

文章编号: 1001-3806(2016)06-0912-04

双面光学共焦技术的透镜中心厚度测量设计

姚红兵, 李丽淋, 陈明明, 杨风潇

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 基于共焦法测量透镜中心厚度的装置中,需要光进入透镜内部发生折射和反射,但这会影响测量精度。为了解决这一问题,在共焦法原理的基础上,采用双面光学共焦的测量方法,设计了一套透镜中心厚度的测量装置,并进行了理论分析、误差分析和试验验证。结果表明,该装置测量范围能达到30mm,测量精度为 $2\mu\text{m}$ 。该装置实现了对透镜中心厚度的高速非接触测量,完全能达到实际测量的需要。

关键词: 测量与计量;非接触测量;双面光学共焦测量;透镜中心厚度

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.028

Design of measurement system of lens center thickness based on double-side optical confocal technology

YAO Hongbing, LI Lilin, CHEN Mingming, YANG Fengxiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: For the existing measurement system of lens center thickness based on optical confocal technology, refraction and reflection of incident light affected the measuring accuracy. In order to solve this problems, based on confocal technology, the modified measurement system of lens center thickness was designed with the method of double-side optical confocal measurement. After theoretical analysis, error analysis and experimental verification, the results show that the measurement range of the system reaches 30mm and the measurement accuracy is $2\mu\text{m}$. The system can get the high-speed untouched measurement of center thickness and satisfy the demands of actual measurement.

Key words: measurement and metrology; non-contact measurement; double optical confocal measurement; thickness of lens center

引言

接触式测量和非接触式测量^[1-2]是现有的两种比较常见的测量透镜中心厚度的方法。在接触式测量中,一般会使用卡尺、测微器等量具来测定透镜的中心厚度和镜组的空气间隔。通过这种方法测量,测量速度缓慢且不够精确,易使被测透镜的抛光面或镀膜面擦伤,致使组装成仪器后,额外增加了系统的杂散光。在大部分的企业中,需要人工通过模具,根据累积的经验进行定心后测量,这样就大大降低了测量的精度。基于这种现状,非接触式测量技术近年来发展很迅速。

透镜有3项基本参量^[3]:中心厚度、折射率和曲率半径。在光学领域中,透镜中心厚度加工的误差是影

响光学系统成像的重要因素。现有的非接触测量的方法中,主要有电容法、干涉法^[4]和共焦法^[5]。利用电容法来测量时需要共面电容测头进行检测,现有的测量技术过程复杂,不能满足于透镜中心厚度的测量;干涉法来测量透镜中心厚度在理论上是可行的,但是在使用干涉法进行透镜中心厚度的检测时很容易受到环境的影响,并且在数据处理的部分比较麻烦,因此实际的应用比较少;相对于前两种方法来说,利用共焦法来检测透镜中心厚度则易于实现高速且精度高的测量。

国内对透明材料厚度相关检测技术^[6]的研究起步较晚,但发展较为迅速。在现有的基于共焦法测量透镜中心厚度的装置^[7]中,所采用的基本都是单一的光学探头,从光源发出的探测光需要进入透镜内发生折射后通过反射返回再发生折射,这就无可避免地影响了此种测量方法的精度,同时在测量镀膜镜片时也会存在比较大的问题。针对此问题,作者设计了一种基于共焦法的采用双头测量透镜中心厚度的装置。该装置采用两个正对的光学探头,光源发出的探测光只需经过所对应的物体上下表面的反射返回光谱仪,然

基金项目:江苏省产学研联合创新资金前瞻性联合研究资助项目(BY2014123-06)

作者简介:姚红兵(1976-),男,博士,主要从事现代光电测试与光信息处理方面的研究工作。

E-mail:yaoye@ujs.edu.cn

收稿日期:2015-08-04;收到修改稿日期:2015-10-13

后对所接收到的光进行分析,得出中心厚度。

1 测量装置的选择与控制方法

1.1 共焦光学系统设计

利用 ZEMAX^[8] 软件建立初始的共焦光学系统模型,如图 1 所示,初始结构选用的像方孔径为 0.3,物距无穷远,选用 486.133nm,587.560nm,656.270nm 作为设计波长。

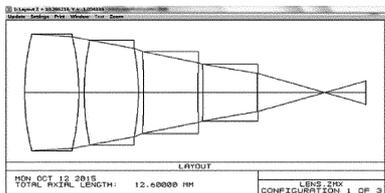


Fig. 1 Initial structure

通过 ZEMAX 的多重结构功能优化保证各波长在像面处的弥散斑最小,再利用 ZEMAX 所带的轴向色差,可以分析出位移与波长关系,如图 2 所示。

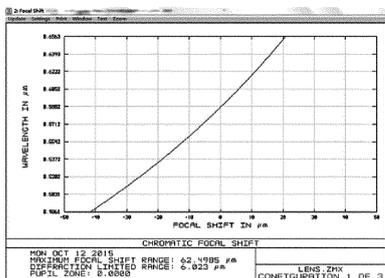


Fig. 2 Axial chromatic aberration

1.2 装置的选取

1.2.1 单探头装置测量原理 根据共焦法原理^[9-10],如图 3 所示,当被测透镜置于测量范围内时,从光源发出的探测光经光学系统聚焦到被测透镜上,如果物体恰好在某波长会聚的焦点上,则该波长的光在透镜表面发生反射,反射的光通过光学系统会聚到光纤探头。反射回来的光通过光纤传输给光谱仪,进行光谱分析再将所得数据传输给计算机,通过数据处理最终确定被测透镜厚度。图中, λ_{\max} 表示所能探测到的最长波长, λ_{\min} 表示所能探测到的最短波长。

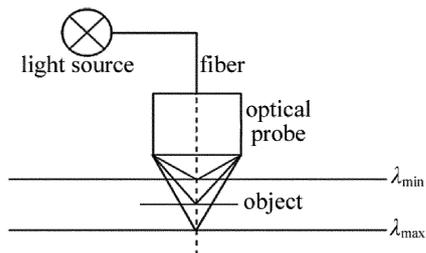


Fig. 3 Principle diagram of confocal measurement

图 4 所示为单探头装置测量原理图,图中 λ_1 和 λ_2 分别为上、下表面返回的波长,其对应的像方孔径

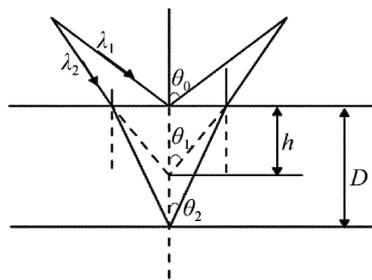


Fig. 4 Schematic diagram of single probe device

角分别为 θ_0 和 θ_1, θ_2 为 λ_2 的折射角,空气的折射率为 n_1 ,被检透明材料的折射率为 n_2, h 为 λ_1 和 λ_2 经过共焦系统成像后两个像点的距离, $f(\lambda)$ 为波长和位移之间的关系,透明材料的厚度用 D 来表示,即透镜的中心厚度也为 D 。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arcsin(n_1 \sin \theta_1 / n_2) \quad (2)$$

$$h \tan \theta_1 = D \tan \theta_2 \quad (3)$$

$$h = f(\lambda_2) - f(\lambda_1) \quad (4)$$

$$D = \frac{[f(\lambda_2) - f(\lambda_1)] \tan \theta_1}{\tan[\arcsin(n_1 \sin \theta_1 / n_2)]} \quad (5)$$

1.2.2 单探头装置测量误差分析 通过本文中所述可以看出,使用单探头时,光需要进入透镜内部,并在内部发生折射和反射等现象。原理部分所述为物体完全水平时的情况,当透镜有所倾斜时,就会产生偏折。

当所测透镜为平凸透镜时,如图 5 所示,图中 θ 为偏转角, i 为 λ_2 的像方孔径角, i' 为 λ_2 的折射角, s 为 λ_1 和 λ_2 经过共焦系统成像后两个像点的距离, R 为透镜的外半径, L 为倾斜时测得的透镜中心厚度, D 为实际透镜的中心厚度。

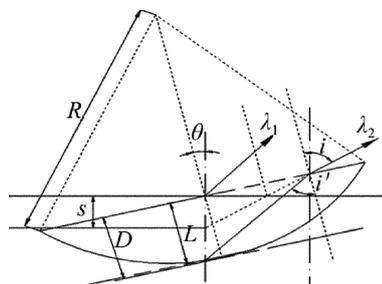


Fig. 5 Diagram of flat convex lens thickness of single probe

通过计算,有:

$$L = [f(\lambda_2) - f(\lambda_1)] \tan(i - \theta) (\cos \theta + \sin \theta \tan i) \cdot \frac{\cos \theta \cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin i}{n_2}\right)\right)}{\sin\left[\arcsin\left(\frac{\sin i}{n_2}\right) - \theta\right]} \quad (6)$$

由此,透镜中心厚度为:

$$D = R - \sqrt{R^2 - (L \tan \theta)^2} + L \quad (7)$$

由以上分析可以看出,当使用单探头时,对装置的垂直度要求非常高,有一点点偏角都会引起较大的误差。因此,本文中采用了双面共焦测量透镜中心厚度的方法。

1.2.3 双面共焦^[11]测量原理及方法 如图6所示,该装置是将光源发出的光通过耦合进入光学探头,利用共焦原理,探头1接收上表面反射回的光,探头2接收下表面反射回的光,然后通过把数据反馈给计算机就可以得到透镜的中心厚度。

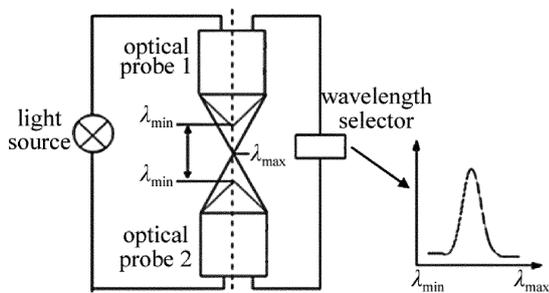


Fig. 6 Principle diagram of double probe device

两个探头由光开关控制,开始测量时,先用已知厚度为 d 的物体进行标定,然后对透镜进行定心操作,通过光开关的控制,使光学探头1处于工作状态,这时候计算机通过反馈的波长记录下共焦响应信号移动的位移 Z_1 ;再通过光开关的控制,使光学探头2处于工作状态,这时候计算机通过反馈的波长记录下共焦响应信号移动的位移 Z_2 。计算机显示透镜中心厚度为:

$$D = d + Z_1 + Z_2 \quad (8)$$

在双探头测量装置中,采用的探头型号均为 CL5-MG20,探头光斑大小为 $24.5\mu\text{m}$,横向分辨率为 $12.3\mu\text{m}$,每个探头的探测范围为 $0.55\text{mm} \sim 15\text{mm}$,故装置的测量范围能达到 30mm 。光谱仪选用 USB2000+, $200\text{nm} \sim 850\text{nm}$ 的波长范围,分辨率可达 0.35nm 。

该装置相比较单探头装置的优点在于:(1)每个探头只需探测返回波长的第一峰,解决了在镜片镀膜情况下需要辨认假峰存在的问题,可以实现对镀膜镜片进行厚度的检测;(2)利用了两个探头,减去了因光进入透镜内发生折射反射等产生的误差,提高了测量的精度;(3)这种测量方法同时可以用在双面可反射但不透明的物体的厚度测量,拓宽了基于共焦法测量的测量范围。

2 误差分析

在本装置的使用过程中,主要引起误差的有以下几个方面。

(1)理论误差。因为对共焦法来说,是通过使用公式来拟合反射光波峰值位移以及厚度变化,拟合的

偏差会直接影响实验结果,所以对于此类误差可以通过增加采样点来校正。

(2)机械结构及人为误差。在实际的装配过程中,光源中心和透镜中心可能不能理想重合在一条直线上,当存在一定的偏转角时,会产生透镜中心厚度误差,如图7所示。图中, θ 为偏转角, L 为通过返回的 λ_1 和 λ_2 波长所测出的距离,即倾斜时测得的透镜中心厚度, R 为透镜的外半径, D 为透镜的中心厚度。

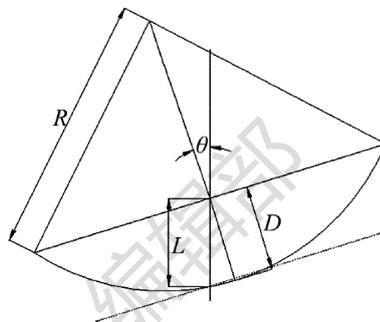


Fig. 7 Diagram of flat convex lens thickness of double probe

由图7可得透镜中心厚度误差为:

$$\Delta D = R - \sqrt{R^2 - (L \sin \theta)^2} + L \cos \theta - L \quad (9)$$

所以在装配时,需要工作人员规范并细心操作来减少误差量。同时,测量者在操作前要做好调零、校准、标定等工作,按要求放置好被测物体,以消除人为的主观误差。

(3)条件误差。在实际测量过程中,温度和微震动以及杂散光都可能引起实验结果的偏差,因此在实际进行测量时,尽量在恒温环境以及防震性能好的工作台上进行。同时为了避免杂散光的干扰,采用的装置为光开关控制探头,减去了因为两个探头发出的光源互相影响而造成的误差。

3 实验结果

本实验中采用的样品为已经标定好的平凸透镜和双凸透镜各5组,其中双凸透镜的材料为 H-K9L,折射率 $n = 1.5168$,通过标定不同的透镜对每组透镜进行重复测量,测量数据如表1和表2所示。用2号透镜进行标定时所测数据如表1所示。用4号透镜进行标定时所测数据如表2所示。

平凸透镜的材料为 H-LAF2,折射率 $n = 1.717$,通

Table 1 Measurement values of each biconvex lens with No. 2 lens

number of lens	standard value/mm	observed value/mm
1	10.487	10.487
2	10.525	10.525
3	10.526	10.528
4	10.530	10.532
5	10.522	10.524

Table 2 Measurement values of each biconvex lens with No. 4 lens

number of lens	standard value/mm	observed value/mm
1	10.487	10.488
2	10.525	10.524
3	10.526	10.528
4	10.530	10.530
5	10.522	10.522

过标定不同的透镜对每组透镜进行重复测量,测量数据如表3和表4所示。用1号透镜进行标定时所测数据如表3所示。用3号透镜进行标定时所测数据如表4所示。

Table 3 Measurement values of each flat convex lens with No. 1 lens

number of lens	standard value/mm	observed value/mm
1	6.954	6.954
2	6.957	6.956
3	6.955	6.955
4	6.952	6.954
5	6.954	6.954

Table 4 Measurement values of each flat convex lens with No. 3 lens

number of lens	standard value/mm	observed value/mm
1	6.954	6.954
2	6.957	6.958
3	6.955	6.955
4	6.952	6.954
5	6.954	6.954

从以上实验数据的对比可以看出,本透镜中心厚度的测量装置的精度能达到 $2\mu\text{m}$,满足测量精度的要求。

4 结论

为了实现对透镜中心厚度简单、高速的非接触测量,提出了一种非接触测量透镜中心厚度的方法,同时设计了一套基于双面光学共焦的透镜中心厚度的测量装置。介绍了基于共焦法测量透镜中心厚度的测量原理,利用不同波长的光会聚在不同焦点的特性,建立了

共焦光学系统,并对单探头透镜中心厚度测量装置和双探头透镜中心厚度测量的装置进行了分析比较。装置可对非透明物体进行厚度的测量。实验结果表明,本装置的测量范围能达到 30mm ,测量精度为 $2\mu\text{m}$,完全能达到实际测量的需要。该装置操作简单、快速、精度高,能达到实际生产的需求,并且该装置同时可以测量镀膜镜片以及非透明物体等,应用面比较广泛。

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(in Chinese).
- [2] XIONG Zh Y, ZHAO B. Design of a new laser thickness measurement instrument[J]. Laser Technology, 2011, 35(5):614-617(in Chinese).
- [3] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics[M]. 3rd th. Beijing: Mechanical Engineering Press,2011;33-37(in Chinese).
- [4] GAO M, HUANG D J, LIU J. The measurement instrument of center thickness of lens [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2003, 23(3):234-236(in Chinese).
- [5] QIAO Y, ZHANG N, LIU T, et al. Optical system design for the measurement of thickness of lens based on confocal technology[J]. Optical Technique, 2010, 36(6):857-859(in Chinese).
- [6] MATTHIAS K, JOCHEN S. Noncontact measurement of central lens thickness[J]. Glass Science and Technology, 2005, 78(5):245-247.
- [7] 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):29-31(in Chinese).
- [8] HUANG S, DENG L Y, YANG H, et al. Homogenization design of laser diode based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2014, 38(4):523-526(in Chinese).
- [9] ZHU W B, ZHONG J, MO R Y, et al. Design of spectral confocal design of spectral confocal chromatic displacement sensor objective[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8):62-66(in Chinese).
- [10] QIAO Y, ZHANG N, XU X P. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(7):1635-1641(in Chinese).
- [11] YANG M S, XING P F, GAO D Z, et al. Measurement of thickness of foils based on conjugated confocal micro-displacement sensors [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(s1):577-578(in Chinese).