镜的测量范围需要达到毫米量级,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 需要优于 0.995,理论分辨率需要优于 200 nm。为此,需对色散物镜中的镜片材料及其组合、物镜的结构参数等进行优化。

本文首先根据光谱共焦位移传感器的工作原理及线性轴向色散条件,对色散物镜的玻璃材料进行选择,并结合像差理论对色散物镜的初始结构进行设计;然后,根据像质和轴向色散与波长的线性度要求,在 Zemax 光学设计软件中对色散物镜的初始结构进行优化和公差分析。

2 基本原理

2.1 光谱共焦位移传感器的工作原理

光谱共焦位移传感器的工作原理如图 1 所示。白光光源发出的宽光谱光束通过 1×2 光纤耦合器进入色散物镜,由于轴向色散的作用,波长为 λ_0 、 λ_1 和 λ_2 的光在色散物镜光轴的不同位置处依次会聚,会聚光经位于波长 λ_1 会聚点处的被测面反射后,被色散物镜聚焦在 1×2 光纤耦合器端面,波长为 λ_1 的光的聚焦光斑最小,耦合入 1×2 光纤耦合器的光的能量最大,在光谱仪上表现出最强的峰。因此,光谱仪上光谱的峰值波长与被测面的位置间建立了一一对应关系。在图 1 中: λ_{max} 为峰值波长; $I(\lambda)$ 为波长的光强; $\Delta\lambda$ 为光谱曲线的半峰全宽。色散物镜决定了不同波长的分开程度,即轴向色散的大小或测量范围的大小,而轴向色散与波长之间的线性度对测量系统的分辨率和精度将产生较大影响。

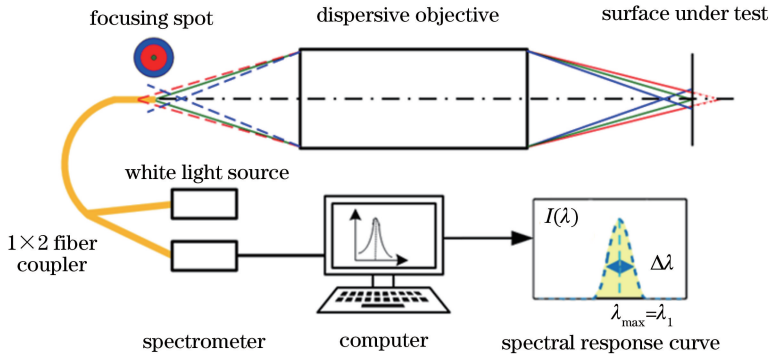


图 1 光谱共焦位移传感器的工作原理

Fig. 1 Working principle of chromatic confocal displacement sensor

2.2 线性轴向色散条件

给定色散大小及光焦度要求后,为了保证轴向色散与波长之间的线性度,由 N 个透镜组成的色散物镜需满足以下 3 个条件^[10]:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{di}}{\nu_{di}} = \frac{-\delta s'_{CF}}{f'^2(1-m)^2}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{di}}{\nu_{di}} R_{\lambda i} = 0, \quad (3)$$

式中: φ 为色散物镜的光焦度; φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; N 为透镜个数; φ_{di} 和 ν_{di} 分别为第 i 个透镜在 d 波长处的光焦度和阿贝数; $\delta s'_{CF}$ 为色散物镜在 C 波长和 F 波长之间的色差(即轴向色散); f' 和 m 分别为色散物镜的焦距和横向放大倍率; $R_{\lambda i}$ 为玻璃材料的色散系数。

3 光学设计

根据光谱共焦位移传感器的工作原理及线性轴向色散条件进行色散物镜的设计,色散物镜的工作波长 λ 为 450~650 nm,中心波长处像方数值孔径 NA 为 0.25,像方焦距 f' 为 30 mm,横向放大倍率 m 为 -1。要求轴向色散 $\delta s'_{CF} \geq 1$ mm,轴向色散与波长之间的线性判定系数 $R^2 \geq 0.995^{[11]}$ 。为此,需要先进行色散物镜玻璃材料的选择,并结合像差理论设计色散物镜的初始结构,在 Zemax 像质优化的同时控制轴向色散与波长之间的线性关系。

3.1 玻璃材料的选择

选用肖特玻璃作为色散物镜的玻璃材料,其色散系数 $R_{\lambda i}$ 恒小于 0。由(3)式可知:当色散物镜的

光焦度 $\varphi > 0$ 时,必须使用正负透镜组合的方式,且正透镜选用阿贝数大的玻璃,负透镜选用阿贝数小的玻璃。通常,组合透镜的玻璃种类越多,越容易得到高线性度的色散^[15],但如果使用三种以上的玻璃材料,会使组合数过多,导致成本增加。因此,选择三种合适的玻璃材料用于色散物镜。

在保证轴向色散大小的前提下,通过选择合适的玻璃材料得到满足线性轴向色散条件的材料组合,表 1 给出了其中的 5 种组合。在光焦度分配过程中,单个透镜光焦度过大会导致透镜的曲率增大、球差增大。因此,单个透镜的光焦度一般不超过组合光焦度的 5 倍^[16]。综合考虑上述因素,选择表 1 中的组合 1,即选用 N-KZFS11、N-SF66 和 N-PK52A 三种材料,其光学参数如表 2 所示。

表 1 满足线性轴向色散条件的玻璃材料组合

Table 1 Combinations of glass materials that satisfy linear axial dispersion condition

Parameter	Combination 1 (N-KZFS11, N-SF66,N-PK52A)	Combination 2 (N-KZFS11,N-PK51, N-SF66)	Combination 3 (N-KZFS11, N-PK52A,N-SF66)	Combination 4 (N-KZFS11, N-PK51A,N-SF66)	Combination 5 (KZFS12,N-PK52A, N-SF66)
φ_1	0.1040	0.1040	0.1020	0.1080	0.1080
φ_2	-0.0367	-0.0347	-0.0347	-0.0367	-0.0247
φ_3	-0.0340	-0.0360	-0.0360	-0.0380	-0.0500
$\delta s'_{CF}$	1.0065	1.0000	1.0104	1.0532	1.0049
$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{di}}{\nu_{di}} R_{\lambda i}$	0.000000009	0.000000172	0.000000602	0.000000619	0.000000766

表 2 组合 1 的玻璃参数

Table 2 Glass parameters in combination 1

Material	N-KZFS11	N-SF66	N-PK52A
Refractive index	1.6377	1.9229	1.4970
Abbe number	42.41	20.88	81.61
Optical power	0.1040	-0.0367	-0.0340

3.2 初始结构设计

与一般成像镜头需要严格校正色差不同,色散物镜需要产生尽可能大的轴向色差。由(2)式可知正透镜产生负色散,负透镜产生正色散。因此,当使用正负透镜组进行组合时,将负透镜组放置在靠近光源一侧产生正色散,将正透镜组放置在远离光源一侧产生负色散,正色散减去负色散就可得到更大的正色散。

色散物镜仅对轴上的点成像,故不需考虑轴外点的像差。轴上点的单色光球差会使像面上的光斑尺寸变大,导致光谱响应曲线变宽,分辨率降低,故需要进行严格校正。在原光学元件的数值孔径和光焦度保持不变的情况下,若通过平分光焦度将单个光学元件拆分成 4~5 个光学元件,则球差可缩小到原来单个透镜时的 10%~15%^[17]。此外,双胶合透镜由于胶合面两边玻璃的折射率不同,也可有效减

小球差。因此,将拆分的透镜相互组合成双胶合透镜来校正球差。

将表 2 中具有正光焦度的 N-KZFS11 透镜拆分成 3 片正透镜,将 N-SF66 透镜和 N-PK52A 透镜均拆分成 2 片透镜,并且将 2 个负透镜(N-SF66、N-PK52A)及 1 个正透镜(N-KZFS11)组成负透镜组,而将两个双胶合透镜(N-SF66 和 N-KZFS11、N-KZFS11 和 N-PK52A)组成正透镜组。同时,考虑到半径、口径和厚度等结构因素的合理性,最终设计出的色散物镜的初始结构如图 2 所示,由 3 个单透镜和 2 个双胶合透镜共 7 片镜片组成。各镜片参数如表 3 所示。

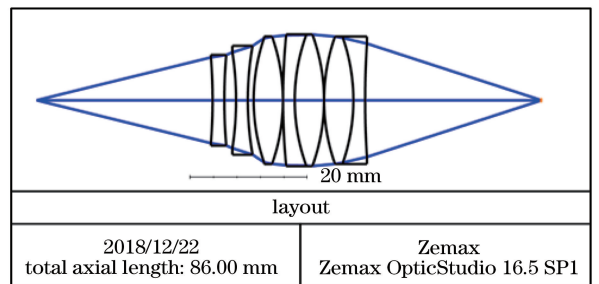


图 2 色散物镜的初始结构

Fig. 2 Initial structure of dispersive objective

表 3 色散物镜的镜片参数

Table 3 Lens parameters for each dispersive objective

Lens number	Glass	Optical power	Radius of front surface /mm	Radius of back surface /mm	Thickness /mm
1	N-SF66	-0.0183	-101.158	101.158	2
2	N-PK52A	-0.0170	-58.801	58.801	2
3	N-KZFS11	0.0347	35.790	-35.790	5
4	N-SF66	-0.0183	127.147	35.790	2
5	N-KZFS11	0.0347	35.790	-35.790	5
6	N-KZFS11	0.0347	35.790	-35.790	5
7	N-PK52A	-0.0170	-35.790	162.592	2

3.3 Zemax 优化

在 Zemax 光学设计软件中对上述初始结构进行优化。为了保证轴向色散和波长之间的线性度及像质,使用 AXCL 操作数控制轴向色差及其线性度,使用 LONA 操作数控制球差,在 450~650 nm 范围内等间隔设置 11 个波长进行优化,并将各波长对应的近轴焦点点列图作为评价函数。优化后的最终结构如图 3 所示,中心波长处像方 NA 为 0.2425,像方焦距 f' 为 28.9964 mm。对各波长聚焦位置进行局部放大,结果如图 4 所示,各波长的焦点点在光轴上依次呈等间隔排列。

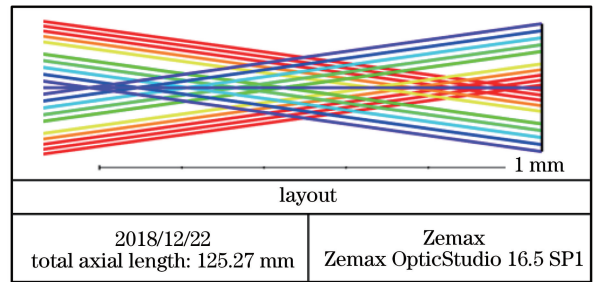


图 4 色散范围的局部放大图

Fig. 4 Partial enlargement of dispersion range

波长 450,550,650 nm 处的点列图和球差曲线分别如图 5 和图 6 所示。各波长在其相应聚焦位置处光斑的均方根 (RMS) 半径均小于艾里斑半径。450,550,650 nm 波长下的最大球差分别为 1.829, 0.927, 1.400 μm ,均满足色散物镜的设计要求。

采用最小二乘法对轴向色散和波长进行线性拟合,结果如图 7 所示。色散物镜的轴向色散为 1.05 mm,线性判定系数 R^2 为 0.997,灵敏度 $S = 1050 / (650 - 450) = 5.25 \mu\text{m} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。配合分辨率为 0.02 nm 的 HR4000 光谱仪,光谱共焦位移传感器的理论分辨率可达 105 nm,满足设计要求。

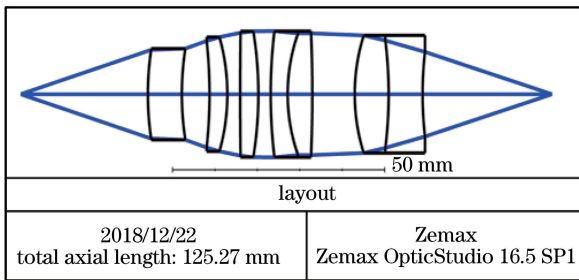


图 3 优化后的色散物镜结构

Fig. 3 Structure of dispersive objective after optimization

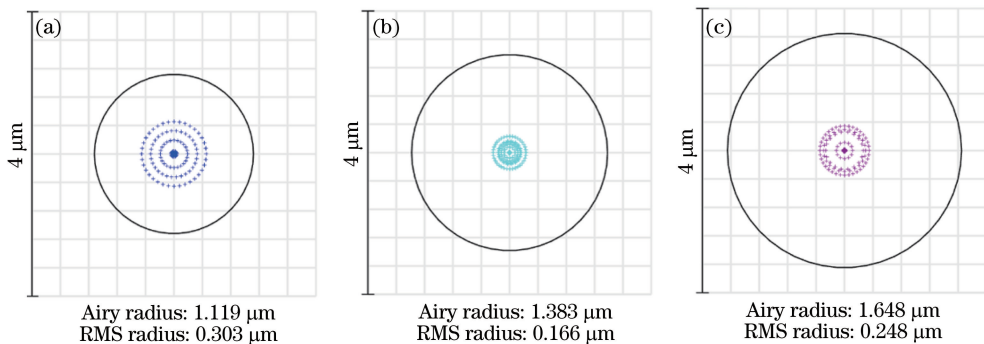


图 5 各波长下的点列图。(a) 450 nm;(b) 550 nm;(c) 650 nm

Fig. 5 Scatter diagram at each wavelength. (a) 450 nm; (b) 550 nm; (c) 650 nm

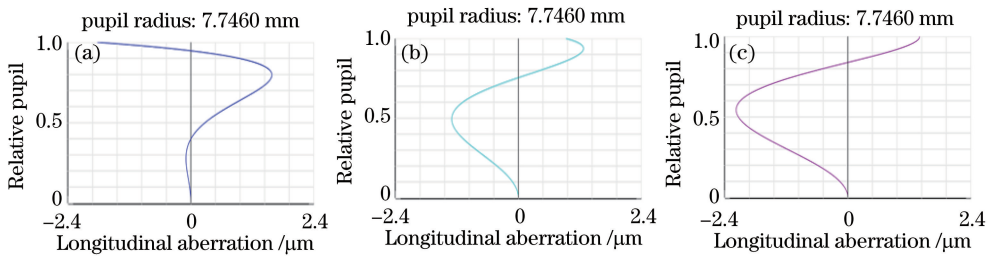


图 6 各波长下的球差曲线。(a) 450 nm; (b) 550 nm; (c) 650 nm

Fig. 6 Curve of spherical aberration at each wavelength. (a) 450 nm; (b) 550 nm; (c) 650 nm

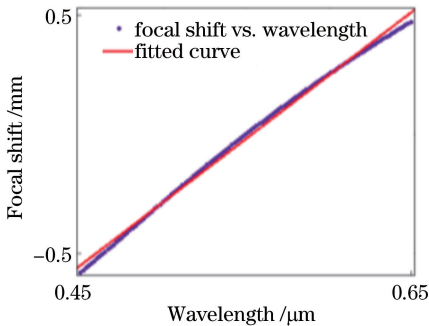


图 7 波长-焦移拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of wavelength-focus shift

3.4 公差分析

为了保证色散物镜加工和装配后的像质以及轴向色散与波长间的线性度,需要对上述优化后的色散物镜进行公差分析。本节将分析色散物镜公差对各波长下点列图半径以及轴向色散与波长间线性度的影响。色散物镜公差分配结果如下。

玻璃材料公差:折射率公差为 0.0002,阿贝数公差为 1%。

表面形位公差:单透镜 1 前后表面的各项公差较敏感,应适当收紧,其半径公差为 0.025%,厚度公差为 0.04 mm,表面不规则度公差为 0.17 个光圈,表面偏心公差为 0.005 mm,表面倾斜公差为 0.001°;其他对公差敏感的面,可适当放松公差要求,即半径公差为 0.1%,厚度公差为 0.05 mm,表面不规则度公差为 0.25 个光圈,表面偏心公差为 0.01 mm,表面倾斜公差为 0.01°。

镜片位置公差:3 个单透镜的偏心公差为 0.0254 mm,镜片倾斜公差分别为 0.04°、0.05°、0.05°。单透镜 4 和 5、6 和 7 分别构成双胶合透镜 1 和 2,其偏心公差分别为 0.01 mm 和 0.009 mm,镜片倾斜公差分别为 0.02°和 0.05°。

3.4.1 公差对各波长点列图半径的影响

使用蒙特卡罗分析方法,以各波长下点列图的半径作为评价标准,要求采样比率在 90% 以内的各

波长下点列图的半径小于艾里斑半径,结果如表 4 所示,可见上述各项公差符合设计要求。

表 4 蒙特卡罗分析结果

Table 4 Results of Monte Carlo analysis

Wavelength / μm	Radius of Airy spot / μm	Less than 90% of spot radius in Monte Carlo analysis / μm
0.45	1.138	1.09199
0.47	1.189	1.12103
0.49	1.240	1.19069
0.51	1.290	1.12016
0.53	1.341	1.17195
0.55	1.391	1.17152
0.57	1.442	1.26518
0.59	1.493	1.13704
0.61	1.543	1.16347
0.63	1.594	1.22053
0.65	1.644	1.20372

3.4.2 公差对轴向色散与波长线性度的影响

采用蒙特卡罗分析方法,并使用 ZPL 宏语言编写评价函数,计算轴向色散与波长间的线性度,结果如图 8 所示,线性判定系数 R^2 的最小值为 0.9961。可见,引入公差后,线性判定系数 R^2 均大于 0.995,满足设计要求。

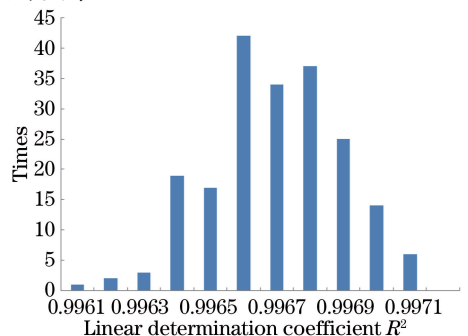


图 8 线性判定系数的分布直方图

Fig. 8 Histogram of linear determination coefficient distributions

4 结 论

根据光谱共焦位移传感器工作原理及线性轴向色散条件,选择 N-KZFS11、N-SF66 和 N-PK52A 三种色散物镜用玻璃材料,并结合像差理论设计出了由 3 个单透镜和 2 个双胶合透镜组成的线性色散物镜初始结构。利用 Zemax 光学设计软件对色散物镜的初始结构进行优化和公差分析,结果表明:在 450~650 nm 波长范围内,各波长光斑均远小于艾里斑;在 450, 550, 650 nm 处的最大球差分别为 1.829, 0.927, 1.400 μm ;色散物镜测量范围可达 1.05 mm,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 可达 0.997,镜头灵敏度为 5.25 $\mu\text{m}\cdot\text{nm}^{-1}$;配合分辨率为 0.02 nm 的光谱仪,光谱共焦位移传感器的理论分辨率可达 105 nm。

参 考 文 献

- [1] Fang C, Xiang Y, Qi K Q. Grating lateral shearing interferometry for suppressing zero-order crosstalk [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0504002.
方超, 向阳, 齐克奇. 抑制零级串扰的光栅横向剪切干涉测量[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0504002.
- [2] van de Kerckhof M A, Boeij W D, Kok H, *et al.* Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5377: 1960-1971.
- [3] Chang X N, Yao Y, Yan L. The development and investigation of displacement sensor [J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(9): 42-44.
昌学年, 姚毅, 闫玲. 位移传感器的发展及研究[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(9): 42-44.
- [4] Zhu Z T, Pei W D, Li Y, *et al.* Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031002.
朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031002.
- [5] Wang D P, Jin X, Zhou W J, *et al.* Nonlinear error calibration method for capacitive displacement sensor based on laser interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101203.
王大鹏, 金星, 周伟静, 等. 基于激光干涉的电容量位移传感器非线性误差标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101203.
- [6] Xu J. Method for analysis of dual frequency laser interference mainly instrument system of linear measurement error sources and error reduction [J]. Metrology & Measurement Technique, 2013, 40(8): 39-40.
徐建. 双频激光干涉仪系统线性测量误差主要来源及减小误差的方法分析[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(8): 39-40.
- [7] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor [J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3259-3264.
- [8] Ruprecht A K, Pruss C, Tiziani H J, *et al.* Confocal micro-optical distance sensor: principle and design [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5856: 128-136.
- [9] Pruss C, Ruprecht A, Korner K, *et al.* Diffractive elements for chromatic confocal sensors [J]. DGaO Proceedings, 2005: 106-107.
- [10] Miks A, Novak J, Novak P. Theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5945: 59450Y.
- [11] Zhu W B, Zhong J, Mo R Y, *et al.* Design of spectral confocal chromatic displacement sensor objective [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8): 62-66.
朱万彬, 钟俊, 莫仁芸, 等. 光谱共焦位移传感器物镜设计[J]. 光电工程, 2010, 37(8): 62-66.
- [12] Liu Q, Wang Y, Yang W C, *et al.* Chromatic confocal microscope with linear dispersive objective [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 52-57.
刘乾, 王洋, 杨维川, 等. 线性色散设计的光谱共焦测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 52-57.
- [13] Tian Y, Liu B. Design of dispersion lens for chromatic confocal displacement sensor [J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 381-384.
田雨, 刘宾. 光谱共焦位移传感器色散镜头设计[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 381-384.
- [14] Wu P Y, Yuan D C. Research of design of lenses used for chromatic confocal displacement sensor [J]. Tool Engineering, 2012, 46(2): 81-83.
武芃越, 袁道成. 光谱共焦位移传感器镜头设计研究[J]. 工具技术, 2012, 46(2): 81-83.
- [15] Liu Q, Yang W C, Yuan D C, *et al.* Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2473-2479.
刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2473-2479.
- [16] Liu Q, Yang W C, Yuan D C, *et al.* Optimization

and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 111-117.
刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜中色散

物镜材料的优化选择 [J]. *光电工程*, 2012, 39(8): 111-117.

[17] Fischer R E. *Optical system design* [M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2004: 63-68.