

测量薄膜厚度的数字叠栅技术

苏俊宏 刘奕辰

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 现代干涉测试的核心是用合理的算法处理干涉图而获得所需的面形及参数。由于常见的相移法要通过移相器有规律地移动采集多幅干涉图并数字化后求取波面的相位分布, 这样必然引入由于移相器的线性及非线性误差所带来的计算误差, 因此需要事先对移相器进行标定。采用了数字叠栅方法, 利用一幅静态干涉图与一个正弦光栅的四幅光强分布图叠加, 从而实现相移式动态干涉测试的效果, 借助于相移法处理干涉图原理, 可获得波面相位分布, 从而实现对薄膜厚度的测量。由于正弦光栅的初始相位是由计算机产生的, 所给出的相位移动不含任何移相误差, 因此可提高测量的精度。

关键词 薄膜; 厚度; 干涉图; 移相干涉法; 叠栅技术

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1108002

Digital Moiré Technique for Thin Film Thickness Measurement

Su Junhong Liu Yichen

(School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract The core of the modern interferometry is to obtain the necessary surface shape and parameters by processing the interferogram using the reasonable algorithm. The method of the common phase shifting interferometry is to obtain the wave surface by digitalizing the multiple interferogram which is gained by the ordered translation motion of the phase shifter, which will introduce a calculation error produced by linear and nonlinear error of phase shifter. Therefore, the phase shifter must be calibrated first. The digital Moiré technique is used, which is to separately overlay a static interferogram with four surfaces of intensity distribution of the sinusoidal grating with different light distribution, achieving the effect of dynamic test based on the phase shifting interferometry, then to obtain the phase distribution based on the principle of the phase shifting interferometry, and thus to realize the measurement of thin film thickness. The initial phase of the sinusoidal grating is generated by the computer, so this phase shift has no error on phase shift, which makes the accuracy of measurement improved.

Key words thin films; thickness; interferogram; phase shifting interferometry; Moiré technology

OCIS codes 120.3180; 120.4120; 120.5050; 120.2650

1 引 言

随着薄膜技术和光电器件的广泛应用, 光学薄膜已被广泛应用于基础研究及特种器件的研制与生产中。面对新型光电器件不断地更新和发展的现状, 对光学薄膜各种参数的精密测量提出了更高的要求。而薄膜厚度是薄膜设计和工艺制造中的关键参数之一, 特别是纳米级薄膜技术的迅速发展, 使得精确测量薄膜厚度成为研究领域中的热点问题。光干涉计量测试技术以波长为计量单位, 是一种公认

的高精度计量测试技术。其中移相干涉技术测量精度高、速度快, 在高精度光学检测中占有重要的地位^[1]。但这种技术需要增加高精度的移相器^[2], 同时必须保证采样过程中有效抑制环境因素所产生的噪声。

本文介绍一种新型技术可以有效避免移相器产生的误差。倾斜干涉仪的参考反射镜, 干涉图中的条纹数增加, 由此可以获得加有一定载频的静态干涉图^[3]。对此干涉图进行傅里叶分析, 可得到载频

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-07-17

基金项目: 科技部国际科技合作(2010DFR70530)资助课题。

作者简介: 苏俊宏(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电技术及仪器、薄膜技术及检测等方面的研究。

E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn

的数值。根据计算出的载频数据,可由计算机生成相同空间频率的正弦光栅。将原始干涉图与正弦光栅叠加,可以产生叠栅条纹图。改变正弦光栅的初始相位,使得相邻两幅光栅的初始相位相差 $\pi/2$,依次产生 4 幅正弦光栅并分别与原始干涉图叠加,从而生成 4 幅叠栅条纹图。选取合适的滤波器,从叠栅条纹图中滤除高频信息,并提取差频信息,便可得到 4 幅含有薄膜波面信息的干涉图。采用四步移相算法,可以直接从上述干涉图中计算得到薄膜的波面信息。这种方法采用移相干涉算法处理静态干涉图,由于正弦光栅初始相位的改变是由计算机产生的,故由此产生的相位移动不含任何移相误差,从而避免了一般移相干涉测试中由于移相器的线性及非线性误差所带来的计算误差^[4]。

2 数字叠栅技术测量薄膜厚度原理

倾斜干涉仪的参考反射镜,就可以得到一幅有线性载频 f 的干涉图,其光强表达式为

$$I(x, y) = a + b \cos[2\pi f x + \phi(x, y)], \quad (1)$$

式中 a 和 b 为位置坐标 (x, y) 的函数, a 为干涉图背景, b/a 为干涉图对比度, $\phi(x, y)$ 为待测相位。

引入一幅与此干涉图相对应的参考干涉图,其光强表达式为

$$I_r(x, y) = 1 + \cos(2\pi f_r x + \phi_r), \quad (2)$$

式中 f_r 称为参考载频, ϕ_r 为初始参考相位。

将这两幅干涉图叠合,可以生成叠栅条纹图,表达式为

$$s(x, y) = a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \phi_r] + 0.5b \cos[2\pi(f + f_r)x + \phi + \phi_r] + a \cos(2\pi f x + \phi) + b \cos(2\pi f_r x + \phi_r). \quad (3)$$

如果采用合适的滤波器,可以从叠栅条纹图中提取出含有待测相位的干涉图。滤波后图像的强度表达式为

$$S(x, y) = a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \phi_r]. \quad (4)$$

如果在选择参考干涉图时,将 ϕ_r 值分别选为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 经过滤波后可以得到 4 幅图像光强表达式分别为

$$\begin{aligned} S_1(x, y) &= a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi], \\ S_2(x, y) &= a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \pi/2], \\ S_3(x, y) &= a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \pi], \\ S_4(x, y) &= a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - 3\pi/2]. \end{aligned} \quad (5)$$

通过移相算法对这 4 幅图像进行处理,可以得到被测干涉图的波面。即

$$2\pi(f - f_r)x + \phi = \arctan \left[\frac{S_2(x, y) - S_4(x, y)}{S_1(x, y) - S_3(x, y)} \right]. \quad (6)$$

如果 $f = f_r$, 求出的就是待测波面,但由于在实际计算时 f, f_r 不可能完全相等,求出的是带有一定倾斜的波面,因此只要将此波面消倾斜即可抑制其对算法的影响。

3 获取干涉图

薄膜的厚度信息是基于 Twyman-Green(泰曼格林)型干涉仪获取干涉图进行测量的,整个测量原理及过程如图 1 所示。

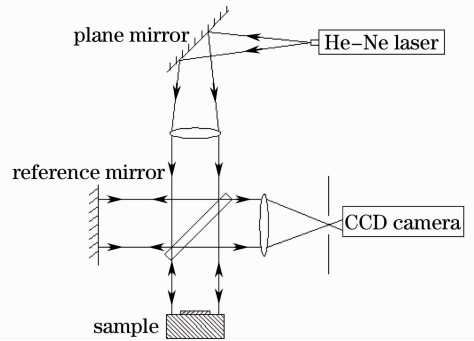


图 1 泰曼格林干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Twyman-Green interferometer

实验中所用膜层为采用热蒸发工艺镀制的 SiO_2 薄膜,使用玻璃作为基底。仪器采用频率稳定的 He-Ne 激光器作为干涉仪的光源,激光器波长为 632.8 nm 。用光纤将激光引入干涉仪的准直系统,由准直系统进行扩束,这束光经分光镜分成两束,其中一束到达参考反射镜,经反射镜反射后再返回到分光镜;另一束平行光经被测薄膜表面和样片基底两个面分别反射后,返回到分光镜并在分光镜处发生干涉,产生光强按正弦规律分布的干涉条纹图像,采集干涉图进行分析。

4 数字叠栅技术的关键技术及数据处理

由泰曼格林干涉仪得到的干涉图如图 2 所示。对有载频的干涉图进行傅里叶变换,将其频谱面上一阶旁瓣中心所对应的频率作为参考载频 f_r 引入。通过计算得到 f_r , 利用(2)式将 ϕ_r 值分别选为 $0,$

$\pi/2, \pi, 3\pi/2$, 可以由计算机生成 4 幅虚光栅参考干涉图如图 3 所示。根据(3)式, 将带有薄膜厚度信息的原始干涉图分别与 4 幅参考干涉图叠加, 生成 4 幅叠栅条纹图如图 4 所示。因为差频($f - f_r$)远小于载频 f 与参考载频 f_r , 故只要选取合适的低通或带阻滤波器, 就可以滤除原始干涉图和参考干涉图的高频信息, 从而提取出其中的叠栅条纹信息。滤波后的叠栅条纹图如图 5 所示。

结合 4 幅叠栅条纹图, 根据(4)~(6)式就可以计算出被检测面的相位。但根据(6)式知道, 这个相位是由反正切函数求得的, 计算机算得的相位主值分布在 $[-\pi, +\pi]$ 之间, 而实际干涉图所包含的相位变化往往大于一个周期 2π , 因此, 计算得到的相位主值是包裹相位。从而需要找到跃变点, 将包裹相位链接成光滑的曲面, 这个过程称之为解包^[5]。

图 6 即是被包裹的相位图。利用最优路径方法对该包裹相位进行解包后得到实际的薄膜波面, 图 7 是解包后的相位图, 图 8 是经过消倾斜算法处理得到的薄膜三维波面图, 图 9 是解包后三维波面图截取的一维曲线示意图。

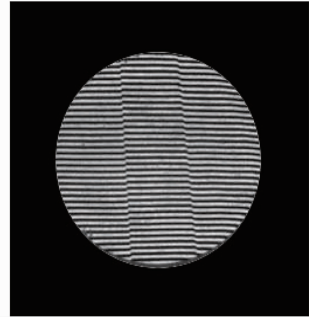


图 2 带有一定载频的干涉图

Fig. 2 Thin film interferogram with carrier frequency

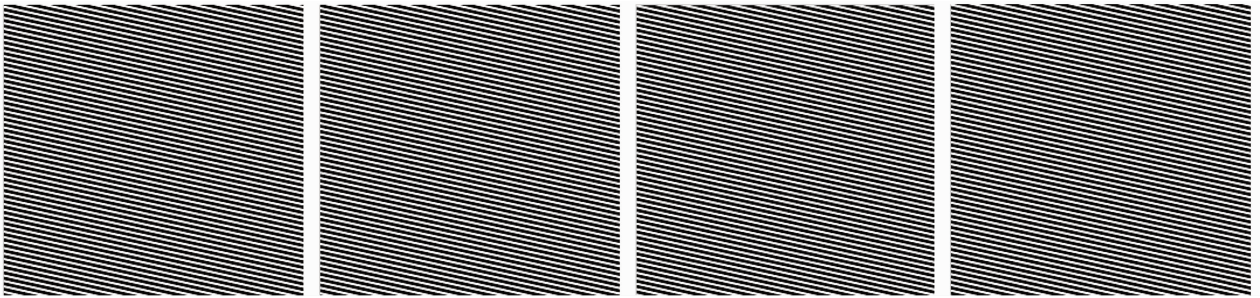


图 3 由计算机生成的 4 幅虚光栅参考干涉图

Fig. 3 Four virtual grating reference interferograms by computer

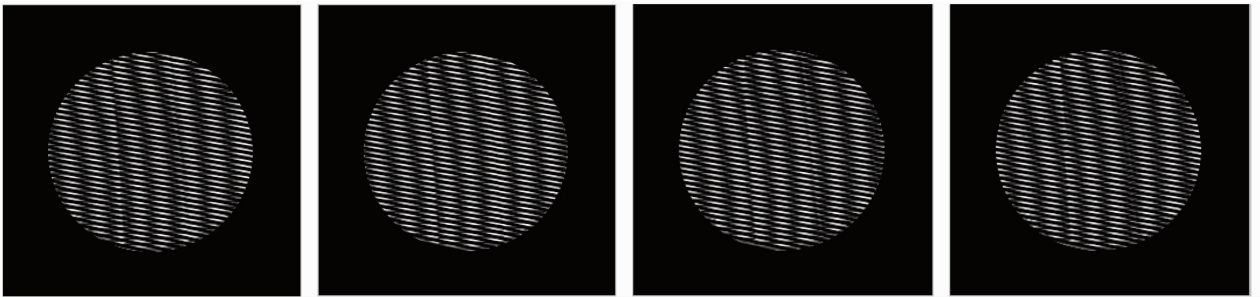


图 4 叠栅条纹图

Fig. 4 Moiré fringe patterns

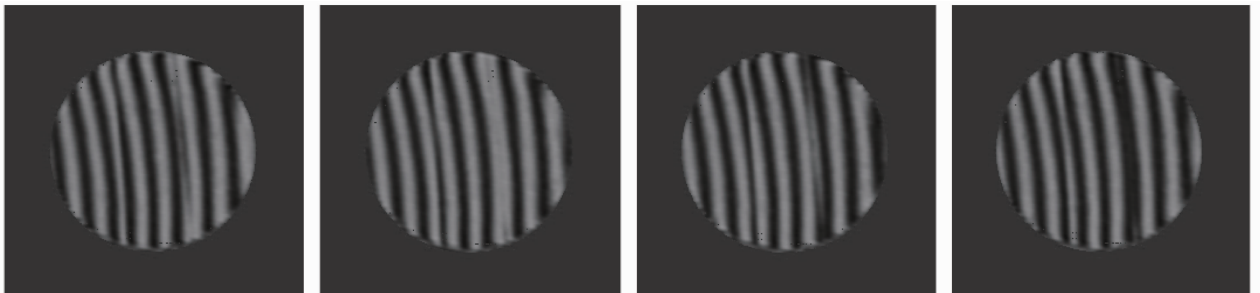


图 5 滤波后的叠栅条纹图

Fig. 5 Four Moiré fringes patterns obtained by the low pass filter

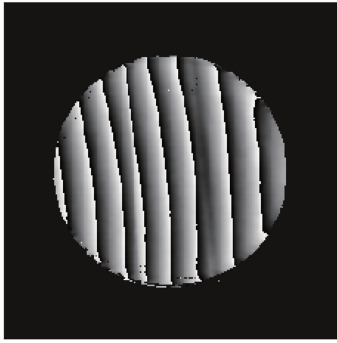


图 6 被包裹的相位图

Fig. 6 Wrapped phase diagram

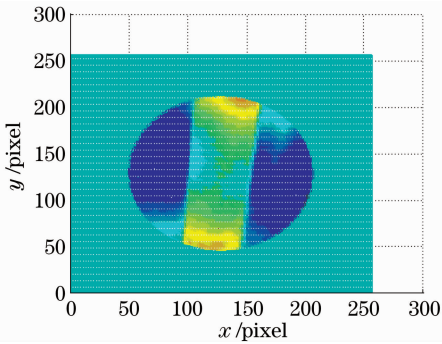


图 7 解包后二维相位图

Fig. 7 Two-dimensional unwrapping phase diagram

得到波面图后,沿平行于 x 方向取 10 个含有薄膜厚度信息的截面,在每个截面中采样获取 10 个薄膜厚度值并求其算术平均值作为每个截面的薄膜厚度值,依次记为 $\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{h}_3, \dots, \bar{h}_{10}$,再通过计算每个截面薄膜厚度值的算术平均值,便可得出整个薄膜

表 1 薄膜样片厚度测量结果

Table 1 Measurement results of thin film thickness

	\bar{h}_1	\bar{h}_2	\bar{h}_3	\bar{h}_4	\bar{h}_5	\bar{h}_6	\bar{h}_7	\bar{h}_8	\bar{h}_9	\bar{h}_{10}	\bar{h}
\bar{h}_i/nm	180.6	192.3	185.2	194.5	196.3	198.2	183.3	193.3	195.7	188.1	190.8
v_i/nm	-10.2	1.5	-5.6	3.7	5.5	7.4	-7.5	2.5	4.9	-2.7	$\sum_{i=1}^{10} v_i = -0.5$
$d_{PV} = 0.62\lambda$						$x_{RMS} = 0.042\lambda$					

5 结 论

采用数字叠栅技术测量薄膜厚度,由于只对一幅静态干涉图进行处理,所以可以避免移相干涉技术在多幅干涉图采样过程中,由于环境因素(温度变化、气流等)所引入的干扰。另外,由于静态干涉图分析中采用了移相干涉算法,故可以在均匀网格点上取得干涉图相位信息,同时,由于虚光栅参考干涉图中引入的是理想的相位移动,因此避免了移相干涉仪中难以彻底消除的移相器的线性和非线性误差。

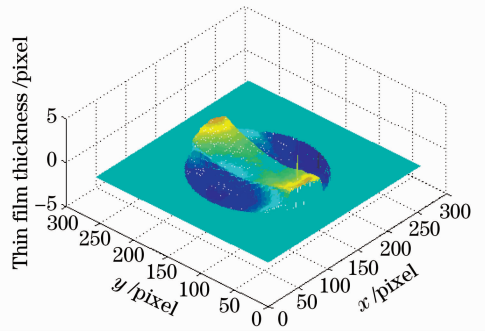


图 8 解包三维波面图

Fig. 8 Three-dimensional unwrapping phase diagram after eliminating the tilt

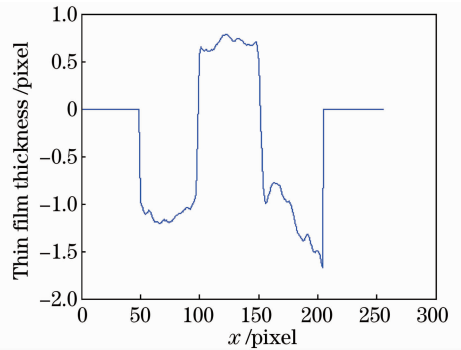


图 9 截面图

Fig. 9 Cross-section diagram

厚度的算术平均值 \bar{h} ^[6]。实验的测量结果如表 1 所示。表中 v_i 表示各组采样数据与平均厚度的差值, d_{PV} 值是指波峰波谷值, x_{RMS} 值反映了薄膜的表面粗糙度。

参 考 文 献

- 1 J. E. Greivenkamp, J. H. Bruning. " Phase Shifting Interferometers" in Optical Shop Testing[M]. D. Malacara ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 501~598
- 2 C. C. Hsu, J. Y. Lee, D. C. Su. Thickness and optical constants measurement of thin film growth with circular heterodyne interferometry [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **491**(1-2): 91~95
- 3 A. Lewis. Measurement of length, surface form and thermal expansion coefficient of length bars up to 1.5 m using multiple-wavelength phase-stepping interferometry [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 1994, **5**(6): 694~703
- 4 Zhu Rihong, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. Phase-shift interferometry and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2): 85~88

- 朱日宏, 陈磊, 王青等. 移相干涉测量术及其应用[J]. 应用光学, 2006, **27**(2): 85~88
- 5 Wan Wenbo, Su Junhong, Yang Lihong *et al.*. Phase unwrapping algorithm for image processing of interferogram[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1): 70~74
- 万文博, 苏俊宏, 杨利红等. 干涉条纹图像处理的相位解包新方法[J]. 应用光学, 2011, **32**(1): 70~74
- 6 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
- 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

栏目编辑:何卓铭