

文章编号 1004-924X(2012)07-1469-06

## 光学相干层析技术在光学表面间距 测量中的应用

王志斌<sup>1,2</sup>, 史国华<sup>1\*</sup>, 何益<sup>1,2</sup>, 丁志华<sup>3</sup>, 张雨东<sup>1</sup>

(1 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**搭建了适于镜头中光学表面间距测量的实验装置,用于非接触高精度测量镜面间距。该装置以光纤型时域光学相干层析系统为基础,通过光学表面的层析成像精确测量其相对位置。对样品扫描装置进行了改进,利用高精度导轨移动光纤准直器来移动成像范围,实现对不同深度光学表面的层析成像。利用实验测量系统完成了对空气间隙样品及已装调好镜头的光学表面间距的测量,其中空气间隙样品的测量值为 6.026 mm,用游标卡尺得到的对比测量值为 6.02 mm;对镜头关键参数空气间隙的测量值为 10.750 mm,其设计值为(10.7±0.03) mm。实验系统误差为 3.871 μm,测量灵敏度为 10.5 μm。结果显示该方法具有非接触、高精度、高灵敏度的特点。

**关键词:**相干光学;光学相干层析成像;光学表面;间距测量

**中图分类号:**TP391.41;TH816.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1469

## Application of optical coherence tomography to distance measurement of optical surface

WANG Zhi-bin<sup>1,2</sup>, SHI Guo-hua<sup>1\*</sup>, HE Yi<sup>1,2</sup>, DING Zhi-hua<sup>3</sup>, ZHANG Yu-dong<sup>1</sup>

(1. *Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: guohua\_shi@yahoo.com.cn*

**Abstract:** A measuring system based on optical coherence tomography was established to measure the distance of optical surfaces non-contactly. The system was developed by modifying the sample scanning device based on a time-domain optical coherence tomographic system. The tomographic images of optical surfaces in different depths were acquired by moving the fiber collimator in sample arm through a high precision guide. The distance of an air gap sample and a lens were measured by using this system. Results show that the measured value of air gap sample is 6.026 mm while it is 6.02 mm by u-

收稿日期:2011-12-23;修订日期:2012-02-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108082);中国科学院创新方向资助项目(No. KGCX2-Y11-920)

sing a vernier caliper. Furthermore, the measured value of air gap in the lens is 10.750 mm while its design value is  $(10.7 \pm 0.03)$  mm. The systematic error is  $3.871 \mu\text{m}$  and the sensitivity is  $10.5 \mu\text{m}$ . The measurement method is characterized by non-contact, high precision, and high sensitivity, and has great potential in optical material testing.

**Key words:** coherence optics; optical coherence tomography; optical surface; distance measurement

## 1 引言

光学表面间距包括镜片厚度和空气间隙厚度,是镜头设计中的重要参数,直接影响着镜头的成像质量,因此光学表面间距的测量在镜头加工、装校的质量控制等环节中有着重要意义。随着半导体、通讯、电子等领域的快速发展,与其相关的光学系统也愈趋复杂,对光学表面间距测量的要求也越来越高。目前仍普遍沿用的接触式测量方法存在某些缺点,例如:为避免划伤光学表面,通常在测量头与被测表面之间加一层保护纸,这不仅降低了测量精度,而且容易破坏一些特殊表面镀膜。因此,光学检测领域迫切需要一种高精度、非接触的光学表面间距测量手段。

1991年,美国麻省理工学院(MIT)的Huang等<sup>[1]</sup>提出光学相干层析技术(Optical Coherence Tomography, OCT),该技术有机结合了低相干干涉技术与共焦显微技术,具有出色的光学切片能力,可实现对亚表面微观结构横截面成像,已广泛应用于人眼结构成像<sup>[1-2]</sup>、玉石结构分析<sup>[3]</sup>等领域。OCT的前身低相干干涉技术广泛应用于一维测距,如1992年W. V. Sorin等<sup>[4]</sup>、1998年Masamitsu Haruna等<sup>[5]</sup>利用低相干反射计同时对间距和群折射率测量。低相干干涉技术主要为平行盘厚度测量,使用聚焦光束,测量范围较小。相比之下,利用OCT技术进行光学表面间距测量可以得到光学表面的二维或三维图像,结果更为直观,对倾斜的样品有更好的鲁棒性,具有非接触、高精度、快速等优点,并已得到原理性验证<sup>[6]</sup>。

本文利用OCT技术对实际镜头光学表面间距进行了测量,概述了OCT技术测距的原理并提出了其应用于大量程间距测量时的具体实施措施,最后对空气间隙样品和物镜样品进行了间距测量实验,并获得了较好的实验结果。

## 2 测量系统原理

测量系统以时域光学相干层析系统为基础,采用宽带光源。由于宽带光源的低相干性,只有当样品臂的后向散射或反射光与参考光光程差小于光源的相干长度时,才能发生干涉,即只有特定深度的后向散射或反射光才能发生干涉,干涉光光强在光程差为零时最大。当光学延迟线进行光程扫描时,参考光分别与样品不同深度的后向散射或反射光发生干涉,干涉光光强的包络代表样品深度方向上折射率的变化信息。当光学表面处折射率突变时,后向反射光最强,其干涉光强度也远大于其他深度位置的干涉光强度,为光强包络的峰值点。因为光学延迟线的光程变化严格可控,所以可以得到相邻包络峰值点对应的光程差,再除以材料折射率就得到对应的间距值。

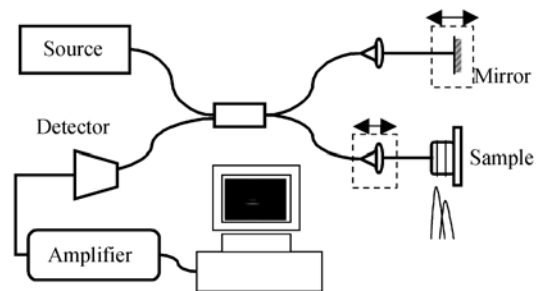


图1 测量系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

测量系统对干涉信号采样、滤波后,提取其强度包络,再根据相应算法重建层析图像。图像中灰度极值点之间的距离就代表相应光学表面的间距。灰度极值点是由干涉信号包络离散化得到的,因此一个像素点对应的光程变化量(空气中)即为图像中光学表面位置的定位极限误差。相干层析轴向分辨率决定了测量的灵敏度。

光学延迟线光程扫描范围一般在1~3 mm, 而一个镜头光学表面间的光程差可达上百毫米。通过改变参考臂和样品臂的光程匹配状况可以改变层析系统的成像范围。在样品臂中利用高精度导轨移动光纤准直器, 可得到不同深度位置光学表面的层析图像。最后结合成像范围的移动距离和相邻光学表面在各自层析图像中的位置, 计算出相邻光学表面的间距值。另外, 为实现大量程内的层析成像, 在样品臂中使用细平行光束代替聚焦光进行横向扫描。

### 3 实验用光学表面间距测量系统

图2为搭建的间距测量实验系统的结构示意图。系统采用中心波长 $\lambda$ 为1 310 nm, 带宽 $\Delta\lambda$

为95 nm的近红外宽带光源(BWC-SLD-1C, B & W Tek), 相干层析理论轴向分辨率 $\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = 7.97 \mu\text{m}$ 。入射光经50/50耦合器分别进入参考臂和样品臂。参考臂中的光学延迟线采用双通快速扫描延迟线(Rapid Scan Optical Delay Line, RSOD), 能够实现群延迟和相延迟的分离控制<sup>[7]</sup>。另外, 调节光栅和傅里叶透镜之间的距离可以实现参考臂与样品臂之间的色散匹配<sup>[8]</sup>, 消除色散不匹配对纵向分辨率的影响。光路中偏振控制器用于匹配样品臂与参考臂的光束偏振态, 使干涉信号强度最大, 从而提高系统的信噪比。电光相位调制器用于干涉信号的高频调制, 可以有效地避免低频 $1/f$ 噪声的干扰, 进一步提高信噪比。

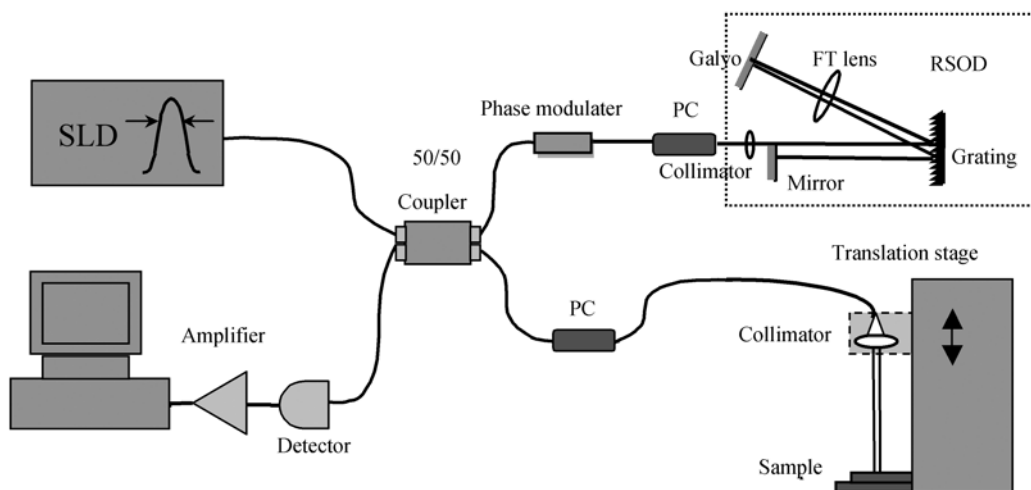


图2 光学表面间距测量实验系统结构图

Fig. 2 Block diagram of experimental distance measurement system

样品臂的入射光经光纤准直镜(PAF-X-2)整形为极细平行光束( $500 \mu\text{m}$ ), 投射到待测样品。光纤准直镜固定在高精度平移台上(SHOT-202, SIGMA KOKI), 平移台的读数精度为 $1 \mu\text{m}$ , 用于改变扫描层析成像范围。待测样品被置于精密电动平移台上, 从而实现了样品的横向扫描。

### 4 光学表面间距测量实验

测量系统采用由函数发生器生成的频率为500 Hz、峰峰值 $V_{pp} = 2.0 \text{ V}$ 的三角波驱动RSOD中的振镜进行光程扫描, 同时生成一个与三角波

信号有固定延迟、占空比可调(实验中设置采样点为2 048点, 延迟20%)的同步信号作为数据采集卡的采样触发信号。位相调制器调制频率为 $f_0 = 500 \text{ kHz}$ , 数据采集卡的采样速度为5 M/s。经标定, 实验系统的最大纵向扫描范围(空气中)为1.074 mm, 层析图像分辨率为 $800 \times 406$ , 即单个像素点对应的距离为 $2.645 \mu\text{m}$ 。

调整光栅和傅里叶透镜之间的距离以实现参考臂与样品臂之间的最佳色散匹配。测量系统对平面镜产生的干涉信号如图3所示, 从图3可得干涉信号的半峰全宽近似为 $10.5 \mu\text{m}$ , 接近相干层析的理论轴向分辨率, 该测量系统的灵敏度为 $10.5 \mu\text{m}$ 。

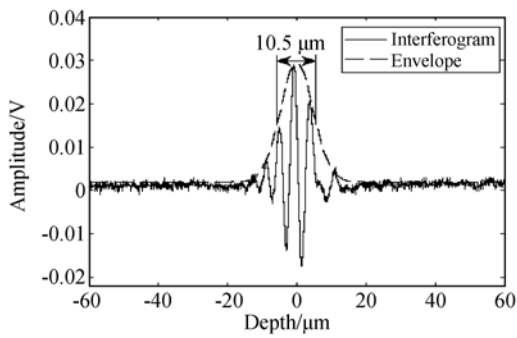
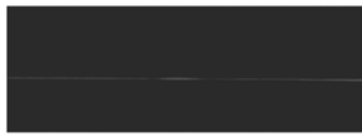


图 3 干涉信号

Fig. 3 Interference signal

为验证实验系统的间距测量效果,首先对一个空气间隙样品进行测量。在两平面镜之间放置一压条,构成一个固定间距值的空气间隙。图 4 (a)、(b)分别为空气间隙上表面和下表面的层析图像。在测量过程中,首先得到上表面的层析图像,然后向下移动样品臂光纤准直器,得到下表面的层析图像,移动距离为 6.070 mm。



(a) 上光学表面  
(a) Above surface



(b) 下光学表面  
(b) Lower surface

图 4 实验得表面层析图像

Fig. 4 Cross sectional images in experiment

由成像物理意义可得到光学表面间距计算公式为:

$$D_{opt-i} = \frac{d(L_{i+1} - L_i) + D_i}{n_i}, \quad (1)$$

其中:  $d$  为层析图像中单个像素点对应的距离(空气中),即  $2.645 \mu\text{m}$ ;  $L_i$  及  $L_{i+1}$  分别代表第  $i$  个和第  $i+1$  个光学表面对应的轴向灰度极值点在其层析图像中的位置,由于图像离散化,其误差范围为  $\pm 1$ ;  $D_i$  为层析成像范围的改变值,即光纤准直

器的移动量,精度为  $1 \mu\text{m}$ ;  $n_i$  为间距介质的折射率。上表面的像素位置为 234,下表面的像素位置为 218,得到空气间隙的厚度为  $6.026 \text{ mm}$ 。使用游标卡尺(测量精度为  $0.02 \text{ mm}$ )测得压条的厚度(即空气间隙值)为  $6.02 \text{ mm}$ ,粗略验证了系统的测量精度。

在测量过程中,对同一光学表面进行长时间连续扫描成像(15 min),光学表面对应的灰度极值点在图像中位置无变化,说明扫描延迟线的重复精度低于一个像素代表的距离,可在此忽略不计。故根据公式(1)可进行误差合成,可得实验系统的间距测量误差(空气中)为  $3.871 \mu\text{m}$ 。

然后对一物镜进行镜面间距测量,物镜及其结构示意图分别如图 5 所示。物镜共有 6 个面,测量其胶合在一起的两个镜面时视为一个面,由上至下分别记为镜面 1,2,3,4,5。物镜中光学表面镀有增透膜,膜层厚度为  $100 \sim 200 \text{ nm}$ ,在系统测量误差范围内可忽略。

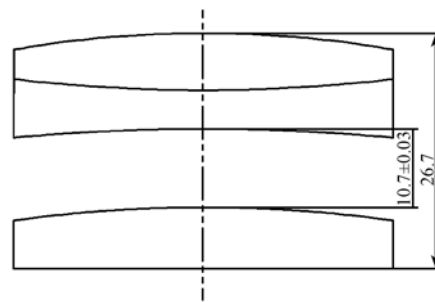
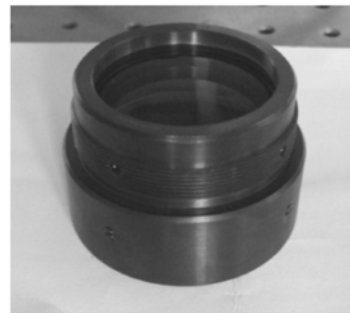


图 5 物镜实物及结构示意图

Fig. 5 Picture and schematic diagram of lens

首先确定物镜光轴位置:调整物镜位置,当样品臂后向反射光强最大时认为光线穿过物镜光轴。移动光纤准直器,依次得到各个镜面的层析图像,镜面层析图像及镜面间距测量结果如表 1 所示。


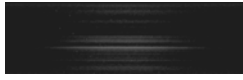
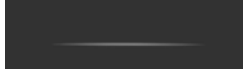


实验系统中,光源为宽带光源,而光学玻璃属于色散介质,因此  $n$  应为群折射率,应对玻璃在光源中心频率的折射率进行修正<sup>[9]</sup>。根据公式(2)

由介质在光源中心频率的折射率计算群折射率。

$$n_g = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (2)$$

表1 物镜镜面间距检测结果

Tab.1 Measurement results of distance between optical surfaces of lens

Optical surface	Cross sectional image of optical surface	Position of optical surface in image	Amount of movement of fiber collimator/mm	Group refractive index	Distance of optical surface /mm
1		137			
2		244	8.865	1.519 318	6.021
3		235	6.591	1.615 326	4.066
4		234	10.756	1.000 27	10.750
5		237	9.500	1.603 536	5.929

物镜的空气间隙测量值为 10.750 mm,各透镜中心厚度分别为 6.021, 4.066, 5.929 mm,与其设计值相当一致,这验证了该测量方法在实际应用中的有效性。第二个光学表面(即胶合面)图像信噪比较低且有多层反射界面,取亮度最大的一个反射面作为胶合面位置,主要原因是胶合面的胶折射率不均匀且有不同偏振取向,可利用偏振 OCT 对胶合层的厚度进行测量,进而分析其对镜头光学特性的影响。OCT 的测量光程变化范围近 40 mm,对光学表面有较好的信噪比。

影响实验测量精度的因素有:随着深度位置的改变,测量系统色散匹配发生改变;物镜被直接放置在横向平移台上,并未对物镜可能的倾斜进

行调整,扫描时极细光束可能未与物镜光轴重合。下一步的工作可以将测量系统与物镜定中心系统结合起来。

## 5 结 论

本文利用光学相干层析技术实现了对镜头中光学表面间距的测量。系统测量灵敏度为 10.5  $\mu\text{m}$ ,对空气间隙测量的系统误差为 3.871  $\mu\text{m}$ 。该方法作为现有光学表面间距测量方法的补充,具有非接触式、高灵敏度、高精度的特点,因此在光学检测领域具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(22):1178-1181.
- [2] 史国华,丁志华,戴云,等.光纤型光学相干层析技术系统的眼科成像[J]. *中国激光*, 2008, 35(9):

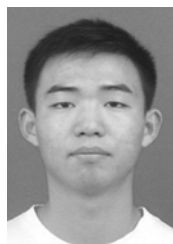
1429-1431.

SHI G H, DING ZH H, DAI Y, *et al.*. Ophthalmic imaging by optical coherence tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9): 1429-1431. (in Chinese)

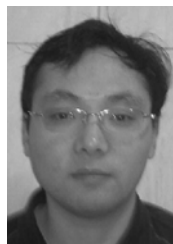
- [3] 曾楠,何永红,马辉.用于玉石结构分析的相干层析技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1335-1342.

- ZENG N, HE Y H, MA H. Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008,16(7):1335-1342. (in Chinese)
- [4] SORIN W V, GRAY D F. Simultaneous thickness and group index measurement using optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992,4(1):105-107.
- [5] HARUNA M, OHMI M, MITSUYAMA T, *et al.*. Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(12):966-968.
- [6] 史国华, 饶学军, 丁志华, 等. 基于光学相干层析技术的光学表面间距测量方法 [J]. *中国激光*, 2009, 36(2):210-214.
- SHI G H, RAO X J, DING ZH H, *et al.*. Distance measurement of optical surface based on optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2):210-214. (in Chinese)
- [7] TEARNEY G J, BOUMA B E, FUJIMOTO J G. High-speed phase-and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(23):1811-1813.
- [8] 杨亚良, 丁志华, 俞晓峰, 等. OCT 系统中基于快速扫描光学延迟线的色散补偿 [J]. *光子学报*, 2008, 37(1):21-24.
- YANG Y L, DING ZH H, YU X F, *et al.*. Dispersion compensation in OCT system by rapid scanning optical delay line [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1):21-24. (in Chinese)
- [9] 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):1075-1078.
- LI H, XIE SH S, LU ZH K. Dispersive, group velocity and refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(12):1075-1078. (in Chinese)

#### 作者简介:



王志斌(1990—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2010年于中国科技大学获学士学位,主要从事生物医学光学成像方面的研究。E-mail: zbwang16@gmail.com



史国华(1981—),男,浙江人,博士,助理研究员,2011年于中国科学院光电技术研究所获博士学位,主要从事生物医学光学成像,特别是光学相干层析及其应用方面的研究。E-mail: guohua\_shi@yahoo.com.cn



何益(1984—),男,四川人,博士研究生,2008年于中国科技大学获学士学位,主要从事生物医学光学成像方面的研究。E-mail: jemy@mail.ustc.edu.cn



丁志华(1967—),男,浙江开化人,教授,博士生导师,1989年于浙江大学获学士学位,1996年于中国科学院上海光学精密机械研究所获博士学位,主要从事生物医学光学成像方面的研究。E-mail: zh\_ding@zju.edu.cn

#### 导师简介:



张雨东(1964—),男,福建人,研究员,博士生导师,1984年于浙江大学获学士学位,1987于中科院光电技术研究所获硕士学位,1991于中科院上海光学精密机械研究所获博士学位,现为中国科学院光电技术研究所所长,主要从事自适应光学及其应用方面的研究。E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn