

差动共焦显微边缘轮廓检测与定位方法

刘大礼 王允* 邱丽荣 赵维谦

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 为了实现高效、准确的检测和定位微结构如光刻掩模版的边缘轮廓,提出了一种差动共焦显微(DCM)边缘轮廓检测方法,并对该方法进行了原理仿真分析和实验验证。该方法具有在焦点的过零阶跃触发特性。利用该特性,该方法可以实时得到样品二值化边缘轮廓图像,极大地提高了边缘轮廓检测效率。理论分析和仿真表明,该方法边缘定位准确,不受边缘形状、方向和样品有效反射率的影响,可以有效抑制噪声和干扰。5 μm 周期台阶标准样品周期测量对比实验表明,该方法所得边缘轮廓能够实现高精度的横向尺寸测量,因此能够用于微结构的快速工业边缘轮廓成像检测。

关键词 测量;边缘检测与定位;差动共焦显微术;过零触发;微结构检测

中图分类号 TN247.1; TH742.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1008001

Differential Confocal Microscopy for Edge Contour Detection and Location

Liu Dali Wang Yun Qiu Lirong Zhao Weiqian

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract In order to realize high-efficiency and high-accuracy edge contours detection and location for micro structures such as photolithographic mask, a differential confocal microscopy (DCM) for edge contour detection and location is proposed and verified by simulation analysis and experiments. The proposed method has an axial response characteristic of zero-cross step trigger at focal point. Utilizing the step trigger characteristic, the proposed method can realize the real-time sample edge contour imaging in the form of binary image, and greatly improve the efficiency of edge contour detection. Theoretical analysis and computer simulations show that the proposed method can precisely detect and locate the edge contour without being affected by edge shape and direction, and has the ability of suppressing the interference caused by multiplicative and additive noise. Experimental results indicate that period measurement difference of 5 μm -period atomic force microscope standard step between the proposed method and atomic force microscope is only 2 nm. So the proposed method can be used for the real time, precise and rapid industrial edge contour inspection for microstructures.

Key words measurement; edge detection and location; differential confocal microscopy; zero-crossing trigger; microstructure inspection

OCIS codes 120.4630; 120.6650; 180.1790

1 引言

边缘轮廓能够准确描述测试对象的重要结构属性如深度上的不连续、特征形状的范围。在微结构

的几何量精密测量方面,如光刻掩模版线宽工业测量的关键内容就是如何实现对线宽边缘进行高效、准确的检测和定位^[1]。因而,对样品实现实时高效、

收稿日期: 2014-02-11; **收到修改稿日期**: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金纳米制造重大研究计划(91123014)、国家重大科学仪器开发专项(2011YQ04013601)、国家 863 计划(2012AA040507)

作者简介: 刘大礼(1984—),男,博士研究生,主要从事激光差动共焦显微成像理论与技术等方面的研究。

E-mail: liudali36@163.com

导师简介: 赵维谦(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: zwq669@126.com

* **通信联系人**。E-mail: alotrabbits@163.com

定位准确、能够有效抑制干扰和噪声的边缘检测具有重要的应用价值。有关边缘检测的研究在工业测量、图像处理、图像分割、模式识别、机器视觉、机器人、医学成像等领域广泛展开^[2]。在微结构测量领域,主要采用显微技术获得被测对象的图像,然后利用图像处理方法对图像做边缘检测^[3-4]。样品边缘检测和定位的准确性取决于显微系统的横向分辨率和边缘检测算法的准确性。一方面,当前高分辨显微技术成像效率亟待提高。电子显微镜、近场显微镜、原子力显微镜等虽然能够对样品实现高横向分辨成像,不过这些方法操作复杂、耗时长、设备成本高,不适用于工业检测。共焦显微镜因其具有 1.4 倍于传统光学显微镜的横向分辨率,以及非接触测量,成像快速,无需制样,成本适中等优点在微结构测量领域被广泛采用^[5-9],但由于需要以极小轴向间隔在不同高度上扫描多层图像来拟合高度轮廓和局部有效反射率图像^[10-11],共焦显微镜成像效率也不能满足实时检测需求。另一方面,图像边缘检测算法对图像噪声极为敏感,故在算法实施之前需先采用平滑滤波实现降噪,反而牺牲了图像的分辨率,所得到的边缘轮廓也不甚理想。为改进上述不足,文献[12]提出一种横向差动共焦显微(DCM)边缘检测定位方法,实现了对与针孔横向偏移方向垂直的边缘实时精确检测,但为了获得样品的全部边缘则不得不多次转动样品。

依据 DCM 技术的过零触发特性和良好的共模

噪声抑制特性^[13-15],本文提出了一种 DCM 成像边缘轮廓检测方法。该方法具有对共焦点的过零阶跃触发特性,实现了对微结构的实时、准确、全方向的边缘检测定位,因而能够实现对样品横向特征尺寸的在线自动测量。该方法通过单层扫描获得两路光强信号,利用信号处理电路实时获得两路信号的差值和该差值的绝对值,并将该差值除以该差值的绝对值得到边缘轮廓信号,从而实现对样品快速准确的边缘检测和线宽、周期等横向尺寸的高精度、高效率的光学测量。

2 系统构成和工作原理

图 1 所示为 DCM 边缘轮廓成像系统。激光经过扩束后被物镜聚焦在样品表面。物镜的位置通过压电陶瓷(PZT)驱动器控制,以实现样品表面的精确聚焦。由样品反射回的光进入探测光路,经过聚光镜、针孔,由探测器输出光强信号。探测针孔相对于聚光镜的焦点位置具有轴向偏移,探测器 1 前针孔偏移 $-z_d$,该路输出信号 I_A ,探测器 2 前针孔偏移 z_d ,该路输出信号 I_B 。 z_d 以光进入探测器方向为正,其光学归一化坐标为 $u_d = kz_d \sin^2 \alpha_1$ 。物方轴向坐标 z 以 PZT 伸长方向即光斑接近样品的方向为正,其光学归一化坐标为 $u = kz \sin^2 \alpha_0$ 。 k 是波数, $\sin \alpha_0$ 是物方物镜数值孔径, $\sin \alpha_1$ 是像方聚光镜数值孔径。

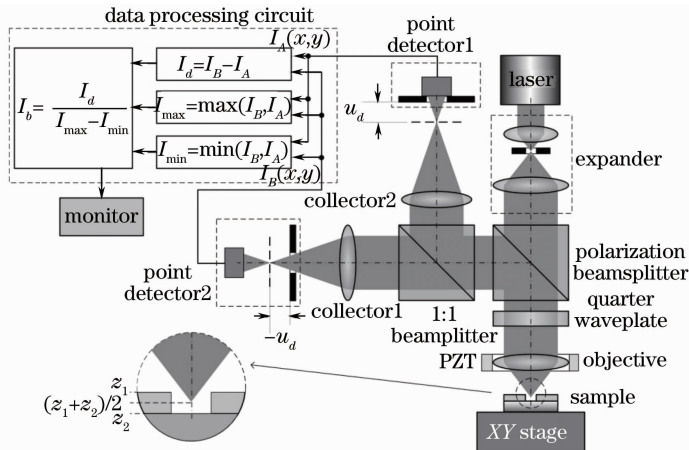


图 1 差动共焦边缘轮廓显微成像系统

Fig. 1 Differential confocal edge contour microscopy system

假设显微系统为无像差、成像与探测透镜一致、使用点探测器的理想共焦相干成像系统。当对有效振幅反射率为 R 、轴向位置为 $u = 0$ 的平面镜沿轴向扫描时,探测器 1 输出光强信号记为 $I_A(u, u_d)$,探

测器 2 输出光强信号记为 $I_B(u, -u_d)$,这里 u 是物镜焦平面位置。由共焦探测器轴向偏置特性可知,针孔偏移会造成共焦轴向响应曲线沿轴向的相移^[13-14,16]。系统探测方分光使用 1:1 分光镜,以保证

$I_A(u, u_d)$ 和 $I_B(u, -u_d)$ 的幅值相等, 为 R^2 。影响平面镜有效反射率的因素主要是平面镜的物质反射率和平面镜的倾斜。于是探测器输出轴向扫描信号为

$$I_A(u, u_d) = R^2 \sin^2 \left(\frac{u}{2} + \frac{u_d}{4} \right), \quad (1)$$

$$I_B(u, -u_d) = R^2 \sin^2 \left(\frac{u}{2} - \frac{u_d}{4} \right). \quad (2)$$

式中 $\sin^2(u/2) = [\sin(u/2)/(u/2)]^2$, 是共焦归一化轴向响应公式。

记 $I_{\max} = \max(I_A, I_B)$, 是在当前位置两路光强信号中的较大值, $I_{\min} = \min(I_A, I_B)$ 是当前位置两路光强信号中的较小值, 两者相减即得到 I_A 和 I_B 的差值的绝对值信号。于是得到样品的边缘轮廓信号

$$I_b(u, u_d) = \text{int} \left(\frac{I_B - I_A}{I_{\max} - I_{\min} + \Delta} \right) = \text{int} \left(\frac{I_B - I_A}{|I_B - I_A| + \Delta} \right) = \begin{cases} 1, & I_B > I_A \\ 0, & I_B = I_A \\ -1, & I_B < I_A \end{cases} \quad (3)$$

式中 int 是取整函数, Δ 是趋近于零的可忽略的极小量, 用以避免 $0/0$ 。

显然(3)式是一个阶跃函数, 其取值只与 I_A 和 I_B 的相对大小关系有关, 而与 I_A 和 I_B 的具体值无关, 与 I_A 和 I_B 的幅值无关, 与平面的有效反射率无关。由图 2 所示系统轴向响应可见, I_b 的阶跃边位置 $I_b = 0$ 对应物镜焦平面位置 $u = 0$, 此时反射平面与焦平面重合; 当焦平面高于反射平面 ($u < 0$) 时, $I_b = -1$; 当焦平面高于反射平面 ($u > 0$) 时, $I_b = 1$ 。因此 I_b 可以用于探测样品在焦平面上的轮廓。由于平面的倾斜只影响平面的有效反射率, 不影响共焦轴向响应曲线形状, 故该结论对于倾斜平面如台阶的上升或下降斜面仍然成立。但当平面倾斜过于陡峭时, 反射光不能进入探测器, 因而不能实现检测。受系统像差、探测器有限尺寸效应的影响, I_A 和

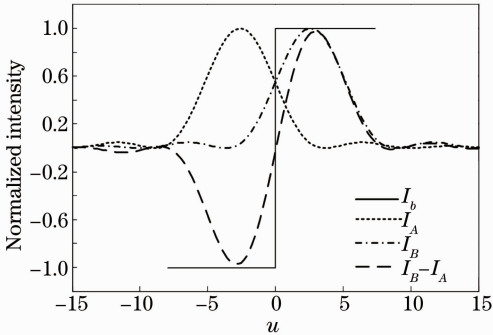


图 2 差动共焦轴向响应曲线 ($u_d = 5.21$)

Fig. 2 Differential confocal axial response curves ($u_d = 5.21$)

I_B 实际轴向曲线未必具有图 2 所示对称性, 但不影响上述结论的成立。此外, 与 $I_B - I_A$ 相比较, I_b 具有更灵敏的过零触发特性和极高的抑制噪声能力和抗干扰性能。

利用 I_b 对物镜焦平面上样品轮廓的阶跃触发特性, 能够实现对样品等高线边缘轮廓的检测和定位。考虑一个普通样品, 样品有效反射率为 $R(x, y)$, 若样品高度轮廓的极值的轴向坐标为 z_1, z_2 。为获得样品中腰的边缘轮廓, 驱动物镜聚焦在 $z_0 = (z_1 + z_2)/2$, 即样品的中腰位置, 该位置轴向归一化坐标记为 u_0 ; 然后 $x-y$ 驱动单元使光束逐行扫描样品。在样品 (x, y) 位置, 该点样品高度为 z' , 其轴向坐标记为 u' 。

由共焦成像公式^[17]得

$$I_A(x, y) = R^2(x, y) |h_a(x, y, z_0 - z', z_d) \otimes o(x, y, z')|^2, \quad (4)$$

$$I_B(x, y) = R^2(x, y) |h_a(x, y, z_0 - z', -z_d) \otimes o(x, y, z')|^2, \quad (5)$$

式中 \otimes 是卷积运算符号, $o(x, y, z')$ 是物在 z' 位置的物函数, $h_a(x, y, z_0 - z', z_d)$ 是探测器具有轴向离焦的共焦振幅点扩展函数, 其归一化坐标表达式为^[18]

$$h_a(v, u, u_d) = \exp(-2is_0u) \int_0^1 P(\rho, u) J_0(v\rho) \rho d\rho \times \int_0^1 P(\rho, u) \exp(iu_d\rho^2/2) J_0(v\rho) \rho d\rho, \quad (6)$$

式中 P 是透镜离焦光瞳函数, J_0 是零阶贝塞尔函数, ρ 是透镜归一化半径坐标, s_0 是轴向空间频率的位移常量, $v = kr \sin \alpha_0$ 是光学归一化径向坐标。

于是样品的边缘图像为

$$I_b(x, y) = \text{int} \left[\frac{I_B(x, y) - I_A(x, y)}{|I_B(x, y) - I_A(x, y)| + \Delta} \right]. \quad (7)$$

由(3)式可知, 当 $I_B(x, y) < I_A(x, y)$ 时, $I_b(x, y) = -1$, 此时样品当前位置的高度低于物镜的焦平面; 当 $I_B(x, y) > I_A(x, y)$ 时, $I_b(x, y) = 1$, 此时样品当前位置的高度高于物镜的焦平面; 当 $I_B(x, y) = I_A(x, y)$ 时, $I_b(x, y) = 0$, 此时样品当前位置的高度等于物镜的焦平面高度。由于采样间隔的原因, 不一定能够得到 $I_b(x, y) = 0$ 。为简化处理, 当 $I_b(x, y) \geq 0$ 时, 相应位置数字边缘图像的灰度值记录为 255; 当 $I_b(x, y) < 0$ 时, 相应位置数字边缘图像的灰度值记录为 0, 于是得到表征样品边缘的二

值化图像。由于物镜被聚焦在样品的中腰位置,因此二值化图像中图像的交界轮廓即样品在中腰位置的等高线边缘轮廓。

边缘数字图像的灰度值只与当前位置 $I_B(x, y)$ 和 $I_A(x, y)$ 有关,且数据处理方法简单,运算时间极短,因此边缘数字图像可以与扫描同时获得,实现对样品边缘的实时检测。基于该实时边缘数字图像可以测量样品横向尺寸。

以台阶样品为例,首先对准在台阶的顶部或底部,然后驱动物镜沿轴向扫描,获得如图 2 所示 I_B-I_A 曲线,接着利用曲线拟合获得 I_B-I_A 曲线线性区域的方程,最后由该方程计算 $I_B-I_A=0$ 的轴向坐标,得到 z_1 或 z_2 ,进而得到 z_0 。在此之后,驱动物镜聚焦在 z_0 位置,利用本方法检测在该平面上的台阶边缘轮廓。物镜的定位误差 Δ 源于系统对 z_0 的测量误差和 PZT 的驱动分辨率,其造成所得边缘位置与理想边缘位置的横向偏离为 $\Delta/\tan\theta$,这里 $\tan\theta$ 是台阶斜边的斜率。差动共焦轴向分辨力可达 $2\text{ nm}^{[13]}$,PZT 的闭环分辨力可达 1 nm ,因此物镜的定位误差很小,其对边缘定位精度的影响可以忽略。

3 理论分析与仿真

3.1 噪声抑制分析

共焦系统中存在加性噪声和乘性噪声两种作用形式的噪声扰动。前者主要是环境光噪声、光电探测器电路噪声,后者主要源自系统激光光源的功率扰动、样品局部有效反射率突变。假设显微系统的乘性噪声如光源功率扰动、反射率扰动造成的与理想信号的比例为 η , $1+\eta \approx 1$ 。环境光造成的加性噪声为 n_a ,两探测电路的噪声特性相同,电路噪声分别是 n_A 和 n_B 。 $I'_A = \eta I_A + n_A + n_a$, $I'_B = \eta I_B + n_B + n_a$ 。于是

$$I'_b = \frac{I'_B - I'_A}{|I'_B - I'_A|} = \frac{I_b + \Delta n / |\Delta I|}{|I_b + \Delta n / |\Delta I||}, \quad (8)$$

式中 $\Delta n = n_B - n_A$, $\Delta I = I_B - I_A$ 。对于非边缘区域,有 $|\Delta I| \gg |\Delta n|$,于是 $I'_b = I_b \cdot \Delta I$ 越大,对上述任何扰动和噪声抑制特性越好。在边缘附近,有 $|\Delta I| \approx |\Delta n|$,此时噪声表现为散粒噪声。 ΔI 在焦点斜率越大,噪声影响范围越窄,对边缘检测准确度的影响越小。

3.2 针孔偏移量的优化

为保证良好的噪声抑制性, $I_B - I_A$ 在焦点斜率越大越好。图 3 采用 $|I_B - I_A|$ 曲线表征不同针孔轴向偏移量的噪声抑制特性。由图 3 可见,随着针孔轴向偏移量 u_d 的逐渐增大, $u=0$ 附近对应的边缘区

域逐渐变窄、斜率逐渐变大。当 $u_d > 2.5$ 时,边缘区域斜率改善渐趋不明显。不过探测器针孔轴向偏移会引入离焦像差,降低系统的横向分辨率,恶化 I_A 、 I_B 的成像质量,从而影响 I_b 的准确性,故系统应选择较小的偏移量。

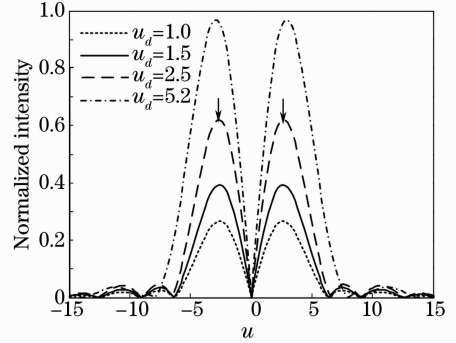


图 3 噪声抑制特性曲线

Fig. 3 Simulation noise suppression characteristic curves

综合考虑横向分辨率和噪声抑制能力,采用 $u_d = 2.5$ 作为最佳偏移量,有效检测区间由 $|I_B - I_A|$ 曲线峰值位置确定,即 $u \in [-2.6, 2.6]$ 。

3.3 边缘检测仿真分析

考虑一个简单的台阶样品,台阶顶部振幅反射率为 r_1 ,轴向坐标为 z_1 ,台阶底部振幅反射率为 r_2 ,轴向坐标为 z_2 ,且 z_1 和 z_2 在有效检测区间内。当台阶物理边缘在 $x=0$ 时,台阶的物函数表示为

$$o(x, y, z) = r_1 H(x) \delta(z_1) + r_2 H(-x) \delta(z_2), \quad (9)$$

式中 $H(x)$ 是阶跃函数。令 $z = (z_1 + z_2)/2$,将(9)式代入(5)、(6)式即可得台阶成像 I_A 、 I_B 。然后将 I_A 、 I_B 代入(7)式即可得到台阶的边缘轮廓图像。仿真参数为物镜数值孔径(NA)为 0.80 ,波长 $\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$,扫描间隔 10 nm 。台阶参数为 $r_1 = 1$, $r_2 = 0.7071$, $z_1 = -75\text{ nm}$, $z_2 = 75\text{ nm}$ 。

仿真结果如图 4 所示。图中细虚线所示为台阶边缘位置。由图 4 可见,台阶被准确分割为高度高于焦点的顶面区域、高度低于焦点的底面区域。 I_b

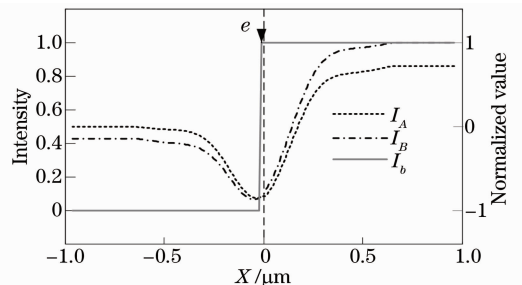


图 4 台阶成像仿真曲线

Fig. 4 Simulation step imaging curves

(x, y) 图像中的阶跃锐边即反映了样品的边缘轮廓的位置信息。受离散采样影响, (4) 式中的 0 值没有出现过。若 (4) 式能够得到 0 值, 则可以依据 0 值的横坐标精确定位边缘位置。当不能得到 0 值时, 可知边缘在 -1 和 1 的阶跃边的 1 个横向间隔内, 因此边缘最大定位偏差为 1 个横向扫描间隔。为简便处理实际边缘位置定义为图 4 中 e 点所示位置。

仿真表明, 本方法能够实现对具有不同有效反射率的台阶样品边缘的实时检测, 边缘定位最大偏差为 1 个扫描间隔。使用小横向间隔, 有利于提高边缘定位精度。

3.4 边缘检测方向性和噪声抑制性仿真

圆孔具有各个方向的边缘。对圆孔做差动共焦成像和共焦成像仿真。圆孔参数为 $\Phi = 3.0 \mu\text{m}$, $r_1 = 1, r_2 = 0.7071, z_1 = -75 \text{ nm}, z_2 = 75 \text{ nm}$ 。扫描间隔 10 nm 。

图 5(a) 中 I_A, I_B 是由差动共焦成像所得的光强数据得到的数字图像。 I_C 是由共焦成像所得的光强数据得到的图像。图 5 中 I_b 是由差动共焦光

强数据使用 (7) 式得到的圆边缘图像; I_E 是对共焦光强数据使用 Sobel 算子得到圆边缘图像。由仿真差动共焦光强数据得到本方法检测圆孔直径为 $2.96 \mu\text{m}$, 由仿真共焦光强数据结合 Sobel 算子方法检测结果为 $3.24 \mu\text{m}$ 。可见, 本方法能够检测任何方向的边缘, 且较共焦结合 Sobel 算子边缘检测方法定位更为准确。

图 5(b)、(c) 所示为仿真光强数据的信噪比 $R_{\text{SN}} = 30 \text{ dB}$ 和极度恶化条件下 $R_{\text{SN}} = 13 \text{ dB}$ 时圆孔光强的图像和边缘轮廓图像。比较不同 R_{SN} 下由 Sobel 算子图像处理获得的边缘图像 I_E 可见, 在共焦光强数据 R_{SN} 严重恶化时 Sobel 算子图像处理无法实现边缘检测。比较不同 R_{SN} 下由本方法获得的边缘图像 I_b 可见, 在共焦图像 R_{SN} 严重恶化时, I_b 图像边缘部分 R_{SN} 变差, 但是边缘区域仍能够被很好辨识, 能够用于边缘检测定位。由仿真可见, 本方法具有良好的噪声抑制特性, 在光强数据的 R_{SN} 严重恶化的情况下, 仍能够实现样品边缘的检测和定位。

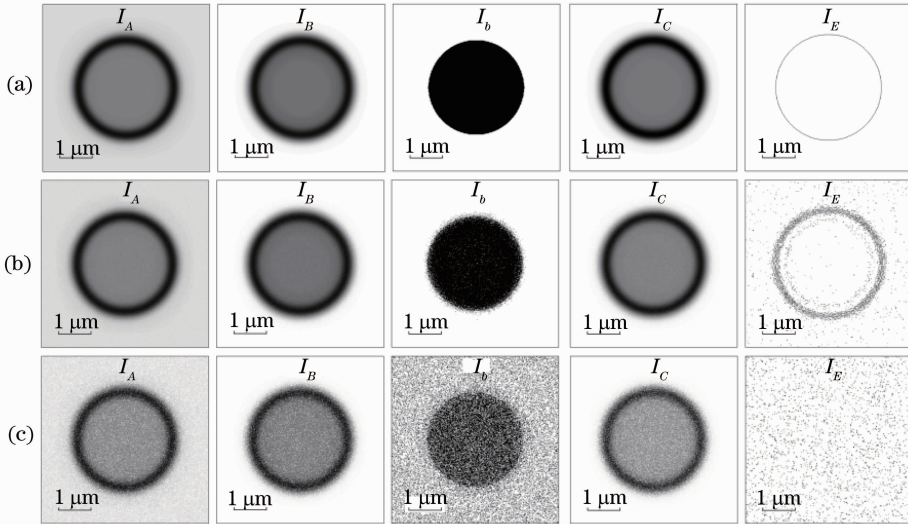


图 5 圆孔成像仿真图像。(a) 无噪声; (b) $R_{\text{SN}} = 30 \text{ dB}$; (c) $R_{\text{SN}} = 13 \text{ dB}$

Fig. 5 Simulation circular hole images with noise. (a) No noise; (b) $R_{\text{SN}} = 30 \text{ dB}$; (c) $R_{\text{SN}} = 13 \text{ dB}$

上述分析仿真表明, 所提方法能够检测和定位样品在物镜焦平面上任意方向的边缘轮廓, 即使在系统噪声和干扰极其严重的情况下, 仍然能够获得有效的边缘轮廓图像。边缘定位精度主要受横向扫描间隔影响, 在不考虑噪声和干扰情况下, 最大边缘定位偏差为 1 个横向扫描间隔。

4 测量实验与结果

构建差动共焦边缘轮廓显微镜作为实验装置对

所提方法进行验证。系统激光光源波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 物镜数 NA 为 0.80 。针孔轴向离焦量 u_d 为 2.5 。物镜采用 PI P725-CD 物镜纳米聚焦系统驱动。该系统内置具有绝对测量和直接计量性能的超精密电容传感器, 系统闭环定位分辨率为 1.25 nm 。系统实测噪声抑制特性曲线如图 6 所示, 在实测中测得的 I_B 和 I_A 形状不同、左右侧曲线不对称, 但始终满足在物镜焦平面位置 $I_B = I_A$, I_b 的阶跃边与之相对应。考虑噪声影响, 系统的有效边缘检测成像范围 $1 \mu\text{m}$, 如图 6 中 AB 所示。

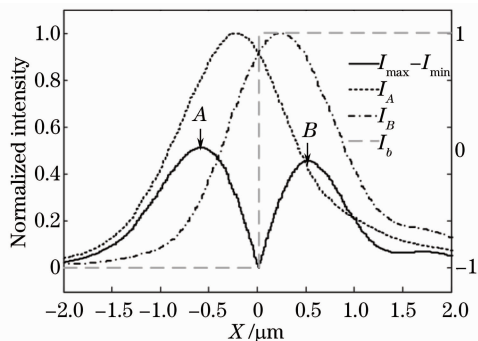


图 6 系统实测噪声抑制特性曲线

Fig. 6 Measured noise suppression characteristic curves

4.1 台阶标准样品测量实验

测量标准样品 Budget Sensors HS-500MG 的硅基二氧化硅台阶周期来考察本方法对有斜边的台阶的边缘检测定位精度和测量性能。台阶标称高度为 500 nm。实测台阶周期数据如图 7 所示。扫描间隔为 10 nm。台阶高度轮廓由 DI Dimension 3100 型原子力显微镜获得,用作对比,如图 8 所示。原子力显微镜获得的台阶周期为 5.0054 μm。

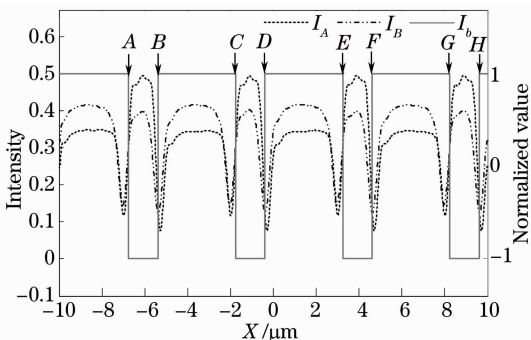


图 7 DCM 实测曲线

Fig. 7 Measurement curves obtained by DCM

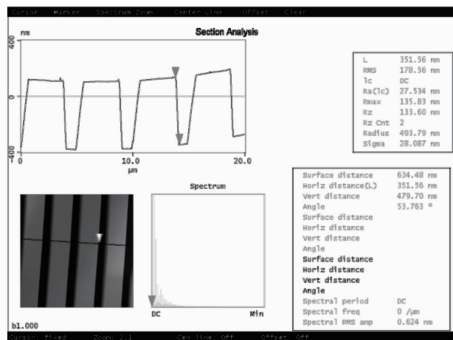


图 8 原子力显微镜测量结果

Fig. 8 Measurement results obtained by atomic force microscope

由图 7 可见本方法对边缘轮廓检测未受台阶各部分有效反射率变化的影响,能够辨识台阶的斜面在物镜焦平面上的边缘。使用图 7 测量台阶周期,

各测量位置所得结果如表 1 所示。周期测量需要定位两条边缘,其测量偏差由边缘定位偏差决定。由表 1 中测量残差可见,本方法所得周期测量最大偏差 0.0192 μm 约是横向扫描间隔的 2 倍,因此对边缘的定位偏差约 1 个横向扫描间隔。由表 1 计算得到本方法所得台阶周期平均值为 5.0033 μm,均方根误差为 0.013 μm,与原子力显微镜获得结果相比,测量残差为 0.0021 μm。该对比实验结果表明,本方法能够准确辨识台阶边缘,且不受台阶斜坡斜率、台阶物质组成的影响,所得边缘轮廓能够实现高精度的横向尺寸测量。

表 1 台阶周期测量结果(单位: μm)

Table 1 Measurement results of step period (unit: μm)

Measurement site	Measuring result	Residual error
AC	5.0138	0.0084
BD	4.9862	-0.0192
CE	5.0138	0.0084
DF	5.0138	0.0084
EG	4.9862	-0.0192
GH	5.0138	0.0084

4.2 不同形状标准样品测量实验

对 HS-500MG 的复杂图形区域成像来考察本方法对边缘方向的检测性能,该区域包含各个方向的边缘。图像尺寸为 256 × 256,成像范围为 37.46 μm × 37.46 μm,成像效果如图 9 所示。图中虚线框所示区域样品的原始形貌被落在样品上的污染物破坏了,是无效区域。污染物的存在不影响其他区域的边缘检测。对于图中有效区域,由图 9(a)可见被检测区域包含圆孔、圆台、纵横方向台阶等表面结构。图 9(b)与图 9(a)同时获得,不需要旋转样品,不需要后期处理。由图 9(b)可见,该图为黑白二值化图像。由 HS-500MG 结构可知,高亮部分为样品底部的硅基,灰暗部分为 HS-500MG 的表面形

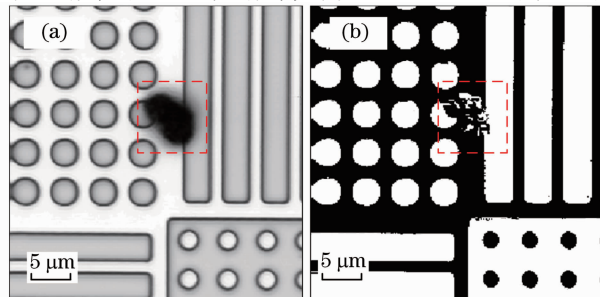


图 9 HS-500MG 实测图像。(a) 光强图像; (b) 边缘轮廓图像

Fig. 9 Measurement images of HS-500MG. (a) Intensity image; (b) edge contour image

状结构。图 9(b)黑色部分对应图 9(a)高亮度部分,即硅基部分,该部分低于物镜焦平面。图 9(b)白色部分对应图 9(a)低亮度部分,即二氧化硅部分,该部分高于物镜焦平面。因而边缘轮廓图像实现了对样品的高度分割。图 9(b)中圆孔、圆台、纵横方向台阶边缘清晰,形状与图 9(a)中响应区域边缘相符。可见,本方法实现了对圆孔、圆柱台阶和横向台阶、纵向台阶的边缘检测,证明本方法不受边缘的方向影响。

5 结 论

实现了一种 DCM 成像边缘轮廓检测方法。该方法改进了差动共焦的过零触发灵敏度,仅通过单次扫描,利用简单的数据处理就可以实时得到样品二值化边缘轮廓图像,极大地提高了对微结构的边缘轮廓检测效率。理论分析和仿真表明,该方法边缘定位准确,定位精度为 1 个横向扫描间隔,不受边缘形状、方向和样品有效反射率的影响,可以有效抑制噪声和干扰,即使在信噪比极端恶化的条件下也能有效检测和定位样品边缘。5 μm 周期台阶标准样品周期测量对比实验表明,本方法所得边缘轮廓能够用于高精度的横向尺寸测量。因此本方法能够用于光刻掩模版等微结构的快速工业边缘轮廓成像检测。

参 考 文 献

- 1 Liu Zhongyao, Yan Juqun, Zhang Rui, *et al.*. A system for measurement of line width by combining polarization interferometry with confocal microscopy[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, 26(2): 115–119.
柳忠尧, 闫聚群, 张蕊, 等. 用于线宽测量的偏振干涉共焦显微测量方法[J]. *计量学报*, 2005, 26(2): 115–119.
- 2 Xu D J, Takis K. Detection and localization of edge contours[C]. *SPIE*, 2003, 5097: 79–89.
- 3 Jiang Li, Wu Weiren, Zhang Zhijing, *et al.*. Automatic detection of micro image edges for micro accessories [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 224–231.
姜黎, 吴伟仁, 张之敬, 等. 微小型结构件显微图像边缘的自动识别[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 224–231.
- 4 Wu Ligang, Li Zupan, Wang Xunsi, *et al.*. Internal macroscopic defects perspective imaging detection system for infrared chalcogenide glasses [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108001.

- 吴礼刚, 李祖盼, 王训四, 等. 红外硫系玻璃内部宏观缺陷透视成像检测系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108001.
- 5 Yin C Y, Lin D J, Liu Z Y, *et al.*. New advance in confocal microscopy[J]. *Meas Sci & Technol*, 2006, 17(3): 596–600.
- 6 Wang Zhao, Zhu Shengcheng, Tan Yushan, *et al.*. Parallel confocal measurement though integrated optical fiber bundle plate [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(1): 105–109.
王昭, 朱升成, 谭玉山, 等. 集成光纤束并行共焦测量[J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 105–109.
- 7 Yan Juqun, Liu Zhongyao, Lin Dejiao, *et al.*. Method of heterodyne confocal microscopy measuring big step height [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(3): 389–393.
闫聚群, 柳忠尧, 林德教, 等. 大台阶高度测量的外差共焦方法[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 389–393.
- 8 Zhang Man, Tang Zhilie, Tan Zhiliang, *et al.*. New method of spatial differential imaging with confocal microscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0318001.
张曼, 唐志列, 谭治良, 等. 一种实现共焦显微镜空间微分成像的新方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0318001.
- 9 Tu Long, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on the technology of parallel laser confocal microscopy detection based on digital micromirror device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 101702.
涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 基于数字微镜的并行激光共焦显微检测技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 101702.
- 10 Taehoon K, Taejoong K, Seungwoo L, *et al.*. Optimum conditions for high-quality 3D reconstruction in confocal scanning microscopy[C]. *SPIE*, 2006, 6090: 181–187.
- 11 Yu Qing, Yu Xiaofen, Cui Changcai. Design of laser parallel confocal measurement system with single source and dual beam paths[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 281–286.
余卿, 余晓芬, 崔长彩. 单光源双光路激光并行共焦测量系统设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 281–286.
- 12 Wang Y F, Kuang C F, Xiu P, *et al.*. A lateral differential confocal microscopy for accurate detection and localization of edge contours[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2014, 53: 12–18.
- 13 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution[J]. *Opt Express*, 2004, 12(21): 5013–5021.
- 14 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R, *et al.*. SABCMS, a new approach to higher lateral resolution of laser probe measurement system [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 120(1): 17–25.
- 15 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R. Tri-heterodyne confocal microscope with axial superresolution and higher SNR[J]. *Opt Express*, 2004, 12(21): 5191–5197.
- 16 Shigeharu K, Tony W. Effect of axial pinhole displacement in confocal microscopes[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(13): 2257–2261.
- 17 Wilson T. *Confocal Microscopy*[M]. London: Academic Press, 1990. 1–64.
- 18 Gu M. *Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1996. 51.

栏目编辑:何卓铭