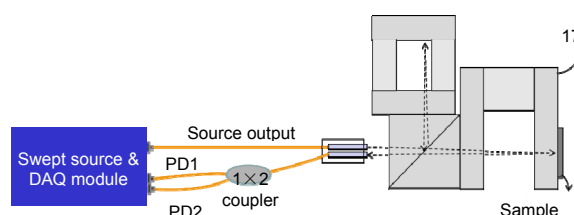


一种提高光学干涉系统稳定性的装置

肖青^{1,2*}, 傅谦², 张大龙², 刘侠^{1,2},
张大鹏², 王兴龙²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²珠海光库科技股份有限公司, 广东 珠海 519000



摘要: 基于光学干涉的测量方法, 通常都有高精度、高灵敏度的特点, 信号易受环境干扰而不稳定, 使用时须远离振源。若要将光学干涉系统用于在线检测, 必须提高其抗干扰性。本文在以前的工作基础上, 从干涉光路的实现方式着手, 制作了一套一体化的迈克尔逊干涉装置, 可用于多层光学平片的厚度检测。该装置通过巧妙的设计和高精密加工, 使整个光路结构为一整体, 避免了测量过程中外界干扰的影响。通过与光纤式迈克尔逊干涉系统做实验对比, 验证了该装置在测试过程中有良好的稳定性和抗干扰性。最后采用宽带光源干涉的方法对多层光学平片的厚度进行测量, 验证了该装置用于精密在线测量的可行性。

关键词: 光学器件; 在线检测; 光学干涉; 抗干扰; 厚度检测

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

A method to improve the stability of the optical interference system

Qing Xiao^{1,2*}, Qian Fu², Dabng Zhang², Xia Liu^{1,2}, Dapeng Zhang² and Xinglong Wang²

¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Advanced Fiber Resources (Zhuhai) Ltd., Zhuhai 519000, China

Abstract: The measurement system based on optical interference has obvious advantages of high precision and high sensitivity. However, the signal is easy to be disturbed by vibration from environment, so the system needs to stay away from the vibration source. To use the optical interference method for real-time measurement, it has to improve the system's stability. In this paper, we proposed an integrated Michelson interference device to measure the thicknesses of multiple layers of optical plate, which could improve the stability of the optical interference system in a new way. Through smart design and high precision processing technique, the light path of the structure was integrated into a whole, which could avoid disturbing successfully. Compared with fiber based interferometer, this device could bring obviously more stable signal. The thicknesses of the multiple layers of optical plate were measured to confirm its feasibility to do the real-time precision measurement.

Keywords: optical device; real-time measurement; optical interference; anti-interference; thickness measurement

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.008

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(11): 1089–1093

收稿日期: 2017-08-28; 收到修改稿日期: 2017-10-14

*E-mail: sophierxq@foxmail.com

1 引言

干涉测量技术在光学测量中占有重要地位,适用于对材料、元件、系统等各种参量的检测。干涉测量系统的基本原理都是将一束光分为两束,在其叠加时形成干涉图,由于探测光的波长非常短,两束光的传播距离稍有不同就能被检测出来,因为这些差异会在干涉图上产生明显的变化,光学干涉测量法具备高灵敏度和高精度的特点。也正是因为如此,干涉系统对外界环境极为敏感,任何扰动都会造成干涉条纹的明暗变化,导致干涉系统做测量时对环境要求极高,必须远离震源,而不适合用作在线检测。

随着精密工程和加工技术的不断发展,对干涉测量的精度、速度、抗干扰性提出了越来越高的要求。为了提高干涉技术的抗干扰性,有从光源着手的激光干涉测量技术^[1-4],从图像算法着手的后处理技术^[5-7],以及各种相移抗干扰术^[8-12]。本课题组之前从干涉光路的实现方式着手,提出并制作了一套一体化的迈克尔逊干涉装置,该装置通过巧妙的设计和精密加工,使整个光路结构为一整体,避免了测量过程中外界干扰影响,可在线检测单层光学平片的厚度^[13]。而本文在之前的工作基础上做了改进,使干涉装置能够对多层光学平片进行在线测量。装置做过改进后,通过与光纤式迈克尔逊干涉系统做实验对比,验证了该装置对抵抗环境干扰的效果。在3 kHz的成像速度下,光纤式的迈克尔逊干涉系统明显无法抵抗成像过程中外界的振动干扰,而本文的一体化迈克尔逊干涉装置很好地解决普通环境下的振动干扰问题。最后使用该装置通过宽带光源干涉的方法对多层盖玻片进行厚度测量,验证了该方法用于精密测量的可行性。

2 迈克尔逊干涉装置的制作

迈克尔逊干涉仪是由 Michelson A A 于 19 世纪 80 年代发明的第一台干涉仪,最早是为了研究光速问题而设计,之后被广泛地应用于各个领域的精密检测。尽管多年来该技术不断发展和改进,但迈克尔逊干涉仪的基本原理仍然是干涉测量法的核心。本文的干涉装置其具体结构如图 1 所示,光学模块包括分光棱镜、参考臂和样品臂三个部分,这三个部分通过光胶工艺连接在一起为一个整体,然后粘接在金属外封盒里面。一个双光纤准直器被焊接在金属外封上,其中一个光纤准直器作为输入端,另一个光纤准直器作为输出端,输出干涉信号光。光通过准直器进入到光模块后由分

光棱镜分成两束,进入参考臂和样品臂,两个臂为对称结构,分别由平行平板玻璃、连接块和反射镜组成。透光玻璃与分光棱镜的透光面紧密相连,反射镜通过连接块与透光玻璃和分光棱镜连为一个整体。反射镜其实是与透光玻璃相同材质的玻璃,参考臂 17 端面镀全反膜,样品臂 14 端面镀 AR 增透膜,待测样品用紫外胶预固定在 14 端面,光从样品表面反射回干涉光路进行干涉。该装置的外封结构如图 2 所示。

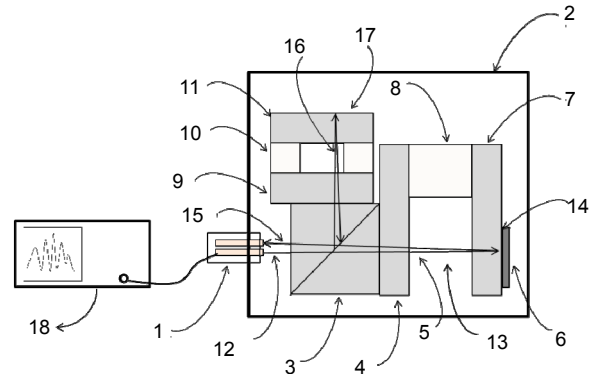


图 1 干涉装置结构示意图。1: 双光纤准直器。2: 金属外封。3: 分光棱镜。4: 透光玻璃。5: 透光窗口。6: 样品。7: 样品臂反射镜。8: 连接块。9: 透光玻璃。10: 连接块。11: 参考臂反射镜。12: 入射光束。13: 棱镜透射光束。14: 透射面 7 反射光束。15: 出射光束。16: 棱镜反射光束。17: 反射镜。11: 反射光束。18: 光波长测试系统。

Fig. 1 The configuration of the interferometer device. 1: Double-fiber collimator. 2: Metal box. 3: Beam splitter. 4: Link glass with clear aperture. 5: Optical window. 6: Sample. 7: Reflector in sample arm; 8: Link block. 9: Link glass with clear aperture. 10: Link block. 11: Reflector in reference arm. 12: Incident light. 13: Transmission light through beam splitter. 14: The transmission plane. 15: Exit light. 16: Reflection light through beam splitter. 17: Reflection light from reflector in reference arm. 18: Wavelength measurement system.

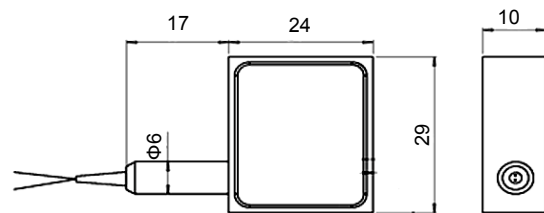


图 2 干涉装置外封尺寸图(标注单位: mm)。

Fig. 2 Dimension figure of the metal box (unit: mm).

为保证干涉结构的稳定性,采用光学性能好、耐高温、机械强度高、性能稳定的光胶法来粘合干涉结构中的各个光学模块。光胶法亦称光胶接触法,它

是依靠分子间的吸引力,使两个光学零件的抛光表面紧密贴合在一起。光胶工艺的实现并不容易,影响光胶的因素很多,除了极难的高精度抛光,另外零件受热不均,表面清洁度不够,都会导致光胶失败。根据设计要求,本课题组的超精细加工表面质量可以满足光胶工艺的要求。同时,各零件的尺寸的加工误差可以控制在微米量级以下,为光学延迟时间的精确控制打下了基础。使用光胶,还排除了胶水对通光表面光学性能的影响,以及胶水的应力和热膨胀系数对干涉结构光程差的影响。此外,装置的参考臂和样品臂采用的是对称结构,即两个臂光所经过的材料是完全相同的,这样可以使装置对温度变化做自动补偿。在材料选择方面,通光玻璃选用的是低热膨胀系数的康宁 fused silica 7980 玻璃,连接块采用的是热膨胀系数为零的微晶玻璃^[13]。

3 干涉装置稳定性对比实验

干涉测试系统采用 Axsun 的 OCT 光学引擎,该引擎包括 1310 nm 波段,50 kHz 扫频光源,K-clock,平衡探测器和高速数据采集卡,因此该引擎集成了光源和高速数据同步采集功能,数据为等频率间隔输出。光源的带宽为 110 nm,采样点为 1024。

光纤式光路系统相对空间的干涉系统有更好的抗干扰性,所以首先选择光纤式干涉系统验证受环境影响的程度。扫频光源输出后通过一个 50:50 的 1×2 的耦合器分到相同的两路,每路分别经过一个光环行器,然后由光纤准直器输出,光斑直径约为 400 μm,经过反射镜后返回,光再经由环形器输出,然后两路反射光通过一个耦合器耦合产生干涉信号,最后被一对平衡探测器接收。其具体的光路结构如图 3,为一个典型的光纤式迈克尔逊干涉结构。

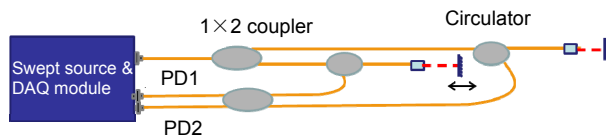


图 3 光纤式迈克尔逊干涉仪光路示意图。

Fig. 3 The schematic diagram of the fiber based Michelson interferometer.

系统的空间光路部分放置在 10 cm 厚的光学平台上,光纤光路部分放置在普通的木质工作台上,系统以 3.3 帧/秒的速度显示 1024 pixels × 1000 pixels 的二维干涉图样,那么二维干涉图表示对同一个样品位置连续成像 1000 次,也就是说对样品点的成像速度大于 3

kHz。在实验过程中发现测试结果受外界环境影响很大,比如轻微碰到工作台,在附近走动等都会使干涉条纹产生如图 4 所示的波动。这也验证了干涉系统对外界环境要求很高,必须远离振源,因此这种系统很难做成在线的检测设备。

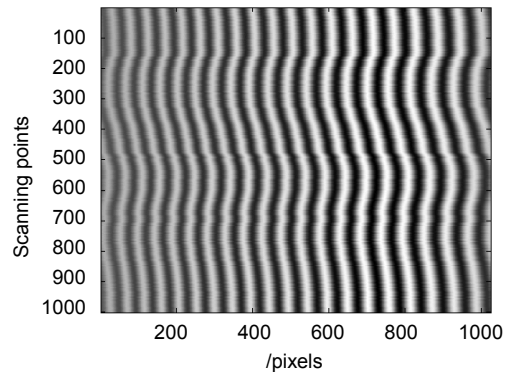


图 4 环境干扰对干涉条纹的影响。

Fig. 4 The influence of the environmental disturbance on the interference signal.

用本文的一体化干涉装置代替光纤式的迈克尔逊干涉结构,测试样品为反射镜,用紫外胶预固定在样品处,系统结构如图 5 所示。然后采用相同的实验条件:整个光学干涉系统放置在普通的木质工作台上,系统以 3.3 帧/秒的速度显示 1024 pixels × 1000 pixels 的二维干涉图样,即对同一个样品位置以大于 3 kHz

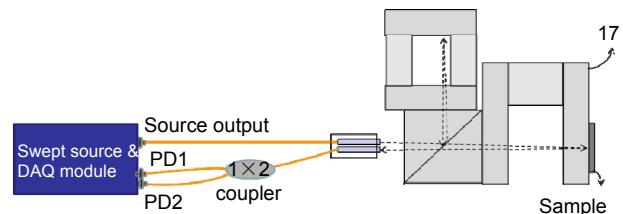


图 5 干涉测试系统图。

Fig. 5 Schematic diagram of the interference testing system.

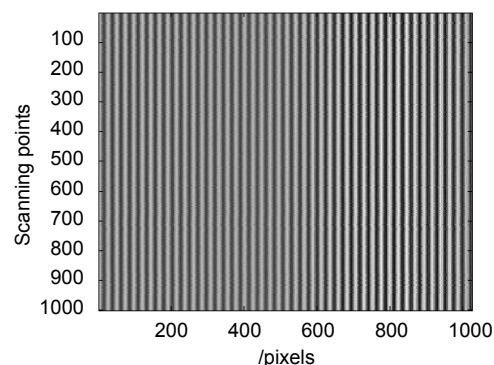


图 6 环境干扰对干涉条纹的影响。

Fig. 6 The influence of the environmental disturbance on the interference signal.

的速度成像,然后施加干扰,轻敲工作台,在附近跳起、走动,其结果如图6所示。从图6可以看出干涉信号非常稳定,几乎不受外界环境振动影响,显示了本文制作的干涉装置有很好的抗干扰性。

4 对光学平片厚度进行测量

光由宽带光源产生的干涉信号携带两个臂的光程差信息,并有如下关系:

$$F^{(s)}(z) \propto FT(I^{(s)}(K)), \quad (1)$$

即通过傅里叶变换,便可将探测器采集到的光谱信息(k 为波数)转换为深度位置信息。探测到的光谱是由 N 个扫描点组成,所以可以在计算机上通过快速傅里叶变换算法(fast Fourier transform, FFT)实现样品深度位置信息的重构。经过傅里叶变换后,在 z 空间会得到 $N/2$ 个离散的点(另外 $N/2$ 个点为复共轭信息,得到的是对称的信息)^[14,15],它们的间距为

$$\delta z = \frac{2\pi}{\Delta k} \quad (2)$$

考虑到光程在样品里的往返传播和样品的折射率,因此频域OCT的纵向视场为

$$\Delta z = \delta z \cdot \frac{N}{4} = \frac{N}{4n_{ave}} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = \frac{1}{4n_{ave}} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda} \quad (3)$$

其中: λ_0 为光源中心波长, $\Delta\lambda$ 为光源的FWHM宽度, n_{ave} 为样品的平均折射率, $\delta\lambda$ 为探测的光谱分辨率。

该光源光谱带宽为110 nm,根据光源的特性参数,高速采集系统去掉了光谱两端的数据,只取了中间91%的带宽,采样点为1024。根据式(2),探测的纵向分辨率由光源的中心波长和带宽决定,为8.57 μm 。

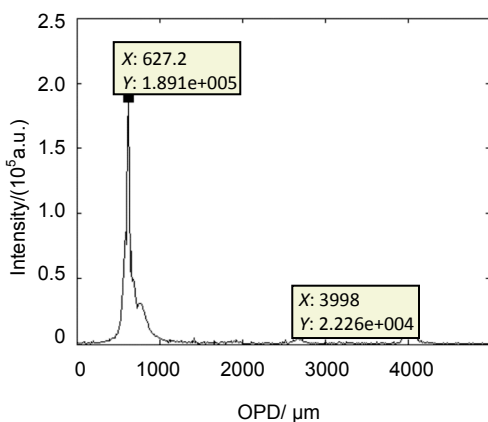


图7 OCT系统对玻璃片的厚度测量结果。
Fig. 7 The thickness testing result of a think glass by OCT system.

根据式(3),系统探测深度为5 mm(空气中)。

用图5的系统对厚玻璃片做测量,玻璃片紧靠在图5的样品(sample)处,并用紫外胶做预固定,然后对得到的干涉图样做FFT,得到如图7所示的结果,横坐标表示空气中的光程差,纵坐标对应反射面的强度信息。计算玻璃厚度为两个光程差值相减除以玻璃的折射率1.511,为2230.8 μm 。同一样品,使用VMS-1510高精度影像测量仪作对比测量,其结果为2225 μm (设备测试误差为 $(3+d/75)$ μm ,即32.7 μm)。另外用千分尺的测量结果为2221 μm (测试精度 ~ 10 μm)。其测量结果对比如表1所示。

表1 玻璃片厚度测量结果对比。

Table 1 The comparison of the thickness measurements results of the glass plate.

	迈克尔逊干涉系统	VMS-1510 高精度影像测量仪	千分尺
测量精度/ μm	8.6	32.7	10
测量结果/ μm	2230.8	2225	2221

对两层紧挨着的盖玻片测试,测试结果如图8所示。第一层盖玻片为181.6 μm ,第二次盖玻片为175.1 μm ,两层玻璃片的空气间隔为19.6 μm 。第一层盖玻片,使用VMS-1510高精度影像测量仪作对比测量,其结果为178 μm (设备测试误差为 $(3+d/75)$ μm ,即5.3 μm)。另外用千分尺的测量结果为172 μm (测试精度 ~ 10 μm)。第二层盖玻片,使用VMS-1510高精度影像

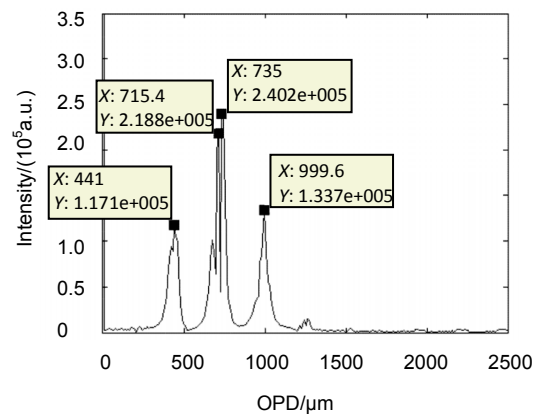


图8 OCT系统对两层盖玻片的厚度测量结果。
Fig. 8 The thickness testing result of two cover slices by OCT system.

测量仪作对比测量，其结果为 $173\ \mu\text{m}$ (设备测试误差为 $(3+d/75)\ \mu\text{m}$ ，即 $5.3\ \mu\text{m}$)。另外用千分尺的测量结果为 $170\ \mu\text{m}$ (测试精度 $\sim 10\ \mu\text{m}$)。其测量结果如表 2 所示。

表 2 两层盖玻片厚度测量结果对比。

Table 2 The comparison of the thickness measurement result of the two layer glass plates.

	迈克尔逊干涉系统	VMS-1510 高精度影像测量仪	千分尺
测量精度/ μm	8.6	5.3	10
第一层测量结果/ μm	181.6	178	172
第二层测量结果/ μm	175.1	173	170

5 结论

本文在之前工作的基础上，制作了一套一体化的迈克尔逊结构的干涉系统，用于测量多层光学平片的厚度。该装置是从迈克尔逊干涉结构的实现方式着手来提高干涉系统的抗干扰性。通过与光纤式迈克尔逊干涉系统进行实验对比，验证了装置测试干涉信号的稳定性，并通过宽带光源干涉的方法对多层光学平片厚度进行测量，验证了该方法用于精密测量的可行性。

参考文献

- He Guotian, Zeng Zhi, Li Ming. Real-time surface profile measurement in a laser diode Interferometer Insensitive to disturbance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 216–219.
何国田, 曾智, 李明. 实时测量表面形貌的抗振抗干扰半导体激光干涉仪[J]. *光学学报*, 2009, **29**(增刊 1): 216–219.
- Diao Xiaofei. Study on high speed heterodyne interferometer with spatially separated beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
刁晓飞. 基于空间分离的高速外差激光干涉测量若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Ai Yong. Laser diode active Interferometer with the strong ability of eliminating environmental disturbance by using sinusoidally modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, **21**(6): 463–468.
艾勇. 强抗干扰型正弦调制式半导体激光有源干涉仪[J]. *中国激光*, 1994, **21**(6): 463–468.
- Yu Xiangzhi, Li Zhengyong, Wang Zhihao, et al. Effect of temperature and vibration on optical fiber Mach-Zehnder interferometer and dynamic compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1041–1046.
余向志, 李政勇, 王志豪, 等. 温度和振动对光纤马赫-曾德干涉仪的影响与动态补偿研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1041–1046.
- Wang Fengpeng, Xie Xiaochun, Wang Xinghua, et al. An anti-jamming algorithm of phase extracting for dynamic interference fringes [J]. *Optics & Optoelectronic technology*, 2009, **7**(6): 37–40.
王凤鹏, 谢晓春, 王彤华, 等. 动态干涉条纹相位提取的抗干扰算法[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(6): 37–40.
- Tentory D. Homogeneity testing of optical glass by holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 1991, **30**(7): 752–755.
- Zhang Wenli, Tian Fengchun, Zhao Zhenzhen, et al. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2017, **44**(5): 488–497.
张文理, 田逢春, 赵贞贞, 等. 空间外差光谱仪的干涉图校正[J]. *光电工程*, 2017, **44**(5): 488–497.
- Ou Jianhai, Xu Kai, Zhou Yue, et al. An optical orthogonal heterodyne demodulation technology for interferometric fiber-optic sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 108–113.
区坚海, 徐恺, 周悦, 等. 干涉型光纤传感器光正交外差解调技术研究[J]. *光电工程*, 2012, **39**(4): 108–113.
- 刘乾. 抗振动移相干涉测量算法与实验研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
- Wang Ming, Hao Qun, Zhu Qidong, et al. Anti-disturbance phase-shifting interferometry method time-and-frequency-domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 146–150.
王明, 郝群, 朱秋东, 等. 时频域双重分析法抗干扰移相干涉术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 146–150.
- Lu Zhenyu, Zhu Rihong, Chen lei, et al. Simulation Study of Robust Control System for Optical Phase-Shifting Interferometer Vibration isolation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 332–334.
陆振宇, 朱日宏, 陈磊, 等. 光学移相干涉仪抗振系统的鲁棒控制系统仿真分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 332–334.
- Makosch G, Drollinger B. Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(24): 4544.
- Xiao Qing, Wang Xinglong, Fu Qian, et al. An Optical Device for On-Line Measurement of Thickness [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 293–299.
肖青, 王兴龙, 傅谦, 等. 一种用于厚度在线检测的光学装置[J]. *光学学报*, 2015, **35**(2): 223002.
- Wang R K. In vivo full range complex Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(5): 05413.
- Wang R K. Fourier domain optical coherence tomography achieves full range complex imaging in vivo by introducing a carrier frequency during scanning[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2007, **52**(19): 5897–5907.