

基于透过式低相干光学干涉测量透镜中心厚度

刘经佑^{1,2*}, 雷枫^{1,2}

¹淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223300;

²淮安市微纳光学成像重点实验室, 江苏 淮安 223300

摘要 基于透过式低相干光学干涉系统, 提出了一种精密调节光程的方法, 以测量透镜的中心厚度。利用一对楔形棱镜, 将接近垂直于光轴方向的低精度直线移动转化为沿光轴方向的高精度直线移动, 实现了高精度的光程调节。楔形棱镜的楔角角度决定了光程差的调节精度, 楔角角度越小, 光程差调节精度越高。使用 $5^{\circ}30'$ 的楔角棱镜组和精度为 $5\ \mu\text{m}$ 的直线移动装置, 实现了光轴方向精度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的移动调节, 测量透镜中心厚度的精度在 $0.9\ \mu\text{m}$ 以内。所提方法提高了干涉条纹的对比度, 可以测量各种类型透镜的中心厚度, 也便于扩大测量厚度范围。

关键词 测量; 透镜中心厚度; 低相干光干涉; 楔形棱镜组; 光程补偿

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121201

Measurement of Lens-Center Thickness Based on Low-Coherence Interference with Transmitted Illumination

Liu Jingyou^{1,2*}, Lei Feng^{1,2}

¹School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an, Jiangsu 223300, China;

²Key Laboratory of Huai'an's Micro-Nano Optical Imaging, Huai'an, Jiangsu 223300, China

Abstract A method for precision-adjustable optical paths is proposed to measure the central thickness of a lens based on low-coherence interference with transmitted illumination. A pair of wedge prisms are used to translate the movement that is nearly perpendicular to the optical axis with low accuracy into movement along the optical axis with high accuracy, and thus the optical path along the optical axis can be precisely adjusted. The accuracy for adjusting the optical-path difference (OPD) is related to the wedge angle. The smaller the wedge angle, the more accurate the adjustable OPD. A pair of prisms with a wedge angle of $5^{\circ}30'$ and a linear stage with $5\ \mu\text{m}$ accuracy are used to realize the movement along the optical axis with an accuracy below $0.5\ \mu\text{m}$, and the central thickness accuracy of the tested lens is less than $0.9\ \mu\text{m}$. The proposed method is employed to improve the contrast of interference fringes. Moreover, the central thicknesses of lenses with different shapes can be measured by the proposed method and the thickness-measuring scope can be extended easily.

Key words measurement; lens-center thickness; low-coherence interference; wedge prism pair; optical path compensation

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.3940

1 引言

透镜中心厚度是透镜重要参数之一, 加工精度直接影响其所在光学系统的装调和成像质量。因此, 研究透镜中心厚度的精确测定方法具有重要的

意义。目前有许多非接触无损的物理测量方法用于测试透镜中心厚度, 如二维扫描法^[1]、图像法^[2-3]、共焦法^[4-14]和低相干光干涉法^[15-23]等。共焦法中的激光共焦方法^[6]、频移共焦法^[13]和差动共焦方法^[14], 测量精度均达 $1\ \mu\text{m}$ 以内。低相干光干涉法采用低

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-01-13; 录用日期: 2019-01-15

基金项目: 淮安市科技局重点实验室项目(HAP201604)

* E-mail: jyliujs@163.com

相干光学干涉原理,利用参考光束与被测镜面反射的测试光束之间的等光程干涉,确定被测透镜前后表面的位置,测量透镜中心厚度。低相干光干涉法结合精密移动控制和干涉信号的算法分析处理,可以获得 $0.5\ \mu\text{m}$ 以内的测量精度。Wilhelm 等^[24]、Langehanenberg 等^[15] 和 Stickler 等^[16] 均获得了 $0.15\ \mu\text{m}$ 以内的测量精度。师中华等^[22] 和金超群等^[23] 将共光路激光测距技术用于低相干光干涉法中,测量精度均达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。用于医学生物组织三维成像的相干层析技术^[25-29],是低相干光干涉技术在其他方面的应用。檀泽浩等^[30] 阐明低相干光干涉技术用于透镜组表面间隔和生物影像测量具有诸多优点,有很好的潜在应用前景。

采用低相干光干涉方法测量时,通常采用直线位移扫描方式调节光程差,有 2 种常用的位移调节测量机构,即步进电机所带的平移台和带光栅尺的平移台。前者移动量程可达 $50\ \text{mm}$ 以上,但移动精度较低,国产同类产品的移动精度为 $2\ \mu\text{m}$,这限制了透镜中心厚度的测量精度。带光栅尺的平移台有闭环控制的光栅尺,移动量程约 $100\ \text{mm}$,测量精度可达亚微米级,适合反射式低相干干涉测量透镜组的各镜面间距,但安装复杂、占用空间大、成本高。现有的成品透镜大部分采用复杂的非线性结构,蒸镀增透膜的表面反射率极低,导致反射式低相干光干涉方法的干涉条纹对比度降低,影响了测量精度。尤其当透镜中心厚度较大时,反射式低相干光干涉方法的干涉条纹的对比度急剧下降。鉴于此,本文提出用透过式低相干光学干涉方法测量透镜中心厚度。该方法采用一种等效于厚度可变的光学平行板的楔形棱镜组,实现了大量程参考光束光程的高精度连续调节,使透镜中心厚度的测量精度较高。改变楔形棱镜组的楔角大小,还可获得不同级别的测量精度。透过式低相干光学干涉方法的干涉信号质量好,特别适用于表面反射率极低的成品单透镜中心厚度的测量。

2 测量原理

2.1 透过式低相干光干涉测量光学系统

透过式低相干光干涉测量透镜中心厚度光学系统的基础是迈克耳孙干涉仪。图 1 为该光学系统的原理示意图,S 为低相干光源,L1 为显微物镜,ST 为小孔光阑,L2 为准直物镜,SP 为分束棱镜,PP 为楔形棱镜组,M1 为平面反射镜,P 为光学平行板,lens 为被测透镜,M2 为平面反射镜,L3 为成像物

镜,CAM 为面阵相机。

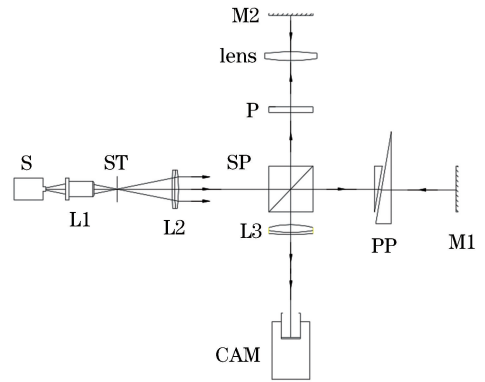


图 1 透过式低相干光干涉测量透镜中心厚度原理图
Fig. 1 Principle diagram for measuring lens-center thickness based on low-coherence interference with transmitted illumination

经过准直的平行光束入射 SP 后,形成两束光,分别称为参考光束和测试光束。参考光束透过 PP,经 M1 反射后,沿原路返回到 SP。参考光束通过的光路称为参考光路。测试光束透过 P 和 lens,经 M2 反射后,沿原路返回到 SP。测试光束通过的光路称为测试光路。参考光束和测试光束通过 L3,在 CAM 接收面上产生干涉条纹。

PP 由 2 个楔角相等的直角棱镜组成,用于精密调节干涉系统参考光路的光程,其中一个棱镜的斜边较短,另一个棱镜的斜边较长。2 个楔形直角棱镜的斜边平行,所在的斜面间有微小间隔,约为 $1\ \text{mm}$ 。楔形棱镜组的左右一对直角边所在端面 and 参考光路的光轴垂直。PP 中较长的棱镜称为可动楔形棱镜,当其在主截面内沿斜边方向移动时,PP 相当于一个厚度可调的光学平行板,藉此可以调节参考光路的光程。P 用于补偿测试光束在测量之初相对于参考光束的光程差,这是由于参考光束中的 PP 在测量之初已有一个相当于平行板的初始厚度,产生了相对于测试光束的额外光程差。

L3 用于提高干涉条纹的对比度。受透镜表面形状的影响,离轴光束通过透镜,经 M2 反射回来的测试光束,形成杂散光。这些杂散光束可能是会聚光束,也可能是发散光束。如果不使用 L3,测试光路由 M2 反射的光束和参考光路由 M1 反射的光束,在重叠区域的光强可能相差悬殊,导致干涉条纹的对比度降低,有可能观测不到干涉条纹。因此,在 SP 与 CAM 之间放置 L3,调节 CAM 和 L3 之间的距离,尽可能降低杂散光对干涉条纹对比度的影响,形成清晰的干涉条纹。

采用透过方式测量透镜中心厚度的原理如下:

调整好低相干光的迈克耳孙干涉仪后,分别在测试光路和参考光路中置入 P 和 PP,调节 PP 中的可动楔形棱镜,找到低相干光干涉条纹对比度最高且中心亮条纹强度为峰值时的位置。然后在测试光路中放置 lens,继续调节 PP 中的可动楔形棱镜,直至再次找到低相干光干涉条纹对比度最高且中心亮斑强度为峰值时的位置。根据前后两次观察干涉条纹过程中的 PP 可动楔形棱镜的移动距离、PP 楔角,以及材料折射率和 lens 材料的折射率,可以计算出透镜的中心厚度。

2.2 大量程光程精密调节原理

参考光路的光程调节是通过调节楔形棱镜组实现的,调节原理如图 2 所示,图中画出的是楔形棱镜组的主截面。

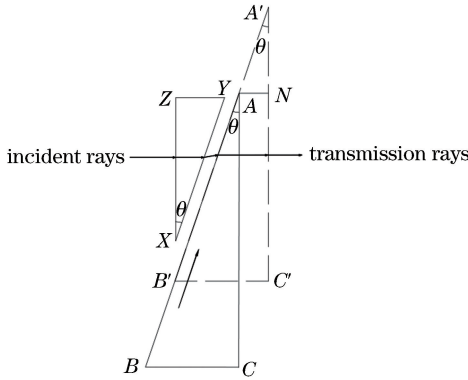


图 2 楔形棱镜组调节光程原理示意图

Fig. 2 Principle diagram for adjusting optical path difference using pair of wedge prisms

楔形棱镜组由 2 个楔角相等的直角棱镜组成,楔角为 θ 。其中一个楔形棱镜 XYZ 的斜边较短,另一个楔形棱镜 ABC 的斜边较长,二者斜面 XY 和 AB 平行且有微小间隔,楔形棱镜组的左端面 XZ 和右端面 AC 处于平行状态。根据光线折射定律,平行光从左端面 XZ 垂直入射,从右端面 AC 垂直出射。当楔形棱镜组中的斜边较长的楔形棱镜沿其斜边 BA 方向平行移动时,楔形棱镜组相当于一个厚度可调的光学平行板。如图 2 所示,直角三角形 ABC 移至 A'B'C' 位置后,相当于增大了光学平行板的厚度。图 2 中,AA' 为移动的距离 x ,AN 为增加的厚度 t ,由直角三角形 A'AN 可知, $\overline{AN} = \overline{AA'} \times \sin \theta$,也即

$$t = x \sin \theta. \quad (1)$$

由(1)式可知, $t < x$,即由直接测量 x 时的误差传递给 t 的误差线性减小。楔角 θ 越小,直接测量 x 传递给 t 的误差也越小。因此,减小楔角 θ 可以

提高沿光轴方向的移动精度,即通过设计合适的楔角 θ ,可以满足预期控制测量误差的要求。

2.3 透镜中心厚度的测量过程

参考图 1,透镜中心厚度的测量过程如下。

1) 调整迈克耳孙干涉仪的两平面反射镜 M1 和 M2,在面阵相机 CAM 接收面上可观察到对比度最高且中心亮条纹强度为峰值的直线型干涉条纹,这表明参考光路和测试光路光程严格相等。由于光学器件为非理想器件,条纹通常略带弯曲。

2) 在测试光路中置入补偿光程用的光学平行板 P,在参考光路中置入楔形棱镜组 PP,使平行光分别垂直于端面入射和出射。沿楔形棱镜组 PP 的互相平行的斜边方向移动可动楔形棱镜,直至在面阵相机 CAM 接收面上观察到对比度最高且中心亮条纹强度为峰值的直线条纹。同理,此干涉条纹亦略带弯曲。此干涉条纹是测量过程中,第 1 次记录可动楔形棱镜在其斜边方向上的位置读数 x_1 的判断依据的条纹。

3) 在光学平行板 P 所在的光路(测试光路)中,置入被测中心厚度的透镜 lens,调整好共轴。继续沿楔形棱镜组 PP 的互相平行的斜边方向移动可动楔形棱镜,直至在面阵相机 CAM 接收面上观察到对比度最高且中心亮斑强度为峰值的圆形干涉条纹。因为被测中心厚度透镜是以光轴为中心轴旋转对称的,所以是圆形条纹。此圆形干涉条纹是测量过程中,第 2 次记录可动楔形棱镜在其斜边方向上的位置读数 x_2 的判断依据的条纹。

2.4 测量计算公式和精度分析

下面推导测量透镜中心厚度的计算公式。由上述测量过程的 2) 和 3) 可知,在楔形棱镜组 PP 的互相平行的斜边方向上,可动楔形棱镜移动的距离为

$$x = x_1 - x_2. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得,相当于一个光学平行板的楔形棱镜组增加的厚度为

$$t = (x_1 - x_2) \sin \theta. \quad (3)$$

设空气折射率为 n_0 ,楔形棱镜组 PP 的玻璃折射率为 n_p ,由于楔形棱镜组厚度的增加带来参考光路光程的增量 P_T 为

$$P_T = 2(n_p - n_0)t. \quad (4)$$

测试光路中置入被测透镜 lens,光轴上的光程增加。设被测透镜 lens 玻璃的折射率为 n ,中心厚度为 t_c ,则光程的增量 P_{TC} 为

$$P_{TC} = 2(n - n_0)t_c. \quad (5)$$

楔形棱镜组厚度增加带来的参考光路光程的增

量 P_T , 与测试光路置入被测透镜在光轴上光程的增量 P_{TC} 相等, 将(1)式代入(4)式, 并与(5)式比较可得被测透镜中心厚度 t_C 为

$$t_C = \frac{n_P - n_0}{n - n_0} x \sin \theta. \quad (6)$$

当被测透镜与楔形棱镜组是同一种玻璃材料时, 即折射率 n 与折射率 n_P 相等, (6)式可化简为

$$t_C = x \sin \theta. \quad (7)$$

由(6)式可推得, 被测透镜中心厚度测量误差的计算公式为

$$\Delta t_C = \Delta x \frac{n_P - n_0}{n - n_0} \sin \theta, \quad (8)$$

式中: Δt_C 为被测透镜的中心厚度测量误差; Δx 为楔形棱镜组中可动楔形棱镜在其斜边方向上的移动距离测量误差。

同理, 当被测透镜与楔形棱镜组是同一种玻璃材料时, (8)式可化简为

$$\Delta t_C = \Delta x \sin \theta. \quad (9)$$

以 LED 低相干光源作为入射光源, 分析对透镜中心厚度的测量精度。表 1 为不同条件下的测量精度, 其低相干光中心波长为 680 nm, 空气的折射率 n_0 取 1.00029, 玻璃 BK7 的折射率为 1.51390, 玻璃 FK4 的折射率为 1.47590。假设楔形棱镜组 PP 中可动楔形棱镜在其斜边方向上的移动测量尺的位置测量精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$, 根据(2)式, 其移动距离 x 测量误差 Δx 为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

由表 1 可知, 楔形棱镜组的楔角 θ 决定被测透镜的中心厚度测量精度, θ 越小, 测量精度越高。测量精度也与透镜折射率相关, 若楔形棱镜组的折射率 n_P 小于被测透镜的折射率 n , 则测量精度更高。当楔形棱镜组与被测透镜是同一种玻璃材料时, 被测透镜的中心厚度测量精度与折射率无关。

表 1 不同条件下的测量精度

Table 1 Measuring precision under different conditions

| n_P | n | $\Delta x / \mu\text{m}$ | θ | $\sin \theta$ | $\Delta t_C / \text{nm}$ |
|---------|-----------|--------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| | | | $5^\circ 44'$ | 0.1 | ± 200 |
| n_P | $n = n_P$ | ± 2 | $2^\circ 52'$ | 0.05 | ± 100 |
| | | | $1^\circ 26'$ | 0.025 | ± 50 |
| | | | $6^\circ 12'$ | 0.10799 | ± 200 |
| 1.47590 | 1.51390 | ± 2 | $3^\circ 5'$ | 0.05399 | ± 100 |
| | | | $1^\circ 33'$ | 0.02700 | ± 50 |
| | | | $5^\circ 20'$ | 0.09260 | ± 200 |
| 1.51390 | 1.47590 | ± 2 | $2^\circ 39'$ | 0.04630 | ± 100 |
| | | | $1^\circ 20'$ | 0.02315 | ± 50 |

2.5 光源光谱宽度对测量厚度范围的影响

(6)式中的 n 和 n_P 分别为被测透镜 lens 和楔形棱镜组 PP 的材料相对于低相干光源中心波长的折射率。当被测透镜 lens 与楔形棱镜组 PP 是同一种玻璃材料时, 即折射率 n 与折射率 n_P 相等时, (6)式可化简为(7)式, 此时测量得到的透镜中心厚度 t_C 与镜片材料的折射率无关。这是因为测试光束和参考光束在各自光路中通过的玻璃厚度相等, 各自通过的空气层的厚度也相等, 也即此种情况下, 低相干光谱中的所有波长的光在产生干涉时, 测试光束与参考光束都是完全等光程干涉, 此时影响干涉条纹对比度的主要因素是两路光在面阵相机 CAM 接收面上的光强之比。此为最理想测量状态, 透镜中心厚度的测量范围不受光源光谱宽度的限制, 使用光谱宽度较宽的低相干涉光源测量, 有利于提高产生等光程干涉条纹的灵敏度。

当被测透镜 lens 与楔形棱镜组 PP 为不同玻璃材料时, 即中心波长的折射率 n 与折射率 n_P 不相等时, 测量透镜中心厚度的计算式为(6)式。此时的低相干光的等光程干涉条纹, 理论上只有光谱中某一波长的光完全等光程且在中心产生亮斑, 而以这一波长为中心的邻近波长的光, 随着其与中心波长差的增大逐渐向相消干涉过渡。对于中心波长两侧邻近的某一特定波长, 被测透镜中心厚度越大, 向相消干涉过渡得越快, 综合光谱范围内的所有波长的光, 最终导致干涉条纹完全消失, 限制了透镜中心厚度的测量范围。可以采用推导非单色光相干长度的方法导出低相干光的光谱宽度对应的测量透镜中心厚度的范围。设低相干光的中心长为 λ , 光谱宽度用半峰全宽 (FWHM) 表示, 短波长为 λ_1 , 长波长为 λ_2 。设短波长为 λ_1 的测试光束与参考光束的光程差为 $\Delta P_{TC}(\lambda_1)$, 长波长 λ_2 的测试光束与参考光束的光程差为 $\Delta P_{TC}(\lambda_2)$, 当二者之差恰好为一个中心波长 λ 时, 可以认为干涉条纹恰好消失, 此时被测透镜的中心厚度 t_C 对应该光谱宽度能测出的极限厚度。

3 实验测量

3.1 实验测量和结果分析

低相干光源采用美国 Thorlab 公司的 LED 光源, 中心波长 λ 为 595 nm, FWHM 为 80 nm。测试样品是中国大恒光电科技公司 (DHC) 的材料 BK7 的部分类型透镜。光学平行板 P 和楔形棱镜组 PP 由本实验室订制, 材料选用 BK7。楔形棱镜组中棱

镜的楔角 θ 有 2 种,一种是 $5^{\circ}30'$,另一种是 $10^{\circ}0'$ 。移动测量尺是 DHC 的一般平移台所带的螺纹副,读数精度为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,故单次测量位移精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。由(9)式可得,采用楔角 θ 为 $5^{\circ}30'$ 的棱镜组时,单次测量精度为 $\pm 0.48 \mu\text{m}$;采用楔角 θ 为 $10^{\circ}0'$ 的棱镜组时,单次测量精度为 $\pm 0.87 \mu\text{m}$ 。

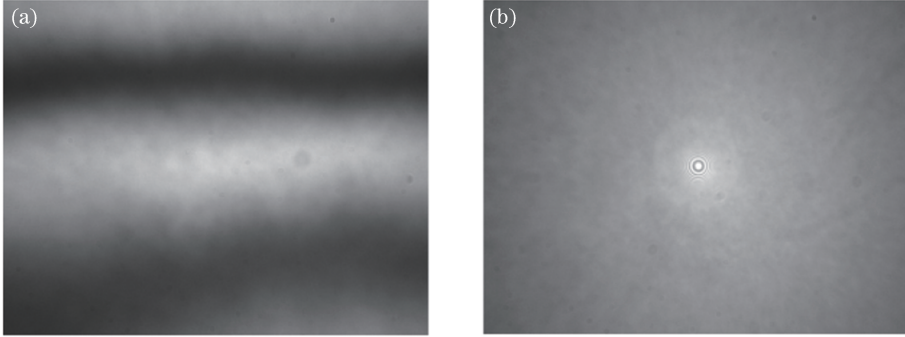


图 3 放置被测透镜前后的等光程干涉条纹。(a)放置被测透镜前;(b)放置被测透镜后
Fig. 3 Equal-path interference fringes before and after lens. (a) Before lens; (b) after lens

实验采用 10 次重复测量读数的方法, i 为重复测量读数次序。采用光学实验数据处理方法^[31]推导位置读数的平均值和不确定范围。位置读数平均值计算式为

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_{1i}}{10} \quad (10)$$

位置读数不确定范围计算式为

$$S_{x_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_{1i} - \bar{x}_1)^2}{10 - 1}} \quad (11)$$

根据(2)式、(7)式、(9)~(11)式可得,被测透镜

图 3 (a)、(b)分别为放置被测透镜前后观察到的等光程干涉条纹。由于采用低相干光作为光源,只有参考光路和测试光路光程严格相等时才能产生对比度高的干涉条纹。故可用楔形棱镜组 PP 调节两路光的光程差,确保在面阵相机 CAM 的接收面上产生低相干光的等光程干涉条纹。

的厚度测量平均值 t_c 和不确定范围 δ 分别为

$$t_c = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \sin \theta, \quad (12)$$

$$\delta = \sin \theta \sqrt{S_{x_1}^2 + S_{x_2}^2}. \quad (13)$$

表 2 和表 3 分别为楔角为 $10^{\circ}0'$ 和 $5^{\circ}30'$ 时的楔形棱镜组的透镜中心厚度测量结果。

表 2 和表 3 中的测试样品为 DHC 的 GCL-010xxx 系列的单透镜。其中 No.5 为双凹型,对应 xxx 为 408; No.7、No.18 和 No.19 为平凹型,对应 xxx 为 303、326 和 301; No.9 为双凸型,对应 xxx 为 203; No.14 为平凸型,对应 xxx 为 167; No.12、No.13 为弯月型,对应 xxx 为 502 和 507。

表 2 基于楔角为 $10^{\circ}0'$ 的楔形棱镜组的透镜中心厚度测量结果

Table 2 Measuring results of lens-center thickness based on pair of edge prisms with wedge angle of $10^{\circ}0'$

| No. | Nominal value of tested lens | | | Measured value of center thickness | |
|-----|------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------|
| | Dimeter ϕ /mm | Focal length f' /mm | Center thickness T_c /mm | $(t_c \pm \delta)$ /mm | Relative error /% |
| 5 | 25.4 | -150.0 | 3.0 \pm 0.1 | 2.9286 \pm 0.0009 | 0.03 |
| 7 | 12.7 | -25.4 | 2.0 \pm 0.1 | 2.0151 \pm 0.0008 | 0.04 |
| 9 | 12.7 | 150.0 | 4.0 \pm 0.1 | 4.0581 \pm 0.0009 | 0.02 |
| 12 | 25.4 | 100.0 | 4.0 \pm 0.1 | 4.0375 \pm 0.0009 | 0.02 |
| 13 | 25.4 | -150.0 | 3.0 \pm 0.1 | 2.7990 \pm 0.0011 | 0.04 |
| 14 | 25.4 | 400.0 | 3.5 \pm 0.1 | 3.5294 \pm 0.0008 | 0.02 |
| 18 | 10.0 | -20.0 | 1.5 \pm 0.1 | 1.4743 \pm 0.0010 | 0.07 |
| 19 | 6.0 | -9.80 | 1.0 \pm 0.1 | 1.1094 \pm 0.0006 | 0.05 |

由表 2 可见,中心厚度的名义值 T_c 在 1.0~4.0 mm 波动。测量值与名义值匹配度高,不确定度在 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 以内,相对不确定度在 $\pm 0.07\%$ 以内。No.13 的镜片按出厂中心厚度误差允许要求来看,

为偶然性不合格品。

由表 3 可见,中心厚度的名义值 T_c 在 1.00~3.50 mm 波动。表 2 中 No.9 的双凸透镜和 No.12 的弯月型透镜由于中心厚度值较大,超出本楔形棱

表 3 基于楔角为 5°30' 的楔形棱镜组的透镜中心厚度测量结果

Table 3 Measuring results of lens-center thickness based on pair of edge prisms with wedge angle of 5°30'

| No. | Nominal value of tested lens | | | Measured value of center thickness | |
|-----|------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------|
| | Dimeter ϕ /mm | Focal length f' /mm | Center thickness T_c /mm | $(t_c \pm \delta)$ /mm | Relative error /% |
| 5 | 25.4 | -150.0 | 3.0±0.1 | 2.9227±0.0002 | 0.01 |
| 7 | 12.7 | -25.4 | 2.0±0.1 | 2.0139±0.0009 | 0.05 |
| 13 | 25.4 | -150.0 | 3.0±0.1 | 2.7980±0.0007 | 0.02 |
| 14 | 25.4 | 400.0 | 3.5±0.1 | 3.5226±0.0009 | 0.02 |
| 18 | 10.0 | -20.0 | 1.5±0.1 | 1.4778±0.0006 | 0.04 |
| 19 | 6.0 | -9.80 | 1.0±0.1 | 1.1044±0.0005 | 0.05 |

镜组测量范围,故未在表 3 列出。测量结果与名义值匹配度高,不确定度在 ±0.9 μm 以内,相对不确定度在 ±0.05% 以内。No.13 镜片按出厂允许误差要求来看,测量结果表明其仍为不合格品,与表 2 的测量结果几乎一样。

由于采用手工测量,圆环形干涉条纹对比度最高时位置判别和中心亮斑强度峰值的判断受人眼生理功能的限制,偶然性误差较大。总体上,5°30' 的楔形棱镜组比 10°0' 的楔形棱镜组测量精度高,由此证明前述精度分析所得“楔角越小,测量精度越高”的结论。

3.2 扩展测量范围的方法

一般情况下,楔形棱镜组的可动楔形棱镜的斜边不可能设计太长,且移动测量平台的测量尺(螺纹副)行程也有限,因此必须采用其他方法扩展透镜中心厚度测量范围。一种办法是在测量步骤 3),将已知厚度或已测量出厚度的平行板 P2,置于分束棱镜 SP 和楔形棱镜组 PP 之间(参考光路),使光束垂直入射和出射,如图 4 所示。设平行板 P2 与楔形棱镜组 PP 的材料相同,厚度为 t_0 ,则(6)式和(7)式可分别修正为

$$t_c = \frac{n_p - n_0}{n - n_0} (t_0 + x \sin \theta), \quad (14)$$

$$t_c = t_0 + x \sin \theta. \quad (15)$$

相应地,(8)式和(9)式也需作相应修正,此处略去。可以看出,测量精度会降低,理论上,由于平行板 P2 有与被测透镜同样数量级的测量误差,测量误差不会超过最大误差的 1.414 倍。本文测量方法的误差非常小,增大后的误差仍然非常小。

另一种办法是在楔形棱镜组 PP 所在的光路(参考光路)上,增加 1 个或多个同样的楔形棱镜组 PP。这样 2 个或 2 个以上的楔形棱镜组的光程调节范围成倍增加,测量范围亦成倍扩展。该方法的测量精度也会相应降低,相关计算公式也需作相应修正。

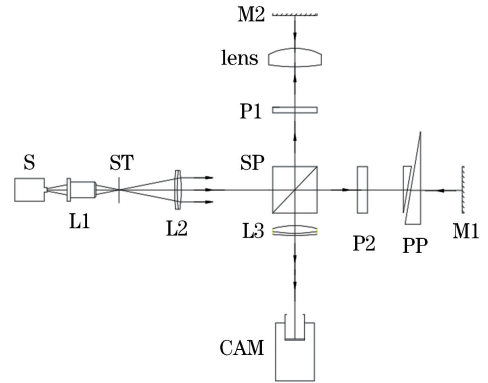


图 4 扩展透镜中心厚度测量范围的方法
Fig. 4 Method for extending measuring range of lens-center thickness

表 4 为采用第 1 种方法扩展测量范围的示例。所用棱镜组材料为 BK7,棱镜组的楔角为 10°0'。No.1 和 No.2 为定制的光学平行板,材料为 BK7,厚度采用本文方法测量。No.8 和 No.17 为 DHC 的 GCL-010xxx 系列单透镜,型号分别为 GCL-010206 和 GCL-010158,依次为双凸型和平凸型,材料为 BK7。由于 No.8 和 No.17 的中心厚度值较大,分别使用 No.1 和 No.2 的光学平行板进行扩展范围测量。修正后的测量结果与中心厚度名义值 T_c 匹配度高。

4 结 论

实验结果表明,使用透过式低相干光的干涉法测量透镜中心厚度的方法切实可行。采用透过被测透镜的测试光束与透过楔形棱镜组的参考光束产生干涉的方法,使低相干光的所有波长的光产生完全等光程干涉,干涉条纹质量好。利用楔形棱镜组调节光程差,在保证大量程的前提下,可以提高测量精度,同时还可通过优化设计楔形棱镜进一步提高测量精度。利用该方法可测量各类面型单透镜的中心厚度。实验测量过程中,手动平移台的读数精度为 ±2.5 μm,测量位移精度为 ±5 μm,采用楔角

表4 扩展测量范围的示例
Table 4 Examples for expanding measuring range

| No. | Nominal value of tested plate or lens | | | Measurement | | Corrected measurement | |
|-----|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | Dimeter ϕ /mm | Focal length f' /mm | Center thickness T_c /mm | $(t_c \pm \delta)$ /mm | Relative error /% | $(t_c \pm \delta)$ /mm | Relative error /% |
| 1 | — | — | 2.2 ± 0.1 | 2.2331 ± 0.0008 | 0.04 | — | — |
| 2 | — | — | 3.8 ± 0.1 | 3.8447 ± 0.0011 | 0.03 | — | — |
| 8 | 25.4 | 150 | 5.0 ± 0.1 | 2.8073 ± 0.0009 | 0.03 | 5.0404 ± 0.0012 | 0.02 |
| 17 | 25.4 | 30 | 8.1 ± 0.1 | 4.2573 ± 0.0011 | 0.02 | 8.1020 ± 0.0016 | 0.02 |

$10^\circ 00'$ 和楔角 $5^\circ 30'$ 楔形棱镜组,透镜中心厚度测量误差分别在 $1.1 \mu\text{m}$ 和 $0.9 \mu\text{m}$ 以内,相对误差最大值分别为 0.07% 和 0.05% 。测量过程中的光程精密调节方向和参考光路的光轴接近垂直,即接近横向移动间接测量,可减小成品仪器的纵向空间要求,有利于测量仪器小型化。

如果采用楔角小于 $1^\circ 26'$ 楔形棱镜组,用步进电机所带的直线移动精度为 $1 \mu\text{m}$ 的平移台替代手动移动测量平台,采用合适的图像数据处理方法,理论测量精度可达 50 nm 以内。本文提到的楔形棱镜组结构,不仅可用于迈克耳孙干涉仪,还可用于马赫-曾德尔干涉仪等参考光和测试光之间光程差的精密调节。

致谢 本文实验中的图像采集得到了凌鸣逸先生的软件设计支持,深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Liang H F, Cai P F. Non-contact measurement method for thickness of optical element[J]. Optical Technique, 2014, 40(6): 535-538.
梁海锋,蔡沛峰.一种非接触测量光学零件厚度的方法[J].光学技术,2014,40(6):535-538.
- [2] Goncharov A V, Bailón L L, Devaney N M, *et al.* Optical testing of lens systems with concentric design [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7389: 738912.
- [3] Park J B, Lee J G, Lee M K, *et al.* A glass thickness measuring system using the machine vision method [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(5): 769-774.
- [4] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, *et al.* Lenses axial space ray tracing measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3608-3617.
- [5] Wang Y, Qiu L R, Yang J M, *et al.* Measurement of the refractive index and thickness for lens by confocal technique [J]. Optik-International Journal

for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 2825-2828.

- [6] Zhao W Q, Shen Y, Qiu L R, *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.
- [7] Yao H B, Li L L, Chen M M, *et al.* Design of measurement system of lens center thickness based on double-side optical confocal technology[J]. Laser Technology, 2016, 40(6): 912-915.
姚红兵,李丽淋,陈明明,等.双面光学共焦技术的透镜中心厚度测量设计[J].激光技术,2016,40(6):912-915.
- [8] Kunkel M, Schulze J. Noncontact measurement of central lens thickness [J]. Glass Science and Technology, 2005, 78(5): 245-247.
- [9] Qiao Y, Zhang N, Xu X P, *et al.* Design of lens thickness measurement system based on confocal technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(7): 1635-1641.
乔杨,张宁,徐熙平,等.基于共焦法的透镜厚度测量系统设计[J].仪器仪表学报,2011,32(7):1635-1641.
- [10] Lu Y, Xu X P, Shi N, *et al.* Research on measurement method and apparatus for lens center thickness[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 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.
- [11] Zhou Y, Guo B H, Li C, *et al.* Research on spectrum bandwidth of emergent light in lens center thickness measurement system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081202.
周勇,郭帮辉,李灿,等.透镜中心厚度测量系统出

- 射光光谱的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081202.
- [12] Zhou Y, Guo B H, Wang X X, *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.
- [13] Tan Y D, Zhu K Y, Zhang S L. New method for lens thickness measurement by the frequency-shifted confocal feedback [J]. Optics Communications, 2016, 380: 91-94.
- [14] Shi L B, Qiu L R, Wang Y, *et al.* Development of lens central 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.
- [15] Langehanenberg P, Ruprecht A, Off D, *et al.* Highly accurate measurement of lens surface distances within optical assemblies for quality testing [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8844: 88444F.
- [16] Stickler D, Langehanenberg P, Lüerß B, *et al.* Optomechanical characterization of large wafer stepper-optics with respect to centering errors, lens distances, and center thicknesses[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86832C.
- [17] Lueerss B, Langehanenberg P. Thickness and air gap measurement of assembled IR objective [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9648: 96480C.
- [18] Zilio S C. Simultaneous thickness and group index measurement with a single arm low-coherence interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27392-27397.
- [19] Wang Z B, Shi G H, He Y, *et al.* Application of optical coherence tomography to distance measurement of optical surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1469-1474. 王志斌, 史国华, 何益, 等. 光学相干层析技术在光学表面间距测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1469-1474.
- [20] Guo B H, Li M, Sun Q. Research of dispersion in measurement of optical lens gap [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061204. 郭帮辉, 李明, 孙强. 光学镜面间隔测量中的色散研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061204.
- [21] Liu F G, Zha X J, Yang B, *et al.* Study on the method of measuring the center thickness of the lenses based on low coherence interferometry of optical fiber[J]. Applied Laser, 2016, 36(5): 605-610. 刘富国, 查学军, 杨波, 等. 基于光纤低相干干涉技术的透镜中心厚度测量方法研究[J]. 应用激光, 2016, 36(5): 605-610.
- [22] Shi Z H, Yang B X, Hu X B, *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.
- [23] Jin C Q, Yang B X, Hu X B, *et al.* Measurement method of lens central thickness with high precision based on low coherence interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604002. 金超群, 杨宝喜, 胡小邦, 等. 低相干光干涉高精度透镜中心厚度的测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604002.
- [24] Wilhelm R, Courteville A, Garcia F. Dimensional metrology for the fabrication of imaging optics using a high accuracy low coherence interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5856: 469-481.
- [25] Pan L H, Li Z L, Wang X Z, *et al.* Depth-dependent dispersion compensation for optical coherence tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0511002. 潘柳华, 李中梁, 王向朝, 等. 光学相干层析成像随深度变化的色散补偿方法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0511002.
- [26] Chang Y, Cui Q F, Piao M X. Optical design of Michelson interferometer based line-field swept source optical coherence tomography system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0608002. 常颖, 崔庆丰, 朴明旭. 迈克耳孙扫频线聚焦光学相干层析系统的光学设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0608002.
- [27] Wang X, Li Z L, Nan N, *et al.* A spectral calibration method in optical coherence tomography based on interference signal with fixed optical path difference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0607005. 王瑄, 李中梁, 南楠, 等. 一种基于固定光程差干涉信号的光学相干层析成像光谱标定方法[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0607005.

- [28] Zhang Y, Gao W R, Zhang L L, *et al.* Handheld optical coherence tomography based on logarithmic compensation and motion threshold [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1107002.
张越, 高万荣, 张兰兰, 等. 基于对数补偿和动态阈值的手持式光学相干层析成像方法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1107002.
- [29] Li P, Yang S S, Ding Z H, *et al.* Research progress in Fourier domain optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207011.
李培, 杨姗姗, 丁志华, 等. 傅里叶域光学相干层析成像技术的研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(2): 0207011.
- [30] Tan Z H, Feng Y P, Wang Z. Advances in measurement of optical central thickness by low coherence interferometry [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2016, 34(1): 5-14.
檀泽浩, 冯云鹏, 王钟. 基于低相干干涉的透镜厚度测量及生物影像研究进展[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 5-14.
- [31] Yang Z W. Optical measurements [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 7-12.
杨志文. 光学测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 7-12.