

# 一种用于厚度在线检测的光学装置

肖青<sup>1,2</sup> 王兴龙<sup>2,\*</sup> 傅谦<sup>2</sup> 张大龙<sup>2</sup> 刘侠<sup>1,2</sup> 邓剑钦<sup>1,2</sup> 曹丁象<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

<sup>2</sup>光库通讯(珠海)有限公司, 广东 珠海 519000

**摘要** 设计并制作了一套基于迈克尔逊结构的光学装置,可用于利用干涉的方法对单层的透明或半透明薄膜或光学平片的厚度做在线检测,测量范围可从微米到毫米量级。该装置采用光胶工艺将不同长度和不同热特性的玻璃材料组合在一起,使装置能够对环境温度变化做自动补偿;同时,输入和输出光信号的光纤准直器与装置为一个整体,因此在检测过程中不像普通干涉系统一样易受外界干扰。使用 Agilent 波长测试仪对装置产生的干涉信号做检测,在振动的环境中,测量自由光谱范围(FSR)变化的95%置信区间为 $\pm 0.0005$  nm,体现了很好的抗干扰能力。为了演示该装置用作自动实时在线检测的可行性,检测了厚度为 $(177.4 \pm 0.7)$   $\mu\text{m}$ 的标准盖玻片,其结果与现有商用系统可比较。

**关键词** 光学器件;薄膜厚度在线检测装置;光学干涉;光胶法

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0223002

## An Optical Device for On-Line Measurement of Thickness

Xiao Qing<sup>1,2</sup> Wang Xinglong<sup>2</sup> Fu Qian<sup>2</sup> Zhang Dalong<sup>2</sup> Liu Xia<sup>1,2</sup>

Deng Jianqin<sup>1,2</sup> Cao Dingxiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Advanced Fiber Resources (Zhuhai) Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China

**Abstract** An optical device based on Michelson interferometer configuration is introduced, which can be used for on-line film thickness measurement. Optical cement is used to splice the glass modules with different lengths and thermal properties, so that the device can make compensation to the environmental temperature variation. Additionally, the double-fiber collimator which is used to input and output the optical signal and the device containing the glass modules are a whole. So the device will not be disturbed by the environment compared to the other interferometers during testing. The stability of the device is tested by an Agilent wavelength measurement system, and the output interference signal shows the excellent performance that the 95% confidential interval of the variation of the free spectral range (FSR) is  $\pm 0.0005$  nm in the disturbed environment (while the acquisition resolution of the Agilent system is 0.001 nm). So we believe this device can be used for on-line interference measurement. To demonstrate the feasibility of the automatic measurement of this device in real-time, the thickness of the cover slice is measured, the result is  $(177.4 \pm 0.7)$   $\mu\text{m}$ , which is comparable with the commercial thickness measurement equipment.

**Key words** optical devices; film thickness on-line measurement equipment; optical interference; optical cement

**OCIS codes** 230.1150; 120.3940; 120.3180

## 1 引言

薄膜或光学平片的厚度和及其均一性是检测薄膜质量的关键参数。与接触式的测量方法相比,光学方

收稿日期: 2014-09-11; 收到修改稿日期: 2014-10-16

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2011A090200035)

作者简介: 肖青(1983—),女,博士后,工程师,主要从事光学弱相干层析成像系统、光学成像、光学精密测量等方面的研究。E-mail: sophierxq@gmail.com

\*通信联系人。E-mail: xlwang@fiber-resources.com

法以非接触、无损的特点,在厚度测量领域占据着重要的地位,并且根据实际需求和应用,又被细分为很多种类,如干涉显微镜、椭圆偏振法<sup>[1-2]</sup>、反射光谱测厚法<sup>[3-5]</sup>和棱镜耦合法<sup>[6]</sup>等。但是光学方法在做检测时,对环境要求极高,还需要专业的操作和维护,不适合用作在线检测。尤其是干涉测量方法<sup>[7-12]</sup>,因为其高精度、高灵敏度的特点,还必须远离振源,严格防尘,只能做成非在线的测厚设备,并且需要配备厚重的底座。目前最为成熟的在线测厚技术为X射线技术,不过这种技术放射性强,而且不适用于测量由多种元素构成的聚合物,常用于钢板等单一元素的测量,极少为薄膜生产线采用。激光测厚技术也可以用作在线测量<sup>[13]</sup>,该方法精度高、无辐射、安全性好,不过它需要将上下两个激光位移传感器装在稳定的固定架上,然后精确校正位置,使激光打在待测物上下表面的同一个点上,通过计算距离得到被测物的厚度,该方法同样难以避免受外界干扰。另外,通常在线测厚设备需要与生产线相匹配的扫描架,在一定程度上限制了在线测厚设备的重复利用,因此在线测试设备一般也比非在线测试设备贵很多。

本文提出并制作了一种迈克耳孙干涉装置,该装置小巧、安装使用灵活,通过巧妙的设计和高精密加工,使其实现了热不敏感性,同时传导光信号输入与输出的光纤准直器与装置为一整体,避免了测量过程中受外界干扰,使得用高精度、高灵敏度的干涉方法对薄膜或光学平片厚度做在线测量成为可能,其测量范围为微米到毫米量级。

## 2 迈克耳孙干涉装置的设计和制作

迈克耳孙干涉结构最早是为了研究光速问题设计出的经典结构,之后被广泛地应用于各个领域的精密检测。干涉装置亦是采用迈克耳孙对称性的结构设计,其具体结构如图1所示。宽带光源由一个双光纤准直器的其中一根光纤入射进装置内部,另一根光纤用于将携带信号的干涉光输出。双光纤准直器是被焊接在金属外封上,与其为一个整体。金属外封里面为光学模块,大体可分为分光棱镜、参考干涉臂和样品干涉臂三个部分,这三个部分连接在一起为一个整体,并粘接在金属外封盒里面。光信号进入到装置内部后,由分光棱镜分成两束分别入射到参考臂和样品臂。光由分光棱镜分光后,经过一通光平行平板玻璃,通光玻璃与分光棱镜的通光面紧密相连,另一面由一连接块与反射镜连接。反射镜其实是与通光玻璃相同材质的玻璃,但在其反面镀上全反膜。即光由分光棱镜分光后,再分别通过两个臂的通光玻璃,空气间隙,反射镜玻璃,然后被反射镜膜反射,光再由原路返回,经分光棱镜汇合产生干涉信号,由光纤导出。两个臂为对称结构,不同的地方是样品臂被设计成开口型,用来插入被测样品。该装置的金属外封结构如图2所示。

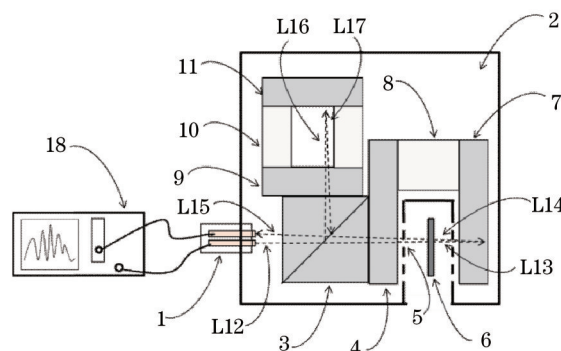


图1 干涉装置结构示意图

Fig.1 Configuration of interferometer

图1中,1为双光纤准直器;2为金属外封;3为分光棱镜;4为通光玻璃;5为通光窗口;6为样品;7为样品臂反射镜;8为连接块;9为通光玻璃;10为连接块;11为参考臂反射镜;12为入射光束;13为棱镜透射光束;14为反射镜7反射光束;15为出射光束;16为棱镜反射光束;17为反射镜11为反射光束;18为光波长测试系统。

如何保证干涉结构的稳定性,不易受环境干扰是要解决的关键问题。如果使用胶来粘合干涉结构的各个光学元件,极有可能会影响其通光性能,另外不同接触面用胶量的不同也会导致其在温度变化的过程中

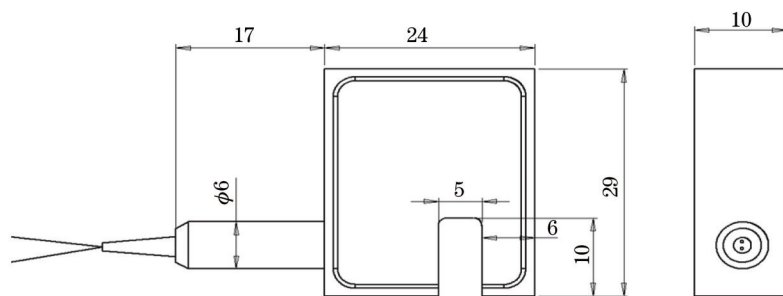


图2 干涉装置外封尺寸图(标注单位:mm)

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

或者在潮湿环境中吸水产生不同的厚度,进而导致光程差的改变,使干涉结构不稳定。经过综合评估,最终采用了机械强度高,光学性能好,耐温性强,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,仅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,还不足以使干涉结构在变化的环境中稳定工作。因此通过采用不同长度和不同热特性材料的组合,实现器件的热不敏感性。同时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,从而扩展了器件的工作温度范围,使器件可以在最严酷的条件下稳定工作,同时使得器件的结构变得简单又合理。对于材料的选择,通光玻璃是低热膨胀系数的康宁玻璃(7980),连接块采用的是热膨胀系数为零的微晶玻璃。微晶玻璃的热膨胀量为其中各晶相以及残余玻璃相的热膨胀量的加和,因此,可以由晶化程度以及热处理制度来调节晶体的热膨胀系数,同时微晶玻璃的热稳定性能好,有更加稳定的化学性能,更高的机械强度。同时输入和输出光信号的光纤准直器与装置为一个整体,因此在检测过程中该装置不像普通干涉装置一样易受外界振动干扰。以上几点的同时实施,确保该装置可采用干涉方法对透明和半透明薄膜或光学平片的厚度做在线检测。

### 3 干涉装置的稳定性测试

测试装置产生的干涉信号,使用的是 Agilent 8164A 波长测试系统,其扫描精度为 0.001 nm,扫描范围设置为 1550~1555 nm。由于通过干涉信号的自由光谱范围(FSR)来计算光程差信息,为了看到一定的调制度,将样品臂的长度多设计了 3 mm,因此装置引入了往返 6 mm 的光程差,这样 5 nm 的扫描范围将会看到 12 个干涉峰,其结果如图 3 所示,其中横坐标表示波长信息,纵坐标表示干涉强度信号,单位为 dB。

为了验证干涉装置的抗干扰能力,将装置置于普通的木制工作台上,并且轻敲工作台,加以振动干扰来

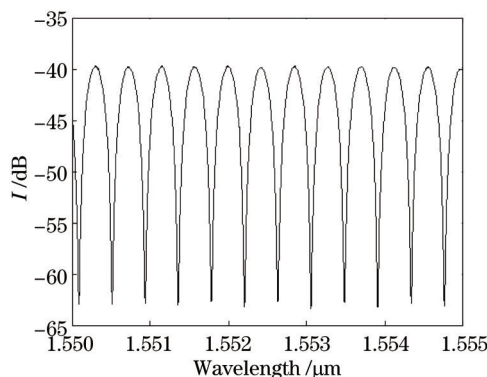


图3 波长测试系统采集到的干涉信号

Fig.3 Interference signal of device collected by wavelength measurement system

测试干涉信号,然后用计算机提取干涉信号的峰值。对于12个干涉峰,可以得到11个FSR值,将10次的测量结果作比较和分析,其平均值和标准差值如表1所示(由于Agilent 8164A波长测试系统的精度是0.001 nm,所以有效数字取到0后第4位),为(0.4255±0.0005) nm,其均值的95%置信区间为±0.0005 nm,与Agilent 8164A波长测试系统的精度0.001 nm相符,所以测试结果显示装置有很好的稳定性。

表1 干涉信号 $f_{\text{FSR}}$ 10次测量结果的平均值和其标准差值

Table 1 Average value and standard deviation of 10 times measurements of  $f_{\text{FSR}}$

	$f_{\text{FSR}1}$	$f_{\text{FSR}2}$	$f_{\text{FSR}3}$	$f_{\text{FSR}4}$	$f_{\text{FSR}5}$	$f_{\text{FSR}6}$	$f_{\text{FSR}7}$	$f_{\text{FSR}8}$	$f_{\text{FSR}9}$	$f_{\text{FSR}10}$	$f_{\text{FSR}11}$
Average value	0.4253	0.4256	0.4253	0.4254	0.4253	0.4256	0.4254	0.4253	0.4256	0.4253	0.4257
Standard deviation	0.0004	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004

#### 4 测量原理及实验

基于该装置,可通过比较插入样品前后干涉信号的FSR来计算光程差,从而得到样品厚度信息。该方法可使用工业用的光波长测量仪来实现,其中需要用到几个纳米范围的波长扫描和一个同步接收的光功率模块;或者使用一台宽带光源和一台光谱仪亦可以达到同样的目的。另外该装置也可以采用多光谱干涉方法来做厚度测量<sup>[4]</sup>,现在只介绍前一种方式。使用扫频光源和功率探测器得到的干涉信号是:

$$I(\Delta L) = I_0[1 + \cos(k\Delta L)], \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为入射光强, $k$ 为波数, $\Delta L$ 为系统引入的光程差。当进行多波长扫描时,可以得到余弦函数形式的调制曲线,那么两峰值之间的自由光谱范围FSR为:

$$f_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{\Delta L}, \quad (2)$$

其中 $\lambda$ 为波长。在插入样品前,光程差仅来源于样品臂多设计的空气间隔长度 $\Delta Z$ ,即:

$$\Delta L = 2\Delta Z. \quad (3)$$

当插入厚度为 $d$ 的样品后,光透过样品2次,光程差 $\Delta L'$ 为:

$$\Delta L' = 2(\Delta Z - d + n \cdot d), \quad (4)$$

其中 $n$ 为被测样品的折射率。联立(2)~(4)式,可以得到待测样品厚度为

$$d = \frac{\Delta L' - \Delta L}{2(n-1)}, \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式,得:

$$d = \frac{\lambda^2}{2(n-1)} \left( \frac{1}{f_{\text{FSR}}} - \frac{1}{f'_{\text{FSR}}} \right). \quad (6)$$

由于直接测量量只有波长 $f_{\text{FSR}}$ ,如前一节所述, $f_{\text{FSR}}$ 的误差范围 $\delta\lambda$ 为0.0005 nm,则可根据间接测量的不确定度评定方法,估算测量的合成标准不确定度为:

$$\delta d = \sqrt{\left( \frac{\partial d}{\partial f'_{\text{FSR}}} \cdot \delta\lambda' \right)^2 + \left( \frac{\partial d}{\partial f_{\text{FSR}}} \cdot \delta\lambda \right)^2} = \frac{\sqrt{2}\lambda^2}{2(n-1)} \cdot \frac{\delta\lambda}{f_{\text{FSR}}^2}. \quad (7)$$

由(7)式可见,该方法精度还与波长和基准FSR有关,当 $\lambda=1550$  nm, $n=1.511$ , $f_{\text{FSR}}=0.425$  nm时, $\delta d$ 为9.2  $\mu\text{m}$ 。为了提高数据精度,将提取的如图3所示的干涉信号导入计算机,对曲线做高精度拟合。为了匹配(1)式的余弦调制函数曲线,信号强度首先需要从dB单位变换到相对强度单位,即:

$$I' = 10^{\frac{I}{10}}. \quad (8)$$

由于干涉信号为等 $k$ 间隔的调制函数,所以,信号还需从 $\lambda$ 空间变换到 $k$ 空间。为了方便曲线拟合,对 $k$ 空间信号做了归一化处理。此时,由于光程差一定, $I'$ 信号为固定周期的余弦函数,可以很容易地将调制信号的固定周期提取出来。做过强度变换和 $k$ 空间变换的 $I'$ 信号和其Matlab拟合曲线如图4所示,拟合曲线的均方根值为0.9986,证明采集到的干涉信号与理论的余弦周期函数能够很好匹配。

由于关注的是信号峰值点的间隔,即FSR值,所以可以忽略原始信号中由于外界环境微振动或者灰尘



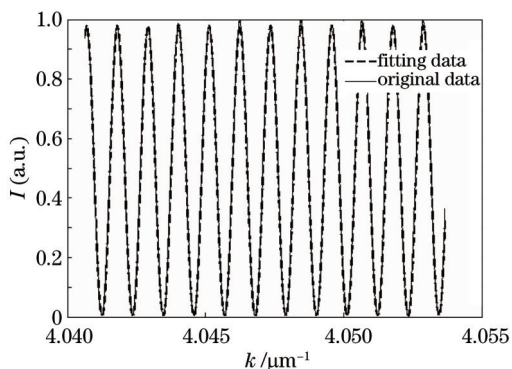


图4 变换后的干涉信号和拟合曲线

Fig.4 Interference signal and fitting line after transform

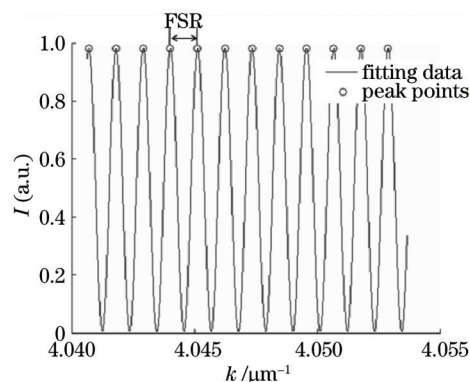


图5 从拟合曲线提取峰值计算FSR

Fig.5 FSR calculation by extracting peak points from fitting data

导致的强度峰值毛刺等问题,用据有相同周期的更高精度的拟合曲线的峰值点来计算FSR。同样采用Matlab编程实现峰值的寻找和提取,其结果如图5所示。

当插入样品后,重复以上步骤,即提取数据、数据变换、曲线拟合、寻找峰值,然后便可以计算出插入样品前后光程差的改变:

$$(\Delta L' - \Delta L) = 2\pi \left( \frac{1}{f_{FSR1}} - \frac{1}{f_{FSR2}} \right), \quad (9)$$

其中 $f_{FSR1}$ 和 $f_{FSR2}$ 为 $k$ 空间的自由光谱范围。根据(5)式便可计算出样品的厚度信息。

根据该方法,将样品垂直于光路插入样品槽,光从样品上透射,由反射镜反射,这样采集的信号强度高、稳定,干涉信号信噪比高,条纹能够体现出很好的调制度,使得测量和计算更加准确。但是对于某些样品,会引入额外的反射面,其带来的干涉信号会叠加在要求的干涉信号上。比如插入样品盖玻片后,测得的数据和处理流程如图6所示,可以看到由盖玻片反射面带来的大周期的幅度调制。但是由于拟合采用的是固

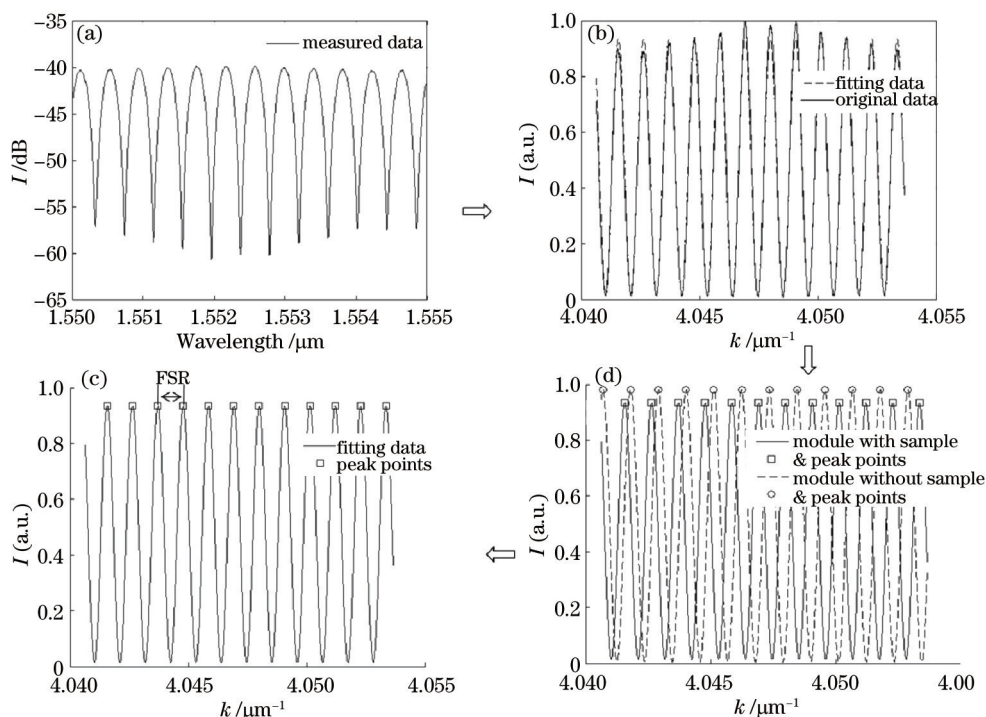


图6 插入盖玻片后的测试数据。(a)波长测试系统采集到的干涉信号;(b)变换后的干涉信号和拟合曲线;(c)从拟合曲线提取峰值计算FSR;(d)插入盖玻片前后拟合曲线和峰值对比

Fig.6 Measurement data after inserting slice. (a) Interference signal collected by wavelength measurement system; (b) interference signal and the fitting line after transform; (c) extracting peak points from fitting data and calculating FSR; (d) comparison of fitting curve and peak after inserting slice

定周期的余弦函数,其FSR结果并不受影响,由图可知,其周期匹配度还是很好。已知标准盖玻片的折射率值为1.511,通过测量得到盖玻片的厚度为 $(177.4\pm 0.7)\mu\text{m}$ (5次测量的平均值 $\pm$ 其标准差)。对同一样品,使用VMS-1510高精度影像测量仪作对比测量,其结果为 $176\mu\text{m}$ (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 $170\mu\text{m}$ (测试精度为 $10\mu\text{m}$ )。

## 5 结 论

设计并制作了迈克耳孙干涉装置,其使用低热膨胀系数的玻璃作通光和连接,热膨胀系数为零的微晶玻璃作为连接块,并采用对称性的结构设计,实现了装置对温度变化的自动补偿。另外,还采用超精细光学加工技术,实现了光胶工艺,将分光棱镜、通光玻璃、连接块、反射镜这些光学模块胶合为一个整体,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。同时,各零件尺寸的加工误差可以控制在微米量级以下,为光学延迟的精确控制打下了基础。用作输入、输出光信号的双光纤准直器被焊接在金属外封上,因此光模块、外封、双光纤准直器为一个整体,在采集干涉信号的过程中不受外界振动干扰。该方法不要求样品贴在样品台上,样品只需垂直于光路插入样品槽,光会从样品上透射,由反射镜反射,这样的信号强度大,干涉条纹对比度高。为了验证干涉装置的抗干扰能力,将装置置于普通的木制工作台上,并且轻敲工作台,加以振动干扰来测量干涉信号,其FSR值的测量结果为 $(0.4255\pm 0.0005)\text{nm}$ ,其均值的95%置信区间为 $\pm 0.0005\text{nm}$ ,与波长测试系统的精度 $0.001\text{nm}$ 相符。因此通过实验证明,以上这些特点合在一起,装置有很好的稳定性,使其可以用于高精度、高灵敏的干涉测量。

为了演示该装置用作自动实时在线检测的可行性,测量了标准盖玻片的厚度。基于该装置,可采用比较干涉信号FSR变化计算光程差的方法,亦可用宽光谱干涉的方法来做厚度测量<sup>[4]</sup>。采用了第一种方法,该方法的理论精度为 $9.2\mu\text{m}$ 。为了提高计算精度,对数据做了高精度拟合,并通过Matlab编写了一套算法,包括数据提取、变换、拟合、寻峰和厚度计算,使得整个测试过程十分方便、快捷。利用该装置测得标准盖玻片的厚度为 $(177.4\pm 0.7)\mu\text{m}$ ,该结果与其他商用测厚设备可比较。

## 参 考 文 献

- 1 J Lee, P I Rovira, I An, *et al.*. Rotating compensator multichannel ellipsometry: applications for real time Stokes vector spectroscopy of thin film growth [J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69: 1800-1810.
- 2 C Chou, H K Teng, C J Yu, *et al.*. Polarization modulation imaging ellipsometry for thin film thickness measurement [J]. *Opt Commun*, 2007, 273(1): 74-83.
- 3 F Joseph, J R Hall, W F C Ferguson. Optical properties of cadmium sulfide and zinc sulfide from 0.6 micron to 14 microns [J]. *J Opt Soc Am*, 1955, 45(9): 714-717.
- 4 Chen Chaoliang, Gao Wanrong. Method of measuring dispersion and refractive index of transparent object based on spectral fiber low coherence interferometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1008005.  
陈朝良, 高万荣. 基于光谱光纤低相干的透射样品色散和折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008005.
- 5 Shen Weidong, Liu Xu, Ye Hui, *et al.*. A new method for determination of the optical constants and thickness of thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 885-889.  
沈伟东, 刘旭, 叶辉, 等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. *光学学报*, 2004, 24(7): 885-889.
- 6 Liu Yongli, Zhang Jinlong, Wang Zhanshan. Advanced study and generalization of rotation-incidence-plane method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712008.  
刘永利, 张锦龙, 王占山. 旋转入射面法的进一步研究与推广[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712008.
- 7 S W Kim, G H Kim. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(28): 5968-5973.
- 8 Y S Ghim, S W Kim. Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry [J]. *Opt Express*, 2006, 14(24): 11885-11891.
- 9 U Schnell, R Dandliker, S Gray. Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(5): 528-530.
- 10 Xue Hui, Shen Weidong, Gu Peifu, *et al.*. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. *Acta*

- Optical Sinica, 2009, 29(7): 1877-1880.
- 薛 晖, 沈伟东, 顾培夫, 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1877-1880.
- 11 Yan Chengzhi, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, *et al.*. Time delay error in optical low coherence interferometry [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0108003.
- 闫成至, 李尚远, 郑小平, 等. 低相干光干涉法延时测量中的误差分析[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0108003.
- 12 Luo Zhenyue, Xue Hui, Zhang Shuna, *et al.*. Novel algorithm for retrieve thin film reflection phase and physical thickness from white-light interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1835-1840.
- 罗震岳, 薛晖, 张淑娜, 等. 从白光干涉曲线获取光学薄膜反射相位和物理厚度的新算法[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1835-1840.
- 13 C Wang, B Zhao. A nonlinear correction method for laser triangulation thickness measurement [J]. Optical Instruments, 2013, 35(2): 19-25.
- 汪 琛, 赵 斌. 一种激光三角测厚中非线性的校正方法[J]. 光学仪器, 2013, 35(2): 19-25.
- 14 Q Xiao, J G Wang, S Q Zeng, *et al.*. A spectral interferometric method to measure thickness with large range [J]. Opt Commun, 2009, 282(15): 3076-3080.

栏目编辑: 韩 峰