

# 光学镜面间隔测量中的色散研究

郭帮辉<sup>1,2</sup> 李明<sup>1</sup> 孙强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 材料的色散会影响镜面间隔的测量精度,为了提高光学干涉法测量镜面间隔的精度,对材料色散效应进行理论分析和数值仿真,分别对LAK9、ZF6、H-ZF2、BAK7、K9光学玻璃进行仿真测试,得到了干涉信号峰值偏移量关系式,信号峰值偏移量与材料的一阶色散系数成正比。为了验证该关系式的正确性,搭建了一个镜面间隔测量实验平台,实验测量得到的干涉信号最大值偏移量与仿真测试结果的相对误差小于2%,考虑到实验过程中的误差因素,证明仿真测试得到的结果是正确的。

**关键词** 光学系统; 光学干涉; 色散; 镜面间隔; 光学装调; 镜面间隔测量; 短相干

**中图分类号** TN23; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.061204

## Research of Dispersion in Measurement of Optical Lens Gap

Guo Banghui<sup>1,2</sup> Li Ming<sup>1</sup> Sun Qiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The dispersion of optical material influences the accuracy of lens gap measurement. In order to improve the accuracy of lens gap measurement, the effect of optical material dispersion is investigated by the theoretical analysis and numerical simulations. An expression of interference signal offset is obtained by numerical simulation for materials of LAK, ZF6, H-ZF2, BAK7 and K9, with the offset proportional to the first order dispersion coefficient of optical material. An experimental platform is set up to verify the simulation result, and it is shown that the relative error of interference signal offset between the experimental and simulation results is below 2%. Considering various error factors in the experiment, the relative error of 2% is reasonable and the obtained expression via simulations is correct.

**Key words** optical systems; optical interference; dispersion; lens gap; optical alignment; measurement of lens gap; partial coherence interferometry

**OCIS codes** 120.4820; 260.3160; 260.2030; 220.1140

## 1 引言

光学镜面之间的间隔是光学系统的重要结构参数,影响光学系统的综合性能<sup>[1-5]</sup>,因此,在装调过程中,必须按照镜片安装图纸的公差要求,严格控制光学镜面之间的间隔。

目前,在光学镜头装配中,广泛使用高度尺来测量光学镜面之间的间隔,测量镜片安装前后的高度差,减去最上方的镜片中心厚度,即为最上方两镜片的空气间隔。这种测量方法属于机械测量法,其缺点是高度尺的测量头与镜面接触,容易划伤镜片,而且测量精度不够高,无法满足高精度镜头装调要求。

近年来,利用光学干涉原理进行镜面间隔测量的仪器,已经用于光学镜头的装配过程中<sup>[6-9]</sup>,这种测量方法的优点是非接触式测量和测量精度高。但是,被测镜片材料的色散效应会对该测量方法的测量精度产生影响。

收稿日期: 2013-12-23; 收到修改稿日期: 2014-01-20; 网络出版日期: 2014-05-20

基金项目: 吉林省科技厅发展计划项目(20125092)、中国科学院院地合作项目(2011CJT0004)

作者简介: 郭帮辉(1983—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事精密光电测量系统方面的研究。

E-mail: gbhycl@163.com

导师简介: 孙强(1972—),男,博士,研究员,主要从事精密光电测量系统、红外成像系统等方面的研究。

E-mail: sunqiang\_skla@yahoo.com.cn

本文对采用光学干涉原理的镜面间隔测量方法进行研究,对材料色散效应进行理论分析和数值模拟,得到镜面间隔与材料色散之间的关系式,能够用于指导光学干涉法测量镜面间隔仪器的研制。

## 2 镜面间隔测量原理

采用光学干涉原理的光学镜片表面间隔测量系统如图1所示,短相干光源超辐射发光二极管(SLD)输出的光束经光学聚焦镜头之后变为会聚光束,被分光棱镜分为两路,其中测量臂光束到达被测光学镜片的表面并被反射后,沿原路逆向返回;另一路参考臂光束到达反射镜的表面被反射之后,也沿原路逆向返回;这两路反射回来的光束再次到达分光棱镜,经过光学聚焦镜头,会聚在探测器靶面。在测量过程中,参考臂的反射镜沿着光栅尺进行直线扫描,分析探测器输出信号的幅值,找到最大幅值点,即为相干最大值。利用参考臂的高精度光栅尺就可以对被测镜面顶点进行定位。相邻两个相干最强的点分别对应相邻两个镜面顶点,通过光栅尺读出参考臂位移量,即为这两个镜面顶点之间的空气间隔。如果两个镜面之间是玻璃介质,不考虑玻璃色散的影响,则该镜片的厚度等于参考臂位移量和玻璃介质折射率的比值。

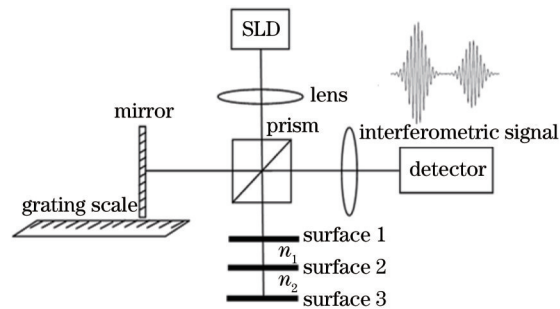


图1 镜片间隔测量结构图

Fig.1 Structure of optical lens gap measurement system

选用的短相干光源 SLD 的光谱曲线如图2所示,其光谱曲线近似高斯分布,峰值波长为 1310 nm,光谱半峰全宽为 42 nm。高斯型短相干光源的相干长度为<sup>[10-11]</sup>

$$l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\delta\lambda}, \quad (1)$$

式中  $l_c$  为相干长度,  $\lambda_c$  为光源中心波长,  $\delta\lambda$  为光源光谱半峰全宽。由(1)式计算可得,此短相干光源 SLD 的相干长度为 18.02  $\mu\text{m}$ 。相干信号如图3所示,横坐标表示测量臂与参考臂之间的光程差,纵坐标表示干涉信号相对强度。由短相干光源 SLD 产生的相干信号是经过幅值调制的信号,不考虑介质色散的情况下,测量臂和参考臂的光程差为 0 时,相干信号强度最大,可以用此时参考臂中反射镜的位置来表示测量臂中的对应镜面的位置。

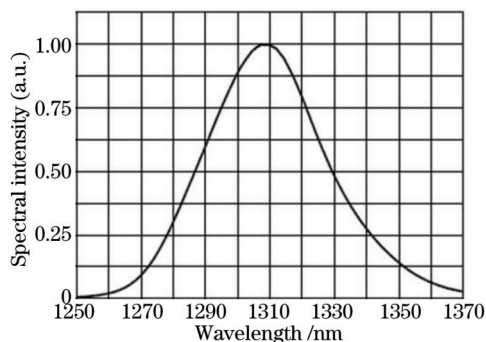


图2 SLD 光源光谱曲线

Fig.2 Spectral curve of SLD light source

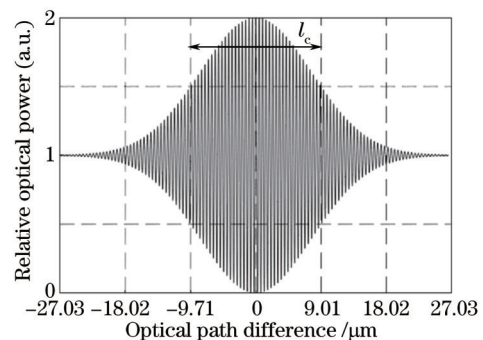


图3 中心波长为 1310 nm,半峰全宽为 42 nm 的 SLD 光源产生的相干信号

Fig.3 Interference signal of SLD light source with central wavelength of 1310 nm and half peak width of 42 nm

## 3 材料色散理论分析

由于玻璃材料的色散效应和所用的短相干光源,导致测量中不同波长的光有不同的光程。因此利用光

学干涉的原理来测量镜片厚度时,必须考虑玻璃材料的色散效应,如图4所示。被测透镜厚度是 $h$ ,短相干光源的中心波长是 $\lambda_c$ ,第一个镜面对应参考臂的 $z_1$ 位置。可以看出,光程差为0时,不同的波长对应参考臂中的反射镜位置都不一样,在中心波长处,第二个镜面对应参考臂的 $z_2$ 位置,考虑玻璃材料的色散效应,干涉信号峰值点与 $z_2$ 之间的距离是 $\Delta z$ 。如果不考虑玻璃材料的色散效应,从测量原理上产生的镜面间隔测量系统误差是 $\Delta z/n(\lambda_c)$ , $n(\lambda_c)$ 是被测镜面之间介质的中心波长处的折射率。

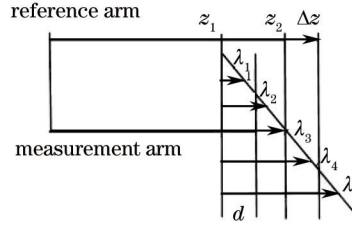


图4 光学材料色散示意图

Fig.4 Dispersion diagram of optical material

假设参考臂和测量臂返回的光强度相等,并且其光谱强度满足高斯分布。参考臂波动方程为

$$E_1(\lambda) = \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos[2k(z_2 + \Delta z) - \omega t], \quad (2)$$

式中 $k$ 为波数, $\omega$ 为角频率。测量臂波动方程为

$$E_2(\lambda) = \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos[2n(\lambda)kh - \omega t], \quad (3)$$

式中 $n(\lambda)$ 为玻璃材料折射率, $h$ 为镜片厚度。

$$n(\lambda) = n(\lambda_c) + \frac{dn}{d\lambda}(\lambda - \lambda_c), \quad (4)$$

式中 $\frac{dn}{d\lambda}$ 为玻璃材料的一阶色散系数。两臂合成光强

$$I = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} [E_1(\lambda) + E_2(\lambda)]^2 d\lambda = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \left\{ \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos\left[2\frac{2\pi}{\lambda}(z_2 + \Delta z) - \omega t\right] + \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos\left[2n(\lambda)\frac{2\pi}{\lambda}h - \omega t\right] \right\}^2 d\lambda, \quad (5)$$

式中 $z_2 = 2n(\lambda_c)h$ 。对(5)式在一段时间内进行积分,再除以时间长度,得到两臂合成光强的平均值 $\bar{I}$

$$\bar{I} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \left\{ \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos\left[2\frac{2\pi}{\lambda}(z_2 + \Delta z) - \omega t\right] + \exp[-(\lambda - \lambda_c)^2 / (2\delta\lambda^2)] \cos\left[2n(\lambda)\frac{2\pi}{\lambda}h - \omega t\right] \right\}^2 d\lambda dt, \quad (6)$$

探测器的输出信号与 $\bar{I}$ 成正比。

#### 4 材料色散模拟仿真

(6)式难以得到解析表达式,只能用数值求解的方法得到测量臂和参考臂合成光强的平均值 $\bar{I}$ 与最大值偏移量 $\Delta z$ 之间的曲线关系图。进行模拟仿真的条件:短相干光源SLD的中心波长为1310 nm,半峰全宽为42 nm,被测光学镜片材料是LAK9,厚度是2 mm。Schott色散公式为:

$$n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}, \quad (7)$$

LAK9的色散常数为: $a_0=3.129053$ ,  $a_1=-1.56045 \times 10^{-2}$ ,  $a_2=2.445980 \times 10^{-2}$ ,  $a_3=4.870570 \times 10^{-4}$ ,  $a_4=-1.116240 \times 10^{-6}$ ,  $a_5=6.826030 \times 10^{-7}$ 。

由(7)式,可以得到LAK9的折射率曲线,如图5所示,在1200~1400 nm范围内,LAK9的折射率与波长之间非常接近线性关系,在此波段范围内,其一阶色散系数为

$$\frac{dn}{d\lambda} = -0.000018023 \text{ nm}^{-1}, \quad (8)$$

在1200~1400 nm范围内,LAK9的折射率可以表示为

$$n(\lambda) = n(\lambda_c) - 0.000018023(\lambda - \lambda_c). \quad (9)$$

将(9)式代入(6)式,进行数值积分计算,其中, $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 1$  s,  $\lambda_1 = 1200$  nm,  $\lambda_2 = 1400$  nm,相对干涉光强 $\bar{I}$ 与 $\Delta z$ 之间的关系曲线如图6所示。图6(a)是 $\Delta z$ 在0~100  $\mu\text{m}$ 范围内的完整关系曲线,图6(b)是

图 6(a)在最大值附近的局部放大图,当  $\Delta z = 47.16 \mu\text{m}$  时,干涉光强达到最大值。

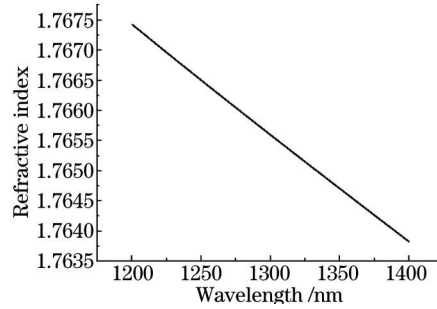


图 5 LAK9 折射率曲线

Fig.5 Curve of refractive index of LAK9

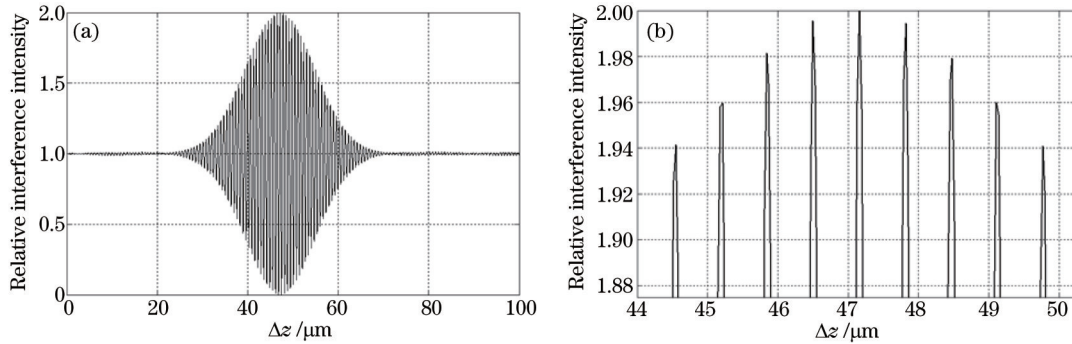


图 6 2 mm LAK9 测量时的干涉信号曲线。(a) 全图; (b) 局部放大图

Fig.6 Curve of interference signal measuring LAK9 of 2 mm. (a) Total graph; (b) local enlarged graph

为了弄清楚  $\Delta z$  与哪些因素有关,设计了以下两种仿真实验:

- 1) 光源相同,镜片材料相同,厚度不同;
- 2) 光源相同,厚度相同,镜片材料不同。

表 1 是厚度分别为 2、4、6、8、10 mm 的 LAK9 光学玻璃对应的  $\Delta z$ , 表 2 是 2 mm 厚度的 LAK9、ZF6、H-ZF2、BAK7、K9 光学玻璃对应的  $\Delta z$ 。

表 1 不同厚度 LAK9 对应的  $\Delta z$

Table 1  $\Delta z$  of LAK9 with different thicknesses

Thickness / mm	2	4	6	8	10
$\Delta z / \mu\text{m}$	47.16	94.97	141.48	189.36	236.45

表 2 厚度 2 mm 的各种光学材料对应的  $\Delta z$

Table 2  $\Delta z$  of various types of optical material with 2 mm thickness

Glass	LAK9	ZF6	H-ZF2	BAK7	K9
$(dn/d\lambda) / \mu\text{m}^{-1}$	-0.01802	-0.01814	-0.01563	-0.01133	-0.01170
$\Delta z / \mu\text{m}$	47.16	47.81	40.61	30.13	30.79

对表 1 和表 2 的数据进行最小二乘拟合,得到拟合方程

$$\Delta z = 1.0015(-\lambda_c h \frac{dn}{d\lambda}) + 0.03414. \quad (10)$$

(10)式的一次项系数接近 1,常数项接近 0,图 7 是仿真实验结果的数据拟合曲线。由于数值仿真过程中存在误差,因此,可以认为  $\Delta z$  的关系式是

$$\Delta z = -\lambda_c h \frac{dn}{d\lambda}. \quad (11)$$

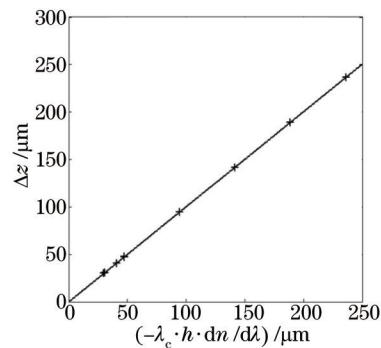


图7 数值仿真结果的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of results of numerical simulation

## 5 镜面间隔测量实验

为了对仿真实验得到的色散效应关系(11)式进行验证,搭建了一个实验平台,进行实验测量。实验条件:短相干光源SLD的中心波长为1310 nm,半峰全宽为42 nm,与仿真条件一致;光栅尺测量精度是2 μm,被测的光学镜片材料分别是LAK9、ZF6、H-ZF2、BAK7、K9,厚度是(2±0.02) mm。实验结果如表3所示。与仿真计算结果相比,实验测试得到的Δz绝对误差小于1 μm,相对误差小于2%。在实验过程中,光栅尺存在测量误差,而且,干涉信号采样过程中也存在误差,导致干涉信号最大值的定位产生误差,综合考虑这些因素,可以认为仿真实验得到的色散效应关系式(11)式是正确的。

表3 厚度2 mm的各种玻璃材料实验测量的Δz

Table 3 Measurement of Δz of various types of optical material with 2 mm thickness

Glass	Thickness /mm	Simulation Δz / μm	Experiment Δz / μm	Relative error
LAK9	2.01	47.16	48.1	1.99%
ZF6	2.00	47.81	47.2	1.28%
H-ZF2	1.99	40.61	40.9	0.71%
BAK7	1.98	30.13	30.7	1.89%
K9	2.00	30.79	30.4	1.27%

## 6 结 论

对光学干涉法测量镜面间隔进行研究,通过理论分析得到材料色散会影响测量精度的结论。以光学干涉的理论为基础,建立数学模型,并对五种光学玻璃材料进行仿真测试,得到结论:峰值偏移量与玻璃材料的一阶色散系数、镜片中心厚度和光源中心波长成正比。搭建了一个实验平台,进行镜片间隔测量实验,实验结果表明,仿真测试得到的结论是正确的。解决了光学干涉测量过程中的材料色散的问题,利用信号峰值偏移量的表达式,能够对镜片间隔测量结果进行修正,从而提高镜片间隔测量的精度。

### 参 考 文 献

- Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.  
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.
- Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0607002.  
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0607002.
- Liao Zhibo, Wang Chunyu, Li Mengjuan, *et al.*. Research on computer-aided alignment based on refract optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2453-2456.  
廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- Yi Hengyu, Qi Yu, Chen Menxue, *et al.*. Computer aided alignment method for optical system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(3): 55-60.

- 易亨瑜, 齐 予, 陈门雪, 等. 光学系统辅助装调技术研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 55-60.
- 5 Wang Fuguo, Wang Zhi, Ming Ming, *et al.*. Opto-mechanical structure design, alignment and test of prime focus optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 41(1): 21-25.  
王富国, 王 志, 明 名, 等. 主焦点式光学系统的光机结构设计与装调检测[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 21-25.
- 6 H Maruyama, S Inoue, T Mitsuyama, *et al.*. Low-coherence interferometer system for the simultaneous measurement of refractive index and thickness[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1315-1322.
- 7 P H Tomlins, R K Wang. Theory developments and applications of optical coherence tomography[J]. *J Phys D: Appl Phy*, 2005, 38(15): 2519-2535.
- 8 Wang Jun, Chen Lei. Measurement of homogeneity of optical glass with parallel surfaces using low coherence light sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 37(12): 2515-2519.  
王 军, 陈 磊. 用短相干光源测量平行平板玻璃的光学均匀性[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2515-2519.
- 9 Yuan Qun, Gao Zhishan, Li Jianxin, *et al.*. Research on techniques of fabrication and measurement about Fizeau infrared interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0808001.  
袁 群, 高志山, 李建欣, 等. 斐索式红外干涉仪研制和测试技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0808001.
- 10 Zhong Ming. Research on optical coherence tomography with double SLD sources[J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. 13-14.  
钟 鸣. 双SLD光学相干层析成像技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008. 13-14.
- 11 Gao Feng. Study on Design and Fabrication for the Optical Coherence Tomography[D]. Chendu: Sichuan University, 2005. 30-34.  
高 峰. 光学相干层析成像系统的研制[D]. 成都: 四川大学, 2005. 30-34.