

光学学报

蝙蝠翼效应下矩形光栅特征参数计算方法

范筱昕¹, 张佳乐¹, 高志山¹, 马剑秋¹, 李赫然¹, 陈露², 雷李华³, 傅云霞³, 徐志毅¹, 朱丹¹, 郭珍艳¹, 袁群^{1*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210023;

³上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

摘要 白光显微干涉术是微结构三维形貌无损测量的有效手段,但当沟槽深度小于光源相干长度时易产生蝙蝠翼效应。ISO-25178 系列规定了由三维形貌计算沟槽深度和线宽两项特征参数的方法。该算法则首先需要确定阶跃边缘位置,然而蝙蝠翼位于阶跃边缘,造成形貌中的阶跃边缘位置定位困难。本文针对上述问题,摒弃了从三维形貌中提取阶跃边缘位置的传统方法,依据干涉图像中矩形光栅上下表面边缘位置采样点相干峰分布的差异性,提取相干包络峰值位置,并计算得到用于区分阶跃上下表面的掩膜。本文提出的方法从垂直扫描干涉图像出发,同步实现三维形貌复原和阶跃边缘位置定位,继而准确、高效地计算沟槽深度和线宽。本文以两种不同特征参数的矩形光栅作为检测对象,对比了测量结果与标称值之间的偏差,并对测量过程中的误差项进行了分析。实验结果证明,本文方法具有良好的重复性和鲁棒性。

关键词 显微干涉; 矩形光栅; 蝙蝠翼效应; 特征参数; 二值化

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231103

1 引言

微纳结构是一种尺寸在微纳米量级的功能性结构,因其尺寸细微往往赋予器件独特的物理及化学性能,被广泛应用于光学、电子、机械、半导体等领域。其线宽、沟槽深度、表面粗糙度等形貌特征参数是影响元器件性能的重要因素。矩形光栅作为一种典型的微纳周期性阶跃结构,由大量等宽等间距的平行狭缝构成,其水平剖面形貌轮廓呈周期性矩形分布。白光显微干涉术是当前矩形光栅形貌特征参数无损测量的典型手段^[1-3],通过对待测样品进行垂直扫描来完成干涉图像的采集,使用相干峰值评估的方法还原出待测样品表面三维形貌,由还原的三维形貌经过计算处理得到所需的特征参数。然而,样品的结构特征会影响该技术的检测结果,因样品结构而产生的蝙蝠翼效应是典型的形貌误差。

2000 年 Harasaki 等提出^[4],当检测系统光源的相干长度大于阶跃样品的沟槽深度时,将在样品阶跃边缘位置处产生蝙蝠翼效应,造成阶跃边缘位置出现异常形貌数据。根据 ISO 25178-70 和 ISO 25178-700^[5-6]中周期性矩形阶跃结构特征参数计算法则,线宽 W 为视场中每一个形貌轮廓全长上阶跃边缘位置之间距离

的统计平均值,沟槽深度 d 则需通过对阶跃上下表面中心区域形貌数据进行平面拟合求解。然而,蝙蝠翼效应下,阶跃边缘的异常数据会导致无法准确确定 W ,从而影响沟槽深度 d 计算时拟合区域的选取,使得该算法则无法应用于矩形光栅特征参数的计算。为了沿用国际标准中的计算法则,同时避免蝙蝠翼效应对阶跃结构特征参数的影响,国内外学者主要从消除蝙蝠翼效应的角度开展研究工作。蝙蝠翼效应的校正主要分为以下两种方式:1)针对待测样品结构特征调节系统硬件参数^[7];2)对相干信号解调得到的三维形貌进行滤波校正^[8-10]。上述方法中,调整硬件参数的方法从产生机制上避免了蝙蝠翼效应的出现,但成本高且不具有普适性;滤波校正方法可以去除三维形貌中蝙蝠翼效应的影响,但需要根据待测样品的特征参数,选择合适的滤波器尺寸及截止频率,增加了测量过程的复杂度,也易出现蝙蝠翼校正不完全的情况。

上述分析表明,如若从三维形貌的角度寻求方法定位矩形光栅阶跃边缘位置,首先需要对蝙蝠翼效应进行校正,校正过程步骤复杂且难以完全避免蝙蝠翼效应的影响。因此,本文从白光显微干涉图像的角度出发,利用相干信号解决阶跃边缘定位问题。白光显微干涉通过逐点的相干包络峰值得到高度分布,对矩

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-07-08; 录用日期: 2023-08-02; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(62175107, 62205148)、国家重点研发计划(2022YFF0706302)、上海市自然科学基金(21ZR1483100)、上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1425000)

通信作者: *yuanqun@njust.edu.cn

形光栅而言,其上下表面的高度不同,底部采样点相干包络峰值位置自然会大于顶部采样点的位置。蝙蝠翼效应在原始干涉数据中引入了非理想干扰因素,导致阶跃边缘位置采样点的相干包络峰值位置发生偏移,虽然这种偏移会在形貌复原上产生蝙蝠翼,但没有改变底部采样点的相干包络峰值位置大于顶部采样点的位置这一性质,所以并不妨碍从相干信号中准确区分矩形光栅的上下表面。本文依据上下表面采样点的相干峰位置差异分辨阶跃边缘上下表面,得到能够准确区分矩形光栅上下表面的二值化掩膜矩阵。另一方面,在垂直扫描的过程中,可以实时进行阶跃边缘位置定位,与样品三维形貌复原并行处理,能够有效提高沟槽深度和线宽的检测效率。为了验证上述方案设计思路,本文对两种不同线宽、不同沟槽深度的矩形光栅进行了检测。同时,

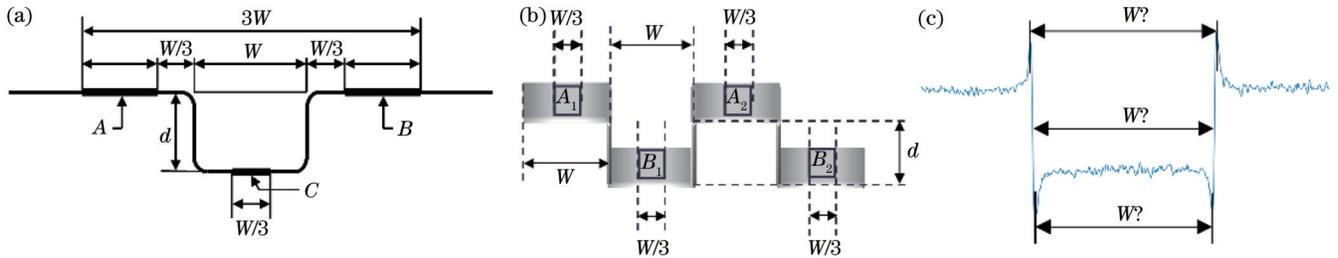


图1 矩形光栅沟槽深度测量标准。(a)传统“W/3”法则定义;(b)“W/3”法则在矩形光栅上的应用;(c)蝙蝠翼效应对W判断的影响
Fig. 1 Measurement standard of rectangular grating groove depth. (a) Definition of traditional "W/3" guideline; (b) application of "W/3" guideline in rectangular grating; (c) influence of batwing effect on judgement of W

可以用两个表达式 Z_1 、 Z_2 分别表示矩形光栅上下表面采样点的高度:

$$\begin{cases} Z_1 = a_1 + \alpha_2 X + a_3 Y + h \\ Z_2 = a_1 + \alpha_2 X + a_3 Y - h \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 和 h 为拟合系数;矩形光栅沟槽深度 $d = 2h$; X 、 Y 为平面拟合时每一个采样点的坐标。将两个表达式合并可得

$$Z = a_1 + \alpha_2 X + a_3 Y + h\delta. \quad (2)$$

变量 δ 在上表面区域 A_1 、 A_2 时为 +1, 在下表面区域 B_1 、 B_2 时为 -1, 因此使用最小二乘法同时拟合三个未知数, 误差函数最小时表达式为

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} (a_1 + \alpha_2 X + a_3 Y + h\delta - Z_i)^2, \quad (3)$$

此时最小二乘拟合的必要条件为

$$\frac{\partial E}{\partial M} = 0, M = a_1, \alpha_2, a_3, h. \quad (4)$$

分别对未知量 a_1 、 a_2 、 a_3 和 h 求偏导, 可得线性方程组:

$$\begin{pmatrix} n & \sum X & \sum Y & \sum \delta \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY & \sum X\delta \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 & \sum Y\delta \\ \sum \delta & \sum X\delta & \sum Y\delta & \sum \delta^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ X \\ Y \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum YZ \\ \sum \delta Z \end{pmatrix}. \quad (5)$$

通过求解式(5), 可以得到矩形光栅的沟槽深度值。由

对本文方法进行了重复性和鲁棒性分析。

2 原理与方法

2.1 蝙蝠翼效应下国际标准的不足

如图1(a)所示,传统的“W/3”法则应用于单沟槽结构中,需要选取沟槽两侧顶部长度为 $2W/3$ 的区域和底部长度为 $W/3$ 的区域来消除阶跃边缘位置的影响^[11]。但由于矩形光栅上下表面等宽等间距,“W/3”法则选取的拟合区域并不适用于矩形光栅。参照 ISO 25178-700 中对周期性矩形阶跃结构沟槽深度测量的定义,如图1(b)所示,本文选取视场中矩形光栅结构所有上下表面中心 $W/3$ 处的采样区域进行最小二乘法拟合,可以有效避免阶跃边缘蝙蝠翼效应对沟槽深度计算的影响。

上述计算过程可知,准确选取拟合区域是该方法实施的前提条件。然而,蝙蝠翼效应会造成 W 难以判断。以蝙蝠翼效应下单沟槽样品三维形貌剖面轮廓图为例,如图1(c)所示,蝙蝠翼效应下该样品在顶部、半高处以及底部的 W 值各不同,这使得上述方法难以指导计算沟槽深度和线宽。针对该问题,本文从白光显微干涉图像出发,通过对相干信号进行分析,寻求阶跃边缘精确定位的实现方法。

2.2 矩形光栅相干信号分析

下式给出了周期为 T 、高度为 h_0 的矩形光栅剖面形貌轮廓表达式:

$$h(x; h_0; T) = \begin{cases} h_0, & mT \leq x \leq mT + T/2 \\ 0, & mT + T/2 \leq x \leq mT + T \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $m=0, 1, 2, \dots$ 。

假定光源光谱特性呈理想高斯分布,采用线性传递函数模型模拟垂直扫描过程中样品表面每一个采样点的光强信息^[12], 得到理想的扫描干涉图 $I_{\text{ideal}}(x, y)$ 为

$$I_{\text{ideal}}(x, y) = \exp \left\{ -4 \left[\frac{h(x; h_0; T) + \Delta z}{l_c} \right]^2 \right\} \cdot \cos \{ 2k [h(x; h_0; T) + \Delta z] \}, \quad (7)$$

式中: l_c 为光源的相干长度; $\Delta z = n\delta_z$, 其中 δ_z 为垂直扫

描系统的步进量, n 为垂直扫描帧数。通过式(7)可以求出扫描过程中每一个采样点的光强信息。白光显微干涉中需要考虑衍射效应的影响, 显微成像系统中的衍射可以认为是圆孔衍射, 圆孔衍射的存在影响着成像系统的分辨率。为了描述显微干涉系统的成像特性, 本文使用点扩展函数(PSF)表示物点到像点的映射关系。圆孔衍射下非相干成像系统的二维 PSF 为

$$f_{\text{psf}}(r) = \left[\frac{J_1(krNA)}{krNA} \right]^2, \quad (8)$$

式中: $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$; J_1 为第一类贝塞尔函数。将理想的扫描干涉图 $I_{\text{ideal}}(x, y)$ 与系统 PSF 卷积, 仿真白光

显微干涉系统中 CCD 实际接收的干涉图 $I_{\text{CCD}}(x, y)$ 为

$$I_{\text{CCD}}(x, y) = I_{\text{ideal}}(x, y) * f_{\text{psf}}(x, y). \quad (9)$$

利用卷积定义可将式(9)变换为

$$I_{\text{CCD}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [I_{\text{ideal}}(x, y)] \cdot \mathcal{F} [f_{\text{psf}}(\xi, \eta)] \right\}, \quad (10)$$

式中, $f_{\text{psf}}(\xi, \eta) = \mathcal{F} [f_{\text{psf}}(x, y)]$, 其中 ξ 和 η 分别为 x 、 y 方向上的空间频率。由于矩形光栅样品仅在 x 方向上存在频率分布, 式(10)可以表示为

$$I_{\text{CCD}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [I_{\text{ideal}}(x, y = 0)] \cdot \mathcal{F} [f_{\text{psf}}(\xi, \eta = 0)] \right\}. \quad (11)$$

结合式(11)和式(8)即可完成线性系统传递函数模型的构建。基于该模型, 本文对蝙蝠翼效应下相干信号的特征进行了仿真与分析, 系统参数如表 1 所示。

表 1 白光显微干涉系统参数

Table 1 Parameters of white light microscopic interference system

Central wavelength	Spectral bandwidth	Coherence length	Numerical aperture	Sampling point	Magnification	Scanning frame
600 nm	200 nm	1.8 μm	0.55	400 \times 400	50	96 frame

当沟槽深度 $h_0 = 0.25\lambda_0$ 及 λ_0 的奇数倍时, 引入的相位差 $\Delta\varphi = 2kh_0 = \pi$, 此时蝙蝠翼效应最为明显^[13]。因此, 本文设置矩形光栅仿真样品沟槽深度 $h_0 = 0.25\lambda_0$, 线宽 $W = 50$ pixel。通过线性系统传递函数模型, 模拟系统截止频率影响下的一系列实际扫描干涉图, 得到不同位置处采样点的相干信号分布。如图 2 所示, 图 2(a) 为矩形光栅上下表面中部未受到蝙蝠翼效应影响的区域, 相干信号幅值较大且呈对称分布。而图 2(b) 为矩形光栅上下表面阶跃边缘区域, 受蝙蝠

翼效应的影响, 其相干信号分布形式发生变化。从蝙蝠翼效应产生的机理分析^[14], 由于衍射极限的存在, 阶跃边缘位置处同时叠加了上下表面的反射和衍射光场, 从而导致蝙蝠翼效应发生于阶跃结构的边缘位置。蝙蝠翼效应引起上下表面采样点相干峰间距增大, 分别计算上下表面阶跃边缘处采样点的相干峰位置, 发现最大相干峰间距 $\Delta = 1.3\lambda_0$, 远大于台阶中部未受到蝙蝠翼效应影响的采样点的相干峰间距 $\Delta = 0.5\lambda_0$, 这表明蝙蝠翼效应引起了相干峰的偏移, 进而影响了形貌复原结果。

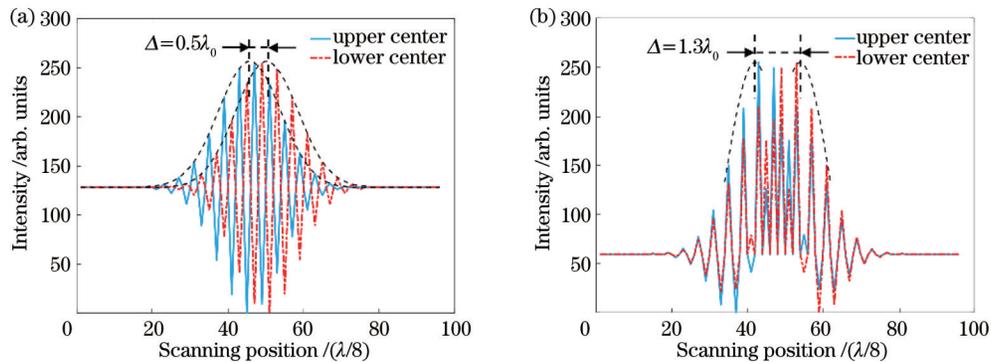


图 2 不同位置处采样点的相干信号特征。(a) 沟槽中部; (b) 阶跃边缘

Fig. 2 Coherence signal characteristics of sampling points at different locations. (a) Middle position; (b) step edge

蝙蝠翼效应引起相干峰偏移, 造成阶跃边缘位置处上下采样点的相干峰位置之间的间距增大, 这使得可以利用相干峰位置分布差异的特性分辨上下表面。因此, 本文进行了进一步仿真分析, 研究蝙蝠翼对不同沟槽深度、不同线宽矩形光栅相干峰位置的影响, 计算上下表面不同位置处采样点的相干峰位置, 结果如图 3 所示。

图 3(a) 为线宽一定时, 不同沟槽深度的矩形光栅的相干峰分布情况。该结果表明, 当沟槽深度 h_0 接近 $0.25\lambda_0$ 时, 阶跃边缘采样点和台阶中部采样点相干峰之间的间距, 呈现先增大后减小的趋势。随着蝙蝠翼效应的衰落, 不同位置处采样点相干峰接近重合, 此时已不会对阶跃结构线宽 W 的判断造成影响。由图 3(b) 所示, 当样品沟槽深度一定时, 在不同线宽的

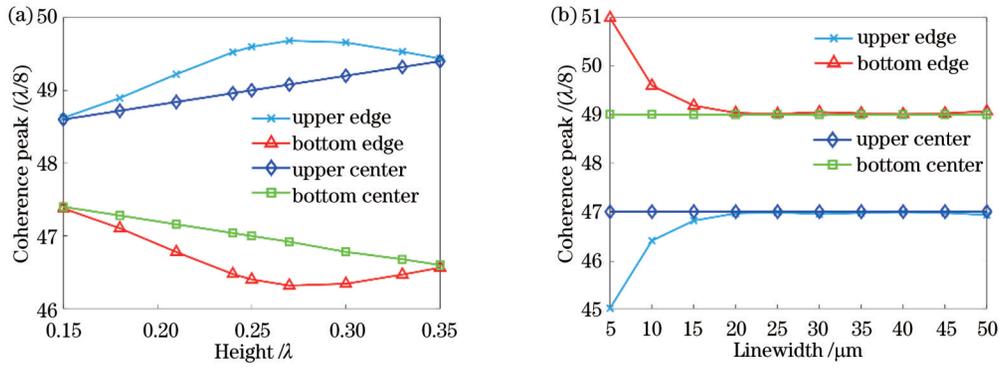


图 3 不同矩形光栅的相干峰位置分布。(a)不同沟槽深度;(b)不同线宽

Fig. 3 Coherence peak position distribution of different rectangular gratings. (a) Different groove depths; (b) different linewidths

矩形光栅上下表面未受到蝙蝠翼效应影响的中部区域,相干峰位置随矩形光栅线宽的变化保持不变。然而,上下表面阶跃边缘位置处采样点的相干峰发生了偏移,随着线宽的增大,偏移量变小,但仍满足上表面的相干峰位置在前,下表面的相干峰位置在后的基本情况。因此,以上分析证明了通过相干峰位置分布差异的特性可以区分上下表面,依据该差异可得到视场中的阶跃边缘位置,从而提取矩形光栅线宽 W 。

2.3 矩形光栅特征参数计算方法

根据 2.2 节中仿真得到的矩形光栅阶跃边缘位置

的相干峰分布差异特性,本文提出了一种基于阶跃边缘定位的特征参数计算方法,算法流程图如图 4 所示。测量开始后,白光显微干涉系统进行垂直扫描,在使用形貌复原算法对相干信号进行解调的同时,采用重心法提取视场中所有采样点的相干包络的峰值位置。然后,根据峰值位置的差异采用二值化区分矩形光栅上下表面,从而得到含有矩形光栅阶跃位置信息的掩膜矩阵和线宽数值。将计算得到的掩膜矩阵与形貌复原算法得到的样品三维形貌结合,沿用“ $W/3$ ”法则计算得出沟槽深度。

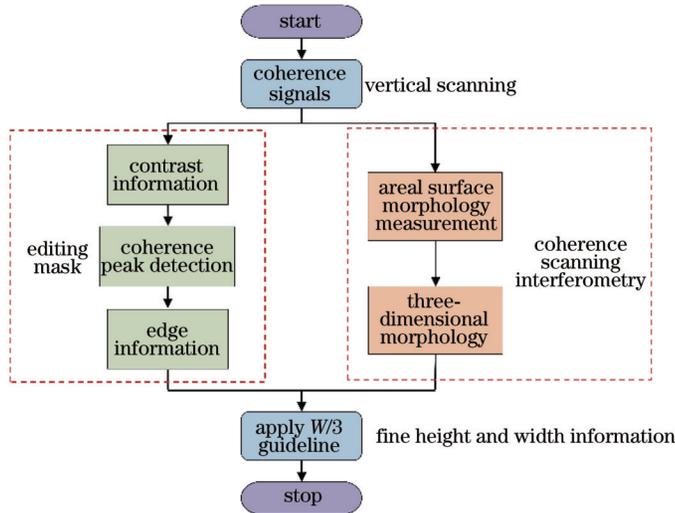


图 4 提出的算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

在 2.2 节给出的线性系统传递函数模型的基础上,引入了 x 、 y 方向上的倾斜量,以模拟实际测量环境下干涉条纹的数量和方向。如图 5(a) 所示,调整矩形光栅模型 x 、 y 方向上的倾斜量至干涉图中出现清晰的干涉条纹。此时对视场中所有采样点做全局重心法计算,将重心法结果作为当前采样点的高度信息,重心法表达式为

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n iM_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (12)$$

式中: M_i 表示扫描过程中第 i 步对比度幅值的大小; n

为扫描的总步数。白光显微干涉系统垂直扫描过程中,由于每步移相量相等,可以使用 Stoilov 五帧法^[15] 计算 M_i 。该方法通过连续 5 幅干涉图计算当前扫描位置相干信号的对比度,因此在扫描采图完成的同时获得了每个采样点的相干信号包络。使用相干信号包络中的峰值信息来表征采样点的高度,如图 5(b) 所示,在矩形光栅结构上下表面的相干峰信息中,出现了明显的差异。进一步对相干峰信息进行处理,提取视场中所有采样点相干峰所在的扫描步数,根据上下表面峰值所在扫描步数的不同完成阶跃边缘定位,最后通

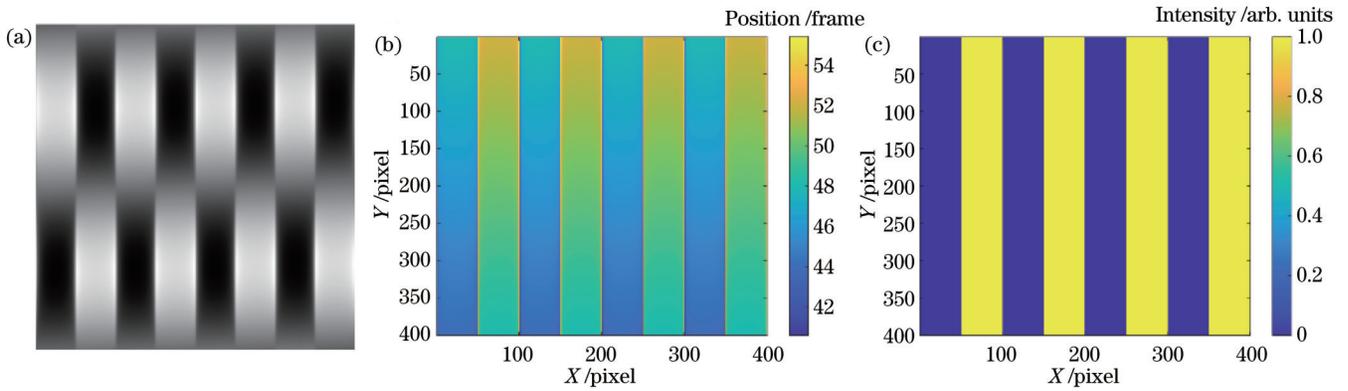


图 5 矩形光栅边缘定位。(a)仿真干涉图;(b)相干峰信息;(c)二值化结果

Fig. 5 Edge positioning of rectangular grating. (a) Simulation interferogram; (b) coherence peak information; (c) binarization result

过逐行判断完成对矩形光栅上下表面的二值化,得到的结果如图 5(c)所示。

如图 5(c)所示,本文方法将矩形光栅结构上下表面二值化区分,从而得到了带有矩形光栅全局阶跃边缘位置坐标的掩膜矩阵。参照 ISO 25178-70 中对周期性阶跃结构线宽计算的规定^[5],矩形光栅线宽测量结果的表达式为

$$W = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (a_{j,i} - b_{j,i})}{m \cdot n}, \quad (13)$$

式中: $a_{j,i}$ 、 $b_{j,i}$ 分别为视场中矩形光栅 y 方向上第 j 条采样线内、第 i 个周期左右阶跃边缘的坐标位置;m 为视场中矩形光栅周期数;n 为 y 方向上的采样点总数。

3 分析与讨论

3.1 实验过程及结果

第 2 节给出了本文提出的矩形光栅特征参数计算方法的基本原理,为了验证所提方法的可行性,本文采用作者研究团队自主研发的白光干涉显微系统^[16]进行了实验。光路原理图如图 6(a)所示,该系统主要由科勒照明系统、成像光路、移相装置以及上位机组成。光源采用白光 LED,中心波长为 582 nm。移相装置使用高精度压电陶瓷 (PZT) 微位移平台,位移分辨率达到

1 nm, z 轴线性误差为 0.03% (PI, P-528, TCD)。系统装配了不同放大倍率的 Mirau 型显微干涉物镜,其中,20×物镜数值孔径为 0.4,有效视场范围为 0.35 mm×0.35 mm,50×物镜数值孔径为 0.55,有效视场范围为 0.14 mm×0.14 mm,针对不同的测量需求可通过转换台更换物镜。整个测量系统的实物图如图 6(b)所示。

2.2 节中提到了当阶跃结构沟槽深度 $h_0 = 0.25\lambda_0$ 及 λ_0 的奇数倍时,蝙蝠翼效应最为明显。因此,本文选用了两种沟槽深度接近 0.25 λ_0 的矩形光栅作为检测样品。其中,检测样品 A 为德国 PTB 机构的 RS-N 分辨率板。选择如图 7(a)所示的区域进行检测,该区域的矩形光栅沟槽深度的标称值为 189.6 nm±1.0 nm,与系统中心波长之比为 0.32,线宽的标称值为 6 μm。检测样品 B 为 Bruker 公司的标准台阶板,如图 7(b)所示,该区域的矩形光栅沟槽深度的标称值为 90.5 nm±2.8 nm,与系统中心波长之比为 0.16,线宽的标称值为 50 μm。在进行矩形光栅测量之前,如图 7(c)、7(d)所示,需要严格按照国际标准中对于低相干扫描干涉法测量三维形貌的规定,调整干涉条纹至 1 根以上,并使条纹方向尽可能垂直于沟槽方向^[17]。图 7(e)、7(f)分别为采用本文方法获得的上下表面二值化掩膜矩阵,可以看到,掩膜矩阵能够很好地区分矩

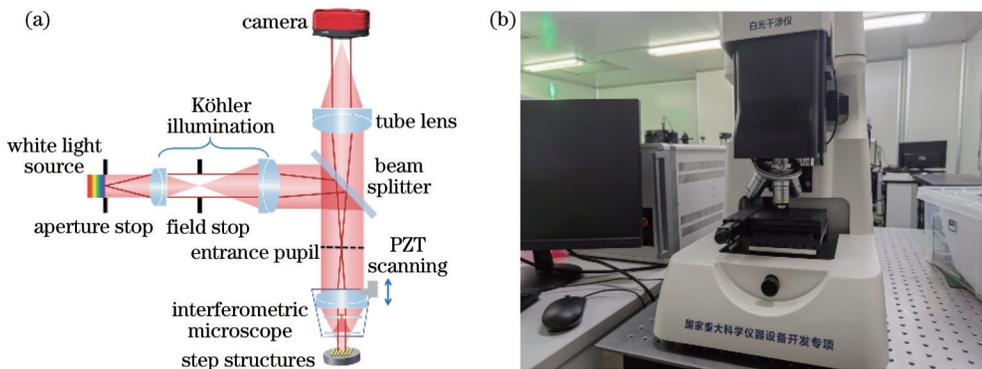


图 6 实验系统。(a)光路原理图;(b)白光显微干涉系统实物图

Fig. 6 Experimental system. (a) Optical path diagram; (b) photo of white light microscopic interference system

形光栅上下表面。图 7(g)、7(h)为采用形貌复原算法得到的样品三维形貌,受蝙蝠翼效应的影响,样品阶跃

边缘出现了大量异常数据。

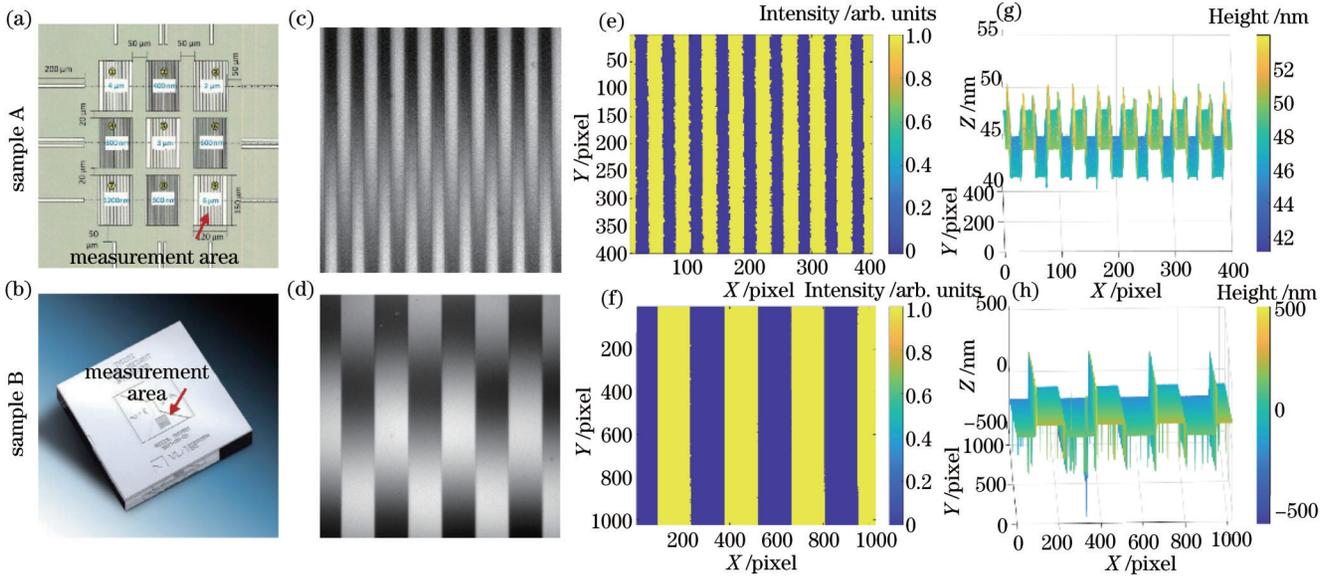


图 7 矩形光栅样品检测过程。(a)、(b)样品测量区域;(c)、(d)干涉图;(e)、(f)掩膜矩阵;(g)、(h)三维形貌复原结果
Fig. 7 Measurement process of rectangular grating sample. (a), (b) Sample measurement area; (c), (d) interferogram; (e), (f) mask matrix; (g), (h) three-dimensional morphology restoration results

使用本文方法对视场中矩形光栅样品同一区域重复测量 10 次,计算矩形光栅沟槽深度以及线宽的均

值、标准差和均值相对标称值的相对误差,样品 A、B 的检测结果如图 8 所示。

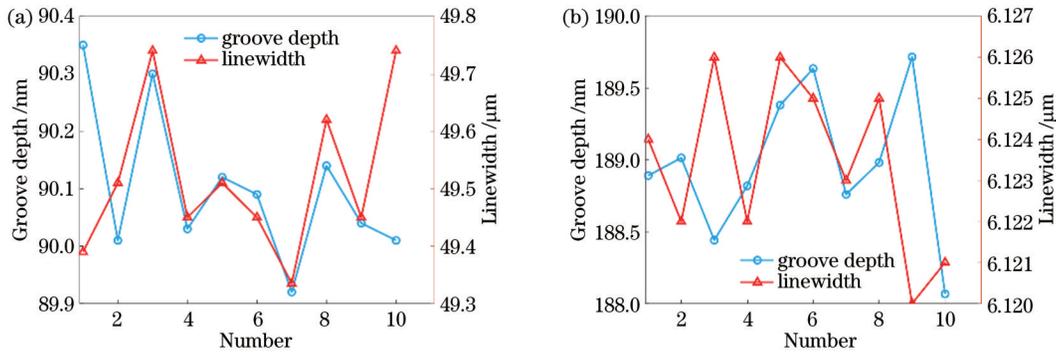


图 8 测量重复性数据。(a)样品 A;(b)样品 B
Fig. 8 Measurement repeatability data. (a) Sample A; (b) sample B

图 8(a)为样品 A 的测量结果,沟槽深度平均值为 188.97 nm,与标称值的相对误差为 0.33%,标准差为 0.13 nm;线宽平均值为 6.12 μm,与标称值的相对误差为 2%,标准差为 0.28 μm。图 8(b)为样品 B 的测量结果,沟槽深度平均值为 90.10 nm,与标称值的相对误差为 0.40%,标准差为 0.51 nm;线宽平均值为 49.52 μm,与标称值的相对误差为 0.96%,标准差为 0.01 μm。由以上测量结果可以看出,本文方法在蝙蝠翼效应的影响下仍具有较高精度,同时从 10 次重复测量结果的标准差可以看出,本文方法具有良好的重复性。随着测量样品线宽的减少,受系统分辨率的限制,本文方法测量得到的线宽相对误差会增大,但对最后矩形光栅上下表面拟合区域的选择,以及后续的沟

槽深度计算结果影响较小。

3.2 鲁棒性分析

白光显微干涉术广泛应用于微纳结构表面形貌的高精度测量和特征参数的检测,从计量特性的研究出发,需要分析测量过程中的误差项对测量结果的影响,以验证本文方法对矩形光栅样品检测的可靠性与鲁棒性。因此,本节以 3.1 节中沟槽深度为 90.5 nm±2.8 nm、线宽为 50 μm 的矩形光栅作为样品,讨论了测量过程中样品摆放角度、干涉条纹方向和数量对实验结果的影响。

实际测量过程中,通过人眼观察调整样品,可以控制阶跃边缘所在方向接近 CCD 靶面 y 方向,但人眼判读垂直度存在误差。如图 9(a)所示,通过计算干涉图

中首尾行 l_1 和 l_2 的差值,可以得到样品摆放偏差对应的像素数,通过式(14)可以转换成对应的倾斜角 θ_1 :

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{l_2 - l_1}{N}\right) \quad (14)$$

从而可以得到样品实际线宽值 $W = d \times \cos \theta_1$,其中, d 为本文方法测得的线宽值。一般地,人眼判断垂直

度误差在 1° 左右,本文通过手动调整不同倾斜角度进行重复实验,计算在不同倾斜角度下样品沟槽深度与线宽的测量结果与标称值之间的相对误差。结果如图 9(b) 所示,沟槽深度的波动范围在 0.8% 以内,而线宽的波动幅度很小,结果表明样品摆放角度对本文所提方法的影响较小。

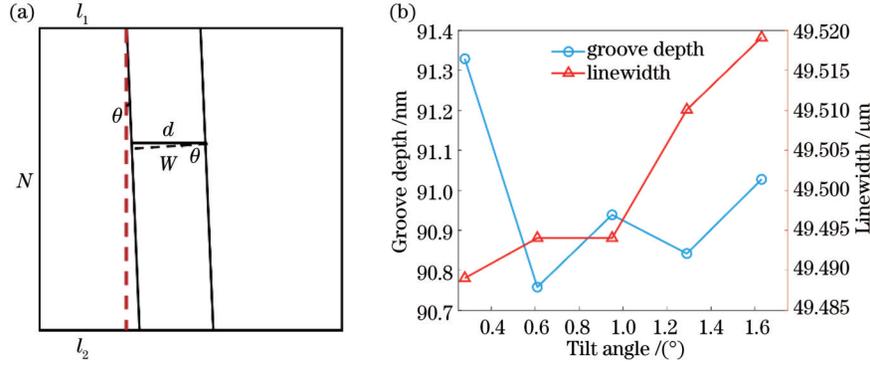


图 9 样品摆放角度的影响。(a)倾斜角示意图;(b)实验结果

Fig. 9 Effect of sample placement angle. (a) Tilt illustration diagram; (b) experimental data

ISO 25178-604 中规定了使用白光干涉仪测量阶跃结构时视场中的干涉条纹应大于一根且垂直于阶跃边缘所在直线。同样地,人眼判断干涉条纹水平度也会存在误差,水平度判读误差也在 1° 左右。通过选择成像最清晰时的干涉图像,手动标定黑白条纹交界处像素点坐标,计算得到倾斜偏差对应的像素数,与对应倾斜角 θ_2 的转换关系与式(14)类似。本文通过重复

实验分别分析了不同数量的干涉条纹以及不同条纹方向对实验结果的影响。结果如图 10 所示,沟槽深度和线宽结果相对标称值的相对误差的波动范围均在 0.4% 以内,且满足线宽相对误差大于沟槽深度的相对误差,与 3.1 节中的实验结果相符合。因此,以上结果说明了实验过程中误差项对本文方法的实验结果的影响较小,证明了本文方法具有良好的鲁棒性。

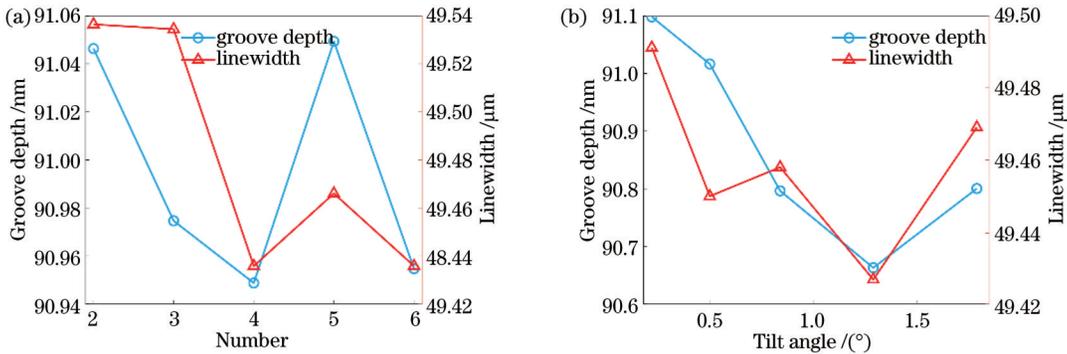


图 10 干涉条纹的影响。(a)条纹数量;(b)条纹方向

Fig. 10 Effect of interference fringe. (a) Fringe number; (b) fringe direction

4 结 论

针对采用 ISO 25178 系列测量矩形光栅时,蝙蝠翼效应导致阶跃边缘位置定位困难,使得该标准无法指导计算矩形光栅特征参数这一问题,本文从白光显微干涉下矩形光栅相干信号特征分析出发,构建了线性系统传递函数模型以仿真蝙蝠翼效应下的干涉图,提取了干涉图中所有采样点上的相干信号进行相干峰定位。仿真结果显示,蝙蝠翼效应虽然导致阶跃边缘位置处采样点相干峰偏移从而影响三维形貌复原,但

并不影响通过相干峰来判断实现上下表面区分。因此本文通过在垂直扫描过程中实时提取相干信号中的对比度信息,计算峰值位置进行二值化处理得到含有阶跃边缘信息的掩膜矩阵,从而实现矩形光栅特征参数的准确计算。区别于先对蝙蝠翼效应下的三维形貌进行校正,再提取阶跃边缘位置计算特征参数的传统方法,本文提出的方法可以在垂直扫描过程中同步获得样品三维形貌数据和区分上下表面的掩膜数据,具有高效、快速的优势。以两种不同特征参数的矩形光栅作为检测对象进行了验证实验,同时,对本文方法进行

了误差项分析,实验结果很好地证明了提出方法的重复性和鲁棒性。本文方法完善了国际标准中“W/3”法则在矩形光栅样品测量上的实施过程,实现了蝙蝠翼效应下矩形光栅特征参数的精确测量。随着半导体、传感器及微纳光学领域中矩形光栅结构朝着更短波长、更大深度方向发展,本文提出的特征参数计算方法可以在白光显微干涉无损检测的基础上以效率高、精度高、重复性好等优势展现出更广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Su R. Coherence scanning interferometry[M]//Leach R K. Advances in optical surface texture metrology. Glassfields: IOP Publishing, 2020.
- [2] de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 1-65.
- [3] Schmit J, Creath K, Wyant J C. Surface profilers, multiple wavelength, and white light interferometry[M]//Malacara D. Optical shop testing. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 667-755.
- [4] Harasaki A, Wyant J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry[J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2101-2106.
- [5] Geometrical product specifications - surface texture: areal-part 70: material measures: ISO 25178-70: 2014[S]. Geneva: ISO, 2014.
- [6] Geometrical product specifications - surface texture: areal-part 700: calibration, adjustment and verification of areal topography measuring instruments: ISO 25178-700: 2021[S]. Geneva: ISO, 2021.
- [7] Xie W C, Lehmann P, Niehues J, et al. Signal modeling in low coherence interference microscopy on example of rectangular grating[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14283-14300.
- [8] 李萍. 基于白光干涉法的表面形貌评价和误差补偿[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Li P. Surface topography evaluation and error compensation based on white light interferometry[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [9] de Groot P, Colonna de Lega X, Kramer J, et al. Determination of fringe order in white-light interference microscopy[J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4571-4578.
- [10] Sang M, Du X Y, Wang S, et al. Gap-matching algorithm with the impCEEMDAN in scanning white-light interference microscopy[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15101-15111.
- [11] Geometrical product specifications-Surface texture: profile method; measurement standards-part1: material measures: ISO 5436-1:2000[S]. Geneva: ISO, 2000.
- [12] Lehmann P, Xie W C, Niehues J. Transfer characteristics of rectangular phase gratings in interference microscopy[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 758-760.
- [13] Xie W C. Transfer characteristics of white light interferometers and confocal microscopes[D]. Kassel: University of Kassel, 2017.
- [14] Xie W C, Lehmann P, Niehues J. Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers[J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1795-1803.
- [15] de Groot P. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window[J]. Applied Optics, 1995, 34(22): 4723-4730.
- [16] 高志山, 袁群, 孙一峰, 等. 微结构显微光学无损检测方法(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(8): 0851501.
Gao Z S, Yuan Q, Sun Y F, et al. Micro-optical nondestructive testing method for microstructure (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8): 0851501.
- [17] Geometrical product specifications - surface texture: areal-part 604: nominal characteristics of noncontact(coherence scanning interferometry) instruments: ISO 25178-604: 2013[S]. Geneva: ISO, 2013.

Calculation Method for Characteristic Parameters of Rectangular Gratings Under Batwing Effect

Fan Xiaoxin¹, Zhang Jiale¹, Gao Zhishan¹, Ma Jianqiu¹, Li Heran¹, Chen Lu², Lei Lihua³,
Fu Yunxia³, Xu Zhiyi¹, Zhu Dan¹, Guo Zhenyan¹, Yuan Qun^{1*}

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

²Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

³Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China

Abstract

Objective White light interferometry, as an effective non-destructive method, is widely employed for measuring characteristic parameters of microstructures. Among these microstructures, the rectangular grating is a typical periodic step structure and has extensive utilization in precision machining due to its diverse materialization properties based on surface morphology characteristic parameters. However, when the groove depth of the grating is smaller than the coherence length of the adopted light source, the batwing effect occurs near or at the edge of the step in the sample under measurement. ISO series 25178 provides a standard morphology for calculating the characteristic parameters of groove depth and linewidth through three-dimensional surface morphology analysis, which necessitates determining the position of the step edge. The batwing effect poses challenges to precisely locating the step edge position and may result in a false

representation of information near the edge of the step discontinuity. We propose a new algorithm for determining the characteristic parameters of rectangular gratings by utilizing the distribution difference of the coherence signals between the upper and lower surfaces, thus avoiding the traditional method of extracting step edge position from three-dimensional surface morphology. The introduced algorithm demonstrates excellent measurement accuracy, high repeatability, and exceptional robustness in calculating the desired characteristic parameters of rectangular gratings.

Methods We propose an algorithm for precise positioning of the step edge in rectangular gratings based on the distribution difference of the coherence peak among different sampling points. The algorithm is designed to improve the detection efficiency of characteristic parameters by incorporating parallel processing techniques. Firstly, during vertical scanning, the coherence signals undergo modulation. Simultaneously, the contrast information is obtained by the gravity method to extract the center of gravity position of the modulation envelope across all sampling points within the field of view. Then, the peak of the contrast envelope is calculated to further accentuate the discrepancy between the upper and lower surfaces of the rectangular grating. By identifying these surfaces, we acquire the step position information, which allows to generate the mask matrix and determine the linewidth values. To obtain the groove depth, we combine the mask matrix and three-dimensional surface morphology of the rectangular grating. Meanwhile, we extend the application of the "W/3" guideline specifically for the rectangular grating structure to mitigate the influence of the batwing effect on depth measurements. Additionally, we incorporate the Stoilov algorithm to calculate the contrast information during the vertical scanning, enabling simultaneous determination of the step edge position and three-dimensional surface morphology. This parallel processing approach enhances the efficiency and accuracy of the algorithm. Generally, our algorithm provides an effective means for precisely positioning the step edge in rectangular gratings, while considering the influence of the batwing effect on depth measurements.

Results and Discussions Experiments are conducted via a self-developed white light interferometry system to evaluate the feasibility and accuracy of the proposed method. Two rectangular gratings with different characteristic parameters are selected as measurement samples. The first sample calibrated by Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) has a groove depth of $189.6 \text{ nm} \pm 1.0 \text{ nm}$ and a linewidth of $6 \text{ }\mu\text{m}$. The second sample certified by VLSI standards traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST) has a groove depth of $90.5 \text{ nm} \pm 2.8 \text{ nm}$ and a linewidth of $50 \text{ }\mu\text{m}$. Ten repeatability measurements are performed in the same area of each sample based on the proposed algorithm. For the first sample, the average depth value is determined to be 188.97 nm with a relative error of 0.33% [Fig. 8(a)]. The average linewidth value is measured to be $6.12 \text{ }\mu\text{m}$ with a relative error of 2% [Fig. 8(b)]. Similarly, for the second sample, the average depth value is 90.10 nm with a relative error of 0.40% [Fig. 8(c)]. The average linewidth value is determined to be $99.04 \text{ }\mu\text{m}$ with a relative error of 0.96% [Fig. 8(d)]. These measurement results demonstrate the accuracy and effectiveness of the algorithm. Furthermore, the standard deviation of the ten repeatability measurement results is analyzed to assess the algorithm stability. The small standard deviation confirms the consistent and reliable performance of the proposed method. Additionally, the influence of error terms during the experiment on the measurement results is investigated. Specifically, variations in sample placement tilt angle, interference fringe numbers, and interference fringe direction are examined. The results indicate that these error terms exert minimal effect on the measurements, highlighting the robustness of the proposed algorithm. In general, the experimental results validate the feasibility and accuracy of the algorithm in accurately determining the groove depth and linewidth of rectangular gratings. The algorithm exhibits stability and robustness and becomes a reliable tool for precise metrology in surface morphology measurements.

Conclusions We present a new approach for accurately measuring the characteristic parameters of rectangular gratings under the batwing effect. Unlike conventional calibration methods, our method focuses on the distribution difference of coherence signals between the upper and lower surfaces of the grating. This approach addresses the limitations of ISO series 25178 in accurately measuring the characteristic parameters in the presence of the batwing effect. To validate this method, we conduct simulations of interferograms during the vertical scanning based on linear system theory. By analyzing the modulation envelope of these interferograms, we can precisely detect the step edge position and distinguish the upper and lower surfaces of the grating sample. Finally, by applying ISO standards, we accurately measure the characteristic parameters of the rectangular grating. Experimental results using two rectangular gratings with different groove depths and linewidths demonstrate the repeatability and robustness of our method. The implementation of the "W/3" guideline in measuring rectangular gratings is significantly improved to accurately measure the characteristic parameters. Importantly, our method features high efficiency, high precision, and fine repeatability without requiring any physical upgrades to the instrument. Considering the ongoing trend towards miniaturization of rectangular gratings, our method has broader applications.

Key words microscopic interferometry; rectangular grating; batwing effect; characteristic parameter; binarization