

引用格式: SUN Yifeng, GAO Zhishan, FAN Xiaoxin, et al. Signal Processing for Height Measurement of High-aspect-ratio Structure Based on Low-coherence Interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0912001  
孙一峰,高志山,范筱昕,等.低相干干涉高深宽比结构高度检测信号处理技术[J].光子学报,2022,51(9):0912001

# 低相干干涉高深宽比结构高度检测信号处理技术

孙一峰,高志山,范筱昕,张佳乐,马剑秋,袁群

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京 210094)

**摘 要:**低相干扫描干涉技术是微结构特征参数无损检测的有效手段。然而对高深宽比结构底部采样点需要进行大量程垂直扫描,由此引起光强漂移导致的相干信号对比度降低,以及阶跃边缘复杂衍射作用造成的相干信号混叠是高度检测过程中的两个主要难题。采用完全噪声辅助聚合经验模态分解算法分解原始信号得到一系列特征模态函数,通过提取高频特征模态函数代替原始信号滤除低频的光强漂移分量,提高相干信号对比度。高深宽比结构边缘复杂衍射作用使该位置附近的相干信号中包含两组包络,其中异常包络由相干峰位置对应上表面的附加相干信号引起并阻碍有效包络的准确判别。通过融合从相干信号中提取的对比度及强度信息并进行二值化处理,实现对高深宽比结构上下表面的识别分类,据此选择当前采样点位置对应的包络作为有效包络并最终完成结构高度的高精度检测。以校准深度为 101.77  $\mu\text{m}$ ,线宽为 10.97  $\mu\text{m}$  的高深宽比沟槽为检测样品,10 次测量的高度均值及标准差分别为 101.093  $\mu\text{m}$ 、0.316  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**干涉测量;高度测量;高深宽比;光强漂移;相干信号混叠

**中图分类号:** TH741; TN247

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20225109.0912001

## 0 引言

随着制造工艺的不断提高,高深宽比结构在半导体、传感及光学领域表现出了优异的性能,如半导体三维封装技术中使用的硅通孔<sup>[1]</sup>、具有高灵敏度的微机电系统<sup>[2]</sup>,以及可灵活调控相位和偏振的超表面<sup>[3]</sup>。与之相对地,高深宽比结构的高度显著影响上述器件的性能,因此实现结构高度的精确检测对加工过程控制及对器件质量评定具有重要意义。当前对高深宽比结构高度检测的主要手段是解剖测试,使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对样品截面进行高精度高度检测<sup>[4-5]</sup>,然而此破坏型方法仅适用于陪片或制样,此外 SEM 测量需耗时数小时,其检测成本高且效率低。

低相干扫描干涉技术以非接触、检测效率高优势广泛应用于阶跃结构的三维形貌检测<sup>[6]</sup>,然而样品的结构特征会影响该技术的检测结果。JO T 等在使用 Linnik 型干涉系统检测深度为 47.9  $\mu\text{m}$ ,直径为 4.27  $\mu\text{m}$  的硅通孔样品时指出,高深宽比结构会遮挡测试臂入射光束并导致返回光能量弱于参考臂从而降低相干信号的对比度<sup>[7]</sup>。研究中对结构底部采样点进行大范围扫描时产生了光强漂移现象并导致相干信号整体倾斜,该现象降低了相干信号的对比度进而影响信号包络的提取。MONTGOMERY P C 等在检测深度为 75  $\mu\text{m}$ ,线宽为 2  $\mu\text{m}$  的微光机电系统时发现,相干扫描过程中在梳齿结构上边缘水平方向向空气延伸的位置附近会出现异常干涉条纹,其对比度甚至高于其所对应的垂直方向上出现在结构下表面条纹的对比度,这将

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2019YFB2005500),国家自然科学基金(Nos.62175107, U1931120),江苏省六大人才高峰项目(No. RJFW-019),中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(No.KLOMT190201),上海在线检测与控制技术重点实验室基金(No.ZX2021102)

**第一作者:** 孙一峰(1995-),男,博士研究生,主要研究方向为显微干涉。Email: 807675530@qq.com

**导师(通讯作者):** 高志山(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为精密光学测试、先进光学设计。Email: zhishgao@njust.edu.cn

**收稿日期:** 2022-01-25; **录用日期:** 2022-04-21

<http://www.photon.ac.cn>

导致基于相干信号对比度检测的算法得到错误的形貌结果<sup>[8-9]</sup>。尽管上述研究中发现了异常干涉条纹现象,但并没有进一步分析相干信号的特征及有效的处理算法。此外,采用Mirau型干涉显微物镜时,中央孔径的光束被参考面遮挡,而高深宽比结构又进一步限制了入射光束的孔径,考虑到返回光束的能量,所以Linnik结构相比于Mirau结构更适用于高深宽比结构检测。TAVROV A等认为在阶跃边缘位置附近的复杂衍射效应是异常干涉条纹的起因,他们采用矢量衍射理论仿真高深宽比沟槽的反射光场后结合构建的相干方程得到了与实验现象相近的仿真结果<sup>[10]</sup>。然而该研究缺乏定量结果,没有分析采样点相对阶跃边缘的距离对异常干涉条纹对比度影响。上述研究表明Linnik型干涉结构可以被应用于高深宽比结构高度的检测,但在检测过程中存在以下问题:1)大范围扫描过程中的光强漂移现象会减弱相干信号的对比度并进一步影响包络的提取。2)阶跃下边缘异常干涉条纹的存在造成附加相干信号,导致下边缘采样点相干信号中包含两个包络,难以判别其中的有效包络并进行相干峰定位。3)不同位置的干涉信号特征不一样,表现为结构上表面及远离阶跃下边缘位置处的相干信号包含一组包络并且可直接用于相干峰定位,而阶跃下边缘位置处的相干信号包含两组包络并需要从其中提取有效包络进行相干峰定位,因此检测高深宽比结构时不能对视场中所有的采样点采用统一的信号处理方法。

针对上述问题,首先需要从原始相干信号中提取高频信息来抑制低频光强漂移的影响,从而提高信号的对比度。完全噪声辅助聚合经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)算法可在无先验知识的情况下将原始信号分解为包含不同频率分量的特征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),选取高频的IMF代替原始信号可实现信号对比度的提升<sup>[11]</sup>。接下来通过对视场中的区域进行二值化处理可识别高深宽比结构的上下表面,根据样品的设计参数对阶跃下边缘附近采样点的相干信号划定窗口并从中提取有效包络即可准确定位相干峰位置,二值化处理可通过分析结构上下表面相干信号强度及对比度信息的差异实现<sup>[12-15]</sup>。最后,结构上表面及远离阶跃下边缘的位置不受附加相干信号的影响,可直接提取相干信号的包络进行相干峰定位。本文对高深宽比结构不同位置相干信号的特征进行分析,采用预处理的方式提高相干信号的对比度,通过二值化处理识别高深宽比结构的上下表面后选取有效包络解决相干信号混叠造成的双包络问题,对深度为 $101.77\ \mu\text{m}$ ,线宽为 $10.97\ \mu\text{m}$ 的高深宽比沟槽样品进行高度检测以证明所提方法的可行性。

## 1 高深宽比结构相干信号的预处理及特征

### 1.1 检测过程

对高深宽比结构的高度检测采用如图1(a)所示的Linnik型低相干扫描干涉系统,短相干光源通过科勒系统均匀照明参考臂及测试臂显微物镜的入瞳并最终会聚在样品及参考板表面,两臂反射光再次通过物镜后相干叠加经由管镜成像到相机,压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic, PZT)带动载物台完成沟槽结构上下表面的相干扫描,相机根据PZT的步进过程逐帧采集干涉图。实验采用课题组自研系统进行高深宽比结构的

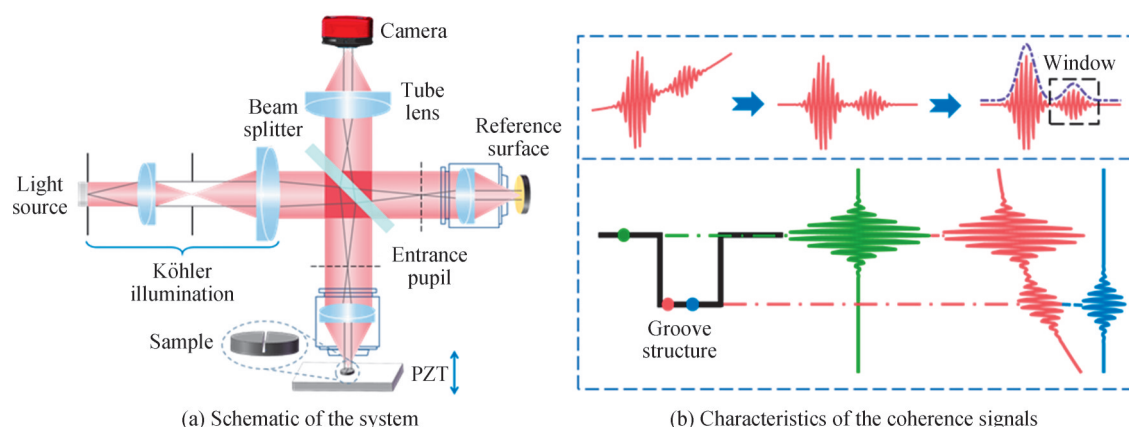


图1 Linnik型低相干扫描干涉系统

Fig. 1 System of Linnik-type low-coherence scanning interferometry

检测。系统光源采用带宽为 300 nm、中心波长为 1 325 nm 的短相干近红外光(相干长度为 5.9  $\mu\text{m}$ ),PZT 的步进量为 165.6 nm(中心波长的八分之一),两臂显微物镜的放大倍率为 20 倍( $\text{NA}=0.5$ ),相机像元尺寸为 20  $\mu\text{m}$ ,两像素间隔对应物方 1  $\mu\text{m}$  的长度。

高深宽比结构不同位置的相干信号具有不同的特征,如图 1(b)所示。结构上表面的相干信号对比度高且包含一组包络;远离阶跃下边缘的沟槽中心位置,由于结构对入射光的遮挡导致反射光能量低并使两臂光强不匹配,因此该位置相干信号能量弱于上表面且对比度较低;对于阶跃下边缘附近的采样点,除了受到遮挡影响外,由大范围扫描引起的光强漂移现象使相干信号发生整体偏移,此外高深宽比沟槽对入射光的衍射作用导致相干信号包含两组包络,对应下表面的有效包络幅值甚至低于异常包络,这将对相干信号的包络提取以及相干峰定位造成明显的干扰。因此在信号处理过程中应先对该位置相干信号预处理以消除光强漂移的影响,在提取相干信号包络后根据样品设计参数设定窗口提取有效包络用于高度计算。

待测样品由硅材料制成,其结构参数如图 2(a)所示,沟槽深度及宽度分别为 101.77  $\mu\text{m}$  及 10.97  $\mu\text{m}$ 。为研究相干信号在不同位置的特征,通过图 2(b)中标注的八个采样点从左至右进行信号特征分析。考虑到样品的深度及 PZT 的步进量,在相干扫描过程中为避免采集数据的冗余,首先以样品上表面所在轴向位置为中心进行  $\pm 17 \mu\text{m}$  的扫描,并再次以下表面所在位置为中心进行  $\pm 17 \mu\text{m}$  的扫描,扫描区间的设置大于系统两倍的相干长度。

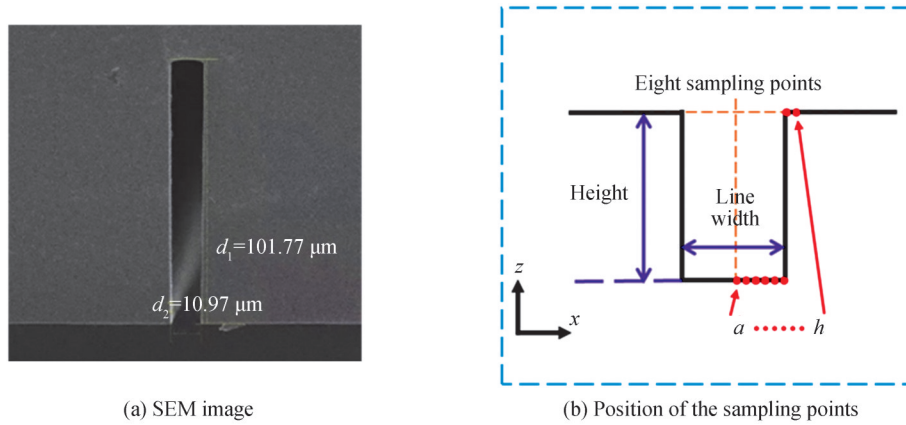


图 2 待测样品结构参数及采样点位置

Fig. 2 Structural parameters of the measurement sample and the location of the sampling point

## 1.2 相干信号的预处理

图 3 为图 2(b)中所标注八个采样点 a~h 的相干信号,每组信号分成两部分表示,并分别对应结构上下表面的扫描区间,为突出信号特征所以在图中对不同采样点的纵轴强度区间进行了相应调整,并对原始信号减去自身均值得到交流分量。图 3(g)、(h)为样品顶端的相干信号,其能量较强且仅可以从中提取一组明显的包络。而样品底部所有采样点的相干信号对比度极低以至于无法表现相干性,此外可以看出相干信号中存在明显的光强漂移现象,以上情况对信号的相干峰提取以及高深宽比结构的高度检测造成严重阻碍。

为提高样品底部相干信号的对比度,采用 CEEMDAN 算法进行信号的预处理。该算法可将原始信号在不存在先验知识的条件下分解为包含不同频率特征的 IMF 分量,通过评价函数选择合适的 IMF 代替原始信号可达到消除信号中的低频光强漂移、凸显信号特征频率的作用。评价函数可表示为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I_k(i) - I(i)]^2} \quad (1)$$

式中, $I(i)$ 为原始相干信号  $n$  步扫描中第  $i$  步的强度值, $I_k$  为第  $k$  个 IMF 分量。当某一 IMF 分量的  $S$  值达到各分量结果中最小的时候,将该 IMF 分量代替原始相干信号。以图 3(e)位于结构底部采样点的相干信号为例,分解结果如图 4(a),最终选取的分量为 IMF 1。图 4(b)中原始信号与被选取分量的对比表明,采用 CEEMDAN 算法进行预处理可显著提升信号的对比度,分解得到的信号不仅体现出了采样点在底部相干扫描时的相干性而且对原始信号中存在的光强漂移进行了很好的校正。采用分解得到的 IMF 分量代替原始

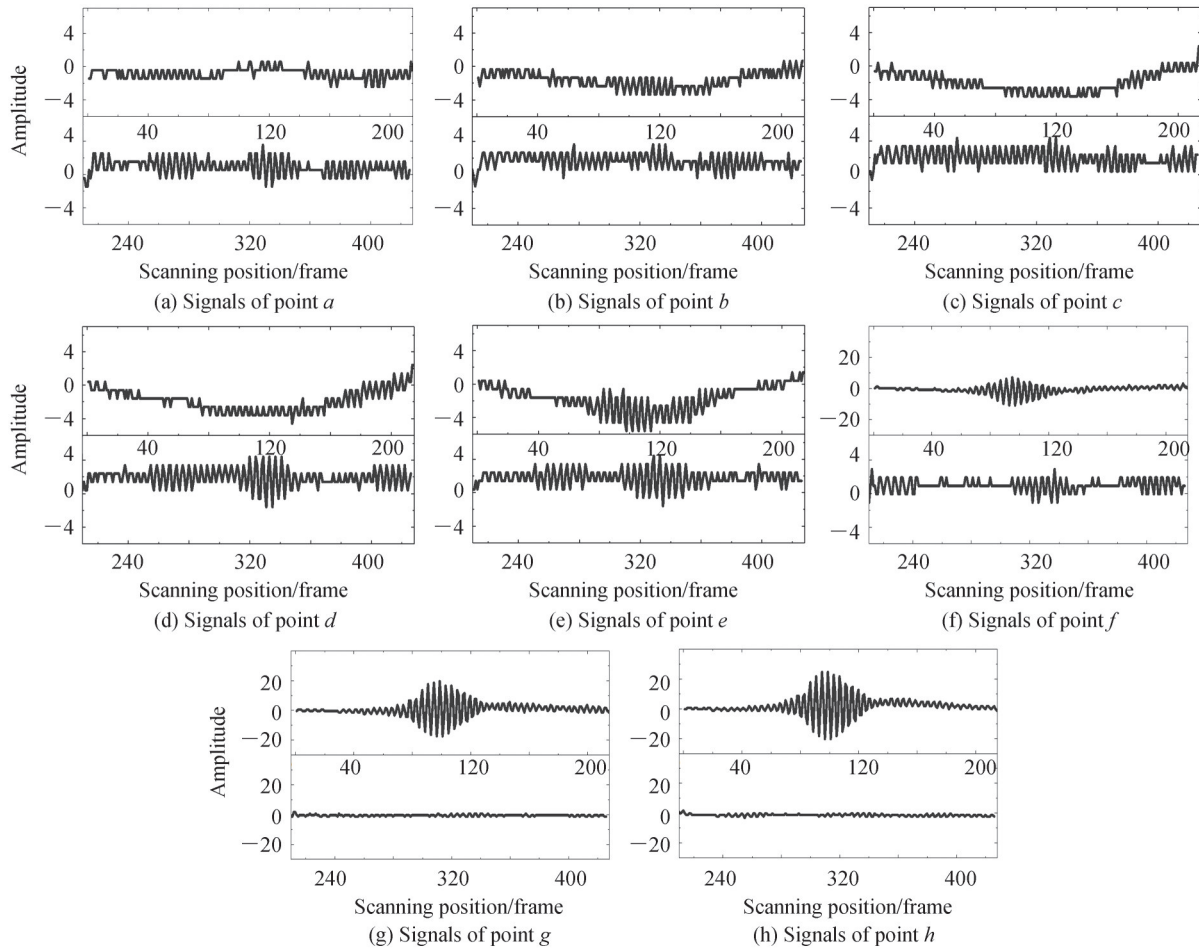


图3 图2中八个采样点的原始相干信号  
Fig. 3 Original coherence signals of eight sampling points in Fig. 2

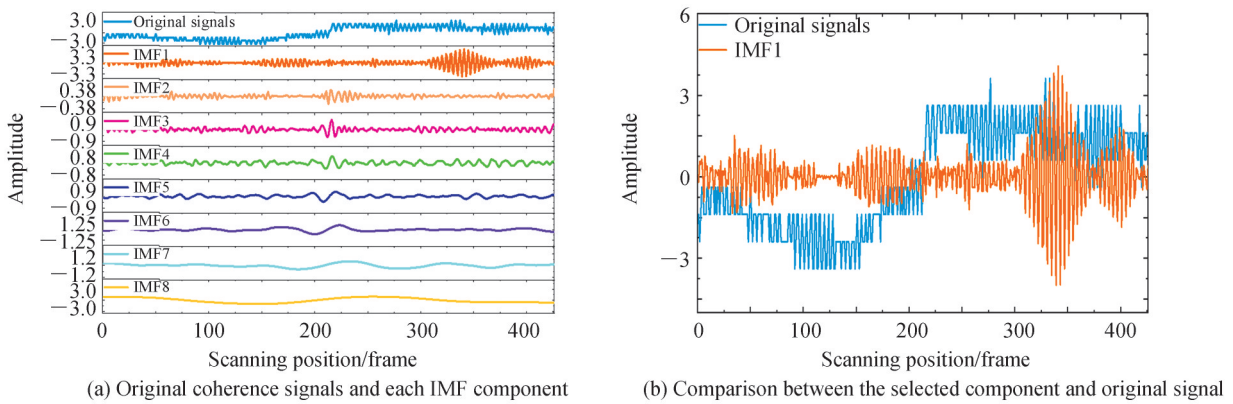


图4 CEEMDAN结果  
Fig. 4 Results of CEEMDAN

信号有利于后续提取信号包络,并最终实现高深宽比样品高度的高精度检测,各采样点预处理后的相干信号及提取的包络如图5。

图5(e)、(f)为下表面最临近阶跃边缘的采样点,可以看出此时相干信号区别于正常情况且都主要包含两组包络,其位置分别对应高深宽比结构的上下表面。多次实验及样品的SEM检测结果表明,此现象并不是因为样品陡直度低造成的采样点横跨上下表面,当高深宽比结构的线宽接近系统衍射极限时( $\delta_{\text{Rayleigh}} = 0.61 \times \lambda/\text{NA} = 1.617 \mu\text{m}$ )相干信号的混叠效应更为明显,而当线宽大于  $30 \mu\text{m}$  时有效包络的幅值明显大于

异常包络且此时混叠效应可以忽略。此外下表面其他采样点中也包含多段满足周期性及短相干性的信号,因此对视场中结构的上下表面二值化,根据当前采样点位置建立合适的窗口提取有效包络进行后续计算是必要的。

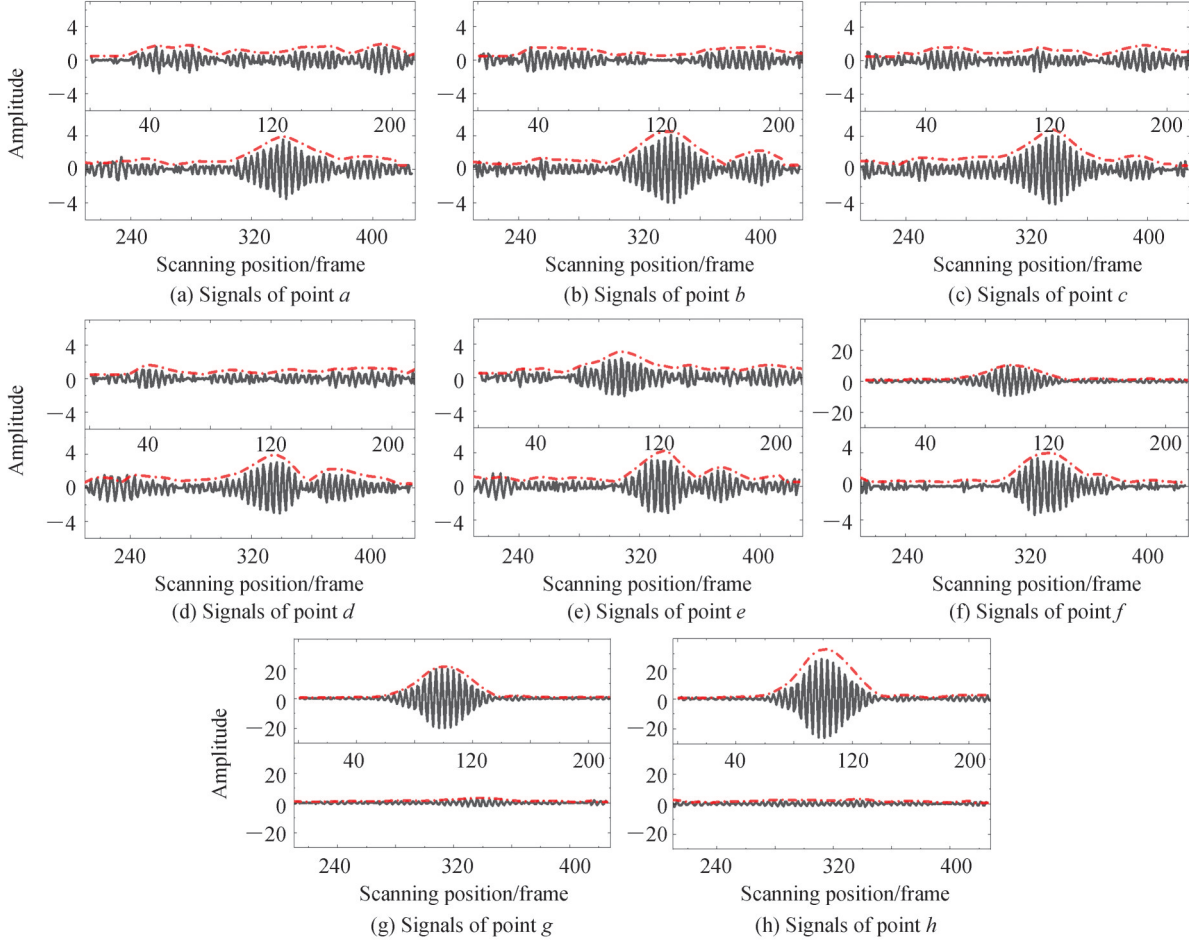


图5 图2中八个采样点预处理后的相干信号(虚线为信号包络)

Fig. 5 Pre-processed coherence signals of eight sampling points in Fig. 2 (The dotted line is the signal envelope)

### 1.3 高深宽比结构相干信号仿真理论

通过严格耦合波理论(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)仿真高深宽比结构底部返回的光场,并结合相干方程的建立解释底部异常相干信号<sup>[10]</sup>。短相干光源通过科勒系统均匀照明物镜入瞳后,光束经过物镜会聚在样品表面,这一过程可以看作样品被载有不同空间频率的平面波照明,反射光场携带样品的结构特征信息再次经过物镜并在其出瞳位置转换成空间频谱,测试臂的光场分布可表示为

$$E_{x,y,z} = \sum_w S(w) \times \sum_\mu L(\mu) \times \left\{ \sum_v \exp(ik_v \cdot r) \cdot \cos^{1/2}(v) \cdot \mathcal{F}^{-1} \left( H(v) \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{F} \{ E_x(k_{\mu,w}) \} \\ \mathcal{F} \{ E_y(k_{\mu,w}) \} \end{bmatrix} \right) \right\}^2 \quad (2)$$

式中, $S(w)$ 为光源光谱的分布强度, $w$ 代表其中某个波长, $L(\mu)$ 为不同入射角 $\mu$ 的能量分布,其中 $0 \leq \mu \leq \theta_{\max}$ ,  $NA = n \cdot \sin(\theta_{\max})$ , $r$ 代表入射光束的方向矢量, $\mathcal{F}^{-1}$ 表示逆傅里叶变换计算, $H(v)$ 为物镜的相干传递函数, $E_x$ 及 $E_y$ 为通过RCWA构建的样品表面两个偏振方向的光场分布。

采样点的相干信号可表示为

$$I = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* \quad (3)$$

式中, $E_1 = E_{x,y,z}$ 为测试臂光场, $E_2$ 为参考臂光场,构建过程同式(2)并且可以通过简单的反射模型代替RCWA计算。

## 2 高深宽比结构高度检测算法

根据1.2节中对不同采样点相干信号特征的分析,提出了高深宽比结构高度检测算法,算法流程如图6。首先通过对相干信号的预处理实现高深宽比结构底部信号对比度提升。对于阶跃下边缘相干信号中包含两组包络且无法确定其中有效包络的问题,采用重心法直接提取全局相干包络的重心位置得到视场中所有采样点的对比度信息,接着将其融合相干信号中提取的强度信息实现对结构上下表面信号差异的放大,通过二值化处理区分上下表面,对下表面采样点根据样品的设计参数设定窗口后将其内部的相干包络认定为有效包络。信号包络的提取通过Morlet小波变换实现,最终根据对多个采样点有效包络峰值的定位得到高深宽比结构高度检测结果。

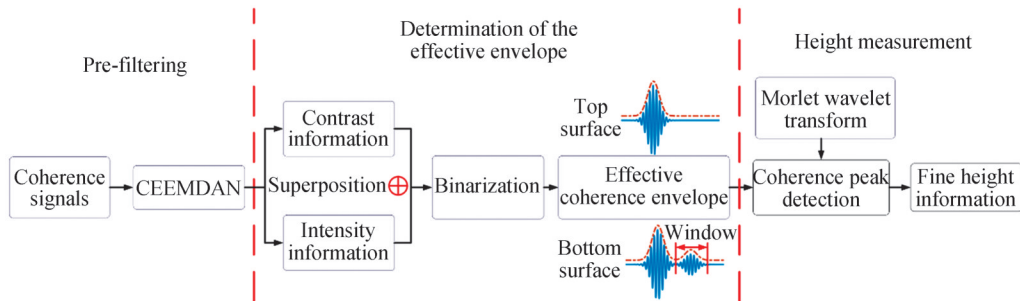


图6 算法流程

Fig. 6 Flow of the proposed algorithm

### 2.1 结构上下表面二值化算法

如图5(h)所示,从结构上表面的正常相干信号中可提取一组最为明显的包络。对于以图5(e)为例的结构下表面相干信号,从中可提取多组包络,但在不确定当前采样点位置的情况下无法选取有效包络。由于包络峰值位置对应当前采样点的相对高度,现对视场中所有采样点提取的包络直接做全局重心法计算,并将结果作为当前采样点的对比度信息。提取包络采用的Morlet小波变换算法将在2.2节介绍,重心法的表达式为

$$C = \left[ \sum_{z=1}^n z \cdot W_T(z) \right] / \left[ \sum_{z=1}^n W_T(z) \right] \quad (4)$$

式中,  $W_T(z)$  表示  $n$  步扫描过程中第  $z$  步对比度幅值的大小。以重心法结果表征采样点的高度,则上表面采样点的高度必然较高;下表面采样点由于多个包络的影响,采用全局重心法得到的高度较低。对比度信息的计算结果如图7(a),从中可以看出结构上下表面的对比度信息出现了明显的差异,且底部对比度信息的复杂分布也反映出相干信号的异常。但仅通过对比度信息不足以显著区分阶跃边缘处采样点对上下表面的归属,接下来将提取相干信号的强度信息。

由于高深宽比结构对底部的遮挡,下表面相干信号的强度将明显低于上表面,对采样点提取强度信息的表达式为

$$I_{\text{select}}(x, y) = \max(I(x, y, z)) \quad (5)$$

式中,  $I(x, y, z)$  为视场中某一采样点  $z$  向扫描得到的相干信号,通过提取信号的最大值可拼接成如图7(b)所示的强度信息图像,从中同样可以看出结构上下表面被区分开。接下来通过高度及强度信息对应采样点相乘的方式将二者融合,并进一步凸显结构上下表面信号的差异,采用 Kittler 算法计算分割阈值的大小<sup>[16]</sup>,最终得到的上下表面二值化结果如图7(c)。

从图7(c)中可以看出,结构上下表面被成功区分,即实现了视场中任一像素点所在表面位置的自动化判定,该结果有助于通过加窗对底部采样点有效包络进行提取。此外二值化结果中的沟槽线宽和SEM图像中对线宽的检测结果一致,进一步证明了所提出二值化算法的有效性。

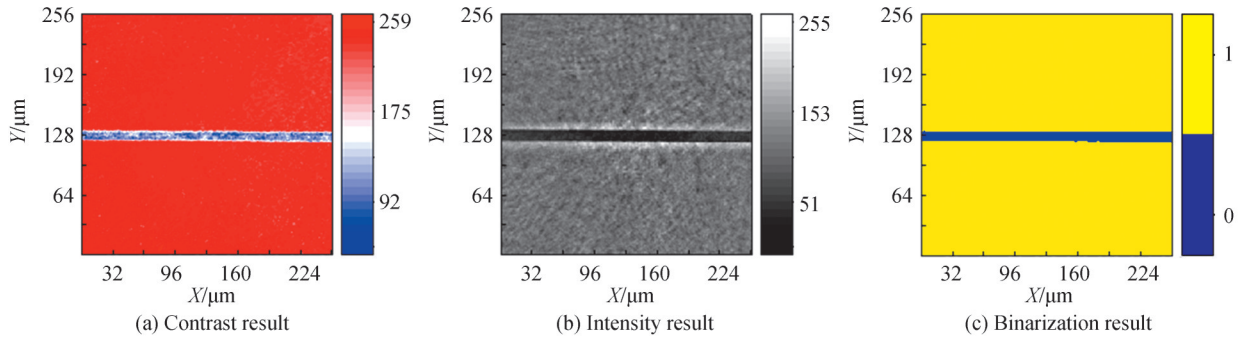


图7 结合对比度及强度信息的二值化结果

Fig. 7 Binarization result combining contrast and intensity information

## 2.2 相干包络的提取及有效包络的选择

小波变换以其良好的稳定性及鲁棒性广泛应用于低相干扫描干涉技术中<sup>[17]</sup>,选取与相干信号特征相似的Morlet小波函数作为母小波函数,即

$$\varphi(z) = \exp(-z^2/2) \cdot \exp(i\omega_0 z) \quad (6)$$

式中, $\omega_0$ 代表函数的中心频率,通过改变尺度参数 $a$ 与位置参数 $b$ ,小波族函数 $\varphi(z, a, b)$ 的表达式为

$$\varphi(z, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{z-b}{a}\right) \quad (7)$$

对相干信号的小波变换方程为

$$W_T(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(z) \varphi^*(z, a, b) dz \quad (8)$$

式中, $\varphi^*(z, a, b)$ 代表 $\varphi(z, a, b)$ 的共轭。小波变换系数即为对相干信号提取的包络结果。

$$|W_T(z)| = \sqrt{(W_{TRe}(z))^2 + (W_{TIm}(z))^2} \quad (9)$$

式中, $W_{TRe}(z)$ 及 $W_{TIm}(z)$ 分别为 $W_T(z)$ 的实部及虚部。

相干信号包络的计算为2.1节中结构上下表面二值化的实现奠定了基础。接下来根据待测样品深度的设计参数,对下表面采样点针对性地设定窗口并将其中的相干包络判定为有效包络(如图6),在实验中窗口的大小为 $17 \mu\text{m}$ ;对于上表面的采样点可直接判定具有最大幅值的包络为有效包络。获取视场中所有采样点的有效包络后,对其进行三次样条插值提高检测的纵向精度,最终定位包络峰值的位置得到采样点的相对高度结果。

## 3 实验结果分析

采用所提出的算法对图2(a)中的高深宽比沟槽结构进行高度检测,其深度及宽度的SEM检测结果分别为 $101.77 \mu\text{m}$ 、 $10.97 \mu\text{m}$ ,该标准样板的结构参数经中国计量院认证并出具检测报告。由于在无损测量的过程中实际检测位置与解剖后SEM的断面不在同一空间位置,而该样品空间一致性很好,因此对其进行多次检测并验证所提算法的准确性和稳定性,检测结果如图8。图8(a)、(b)分别为高深宽比沟槽结构的三维及二维检测结果,采用所提出的检测算法可有效抑制结构下表面异常相干信号对形貌检测的影响,并自动化实现对视场中所有采样点有效包络的提取及结构真实形貌的复原。检测得到准确的形貌结果有助于对高深宽比结构高度的准确评定,参照ISO5436-1:2000中的定义,如图8(c)所示, $W$ 代表沟槽可测宽度,采取被测沟槽可测宽度的三倍进行采样,即A、B、C三个区域的长度均等于沟槽可测宽度,测量时排除三个测量区域中阶跃边缘数据点作为有效计算数据区 $W/3$ 。沟槽深度单次测量结果表达式为

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n c_i}{2n} - \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \quad (10)$$

式中, $a_i$ 、 $b_i$ 及 $c_i$ 分别为区域A、B、C中第 $i$ 个采样点的相对高度,各区域中的测量点数 $n=4$ 。

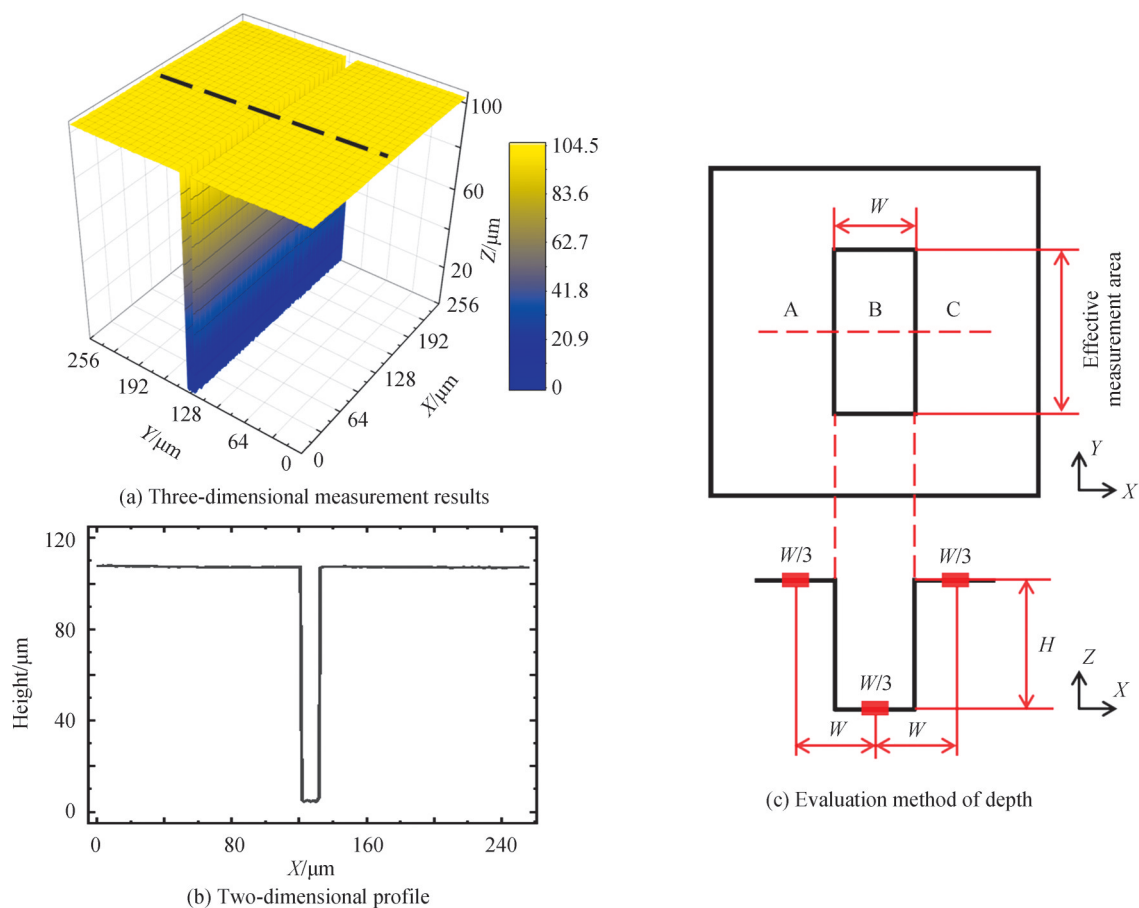


图8 高深宽比沟槽结构检测结果  
Fig. 8 Measurement result of the high-aspect-ratio trench

重复测量10次沟槽深度并计算结果的均值、标准差,以及均值相对SEM检测结果的绝对误差和相对误差,检测结果如表1。

表1 高深宽比沟槽结构检测结果  
Table 1 Measurement result of the high-aspect-ratio trench

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Result/ $\mu\text{m}$	101.235	101.003	101.587	101.296	101.198	100.458	101.263	101.212	100.834	100.846
Mean value/ $\mu\text{m}$	101.093									
Standard deviation/ $\mu\text{m}$	0.316									
Absolute error/ $\mu\text{m}$	0.677									
Relative error/%	0.67%									

从表1中可以看出,采用本文提出算法进行高度检测的均值结果接近SEM对剖片截面的检测结果(101.77  $\mu\text{m}$ ),从10次检测结果的标准差可以看出本算法具有良好的重复性和鲁棒性。相较于SEM检测而言,采用低相干扫描干涉系统的显著优势在于无损检测,检测过程中无需进行剖片,所以检测效率高且检测成本低,而本文提出的方法可在不改动系统硬件的基础上实现算法层面的信号处理和高度检测因此具备良好的适用性。

## 4 结论

本文提出了基于低相干扫描干涉技术的高深宽比结构高度检测方法。首先采用CEEMDAN算法处理原始信号实现下表面相干信号对比度的提升。分析发现高深宽比结构边缘对入射光的衍射作用会使下表面的相干信号包含两个甚至多个包络,并且难以从相干峰位置对应结构的上下表面的两个主要包络中确定



有效包络。本文通过结合相干信号中提取的强度信息及对比度信息完成结构上下表面的二值化处理,参照样品的设计参数针对下表面相干信号的包络进行加窗提取,最终实现视场中所有采样点有效包络的自动化判定及结构高度的准确检测。对深度为  $101.77\ \mu\text{m}$ ,线宽为  $10.97\ \mu\text{m}$  的高深宽比沟槽样品进行检测,实验结果证明了提出方法的准确性及稳定性。随着高深宽比结构在半导体、传感器及微纳光学领域愈发广泛的应用,本文提出的高度检测方法可在不改变常规低相干扫描干涉系统硬件的基础上以非接触、高效等优势实现更广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] XU Han, ZHU Yajun, DAI Feihu, et al. Vertical interconnection structures of wafer level package[J]. *Electronics and Packaging*, 2021, 21(10):89-96.  
徐罕, 朱亚军, 戴飞虎, 等. 晶圆级封装中的垂直互连结构[J]. *电子与封装*, 2021, 21(10):89-96.
- [2] MU Jiliang, GUO Maoxiang, LIU Bing, et al. Fabrication methods and applications of silicon micro/nanometer structures with high aspect ratio[J]. *Semiconductor Technology*, 2013, 38(5):321-327.  
穆继亮, 郭茂香, 刘冰, 等. 高深宽比硅基微纳结构制造方法及其应用[J]. *半导体技术*, 2013, 38(5):321-327.
- [3] KUZNETSOV A I, MIROSHNICHENKO A E, BRONGERSMA M L. Optically resonant dielectric nanostructures[J]. *Science*, 2016, 354:6314.
- [4] LI Zhi, WANG Xiangjun. Measurement methods of geometric characteristics in MEMS[J]. *Microfabrication Technology*, 2003, 1:51-56.  
李智, 王向军. MEMS中几何量的测试方法[J]. *微细加工技术*, 2003, 1:51-56.
- [5] ZHOU Lingling, SUN Wei. Lamellar microstructure in the complex alloy phases by focused ion beam processing scanning and transmission electron microscopy[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2018, 37(6):590-595.  
周玲玲, 孙威. FIB加工、扫描及透射电子显微镜相结合的复杂合金相层状组织表征[J]. *电子显微学报*, 2018, 37(6):590-595.
- [6] GROOT P D, DECK L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42:389-401.
- [7] JO T, KIM S, PAHK H. 3D measurement of TSVs using low numerical aperture white-light scanning interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(4):317-322.
- [8] MONTGOMERY P C, MONTANER D, MANZARDO O, et al. The metrology of a miniature FT spectrometer MOEMS device using white light scanning interference microscopy[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 450(1):79-83.
- [9] MONTGOMERY P C, MONTANER D, MANZARDO O, et al. Lateral error reduction in the 3D characterization of deep MOEMS devices using white light interference microscopy[J]. *Optical Micro-and Nanometrology in Manufacturing Technology*, 2004, 5458:34-42.
- [10] TAVROV A, SCHMIT J, KERWIEN N, OSTEN W, et al. Diffraction-induced coherence levels[J]. *Applied Optics*, 2005, 44:2202-2212.
- [11] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]. *IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, IEEE, 2011.
- [12] SYMEONIDIS M, NAKAGAWA W, KIM D C, et al. High-resolution interference microscopy of binary phase diffractive optical elements[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2:2496-2510.
- [13] TAVROV A, TOTZECK M, KERWIEN N, et al. Rigorous coupled-wave analysis calculus of submicrometer interference pattern and resolving edge position versus signal-to-noise ratio[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41:1886-1892.
- [14] HARASAKI A, WYANT J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13):2101-2106.
- [15] TÖPFER S C, KÜHN O, LINSS G, et al. Model-based edge detection in height map images with nanometer resolution [C]. *SPIE*, 2004, 5578:476-485.
- [16] KITTLER J, ILLINGWORTH J. On threshold selection using clustering criteria[J]. *IEEE Transactions SMC*, 1985, 15(5):652-655.
- [17] XU Hongjie, LUO Huigang. Interference signal envelope extraction based on wavelet transform method [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(3):406-409,413.  
徐宏杰, 罗惠刚. 基于小波变换的干涉信号包络提取方法研究[J]. *半导体光电*, 2017, 38(3):406-409,413.

## Signal Processing for Height Measurement of High-aspect-ratio Structure Based on Low-coherence Interferometry

SUN Yifeng, GAO Zhishan, FAN Xiaoxin, ZHANG Jiale, MA Jianqiu, YUAN Qun

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Low-coherence scanning interferometry is an effective method used for measuring characteristic parameters of microstructures with the advantage of non-destruction. However, a large range of vertical scanning is required for the sampling points at the bottom of the high-aspect-ratio structure, which causes the offset of light intensity and reduces the contrast of coherence signals. Besides, the aliasing coherence signals induced by the complex diffraction effect appear at the step edge and two main envelopes can be extracted. All these phenomena obstruct the locating of the coherence peak and then mislead the height measurement. Algorithmic processing seems to be an effective method to solve the above problems including suppressing the component of offset and demodulating the aliasing coherence signals. Due to the central shielding effect of Mirau-type objectives, the effective signals returned from the sampling points at the bottom of the high-aspect-ratio structure can be further reduced. Combined with the consideration of the magnification in the measurement of the structure with narrow linewidth, Linnik-type objectives are selected in the interference system. In this paper, the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise is used to decompose the original signals into a series of intrinsic mode functions. This algorithm can decompose the original signals into different frequency components without prior knowledge. By extracting the intrinsic mode functions with high-frequency and then replacing the original signals, the offset with low-frequency is filtered out and the contrast of coherence signals is further improved. The complex diffraction effect at the edge of the high-aspect-ratio structure results in the coherence signals containing two sets of the envelopes, among which the abnormal envelope is induced by the additional coherence signals. These additional coherence signals correspond to the interference fringes appearing near the upper edges and extending horizontally into the air. However, their contrast is even higher than that of the corresponding interference fringes appearing at the lower surface of the structure. Thus, the abnormal envelope corresponding to the upper surface has a higher amplitude, which obstructs the coherence peak position of the effective envelope. A more complicated condition is that the sampling points far away from the step edge has normal coherence signals containing the single envelope. Therefore, the received coherence signals in the full field of view are mixed up and not applicable to one processing method. What is necessary is that the current position of each sampling point must be determined. The envelope corresponding to the correct surface of the step structure can be used for coherence peak locating and height measurement. For the amplitude of the coherence signals, the shielding effect of the high-aspect-ratio structure can lead to a small result, relatively. This can be considered as the intensity information which helps to distinguish the lower surface of the structure. Besides, there have been obvious discrepancies between the positions calculated by the centroid method for the envelopes extracted from the coherence signals. This is another way to distinguish the different surfaces and can be regarded as contrast information. In this paper, binarization processing is realized by combining the contrast and intensity information extracted from the coherence signals. The purpose of combining these two kinds of information is to further highlight the discrepancy between the upper and lower surfaces. After identifying the upper and lower surfaces of the high-aspect-ratio structure, the envelope corresponding to the current position of the sampling point is selected as the effective envelope for locating the coherence peak and height measurement. A high-aspect-ratio groove with a depth of  $101.77\ \mu\text{m}$  and a line width of  $10.97\ \mu\text{m}$  is selected to be the measurement sample. The structural parameters of this sample have been certified by the China Metrology Institute and a test report has been issued. Using the algorithm proposed in this paper to conduct ten repeatability measurements, the mean of the height measurement results can be calculated as  $101.093\ \mu\text{m}$  and the relative error is  $0.67\%$ . These two parameters demonstrate the accuracy of the

algorithm. Besides, the standard deviation is  $0.316\ \mu\text{m}$  which illustrates the robustness and stability of the algorithm. Due to the general trend toward miniaturization, this non-destructive metrology offers significant advantages in height measurement of high-aspect-ratio structures, without introducing any physical upgrade of the instrument.

**Key words:** Interferometry; Height measurement; High-aspect-ratio; Intensity offset; Aliasing coherence signal

**OCIS Codes:** 120.2650; 030.1640; 120.2380; 120.3180

---

**Foundation item:** National Key Research and Development Program(No.2019YFB2005500), National Natural Science Foundation of China (Nos.62175107, U1931120), Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province(No.RJFW-019), Foundation of Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences(No. KLOMT190201), Foundation of Shanghai Key Laboratory of Online Test and Control Technology(No.ZX2021102)