

# 光学学报

## 基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量

周俊涛, 高志山, 孙一峰, 马剑秋, 谢鹏飞, 张佳乐, 郭珍艳, 袁群\*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 传统的低相干垂直扫描方法在测量高度达数十或数百微米的台阶或沟槽类微结构的表面三维形貌时, 测量效率低下。为此, 提出一种基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量方法, 该方法包含两次垂直扫描过程。建立描述单幅干涉图条纹对比度的评价函数, 利用粗扫描来定位被测件上下表面的大致位置, 并联系上下两幅粗扫描图像计算出覆盖被测件上下表面相干区域的精扫描采图区域。精扫描在其他区域直接跳过但记录位移量, 结合  $\pi/2$  扫描移相的精扫描干涉图复原被测件的表面三维形貌。粗扫描的扫描步长由低相干光谱分布计算得到, 精扫描步长为中心波长的  $1/8$ 。以高度为  $7.805\ \mu\text{m}$  的台阶板和深度为  $200.99\ \mu\text{m}$  的沟槽进行实验, 结果表明, 所提方法相比传统垂直扫描方法的采图时间分别缩短了 48.2% 和 55.2%。

**关键词** 测量; 表面三维形貌; 快速垂直扫描测量; 光谱分布特性

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512003

### Fast Vertical Scanning Topography Measurement Based on Spectral Distribution Characteristics

Zhou Juntao, Gao Zhishan, Sun Yifeng, Ma Jianqiu, Xie Pengfei, Zhang Jiale, Guo Zhenyan, Yuan Qun\*

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*

**Abstract** The traditional low-coherence vertical scanning method has low measurement efficiency when measuring the three-dimensional surface topography of steps or groove-like microstructures with a height of tens or hundreds of microns. For this reason, a fast vertical scanning topography measurement method based on spectral distribution characteristics is proposed, and this method includes twice vertical scanning processes. An evaluation function to describe the fringe contrast of a single interferogram is established, the approximate position of the upper and lower surfaces of the test object is located by coarse scanning, and the upper and lower coarse scanning images are connected to calculate the image acquisition areas of the fine scanning that cover the coherent areas on the upper and lower surfaces of the test object. The fine scanning is not performed in other areas, but its displacement is recorded. With the fine scanning interferogram of  $\pi/2$  scanning phase shift, the three-dimensional surface topography of the test object is restored. The scanning step length of the coarse scanning is calculated based on the low-coherence spectral distribution, and the step length of the fine scanning is one-eighth of the center wavelength. Experiments on the step with a height of  $7.805\ \mu\text{m}$  and the groove with a depth of  $200.99\ \mu\text{m}$  show that the proposed method reduces the acquisition time by 48.2% and 55.2% respectively, compared with the traditional vertical scanning method.

**Key words** measurement; three-dimensional surface topography; fast vertical scanning measurement; spectral distribution characteristics

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-10; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005500)、国家自然科学基金(62175107)、江苏省六大人才高峰项目(RJFW-019)、中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(KLOMT190201)、上海在线检测与控制技术重点实验室基金(ZX2021102)

通信作者: \*yuanqun@njjust.edu.cn

## 1 引言

传统低相干垂直扫描方法在测量微结构表面三维形貌时,通常以 $\lambda_0/8$ ( $\lambda_0$ 为低相干光的中心波长)的扫描步长(对应的移相间隔为 $\pi/2$ )等间距垂直扫描<sup>[1]</sup>。对于高度达数十或数百微米的台阶或沟槽类样品,需要采集数百或数千幅干涉图,才能复原其表面三维形貌。然而,对复原算法有效的图像只有扫描至被测件上下表面附近,且与参考面的光程差为相干长度以内的存在干涉条纹的干涉图。中间冗余的大量扫描干涉图不仅增加了垂直扫描的采图时间,还增加了复原算法处理的数据量,极大降低了形貌测量的效率。

为了减少采集的干涉图数量,常规的方法是增大扫描步长,例如采用 $\lambda_0/4$ 、 $3\lambda_0/8$ 等扫描步长等间距垂直扫描,但这种方法将导致复原算法的形貌复原精度降低。一种解决上述问题的合理思路是只在被测件上下表面与参考面的光程差为相干长度以内的区域中采用 $\lambda_0/8$ 的扫描步长等间距垂直扫描,在非相干区域直接跳过扫描,避免采集冗余的干涉图。

查找被测件上下表面相干区域的第一步是定位被测件的上下表面位置。手动定位对焦操作复杂、存在人为误差<sup>[2]</sup>,为解决上述问题和实现自动化,自动对焦技术得到了关注,并被广泛地应用在照相机、摄像机和显微镜等成像系统中<sup>[3-5]</sup>。利用激光头<sup>[6-7]</sup>、精密螺旋光栅<sup>[8]</sup>、光电倍增管<sup>[9]</sup>和光电传感器<sup>[10-11]</sup>等装置定位被测件上下表面的方法属于主动式自动对焦,需要加装额外器件,增加了成本。在不增加成本的基础上,可以使用被动式自动对焦<sup>[12-13]</sup>,即充分利用显微干涉自身的成像能力通过评价函数定位被测件的上下表面位置。评价函数通过量化空域或频域中与图像清晰度密切相关的特性来反映一幅图像的清楚程度,并判定评价函数值最大的那幅图像为对焦图像<sup>[14]</sup>。在完成被测件上下表面位置的定位后,通常采用 ViBe 算法<sup>[15]</sup>、帧差法<sup>[16]</sup>精确查找被测件上下表面的相干区域,最后对其采用 $\lambda_0/8$ 的扫描步长等间距垂直扫描。

上述方法以精确查找被测件上下表面的相干区域为目标,需要以较小的扫描步长进行采图分析,这将花费大量的时间,且无法保证查找的区域一定与相干区域重合,一旦出现查找的区域小于相干区域的情况,采集的有效干涉图数量不够,将会导致表面三维形貌复原误差的出现。反之,如果采图区域稍大于相干区域,虽然多采集了数幅冗余图像,但是可以保证形貌复原的精度。因此,没有必要花费大量的时间,用于精确查找被测件上下表面的相干区域,只需快速查找到分别覆盖被测件上下表面相干区域的稍大采图区域便可。定位被测件上下表面位置是为了方便查找上下表面的相干区域,若能在上下表面的大致位置推算出覆盖上下表面干涉区域的采图区域,则也不必定位到上下表面的精确位置。

基于上述思路,为提高低相干垂直扫描方法对高度达数十或数百微米的台阶或沟槽类样品的形貌测量

的效率,本文采集照射到探测器位置处的低相干光的光谱分布,计算出低相干光的相干长度,分析粗扫描步长与相干长度的关系,并合理建立评价函数。采用粗扫描步长等间距垂直扫描定位被测件上下表面的大致位置,根据其上下两幅图像的评价函数值,计算出覆盖被测件上下表面相干区域的采图区域,采用 $\lambda_0/8$ 的精扫描步长对这两个采图区域进行垂直扫描,以采集 $\pi/2$ 扫描移相干涉图,最后使用复原算法复原被测件的表面三维形貌。

## 2 基本原理

### 2.1 快速垂直扫描形貌测量的原理

快速垂直扫描形貌测量的原理图如图 1 所示,仅使用两次垂直扫描便可以完成对被测件表面三维形貌的测量。第一次为粗扫描,采用粗扫描步长进行等间距垂直扫描,以定位被测件上下表面的大致位置,并根据定位点上下两幅粗扫描图像的评价函数值推算出覆盖被测件上下表面相干区域的采图区域。第二次为精扫描,采用精扫描步长对推算出的采图区域进行等间距垂直扫描,采集干涉图像,根据记录的干涉图像和跳过的扫描区域长度,利用复原算法复原被测件的表面三维形貌。

在图 1 中, $\delta_0$ 为传统垂直扫描方法的扫描步长, $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 分别为快速垂直扫描方法的粗扫描步长和精扫描步长, $L$ 为被测件上下表面的相干区域长度,有效的采图区域为以上下表面为中心向上下方向各自延伸 $L/2$ 的扫描空间, $O_i$ 点、 $O_j$ 点分别为粗扫描定位的被测件上、下表面的大致位置, $A_{up}$ 与 $B_{up}$ 间的区域、 $A_{bo}$ 与 $B_{bo}$ 间的区域为推算出的被测件上、下表面的采图区域, $B_{up}$ 与 $A_{bo}$ 间的区域为精扫描跳过的区域,其长度为 $\Delta L$ 。

### 2.2 被测件上下表面的相干区域长度

依据双光束干涉理论,当两束光束相交时,若它们满足相干条件,则可以产生稳定的干涉条纹<sup>[17]</sup>,其中干涉条纹的光强值 $I(z)$ 可以表示为

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}[R(\tau)], \quad (1)$$

式中: $z$ 是轴向坐标位置; $I_1$ 和 $I_2$ 是参考光和测试光的光强值; $\operatorname{Re}[R(\tau)]$ 是光源自相干函数 $R(\tau)$ 的实部; $\tau$ 是两束干涉光之间相差的时间延迟,它的取值由分光板与参考板之间的距离 $h_0$ 决定,可以表示为

$$\tau = 2(z - h_0)/c, \quad (2)$$

式中: $c$ 为真空中的光速。

采用归一化的高斯函数 $B(\nu)$ 来表征照明光源的光谱分布,则有

$$B(\nu) = \frac{1}{2\Delta\nu\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_c}{2\Delta\nu}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中: $\nu$ 是频率; $\nu_c$ 是光源的中心频率; $\Delta\nu$ 是光源光谱的半峰全宽。 $\nu_c$ 和 $\Delta\nu$ 可以表示为

$$\nu_c = c/\lambda_c, \quad (4)$$

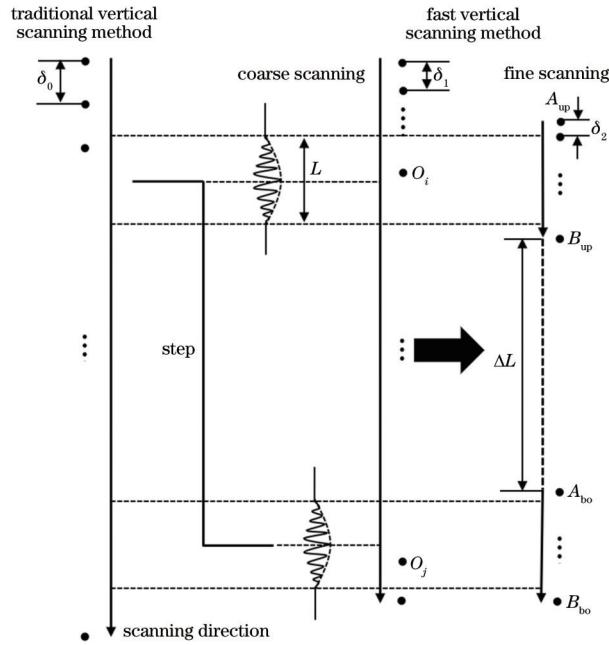


图 1 快速垂直扫描形貌测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fast vertical scanning topography measurement

$$\Delta\nu = \frac{1}{2} \left( \frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \right) = \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_1\lambda_2} \approx \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_c^2} = \frac{c}{2l_c} \quad (5)$$

式中： $\lambda_c$  为光源的中心波长； $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  为光源光谱宽度对应的波长边界； $l_c$  为光源的相干长度。

光源的自相关函数  $R(\tau)$  可以表示为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \exp(j2\pi\nu\tau) d\nu = \exp[-4\pi^2\tau^2(\Delta\nu)^2] \exp(-j2\pi\nu_c\tau) \quad (6)$$

将式(6)代入式(1), 可得

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \exp[-4\pi^2\tau^2(\Delta\nu)^2] \cos(2\pi\nu_c\tau) \quad (7)$$

将式(2)、式(4)和式(5)代入式(7)中可得

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \exp\left\{-\left[(z - h_0)\frac{2\pi}{l_c}\right]^2\right\} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_c}(z - h_0)\right] \quad (8)$$

为了简化表示, 令干涉信号的高斯包络为  $g(z - h_0) = \exp\left\{-\left[(z - h_0)\left(\frac{2\pi}{l_c}\right)\right]^2\right\}$ , 背景光强为  $I_b = I_1 + I_2$ , 条纹可见度为  $\gamma = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ 。

用  $h$  表示待测物体表面的高度信息, 考虑到实际操作中的扫描过程和由反射引入的附加相位  $\alpha$ , 则干涉信号的一般形式可以表示为

$$I(z) = I_b \left\{ 1 + g(z - h) \gamma \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z - h) + \alpha\right] \right\} \quad (9)$$

式中： $\lambda_0$  为探测器位置处低相干光的中心波长。

在式(9)的基础上, 进一步考虑显微干涉的情况。

当平面反射发生时, 入射光场分布  $u(x, y)$  的二维傅里叶变换可以表示为

$$U(k_{wx}, k_{wy}) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y) \exp[-j(k_{wx}x + k_{wy}y)] dx dy \quad (10)$$

式中： $k_{wx}$  和  $k_{wy}$  为波矢量  $k_w$  在  $x$  方向和  $y$  方向上的分量,  $|k_w| = 2\pi/\lambda_c$ 。

经过反射率为  $B_1$  的反射面反射之后, 入射光场分布  $u(x, y)$  在距焦点  $z$  距离处的二维傅里叶变换可以表示为

$$U_1(k_{wx}, k_{wy}) = B_1 U(-k_{wx}, -k_{wy}) \exp[-j(2k_{wz}z + \alpha)] \quad (11)$$

式中： $k_{wz}$  为波矢量  $k_w$  在  $z$  方向上的分量。

使用同样的方法, 可以求得参考光反射后的二维傅里叶变换为

$$U_z(k_{wx}, k_{wy}) = B_2 U(-k_{wx}, -k_{wy}) \exp(-j2k_{wz}h_0) \quad (12)$$

式中： $B_2$  为参考板的反射率。

一般来说光学系统具有旋转对称性, 为了简化分析, 本文之后的讨论将会在柱面坐标系中进行。在柱面坐标系中有  $k_{wz} = |k_w| \cos \sigma$ , 其中  $\sigma$  为光线与光轴之间的夹角。由于实际光学系统的数值孔径  $NA = \sin \sigma_0$  ( $\sigma_0$  为实际光学系统的半孔径角) 是有限的, 故不妨假设在数值孔径范围内照明是均匀的, 此时  $U(k_{wx}, k_{wy})$  可表示为

$$U(k_{wx}, k_{wy}) = \begin{cases} \text{constant}, & \sigma \leq \sigma_0 \\ 0, & \sigma > \sigma_0 \end{cases} \quad (13)$$



探测器的输出光强能够表示为

$$I(z) = \int 2\pi |U_1 + U_2|^2 k_w dk_w = 2\pi |k_w|^2 |U|^2 \int_0^{\sigma_0} \left\{ B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos[2k_w(z - h_0) \cos \sigma + \alpha] \right\} \sin \sigma \cos \sigma d\sigma, \quad (14)$$

式(14)中积分号内的第一项和第二项为干涉信号的背景光强,第三项为干涉信号的相关项,它表征了干涉信号的变化状况,而且携带了待测物体表面的高度信息。

当光源的光谱分布为  $F(\lambda)$  时,考虑实际的扫描过程和表面高度  $h$ ,则式(14)的相关项  $I_{U_1 U_2}$  可以改写为

$$I_{U_1 U_2}(z) = 4\pi B_1 B_2 |U|^2 \times \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \int_0^{\sigma_0} |k_w|^2 \left\{ \cos[2k(z - h) \cos \sigma + \alpha] \right\} \times \sin \sigma \cos \sigma F(\lambda) d\sigma d\lambda. \quad (15)$$

通过式(15)可以看出,  $I_{U_1 U_2}$  是一个正弦或余弦函数,其包络受到光源光谱形式的调制。因此,当光源的光谱一定时,处于同一高度的表面出现干涉条纹的区域是一个以零光程差位置为中心的对称区域,且区域长度为一固定值。对于台阶或沟槽类微结构样品,其上下表面较为光滑、高度起伏很小,可以将上下表面上的点近似为处于同一高度,此时上下表面的相干区域长度  $L$  为固定值,其表达式为

$$L = 2 \cdot \min(\Delta l, \Delta p), \quad (16)$$

式中:  $\min(\cdot)$  函数的功能是取两者中的小值;  $\Delta l$  为探测器位置处低相干光的相干长度;  $\Delta p$  为干涉显微物镜的景深。  $\Delta l$  和  $\Delta p$  的表达式为

$$\Delta l = \lambda_0^2 / \Delta \lambda, \quad (17)$$

$$\Delta p = \lambda_0 \frac{\sqrt{1 - (NA)^2}}{(NA)^2}, \quad (18)$$

式中:  $\Delta \lambda$  为探测器位置处低相干光的波长范围。  $\lambda_0$  的表达式为

$$\lambda_0 = \frac{\int E(\lambda) \lambda d\lambda}{\int E(\lambda) d\lambda}, \quad (19)$$

式中:  $E(\lambda)$  为光谱仪在探测器位置处采集的各个波长对应的光强。

### 2.3 扫描步长

由于干涉条纹的存在,故探测器在待测件上下表面相干区域采集的图像相比非相干区域有着更为明显的条纹对比度,且越靠近零光程差位置,条纹对比度越明显。因此,在粗扫描过程中可以引入自动对焦技术,使用评价函数来描述干涉图条纹对比度变化,以实现待测件上下表面位置的自动定位。

自动对焦中常用的评价函数有 4 类<sup>[18]</sup>,即基于空域的评价函数、基于频域的评价函数、基于信息熵的评价函数和基于统计学的评价函数。方差评价函数是基于空域的评价函数,其精度虽然处于中等水平,但是定位的速度很快,由于所提方法在粗扫描过程中,

只需要定位到被测件上下表面的大致位置,即定位点处于上下表面的相干区域中,故本文选用方差评价函数来描述干涉图条纹对比度的变化。

粗扫描步长过大会直接跳过被测件上下表面的相干区域,导致定位失败,步长过小则会增加定位时间。最理想的粗扫描步长是使粗扫描在被测件上下表面的相干区域中只采集一幅图像,但如图 2 所示,受限于粗扫描起点的变化,会出现采集的那幅图像恰好位于上下表面相干区域边缘附近的情况,此时该幅图像的评价函数值与非相干区域采集的图像的评价函数值相差不大,进而难以判定该幅图像在相干区域内。当粗扫描只在被测件上下表面的相干区域内采集两幅图像时,也会出现类似的情况。然而,当粗扫描在被测件上下表面的相干区域内采集三幅图像时,则总会有一幅图像位于被测件上下表面附近,此时该幅图像的评价函数值将是附近图像的评价函数值的峰值。粗扫描在被测件上下表面的相干区域内采集三幅以上图像的情况与采集三幅图像的情况类似。图 2 中,  $\delta_1^{(1)}$ 、 $\delta_1^{(2)}$ 、 $\delta_1^{(3)}$  为不同的粗扫描步长。

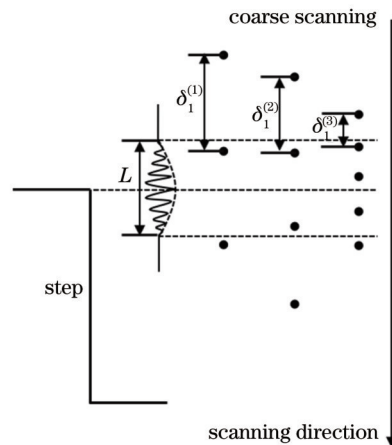


图 2 不同粗扫描步长示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different coarse scanning steps

如图 3 所示,当被测件上下表面的相干区域长度  $L$  与粗扫描步长  $\delta_1$  满足

$$n\delta_1 < L < (n + 1)\delta_1 \quad (20)$$

时,在粗扫描过程中,不论粗扫描起点在何处,总会在上下表面干涉区域内采集  $n$  或  $n + 1$  幅图像,  $n$  为正整数。

由式(20)可知,保证粗扫描过程中在被测件上下表面的相干区域内采集至少三幅图像的粗扫描步长  $\delta_1$  为

$$\delta_1 < L/3. \quad (21)$$

在垂直扫描过程中,干涉条纹会以  $2\pi$  为周期的相位进行移动,这会导致方差评价函数不再呈现单一峰值,进而影响定位结果。为使粗扫描过程中采集的图像间保持  $2\pi$  整数倍的相位变化,即干涉条纹总是处于相同的位置,则需让扫描步长满足

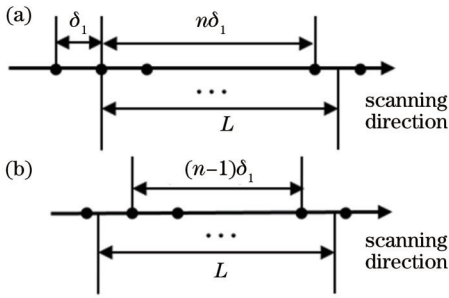


图 3 随着粗扫描起点变化的采图情况。(a)采集  $n+1$  幅图像的情况;(b)采集  $n$  幅图像的情况

Fig. 3 Image acquisition situation varying with starting point of coarse scanning; (a) Acquisition of  $n+1$  images; (b) acquisition of  $n$  images

$$\delta_1 = n \cdot \frac{\lambda_0}{2}. \quad (22)$$

结合式(21)和式(22),同时为了保证粗扫描过程的效率,粗扫描步长  $\delta_1$  的表达式为

$$\delta_1 = \text{floor}\left(\frac{L/3}{\lambda_0/2}\right) \cdot \frac{\lambda_0}{2}, \quad (23)$$

式中:  $\text{floor}(\cdot)$  函数的功能是向下取整。此外,为了保证复原算法的复原精度,精扫描步长  $\delta_2$  选为  $\lambda_0/8$ 。

#### 2.4 采图区域的确定

如图 4 所示,  $O_i$  点为粗扫描过程中定位的上表面大致位置,  $O_{i-1}$  点和  $O_{i+1}$  点为定位点的上一个点和下一个点,  $A_{up}$  点、 $B_{up}$  点分别为采图区域的上界和下界。通过比较  $O_{i-1}$  点与  $O_{i+1}$  点的评价函数值确定  $O_i$  点与上表面的关系:若两者相等,则  $O_i$  点恰好处于上表面处,此时  $O_{i-1}$  点与相干区域上界的距离等于  $O_{i+1}$  点与相干区域下界的距离,即  $L_1 = L_2 = (L - 2\delta_1)/2$ ,  $A_{up}$  与  $B_{up}$  间的区域与上表面相干区域重合;若  $O_{i-1}$  点的评价函数值小于  $O_{i+1}$  点的评价函数值,则  $O_i$  点在上表面上方,此时  $O_{i-1}$  点与相干区域上界的距离小于  $O_{i+1}$  点与相干区域下界的距离,当  $L_1 = (L - 2\delta_1)/2$ ,  $L_2 = L - 2\delta_1$  时,可以保证  $A_{up}$  与  $B_{up}$  间的区域覆盖上表面相干区;若  $O_{i-1}$  点的评价函数值大于  $O_{i+1}$  点的评价函数值,则  $O_i$  点在上表面下方,此时  $O_{i-1}$  点与相干区域上界的距离大于  $O_{i+1}$  点与相干区域下界的距离,当  $L_1 = L - 2\delta_1$ ,  $L_2 = (L - 2\delta_1)/2$  时,可以保证  $A_{up}$  与  $B_{up}$  间的区域覆盖上表面相干区。被测件下表面采图区域的查找,与上表面采图区域的查找方式类似。

确定被测件上下表面的采图区域( $A_{up}$  与  $B_{up}$  间的区域和  $A_{bo}$  与  $B_{bo}$  间的区域)后,利用计算机中记录的  $B_{up}$  点和  $A_{bo}$  点的位置,可以得到精扫描跳过的区域长度  $\Delta L$ 。

### 3 快速垂直扫描形貌测量方法

提出的基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌

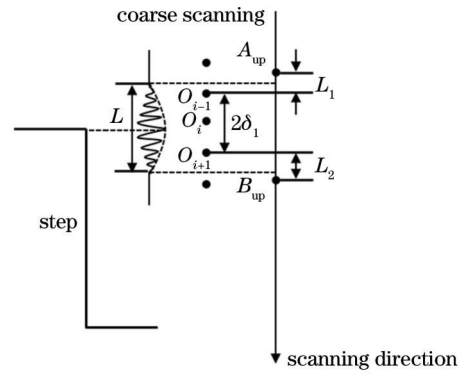


图 4 查找上表面采图区域的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of finding image acquisition area of upper surface

测量的流程图如图 5 所示。

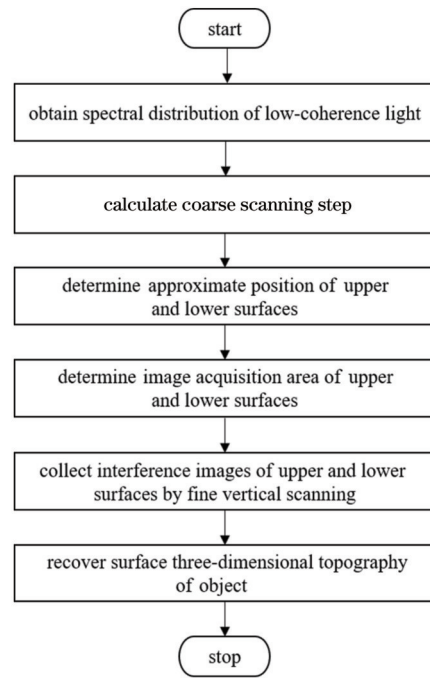


图 5 快速垂直扫描形貌测量流程图

Fig. 5 Flow chart of fast vertical scanning topography measurement

基于光谱分布特性的快速垂直扫描测量方法的具体步骤如下。

1) 将光谱仪放置在探测器位置处,测量低相干光的光谱分布。

2) 查找低相干光显微干涉仪使用的干涉显微物镜的数值孔径,计算出被测件上下表面的相干区域长度,并由此确定粗扫描的扫描步长。之后,若没有改变低相干光显微干涉仪的结构和使用的干涉显微物镜,则不需要进行步骤 1) 和步骤 2)。

3) 将被测件放置在载物台上,控制干涉显微物镜从其工作距离之外,按照粗扫描步长朝着被测件等间距垂直扫描。每扫描一次,控制探测器采集一幅图像并计算该幅图像的评价函数值,直到定位到被测件上

下表面的大致位置为止。

4) 比较被测件上下表面粗扫描定位点上下两幅图像的评价函数值, 确定上下表面的采图区域。

5) 对被测件上下表面的采图区域按照精扫描步长等间隔垂直扫描以采集干涉图像, 并记录精扫描过程跳过的区域长度。

6) 根据采集的干涉图像和精扫描过程跳过的区域长度, 使用形貌复原算法复原被测件的表面三维形貌。

本文采用高精度垂直扫描算法(HDVSI)<sup>[19]</sup>处理被测件上下表面采集的干涉图像和跳过的区域长度, 在保证被测件表面三维形貌复原精度的同时, 保证上下表面的复原精度一致。

虽然所提方法是针对高度达数十或数百微米的台阶或沟槽类样品, 但是对其稍加补充便可以成为一个普适性的方法。对于高度较小且表面较光滑的被测件, 其上下表面的相干区域会发生重叠, 融合成一个较大的相干区域, 此时只需要查找一次采图区域即可。若预先知道被测件高度  $H$  的名义值, 则只需将被测件表面相干区域长度  $L$  修正为  $L+H$ 。若不知道被测件的高度, 则只需在确定采图区域那一步将被测件表面

相干区域长度  $L$  修正为  $2L$ 。对于表面粗糙的被测件, 即被测件上下表面有较大的起伏, 则需要在确定采图区域后加上修正步骤。先比较采图区域边界点的评价函数值与粗扫描定位点的评价函数值确定采图边界点与相干区域边界点的方位关系, 再采用精扫描步长从采图区域的边界点开始扫描, 并利用 ViBe 算法或帧差法查找正确的采图区域。

## 4 实 验

为了验证基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量方法的快速性, 使用自研的低相干光显微干涉仪测量一块标定高度为  $7.805\ \mu\text{m}$  的台阶板 (Veeco, 10113-281)。首先, 求出低相干光的中心波长  $\lambda_0$ 。被测件上下表面的相干区域长度  $L$ 、粗扫描步长  $\delta_1$  和精扫描步长  $\delta_2$ , 其值分别为  $576\ \text{nm}$ 、 $2205.84\ \text{nm}$ 、 $576\ \text{nm}$  和  $72\ \text{nm}$ 。然后, 将高度为  $7.805\ \mu\text{m}$  的台阶板放置在载物台中央, 粗调干涉显微物镜, 使其处于工作距离之外, 从计算机中读出此时的位置, 并以此位置为起点, 进行快速垂直扫描形貌测量。实验复原的表面三维形貌如图 6 所示, 测量结果如表 1 所示。

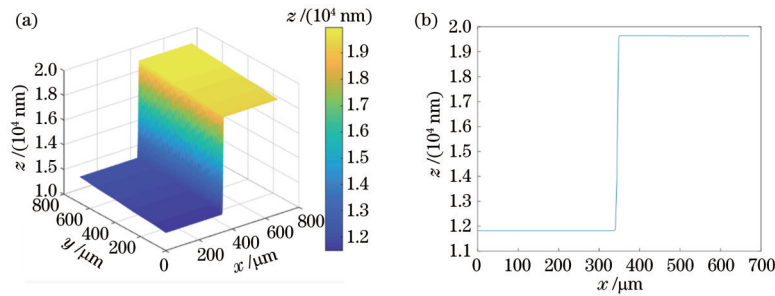


图 6 复原出的台阶板表面三维形貌图和截面图。(a) 表面三维形貌图; (b) 截面图

Fig. 6 Recovered three-dimensional surface topography and cross-sectional view of step. (a) Three-dimensional surface topography; (b) cross-sectional view

表 1 实验测量结果

Table 1 Results of experimental measurement

Calibration value of step height / nm	Calculated step height by proposed method / nm	Acquisition time of proposed method / s	Calculated step height by traditional vertical scanning / nm	Acquisition time of traditional vertical scanning / s
7805	7813	45.4	7811	87.6

由表 1 可计算出所提方法与传统垂直扫描测量方法的测量偏差值  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 即

$$\theta_1 = \frac{7813 - 7805}{7805} \times 100\% = 0.102\%, \quad (24)$$

$$\theta_2 = \frac{7811 - 7805}{7805} \times 100\% = 0.077\%. \quad (25)$$

可以看出, 所提方法的测量偏差值与传统垂直扫描测量方法相近, 但所提方法的采图时间相比传统垂直扫描测量方法快了  $42.2\ \text{s}$ , 缩短了  $48.2\%$  的采图时间。

为了进一步体现所提方法的快速性, 选用深度为  $200.99\ \mu\text{m}$  的沟槽进行实验, 实验复原出的沟槽的表

面三维形貌和对应的截面图如图 7 所示。所提方法的复原高度为  $200.01\ \mu\text{m}$ , 测量偏差值为  $0.488\%$ , 对沟槽的采图时间为  $232.1\ \text{s}$ , 相比传统垂直扫描测量方法的采图时间 ( $517.6\ \text{s}$ ) 快了  $285.5\ \text{s}$ , 采图时间缩短了  $55.2\%$ 。

## 5 结 论

在测量高度达数十或数百微米的台阶或沟槽类微结构样品的表面三维形貌时, 传统的垂直扫描形貌测量方法测量效率低下。为解决上述问题, 提出基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量方法, 以快速查找覆盖相干区域的采图区域代替繁琐而费时的精确查



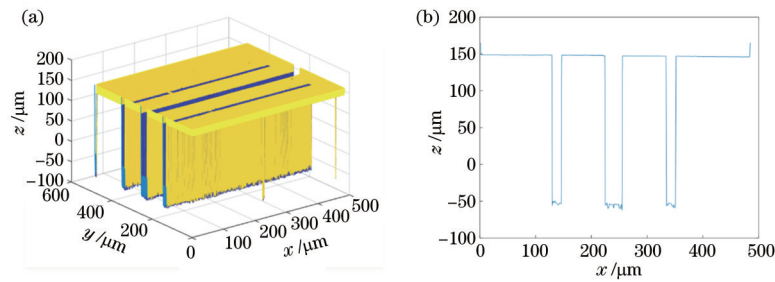


图 7 复原出的沟槽的表面三维形貌图及截面图。(a)表面三维形貌图;(b)截面图

Fig. 7 Recovered three-dimensional surface topography and cross-sectional view of groove. (a) Three-dimensional surface topography; (b) cross-sectional view

找相干区域步骤,虽然多采集了数幅冗余图像,但是在保证复原精度的基础上加快了采图效率。对高度为  $7.805\ \mu\text{m}$  的台阶板进行快速垂直扫描测量实验。实验表明,所提方法的采图时间为  $45.4\ \text{s}$ ,相比传统垂直扫描测量方法快了  $42.2\ \text{s}$ ,缩短了  $48.2\%$  的采图时间。对深度为  $200.99\ \mu\text{m}$  的沟槽进行快速垂直扫描测量实验。实验表明,所提方法的平均采图时间仅为  $232.1\ \text{s}$ ,相比传统垂直扫描测量方法的采图时间 ( $517.6\ \text{s}$ ) 快了  $285.5\ \text{s}$ ,缩短了  $55.2\%$  的采图时间。结果表明,提出的基于光谱分布特性的快速垂直扫描形貌测量方法能够有效地提升垂直扫描的测量效率。

#### 参 考 文 献

- [1] Windecker R, Tiziani H J. Optical roughness measurements using extended white-light interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(6): 1081-1087.
- [2] 夏浩盛, 余飞鸿. 数码显微镜自动对焦算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0400002.  
Xia H S, Yu F H. Auto focusing algorithm of digital microscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0400002.
- [3] Yang X L, Lu Y X, Sun D, et al. An improved clarity evaluation algorithm based on HVS theory[C]//2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, May 25-27, 2018, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2018: 852-855.
- [4] 兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1411003.  
Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1411003.
- [5] 叶一青, 易定容, 张勇贞, 等. 基于倾斜摄像头的显微自动对焦方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1218001.  
Ye Y Q, Yi D R, Zhang Y Z, et al. Microscopy autofocus method using tilt camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1218001.
- [6] 蒋章伟, 燕艳, 李阳, 等. 大范围高精度激光诱导击穿光谱显微对焦系统[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1215004.  
Jiang Z W, Yan Y, Li Y, et al. Wide-range and high-precision microscopic focusing system for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215004.
- [7] Dong J T, Lu R S, Li Y, et al. Automated determination of best focus and minimization of optical path difference in Linnik white light interferometry[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(30): 5861-5871.
- [8] Lee J Y, Wang Y H, Lai L J, et al. Development of an auto-focus system based on the Moiré method[J]. *Measurement*, 2011, 44(10): 1793-1800.
- [9] 毛新越, 赵维谦, 王允, 等. 激光差动共焦显微成像中的轴向快速定焦方法[J]. *光学技术*, 2015, 41(5): 385-389.  
Mao X Y, Zhao W Q, Wang Y, et al. The method of axial fast identified focus of laser differential confocal microscopy imaging[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(5): 385-389.
- [10] Cao B X, Hoang P L, Ahn S H, et al. High-speed focus inspection system using a position-sensitive detector[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2842.
- [11] Xu J M, Hu S Y, Feng F, et al. Experimental study on auto-focusing and ranging based on light-field imaging technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10256: 102560G.
- [12] 田畔, 谷朝臣, 胡洁, 等. 显微镜自动对焦方法研究综述[J]. *光学技术*, 2014, 40(1): 84-88.  
Tian P, Gu C C, Hu J, et al. Research survey on microscopy autofocus methods[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(1): 84-88.
- [13] Zhang X D, Liu Z Q, Jiang M S, et al. Fast and accurate auto-focusing algorithm based on the combination of depth from focus and improved depth from defocus[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31237-31247.
- [14] 曾海飞, 韩昌佩, 李凯, 等. 改进的梯度阈值图像清晰度评价算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(22): 2211001.  
Zeng H F, Han C P, Li K, et al. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2211001.
- [15] 马龙, 吕毅, 裴昕, 等. 白光干涉轮廓仪空间扫描范围自适应规划方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061202.  
Ma L, Lü Y, Pei X, et al. Adaptive planning method of

- spatial scanning range for white light interferometric profiler[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061202.
- [16] 梁航, 高健, 黄义亮, 等. 白光扫描干涉过程的自动对焦方法研究[J]. *半导体光电*, 2019, 40(5): 726-731.  
Liang H, Gao J, Huang Y L, et al. Research on autofocus algorithm for white light scanning interference [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(5): 726-731.
- [17] Sun Y F, Yu H B, Ma J Q, et al. Spurious fringe processing for dielectric metasurface profile measurement using white-light scanning interferometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(2): 215-223.
- [18] 项魁, 高健. 自动对焦过程中图像清晰度评价算法研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(1): 52-55.  
Xiang K, Gao J. Research on the image definition evaluation algorithm in autofocus process[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(1): 52-55.
- [19] 雷李华, 李强, 傅云霞. 白光干涉三维形貌快速测量算法[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(3): 62-70.  
Lei L H, Li Q, Fu Y X. Three-dimensional topography rapid measurement algorithm using white light interference[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(3): 62-70.