

文章编号:1002-2082(2019)03-0473-05

基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量方法

时 凯^{1,2}, 苏俊宏^{1,2}, 齐 媛³

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西省光电测试与仪器重点实验室, 陕西 西安 710021;
3. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对光学薄膜厚度测量困难问题, 提出了一种基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量方法。采用经典迈克尔逊干涉光路, 利用外差干涉原理将薄膜厚度差转换为光程差, 以精密位移平台为扫描机构实现薄膜厚度的逐行扫描测量。测量系统在恒温实验条件下 20 min 内的漂移不超过 8 nm, 测量结果平均差小于 1 nm, 通过与椭圆偏振仪的测量结果比较, 测量差值为 12.97 nm, 表明了该方法的可行性。

关键词: 激光干涉; 外差; 薄膜厚度; 测量

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201940.0303003

Method of thin film thickness measurement based on laser heterodyne interferometry

SHI Kai^{1,2}, SU Junhong^{1,2}, QI Yuan³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Photoelectricity Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: For the difficulty of measuring the thin film thickness, a method of thin film thickness measurement based on laser heterodyne interferometry was proposed. Using the classical Michelson interference optical path, the heterodyne interference principle was used to convert the film thickness difference into the optical path difference, and the precise displacement table was used as the scanning mechanism to realize the progressive scanning measurement of the film thickness. Results show that the shift of the measurement system within 20 min under constant temperature experimental conditions does not exceed 8 nm, and the average deviation of the measurement results is less than 1 nm. Comparing with the measurement results of the ellipsometer, the measurement difference is 12.97 nm, indicating the feasibility of the method.

Key words: laser interferometry; heterodyne; thin film thickness; measurement

引言

随着科学技术的不断更新, 对先进光学元件表面光学薄膜的性能要求也不断提高, 与之相对应的加工和检测技术也不断更新。光学薄膜是现代光学技术中不可缺少的技术基础, 它具有改变介质的光学特性(如增透膜, 高反膜等), 改进器件表面性能, 扩展材料新的功能特性等优点。由于

光学薄膜的性能对器件的功能和质量有着重要的影响, 因此检测薄膜的各项技术得到快速发展^[1-3]。薄膜厚度是否均匀一致是检测薄膜各项性能的基础^[4-5], 它会影响整个器件的最终质量。因此薄膜厚度测量是光学薄膜制备的基础检测项目之一。

现有薄膜厚度测量方法中, 椭偏法^[6-8]是应用最广泛的方法之一。它具有灵敏度高, 适合于各种薄

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS042); 西安工业大学光电工程学院院长基金(2017GDYJY02)

作者简介: 时凯(1987—), 男, 讲师, 主要从事光电测试方面的研究。E-mail: shikai@xatu.edu.cn

膜测量的优点,但是它需要成本高、测试过程复杂的设备和计算模型,并且其精度受诸多因素的影响较大。根据便捷低成本的使用要求,本文提出一种基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量方法。此方法采用经典迈克尔逊干涉光路,利用外差干涉原理^[9]将薄膜厚度差转换为两束不同频率的光产生的光程差,以精密位移平台为扫描机构实现薄膜厚度的逐行扫描测量。测量系统在恒温实验条件下 20 min 内的漂移不超过 8 nm,测量结果平均差小于 1 nm。通过与椭圆偏振仪的比较,表明该方法的可行性。

1 测量原理

基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量系统结构如图 1 所示。此系统包括双频激光器、偏振分光棱镜、1/4 波片、偏振片、参考反射镜、待测薄膜、精密位移台、光电接收器、相位计。

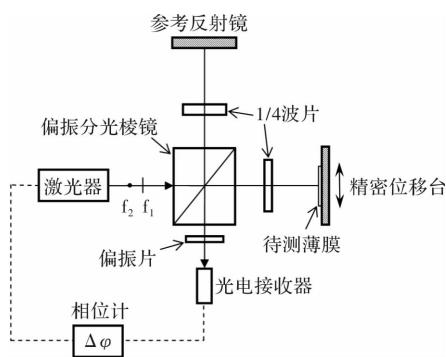


图 1 基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量系统光路原理图

Fig. 1 Schematic of thin film thickness measurement system based on laser heterodyne interferometry

系统采用 Agilent 5517B 双频激光器作为光源,发射包含水平偏振分量 f_1 的激光束和垂直偏振分量 f_2 (2 个光频率中的较高者)两束偏振方向正交的激光(频差为 1.9 MHz ~ 2.4 MHz)。当激光器调谐稳定时,其内部通过混合 2 个激光频率来产生拍频信号作为参考信号 I_R ,其频率为频差 $f_1 - f_2$ 。双频激光器的出射光(包含 f_1 和 f_2)经过偏振分光棱镜,其中垂直偏振分量 f_2 反射到参考反射镜上,水平偏振分量 f_1 透过偏振分光镜,入射到固定在精密位移台上的待测薄膜样品,精密位移平台沿垂直于光路方向扫描,将薄膜厚度差转换为光程差 Δl 。两束光各自沿其反射方向反射,由于 2 次经过 1/4 波片,再次经过偏振分光棱镜时 f_2 透射, f_1 反射,两路光合光后形成的拍频信号被光电接收器接收,将其作为测量信号 I_M 。最后,

测量和参考信号通过相位计比相得到包含有薄膜厚度的相位差 $\Delta\varphi$ 。

其中参考信号和测量信号表示成拍频干涉信号的函数为^[10-11]:

$$I_R = A_{0R} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0R}] \quad (1)$$

$$I_M = A_{0M} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0M} + \Delta\varphi] \quad (2)$$

式中: A_{0R} 和 A_{0M} 是干涉信号振幅; φ_{0R} 和 φ_{0M} 是初始相位; $\Delta\varphi$ 为相位差; 设 $\Delta l = 2(L_1 - L_2)$ 为干涉系统实际光程差, L_1 和 L_2 为 2 个干涉臂长, 则相位差 $\Delta\varphi$ 可通过比较 I_M 和 I_R 的相位得到, 其与光程差 Δl 的关系为

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi \quad (3)$$

式中 λ 为激光器中心波长。

由于实际光程差为薄膜物理厚度 H 的 2 倍, 其关系为

$$H = \frac{1}{2} \Delta l \quad (4)$$

薄膜厚度 H 与相位差 $\Delta\varphi$ 的关系为

$$H = \frac{1}{2} \Delta l = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (5)$$

当精密位移平台沿垂直于光路方向扫描, 由于 λ 已知, 那么薄膜厚度的变化即可由相位差反映, 即薄膜厚度 H 可由(5)式得到。当 $\lambda = 632.99$ nm, 相位计的分辨率为 0.7°(512 细分), 薄膜厚度测量系统的理论分辨率为 0.618 nm。

2 测量实验

测量系统搭建在光学气动平台上, 测量环境温湿度恒定(温度: $(22 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, 湿度: $(55 \pm 3)\%$)。系统的测量稳定性如图 2 所示, 在 20 min 内的漂移不超过 8 nm, 测量结果平均差小于 1 nm。

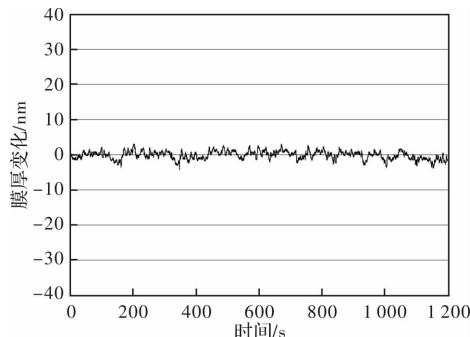


图 2 薄膜厚度测量系统稳定性实验结果

Fig. 2 Experimental results of stability of thin film thickness measurement system

厚度测量实验中使用的薄膜样品为使用真空镀膜机镀制的 SiO_2 薄膜样品, 基底为 ZK9 玻璃。为了便于测试, 使用专门夹具遮挡部分基底, 通过镀膜形成 ZK9 基底上的 SiO_2 薄膜台阶。

测量时将待测薄膜样品固定在 M-403.22S 线性精密位移平台上, 调整外差干涉系统光路使测量臂与薄膜样品垂直。通过 C-663 控制器控制位移台移动, 测量光束扫过待测薄膜样品, 实现被测位置薄膜厚度的逐行扫描测量。对 SiO_2 薄膜台阶的测量结果如图 3 所示。

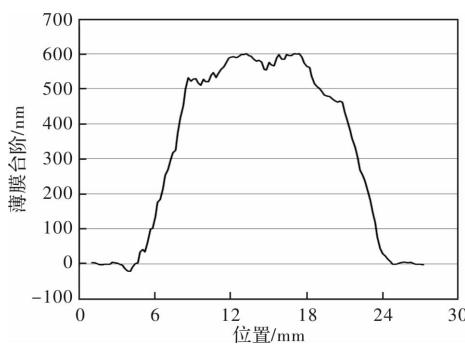


图 3 SiO_2 薄膜台阶测量结果图

Fig. 3 Measurement results of SiO_2 thin film step

为了验证本测量方法的正确性, 为下一步对比测量实验做准备。通过改变测量光束扫描位置, 测量待测薄膜样品 3 组不同位置的台阶信息, 并取每组测量结果的算术平均值作为每个位置的薄膜厚度值, 记作 \bar{H}_1 、 \bar{H}_2 、 \bar{H}_3 , 再取每组薄膜厚度的算术平均值作为待测薄膜样品厚度的算术平均值 H ^[12-13]。薄膜厚度测量结果如表 1 所示, 其中 δ_i 表示每组测量结果与厚度算术平均值 H 的残差。

表 1 薄膜厚度测量结果

Table 1 Measurement results of thin film thickness

	\bar{H}_1	\bar{H}_2	\bar{H}_3	H
H_i/nm	552.17	569.32	547.78	556.42
δ_i/nm	-4.25	12.90	-8.64	$\sum_{i=1}^3 \delta_i = 0.01$

使用 M-2000UI 型椭圆偏振仪对待测薄膜样品的 3 个不同位置进行厚度测量, 并与外差干涉法测量结果进行比较。表 2 列出了基于外差干涉术的薄膜厚度测量方法和椭偏法的测量结果。从表 2 可知, 测量结果基本相符, 差值为 12.97 nm。测量数据上的偏差主要是由于两种测量方法原理的不同和薄膜样品选择的测量位置不同

造成的。

表 2 椭偏法测量结果

Table 2 Measurement results of ellipsometry

	椭偏法 1	椭偏法 2	椭偏法 3	平均值	外差干涉法	差值
H_i/nm	576.56	563.12	568.48	569.39	556.42	12.97

3 误差分析

利用本文提出的测量方法进行薄膜厚度测量过程中测量误差不可避免的, 影响系统测量精度的因素很多, 如系统的非线性误差、激光器和探测器的电子误差、测量环境扰动误差等。

外差干涉测量系统中由于双频激光器和光学元件的缺陷, 使得相位变化和被测量误差呈非线性关系, 导致测量系统中出现一个周期性的非线性误差。不同的激光干涉仪都存在非线性误差, 在一般的激光干涉仪中, 此误差可达 10 nm~20 nm, 在性能较高的激光干涉仪中也存在几 nm 的非线性误差^[10]。外差干涉系统的非线性误差可通过不同的测量系统得到^[14], 结果表明在较短时间内相位测量的非线性误差不超过 10 nm^[15]。为了减少测量系统的非线性误差, 采用高质量的双频激光器、波片和偏振分光棱镜来减弱入射激光的椭圆偏振, 同时提高系统各个光学元件的安装精度。在此基础上, 通过采取各种光学补偿, 电子补偿, 硬件和软件处理等措施可以进一步降低非线性误差^[16]。

双频激光器作为整个测量系统的核心器件, 其实际输出波长只能稳定在一定范围内, 本系统中 Agilent 5517B 双频激光器的真空波长稳定性(1 h)为 $\pm 0.002 \times 10^{-6}$ mm, 因此会引起测量系统的激光波长稳定性误差。当被测薄膜厚度小于 2 μm 时, 波长稳定性误差为 $\pm 2 \times 10^{-3}$ nm。测量系统的电子误差是由接收器和相位计引起的。接收器和相位计(接收器直接接收激光束)的稳定性测量结果如图 4 所示, 连续采样 20 min 后。测量值在 0.4 nm~0.5 nm 范围内变化, 平均偏差为 0.11 nm。

光学组件是测量系统的关键部分, 因此光学组件的安装和固定将对系统测量误差产生影响。光学组件应牢固地固定在同一气动光学平台上, 以确保最小的振动。在测量过程中, 光学组件或激光束周围的任何局部热源都会导致光学模块的

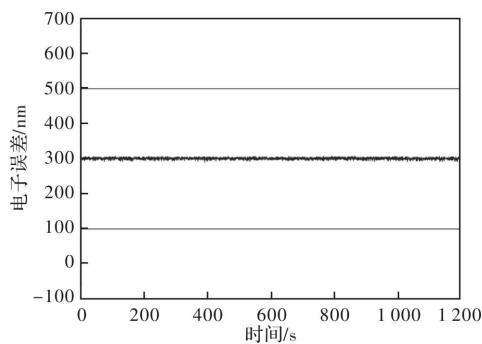


图 4 接收器和相位计的稳定性测量结果

Fig. 4 Experimental results of stability of receiver and phase meter

膨胀或激光束周围空气的干扰。因此有必要避免测量系统周围的局部热源。空气湍流是由激光束周围的冷热空气的移动引起的,它会改变激光束的波长。另一方面,温度改变空气介质的折射系数。这些环境扰动将改变测量系统的几何光路,并降低测量结果的准确性。为了减少温度,气流和振动的影响,光学组件应尽可能靠近并固定,在每次实验期间都将光路罩在密闭空间中,可以提供相对均匀的环境空气,以便减小测量环境扰动误差。由于环境扰动误差不可能同时获得其确定值,所以本文选择稳定性测量实验中的漂移值作为近似值。在对环境扰动误差做近似的条件下,可将上述各项误差合成为

$$\Delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^s e_i^2 + \sum_{i=1}^q \delta_i^2} = \\ \pm \sqrt{(4^2 + 10^2) + [(2 \times 10^{-3})^2 + 0.5^2]} = \\ \pm 10.78 \text{ nm}$$

式中: e 是系统误差; δ 是随机误差。

4 结论

本文提出的基于激光外差干涉术的薄膜厚度测量方法利用了经典迈克尔逊干涉光路,系统搭建便捷,以精密位移平台为扫描机构实现薄膜厚度的逐行扫描测量。当采用 512 细分的相位计,薄膜厚度测量系统的理论分辨率可达到 0.618 nm。系统在 20 min 内的漂移不超过 8 nm,平均差小于 1 nm,系统稳定性较好。通过与椭圆偏振仪的测量结果比较发现,两种方法对相同 SiO_2 薄膜样品的测量差值为 12.97 nm。对系统的测量误差进行分析,得出合成误差为 $\pm 10.78 \text{ nm}$ 。实验结果表明该方法正确可行,与椭偏法相比,基于激光外差

干涉术的薄膜厚度测量方法提供了一种较为简单,低成本的解决方案。该方法不仅可以满足薄膜厚度测量的需要,也可以进一步推广,实现微纳结构的台阶高度等具有突变形貌的测量。

参考文献:

- [1] DAI Rong, XIE Tiebang, CHANG Suping. A vertical scanning white-light interfering profilometer[J]. Optical Technique, 2006, 32(4):545-548.
戴蓉, 谢铁邦, 常素萍. 垂直扫描白光干涉表面三维形貌测量系统[J]. 光学技术, 2006, 32(4):545-548.
- [2] CHEN Kai, CUI Mingqi, ZHENG Lei, et al. Layer thickness measurement of super thin films [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008(2):234-238.
陈凯, 崔明启, 郑雷, 等. nm 量级薄膜厚度测量[J]. 强激光与粒子束, 2008(2):234-238.
- [3] GUO Zhifeng, GUO Zhaohua, WANG Yongwang, et al. Application of atomic force microscope and white light interferometer in surface material tests [J]. Surface Technology, 2018, 47(1):254-259.
郭志峰, 郭昭华, 王永旺, 等. 原子力显微镜和白光干涉仪在表面材料测试中的应用研究[J]. 表面技术, 2018, 47(1):254-259.
- [4] WANG Changjun, XIONG Shengming. Correction for film thickness uniformity of large aperture optical components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007(7):1153-1157.
王长军, 熊胜明. 大口径光学元件薄膜厚度均匀性修正[J]. 强激光与粒子束, 2007(7):1153-1157.
- [5] CHENG Min, ALI E, SUN Zhengwen, et al. Novel correction mask for thickness uniformity improvement of coatings on large aperture aspheric surface [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(3):250-254.
程敏, 艾力·伊沙木丁, 孙正文, 等. 大口径非球面镀膜均匀性分析与修正挡板设计[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(3):250-254.
- [6] LIANG Haifeng, YAN Yixin. Study on optical properties of diamond-like carbon with ellipsometry[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2005(4):287-289.
梁海锋, 严一心. 类金刚石薄膜光学特性的椭偏法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2005(4):287-289.
- [7] MA Xun, LIU Zuming, CHEN TingJin, et al. Thin film material thickness and refractive index measurement by elliptical polarization instrument[J]. Journal

- of Yunan Normal University (Natural Sciences Edition), 2005(4):24-27.
- 马逊,刘祖明,陈庭金,等.椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率[J].云南师范大学学报(自然科学版),2005(4):24-27.
- [8] FAN Jiangwei, WANG Feng, SUN Qinlei, et al. The thickness determination of SiO_2/Si ultra-thin film by spectroscopic ellipsometry through multilayer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(5):388-392.
- 范江玮,王峰,孙钦蕾,等.多层模型计算椭偏法测量的 SiO_2/Si 超薄膜厚度[J].测试技术学报,2012,26(5):388-392.
- [9] LI Yongqian, LI Xiaoying, ZHU Mingquan. A new method to correct the nonlinear errors in heterodyne interferometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005(5):542-546.
- 黎永前,李晓莹,朱名铨.纳米精度外差式激光干涉仪非线性误差修正方法研究[J].仪器仪表学报,2005(5):542-546.
- [10] HOU Wenmei, ZHANG Yunbo, LE Yanfen, et al. Elimination of the nonlinearity of heterodyne displacement interferometers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9):162-167.
- 侯文玫,张运波,乐燕芬,等.外差激光干涉测长非线性误差的消除[J].中国激光,2012,39(9):162-167.
- [11] ZHONG Chaoyang, HOU Wenmei, JU Aisong, et al. Analysis of frequency mixing in dual-frequency interferometer[J]. Optical Technique, 2015, 41(2): 119-123.
- 钟朝阳,侯文玫,句爱松,等.双频激光干涉仪的混频分析与研究[J].光学技术,2015,41(2):119-123.
- [12] SHI Yilei, SU Junhong, YANG Lihong, et al. Measuring thin-film thickness with phase-shift interferometry[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1):76-79,83.
- 石一磊,苏俊宏,杨利红,等.基于相位偏移干涉术的薄膜厚度测量方法[J].应用光学,2009,30(1):76-79,83.
- [13] SU Junhong, LIU Yichen. Digital Moiré technique for thin film thickness measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11):104-108.
- 苏俊宏,刘奕辰.测量薄膜厚度的数字叠栅技术[J].中国激光,2012,39(11):104-108.
- [14] HOU W M, GUNTER W. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. Precision Engineering, 1992, 14(1): 91-98.
- [15] SHI Kai, SU Junhong, HOU Wenmei. Roll angle measurement system based on differential plane mirror interferometer [J]. Optics Express, 2018, 26(16):19826-19834.
- [16] LE Yanfen, JU Aisong. Analysis and measurement of the nonlinear errors in heterodyne interferometers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5):203-212.
- 乐燕芬,句爱松.外差激光干涉仪非线性误差分析及测量[J].激光与光电子进展,2016,53(5):203-212.