

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0210-05

基于光学相干层析技术的光学表面间距测量方法

史国华^{1,2} 饶学军¹ 丁志华³ 张雨东¹ 姜文汉¹

(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 介绍了利用光学相干层析技术(OCT)实现光学表面间距测量的方法。通过采用近红外宽带光源,结合迈克尔逊干涉仪和外差探测技术,建立了一套光纤型光学相干层析系统,并利用这套系统实现了对盖玻片堆快速(500 Hz)、高灵敏度(6.7 μm)、高精度(约 2.07 μm)、非接触式的光学表面间距测量,取得了较好的实验结果。该方法采用了光纤化的结构设计,使得系统紧凑、灵活,作为现有光学表面间距测量方法的补充,将在光学材料检测、光学加工、光学装校等领域具有良好的应用前景。

关键词 测量;光学相干层析成像;光学表面;间距

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0210

Distance Measurement of Optical Surface Based on Optical Coherence Tomography

Shi Guohua^{1,2} Rao Xuejun¹ Ding Zhihua³ Zhang Yudong¹ Jiang Wenhan¹

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract This paper describes the distance measurement of optical surface based on optical coherence tomography (OCT). A single-mode fiber-designed OCT system is developed which consists of a near infrared light source, a Michelson's interferometer and optical heterodyne detection. Distance testing experiment of range cover glasses is carried out by using this OCT system. The result shows this measurement system has the features of high speed (500 Hz), high sensitivity(6.7 μm), high precision(about 2.07 μm), and it is a non-contact type. The designed fiber system is compact and flexible, and it has great potential in optical material testing, optical manufacture, and optical alignment.

Key words measurement; optical coherence tomography; optical surface; distance

1 引 言

镜头是光学系统的最基本单元之一,其光学表面之间的间距直接影响光学系统的成像质量,因此镜头光学表面的间距测量在光学设计、光学加工、光学装校等领域具有很重要的意义。由于技术的发展,对光学系统的成像质量要求也越来越高,特别是目前应用较为广泛的“数码镜头”和“CCD 扫描镜

头”,其透镜中心厚度的加工精度一般为 0.005~0.01 mm,而加工与装校是否满足了公差要求,需要有高精度的仪器来测量和检验。目前主要的检测手段分非接触式测量与接触式测量两大类。非接触式测量主要有:激光散斑技术^[1]、光学投影成像技术^[2]等。但国内仍然普遍沿用接触式方法进行测量。接触式测量,一方面由于受测头大小的影响,对凹透镜

基金项目: 国家 863 计划(2008AA02Z422)资助课题。

作者简介: 史国华(1981—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事光学成像方面的研究。

E-mail: guohua_shi@yahoo.com.cn

导师简介: 张雨东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn

来说,中心厚度无法精确测量;另一方面测量力易使零件表面损伤;而且接触式测量的耗时长,无法在光学加工和装较的过程中实现实时引导。

光学相干层析技术(OCT)是在20世纪90年代开始发展起来的新型的成像技术,它类似于B型超声成像,将低相干干涉仪和共焦扫描显微术有机结合,运用现代计算机图像处理技术,是高纵向分辨率和高横向分辨率的完美结合,而且具有非接触性,因此1991年Huang等^[3]首次利用OCT获得了人视网膜的细微结构和冠状动脉壁的结构成像。1998年Haruna等^[4]提出利用OCT对物体进行厚度测量的方法。目前,OCT已广泛应用于生物组织结构成像^[3,5]、生物组织参数测量^[6,7]等诸多领域。

本文介绍了利用OCT的纵向层析特性来实现光学表面间距的最新进展,描述了OCT原理及其应用于光学表面间距测量的具体实施措施,利用实验室建立的OCT系统对盖玻片样品进行了间距测试实验,并获得了较好的测量结果。

2 光学相干层析技术原理

如图1所示,OCT本质上就是低相干干涉仪。宽带光源发出的光束分别进入放有反射镜的参考臂和放有被测样品的样品臂。当这两路光返回耦合器时,就会在耦合器发生干涉,干涉信号被光电探测器接受,然后传送到电脑进行处理。由于系统采用低相干光源,其相干长度很小,当参考臂光程固定时,只有来自样品内部特定深度点的反射光才能和参考光发生干涉,因此移动参考臂中的反射镜位置,改变参考臂光程,便可获得沿样品深度方面的干涉信号序列。干涉信号序列经过模数转化进入电脑,再通过离散傅里叶变化实现对干涉信号的解调,并获取干涉信号的包络序列,最后利用包络序列表征样品

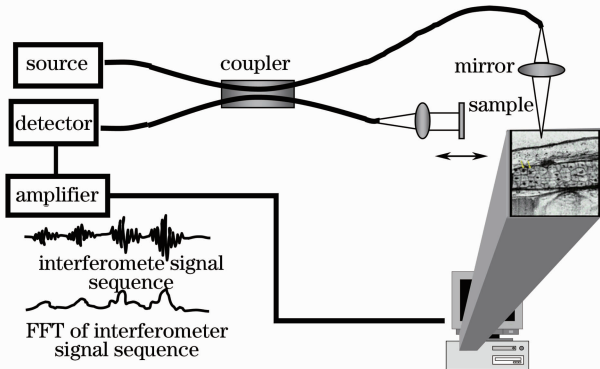


图1 光学相干层析原理示意图

Fig. 1 Schematic of optical coherence tomography

深度方面的灰度信号,从而实现对样品深度方面的层析成像。

由于OCT系统是利用样品的单次反射光成像,在样品中只有具备折射率突变的光学表面,才能实现层析成像,因此干涉信号包络序列中,相邻包络之间的中心距离就代表相邻的两个折射率突变的光学表面的间距;而且在利用反射镜进行扫描的过程中,反射镜的光程变化是严格可控的,所以通过获取相邻包络中心对应的反射镜位置,就可以实现对两个折射率突变光学表面的间距测量。因此利用OCT测量光学表面间距时,其系统纵向分辨率(最小可测量的纵向距离)就决定测试的灵敏度,其最小可定位的参考臂光程改变量,就决定测试的精度。

3 实验用光学相干层析系统

图2所示为实验中所用光纤型光学相干层析成像系统布局。系统采用中心波长 λ 为840 nm,带宽 $\Delta\lambda$ 为50 nm的近红外宽带光源(SLD-371-HP-DIL-SM-PD, SUPERLUM),其理论纵向分辨率 $\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = 6.23 \mu\text{m}$ 。入射到样品臂的光经准直镜和聚焦物镜投射到待测样品;待测样品被置于精密电动平移台上,并利用平移台实现对样品的横向扫描。偏振控制器用于实现样品臂与参考臂光束偏振态匹配,通过选取具有最强干涉信号的偏振态光束,使得系统具有较高的信噪比。

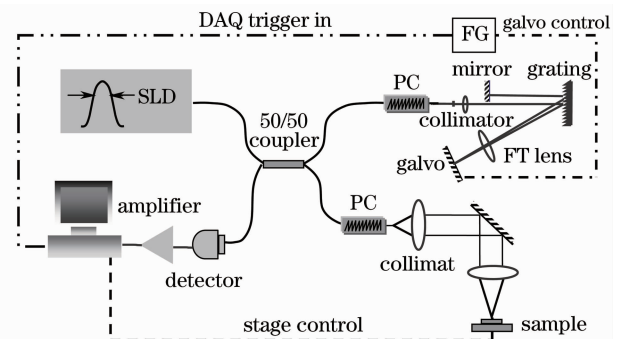


图2 实验用光学相干层析系统布局。SLD:超辐射光源; FT lens:傅里叶透镜;PC:偏振控制器;FG:函数发生器;DAQ:数据采集卡

Fig. 2 Block diagram of experimental OCT system. SLD: superluminescent diode; FT lens: Fourier transform lens. PC: polarization controller; FG: function generator; DAQ: date acquisition

由于OCT采用宽带光源,使得色散对于系统纵向分辨率具有巨大的影响。参考臂与样品臂两支光路的色散不匹配,会使干涉信号被展宽,甚至出现

双干涉峰,从而降低系统的纵向分辨率。为了克服色散对纵向分辨率的影响,系统采用由准直镜、光栅(光栅栅距 $d = 1 \text{ mm}/300$)、傅里叶透镜($f = 60 \text{ mm}$,大恒新纪元)、振镜(Model 6220, Cambridge Technology)和反射镜组成的双通快速扫描光学延迟(Rapid Scan Optical Delay, RSOD)线作为参考臂。双通 RSOD 能够实现群延迟和相延迟分离控制^[9]。通过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,从而保证系统获取近似于理论值的纵向分辨率。此外为了提高信噪比,系统中利用双通 RSOD 实现相位调制。在已经实现参考臂和样品臂色散匹配和光程

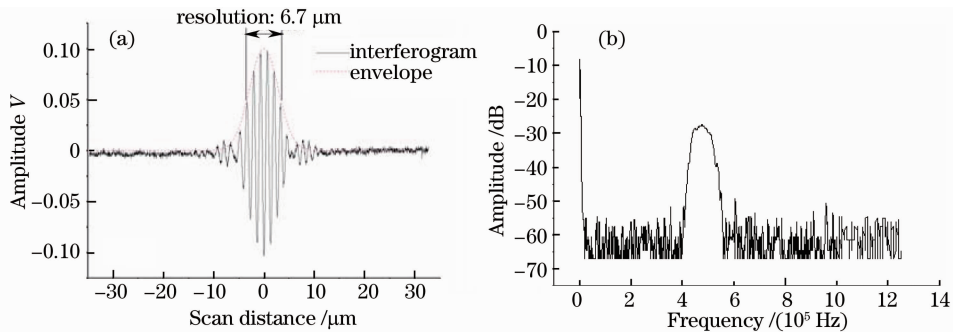


图 3 (a) 干涉信号;(b) 干涉信号的频谱

Fig. 3 (a) Interference signal; (b) frequency spectrum of the interference signal

4 光学表面间距测量实验

系统的纵向扫描是由 RSOD 的群延迟决定的,且可以事先精确标定其扫描范围。当振镜偏移距离 $x = 3 \text{ mm}$,使用频率为 500 Hz 、峰峰值 $V_{pp} = 2.0 \text{ V}$ 的三角波驱动进行纵向扫描,并采取单边扫描采样时,系统最大纵向扫描范围(空气中)为 2.12 mm 。由于三角波信号在极值点附近具有斜率突变的特性,因此在靠近极值点附近的区域内,振镜扫描速度不稳定。为了跳过这些不稳定的区域,系统中通过控制函数发生器,生成一个与振镜驱动信号相关的、占空比可调(实验中占空比为 25%)的同步信号,并把此信号作为数据采集卡的采样触发信号。振镜驱动信号与采样触发信号之间的关系如图 4 所示。从图 4 可以看到,采样区域远离三角波的极值点,从而避开了不稳定的扫描区域。

实验中采用折射率 $n = 1.515$,厚度标称值为 $175 \mu\text{m}$ 的盖玻片作为样本。实质上只需要一维的纵向扫描信号就可以实现对光学表面的间距测量。实验系统的纵向扫描速度为 500 Hz ,因此获取盖玻片一维纵向扫描信息只需要 2 ms 。但是为了直观

匹配的情况下,改变振镜转轴相对光轴的偏移距离 x ,就可以实现对样品臂光束的相位调制。考虑到系统探测器带宽、干涉信号强度以及系统调节的方便性,系统中采用由函数发生器生成的频率为 500 Hz ,峰峰值 $V_{pp} = 2.0 \text{ V}$ 的三角波驱动振镜进行纵向扫描,并选择 $x = 3.000 \text{ mm}$,此时系统调制频率为 $f_0 = 500 \text{ kHz}$ 。系统实际干涉信号及其频谱如图 3 所示。从图 3(a)可以看出系统干涉信号的半峰全宽(FWHM)近似为 $6.7 \mu\text{m}$,接近于理论纵向分辨率,因此也可以认为该测量系统的灵敏度为 $6.7 \mu\text{m}$;图 3(b)中干涉信号的中心频率大于 2 倍的信号带宽,满足奈奎斯特采样定律。

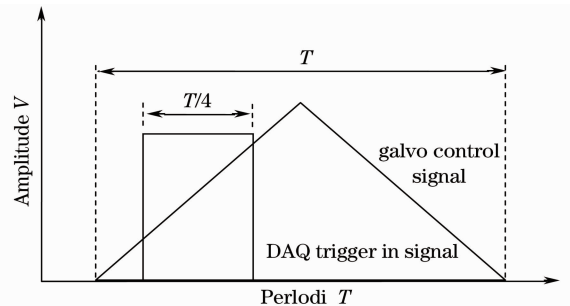


图 4 振镜驱动信号与采样触发信号关系图

Fig. 4 Relationship of galvo control signal and DAQ trigger in signal

的显示光学表面的结构,在实验中结合 RSOD 的纵向扫描与精密平移台的横向扫描(扫描区域为 2 mm),每秒钟获取 4 张像素数为 $800 (X) \times 512 (Z)$ 的被测样品二维层析图像。图 5(a)为盖玻片堆的二维层析图像,间距较大的两条亮线分别代表一块盖玻片的上下表面,因此图中包含有 3 块完整的盖玻片,以及第四块盖玻片的上表面,间距较短的两条亮线表示盖玻片之间的空气间隔,因此图中有 3 层空气间隔。图 5(b)是样品干涉信号包络沿图 5(a)所示箭头线方向(一维纵向)的分布图。相

邻干涉信号包络的中心距就代表相应折射率突变表面的距离(空气中)。相应的间距可表示为

$$D = \frac{d(N_i - N_{i+1})}{n}, \quad (1)$$

式中 D 代表相邻两个光学表面的间距, d 代表单个像素点表示的间距(空气中), 也代表系统测量精度; N_i 代表干涉信号包络的中心像素点位置, N_{i+1} 代表相邻的下一个干涉信号包络的中心像素点位置, n

代表两个光学表面之间的介质折射率。

实验中采用占空比为 25% 的采样触发信号, 对应的纵向扫描范围为 1.06 mm(空气中), 纵向扫描点数为 512, 因此 Z 方向单个像素点代表 $2.0703125 \mu\text{m}$ (空气中)的间距; 通过图 5(b) 可以获得干涉信号包络中心对应的像素点位置, 最终的计算结果如表 1 所示。

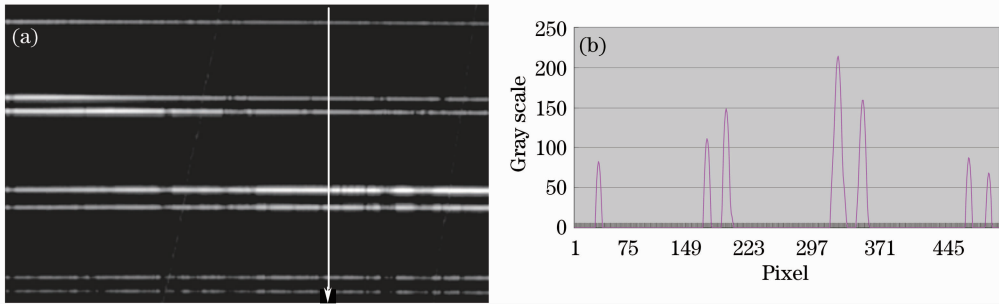


图 5 (a) 盖玻片堆成像结果图; (b) 沿箭头方向的干涉信号包络分布

Fig. 5 (a) Image of range cover glasses; (b) interferogram envelope along the arrow

表 1 三层盖玻片间距检测的结果

Table 1 Measurement results of three cover glasses distance

	Optical interface	Position of interferogram envelope center(Pixel location)	Distance of optical interface / μm
First cover glass	Front surface	29	177.6506776
	Back surface	159	
First air gap			47.6171875
Second cover glass	Front surface	182	183.1167491
	Back surface	316	
Second air gap			60.0390625
Third cover glass	Front surface	345	173.5519967
	Back surface	472	
Third air gap			
Fourth cover glass	Front surface	496	49.6875000

从表 1 可以看到三块盖玻片的测量值与其标称厚度值相当吻合, 从而验证了本文方法的正确性, 同时也测定出盖玻片之间的空气间隙。需要指出的是, 由于盖玻片堆是随意放置的, 无法事先测定盖玻片之间的空气间隙, 因此实验中获取的空气间距无法比对。今后的工作是, 采用压电陶瓷代替扫描振镜, 从而进一步提高测试系统的测量精度; 采用极细光束照亮被测样品, 从而提高系统的纵向探测范围。

5 结 论

本文利用光学相干层析技术实现了对光学表面的间距测量, 该方法具有快速(500 Hz)、高灵敏度($6.7 \mu\text{m}$)、高精度(约 $2.07 \mu\text{m}$)、非接触式的特点。用该方法不仅可以测量光学镜头/材料的厚度, 而且

还可以同时获取光学镜头/材料之间的空气间距。该方法作为现有光学表面间距测量方法的补充, 可以精确地测量光学材料的厚度、验证光学设计的中心厚度参数、在线指导光学加工和装校, 因此具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- Zhao Dexin, Song Wei. Measurement of thickness and index of refraction of transparent medium[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(10): 785~787
赵德信, 宋 伟. 透明介质的厚度与折射率的测量[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(10): 785~787
- Liao Haiyang. Design of control lenses projection measuring instrument [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(3): 254~258
廖海洋. 隐形眼镜投影测量仪的设计[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(3): 254~258

- 3 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, **254**(22): 1178~1181
- 4 Masamitsu Haruna, Masato Ohmi, Teruki Mitsuyama *et al.*. Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12): 966~968
- 5 Shi Gaohua, Ding Zhihua, Rao Xuejun *et al.*. Optical coherence tomography by adopting frequency-domain optical delay line[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 1~4
史国华, 丁志华, 饶学军等. 采用频域快速延迟线的光学相干层析系统的研制[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 1~4
- 6 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern *et al.*. Determination of the refractive index of highly scattering human tissue by optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(21): 2258~2260
- 7 Hu Haifeng, Yao Jianquan. Application of Monte Carlo simulation technology in OCT imaging contrast[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 94~99
胡海峰, 姚建铨. 利用 Monte Carlo 模拟技术研究 OCT 图像对比度[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(1): 94~99