

低相干光干涉高精度透镜中心厚度的测量方法

金超群^{1,2}, 杨宝喜^{1,2}, 胡小邦¹, 张 方¹, 马 健^{1,2}, 黄惠杰¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 阐述了一种基于低相干光干涉技术的透镜中心厚度的测量方法,并设计了腔式测量结构对未知折射率的材料进行中心厚度测量。测量系统为包括低相干测量和激光测距的全光纤结构。低相干测量结构参考臂和激光测距结构参考臂的共光路设计降低了环境因素的影响,提高了测量稳定性,并利用七步相移法实现对干涉信号的定位和提取。另外,利用低相干测量方法中的平衡差分结构去除了干涉信号中的直流项,同时提高了弱信号的定位精度。实验结果表明,该腔式测量结构对殷瓦合金标准块的测量精度优于 $0.5\ \mu\text{m}$,该系统能够实现对透镜中心厚度的高精度测量,满足高精密光学系统的测量要求。

关键词 测量; 透镜中心厚度; 低相干光干涉; 腔式测量结构; 平衡差分测量结构

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604002

Measurement Method of Lens Central Thickness with High Precision Based on Low Coherence Interferometry

Jin Chaoqun^{1,2}, Yang Baoxi^{1,2}, Hu Xiaobang¹, Zhang Fang¹, Ma Jian^{1,2}, Huang Huijie¹

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A lens central thickness measurement method based on low coherence interferometry technique is presented. The cavity measurement structure is designed to measure the central thickness of the material with unknown refractive index. The measurement system is an all-fiber structure including low coherence measurement and laser ranging. The design of common optical path of low coherence measurement structure reference arm and laser ranging structure reference arm reduces the influence of environmental disturbances and obtains a higher measurement stability. The interference signal can be located and extracted by seven-step phase shifting method. By using the balanced differential structure of low coherence measurement method, the direct current item in the interference signal is removed and the positioning accuracy of the weak signal is improved. The experimental results show that the measurement accuracy for Invar standard block from the cavity measurement structure is below $0.5\ \mu\text{m}$. The system can realize high precision measurement of lens central thickness, and satisfy measurement request of high precision optical system.

Key words measurement; lens central thickness; low coherence interferometry; cavity measurement structure; balanced differential measurement structure

OCIS codes 120.3180; 120.4290; 120.4570; 120.4820

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-03-01

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402)

作者简介: 金超群(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电检测与光学设计方面的研究。

E-mail: chaoqun@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 杨宝喜(1972—),男,硕士,高级工程师,主要从事光学系统设计、光电检测和高数值孔径光学光刻技术等方面的研究。E-mail: yangbx@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光学系统中,透镜的三个基本参数是中心厚度、曲率半径和折射率。透镜中心厚度的加工误差直接影响了光学系统的成像质量,诸如光刻机、航天镜头等高精密光学系统都需要对透镜中心厚度进行高精度测量和校验。目前,透镜中心厚度的测量方法可以分为接触式和非接触式两种。接触式测量方法^[1-2]主要使用测量仪的探针来标定待测透镜前后两个表面的顶点位置,直接获取待测透镜的中心厚度。常见的接触式测量方法有轮廓仪、千分尺等,这类测量方法会损伤待测透镜膜层及外表面的光洁度,另外探针由于频繁使用而造成的磨损会降低透镜中心厚度的测量精度,所以接触式测量方法很难满足高精密光学系统对透镜中心厚度的测量要求。

非接触式测量方法主要有共面电容法^[3]、共焦法^[4-8]、图像法^[9-10]和干涉法^[11-16]等。非接触式测量方法对透镜表面没有损伤,能实现远距离高精度测量,是透镜中心厚度测量的研究重点。目前,国内较为成熟的技术有史立波等^[4-5]提出的激光共焦透镜中心厚度测量方法和周勇等^[7]研究的基于色差共焦原理的透镜中心厚度测量系统。但是,这类技术需要知道透镜的面形和材料折射率等条件,且计算复杂。低相干光干涉测量方法^[12-16]能够在未知透镜面形等条件的情况下,实现透镜在高精度装配环境中的实时测量,并且其测量范围大,单次可测透镜数量多,能实现远距离的高精度测量,是当今的研究热点。

低相干光干涉测量方法是一种以宽谱光源作为相干光源的干涉测量技术,其相干长度短,只有在测量光和参考光的光程相等时才能产生干涉峰值,因此具有很好的空间定位特性^[12],通过计算透镜前后镜面顶点对应干涉峰之间的距离变化可以得出透镜的中心厚度。但是,低相干干涉测量方法需要知道透镜材料的群折射率才可进行测量,其应用范围受到一定的限制。因此,本文提出一种腔式测量结构用于透镜中心厚度的测量,无需知道透镜的任何参数即可对其中心厚度进行高精度测量。

2 基本原理

2.1 平衡差分结构的低相干光干涉测距基本原理

最基本的低相干光干涉结构采用的是迈克耳孙干涉结构,低相干光源超辐射发光二极管(SLD)发出的低相干光分成信号测量光和参考光。其中,信号测量光在待测透镜前后镜面的反射光与参考光的反射光发生干涉,只有当测量反射光和参考反射光等光程时才会产生干涉极大值信号,干涉信号强度随着光程差的增大快速降低。所以,低相干光干涉具有很好的空间定位性,可用于透镜中心厚度的非接触式测量。但是干涉光的直流本底信号和反射光的耦合效率都会随着光程的增大而降低,从而降低了弱信号的定位精度。为了减小本底信号对信号定位精度的影响,提高弱信号的定位精度,设计了平衡差分结构的低相干光干涉结构。

图1为平衡差分结构^[17-18]的低相干光干涉法测量透镜中心厚度的基本原理图。低相干光源 SLD 发出的光经过光纤耦合器1分成信号测量光和参考光,其中信号测量光经过光纤环形器2、准直透镜入射到待测透镜内部,信号测量光在待测透镜的前后表面发生反射,反射信号光经准直透镜、光纤环形器2入射到光纤耦合器2中。参考光经光纤环形器1、准直透镜后照射在扫描反射镜上,并经准直镜、光纤环形器1反射回

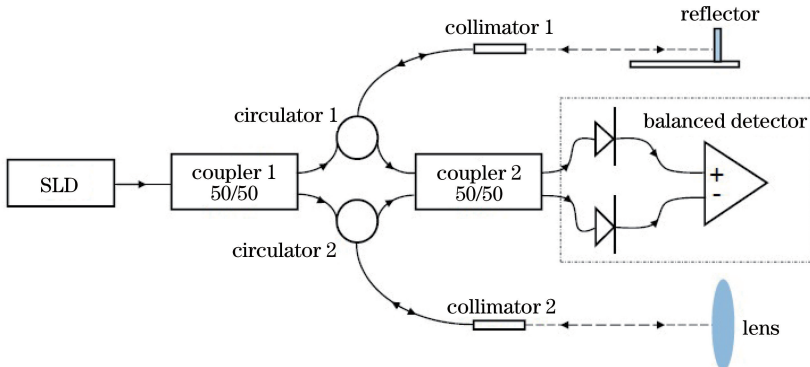


图1 平衡差分结构的低相干光干涉测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of low coherence interference measurement for balanced differential structure

光纤耦合器 2 中。测量信号的反射光和参考信号的反射光在光纤耦合器 2 中形成干涉,光纤耦合器 2 输出的两路干涉信号平均功率相等,但具有 π 的相位差^[17],通过平衡光电探测器正负端口接收后,去除本底干扰信号^[18],增强干涉信号强度。扫描反射镜安装在平移导轨上,参考光的光程随着扫描反射镜的平移发生变化。当参考光的反射信号与待测透镜某表面的反射光信号的光程差为零时产生干涉极大值,当光程差增大时干涉信号迅速减小,低相干光干涉信号如图 2 所示。

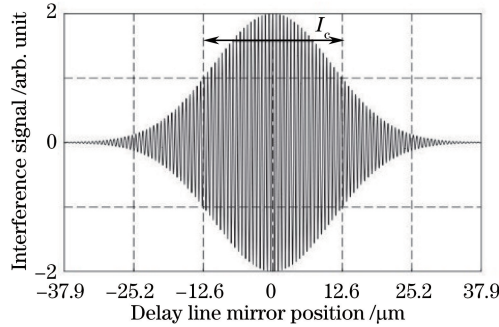


图 2 低相干光干涉信号

Fig. 2 Signal of low coherence interferometry

2.2 高相干光干涉测距基本原理

图 3 所示,为高相干测距方法示意图。高相干测距方法采用迈克耳孙干涉结构,光源为窄带光源,其相干长度很长,窄带光源发出的光经光纤耦合器分成信号测量光和参考光,信号测量光照射到光纤反射镜上反射回光纤耦合器中,参考光经扫描反射镜反射后进入光纤耦合器,信号测量光的反射光与参考光的反射光叠加产生干涉信号。当扫描反射镜的反射光与参考光的反射光的光程差为半波长偶数倍时出现干涉波峰,为半波长奇数倍时出现干涉波谷。光电探测器(PD)探测到的是随扫描反射镜移动距离而变化的正弦信号,如图 4 所示,通过统计激光干涉信号波峰和波谷的数量即可计算扫描反射镜移动的光学距离。

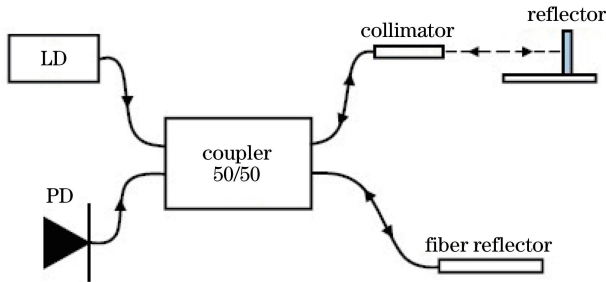


图 3 高相干光干涉测距基本原理示意图

Fig. 3 Schematic of ranging basic principle for high coherent interferometry

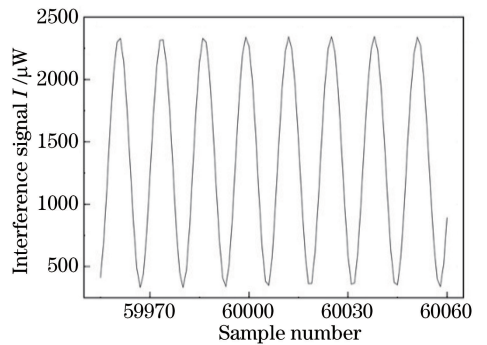


图 4 高相干光干涉信号示意图

Fig. 4 Schematic of high coherent interference signal

2.3 腔式结构测距基本原理

图 5 为腔式结构测距的基本原理示意图,两块平板玻璃形成一个标准测量腔,如图 5(a)所示,两个平板之间的距离 L_{air0} 通过低相干光干涉测距系统进行测量(空气的群折射率可通过 Edlen 公式计算)。然后将待测样品插入标准腔中,如图 5(b)所示,利用低相干光干涉测距系统再次进行测量,测得标准腔前表面到待测样品前表面的空气层厚度 L_{air1} 和标准腔后表面到待测样品后表面的空气层厚度 L_{air2} 。利用标准腔的腔长 L_{air0} 减去两个空气层厚度得到样品的中心厚度 d 为

$$d = L_{air0} - L_{air1} - L_{air2} \quad (1)$$

利用(1)式在计算被测样品的中心厚度的同时,可计算样品材料在测量波长下的群折射率。对于多透镜结构,如果透镜都为同一种材料,也可通过该方法测量各个透镜样品的中心厚度。

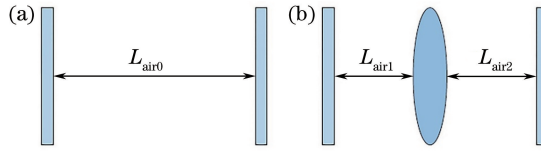


图 5 (a)腔式测量结构的腔体示意图;(b)插入待测透镜的腔式测量结构示意图

Fig. 5 (a) Schematic of cavity for cavity measurement structure; (b) schematic of cavity measurement structure with unmeasured lens inside

3 低相干光干涉高精度透镜中心厚度测量系统

3.1 系统结构设计

搭建的平衡差分结构的低相干光干涉测量系统包括 SLD、激光二极管(LD)、PD、波分复用器(WDM)等,如图 6 所示。通过波分复用器将低相干测量光束与高相干测距光束进行分束和合束,实现低相干测量系统参考臂和高相干测距系统参考臂的共光路设计,使得两系统的干涉随着扫描反射镜的位移同步发生。

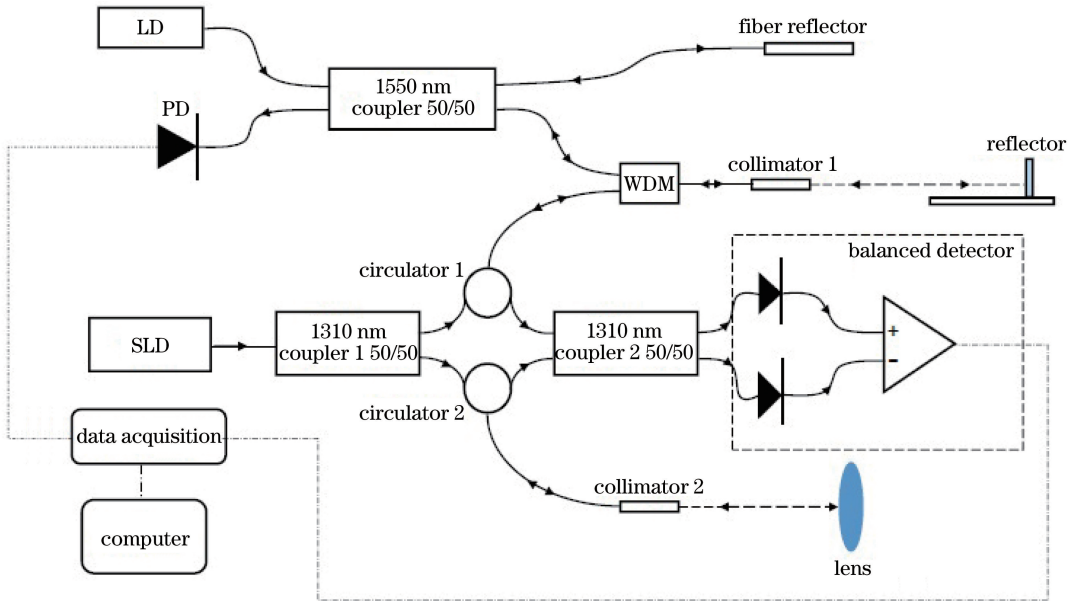


图 6 实验测量系统结构

Fig. 6 Structure of experimental measurement system

系统中的低相干光源 SLD 的中心波长为 1310 nm,线宽为 83 nm,其相干长度为 $l_c = 2 \ln 2 \times \lambda^2 / (\pi \times \Delta \lambda) = 9 \mu\text{m}$ 。窄带光源 LD 的中心波长为 1550 nm。平衡差分测量系统中的低相干测量结构中的两个光纤耦合器的工作波长均为 1310 nm,分束比均为 50:50,其中第一个 1310 nm 光纤耦合器主要起到分振幅的作用,第二个 1310 nm 光纤耦合器将输出两个信号直流项相同但干涉项具有 π 的相位差的干涉信号。平衡光电探测器对两干涉信号进行差分探测,其输出的两电流的交流项也具有 π 的相位差,但是其直流项相抵消,因此平衡光电探测器最后的输出只包含交流项信号。系统中使用的光电探测器分别为带宽为 200 MHz 的铟镓砷(InGaAs)光电探测器和带宽为 200 MHz 的 InGaAs 雪崩光电二极管(APD)平衡光电探测器,分别用于采集激光测距信号和低相干测量信号,并将干涉光信号转换为电信号。扫描反射镜匀速运动的同时,通过数据采集卡同步采集两个光电探测器的输出信号,并反馈给计算机。

3.2 信号提取算法设计

干涉信号的提取主要是对测量信号中的干涉区域进行提取,通过计算每个采样点的调制度 γ 并设定合适的阈值来确定信号中的干涉区域^[16],这样可降低计算量并提高运行效率。通过提取信号包络来定位干涉主极大的位置。通过七步相移法^[19]计算激光测距干涉信号在每个采样点的相位值 φ 。以第 i 个干涉峰采样点位置为中心连续 7 个激光测距采样点的干涉光强值为 $I_{i-3}, I_{i-2}, I_{i-1}, I_i, I_{i+1}, I_{i+2}, I_{i+3}$,则

$$\varphi_i = \arctan \left[\frac{4(2I_i - I_{i-2} - I_{i+2})}{I_{i-3} - 7I_{i-1} + 7I_{i+1} - I_{i+3}} \right]. \quad (2)$$

通过计数相邻干涉峰值 $i+1$ 和 i 之间对应的激光测距干涉信号的波峰和波谷数量来计算低相干光干涉信号峰值间的距离^[16] D 为

$$D = \frac{\lambda_{1550}}{n_{\text{air}}(\lambda_{1550})} \cdot \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{4\pi}, \quad (3)$$

式中 λ_{1550} 为激光测距光源的中心波长, $n_{\text{air}}(\lambda_{1550})$ 为空气在波长 λ_{1550} 下的折射率。

该结构所用的光源为宽带光源, 且所测样品为色散介质, 当测量光束经过待测镜片相邻表面间的光程与参考光所经过的光程相等时出现干涉极大值, 即

$$D_{\text{mea}} \cdot n_g(\lambda_{1310}) = D \cdot n_{g,\text{air}}(\lambda_{1310}), \quad (4)$$

式中 D_{mea} 为待测样品厚度, $n_g(\lambda_{1310})$ 为待测样品材料在光波长 λ_{1310} 下的群折射率, $n_{g,\text{air}}(\lambda_{1310})$ 为空气在波长 λ_{1310} 下的群折射率。

则待测样品的物理厚度为

$$D_{\text{mea}} = \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \cdot \lambda_{1550}}{4\pi} \cdot \frac{n_{g,\text{air}}(\lambda_{1310})}{n_{\text{air}}(\lambda_{1550}) \cdot n_g(\lambda_{1310})}. \quad (5)$$

透镜材料折射率 $n(\lambda)$ 由 Sellmeier 色散公式^[20] 求得

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}, \quad (6)$$

式中 B_1, B_2, B_3 和 C_1, C_2, C_3 是材料的 Sellmeier 色散系数。

空气折射率可由 Edlen 公式^[21] 计算

$$n_{15} - 1 = [8342.12 + 2406030(130 - \sigma^2)^{-1} + 15997(38.9 - \sigma^2)^{-1}] \cdot 10^{-8}, \quad (7)$$

$$n_{t,p} - 1 = \frac{p(n_{15} - 1)}{720.775} \cdot \frac{1 + p(0.817 - 0.0133t) \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0036610t}, \quad (8)$$

$$n_{t,p,f} = n_{t,p} - f(5.7224 - 0.0457\sigma^2) \cdot 10^{-8}, \quad (9)$$

式中 $n_{15} - 1$ 是 15 °C、一个标准大气压下的空气折射率, σ 是真空中波数, $\sigma = 1/\lambda$, $(n_{t,p} - 1)$ 为标准空气下受到温度和气压影响的折射率, $n_{t,p,f}$ 是标准空气中受到气温、气压以及水汽影响的折射率, t 为温度, p 为气压, f 为空气相对湿度。

则由群折射率^[22] n_g 的计算公式

$$n_g(\lambda) = n(\lambda) - \frac{\delta n}{\delta \lambda} \cdot \lambda, \quad (10)$$

便可以得出波长 λ 对应的材料群折射率 n_g , 式中 $n(\lambda)$ 为 λ 对应的材料折射率。

4 低相干光干涉高精度透镜中心厚度测量系统实验

搭建平衡差分结构的低相干光干涉实验系统如图 7 所示, 利用该实验系统对殷瓦合金标准块进行测量。搭建腔式测量结构如图 8 所示, 并利用腔式测量结构对殷瓦合金标准块和双片透镜镜头进行中心厚度测量。

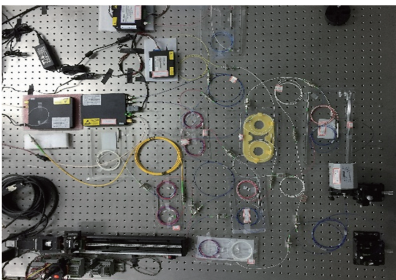


图 7 透镜中心厚度测量系统

Fig. 7 Lens center thickness measurement system

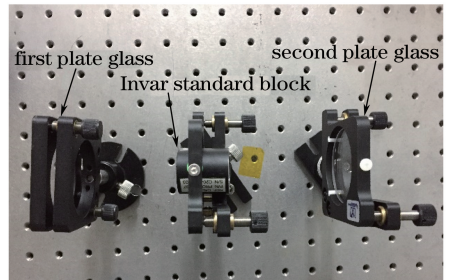


图 8 插入殷瓦合金标准块的腔式测量结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cavity measurement structure with Invar standard block inside

4.1 殷瓦合金标准块厚度测量

所测量的光学结构为殷瓦合金标准块,其结构见图 9,该殷瓦合金标准块由两块 N-BK7 平板玻璃和中空的殷瓦合金圆柱组成;该标准块的第一平面镜厚度值为 5.23646 mm,第二平面镜厚度值为 5.27015 mm,标准块中间的空气间隙的标称值为 19.9872 mm。殷瓦合金标准块干涉测量信号测量结果如图 10 所示。殷瓦合金标准块镜片厚度的测量结果如表 1 所示。

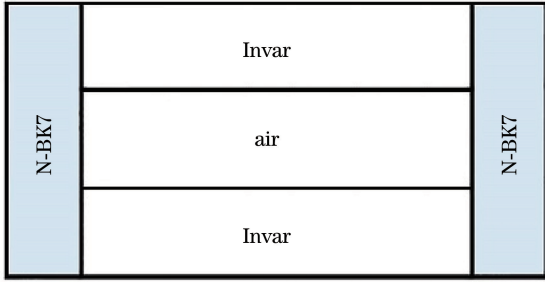


图 9 殷瓦合金标准块结构图

Fig. 9 Structure chart of Invar standard block

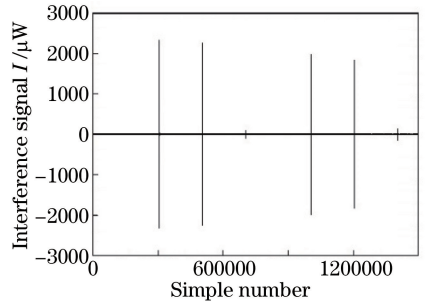


图 10 殷瓦合金标准块干涉测量信号

Fig. 10 Interference measurement signal of Invar standard block

表 1 殷瓦合金标准块镜面厚度测量结果

Table 1 Thickness measurement results of Invar standard block

No.	Thickness of N-BK7 glass /mm	Thickness of air gap /mm	Thickness of N-BK7 glass /mm
1	5.236549	19.98717	5.270191
2	5.236294	19.98717	5.270191
3	5.236549	19.98717	5.270191
4	5.236549	19.98717	5.270191
5	5.236294	19.98717	5.269936
6	5.236294	19.98717	5.270191
7	5.236549	19.98678	5.270191
8	5.236294	19.98717	5.269936
9	5.236294	19.98717	5.269936
10	5.236284	19.98678	5.270191
Mean value	5.236396	19.98709	5.270115
Standard deviation	0.000131	0.000163	0.000123

由测量结果可以看出,殷瓦合金标准块的第一平面镜的测量结果与标称值的偏差约为 64 nm,测量的标准偏差为 131 nm;第二平面镜的测量结果与标称值的偏差约为 35 nm,测量标准差为 123 nm;殷瓦合金标准块中间的空气间隙的测量结果与标称值的偏差约为 110 nm,测量标准差为 163 nm。

4.2 腔式测量结构测量实验

4.2.1 殷瓦合金标准块的测量

腔式测量结构图如图 5,由两个平行的熔石英材料的平板玻璃组成的测量腔和待测样品构成;测量时先对腔结构的腔长进行测定,然后将待测样品插入腔结构中再次进行测量。殷瓦合金标准块的结构图如图 9 所示。

图 11 中 L_{air0} 为腔长, L_{air1} 、 L_{air2} 、 L_{air3} 分别为插入殷瓦合金标准块后三个空气层的厚度,则殷瓦合金标准块中两块 N-BK7 材料玻璃的厚度总和为

$$L_{1N-BK7} + L_{2N-BK7} = L_{air0} - L_{air1} - L_{air2} - L_{air3} \quad (11)$$

腔式测量结构的干涉测量信号和插入殷瓦合金标准块后的干涉测量信号分别如图 12(a)和图 12(b)所示。测量结果如表 2 所示。

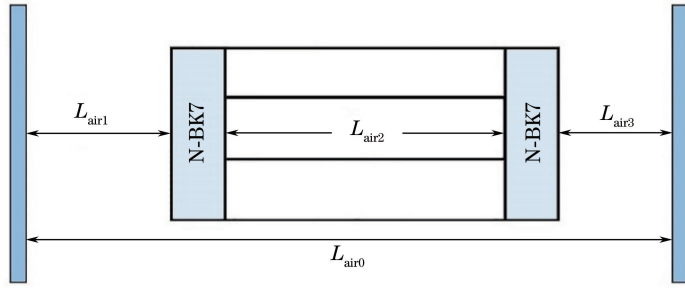


图 11 插入殷瓦合金标准块的腔式测量结构原理图

Fig. 11 Schematic of cavity measurement structure with Invar standard block inside

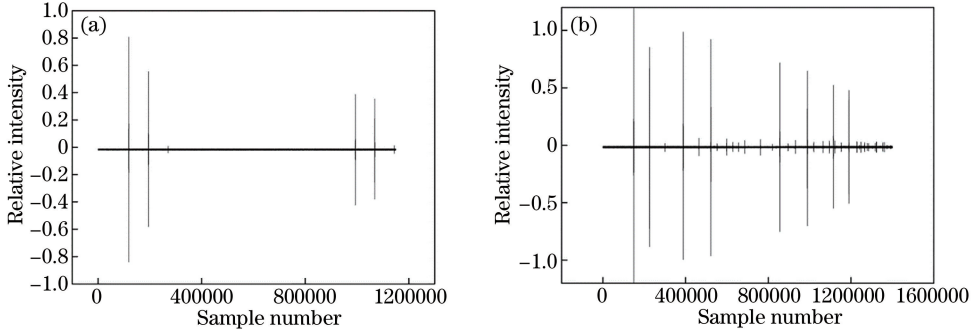


图 12 (a)腔式测量结构的干涉测量信号;(b)插入殷瓦合金标准块后的干涉测量信号

Fig. 12 (a) Interference measurement signal of cavity measurement structure; (b) interference measurement signal with Invar standard block inside

表 2 腔式测量结构的腔长及插入殷瓦合金标准块后的测量结果

Table 2 Measurement results of cavity length and cavity structure with Invar standard block inside

No.	L_{air0}/mm	L_{air1}/mm	L_{air2}/mm	L_{air3}/mm	$L_{1\text{-BK7}} + L_{2\text{-BK7}}/\text{mm}$
1	47.8969	9.8196	19.9870	7.5849	10.5054
2	47.8977	9.8192	19.9870	7.5849	10.5066
3	47.8969	9.8192	19.9874	7.5849	10.5054
4	47.8969	9.8189	19.9870	7.5845	10.5066
5	47.8973	9.8196	19.9874	7.5845	10.5058
6	47.8973	9.8186	19.9874	7.5853	10.5058
7	47.8973	9.8192	19.9874	7.5845	10.5062
8	47.8973	9.8186	19.9870	7.5853	10.5062
9	47.8977	9.8186	19.9870	7.5849	10.5070
10	47.8973	9.8186	19.9874	7.5849	10.5062
Mean value	47.89726	9.81901	19.9872	7.58486	10.50612

通过表 2 计算出的 N-BK7 材料厚度和可以得到殷瓦合金标准块两端 N-BK7 材料的厚度,利用腔式结构得到的殷瓦合金标准块的各个镜面间距如表 3 所示,其中 $L_{O1\text{-BK7}}$ 和 $L_{O2\text{-BK7}}$ 为殷瓦合金标准块中两端 N-BK7 材料平板玻璃的光学厚度,则其物理厚度可表达为

$$L_{1\text{-BK7}} = \frac{L_{O1\text{-BK7}}}{L_{O1\text{-BK7}} + L_{O2\text{-BK7}}} (L_{1\text{-BK7}} + L_{2\text{-BK7}}), \quad (12)$$

$$L_{2\text{-BK7}} = \frac{L_{O2\text{-BK7}}}{L_{O1\text{-BK7}} + L_{O2\text{-BK7}}} (L_{1\text{-BK7}} + L_{2\text{-BK7}}). \quad (13)$$

N-BK7 材料在 1310 nm 下的群折射率可表达为

$$n_{g,\text{N-BK7}} = \frac{L_{O1\text{-BK7}} + L_{O2\text{-BK7}}}{L_{1\text{-BK7}} + L_{2\text{-BK7}}}. \quad (14)$$

表 3 殷瓦合金标准块的两个镜面厚度和空气间隔的测量结果

Table 3 Measurement results of thickness between two mirror surface and air gap of Invar standard block

No.	$L_{O1N-BK7}/\text{mm}$	$L_{O2N-BK7}/\text{mm}$	L_{1N-BK7}/mm	L_{air}/mm	L_{2N-BK7}/mm	$n_{g,N-BK7}$
1	7.95762	8.00913	5.23577	19.98701	5.26967	1.519856
2	7.95800	8.00913	5.23648	19.98701	5.27012	1.519725
3	7.95800	8.00913	5.23590	19.98740	5.26954	1.519893
4	7.95800	8.00913	5.23648	19.98701	5.27012	1.519725
5	7.95762	8.00836	5.23622	19.98740	5.26961	1.519726
6	7.95800	8.00913	5.23609	19.98740	5.26973	1.519837
7	7.95762	8.00836	5.23641	19.98740	5.26980	1.519670
8	7.95800	8.00913	5.23628	19.98701	5.26993	1.519781
9	7.95800	8.00913	5.23667	19.98701	5.27031	1.519669
10	7.95839	8.00875	5.23654	19.98740	5.26967	1.519781
Mean value	7.95793	8.00894	5.23628	19.89720	5.26985	1.519766
Standard deviation	0.00019	0.00027	0.00023	0.00019	0.00022	6.3×10^{-5}

由腔式测量结构测量结果可以看出,测量结果与标称值比较接近,但测量结果误差和测量标准差与之前所测结果相比数值有所增大,主要是因为该方法需要对多个空气间隙进行测量,每个空气间隙的测量不确定性都会反映到最后的计算结果中。同时由 Sellmeier 色散公式计算出的 N-BK7 材料在温度为 18 °C、相对湿度为 50%、气压为 101.325 kPa、光波长 1310 nm 条件下的群折射为 1.51978,与测量的结果较为接近,因此通过该方法可以大致确定材料的种类。

4.2.2 双片透镜镜头测试

所测镜头中包含两片透镜,其材料都为康宁 C7980 玻璃材料,可利用腔式结构进行测量,测量方法与殷瓦合金标准块的测量方法相同,腔结构的测量信号和插入镜头后的测量信号如图 13 所示。

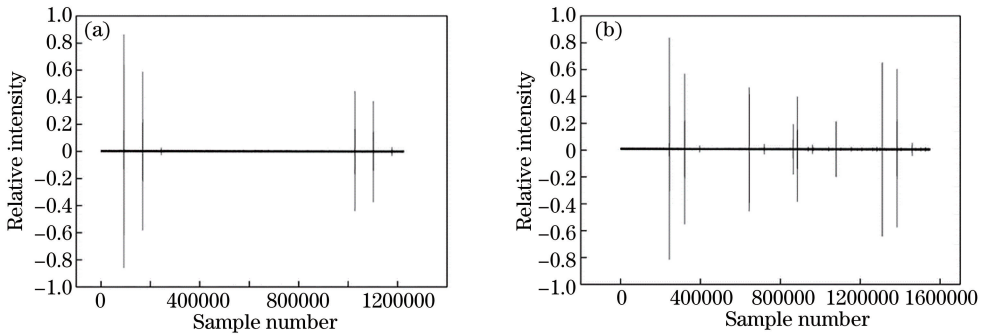


图 13 (a)腔结构的干涉测量信号;(b)插入镜头后的干涉测量信号

Fig. 13 (a) Interference measurement signal of cavity structure; (b) interference measurement signal of cavity structure with lens inside

腔长 L_0 的测量结果如表 4 所示,其测量平均值为 51.4723 mm。

表 4 腔长 L_0 的测量结果

Table 4 Measurement results of cavity length L_0

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_0/mm	51.4715	51.4719	51.4726	51.4723	51.4726	51.4719	51.4726	51.4723	51.4726	51.4723

与殷瓦合金标准块的测量计算方式相同,最后得到的镜头各个面间的间距如表 5 所示,其中 $L_{O1C7980}$ 、 $L_{O2C7980}$ 为透镜 1 和透镜 2 的光学厚度, L_{1C7980} 、 L_{2C7980} 为透镜 1 和透镜 2 的物理厚度, $n_{g,C7980}$ 为 C7980 材料的群折射率。

镜头的设计值中透镜 1 和透镜 2 的中心厚度分别为 8 mm 和 9 mm,其公差要求为 ± 0.05 mm,由实际测量结果可知透镜的加工厚度满足要求。由 Sellmeier 色散公式计算出的 C7980 材料在温度为 18.2 °C、相对湿度为 53%、气压为 101.325 kPa、光波长 1310 nm 条件下的群折射率为 1.46213,与测量计算值 1.46217 较为接近。

表 5 双片透镜镜头各个镜面间距测量结果

Table 5 Measurement results of spaces among different mirror surfaces for doublet lens

No.	$L_{01C7980}/\text{mm}$	$L_{02C7980}/\text{mm}$	L_{1C7980}/mm	L_{2C7980}/mm	$n_{g, C7980}$
1	11.6529	13.2092	7.9696	9.0341	1.462160
2	11.6525	13.2085	7.9696	9.0338	1.462124
3	11.6525	13.2092	7.9696	9.0342	1.462111
4	11.6529	13.2092	7.9696	9.0341	1.462160
5	11.6529	13.2092	7.9695	9.0339	1.462193
6	11.6533	13.2092	7.9698	9.0339	1.462183
7	11.6529	13.2092	7.9696	9.0341	1.462160
8	11.6525	13.2089	7.9694	9.0339	1.462148
9	11.6525	13.2089	7.9694	9.0339	1.462148
10	11.6533	13.2096	7.9689	9.0332	1.462339
Mean value	11.6528	13.2091	7.9695	9.0339	1.462172
Standard deviation	0.00025	0.00024	0.00020	0.00022	3.94×10^{-5}

5 结 论

设计了基于平衡差分结构的低相干光干涉的透镜中心厚度测量系统,该方法可以大大降低本底信号对干涉信号的影响,提高了弱干涉信号的定位精度,实现了透镜中心厚度的高精度测量。另外,设计了腔式测量结构的透镜中心厚度测量系统,其能实现未知材料折射率光学透镜中心厚度的高精度测量,并能计算材料在低相干光波长下的群折射率。在透镜中心厚度的计算中考虑了温度、气压和湿度对空气折射率和群折射率的影响,并通过改进信号提取算法,提升了系统测量精度。

通过对殷瓦合金标准块的实验测量,结果表明该系统的测量精度优于 $0.5 \mu\text{m}$,能够满足对透镜中心厚度的高精度测量需求。该系统测量方便、快捷,不损伤光学器件,精度高,稳定性强,在光学加工和检测等领域有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 徐锡林. 高精度表面轮廓仪测量探头的设计[J]. 上海交通大学学报, 1991, 25(4): 128-131.
- [2] Li Xiaodong, Li Xiaoling. The analysis of influence on measurement accuracy of profile instruments[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2005, 41(3): 134-136.
李晓东, 李晓玲. 影响轮廓仪测量精度因素的分析[J]. 理化检验-物理分册, 2005, 41(3): 134-136.
- [3] He Jiayang, Zhang Dawei. Study on technology for on-line testing the thickness with coplane capacitor[J]. Journal of Tianjin University, 1994, 27(2): 250-256.
何家祥, 张大卫. 共面电容式在线测厚技术[J]. 天津大学学报, 1994, 27(2): 250-256.
- [4] Shi Libo, Qiu Lirong, Wang Yun, et al. Development of central lens thickness measurement system using laser differential confocal microscopy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 683-688.
史立波, 邱丽荣, 王 允, 等. 激光差动共焦透镜中心厚度测量系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 683-688.
- [5] Zhao Weiqian, Shen Yang, Qiu Lirong, et al. Lenses axial space measurement by laser confocal technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031205.
赵维谦, 沈 阳, 邱丽荣, 等. 激光共焦透镜轴向间隙测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031205.
- [6] Qiao Yang, Zhang Ning, Liu Tao, et al. Optical system design for the measurement of center thickness of lens based on confocal technology[J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 857-859.
乔 杨, 张 宁, 刘 涛, 等. 基于共焦法透镜中心厚度检测的光学系统设计[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 857-859.
- [7] Zhou Yong, Guo Banghui, Wang Xiaoxun, et al. Design of lens central thickness measuring optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031201.
周 勇, 郭帮辉, 王潇询, 等. 透镜中心厚度测量系统光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031201.
- [8] Lu Yi, Xu Xiping, Shi Nuo, et al. Research on measurement method and apparatus for lens center thickness[J].

- Journal of Changchun University of Science and Technology, 2013, 36(3-4): 28-31.
- 卢毅, 徐熙平, 石诺, 等. 透镜中心厚度测量方法及装置的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3-4): 28-31.
- [9] Goncharov A V, Bailón L L, Devaney N M, *et al.* Optical testing of lens systems with concentric design[C]. SPIE, 2009, 7389: 738912.
- [10] Jiang Jiadong, Yuan Daocheng, Pu Jie. Research on on-line-measuring clearance of assembly parts based on image measurement technology[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(12): 26-28.
蒋家东, 袁道成, 蒲洁. 基于图像测量技术的装配间隙在线测量研究[J]. 传感器技术, 2005, 24(12): 26-28.
- [11] Gao Ming, Huang Dingjin, Liu Jun. The measurement instrument of center thickness of lens[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2003, 23(3): 234-236.
高明, 黄钉劲, 刘钧. 透镜中心厚度测量仪的设计[J]. 西安工业大学学报, 2003, 23(3): 234-236.
- [12] de Groot P. Optical gap measuring apparatus and method: America, 5557399[P]. 1996-9-17.
- [13] Courteville A, Wilhelm R, Delaveau M, *et al.* Non-contact in-process metrology using a high-accuracy low-coherence interferometer[C]. Laser Metrology and Machine Performance VII, 7th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM and Robotic Performance, 2005: 534-544.
- [14] Wilhelm R, Courteville A, Garcia F. Dimensional metrology for the fabrication of imaging optics using a high accuracy low coherence interferometer[C]. SPIE, 2005: 469-480.
- [15] Schmitt J M. Optical coherence tomography (OCT): a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 1205-1215.
- [16] Shi Zhonghua, Yang Baoxi, Hu Xiaobang, *et al.* Lens surface distance measurement with large range and high precision based on low coherence interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0612001.
师中华, 杨宝喜, 胡小邦, 等. 基于低相干干涉技术的大量程高精度镜面间距测量[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0612001.
- [17] Zhao Shuyue. The research of low-coherence interferometer based distributed optical fiber sensing system[D]. Hefei: Anhui University, 2011.
赵舒悦. 基于低相干干涉技术的分布式传感系统的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2011.
- [18] Wang Jinjing. Development of balanced homodyne detector[D]. Shanxi University, Taiyuan: 2012.
王金晶. 平衡零拍探测器的研制[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- [19] Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(4): 832-843.
- [20] 廖延彪. 物理光学[M]. 电子工业出版社, 1986.
- [21] Zhang Zhuo, Chen Zhong, Zhong Li. An updated Edlen equation under low air pressure based on pattern search method [J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(3): 221-224.
张琢, 陈中, 钟丽. 基于模式搜索法的低气压段 Edlen 公式的改进[J]. 计量学报, 2005, 26(3): 221-224.
- [22] Li Hui, Xie Shusen, Lu Zukang. Dispersion, group velocity and group refractive index[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(12): 1075-1079.
李晖, 谢树森, 陆祖康. 色散, 群速与群折射率[J]. 光子学报, 1999, 28(12): 1075-1079.