

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0252-05

薄膜厚度测量的干涉图处理技术

葛锦蔓 苏俊宏

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 利用现代干涉测量方法测量薄膜厚度具有全场测试、高精度和非接触性测量的优点,其核心是用合理的算法从干涉图中获得所需的被测面面形及参数。该方法的基础和关键是对所采集到的干涉图进行图像预处理。就干涉图的采集及其预处理技术提出了一种干涉图预处理的方法,该方法利用数学形态学对干涉图进行有效区域的边缘提取,利用二维快速傅里叶变换迭代法对干涉图进行区域延拓,并采用非加权离散余弦变换(DCT)最小二乘算法对干涉图进行波面统一,最终恢复出薄膜的被测面形,为后续精确获取薄膜厚度信息奠定基础。对一个实际 SiO₂ 薄膜样片进行了干涉图的采集以及预处理。结果表明,通过本算法得到的干涉图预处理结果,与 Zygo 干涉仪的分析测试结果基本一致。

关键词 测量;薄膜厚度;干涉图处理;数学形态学;二维快速傅里叶变换;最小二乘算法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0252

Processing Technology of Interferogram of Thin Film Thickness Measurement

Ge Jinman Su Junhong

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

Abstract Measuring the thin film thickness by modern interferometry has advantages of the whole test, high precision and non-contact measurement, the kernel of which is to obtain necessary surface shape and parameter by processing interferogram with reasonable algorithms. The pre-treatment of the interferogram is the most crucial and a basal part, which includes the edge identification of based on mathematical morphology, regional extension based on the 2-D fast Fourier transform (FFT) and unwrapped and wrapped phase based on the non-weighted least squares algorithm for DCT. At the result, surface distribution can be obtained, which lays the groundwork for getting the thin films thickness correctly. In this paper, the image collection of the SiO₂ film and the pretreatment of interferogram is performed. The result indicates that it is basically consistent to the result tested by Zygo interferometer.

Key words measurement; thin film thickness; interference image processing; mathematical morphology; 2-D fast Fourier transform; least squares algorithm

1 引言

随着科学技术的迅猛发展,干涉测量技术也得到了突飞猛进的发展。目前,基于光干涉原理制备的各种干涉仪已经应用于测量长度、位移、波面、面形、表面微观形貌、角度、加速度等^[1]。目前,薄膜厚度高精度测试的方法中都是对膜层局部厚度测试,而利用干涉法测量薄膜厚度则具有全场测试、高精度和非破坏性等优点,因此成为国内外研究的重点。Hsu 等^[2,3]利用干涉的方法测量薄膜厚度,精度可

达 10⁻³ nm。为了实现全场测试,本文提出了干涉法测试膜厚的方法。对于所采集到的薄膜干涉图来说,其膜厚信息是被隐藏在干涉图的条纹信息中的,只有通过图像处理的方法将被测薄膜的表面恢复出来,才能获得薄膜的厚度信息。因此,在这种方法的研究过程中,对干涉图的预处理尤为重要,它也是能否精确得到被测薄膜厚度信息的关键。

本文研究了一种干涉图预处理的方法,利用数学形态学的方法完成干涉图有效区域的边缘提取,

基金项目: 西安市科技计划(CXY08009)资助课题。

作者简介: 葛锦蔓(1984—),女,硕士研究生,主要从事光电检测及仪器等方面的研究。E-mail: gjm129@163.com

导师简介: 苏俊宏(1963—),男,教授,博士,主要从事光电检测及仪器等方面的研究。E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn

利用二维快速傅里叶变换(FFT)迭代法对干涉图进行区域延拓,并采用非加权离散余弦变换(DCT)最小二乘算法对干涉图进行波面统一,最终将被测薄膜的表面面形恢复出来,以便后续精确地获取薄膜厚度信息。

2 干涉图的图像采集

要完成高精度的薄膜厚度测量,采集一幅高质量的干涉图是必不可少的测量环节。干涉图的质量好坏直接影响到后续干涉图图像处理的精确度。随着电子技术和计算机技术的广泛发展,数字图像采集设备大量使用,干涉图一般通过数码设备采集和计算机处理,得到一幅数字干涉图。测量薄膜厚度的干涉图图像采集系统如图 1 所示。

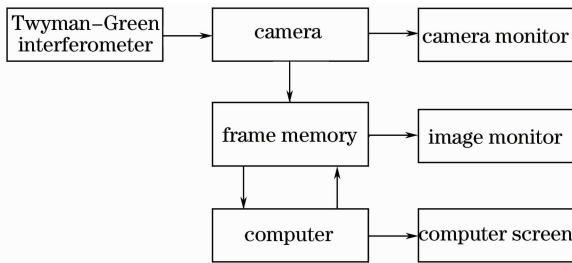


图 1 干涉图像采集系统

Fig. 1 Interferogram acquisition

采用上述图像采集系统采集到一幅 SiO₂ 薄膜样片的实际干涉图,如图 2 所示。

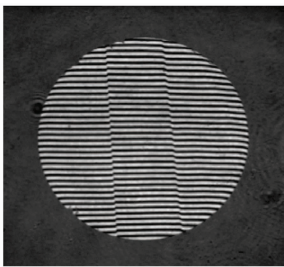


图 2 实际采集到的干涉图

Fig. 2 An actual interferogram

3 干涉图预处理的关键技术

3.1 基于数学形态学原理的图像有效区域的边缘提取

数学形态学是一种应用于图像处理和模式识别领域的新方法,其基本思想是用一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状,以达到对图像分析和识别的目的。集合论是其基础。数学形态学的基本运算包括腐蚀、膨胀、开运算和闭运算,基于这 4 种基本运算可以组合成各种形态学的实用算法

来处理各种问题。设 A, B 为 Z 中的集合, B 在形态学操作中通常被称为结构元, ϕ 为空集, 则基本运算的定义为

$$\text{膨胀: } A \oplus B = \{x \mid (\hat{B})_x \cap A \neq \phi\}, \quad (1)$$

$$\text{腐蚀: } A \ominus B = \{x \mid (B)_x \cap A^c \neq \phi\}, \quad (2)$$

$$\text{开运算: } A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (3)$$

$$\text{闭运算: } A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B. \quad (4)$$

采用数学形态学的基本操作提取干涉图中的有效区域的轮廓,并将有效区域移至图像中心位置,同时对图像大小进行必要的缩放。将所采集到的干涉图用 Otsu 算法进行图像二值化处理,把原图变为二值图像,选择合适的结构元素对图像进行膨胀和腐蚀操作,利用 Canny 算子提取图像边缘,便得到原干涉图中有效区域的轮廓,最后利用此轮廓的相对位置将原图中的有效条纹区域移至图像中心位置,并将原图裁剪为 512 pixel × 512 pixel 的图像。本文选择的是 5 × 5 的圆形结构元素,其计算公式为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

从干涉仪上采集的干涉图,通常有效区域条纹的外缘会出现条纹变形,为了消除它对处理结果的影响,可利用最小二乘法对处理得到的有效区域边缘进行拟合,人为地将有效区域缩小 3~5 pixel,以此消除条纹边缘变形对后续处理的影响。依据本算法对图 2 进行边缘提取并缩放图像,结果如图 3 所示。

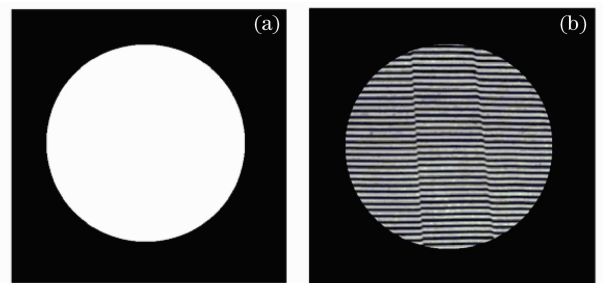


图 3 对薄膜厚度干涉图的边缘提取过程及结果。(a)数学形态学方法提取的有效区域边缘;(b)干涉图边缘提取并缩放后的图像

Fig. 3 Process and result of identified edge. (a) identification of the edge based on mathematical morphology; (b) interferogram after identifying and zooming the edge

3.2 基于 2-D FFT 迭代算法的干涉图的区域延拓

选用基于二维傅里叶变换的迭代法对原始干涉

图进行区域延拓处理。由于傅里叶变换原则上是对无限大的区间进行变换才能不引起误差,但实际中干涉图始终都有确定的大小。同时,在用二维快速傅里叶变换法对干涉图进行处理时,要求采样序列长度必须满足 2^n 个采样点,如果不是 2^n 个采样点的话,就会在二维快速傅里叶变换后出现奇异点,给测试结果带来不必要的误差。如果处理的数据是矩形的,要求采样的行列都必须是 2^n 个采样点。而实际测量得到的干涉图有条纹的区域一定是圆形的,这

不符合上述的采样要求^[4,5]。为了尽可能地消除上述可能引起的误差,必须对干涉图进行区域延拓。

一幅普通干涉图的光强分布可描述为

$$I(r) = A(r)\{1 + V(r)\cos[2\pi f_0 \cdot r - \phi(r)]\}, \quad (6)$$

式中 $A(r)$ 为连续区域,假设它单独在区域 D 内确定, $V(r)$ 为该点条纹清晰度, f_0 为所加载频, $\phi(r)$ 为被测面的相位分布。(6)式还可写成

$$I(r) = A(r)[1 + \operatorname{Re}C(r)\exp(2\pi f_0 \cdot r)] = A(r)[1 + \frac{1}{2}C(r)\exp(2\pi f_0 \cdot r) + \frac{1}{2}C(r)\exp(-2\pi f_0 \cdot r)], \quad (7)$$

式中 $C(r)$ 通常称为复条纹可见度,定义为

$$C(r) = V(r)\exp[-j\phi(r)], \quad (8)$$

对 $I(r)$ 进行傅里叶变换有

$$\hat{I}(f) = \hat{A}(r) * [\delta(f) + 1/2\hat{C}(f - f_0) + 1/2\hat{C}^*(-f - f_0)], \quad (9)$$

式中 $(*)$ 表示卷积, $(^*)$ 表示复共轭, $\delta(f)$ 为一个 Dirac 脉冲分布。

在除去连续分布后,首先减去干涉图的背景分布,通过(6)式有

$$J(r) = \frac{I(r)}{A(r)} - 1 = V(r)\cos[2\pi f_0 \cdot r - \phi(r)], \quad (10)$$

其傅里叶变换为

$$\hat{J}(f) = [1/2\hat{C}(f - f_0) + 1/2\hat{C}^*(-f - f_0)]. \quad (11)$$

为了满足区域延拓的准确性要求,在确定原图

像有效条纹区轮廓之后,将该轮廓以外的区域置零。对其进行二维快速傅里叶变换,提取其中的正一级频谱,进行逆傅里叶变换 (IFFT),即产生一个有条纹延拓的干涉图。在这个新的干涉图内,对应于原干涉图的有效条纹区域用原干涉图的有效条纹区域代替,然后继续进行二维快速傅里叶变换,提取正一级频谱,反傅里叶变换,干涉图有效区域替换为原始值,以此类推,进行迭代,最后进行干涉图的灰度级调整,以此完成干涉图的区域延拓。区域延拓的基本原理框图如图 4 所示。

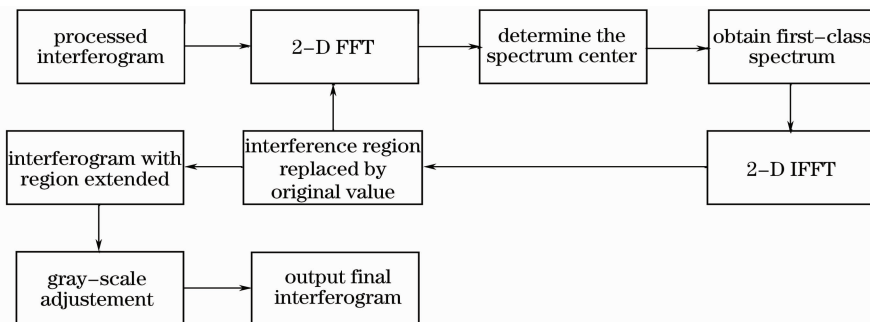


图 4 2-D FFT 迭代算法进行区域延拓流程图

Fig. 4 Flow chart of regional extension based on the 2-D FFT iterative algorithm

通过本算法对图 3 进行干涉图的区域延拓,结果如图 5 所示。

3.3 基于非加权 DCT 最小二乘算法的干涉图的波面统一

根据光干涉原理,两个相干波面发生干涉时,其

干涉图像的光强分布为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y)], \quad (12)$$

式中 $a(x, y)$ 为干涉图背景光强, $b(x, y)$ 为干涉条纹的幅值调制度, $\phi(x, y)$ 是带有薄膜厚度信息的被

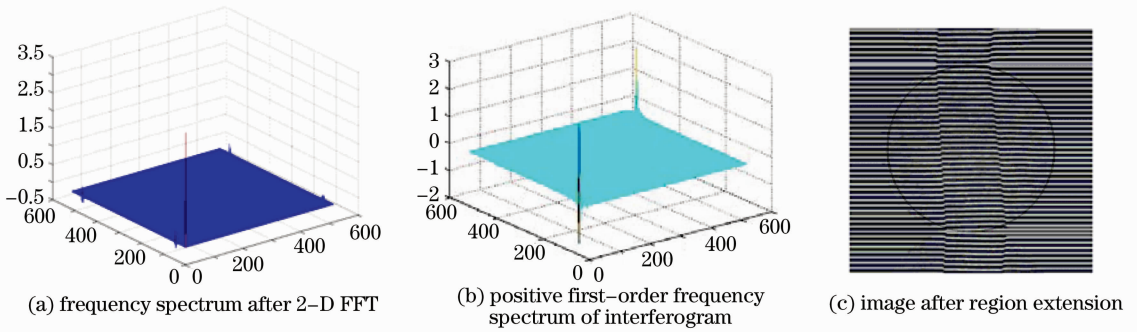


图 5 干涉图的区域延拓处理过程及结果

Fig. 5 Process and results of region extension of interferogram

测波面的相位分布函数。采用基于二维快速傅里叶变换的方法可求出被测薄膜的相位分布函数 $\phi(x, y)$

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Re}[c(x, y)]}{\text{Im}[c(x, y)]}, \quad (13)$$

式中 $\text{Re}[c(x, y)], \text{Im}[c(x, y)]$ 分别为 $c(x, y)$ 的实部和虚部。

由(13)式可以看出,在计算被测薄膜相位分布时用的是反正切函数,而由反正切函数所得到的幅角存在于 $[\pi, -\pi]$ 之间,因此整个被测薄膜波面相

位则会在 $-k\pi (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$ 和 $k\pi (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$ 处存在相位跃变现象,从而使得整个被测波面的相位不连续,因此必须进行波面统一,也就是相位解包技术,才能得到连续相位分布,恢复被测薄膜的表面形貌。本文采用非加权 DCT 最小二乘算法进行波面统一。

设由上面得到的包裹相位为 $\phi_{i,j}$, 对应的待求去包裹相位为 $\varphi_{i,j}$, 二者有如下关系

$$\varphi_{i,j} = \phi_{i,j} + 2k\pi, \quad -\pi < \varphi_{i,j} < \pi, k \text{ 为整数}, i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (14)$$

定义包裹算子 W 为

$$\begin{cases} \Delta_{i,j}^x = W(\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}), i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \\ \Delta_{i,j}^y = W(\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}), i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\Delta_{i,j}^x$ 为 x 方向相位差分, $\Delta_{i,j}^y$ 为 y 方向相位差分。根据最小二乘法原理,去包裹相位为下列方程的解

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x)^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y)^2 = \min, \quad (16)$$

由上式可求得

$$\epsilon_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y), \quad (17)$$

(17)式为满足 Neumann 边界条件的离散泊松方程,可以采用离散余弦变换进行快速求解,得出去包

裹相位值 $\varphi_{i,j}$ [6]。

经上述非加权 DCT 最小二乘算法对图 5(c) 进行波面统一,结果如图 6 所示。

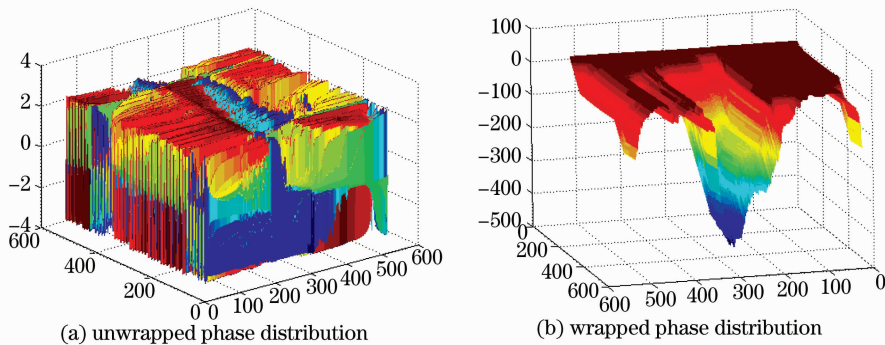


图 6 干涉图的波面统一结果

Fig. 6 Results of the unwrapped and wrapped phase of interferogram

4 处理结果分析

上述干涉图的处理算法是在获得一幅高质量的干涉图的基础上完成的,其处理结果与待测薄膜的制备过程和测试过程有着密切的关系。为了验证本算法的准确性,特制备了一个薄膜样片,此样片是采用真空蒸发镀膜机镀制的。本底真空度为 4.0×10^{-3} Pa,工作真空度为 9.0×10^{-3} Pa,采用 K9 玻璃作为蒸发薄膜的基底,基底温度为 180°C ,在基底表面镀制 SiO_2 薄膜。为了便于膜层厚度的测量,在镀制过程中将预制好的槽型铝片叠放在基底表面,使得被遮挡的基底部分表面没有膜层,这样便在基底表面形成了 2 个 SiO_2 薄膜的台阶。将此样片用

图 1 所示的干涉图图像采集系统进行干涉图图像采集,获得一幅高质量的干涉图,即为图 2。最后通过本算法对所获得的干涉图进行图像处理得到被测薄膜样片的表面面形,如图 7(a) 所示。由于目前 Zygo 平面干涉仪的测试结果几乎无人质疑,所以将其作为测量标准与本测试算法得到的结果进行对比。图 7(b) 即为 Zygo 平面干涉仪对本样片的测试结果,与本算法得到的结果进行比较后发现二者基本一致,这说明本算法具有一定的精确度。本算法的运行时间很短,主要受电脑配置的影响较大,配置越高的电脑运行速度越快。

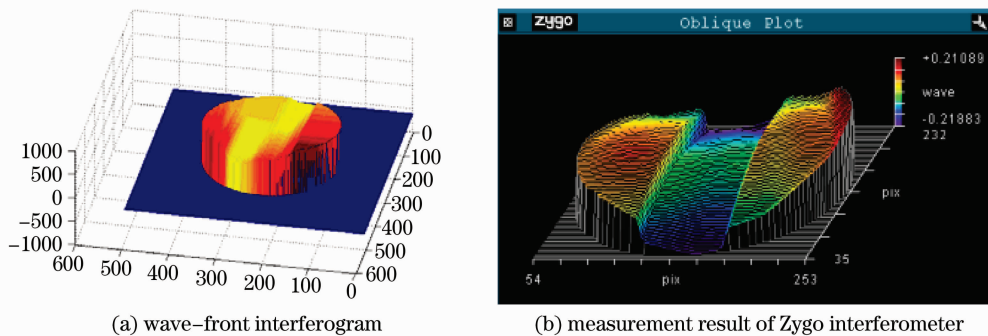


图 7 测量结果的对比

Fig. 7 Comparison results between the algorithm and Zygo interferometer

5 结 论

阐述了一种干涉图预处理方法,分别采用不同的方法及算法对所采集到的干涉图进行边缘识别、区域延拓和波面统一,最终恢复出了被测薄膜的表面面形。经过与 Zygo 平面干涉仪的测量结果进行比较,二者基本一致。这表明本方法具有一定的准确度,可以为后续提取薄膜厚度信息奠定基础。

参 考 文 献

- 1 Yin Chunyong. Modern Interferometric Measuring Technique [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1997
- 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 1997
- 2 Chengchih Hsu, Juyi Lee, Derchin 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 P. Hlubina, D. Ciprian, J. Lunacek *et al.*. Thickness of SiO_2 thin film on silicon wafer measured by dispersive white-light spectral interferometry [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **84**(3): 511~516
- 4 James J. Talamonti, Richard B. Kay, Danny J. Krebs. Numerical model estimating the capabilities and limitations of the fast Fourier transform technique in absolute interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2182~2191
- 5 Su Junhong. Interferogram region spreading technology in spatial domain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **34**(4): 397~400
- 苏俊宏. 干涉图空域延拓技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, **34**(4): 397~400
- 6 Hui Mei, Wang Dongsheng, Li Qingxiang *et al.*. Phase unwrapping method based on the solution of discrete Poisson equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1245~1249
- 慧梅,王东生,李庆祥等. 基于离散泊松方程解得相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1245~1249