

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.006

# 基于二维光学相干层析的多层薄膜 结构无损定量评价

陈丹阳<sup>1</sup>, 童俊海<sup>2</sup>, 钟舜聪<sup>2,3\*</sup>, 张秋坤<sup>2</sup>, 林杰文<sup>2</sup>, 伏喜斌<sup>4</sup>

(1. 漳州职业技术学院 电子工程系, 福建 漳州 363000;

2. 福州大学 机械工程及自动化学院光学/太赫兹及无损检测实验室, 福建 福州 350108;

3. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350000; 4. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

**摘要:** 为了实现对多层薄膜结构厚度进行快速准确的测量和无损定量评价, 研制了二维光学相干层析 (Optical Coherence Tomography, OCT) 系统, 避免了传统一维 OCT 系统逐点扫描导致成像效率低下的问题。阐述了去除 OCT 共轭镜像理论, 采用了五步相移干涉法, 具体由压电驱动器驱动参考镜实现, 做到了对 OCT 共轭镜像的去除, 避免出现 OCT 图像的混叠。所研制的 OCT 系统具有极高的系统分辨率和较好的信噪比, 可以实现对手机钢化玻璃薄膜内部四层结构厚度 (钢化玻璃、静电胶层 1、防爆贴膜和静电胶层 2) 进行准确测量。实验结果表明: 自研制的系统可快速高精度地对多层薄膜结构厚度进行测量, 可以推荐使用在多层薄膜的无损定量评价中。

**关键词:** 干涉条纹; 光学相干层析; 多层薄膜结构; 厚度测量

中图分类号: TH74

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)08-0847-04

## Quantitative nondestructive evaluation of multilayer thin films based on two-dimensional optical coherence tomography

CHEN Dan-yang, TONG Jun-hai, ZHONG Shun-cong, ZHANG Qiu-kun, LIN Jie-wen, FU Xi-bin

(1. Electronic Engineering Department, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China; 2. Laboratory of Optics, Terahertz and Non-destructive Testing & Evaluation, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350000, China; 4. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** In order to achieve fast accurate thickness measurement and nondestructive evaluation of multilayer thin films, a two-dimensional optical coherence tomography (OCT) was developed. The developed system did not need to point-by-point scan the sample and therefore, the problem of low imaging efficiency was avoided by point by point scanning. In addition, the theory of removing OCT conjugate mirror image was presented; also, five-step phase-shifting interferometry method was employed the system to remove the effect of OCT conjugate mirror image and finally to avoid image aliasing. A PZT actuator was used to drive the reference mirror to achieve the five phase. By using the system, the internal structure of mobile toughened glass film was accurately measured, including toughened glass, the first electrostatic glue, explo-

收稿日期: 2016-06-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51675103); 国家卫生和计划生育委员会科研基金 (WKJ-FJ-27); 教育部高等学校博士学科点基金 (博导类, 20133514110008); 福建省省杰出青年基金 (2014J07007); 福建省质量技术监督局科技计划项目 (FJQI2014008, FJQI2013024); 福建省自然科学基金项目 (2015J01234)

**作者简介:** 陈丹阳 (1963-), 男, 福建泉州人, 副教授, 主要从事化工机械、无损检测、信号/图像处理等方面的研究。E-mail: 981616388@qq.com

**通信联系人:** 钟舜聪, 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhongshancong@hotmail.com

sion-proof film and the second electrostatic glue. Experimental results demonstrated that the home-made system had high-accuracy and high-speed imaging performance for the measurement of multilayer thin films. It could be recommended for non-destructive evaluation of multilayer thin films.

**Key words:** interference fringes; optical coherence tomography; multilayer thin film; thickness measurement

## 0 引 言

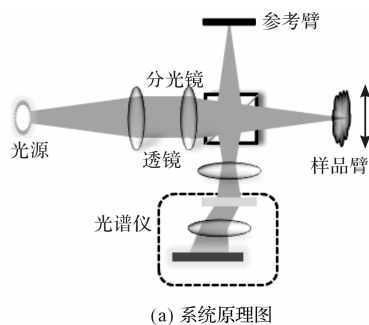
薄膜厚度是显著影响薄膜力学、电磁和光电等性能的一个重要参量,因此在薄膜制备和分析应用中,薄膜厚度的精确测量显得尤为重要。另外,薄膜涂层通常是用来保护表面或增强表面功能的,为了提高涂层的经济效益,涂层的厚度有变小的趋势。随着厚度的变薄,涂层厚度的均匀性就变得越来越重要了,因此就需要对涂层进行测量。台阶仪是常用的厚度测试方法<sup>[1]</sup>,然而测试中机械探针与被测薄膜接触,会造成表面损伤,并且这种方法不能检测多层薄膜结构厚度,如手机钢化膜等。超声方法也可用于测量薄膜厚度<sup>[2]</sup>,但是它也是一种接触式的方法。非接触无损检测厚度检测方法是比较理想的方法,可避免薄膜受损。目前比较常见的是光学无损检测方法,如白光干涉法<sup>[3]</sup>、三角测量法和相位测量法<sup>[4]</sup>、X射线法<sup>[5-6]</sup>、等色干涉法<sup>[7]</sup>等。但是对于X射线方法其安全性需要考虑。

光学相干层析(OCT)系统,利用弱相干干涉原理,通过探测被测样品不同深度层的背向散射光,来获取被测样品的内部微结构信息的一种高分辨率内部成像技术<sup>[8]</sup>,目前主要应用于检测眼睛<sup>[9]</sup>、复合材料<sup>[10]</sup>等。为了提高检测的速度,本研究自研制二维光学相干层析系统用于多层薄膜结构的无损检测和定量评价。

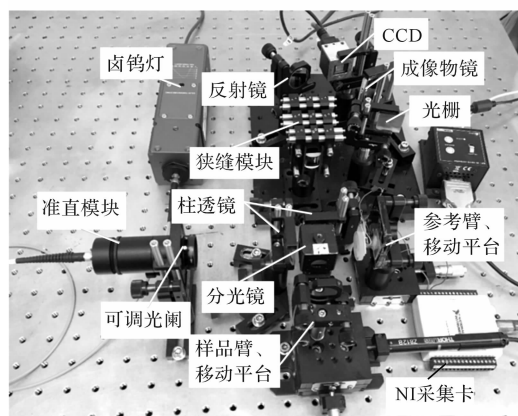
## 1 二维光学相干层析系统

本研究搭建二维频域OCT系统如图1所示。通常用宽带低相干光作为系统光源(比如卤钨灯),从光源发出的入射光经过第一个透镜后被准直为平行光,再经第二个透镜聚焦后进入分光镜,被分为两束光(样品光和参考光)分别进入系统样品臂和参考臂。参考光到达参考臂后直接反射回来,而样品光到达待测样品内部后其后向反射光被反射回来。反射回来的两束光在分光镜相遇,叠加形成包含样品结构信息的干涉信号,随后被聚焦进入光谱仪。光谱仪中的光栅具有分光作用。系统的光谱信号经光栅时被按波长大小分开,而后被CCD相机采集。根据二维频域OCT系统对被测样品进行成像时候,不需要逐点对样品进行扫描。所以相比一维光学相干系统,所研制的系统

的成像速度大大提高了。



(a) 系统原理图



(b) 系统实物图

图1 二维光学相干层析系统

## 2 去除OCT共轭镜像理论

在频域OCT中,一般是对CCD采集到的光谱进行快速傅里叶变换(FFT)以获得被测样品深度方向的信息。利用FFT变换会出现负共轭镜像现象,使得正(或者负)光程空间出现了图像的混叠<sup>[11]</sup>。两相干光的光强表达式为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\theta \quad (1)$$

式中: $I_1, I_2$ —两相干光的光强; $\theta$ —两光波间相位差。

另外,频域OCT系统中信号光谱还存在自相关信号,故在频域干涉信号中上式可写为:

$$I = I_{\text{直}} + I_{\text{自}} \cos\alpha + I_{\text{干}} \cos\theta \quad (2)$$

式中: $I_{\text{直}}$ —直流噪声光强; $I_{\text{自}} \cos\alpha$ —表示自相关干涉信号强度,其中相位角 $\alpha$ 由样品层析厚度决定,而与参考臂和样品臂之间的光程差无关; $I_{\text{干}} \cos\theta$ —干涉信号,其中相位角 $\theta$ 由参考臂和样品臂之间的光程差决定。

为了去除系统成像中的直流项和自相关项等噪声及FFT变换中的复共轭镜像,本研究采用五步相移干

涉法。当参考臂和样品臂之间的光程差发生变化时就可以得到一个相位差。相位角的求解中常见方法为五步相移计算公式(Hariharan 算法<sup>[12]</sup>),每次引入的相移量依次是:  $-2\Delta, -\Delta, 0, \Delta, 2\Delta$ , 每步相移量为  $\Delta$ 。每次的光强表达式为:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{直} + I_{干} \cos(\theta - 2\Delta) \\ I_2 &= I_{直} + I_{干} \cos(\theta - \Delta) \\ I_3 &= I_{直} + I_{干} \cos(\theta) \\ I_4 &= I_{直} + I_{干} \cos(\theta + \Delta) \\ I_5 &= I_{直} + I_{干} \cos(\theta + 2\Delta) \end{aligned} \quad (3)$$

根据五步相移计算公式可得相位差  $\theta$  可表示为:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} * \sin\Delta \right) \quad (4)$$

因为当相移量  $\Delta$  为  $\pi/2$  时能够最大程度地减少光强误差影响,故本研究中所用相移量  $\Delta = \pi/2$ 。光强大小表达式为:

$$A = \sqrt{[2(I_2 - I_4)]^2 + (2I_3 - I_1 - I_5)^2} \quad (5)$$

得到光谱信号的幅值信息  $A$  及相位信息  $\theta$  后,利用幅值及相位可重新构建干涉光谱的复数序列信息:

$$I(n) = A(n)e^{i\theta(n)} \quad (6)$$

对式(6)进行 FFT 即可得到没有圆周对称的信息,即消除了共轲镜像。

### 3 实验及结果分析

该实验利用自研制的频域 OCT 系统对手机钢化玻璃薄膜结构进行检测以验证所搭建的 OCT 系统对多层薄膜结构厚度检测的可行性。一般的手机钢化玻璃薄膜结构有 4 层结构,包括钢化玻璃、静电胶层 1、防爆贴膜和静电胶层 2。理论计算,当使用卤钨灯作为系统光源时该系统有极高的分辨率,CCD 相机采集得到的二维干涉条纹图和第 500 行干涉光谱图如图 2 所示。

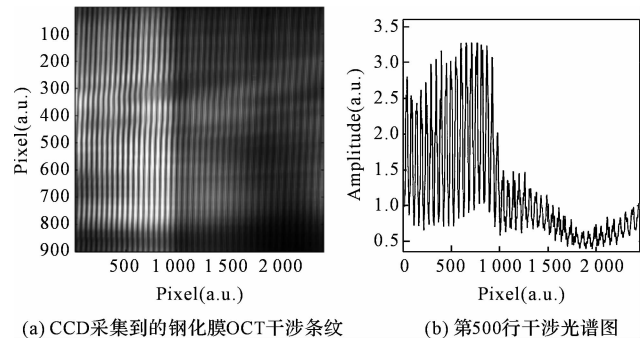


图 2 二维光学相干层析系统采集到干涉条纹和光谱

由图可看出该系统具有较好的信噪比。如果光谱直接做 FFT 变换,则会出现负共轲镜像现象,如图 3 所示。

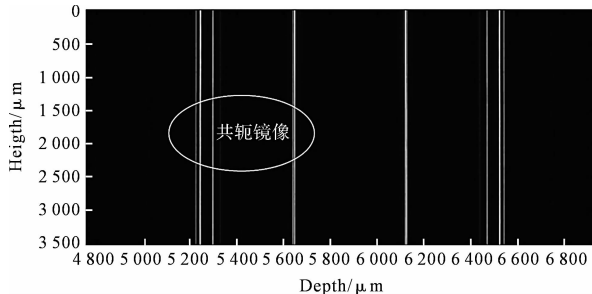


图 3 钢化膜结构图(去共轲镜像前)

为了去除镜相像,本研究采用了五步相移干涉法。五相位是通过使用 PZT 压电驱动器来驱动参考镜来实现的。五相移位法去除干扰信号后的钢化膜结构图如图 4 所示。

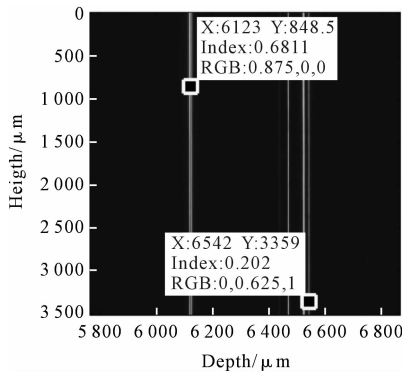


图 4 钢化膜结构图(去共轲镜像后)

由图 4 可知,利用自研发的二维光学相干层析可得到钢化膜各层的厚度分别是:钢化玻璃层厚度为  $219 \mu\text{m}$ ,静电胶层 1 厚度为  $29 \mu\text{m}$ ,防爆贴膜厚度为  $52 \mu\text{m}$ ,静电胶层 2 厚度为  $19 \mu\text{m}$ ,所以测得钢化膜总厚度为  $419 \mu\text{m}$ 。相比本项目组先前研发的单点 OCT 系统<sup>[13]</sup>所测得的厚度  $419 \mu\text{m}$  相符。这就验证了自研制的二维频域 OCT 系统的检测精度,本系统可用于精确测量多层薄膜结构的各层厚度。另外,由于二维 OCT 系统在对钢化膜进行无损检测的时候可以一次成像,不需要像单点 OCT 系统那样对样品进行逐点扫描,这样大大提高了检测速度。

### 5 结束语

为了实现多层薄膜结构的快速精确检测,提出并自研制了二维光学相干层析系统,不需要对样品进行逐点扫描成像,极大提高了光学相干层析的成像速度。为了避免出现图像的混叠,在研究去除 OCT 共轲镜像理论的基础上,利用五步相移干涉法,实现对 OCT 负共轲镜像的去除。其中,5 个相位是通过使用 PZT 压电驱动器来驱动参考镜来实现的。实验结果表明自研制的二维光学相干层析系统精度高、信噪比高、速度快,可以推荐使用在多层薄膜的无损定量评价中。

## 参考文献 (References) :

- [1] 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.
- [2] 申洪苗,马希直,薄油膜厚度分布超声测量机制研[J]. 润滑与密封,2013,38(5):46-50.
- [3] GUO T, WU J, NI L, et al. Initial estimation of thin film thickness measurement based on white light spectral interferometry[J]. **Thin Solid Films**,2016(612):267-273.
- [4] 赵俊梅,林祥德. 非接触方法测量薄膜厚度的研究[J]. 机械管理开发,2006(2):33-34.
- [5] 崔建军,高思田,基于 X 射线掠射法的纳米薄膜厚度计量与量值溯源研究[J]. 物理学报,2014,63(6):60-61.
- [6] LOPES F, AMORIN L, MARTINS L, et al. Thickness measurement of  $V_2O_5$  nanometric thin films using a portable XRF[J]. **Journal of Spectroscopy**,2015(2016):1-7.
- [7] 魏秀芳. 利用等色干涉原理测量薄膜厚度[J]. 甘肃高师学报,2007,12(5):31-32.
- [8] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, et al. Optical coherence tomography[J]. **Science**,1991,254(5035):1178-1181.
- [9] LEE E, BOER J, MUJAT M, et al. In vivo optical frequency domain imaging of human retina and choroid[J]. **Optics Express**,2006,14(10):4403-4411.
- [10] ZHONG S, YAN Y, SHEN Y. Non-destructive testing of GFRP materials by fourier-domain infrared optical coherence tomography[C]. **International Conference on Automatic Control and Artificial Interligence, Xiamen: IEEE**,2012.
- [11] ZHANG K. Full-range Fourier domain optical coherence tomography imaging probe with a magnetic-driven resonant fiber cantilever[J]. **Optical Engineering**,2011,50(11):119-121.
- [12] HARASAKI A, SCHMI J, WYANT J. Improved vertical-scanning interferometry [J]. **Applied Optics**,2000,39(13):2107-2115.
- [13] ZHONG S, SHEN Y, HO L, et al. Non-destructive quantification of pharmaceutical tablet coatings using terahertz pulsed imaging and optical coherence tomography[J]. **Optics and Lasers in Engineering**,2011,49(3):361-365.

[编辑:张 豪]

## 本文引用格式:

陈丹阳,童俊海,钟舜聪,等. 基于二维光学相干层析的多层薄膜结构无损定量评价[J]. 机电工程,2017,34(8):847-850.

CHEN Dan-yang, TONG Jun-hai, ZHONG Shun-cong, et al. Quantitative nondestructive evaluation of multilayer thin films based on two-dimensional optical coherence tomography[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(8):847-850. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

## (上接第 828 页)

- [4] JIANG Ying-ying, TIAN Feng, WANG Xu-gang, et al. Adaptive symbol recognition for sketch-based interfaces based on template matching and SVM[J]. **Chinese Journal of Computers**,2009,32(2):252-260.
- [5] ALMAZAN J, FOMES A, VALVENY E. A non-rigid appearance model for shape description and recognition[J]. **Pattern Recognition**,2012,45(9):3105-3113.
- [6] ESCALERA S, FOMES A, PUJOL O, et al. Blurred shape model for binary and grey-level symbol recognition[J]. **Pattern Recognition Letters**,2009,30(15):1424-1433.
- [7] 赵 鹏,王 斐,刘慧婷,等. 基于深度学习的手绘草图识别[J]. 四川大学学报:工程科学版,2016,48(3):94-99.
- [8] 吴玲达,张友根,邓 维. 面向手绘军标图形的旋转自由识别方法[J]. 中国图象图形学报,2014,19(3):456-462.
- [9] 王国余,李正明,花世群. 手写电气元件符号的识别算法[J]. 江南大学学报:自然科学版,2003,2(1):53-55.
- [10] 周建新,戴 永,王求真. 智能像卡输入的手绘电气符号识别研究[J]. 计算机测量与控制,2006,14(12):1698-1901.
- [11] TSAI W H, FU K S. Error-correcting isomorphisms of attributed relational graphs for pattern analysis[J]. **IEEE Trans Syst Man Cyber**,1979,9(12):757-68.
- [12] YIYAN X, JOSEPH J, LAVIOLA J R. A shortstraw-based algorithm for conner finding in sketch-based interfaces[J]. **Computers&Graphics**,2010,34(5):513-527.
- [13] WOLIN A, EOFF B, HAMMOND T. Shortstraw: a simple and effective corner finder for polylines[C]. Proceedings of the Euro-Graphics 5th Annual Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, Annecy: The Eurographics Association,2008.
- [14] YU Bo, CAI Shi-jie. A domain-independent system for sketch recognition[C]. Proc. of the 1st International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia, New York: ACM Press,2003.
- [15] YU Bo. Recognition of freehand sketches using mean shift [C]. Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent User Interfaces, New York: ACM,2003.
- [16] XU Jun-wen, LIAO Da-xiong, WANG Shu-xia, et al. Recognition of on-line sketched electrical diagrams[J]. **Science Technology and Engineering**,2007,7(6):1089-1094.
- [17] SEZGIN TM, DAVIS R. HMM-based efficient sketch recognition[C]. International conference on intelligent user interfaces, New York: ACM Press,2005.

[编辑:李 辉]