

光学薄膜缺陷的光学相干层析检测方法研究

秦玉伟^{1,2}

¹渭南师范学院物理与电气工程学院, 陕西 渭南 714099

²陕西省X射线检测与应用研究开发中心, 陕西 渭南 714099

摘要 为了对光学薄膜的内部缺陷进行无损高精度检测, 采用了谱域光学相干层析成像(OCT)的方法, 并进行了理论分析和实验验证, 获得了单层和多层光学薄膜样品的二维层析图像。根据薄膜的二维层析图像, 可以清晰地观察到薄膜的内部缺陷, 并能够对缺陷位置进行定位。实验结果表明, 谱域OCT技术是一种光学薄膜缺陷检测的有效方法。

关键词 测量; 光学相干层析成像; 光学薄膜; 缺陷检测

中图分类号 TH744.3; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071202

Study on Defect Detection of Optical Thin Film Using Optical Coherence Tomography

Qin Yuwei^{1,2}

¹School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Normal University, Weinan, Shaanxi 714099, China

²Shaanxi Research Center of X-Ray Detection and Application, Weinan, Shaanxi 714099, China

Abstract Spectral-domain optical coherence tomography (OCT) is used for the inner defect detection of the optical thin film with high accuracy. It is theoretical analyzed and experimentally validated. The two-dimensional (2-D) cross-sectional images of the optical thin film with single layer and multi-layer structure are obtained respectively. Based on the 2-D cross-sectional images, the defect in the film can be observed clearly, and the position of the defect in film can be located. It is demonstrated that spectral-domain OCT is an effective method for defect detection of the optical film.

Key words measurement; optical coherence tomography; optical film; defect detection

OCIS codes 120.4820; 110.4500; 180.1655

1 引言

光学薄膜在光学器件、相机镜头、液晶屏幕等方面发挥着重要作用, 现代化的工业生产对光学薄膜的质量要求也越来越高。光学薄膜生产过程中, 受生产工艺或生产环境等条件的限制, 容易造成薄膜质量缺陷, 主要表现在表面出现划痕、内部产生气泡, 或薄膜内部掺入杂质、尘埃等^[1]。

传统的光学薄膜质量检测方法有很多种, 人工检测法利用人的肉眼, 借助于放大镜对薄膜进行人工检测, 该方法无法对薄膜内部缺陷进行检测, 并且受人眼结构的限制, 难以达到微米级的分辨率, 因而无法实现高精度检测; 另一方面, 人工检测还受到环境因素的影响, 并且由于工作强度加大, 人的疲劳会引起误判, 无法适应工业化生产和检测需要。机器视觉检测方法一般采用主动光源照射薄膜样品, 利用CCD采集光学薄膜样品的图像, 实现薄膜缺陷检测, 该方法可以用于在线检测, 但是由于光学薄膜具有高透光性, 因此对光源和CCD的选择、安装提出了很高的要求, 并且在线检测过程中, 相机的帧速率必须与光学薄膜的运动速率精确同步, 才能实现对缺陷的精确检测。另一方面, 表面气泡、划痕等瑕疵与背景灰度级差别很小, 容易与噪声图像混淆, 使缺陷湮没在背景噪声中, 导致漏检或误检, 要实现高精度检测, 需要高像素的CCD, 采集的图像数据量巨大, 算法复杂, 处理困难, 难以适应现代化生产的实际需要。

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-18; 网络出版日期: 2015-05-20

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金基础研究项目、陕西省军民融合研究基金项目(15JMR12)、渭南师范学院科研计划项目(14YKS009, 15ZRRC08)、渭南师范学院特色学科建设项目(14TSXK07)

作者简介: 秦玉伟(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事传感器与光电检测技术方面的研究。E-mail: qinyuwei@163.com

光学相干层析成像(OCT)是一种非侵入、非接触和无损伤的光学成像技术,具有极高的分辨率^[2]。OCT通过检测介质的后向散射光信号,获得物体的内部微观结构信息。OCT不仅可以作为医学成像仪器,辅助医生进行病理诊断,而且可以作为光学测量手段用于光学散射介质的检测^[2-7]。Manallah等^[8]利用OCT技术对单层薄膜进行了厚度测量,并通过散射势两个连续峰值的横向间距得到了薄膜厚度;Chen等^[9]利用谱域OCT技术对单层薄膜进行了成像实验,并利用二维层析图像得到了薄膜厚度。然而,他们并未进行薄膜的内部缺陷检测研究,也未进行多层薄膜的成像实验研究。

针对薄膜生产过程中可能出现的质量缺陷,本文提出了一种利用谱域OCT技术的薄膜缺陷检测方法,利用卤钨灯光源产生的红外光进行成像检测,在提高检测厚度的同时,减少环境杂散可见光对检测结果的影响,分析了检测原理,并进行了单层薄膜和多层薄膜的厚度测量和内部缺陷检测实验研究。

2 谱域OCT技术的检测原理

谱域OCT技术进行薄膜缺陷检测利用了Fercher等^[10]提出的散射近似理论,该理论后向散射光场包含物体的内部微观结构信息,因此,通过对散射光场复振幅 $E_s(K)$ 的傅里叶变换,就能够获取物体的散射势 $F(z)$:

$$F(z) \propto \text{FT}[E_s(K)]. \quad (1)$$

式中 $\text{FT}(\cdot)$ 表示傅里叶变换。根据维纳-辛钦定理,信号的自相关函数可以通过功率谱密度的傅里叶变换获得,因此可以通过干涉频谱的逆傅里叶变换重建物体的深度信息。由于不需要像时域OCT一样通过移动样品臂或参考臂对物体进行轴向机械扫描,因而谱域OCT系统的成像速度和稳定性显著提高^[11-12]。

谱域OCT利用光纤光谱仪将低相干光源的宽带光谱分成窄带光谱,而不同波长的窄带光谱就携带物体轴向不同深度的微观结构信息^[10]。因此,利用低相干的迈克耳孙干涉仪得到的干涉光谱图中,就包含物体的微观结构信息,实现了对物体的精密测量和无损检测。

3 谱域OCT检测装置设计

谱域OCT检测装置的核心部分是低相干结构的迈克耳孙干涉仪,检测系统通过光纤结构的迈克耳孙干涉仪实现样品光和参考光之间的干涉^[12],结构如图1所示。

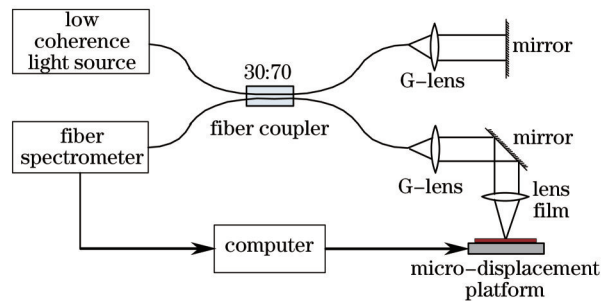


图1 OCT系统结构图

Fig.1 Schematic of the OCT system

检测系统由宽带光源、光纤耦合器、光纤光谱仪、光纤准直器、聚焦透镜、平面反射镜和微位移平台等几部分构成,光学薄膜通过支架固定在微位移平台上,通过微位移平台的移动实现对光学薄膜进行横向扫描。卤钨灯为荷兰爱万提斯公司的风冷型卤钨灯Avalight-HAL,光源的功率为20 W,覆盖波长范围为360~2500 nm,光源的中心波长 λ_0 约为1285 nm,半峰全宽(FWHM) $\Delta\lambda$ 为535 nm,因此该谱域OCT系统在空气中的理论轴向分辨率为1.36 μm 。对卤钨灯光源的实际功率谱进行傅里叶变换,根据得到的点扩展函数可以得知,搭建的谱域OCT实验平台的轴向分辨率约为1.4 μm ,与理论计算值基本吻合。光纤光谱仪为荷兰爱万提斯公司的制冷型高灵敏度近红外光纤光谱仪AvaSpec-NIR512-1.7TEC,光谱采样间隔为1.64 nm,因此对样品的探测深度约为200 μm 。

光源发出的光束进入单模光纤传输后,经单模光纤耦合器(2×2,分束比为30:70)分为两部分:一部分经由G-lens光纤准直器后成为平行光,照射在参考平面反射镜上,并经平面镜反射;而另一部分经G-lens光纤准直器平行出射后,经透镜聚焦到光学薄膜样品上,进行后向散射,两部分光线经光纤耦合器重新合并

发生干涉。通过分析频谱干涉信号获得含样品微观结构信息的散射势,能够获取薄膜的二维层析图像,光学薄膜的内部缺陷可以根据二维层析图像进行直观清晰的分析和判断。由于该检测系统使用相干长度极短的卤钨灯作为光源,根据谱域OCT轴向分辨率理论计算公式可知,该系统能够达到较高的分辨率^[4,13-14]。另外由于谱域OCT系统的信噪比和灵敏度较高^[15-16],因此该检测系统能够实现光学薄膜的精密检测。

4 实验结果与分析

将光学薄膜样品和参考平面镜分别固定在微位移平台上,通过软件控制微位移平台发生位移,对参考臂光路进行调整,使光学薄膜返回的样品光与另一平面镜返回的参考光发生干涉。考虑到零光程差附近时干涉信号极易受到空气流动和振动等环境因素的干扰,造成干涉条纹抖动,引起检测误差,因此光路调整时,应使两臂的光程差略大于零,这样既能够保证OCT检测系统灵敏度,又能够有效抑制环境引起的干扰,提高系统的信噪比^[1]。通常情况下,应保证光纤光谱仪操作软件界面显示的干涉光谱有几个干涉条纹峰值为宜。当光谱仪上观察到清晰的干涉光谱时,停止调整光路,采集此时的干涉光谱,如图2所示。

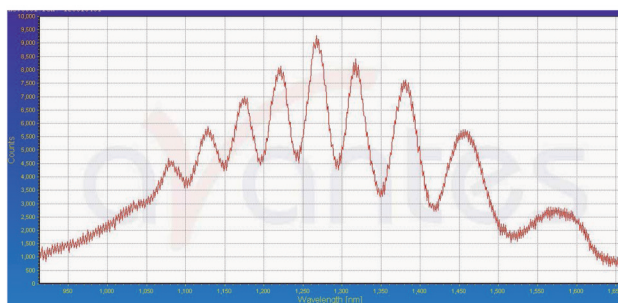


图2 OCT干涉光谱

Fig.2 Interference Spectrum of the OCT

将其转换为均匀波数空间的干涉光谱,并利用计算机软件对干涉光谱的进行逆傅里叶变换,获取物体散射势^[4]。对光学薄膜进行横向扫描,并将散射势赋灰度值,重构薄膜的二维层析图像。对存在缺陷的单层薄膜和多层薄膜样品分别进行检测实验,得到二维层析图像如图3所示。

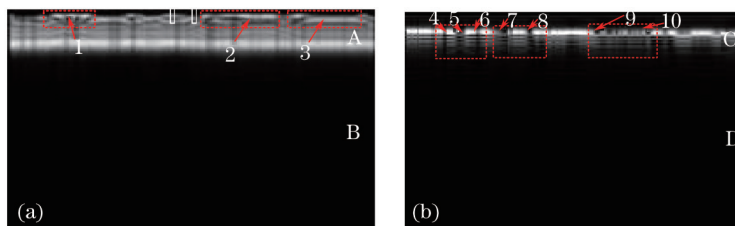


图3 OCT(二维层析)图像。(a) 单层薄膜; (b) 多层薄膜

Fig.3 OCT (2-D cross-sectional) images. (a) Single layer film; (b) multi-layer film

图3所示的二维层析图像,横断面积为 $100\ \mu\text{m}$ (深度) $\times 200\ \mu\text{m}$ (长度),红色虚线框所示区域为单层光学薄膜和多层光学薄膜的缺陷区域。二维层析图像亮度较高处的区域A、C表示镀膜层,而亮度较低处的区域B、D表示薄膜的玻璃基片。由于薄膜所用的玻璃基片为高透射性材料,后向散射光强极弱,并且随着探测深度的增加,散射光强逐渐变小,与薄膜的散射光强相比可以忽略,因此表现为高对比度的层析图像。由图3(a)的单层薄膜的二维层析图像,能够清晰地观察到虚线框所示区域内凸起的缺陷部位1~3,该缺陷是光学镀膜过程中存在于薄膜内部的气泡;由图3(b)多层薄膜的二维层析图像,能够清晰地观察到多层薄膜虚线框所示区域内的多处缺陷4~10,此处的缺陷是由于光学薄膜受硬物划伤造成的划痕。

上述实验结果表明,能够对单层和多层的薄膜进行横断面层析成像,实现对薄膜的缺陷检测,以及缺陷的特征提取与识别,并可以根据成像面积对缺陷部位进行精确定位。采用高灵敏度的光纤光谱仪,减少光谱仪积分时间,提高光谱采集速度,就能够实现高精度在线快速检测。

5 结论

介绍了一种光学薄膜的缺陷检测方法,对其检测原理进行了分析,并对单层和多层光学薄膜样品进行

了成像实验。实验结果表明,利用薄膜的二维层析图像,该谱域 OCT 检测系统不仅能够获取薄膜表面缺陷的清晰图像,而且能够对薄膜的内部进行成像,获取内部缺陷的细节信息。该方法具有高精度、非接触的显著优势,在光学薄膜检测方面极具发展潜力。

参 考 文 献

- 1 Zhong Qiusheng, Hu Guanghua, Li Jingrong. Research on on-line inspecting algorithm for micro-defects of optical films surface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, (10): 102-105.
钟球盛, 胡广华, 李静蓉. 光学薄膜表面微细缺陷在线检测方法研究[J]. 机械设计与制造, 2011, (10): 102-105.
- 2 Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 3 Fercher A F. Optical coherence tomography- development, principles, applications[J]. Zeitschrift für Medizinische Physik, 2010, 20(4): 251-276.
- 4 Qin Y W, Zhao H, Zhuang Z Q, *et al.*. High resolution spectral-domain optical coherence tomography using a thermal light source[J]. Opt Quantum Electron, 2012, 43(6): 83-90.
- 5 Li Jianghua, Huang Hai, Tang Zhilie, *et al.*. Measurement of enamel mineral density by optical coherence tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0817001.
李江华, 黄海, 唐志列, 等. 光学相干层析成像对牙釉质矿密度的定量测量[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0817001.
- 6 Ding Zhihua, Zhao Chen, Bao Wen, *et al.*. Advances in doppler optical coherence tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080005.
丁志华, 赵晨, 鲍文, 等. 多普勒光学相干层析成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080005.
- 7 Su Ya, Meng Zhuo, Wang Longzhi, *et al.*. Correlation analysis and calibration of noninvasive blood glucose monitoring in vivo with optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0704002.
苏亚, 孟卓, 王龙志, 等. 光学相干层析无创血糖检测中相关性分析及标定[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0704002.
- 8 Manallah A, Bouafia M, Meguellati S. Optical coherence tomography as film thickness measurement technique[C]. SPIE, 2015, 9450: 945006.
- 9 Chen Y P, Zhao H, Wang Z. Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source[J]. Opt Rev, 2009, 16(1): 26-29.
- 10 Fercher A F, Hitzenberger C K, Kamp G, *et al.*. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry[J]. Opt Commun, 1995, 117(1995): 443-448.
- 11 Fercher A F, Drexler W, Hitzenberger C K, *et al.*. Optical coherence tomography- principles and applications[J]. Reports Progress Phys, 2003, 66(2): 239-303.
- 12 Chang S D, Mao Y X, Flueraru C, *et al.*. Optical coherence tomography: technology and applications[C]. SPIE, 2009, 7156: 715606.
- 13 Qin Y W. Study on micro- electromechanical system measurement using optical coherence tomography[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 664-667.
- 14 Wiesauer K, Pircher M, Gotzinger E, *et al.*. En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation[J]. Opt Express, 2005, 13(3): 1015 - 1024.
- 15 Leitheb R, Hiezenberger C K, Fercher A F. Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography[J]. Opt Express, 2003, 11(8): 889-894.
- 16 De Boer J F, Cense B, Park B H, *et al.*. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography[J]. Opt Lett, 2003, 28(21): 2067-2069.

栏目编辑: 何卓铭