

基于图像锁相的薄膜吸收多通道检测技术

陶春先^{1,2} 赵元安¹ 贺洪波¹ 邵建达¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 从理论和应用两方面对光学薄膜吸收缺陷的检测方法进行了研究。基于 CCD 摄像机的图像锁相技术, 提出了不同于传统逐点扫描方法的多通道薄膜吸收检测方法。基于逐点扫描法和图像检测法, 分别计算了大区域内薄膜单点缺陷所对应的吸收分布, 结果证明了图像法应用于较大口径薄膜元件吸收检测的可行性。计算和实验表明: 相对于逐点法, 图像法测量薄膜速度可以提高上百倍, 避免了逐点扫描法中耗时长、效率低的不足, 扩展了光热技术在大口径镀膜光学元件中的应用。

关键词 光学薄膜; 吸收测量; 光热效应; 图像锁相

中图分类号 TN247; O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2333

Multi-Channel Absorption Measurement of Optical Coatings Based on Image Lock-in Technique

Tao Chunxian^{1,2} Zhao Yuan,an¹ He Hongbo¹ Shao Jianda¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract The absorption detection of optical coatings is studied in theory and application. A novel method of multichannel measurement based on image lock-in is presented. The comparison between the calculated measuring results of point by point method and multichannel method is made, which proves the feasibility of the multichannel method for large scaled coatings measurement. Through calculation, it is known that the measuring speed of image method can be increased more than hundreds of times compared with that of the past. This technique avoids the weakness of long time-consuming and low efficiency in traditional method and expands the application of photothermal technique in large scale optical coatings.

Key words optical coating; absorption measurement; photothermal effect; image lock-in

1 引 言

薄膜吸收不仅是影响其光学性能的重要因素, 更是导致薄膜激光损伤的直接原因。薄膜吸收的来源虽然复杂多样, 但微小的吸收同样会导致光学元器件的致命损伤。因而不仅要定性的寻找薄膜吸收的来源和机制, 还要对其作精确测量和分析, 并对吸收区域进行精确定位。通过测量薄膜吸收和热缺陷分布, 从而分析薄膜损伤机制, 提高改进制备工艺, 提高其抗损伤能力。薄膜吸收的测量和吸收缺陷分

布定位严格依赖于所采用的测量技术和手段。如今, 激光辐照引起的光热效应已经广泛应用于薄膜和晶体的吸收和损伤检测中^[1]。该方法以其无损, 高精度, 高灵敏度等特点而在薄膜吸收测量, 局部缺陷探测中得到广泛应用, 并逐渐发展出多种各具特点的实用测量技术, 如光热辐射法, 激光量热法, 光热偏转法, 光热位移法以及热透镜技术^[2~5]。其中, 表面热透镜技术(STL)具有无损检测的特点, 且调节方便, 测量稳定, 其对薄膜吸收的测量精度可以达

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-11-18

作者简介: 陶春先(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光学薄膜吸收测量与损伤检测等方面的研究。

E-mail: taochx@siom.ac.cn

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学薄膜技术与光电信息功能薄膜等方面的研究。

E-mail: jdshao@mail.shenc.ac.cn

到 10^{-6} 甚至更低的量级。该技术为光学薄膜的激光损伤研究和薄膜品质检测提供了有力的工具,获得了国内外研究人员的广泛关注^[6~11]。

在表面热透镜技术中,锁相放大器是非常有效的吸收信号检测工具。但是锁相放大器得到的仅是膜面单像素点的吸收信号,为实现对不同区域的吸收检测,通常采用传动平台逐点测量的栅扫描模式。该信号处理方法是种串行运行的模式,实际上是一种单通道检测技术。在应用于对大口径激光薄膜的面吸收检测中存在耗时的极大缺陷,而且难以保证仪器的稳定性。因此希望通过扩展测量空间范围,即在测量过程中以空间换时间从而提高测量效率。基于对大口径薄膜的测量要求,我们提出了一种基于图像锁相技术的多通道检测方法。通过图像信号和参考图像信号的相干运算实现对大区域上微小信号的窄带检测。结合高速 CCD 相机实现对大口径光学薄膜吸收及热缺陷分布的快速测量。

2 多通道检测原理

2.1 锁相原理

相对于应用锁相放大器的单像素检测模式,图像锁相是一种实现弱信号的多像素同步检测的多通道技术。锁相技术的核心原理可以用下面的相关函数表示为

$$R(\delta, T) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)g(t+\delta)dt, \quad (1)$$

式中 T 为参考信号 $f(t)$ 和探测信号 $g(t+\delta)$ 相关运算的积分时间, $R(\delta)$ 表示两个信号间的相关程度; 相关度 $R(\delta)$ 取值不为零则意味着存在一个与参考信号相关的非零的探测信号 $g(t)$ 。锁相技术依靠探测信号对频率确定的参考信号的响应关系,因此需要施加调制或激励从而获得同频率的探测信号。作为测量中一种最普遍的情况,常将调制频率为 f_0 的谐波函数作为作参考信号,其表达式为

$$f(t) = a\sin(2\pi f_0 t), \quad (2)$$

当测量信号被以相同频率调制时,那么实验中参考光将对探测信号中的同频信号产生响应。实际上被调制的探测信号包含多种高频信号,该探测信号可以表示为

$$g(t) = b\sin(2\pi f_0 t + \Delta) + H, \quad (3)$$

其中振幅 b 为待测的信号幅值, H 为高阶谐波,相位参量 Δ 为测量信号相对于参考信号的相移,其产生有延迟或信号传递等多种因素。由此可以得到表征

锁相信号的自相关函数表达式

$$R(nT, \Delta) = \frac{ab}{nT} \int_0^{nT} \sin(2\pi ft) \sin(2\pi ft + \Delta) dt, \quad (4)$$

其中 nT 为积分上限,周期 T 为调制频率 f_0 的倒数。 n 取值影响测量精度和工作时间。

2.2 图像锁相技术

光学锁相基于锁相原理利用面阵 CCD 元件将传统锁相的同步测量变为同步记录方式^[7~9]。根据时域特征的取样平均来改善信噪比并恢复波形的测量。对于任何重复的信号波形,在其出现期间只取一个样本,并在固定的取样间隔内重复 m 次。由 \sqrt{m} 法则可知,信噪比改善 $R_{SN} = \sqrt{m}$ 。若将所描述的信号按时间顺序划分为 n 个间隔,将每个间隔的平均结果记录下来,便能使噪声污染的信号波形得到恢复。

系统中待探测信号由样品对激励光的光热效应产生。对激励光施加频率为 f 的调制在样品表面产生周期性信号。探测光通过样品的激励区域后受该周期性信号影响产生时变的探测信号 $g(t)$ 。一般地,实际测量中采用方波或正弦波的振幅调制。这两种调制方式在应用中在取一级近似的条件下是等效的。因此,探测信号表达式为

$$g(t) = A[1 + \cos(\varphi_0 + 2\pi ft)]/2, \quad (5)$$

其中 A, φ_0, f 分别表示探测信号的振幅,初始相位和频率。

对于频率为 f 的图像信号 $g(t)$,选取合适的参考图像信号是完成光学锁相的必要前提条件。因为只有通过参考信号锁定其任意相位状态,才能由多像素接收器(如高速 CCD 相机)记录整个图像信号。根据 2.1 所述的锁相原理,为实现图像信号的锁定,所应用的参考图像信号必须严格满足锁相条件 $f_0 = f$ 。基于上述前提,在设计中采用了对探测信号的双调制法实现光学锁相,如图 1 所示,即通过对探测光进行与激励光同频率调制的方法获取参考图像信号 $f(t)$ 。

在一个周期内所得到的锁相信号取决于参考信号不同的初始相位

$$\varphi = \varphi_0 + n2\pi/N \quad (6)$$

其中 n 为取值范围在 $0 \sim N$ 的整数。

测量中有多种算法应用于图像锁相中,如四步相关法(Four-point correlation)和数字正弦余弦法(Digital sin/cos)。从本质上讲,这几种算法都是通

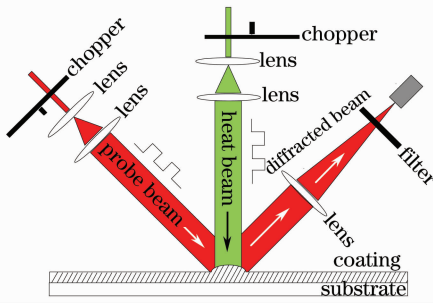


图1 图像锁相的双调制设计

Fig. 1 Double modulation configuration of image lock-in
 过分别或同步记录同相和异相信号,从而获取待测信号的振幅和相位。四步相关具有算法计算便捷,适用于信号在线测量的特点,所以被应用于对薄膜吸收的多通道检测中。根据四步相关算法,公式(6)中 $N = 4$,即只需分别记录如下四个相对相位的信号对应的锁相信号 S_1, S_2, S_3, S_4 :

$$\Delta\varphi(t) = \varphi - \varphi_0 = 2\pi ft_j = \begin{cases} 0, \pi \\ \pi/2, 3\pi/2 \end{cases}, \quad (7)$$

上式表示的相位对应于每个周期内的四个时间点。 j 个周期内的四步相关算法的图像采集时间点满足下式:

$$t_j = \begin{cases} j/f \\ (4j+1)/(4f) \\ (4j+2)/(4f) \\ (4j+3)/(4f) \end{cases}. \quad (8)$$

在三个调制周期内进行图像锁相运算的工作程序如图2所示。在(8)式所示时间点 t_j , 利用 CCD 逐次记录探测信号 S_1, S_2, S_3, S_4 。CCD 相机在图像采集中相当于一个时间积分器,积分时间对应于锁相放大器窄带滤波的带宽 δt 。经过 N 个周期内的重复积分,探测信号上任意点 $r(x, y)$ 的锁相信号表示为

$$S_n(r) = \frac{1}{N\delta t} \sum_{j=1}^N g_{n,j}(r), \quad (9)$$

那么可以得到在信号面上点 $r(x, y)$ 的锁相信号表

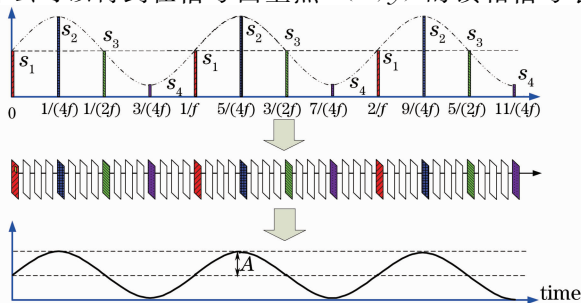


图2 图像锁相工作序列图

Fig. 2 Sequence diagram of image lock-in operation

达式为:

$$\begin{cases} S_1(r) = A(r) [1 + \cos(\varphi_0)]/2 \\ S_2(r) = A(r) [1 + \cos(\varphi_0 + \pi/2)]/2 \\ S_3(r) = A(r) [1 + \cos(\varphi_0 + \pi)]/2 \\ S_4(r) = A(r) [1 + \cos(\varphi_0 + 3\pi/2)]/2 \end{cases}, \quad (10)$$

由此可以得到锁相信号的振幅 $A(r)$ 和相位 $\varphi_0(r)$ 计算公式:

$$A(r) = \sqrt{[S_1(r) - S_3(r)]^2 + [S_2(r) - S_4(r)]^2},$$

$$\varphi_0(r) = \arctan \left[\frac{S_1(r) - S_3(r)}{S_2(r) - S_4(r)} \right]. \quad (11)$$

(11)式对探测像面上的其他像素点同样适用,由此可以同时得到整个探测面的微弱信号。CCD 相机作为多像素接收器,其相面元由数百万个光敏元件组成,而每个单元可以作为独立的信号接收元从而辅助实现锁相放大器的功能。这种探测方法遵从锁相原理的核心公式,但是同时具有多点探测同步记录的特点。从本质上讲,光学锁相实现了对大区域范围内的弱信号的多通道探测。

3 薄膜吸收的多通道测量

3.1 实验装置

基于图像锁相的多通道测量的实验装置如图3所示。以多通道模式进行光学薄膜的面吸收及热缺陷分布测量,需要通过扩束镜增大抽运激光的激励面积和探测激光的覆盖面积。激励光源为 1064 nm YAG 连续激光器,探测光源为 632.8 nm MS120 He-Ne 激光器。激励光和探测光分别通过扩束准直透镜组后,形成有较大光斑的近平行光。调制器为两个电子快门,通光口径 6 mm,频率范围在 0~500 Hz,分别被其驱动器驱动。触发脉冲由 NI 公司的 I/O 数据卡产生。根据表面热透镜理论,必须保证测量的信号处于吸收值与激励功率的线性范围内,因此在抽运光路中放置衰减器,其衰减范围在 0.01%~100%连续可调。

CCD 相机空间分辨率 1024 pixel×1024 pixel, 帧速 30 frame/s。它在较弱的光信号下具有较高的灵敏度和较好的图像分辨能力,图像采集的帧速和数据传输速度较理想;同时,它与 NI 公司的数据卡匹配较好,可以与测试系统的其他单元兼容共享驱动信号。计算机作为数据卡和图像卡的载体,利用 LabVIEW 程序命令控制触发脉冲从而实现对调制器和图像采集的控制。图像信号经过计算机的在线实时处理将测试结果以图像和数据的形式保存在硬盘中。

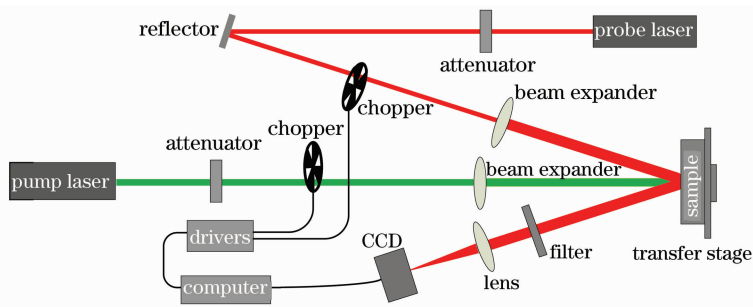


图3 薄膜吸收多通道测量实验装置图

Fig. 3 Setup of multichannel absorption measurement of optical coatings

3.2 理论计算和测试分析

结合表面热透镜理论,利用薄膜吸收的多通道测量原理计算了理想条件下的薄膜吸收和热缺陷分

布。在探测光为基模高斯光束条件下,探测信号遵循菲涅耳衍射的形式,那么热透镜效应下的探测光衍射光场表达式为

$$E(r,t) = \oint_{\epsilon} \{1 - iku_0 \exp[-(\alpha^2 + \beta^2)/(4R^2)] [1 - \cos(2\pi ft)]\} \exp\{-ik(\alpha^2 + \beta^2)/(2q) + ik[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2]/(2z_{sd})\} d\alpha d\beta, \quad (12)$$

公式中 c 是与腰斑半径、波长和传输距离有关的实验常数, $k = 2\pi/\lambda$ 表示光束的光学矢量, q 为高斯光束的复曲率半径, z_{sd} 表示膜面到接收面的距离。接收面上的衍射光强分布为

$$I(r,t) = |E(r,t)|^2. \quad (13)$$

根据 2.2 节所述算法,所得到的四个相位状态下的锁相图像信号如图 4 所示。其中图 4(a)~(d) 分别记录了一个周期内弱信号具有 $\pi/2$ 的相位差的四个波动状态 S_1, S_2, S_3, S_4 。

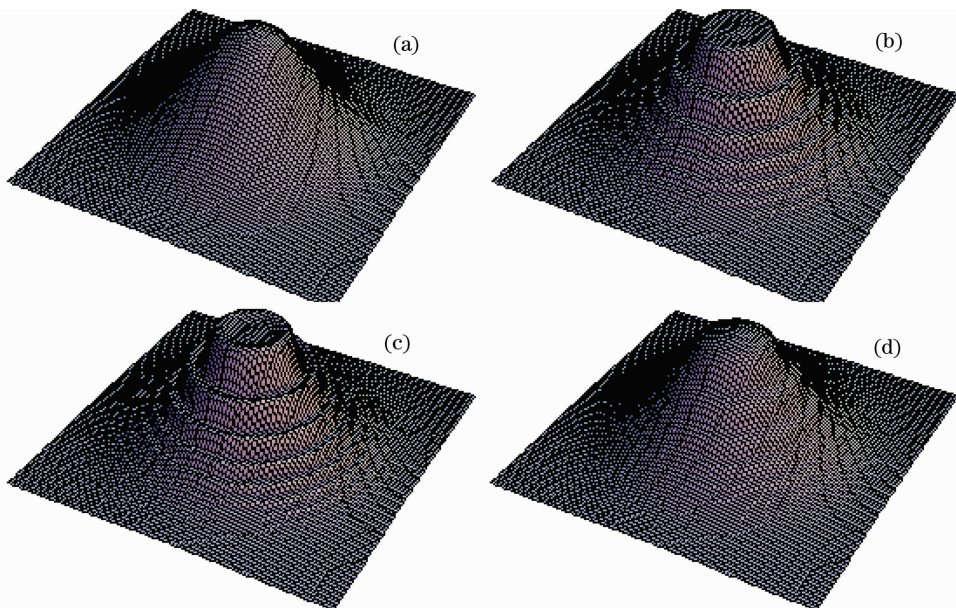


图4 光学锁相在(a)0°, (b)90°, (c)180°, (d)270°的相关锁相信号

Fig. 4 Image signals of image lock-in arithmetic at (a) 0°, (a) 90°, (a) 180°, (a) 270°

薄膜激励区域上的吸收反映在图像锁相信号的幅值大小和空间分布上。图 5 表示了由于探测区域上存在较大的吸收缺陷点,该处锁相信号的幅值明显大于其他区域。这与运用锁相放大器的单像素测

量的结果一致。由于光学锁相具有能应用于整个探测区域的特性,因此激励区域内其他缺陷点的吸收情况可以同步得到,由此表明基于光学锁相的多通道测量方法是可行有效性的。

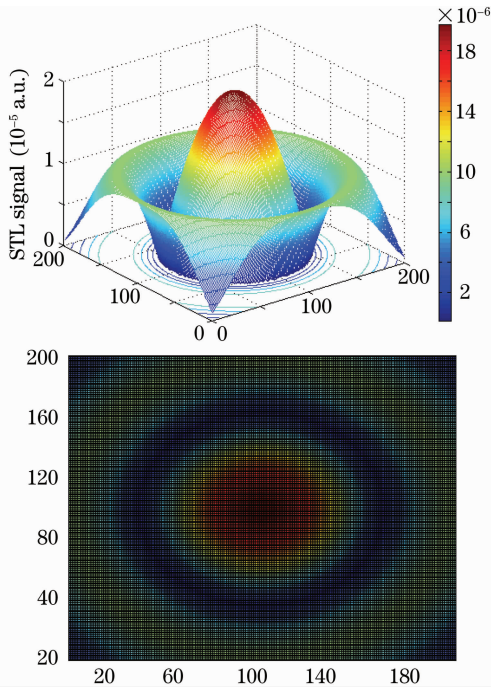


图5 薄膜弱吸收信号幅值 $A(r)$ 的三维和二维分布
Fig. 5 Amplitude distribution of weak absorption in signals three-dimension and two-dimension

多通道测量的测量时间受到 CCD 相机的采集速度和激励区域大小等有关。完成整个测量流程所需的时间主要包括如下部分:1) 激光器启动及稳定时间;2) 测量程序初始化时间;3) 图像锁相测量时间;4) 图像后处理时间。其中第三部分对减少测量时间起最大作用。该过程中通过提高激励光的功率使得单次测量面积可达 $0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 从而极大降低了所需的测量时间, 实际测量速度可以提高两个量级。高速 CCD 相机具有较短的积分时间, 这样在降低了带宽提高测量精度的同时提高了测量效率。

4 结论

薄膜吸收的多通道测量技术能够实现对大口径薄膜样品的快速高效测量。相对于栅扫描模式, 多通道测量在测量速度上可以提高数百倍。应用大口径薄膜损伤检测时, 为薄膜缺陷点的检测和预处理

提供了有利的辅助工具。

参 考 文 献

- 1 Robert Chow, J. R. Taylor and Z. L. Wu. Absorbance behavior of optical coatings for high-average-power laser applications[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(4): 650~658
- 2 Z. L. Wu, C. J. Stolz, S. C. Weakley *et al.*. Damage threshold prediction of hafnia-silica multilayer coatings by nondestructive evaluation of fluence-limiting defects[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **41**(16): 1897~1906
- 3 Hu Wentao, Fan Zhengxiu, Liu Liming. Measurements of weak absorption of optical coatings for multi-wavelength by photothermal deflection technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(5): 475~478
胡文涛, 范正修, 刘立明. 用光热偏转技术实施光学薄膜微弱吸收的多波长测量[J]. *光学学报*, 1993, **13**(5): 475~478
- 4 Li Bingcheng, Xiong Shengming, Holger Blaschke *et al.*. Measuring weak absorbance of optical thin films with laser calorimetric technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 823~826
李斌成, 熊胜明, Holger Blaschke 等. 激光量热法测量光学薄膜微弱吸收[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 823~826
- 5 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Zhao Qiang. Measuring weak absorbance of thin film coatings by surface thermal lensing technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 150~154
胡海洋, 范正修, 赵强. 表面热透镜技术探测光学薄膜的微弱吸收[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 150~154
- 6 Laurent Gallais, Mireille Commandré. Simultaneous absorption, scattering, and luminescence mappings for the characterization of optical coatings and surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7): 1416~1424
- 7 B. Bertussi, J. Y. Natoli, M. Commandré. High-resolution photothermal microscope: a sensitive tool for the detection of isolated absorbing defects in optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7): 1410~1415
- 8 P. K. Kuo, T. Ahmed, H. Jin *et al.*. Phase-locked image acquisition in thermography[C]. *SPIE*, 1988, 1004: 41~45
- 9 A. Dubois, A. C. Boccara, M. Lebec. Real-time reflectivity and topography imagery of depth-resolved microscopic surfaces[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5): 309~311
- 10 Xu Cheng, Dong Hongcheng, Ma Jianyong *et al.*. Influences of SiO_2 protective layers and annealing on the laser-induced damage threshold of Ta_2O_5 films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 228~230
- 11 Xu Cheng, Dong Hongcheng, Xiao Qiling *et al.*. Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta_2O_5 films deposited by different methods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1595~1599
许程, 董洪成, 肖祁陵等. 不同方法制备的 Ta_2O_5 薄膜光学性能和激光损伤阈值的对比分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1595~1599