

文章编号: 1001-3806(2012)05-0662-03

基于光学相干层析成像技术的薄膜厚度测量

秦玉伟

(渭南师范学院 物理与电气工程学院, 渭南 714000)

摘要: 为了对薄膜厚度进行测量, 采用白光光谱域光学相干层析成像的测量方法, 进行了理论分析和实验验证, 对以玻璃为基片的单层和多层薄膜样品进行了层析成像实验, 获得了样品的2维层析图像。结果表明, 该系统不仅能显示薄膜样品内部的微观结构, 而且能从2维层析图像中得到单层和多层薄膜的厚度(分别为68 μm 和30 μm), 测量值与理论值相吻合, 从而验证了测量理论正确性。该系统具有较高分辨率, 可实现快速成像, 满足实际工业测量需要。

关键词: 测量与计量; 薄膜厚度; 谱域; 光学相干层析成像

中图分类号: TH744.3; O484.5 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.022

Film thickness measurement based on optical coherence tomography

QIN Yu-wei

(School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Teachers University, Weinan 714000, China)

Abstract: A measuring method based on white-light spectral-domain optical coherence tomography was used to measure thin film thickness. The theory was analyzed and the experiment was done. The single-layer and multi-layer thin film on glass substrate was used for imaging experiments respectively and 2-D cross-sectional images were obtained. The experiment shows that system can not only measure the inner microstructure of the film, but also measure the film thickness of single-layer and multi-layer film in 68 μm and 30 μm respectively. The measured value is the same as the theoretical value, which verifies the validity of the theory. The system has high imaging speed and resolution, and can meet the industrial measurement.

Key words: measurement and metrology; thin films thickness; spectral-domain; optical coherence tomography

引言

薄膜厚度是指基片表面和薄膜表面的距离, 工业生产的薄膜, 其厚度是一个非常重要的参量, 直接关系到该薄膜材料能否正常工作。此外, 薄膜材料的性能、透光性能、磁性能、热导率和表面结构等都与厚度有着密切的联系。薄膜厚度的测量方法有很多, 按照测量的方式分可以分为两类: 直接测量和间接测量。直接测量指应用测量仪器, 通过接触直接感应出薄膜的厚度, 常见的直接法测量有螺旋测微法、精密轮廓扫描法(台阶法)和扫描电子显微法(scanning electron microscope, SEM); 间接测量指根据一定对应的物理关系, 将相关的物理量经过计算转化为薄膜的厚度, 从而达到测量薄膜厚度的目的。

光学相干层析成像(optical coherence tomography,

基金项目: 渭南市自然科学基金基础研究计划资助项目(2011KYJ-3); 渭南师范学院科研计划资助项目(12YKS021)

作者简介: 秦玉伟(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光电检测与传感器技术。

E-mail: qinyuwei@163.com

收稿日期: 2012-01-13; 收到修改稿日期: 2012-02-11

OCT) 是一种利用低相干干涉测量原理的成像技术, 通过检测样品内部不同深度对入射光的背向反射或散射信号, 从而获得样品的2维层析图像或3维形貌图像, 具有较高的分辨率^[1-3]。OCT最初被用来进行生物组织成像, 随着对OCT技术的深入研究, OCT被广泛的应用于工业领域的无损检测、材料厚度测量、表面粗糙度测量、截面成像等^[4-5]。频域OCT(spectral-domain OCT, SD-OCT)具有较高的分辨率和信噪比, 并且不需要轴向机械扫描, 成像速度快, 因此得到了更为广泛的应用^[6-8]。

1 频域OCT的原理与实验设计

频域OCT理论基础是FERCHER等人提出的散射势理论^[9]。频域OCT系统中, 样品的深度信息通过干涉频谱的傅里叶逆变换得到, 而不必移动参考臂, 因此可以极大地提高系统稳定性、信噪比和成像速度^[6-7]。频域OCT系统中, 光谱仪接收的干涉信号 $I(\lambda)$ 为:

$$I(\lambda) \propto S(\lambda) \left\{ 1 + 2 \int_0^{\infty} P(h) \cos\left(\frac{4\pi n_0 h}{\lambda}\right) dh + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P(h) P(h') \exp\left[i \frac{4\pi n_0 h}{\lambda} (h - h')\right] dh dh' \right\} \quad (1)$$

式中 $P(h)$ 和 $P(h')$ 为样品不同深度的散射势,含样品的结构信息; h 和 h' 为不同的探测深度; λ 为光源波长; $S(\lambda)$ 为光源的光谱密度; n_0 为样品的平均折射率。(1) 式中括号内第 1 项为直流项,即直流噪声;第 2 项为互相关项,含样品结构信息;第 3 项为自相关项,为样品不同深度处的散射光之间的干涉。直流项和自相关项的存在会降低图像质量,可通过相移法去除^[3]。对(1) 式中的互相关项进行傅里叶逆变换,并通过偏置光路法去除散射势的共轭项,就可以得到散射势 $P(h)$,获得样品的微观结构信息^[10]。

谱域 OCT 系统主要由低相干光源、光纤迈克尔逊干涉仪和光纤光谱仪构成,系统结构如图 1 所示。该系统采用光纤结构,可以有效提高系统的探测灵活性。OCT 系统中,低相干光源发出的低相干光束经 2×2 单模光纤耦合器(分光比为 50/50)后被分成两部分,一部分称为样品臂,进入样品进行散射;另一部分称为参考臂,经平面镜进行反射。当两臂光程差小于光源相干长度时,样品臂的散射光和参考臂的反射光经光纤耦合器后会发生干涉,干涉光谱中含有样品的深度信息,通过光谱仪采集干涉光谱信号后,将干涉光谱信号传输至计算机进行傅里叶逆变换处理,以得到样品的微观结构信息。通过 2 维的步进电机微位移平台可以实现样品臂和参考臂光程的匹配,并实现样品的 2 维横向扫描,得到样品的 2 维层析图像和 3 维形貌图像。

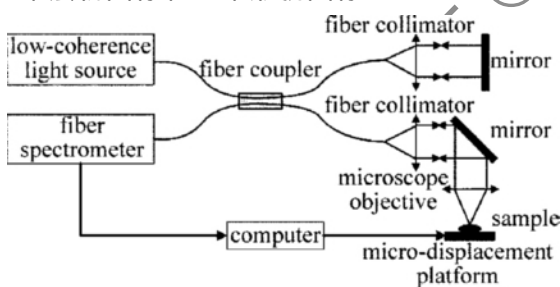


Fig. 1 Schematic of SD-OCT system

2 实验结果与分析

实验样品是以玻璃为基片的单层薄膜和多层薄膜,样品固定在步进电机微位移平台上,通过软件控制行程对光路进行调整,使样品光和参考光之间发生谱域干涉,当光谱仪上观察到清晰的余弦调制信号时停止光路调整,采集干涉光谱信号,并通过计算机对干涉光谱信号做傅里叶逆变换,得到样品的散射势,即 1 维深度图像,如图 2a 所示,其中 A-scan 表示深度坐标, X-scan 表示横向坐标。可以看出,图 2a 中存在两个明显的散射势峰值,分别表示样品薄膜的上表面和下表面位置,两散射势峰值横坐标之差约为 $68 \mu\text{m}$,即为薄膜

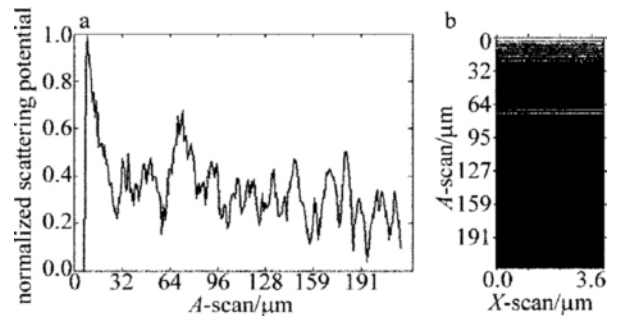


Fig. 2 a—1-D depth image of single-layer thin film b—2-D cross-sectional image of single-layer thin film

厚度,与理论值基本吻合。对样品进行横向扫描,将光谱仪连续采集的多个干涉光谱信号进行傅里叶逆变换,并将得到的多个 1 维散射势赋灰度值,得到样品的 2 维层析图像,如图 2b 所示。

由于薄膜表面反射较强,表现为层析图像顶部的亮线,而玻璃基片基本无反射,表现为暗色。通过 2 维层析图像可以看出,薄膜上下表面之间的深度坐标值之差约为 $68 \mu\text{m}$,即薄膜厚度约为 $68 \mu\text{m}$ 。图 3 为多层薄膜样品的 1 维深度图像和 2 维层析图像。图 3a 中的多个散射势峰值表示薄膜边界,在图 3b 的 2 维层析图像中表现为亮线。从 1 维散射势和 2 维层析图像中,可以看出样品的多层薄膜结构,多层薄膜的厚度约为 $30 \mu\text{m}$ 。

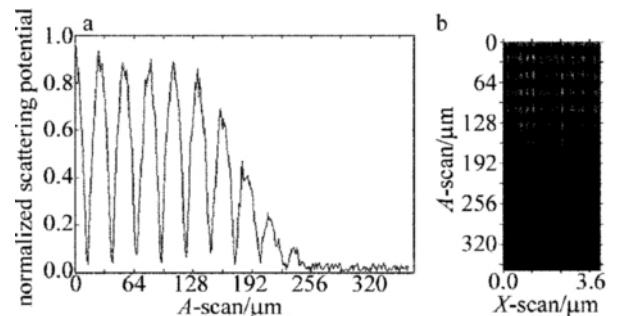


Fig. 3 a—1-D depth image of multi-layer thin film b—2-D cross-sectional image of multi-layer thin film

对厚度为 $18 \mu\text{m}$ 、以玻璃为基片的金属薄膜样品进行了层析成像实验,测得薄膜的厚度为 $16.8 \mu\text{m}$,验证了该测量方法的实用性,但由于金属薄膜对白光谱散射较强,因此,白光难以穿透多层金属薄膜,无法对多层金属薄膜进行厚度测量。

3 结论

提出了一种利用白光谱域 OCT 原理的薄膜厚度测量方法,对单层薄膜和多层薄膜样品的成像实验,得到了两个样品的 2 维层析图像,并且从图像中得到了薄膜厚度,与薄膜理论厚度基本吻合。该系统具有高分辨率和信噪比,且成像速度较高,可广泛应用于工业测量领域,如半导体质量检测 and 机电系统的研究等,

具有良好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] HUANG D , SWANSON E A , LIN C P , *et al.* Optical coherence tomography [J]. *Science* , 1991 , 254(5035) : 1178-1181.
- [2] CHANG Sh D , MAO Y X , COSTEL F , *et al.* Optical coherence tomography: technology and applications [J]. *Proceedings of SPIE* , 2009 , 7156: 1-8.
- [3] FERCHER A F , DREXLER W , HITZENBERGER C K , *et al.* Optical coherence tomography-principles and applications [J]. *Reports on Progress in Physics* 2003 , 66(2) : 239-303.
- [4] WIESAUER K , PIRCHER M , GOTZINGER E , *et al.* En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation [J]. *Optics Express* , 2005 , 13(3) : 1015-1024.
- [5] CHANG Sh D , MAO Y X , CHANG G M , *et al.* Jade detection and analysis based on optical coherence tomography images [J]. *Optical Engineering* , 2010 , 49(6) : 1-6.
- [6] LEITHEB R , HIEZENBERGER C K , FERCHER A F. Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express* , 2003 , 11(8) : 889-894.
- [7] 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]. *Optics Letters* 2003 28(21) : 2067-2069.
- [8] YUN S H , TEARNDY G J , de BOER J F , *et al.* High-speed optical frequency-domain imaging [J]. *Optics Express* , 2003 , 11 (22) : 2953-2963.
- [9] FERCHER A F , HITZENBERGER C K , KAMP G , *et al.* Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry [J]. *Optics Communications* , 1995 , 117(1/2) : 443-448.
- [10] TARGOWSKI P , WOJTKOWSKI M , KOWALCZYK A , *et al.* Complex spectral OCT in human eye imaging in vivo [J]. *Proceedings of SPIE* 2003 5140: 28-32.

版权所有 © 《激光技术》编辑部