

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105064

结合多光束光学应力传感器与改进的 Canny 算法求曲率半径的方法研究*

周陈昊 凌 晓 杨连乔 张建华

(上海大学材料科学与工程学院 上海 200072)

摘要:利用多光束光学应力传感器(MOSS)求薄膜曲率需要测量出光束在反射前后的间距,根据相邻入射(折射)光束间距即可计算出薄膜的曲率半径。光束的间距可由接收到的光斑中心点确定。提取光斑的中心点主要利用 Canny 边缘检测算法和椭圆拟合算法。用 CMOS 传感器得到的光斑阵列图像,在光斑周围参杂有很大的椒盐噪声,对于传统的 Canny 算法,无法准确的检测出光斑的边缘。利用一种改进的 Canny 边缘检测算法,可有效的消除光斑周围的噪声,并较好的保留光斑边缘。最后利用椭圆拟合算法对边缘进行拟合,求得光斑阵列的所有中心点。实验最后选用标准件进行验证,用测得的间距算出曲率半径与实际进行对比,误差结果在 2%~4%,证明该方法可行。

关键词: 光束间距;薄膜曲率;边缘检测;椭圆拟合

中图分类号: TP751

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 520.60

Research on the method of combining multi-beam stress method and image processing to calculate the radius of curvature

Zhou Chenhao Ling Xiao Yang Lianqiao Zhang Jianhua

(School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Using the multi-beam optical stress sensor (MOSS) to find the curvature of the film requires measuring the distance between the beams before and after reflection, and the radius of curvature of the film can be calculated based on the distance between adjacent incident (refracted) beams. The spacing of the beams can be determined by the center point of the received light spot. Extracting the center point of the light spot mainly uses Canny edge detection algorithm and ellipse fitting algorithm. The spot array image obtained with the CMOS sensor has a lot of salt and pepper noise mixed around the spot. For the traditional Canny algorithm, the edge of the spot cannot be accurately detected. An improved Canny edge detection algorithm is used, which can effectively eliminate the noise around the light spot and retain the edge of the light spot. Finally, an ellipse fitting algorithm is used to fit the edges to obtain all the center points of the spot array. At the end of the experiment, standard parts were selected for verification, and the radius of curvature calculated by the measured distance was compared with the actual one. The error result was 2%~4%, which proved that the method was feasible.

Keywords: beam spacing; film curvature; edge detection; ellipse fitting

0 引言

近年来,薄膜和聚合物基板由于其良好的性能被广泛应用于电子器件和光电器件,并且随着薄膜器件的不断小型化,在镀膜过程中,薄膜的热失配、晶格缺陷、表面张力和界面位错致使薄膜内部产生残余应力。薄膜应力可分为压应力和张应力。通常,张应力会引起裂纹、边缘

和界面分层,压应力会导致薄膜表面或衬底开裂和剥落现象。薄膜应力不仅在宏观上限制着薄膜结构,而且从微观上影响薄膜的各种物理化学性质。

目前,测量薄膜应力的方法大致分为有损检测和无损检测。有损检测法主要是通过某种方式去除部分薄膜材料来测量,包括有钻孔法^[1-2]、环芯法^[3]、裂纹柔度法^[4]、断裂损伤模型估计残余应力^[5]等,但可能会在铣削切割时产生误差。为避免对测试样品造成损伤,通过测

收稿日期: 2021-12-28 Received Date: 2021-12-28

* 基金项目: 杰出青年基金(51725505)项目资助

量应力相关的参数设计出无损检测法。基于 Stoney 公式的基底曲率法^[6-7]是最常见的方法,测量由应力引起的弯曲曲率,适用于大部分材料。XRD 检测法^[8-9]和拉曼光谱法^[10-11]通过测量材料的晶格变形,结合布拉格方程等求出宏观应力,只适用于具有特征峰的晶体材料。纳米压痕法^[12-13]需要对材料进行加压测试,通过分析压痕面积来计算残余应力,但要与无应力材料做对比,且不适合测量很软的材料。基于超声波弹性理论的超声波应力检测仪^[14]可无损测定样品内部应力,但有时会产生杂乱的反射波干扰结果。此外,磁弹性法^[15-16]、聚焦离子束释放法^[17]、中子衍射法^[18-19]、光纤光栅法^[20]等仅适用于某些特殊的复合材料。综合上述方法,基底曲率法可以快速无损进行测量,且最终结果精度高,可作为最终的测量方法。

按照不同的测量基底应变的方法,基底曲率法也分为很多种类。使用接触式轮廓仪^[21-22]的特殊探针或者光学轮廓仪^[23]扫过样品表面,对样品曲率进行测量,这种方法操作便捷,但在曲率变化幅度不大的情况下,易产生较大的误差。选用悬臂梁^[24]作为薄膜衬底,在沉积过程中检测由应力引起的梁的弯曲曲率,此方法在发生较小应变的情况下不易测量曲率变化。双光束激光杠杆法^[25]利用薄膜曲率对激光造成的反射偏转,测量光束反射前后的间距求得薄膜曲率,但该方法的数据偏少,具有特殊性。此外,市场上还有专门的仪器^[26-27]可直接测量曲率,但仪器成本过高,且不适用于所有的薄膜材料。本文选用的多光束(MOSS)光学应力传感器^[28-31]研究薄膜沉积过程中的残余应力,将平行激光束阵列从基板反射,测量相邻激光束之间间距的变化,并对比多组数据取平均值得到最终的曲率。

在利用公式计算薄膜曲率时,反射光束间距的测量精确度将直接影响到计算误差。因此,需要一种能够精准测量光束间距的方法。实验采用 CMOS 传感器采集光束反射图像,利用计算机视觉技术可有效地提取出采集图像的特征。因此,本研究的目的是从图像处理算法方面设计一种可以准确测量光斑间距的方法。

为能够准确测得光束间距,可对光斑边缘进行特征提取,求得光束中心。目前,边缘提取算法主要有 Canny 算子、Sobel 算子^[32]、Laplacian 算子^[33-34]、Schar 滤波器^[35]、霍夫变换^[36]等。当图像较大时,Sobel 算子、Laplacian 算子和 Schar 滤波器的处理时间是一个严重的问题,且检测结果较为模糊,边缘不能完好的连接在一起。霍夫变换是对直线和圆的一种特征提取方法,对于光斑的边缘提取会产生较大的误差。Canny 算子能够在检测的时候尽可能多的标识出图像的实际边缘,且与实际边缘十分接近。Yang 等^[37]根据多阈值分割模型和 Canny 算子检测马铃薯的发芽情况,结果可以找到

89.85%的发芽区域并保持 87.08%的精度。He 等^[38]利用相敏光时域反射仪和 Canny 算子,提出一种新的光纤信号识别方法,对运行中的列车位置和速度进行实时准确的监测。Yan 等^[39]为了无损评估导体表面下的涂层腐蚀(CUC),利用脉冲调制涡流技术(PMEC)对 CUC 进行轮廓识别,提出一种改进的 Canny 算法以提高 CUC 轮廓识别精度。

根据 Canny 算法检测结果来看,图像仍留有一些噪声与伪边缘,所以在改进的 Canny 算法基础上,可利用椭圆拟合算法对边缘进行拟合。由于椭圆的特异性,椭圆拟合算法在任何噪声或遮挡的情况下都可以准确地给出结果。Yu 等^[40]为检测浑浊溶液的成分,利用高光谱成像技术提出一种基于轮廓提取和椭圆拟合的检测模型,与传统的光强模型和抽象纹理特征模型相比,椭圆拟合模型稳定性好,计算量少,可视化效果清晰,且对数据的采集过程要求较低。Zhang 等^[41]提出了一种多椭圆拟合方法来确定 TEM 图像中的原子列位置,可以同时获得每个原子列的位置和强度分布,与基于模型的方法相比,椭圆拟合更具适应性,且精度也能达到皮米级别。

本文使用改进的 Canny 算法对光斑进行边缘检测,用双边滤波代替原始的高斯滤波,能更好地去除光斑周围的椒盐噪声,又从 4 个方向对图像进行梯度幅值计算,极大的改善了光斑边缘轮廓的连接程度。同时为了消除 Canny 检测之后的噪声和伪边缘,利用椭圆拟合算法对光斑边缘进行拟合,求得椭圆即光斑的中心点。经实验证明,该方法可准确有效的测量出光束间距,进而能较为精确地计算出薄膜曲率。

1 实验装置

对于本实验研究,已建立一个同时实施 MOSS 与 CMOS 的测量系统,用于多光束的成像与处理。选取了曲率标准件用于实验。结合改进的 Canny 算子与椭圆拟合算法对成像图像进行提取和研究。

测量系统中的 MOSS 与 CMOS 结构由激光发射器、3×3 分光镜、反射镜、接收器、CMOS 传感器、图像采集卡和计算机组成。系统设置如图 1 所示。其运行流程为,将待测样品放置在实验台,通过分光之后的激光束照射到样品表面,由接收器接收反射后的激光束,并由 CMOS 传感器采集反射光斑阵列图像,经过图像采集卡将得到的图像信息转化为可处理的数字图像信息,最后对数字图像进行处理得到光斑点的间距,由公式得出样品曲率。

2 改进的 Canny 算法

传统的 Canny 算法无法有效准确的检测出本实验的

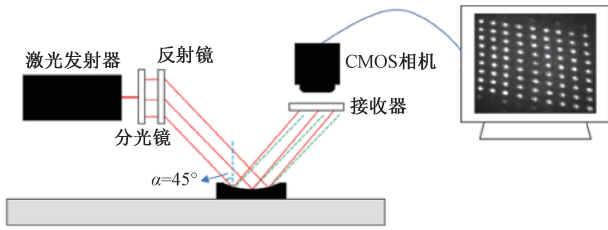


图 1 多光束光学应力传感器原理图(MOSS)

Fig. 1 Schematic diagram of multi-beam optical stress sensor

光斑边缘,本文对其进行一定的改进,能够很好地提取出光斑阵列的每个边缘。

2.1 高斯滤波与双边滤波

原算法采用高斯平滑滤波器,滤波的主要目的是降噪。高斯滤波能使图像变得平滑(模糊),但同时也有可能增大边缘的宽度。高斯函数是一个类似于正态分布的中间大两边小的函数。假设一个像素点的位置是 (m, n) , 其灰度值(只考虑二值图像)为 $f(m, n)$, 经过高斯滤波后的灰度值将变为:

$$g_{\sigma}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}} \cdot f(m, n) \quad (1)$$

对于光斑阵列图像而言,光斑与光斑之间夹杂着许多的椒盐噪声,使用传统 Canny 算子中的高斯滤波器模板进行邻域运算时,因其仅仅考虑了像素间空间位置上的关系,会导致光斑边缘被模糊,无法在降噪的同时很好的保留边缘信息,对检测光斑阵列的边缘产生很大的影响。为改善这一情况,本文提出了用双边滤波的方法替代原先的高斯滤波。双边滤波是一种非线性滤波,能够达到去噪保边的效果。相比于高斯滤波,双边滤波多了一种掩膜,也就是说双边滤波还考虑了图像的灰度相似性,所以双边滤波是结合图像的空间邻近度和像素值相似度的一种折中处理。双边滤波器的核由两个函数生成:

空间域高斯函数:

$$w_d = e^{-\frac{(x_i-x_c)^2+(y_i-y_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

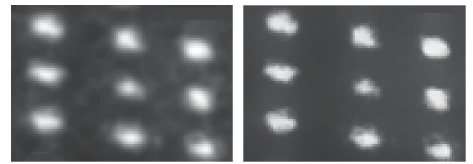
值域高斯函数:

$$w_i = e^{-\frac{(\text{gray}(x_i, y_i) - \text{gray}(x_c, y_c))^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中: (x_i, y_i) 为邻域内某点的位置, (x_c, y_c) 为中心点的位置, $\text{gray}(x_j, y_i)$ 为邻域内某点灰度值, $\text{gray}(x_c, y_c)$ 为中心点灰度值, σ 为空间域(值域)标准差。

以光斑阵列图像为例进行高斯滤波和双边滤波实验,结果如图 2 所示。

结果表明,高斯滤波处理的图像光斑边缘较模糊,周围的噪声没有被很好地消除,而双边滤波的降噪效果更



(a) 高斯滤波 (a) Gaussian filtering
(b) 双边滤波 (b) Bilateral filtering

图 2 两种滤波效果对比

Fig. 2 Comparison of two filtering effects

加显著,并且很好的保留了光斑的边缘信息,便于后续进行的边缘提取。

2.2 计算 4 个方向的梯度幅值和方向

传统的 Canny 算法一般使用的是 0° 和 180° 方向的 Sobel 算子计算梯度幅值,即仅考虑了水平和垂直方向上的梯度幅值,这对于检测一些梯度变化较为缓慢的边缘,容易造成梯度信息的丢失。为了检测到完整的光斑边缘信息,本文增加了 45° 和 135° 的 Sobel 模板,分别作用于 4 个不同的方向,计算各个梯度幅值 $G_x(i, j)$ 、 $G_y(i, j)$ 、 $G_{45^\circ}(i, j)$ 和 $G_{135^\circ}(i, j)$:

$$Sobel_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Sobel_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Sobel_{45^\circ} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$Sobel_{135^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_x(i, j) = f(i, j) \cdot Sobel_x \quad (4)$$

$$G_y(i, j) = f(i, j) \cdot Sobel_y \quad (5)$$

$$G_{45^\circ}(i, j) = f(i, j) \cdot Sobel_{45^\circ} \quad (6)$$

$$G_{135^\circ}(i, j) = f(i, j) \cdot Sobel_{135^\circ} \quad (7)$$

进一步可以通过公式计算到图像的梯度幅值 $G(x, y)$ 和梯度方向 $\theta(x, y)$:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_{45^\circ}^2 + G_{135^\circ}^2} \quad (8)$$

$$\theta_G = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (9)$$

例如在 3×3 区域内,边缘可以划分为 0° 、 45° 、 135° 、 180° 这 4 个方向,同样,梯度方向也为 4 个方向(与边缘方向正交)。因此为了进行后续的非极大值抑制,将所有可能的方向量化为 4 个方向,如图 3 所示。

量化的情况可总结为:

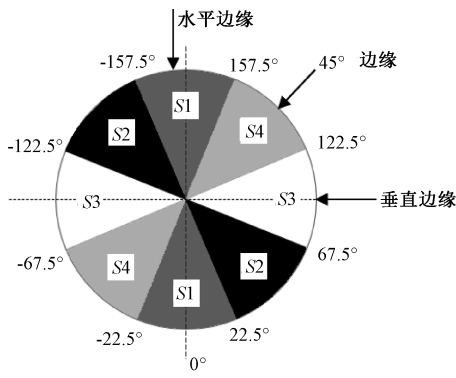


图 3 量化的 4 个梯度方向

Fig. 3 Four quantified gradient directions

水平边缘—梯度方向为垂直：

$$\theta_c \in \left[-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}\right) \cup \left[\frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}\right)$$

135°边缘—梯度方向为 45°：

$$\theta_c \in \left[\frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}\right) \cup \left[\frac{9\pi}{8}, \frac{11\pi}{8}\right)$$

垂直边缘—梯度方向为水平：

$$\theta_c \in \left[\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}\right) \cup \left[\frac{11\pi}{8}, \frac{13\pi}{8}\right)$$

45°边缘—梯度方向为 135°：

$$\theta_c \in \left[-\frac{3\pi}{8}, -\frac{\pi}{8}\right) \cup \left[\frac{5\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}\right)$$

2.3 非极大值抑制

在图像梯度幅值矩阵中,元素的像素值越大,说明图像中该点的梯度值越大,但这并不能说明该点就是边缘,因为在图像增强过程中也有此规律。在 Canny 算法中,要进行非极大值抑制,首先要确定中心像素点 C 的灰度值在其 8 邻域内是否为最大。图 4 中,虚线线条为点 C 的梯度方向,将当前位置的梯度值与梯度方向上两侧的梯度值进行比较,由此可确定在此梯度方向上的局部最大值,即除了 C 点之外,梯度方向上的两个交点 Point1、Point2 也有可能为极大值点。经过分析可得,若 C 点的灰度值小于这两个点中的任意一个,就说明 C 点并不是局部极大值点,即可排除点 C 为边缘点。

但实际上,沿着本文所设定的梯度方向,只能得到 C 点邻域的 8 个点的像素值,Point1 和 Point2 并不包含于此。沿着上述 4 种类型的梯度方向,比较 3×3 邻域内对应邻域值的大小。如图 5,领域中心 x 与沿着其对应的梯度方向的两个像素相比,若中心像素 x 为最大值,则保留,否则像素转变为 0,即为舍弃,这样可以抑制非极大值点,剔除掉一大部分非边缘的点,以得到细化的边缘。

完成非极大值抑制后,会得到一个二值图像,非边缘的点灰度值均为 0,可能为边缘的局部灰度极大值点可

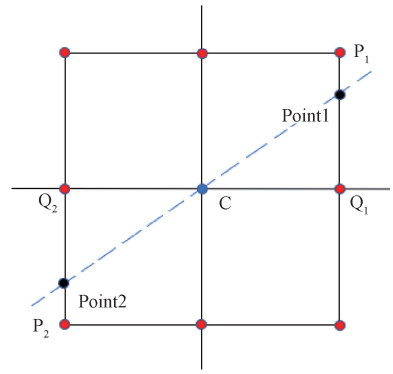


图 4 非极大值抑制原理

Fig. 4 Principle of non-maximum suppression

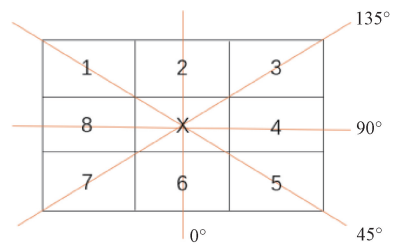


图 5 3×3 邻域内对应邻域值的大小

Fig. 5 The size of the corresponding neighborhood value in the 3×3 neighborhood

设置其灰度为 128。

2.4 双阈值检测和边缘连接

一般的边缘检测算法用一个阈值来滤除掉噪声或者是由颜色变化所引起的较小的梯度值,保留较大的梯度值。而 Canny 算法中减少假边缘数量的方法是采用双阈值检测法。选取系数 TH(高阈值)和 TL(低阈值),比率为 2 : 1 或 3 : 1(一般选取 TH=0.2 或 0.3,TL=0.1)。根据高阈值得到一个边缘图像,这样一个图像含有很少的假边缘,但是由于阈值较高,产生的图像边缘可能不会闭合,为了解决这样一个问题采用了另外一个低阈值。抛弃低于低阈值的点,标记高于高阈值的点(确定边缘点)。将在高低阈值中间的点使用 8 连通区域确定,即只有当其与高阈值点相接时才被保留为边缘点。

强边缘点可以认为是真的边缘,弱边缘点则可能是真的边缘,也可能是噪声或颜色变化引起的。为得到精确的结果,后者引起的弱边缘点应该去掉。通常认为真实边缘引起的弱边缘点和强边缘点是连通的,而由噪声引起的弱边缘点则不会。在高阈值图像中把边缘链接成轮廓,当到达轮廓的端点时,该算法会在断点的 8 邻域点中寻找满足低阈值的点,再根据此点收集新的边缘,直到整个图像边缘闭合。图 6 为使用改进的 Canny 算子检测出的光斑边缘图像。



图6 改进后的 Canny 边缘检测

Fig. 6 Improved Canny edge detection

3 椭圆拟合

根据上面的具体测试图像可以看出, Canny 算法虽然可以较为完整的提取出每个光斑的边缘轮廓, 但检测结果也包含了很多噪声和一些其他原因造成的假边缘, 因此还需要进行进一步的处理。本文利用椭圆拟合算法对 Canny 检测结果进行边缘提取, 根据最小化约束条件, 利用最小二乘法, 引入拉格朗日乘子算法获得等式组, 求特征值与特征向量, 得到最优拟合椭圆。在实际图像应用中, 该算法能够有效地处理含有较多噪声点的光斑轮廓, 拟合出具有高精度的椭圆, 并且算法的速度满足实时性要求。

3.1 椭圆方程

椭圆的标准方程为:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (10)$$

式中: 半长轴为 a , 半短轴为 b , 中心点 (x_0, y_0) 。

椭圆 ($B^2 - 4AC < 0$) 的一般方程为:

$$Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F = 0 \quad (11)$$

3.2 椭圆拟合

1) 简化求取参数

为求取椭圆的 6 个参数, 建立点到定圆锥曲线的代数距离 $F(x, y)$ 。

$$F(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0 \quad (12)$$

设 $\mathbf{A} = [a, b, c, d, e, f]^T$, $\mathbf{X} = [x^2, y^2, xy, x, y, 1]$, 方程即可表示为:

$$F_A(\mathbf{X}) = \mathbf{X} \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (13)$$

满足约束条件 $b^2 - 4ac < 0$ 。 a, b, c, d, e, f 为椭圆的 6 个常数, x, y 为椭圆上的坐标点。方程最终可简化为:

$$\min \sum_{i=1}^N F(x_i, y_i)^2 = \min \sum_{i=1}^N (F_A(x_i))^2 = \min \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \mathbf{A})^2 \quad (14)$$

可直接用最小二乘法对上式进行求解, 但所拟合的结果只是普通的圆锥曲线, 而不是椭圆曲线。

2) 计算

为确保求得的是椭圆解, 就要设定一个新的约束条件。当 a 取任何不为 0 即 $\alpha \neq 0$ 时, $\alpha \cdot a$ 表示为相同的圆锥曲线。所以在合适的尺度下, 可将不等式约束关系可以转化为等式约束: $4ac - b^2 = 1$ 。

定义一个 $N \times 6$ 的矩阵 \mathbf{C} 和一个 6×6 的常数矩阵 \mathbf{D} :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & y_i^2 & x_i y_i & x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & y_N^2 & x_N y_N & x_N & y_N & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

当满足 $\mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} = 1$ 的条件时, 可将椭圆的拟合问题转化为求 $\min \|\mathbf{C} \mathbf{a}\|^2$ 。

将等式约束条件 $4ac - b^2 = 1$ 改写成矩阵形式: $\mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} = 1$ 。

然后对将求 $\min \|\mathbf{C} \mathbf{a}\|^2$ 的问题进一步改写, 约束条件 $\mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} = 1$:

$$\min \|\mathbf{C} \mathbf{a}\|^2 = \mathbf{C} \mathbf{a} \mathbf{a}^T \mathbf{C}^T \quad (17)$$

根据拉格朗日乘子法, 引入拉格朗日因子 λ , 构造函数:

$$L(\mathbf{C}, \lambda) = \mathbf{C} \mathbf{a} \mathbf{a}^T \mathbf{C}^T - \lambda (\mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} - 1) \quad (18)$$

$$\text{求其偏导为 } 0: \frac{\partial L(\mathbf{C}, \lambda)}{\partial \mathbf{C}} = 0 \quad (19)$$

得到: $\mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{a} - \lambda \mathbf{D} \mathbf{a} = 0$ 即 $\mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = \lambda \mathbf{D} \mathbf{a}$; 再令 $\mathbf{C}^T \mathbf{C} = \mathbf{S}$, 等式变为 $\mathbf{S} \mathbf{a} = \lambda \mathbf{D} \mathbf{a}$, 最后简化为求取特征值的形式:

$$\mathbf{S}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{a} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{a} \quad (20)$$

即椭圆的拟合问题最终转化为了求取 $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{D}$ 的特征值、特征向量的问题。同样的 $(\lambda_i, \mu_i \mathbf{u}_i)$ 也是方程 $\mathbf{S} \mathbf{a} = \lambda \mathbf{D} \mathbf{a}$ 的特征解, 其中 μ 为任意实数。根据方程 $\mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} = 1$, 可以很容易的找到一个实数 μ , 使得 $\mu^2 \mathbf{u}_i^T \mathbf{D} \mathbf{u}_i = 1$, 即:

$$\mu_i = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{u}_i^T \mathbf{D} \mathbf{u}_i}} = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\mathbf{u}_i^T \mathbf{S} \mathbf{u}_i}} \quad (21)$$

最后令 $\bar{\mathbf{a}}_i = \mu_i \mathbf{u}_i$, 取 $\lambda_i > 0$ 对应的特征向量 \mathbf{u}_i , 即可作为曲线拟合的方程解, 如图 7 所示。

图 8~10 为根据 Canny 算子检测边缘之后所拟合出的轮廓和椭圆。根据拟合的结果就可以求得椭圆中心即为光斑的中心点, 最终求得光斑间距。

4 验证

为验证总体测量系统的精度, 本文选择了表面曲率

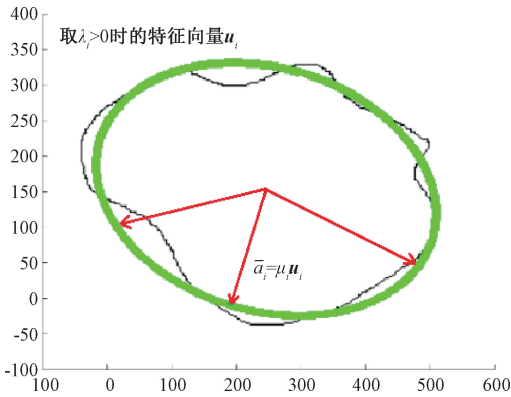


图7 曲线拟合的方程解

Fig. 7 Equation solutions for curve fitting

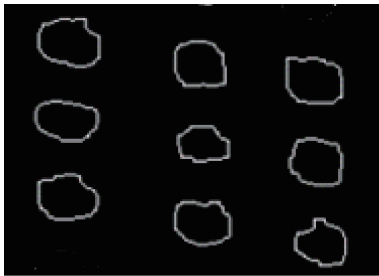


图8 提取的光斑边缘

Fig. 8 Edge of the light spot extracted



图9 根据边缘拟合的椭圆

Fig. 9 Ellipse fitted to the edge



图10 光斑中心点

Fig. 10 Spot center point

测试样品。

利用搭建的测量系统对样品表面的曲率半径进行测量,由 CMOS 传感器得到的光斑图像经上述算法处理得到各个光斑中心点的坐标,即可计算出光束反射前后的间距,再利用公式求得样品的曲率半径。测量出的 5 个样品的曲率与实际标准数值对比的误差如图 11 所示。

$$\text{曲率计算公式: } k = \frac{1}{R} \approx \frac{D_0 - D}{2LD_0 \cos \alpha} \quad (22)$$

式中: L 为样品中心到相机面的距离; D_0 为相邻的入射光束中心距离; D 为对应相邻的反射光束中心距离; α 为入射角。

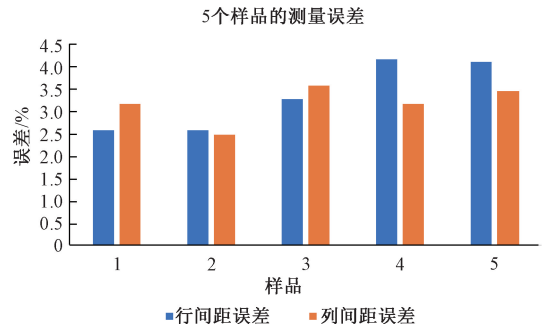


图11 测量误差的大小

Fig. 11 The size of the measurement error

图 11 中可以明显的看出误差大小在 2% ~ 4% 上下,结果较为精确。

5 结论

针对曲率法所使用的光束间距,本文用 CMOS 传感器拍摄到的原始光斑阵列图像,经由改进的 Canny 算子对光斑阵列进行边缘检测,提取出每个光斑的边缘图像,再使用椭圆拟合算法对边缘图像进行拟合,得到光斑的拟合椭圆,最终得到的椭圆中心点即为光束的中心点,算出中心点间距即可求出薄膜曲率,误差大小在 2% ~ 4% 左右。

该方法适用于在硬质衬底上沉积的薄膜。经过实验测得,每个入射光斑的直径约为 2 mm,初始入射光束的间距为 10 mm,所测量的样品曲率必须大于入射光束间距。选用传感器的最小分辨率为 2.2 μm,假定基片直径为 50 mm, L 为 0.5 m,此系统最大测量的曲率半径可达 12 km。

参考文献

[1] BABAEEIAN M, MOHAMMADIMEHR M. Experimental and computational analyses on residual stress of composite plate using DIC and Hole-drilling methods based on Mohr's circle and considering the time effect [J]. Optics and

- Lasers in Engineering, 2021, 137: 106355.
- [2] JIANG H, LEI Z, BAI R, et al. Identifying elasto-plastic damage coupling model of laser-welded aluminum alloy by virtual field method and digital image correlation [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106268.
- [3] ZHU R H, XIE H M, ZHU J G, et al. A micro-scale strain rosette for residual stress measurement by SEM Moiré method [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 57(4): 716-722.
- [4] PISAREV V S, MATVIENKO Y G, ELEONSKY S I, et al. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 179: 348-374.
- [5] WANG Q, LI L A, LI C, et al. The estimation of residual stresses by the brittle thin film's initial cracks on a ductile substrate subjected to tensile stresses [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103036.
- [6] 马一博,陈牧,颜悦,等. 薄膜应力测量方法及影响因素研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(1): 17-25.
MA Y B, CHEN M, YAN Y, et al. Research progress on measurement methods and influence factors of thin-film stress [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(1): 17-25.
- [7] BESOZZI E, DELLASEGA D, PEZZOLI A, et al. Coefficient of thermal expansion of nanostructured tungsten based coatings assessed by substrate curvature method [J]. Materials & Design, 2018, 137: 192-203.
- [8] LI H, SUN P, CHENG D, et al. Effects of deposition temperature on structure, residual stress and corrosion behavior of Cr/TiN/Ti/TiN films [J]. Ceramics International, 2021, 47(24): 34909-34917.
- [9] SCHODERBÖCK P, KÖSTENBAUER H. Residual stress determination in thin films by X-ray diffraction and the widespread analytical practice applying a biaxial stress model: An outdated oversimplification? [J]. Applied Surface Science, 2021, 541: 148531.
- [10] 李秋,薛凯,王丽捷,等. 涂层结构残余应力拉曼光谱测量方法探讨[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2019, 29(2): 7-12.
LI Q, XUE K, WANG L J, et al. Raman spectroscopy for measuring residual stress in coatings [J]. Journal of Tianjin University of Technology and Education, 2019, 29(2): 7-12.
- [11] MIKI Y, NISHIMOTO A, SONE T, et al. Residual stress measurement in DLC films deposited by PBIID method using Raman microprobe spectroscopy [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 274-280.
- [12] 董美伶. 基于纳米压痕技术的薄膜残余应力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
DONG M L. Study on residual stress of thin films by nanoindentation technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [13] LEI S, HUANG J H, CHEN H. Measurement of residual stress on TiN/Ti bilayer thin films using average X-ray strain combined with laser curvature and nanoindentation methods [J]. Materials Chemistry and Physics, 2017, 199: 185-192.
- [14] ZHAN Y, XU H, DU W, et al. Research on the influence of heat treatment on residual stress of TC4 alloy produced by laser additive manufacturing based on laser ultrasonic technique [J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106466.
- [15] SAMOURGKANIDIS G, KOUZOUNDIS D. A pattern matching identification method of cracks on cantilever beams through their bending modes measured by magnetoelastic sensors [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103: 102266.
- [16] ZHANG S, ZHANG H, LIU H, et al. Resonance enhanced magnetoelastic method with high sensitivity for steel stress measurement [J]. Measurement, 2021, 186: 110139.
- [17] GAO Z, ZHANG X, KULCZYK-MALECKA J, et al. Ceramic buckling for determining the residual stress in thin films [J]. Scripta Materialia, 2021, 201: 113949.
- [18] AHN J, HE E, CHEN L, et al. Determination of residual stresses in fibre laser welded AA2024-T3 T-joints by numerical simulation and neutron diffraction [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 685-703.
- [19] LV Y, DING Y, CUI H, et al. Investigation of microscopic residual stress and its effects on stress corrosion behavior of NiAl bronze alloy using in situ neutron diffraction/EBSD/ tensile corrosion experiment [J]. Materials Characterization, 2020, 164: 110351.
- [20] RAO C, YE Z, ZHONG H, et al. Fiber Bragg grating based stress measurement for films deposited onto cylindrical surfaces [J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(9): 1577-1583.
- [21] SAVCHUK O, VOLINSKY A A. Nonparametric estimation of SiC film residual stress from the wafer surface profile [J]. Measurement, 2021, 177: 109238.
- [22] HERRERA-CELIS J, REYES-BETANZO C, GELVEZ-LIZARAZO O, et al. Low residual stress in hydrogenated amorphous silicon-carbon films deposited by low-

- temperature PECVD [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(6): 5581-5590.
- [23] BESNARD A, ARDIGO M R, IMHOFF L, et al. Curvature radius measurement by optical profiler and determination of the residual stress in thin films [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 487: 356-361.
- [24] 董恺琛, 娄帅, 姚杰, 等. 脉冲激光沉积薄膜的残余应力测量[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 70-76.
DONG K CH, LOU SH, YAO J, et al. Measurement of residual stresses in pulsed laser deposited thin films[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26: 70-76.
- [25] ZHU J T, ZHOU T, ZHU J, et al. Study on stress in Si-doped Al thin films prepared by magnetron co-sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1431002.
- [26] SAGHAEIAN F, KECKES J, WOEHLERT S, et al. Microstructure and stress gradients in TiW thin films characterized by 40 nm X-ray diffraction and transmission electron microscopy [J]. *Thin Solid Films*, 2019, 691: 137576.
- [27] LEI Y, JIANG J, WANG Y, et al. Structure evolution and stress transition in diamond-like carbon films by glancing angle deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 479: 12-19.
- [28] DEV A S, KUMAR D, GUPTA P, et al. Development of residual stress and uniaxial magnetic anisotropy during growth of polycrystalline Co film[J]. *Materials Research Bulletin*, 2020, 121: 110616.
- [29] TUYAERTS R, RASKIN J P, PROOST J. Opto-electrical properties and internal stress in Al: ZnO thin films deposited by direct current reactive sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 695: 137760.
- [30] KOENIG T R, RAO Z, CHASON E, et al. The microstructural and stress evolution in sputter deposited Ni thin films [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 412: 126973.
- [31] CHASON E, GUDURU P R. Tutorial: Understanding residual stress in polycrystalline thin films through real-time measurements and physical models[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(19): 191101.
- [32] PENG-O T, CHAIKAN P. High performance and energy efficient sobel edge detection [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 87: 104368.
- [33] LORENCIN I, AN-ĐELIĆ N, ŠPANJOL J, et al. Using multi-layer perceptron with Laplacian edge detector for bladder cancer diagnosis [J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2020, 102: 101746.
- [34] 童胜杰, 江明, 焦传佳. 一种改进工件边缘检测方法的研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 128-134.
- TONG SH J, JIANG M, JIAO CH J. Research on an improved edge detection method of workpiece [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(1): 128-134.
- [35] CASENEUVE G, VALOVA I, LEBLANC N, et al. Chest X-ray image preprocessing for disease classification [J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 192: 658-665.
- [36] CHEN J, QIANG H, WU J, et al. Navigation path extraction for greenhouse cucumber-picking robots using the prediction-point Hough transform [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105911.
- [37] YANG Y, ZHAO X, HUANG M, et al. Multispectral image based germination detection of potato by using supervised multiple threshold segmentation model and Canny edge detector [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106041.
- [38] HE M, FENG L, FAN J. A method for real-time monitoring of running trains using Φ -OTDR and the improved Canny [J]. *Optik*, 2019, 184: 356-363.
- [39] YAN B, LI Y, REN S, et al. Recognition and evaluation of corrosion profile via pulse-modulation eddy current inspection in conjunction with improved Canny algorithm [J]. *NDT & E International*, 2019, 106: 18-28.
- [40] YU H, YAN W, SUN J, et al. Study on quantitative detection of turbid solution components based on ellipse fitting [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 240: 118573.
- [41] ZHANG Q, JIN C H, XU H T, et al. Multiple-ellipse fitting method to precisely measure the positions of atomic columns in a transmission electron microscope image [J]. *Micron*, 2018, 113: 99-104.

作者简介



周陈昊, 2020年于南京工程学院获得学士学位, 现为上海大学在读硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与运动控制。

E-mail: zch83@shu.edu.cn

Zhou Chenhao received B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2020.

He is currently a M. Sc. candidate in Shanghai University. His main research interests include image processing and sport control.



凌晓, 上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室在读博士后。2011年毕业于山东农业大学动力与机械学院, 2014年在上海交通大学获得硕士学位, 2020年在上海交通大学获得博士学位。主要研究方向为复杂机电系统设计、健康监测与性能

评估、深度学习、柔性显示与薄膜封装等。

E-mail: ling_xiao@shu.edu.cn

Xiao Ling is a post doctor at the Key Laboratory of the Ministry of Education for New Display Technology and Application Integration at Shanghai University and a supervisor for postgraduate students. She received the B. Sc. degree from the School of Mechanical Engineering at Shandong Agriculture University in 2011 and M. Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2014, and Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2020. Her main research interests include complex electromechanical system design, health monitoring and performance evaluation, deep learning, flexible display and thin film packaging, etc.



杨连乔, 上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室副研究员, 博士研究生导师。2004年毕业于武汉大学动力与机械学院, 2004~2009年在韩国明知大学获得硕士、博士学位, 师从韩国绿色能源总统顾问申武焕教授。主要研究方向为光电器件及固态照明的开发, 石墨烯等纳米材料在光电器件电极和传感器领域的制备、应用, 微纳电子散热技术等。

E-mail: yanglianqiao@i.shu.edu.cn

Yang Lianqiao is an associate researcher at the Key Laboratory of the Ministry of Education for New Display Technology and Application Integration at Shanghai University and a supervisor for postgraduate students. She received the B. Sc. degree from the School of Power and Mechanical

Engineering of Wuhan University in 2004, and M. Sc. degree and Ph. D. degree from Myongji University in Korea from 2004 ~ 2009. Her main research interests include the development of optoelectronic devices and solid-state lighting, the preparation and application of graphene and other nanomaterials in the field of optoelectronic devices electrodes and sensors, micro-nano electronic heat dissipation technology, etc.



张建华 (通信作者), 上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室主任、教授, 博士研究生导师。2001~2002年在香港城市大学电子工程学系做访问学者研究; 2002~2003年, 在英国 Heriot Watt 大学电子工程系从事博士后研究。上海 OLED 产业联盟秘书长, 上海优秀学术带头人、新型显示首席科学家。

E-mail: jhzhang@oa.shu.edu.cn

Zhang Jianhua (Corresponding author), director, professor, and doctoral supervisor of the Key Laboratory of New Display Technology and Application Integration of the Ministry of Education of Shanghai University. From 2001 to 2002, she was a visiting scholar at the Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong; from 2002 to 2003, she was engaged in postdoctoral research at the Department of Electronic Engineering, Heriot-Watt University, United Kingdom. Secretary-General of Shanghai OLED Industry Alliance, Shanghai Outstanding Academic Leader, Chief Scientist of New Display.