

文章编号: 1002-1582(2026)04-0434-09

高分辨白光干涉-共焦显微三维形貌测量传感器研制

杨瑞, 贺佳怡, 于福禄, 杨翌明, 杨昌云, 杨帅*

(北京理工大学 光电学院 北京 100081)

摘 要: 针对单一测量模式难以同时满足不同复杂微纳结构的高空间分辨成像检测问题, 提出了基于白光干涉与共焦双光路融合原理的高分辨三维形貌成像检测方法。方法通过分光棱镜与共用管镜实现白光/激光照明/探测光路的同轴合束与空间复用, 并引入振镜实现共焦模式下的横向快速扫描。系统可实现两种测量模式的原位切换, 以白光干涉技术实现大范围形貌的纳米级测量, 以共焦技术实现复杂边缘的精细定位, 从而将白光干涉的高轴向分辨力优势与共焦技术的高横向分辨力特性相结合, 实现了针对不同微纳结构的高精度三维形貌测量。基于该方法研制了小型化多模式白光干涉-共焦测量传感器系统, 实验结果表明, 系统可实现双模式三维形貌测量; 光滑平面测试中轴向重复性小于 2 nm, 标准台阶光栅测试中高度标准差小于标称高度的 2%。将白光干涉与共焦结合应用于微纳测量领域, 为微纳结构三维形貌的高效、精密测量提供了参考。

关 键 词: 白光干涉; 激光共焦; 高空间分辨; 形貌测量; 光学测量

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Development of a high-resolution white-light interference and confocal microscopic sensor for three-dimensional surface topography measurement

YANG Rui, HE Jiayi, YU Fulu, YANG Yiming, YANG changyun, YANG shuai*

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

Abstract: To address the difficulty of a single measurement mode in simultaneously meeting the high-spatial-resolution imaging and inspection requirements of diverse complex micro/nanostructures, a high-resolution three-dimensional topography imaging and measurement method based on the dual-optical-path integration of white-light interferometry and confocal microscopy is proposed. In this method, a beam-splitting prism and a shared tube lens are used to realize coaxial beam combination and spatial multiplexing of the white-light/laser illumination and detection paths, while a galvanometer is introduced to achieve rapid lateral scanning in the confocal mode. The system enables in situ switching between the two measurement modes. White-light interferometry is used for nanometer-scale measurement of large-area surface topography, whereas confocal microscopy is used for precise localization of complex edges. In this way, the high axial resolution of white-light interferometry is combined with the high lateral resolution of confocal microscopy, enabling high-precision three-dimensional topography measurement of different micro/nanostructures. Based on this method, a miniaturized multimode white-light-interferometry/confocal measurement sensor system was developed. Experimental results show that the system can realize dual-mode three-dimensional topography measurement. In the smooth-plane test, the axial repeatability was better than 2 nm, and in the standard step-grating test, the height standard deviation was less than 2% of the nominal height. The integration of white-light interferometry and confocal microscopy in micro/nano measurement provides a reference for efficient and precise three-dimensional topography measurement of micro/nanostructures.

收稿日期: 2026-04-21; **收到修改稿日期:** 2026-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (62405020)

作者简介: 杨瑞 (2000—), 女, 硕士研究生, 从事激光差动共焦-干涉精密测量研究。yr17631721896@163.com

杨帅 (1994—), 男, 特别副研究员, 从事激光差动共焦-干涉精密测量研究。

* **通讯作者:** yangshuai_bit@163.com

Keywords: white-light interferometry; confocal microscopy; high spatial resolution; three-dimensional morphology measurement; optical measurement

0 引言

随着半导体制造、微机电系统、精密光学等领域的飞速发展,复杂微结构器件作为实现特定功能的关键载体,正得到越来越广泛的应用^[1]。其表面形貌特征作为重要评定参数,直接关系到元器件的可靠性和稳定性,因此对微结构表面的高分辨测量与分析评定,已成为保障元器件功能特性与质量的重要前提^[2-3]。与此同时,随着器件集成度不断提高,应用场景逐渐向便携化、集成化方向发展,测量系统体积的小型化也日益成为重要发展趋势。其不仅有助于降低系统的搭建与应用成本,还能够更好地满足多种不同测量环境的实际需求。因此,为满足先进制造与精密检测的发展需求,探索和发展面向复杂微观三维结构的高分辨、高效率、小型化检测技术,已成为支撑其质量控制与产品性能提升不可或缺的重要环节。

白光干涉(WLI)测量技术因其高轴向分辨力、高效率、大量程优势,在微纳结构表面粗糙度测量与形貌特征提取方面被广泛使用^[4-6]。其通过垂直扫描样品寻找各测量点零光程差位置,从而实现非接触表面形貌测量。但传统的白光干涉技术存在抗干扰性差^[7-9]、横向分辨力低^[10-11]的问题。针对这些问题,国内外学者提出了多种方案,例如聂磊^[12]利用移动差分预处理抑制了振动引起的相位噪声,Ji等^[13]采取了单色干涉辅助系统并结合了算法对相位误差进行补偿。Li等^[14]提出了傅里叶叠层相干扫描干涉测量技术来提高横向分辨力,青乐康^[15]等则引入小波变换等图像处理手段进行数据修补来减小蝙蝠翼的影响范围。尽管上述方法在一定程度上缓解了测量误差,但软件算法往往会增加计算复杂程度,易丢失表面高频特征,且受限于单模态干涉原理,难以从根本上突破物理测量瓶颈。

共焦技术因其较优的横向分辨力与抗干扰能力,与干涉在测量能力上形成了极强的互补优势。其特有的针孔滤波机制能有效抑制陡峭侧壁产生的杂散光,在测量大倾角复杂结构时弥补了干涉易失真的短板^[16]。不仅如此,共焦技术在发挥其高横向分辨与滤波特性的同时,还能通过共模抑制^[17],极大提升系统的抗干扰能力;且响应曲线在焦点位置具有高斜率与高线性度特性,可实现高分辨层析对焦^[18]。

鉴于两种测量方法的互补特性,国内外已经开展了多种干涉与共焦结合的探索,其已成为精

密仪器发展的重要趋势。Sensofar^[19]与中图仪器^[20]等企业已成功研制出集成白光干涉与共焦技术的复合型三维形貌仪,但Sensofar采用基于微显示器的扫描方式,在扫描路径调节及测量区域灵活控制方面仍存在一定局限。相比之下,振镜扫描具有响应速度快、扫描角度可调及控制灵活等特点,在复杂区域与多尺度结构测量中更具优势。而中图仪器的整体尺寸较大。Niehues和Lehmann等^[21]将Mirau型白光干涉仪与共焦照明系统相结合,通过限制空间相干性有效削弱了蝙蝠翼效应,但该方法数据采集非常耗时,且长时间测量引发的热漂移会导致重建的形貌曲线发生失真;Wang等^[22]提出了一种集成相移干涉与差动共焦的显微镜,有效提高了系统的轴向动态范围和分辨力,同时降低了对振动和反射干扰的敏感性,但该方法受限于逐点扫描机制,在进行大视场测量时耗时较长;且多通道同步采集的设计增加了系统光路的装调难度。

基于上述分析,现有复合式三维形貌测量系统在实现多模式测量的同时,仍存在结构较复杂、局部测量区域调节不够灵活等问题。为此,本文提出了一种融合了白光干涉与激光共焦的测量方式,并研制了高分辨、小型化的传感器测量系统。该系统采用共用管镜与分光棱镜实现两种测量光路的同轴融合,降低了双模式系统的结构复杂度;同时引入振镜实现共焦模式下的快速横向扫描,提高了局部测量区域选择的灵活性。白光干涉模块侧重于表面高度轮廓的高精度恢复,共焦模块则可对边缘细节和局部结构进行补充表征,从而形成两种测量模式的互补。本文阐述了该系统的测量原理,搭建了双模式协同测量实验装置,并通过标准样品测试,验证了该系统在微纳轮廓测量中的可行性与准确性。

1 测量原理

根据白光干涉与激光共焦光路需求,设计系统光路原理如图1所示。系统采用分光棱镜作为核心耦合元件,通过共用管镜,实现两种测量技术在同一空间下的光路融合。

在照明阶段,系统利用分光棱镜(BS)实现了双测量光源的共轴合束。共焦模块中,激光出射光束经过偏振分光镜(PBS)、 $\lambda/4$ 波片调制后,由MEMS振镜反射,依次透过扫描透镜与管镜,最终经物镜聚焦于被测样品表面。同时,白光干涉模块中的白光光源经科勒照明透镜组水平射入

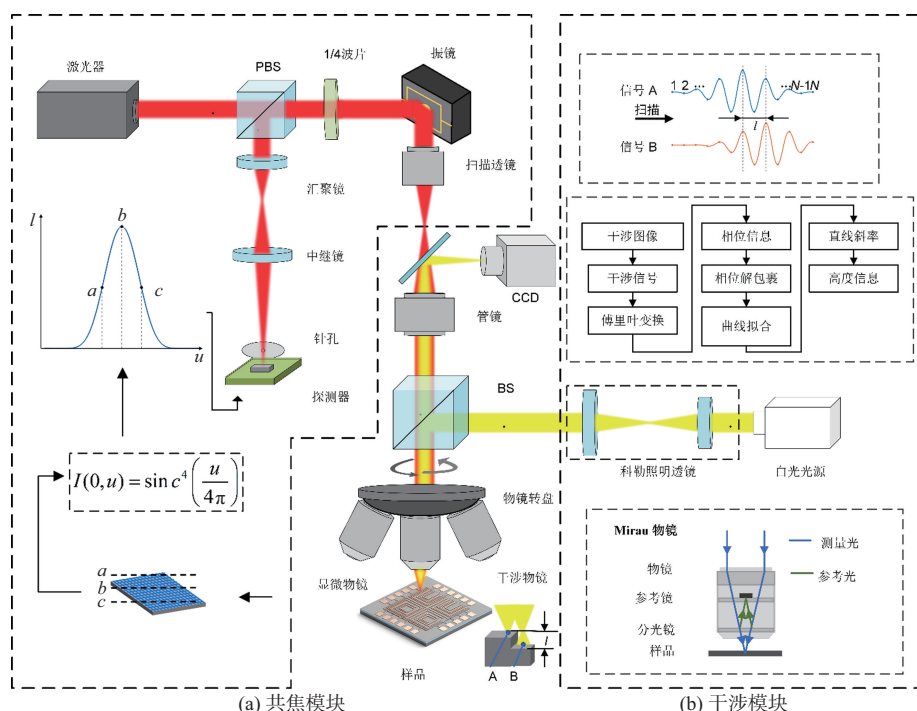


图 1 双光路融合原理图

BS, 被转折向下进入主光路。两束照明光在 BS 处完成物理合束, 共用同一光轴进入测量物镜。物镜转盘集成显微物镜与干涉物镜, 实现两种方式在统一坐标系下的原位测量。

在光路返回阶段, 光沿共用主光轴向上返回后, 会根据各自的光学特性在系统中分离。

对于激光共焦光路, 如图 1 (a) 所示, 携带样品表面形貌信息的反射光束沿原光路返回, 经 PBS 反射进入收集透镜, 光束经收集透镜会聚和中继镜放大后, 通过针孔滤除杂散光, 最后通过光电探测器采集光强信号。理想共焦系统的三维强度点扩散函数为

$$I(v, u) = \left| 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v\rho) \exp(-j u \rho^2 / 2) \rho d\rho \right|^4 \quad (1)$$

式中, ρ 为归一化的光瞳径向极径, $P(\rho)$ 为光瞳函数; J_0 为零阶第一类贝塞尔函数。则其对应的轴向点扩散函数为

$$I(0, u) = \sin^4\left(\frac{u}{4\pi}\right) \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 共焦系统在焦点附近具有最强响应。测量时, 利用位移台轴向扫描得到各点的轴向响应曲线, 再通过峰值位置确定对应的轴向高度。

共焦二维横向信息采用振镜扫描获取, 振镜扫描系统中包括振镜、扫描透镜、管镜和显微物镜, 其光路原理图如图 2 所示。当振镜在 45 度角度上偏转角度 φ 时, 反射光束的偏转角为 2φ 。扫描透镜、

管镜和物镜的焦距分别为 f_s 、 f_t 和 f_o , 根据几何成像原理, 此时被测样品表面的光斑位置 Δx_2 为

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 f_o / f_t' = f_s f_o \tan(2\varphi) / f_t' \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 改变 MEMS 振镜的控制信号, 使振镜在 X 和 Y 方向上发生偏转, 会聚在物镜焦平面的光斑横向位置也会发生相应变化, 从而实现光束偏转扫描。将各采样点的高度信息与横向空间位置结合, 得到待测表面的高度分布, 进而恢复三维形貌。

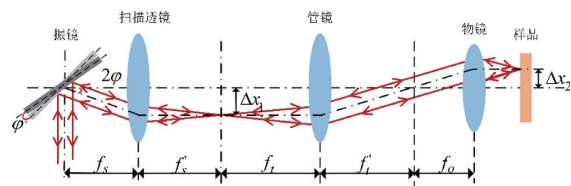


图 2 振镜扫描原理图

而对于干涉光路, 如图 1 (b), 携带相位信息的返回光直接向上穿过 BS 与管镜, 经分光片反射, 由 CCD 相机捕获实现测量。测量过程中, 沿光轴方向对样品进行垂直移动, 改变参考光与测量光之间的光程差。利用 CCD 相机采集干涉图像, 上位机通过图像提取被测表面干涉信号强度曲线。当光程差为零时, 干涉信号强度出现极大值, 即为相干峰。而相干峰位置即对应着被测表面上各点的高度信息, 如图 1 (b), 当 AB 点高度差为 l 时, 信号 A 与 B 的相干峰位置存在 l 的横向偏移。通过提取干涉信号的相干峰位置, 计算被测表面各点的高度信息, 从而得到表面三维形貌。

本文采取的相干峰提取算法是空间频域法，其算法流程如图 1（b）所示。在数据处理中，首先对像素点 (x,y) 处的离散干涉强度信号进行傅里叶变换，获得包含幅值与相位信息的复数谱 $F(k_j)$

$$F(k_j)=\sum_{n=1}^NI_n\exp(-ik_jZ_n)$$

(4)

由复数谱的虚部和实部可通过反正切运算获得波数 k_j 处的相对相位 ϕ_j 。假设白光干涉系统中二阶以上的色散可近似忽略，相位 ϕ 与波数 k 成线性关系

$$\phi\approx\phi_0+(k-k_0)G_0$$

(5)

式中， G_0 为中心波数 k_0 处的群速度光程差。傅里叶变换后的大部分有用信息包含在相对强度 $|F(k_j)|$ 较大的区域，因此收集该区域一系列相位数据 (ϕ_j,k_j) ，进行相位解包裹并进行线性最小二乘拟合，根据式（5）可知，拟合直线的斜率即对应群速度光程差 G_0 。群速度光程差与实际形貌之间的关系与群折射率 n_G 有关,通过下式将群速度光程差的变化量转化为物理高度差 Δh

$$\Delta h=\Delta G/2n_G$$

(6)

即可完成待测样品表面三维轮廓的测量。

基于上述相干峰提取算法，即可完成每个点轴向高度的获取。在实际表面形貌测量中，扫描步长设定为 100nm，利用 CCD 相机获取全视场范围内各采样点的一系列白光干涉图，采集图像帧数根据样品高度确定。数据处理时，对各像素点进行 FFT 变换，并选取频谱主峰及其前后各 2 个频率采样点，共 5 个频率点作为相位拟合区间，进行相位解包裹和线性拟合，最终由拟合斜率获得高度信息。对每一个有效像素点执行上述运算，即可逐点计算出对应的离散高度阵列。结合二维坐标，最终重建出待测样品的微观三维形貌。

综上所述，系统通过照明合束与共轴探测的设计，利用不同光学特性与分光器件实现两种测量方式的双光路融合。

2 关键因素分析

2.1 共用光路影响因素分析

该系统的共用光路利用分光棱镜进行光路耦合，同时采用共用管镜实现原位测量和系统小型化，需对这两个器件的引入对系统性能的影响进行仿真分析。

2.1.1 共用管镜影响分析

管镜的光学性能直接决定了系统的最终成像质量。综合考虑本系统小型化集成的需求以及成像要求，选取了焦距为 165mm 的管镜作为共用成像透镜。为了验证该管镜在白光干涉与激光共焦

两种模式下的适用性，利用 Zemax 软件构建了系统的光学仿真模型。图 3 和 4 分别展示了该管镜在共焦系统和白光干涉系统中的光路仿真结构。

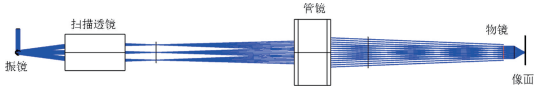


图 3 共焦三维光路仿真

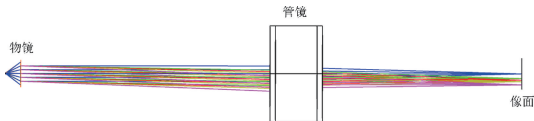


图 4 白光三维光路成像仿真

为了量化评估其成像性能，分别对各视场进行了点列图与波前图分析。表 1 和表 2 分别汇总了 20×物镜下，边缘视场（0.35mm）和中心视场下的共焦和干涉成像质量参数。根据上述仿真数据分析，全视场范围内的弥散圆均方根（RMS）半径均小于艾里斑半径，表明系统成像达到了衍射极限水平；全视场 RMS 波前误差优于 $\lambda/4$ ，满足系统的像质要求。综上所述，选用的管镜在保证系统紧凑结构的同时，能够提供较好的成像质量，满足白光干涉与激光共焦共光路测量的设计指标。

表 1 不同视场下共焦成像质量参数

视场位置	RMS 半径/ μm	艾里斑半径/ μm	RMS 波前误差/ λ
中心视场	0.097	0.5423	0.0201
边缘视场	0.258	0.5503	0.0650

表 2 不同视场下白光成像质量参数

视场位置	RMS 半径/ μm	艾里斑半径/ μm	RMS 波前误差/ λ
中心视场	1.371	8.753	0.0274
边缘视场	2.116	8.753	0.0389

2.1.2 引入棱镜对成像质量的影响

基于 Zemax 软件，分别仿真了共焦光路和白光干涉光路在插入棱镜后的成像质量变化，通过对比边缘视场的 RMS 半径和 RMS 波前误差来评价系统像差水平，其对比结果如表 3 和表 4 所示。可以看出，两个系统的 RMS 半径和波前误差均没有较大改变。

表 3 边缘视场下共焦成像质量参数对比

有无棱镜	RMS 半径/ μm	艾里斑半径/ μm	RMS 波前误差/ λ
加棱镜	0.234	0.5564	0.0596
未加棱镜	0.258	0.5503	0.0650

表 4 边缘视场下干涉成像质量参数对比

有无棱镜	RMS 半径/ μm	艾里斑半径/ μm	RMS 波前误差/ λ
加棱镜	1.989	8.753	0.0338
未加棱镜	2.116	8.753	0.0389

进一步，采用 Huygens PSF 在 X、Y 方向上的半高全宽（FWHM）来评价棱镜对系统横向分辨

力的影响,结果如图5所示。可以看出,加入棱镜后,共焦光路中心视场基本不受影响,边缘视场FWHM略有增大,但最大增量小于 $0.02\mu\text{m}$,占FWHM基值比例不足5%,影响较小;干涉光路FWHM仅在不同视场下出现小幅波动,整体变化不明显。综合上述对比结果,棱镜引入后两种光路的成像质量变化较小,对系统成像性能影响有限。

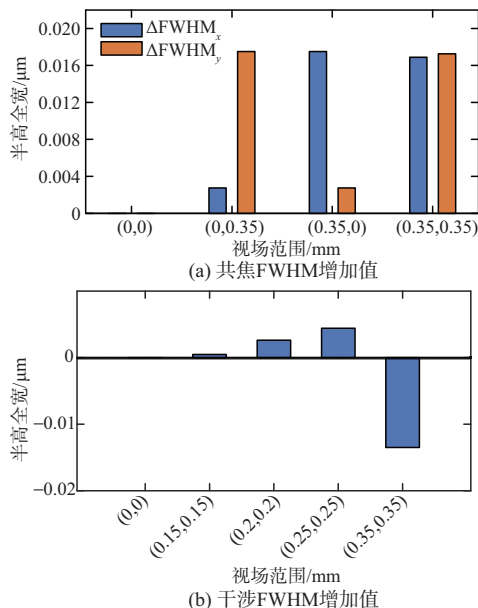


图5 不同视场插入棱镜后FWHM增加值

2.2 白光干涉关键因素分析

2.2.1 汇聚镜焦距

在白光干涉光路中,科勒照明的汇聚镜焦距既影响照明均匀性,也决定着照明视场的大小。基于系统的光路设计要求,并综合考虑传感器的小型化需求,本文选择焦距分别为25mm和160mm的双胶合消色差透镜作为汇聚透镜组,利用Zemax光学设计软件进行建模与仿真,其仿真结构模型如图6所示。

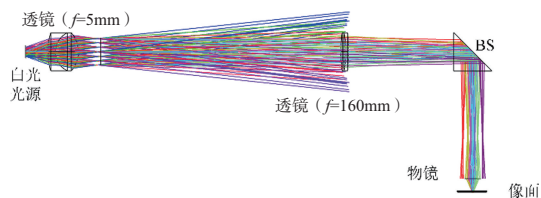


图6 科勒照明汇聚镜焦距仿真

利用几何图像分析对样品面白光照明效果进行分析,得到样品面照明光斑分布图,如图7所示,结果表明,样品面上的白光照明斑近似呈圆形,在 $20\times$ 物镜下光斑半径约为 $500\mu\text{m}$,照明直径约为1.0mm,能够满足本系统不小于 $700\times 700\mu\text{m}$ 的实际视场需求;同时可以看出其照明均匀性较好,有良好的照明效果。

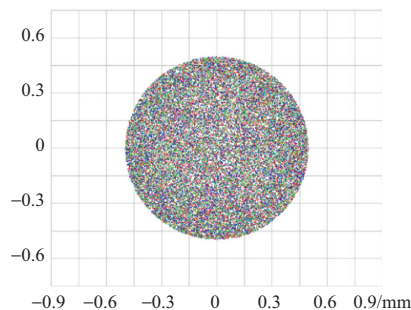


图7 照明效果仿真

2.2.2 相机靶面与适配器参数

CCD相机的靶面尺寸直接决定了系统最终的有效成像视场。为满足本系统的实际测量视场需求,基于光路参数对所需的最小靶面尺寸进行理论计算。已知系统采用的管镜焦距为165mm,物镜标称倍率为 $20\times$ (焦距为9mm)。系统的成像光路几何模型如图2.6所示。

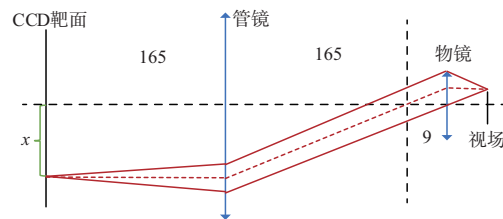


图8 成像光路几何模型图

根据理想光学系统的成像原理,像面半高 y 与物面半高之间满足如下几何相似关系

$$\frac{y}{165} = \frac{0.35}{9} \quad (7)$$

由上式解得,当物面半视场为0.35mm时,对应像面半高 y 为6.42mm,因此靶面所需物理尺寸为 $12.84\times 12.84\text{mm}$ 。综合考虑传感器小型化与市场通用元器件的选型,采用标准的1英寸大靶面CCD工业相机,其有效接收尺寸约为 $12.8\times 9.6\text{mm}$ 。为实现大视场信息的无损接收,在管镜与相机前端引入了缩放倍率为 $0.5\times$ 的光学适配器。该设计使得成像区域位于1英寸靶面的中心,在保证大视场 $700\times 700\mu\text{m}$ 的前提下,有效避免了边缘像差与渐晕效应。

2.3 激光共焦关键因素分析

2.3.1 针孔物理半径

针孔的物理半径作为共焦系统的关键参数,影响着系统的探测灵敏度和分辨力等参数,因此需要对其半径 r_d 进行仿真,选取合适尺寸。

有限圆形针孔函数 $D(v)$ 为

$$D(v) = \begin{cases} 1, & v \leq v_d \\ 0, & v > v_d \end{cases} \quad (8)$$

式中, v 为针孔平面的归一化坐标, v_d 为针孔归一化半径, $v_d = 2\pi r_d \sin \alpha / \lambda$; $\sin \alpha$ 为针孔前收集透镜的数值孔径,则单个透镜的振幅点扩散函数可表述为

$$h(v,u)=2\int_0^1P(\rho)J_0(v\rho)\exp(-j u\rho^2/2)\rho d\rho \tag{9}$$

当照明物镜与收集物镜参数一致，扩散函数均为 h ，则有限针孔条件下的有效强度点扩散函数可表示为

$$I_{vd}(v,u)=|h(v,u)|^2\left[D(v)\otimes|h(v,u)|^2\right] \tag{10}$$

根据式 (10) 分别对系统的轴向响应曲线 $I_d(u)$ 和径向响应曲线 $I_d(v)$ 进行仿真，计算得到的不同针孔尺寸下轴向和横向响应曲线半高宽和峰值如图 9 所示。从图中可以看到，要综合保证共焦系统的横向、轴向分辨力以及信号强度，针孔尺寸 v_d 应取 $3\leq v_d\leq 4$ 。

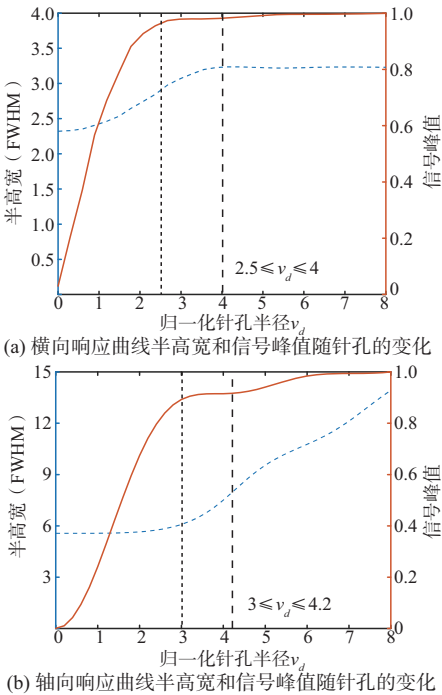


图 9 针孔半径对分辨力的影响

当激光波长 $\lambda=450\text{nm}$ ，收集透镜 $\text{NA}=0.022$ 时，需要选用半径为 $9.77\sim13.03\mu\text{m}$ 的针孔，这会导致较大的调整难度。因此在收集透镜后增设中继放大镜，增大艾里斑主瓣尺寸。根据需求与实际经验，将光斑放大 8 倍，放大后对应的实际针孔直径约为 $156\sim208\mu\text{m}$ ，此时可选 $160\mu\text{m}$ 直径的针孔，这个量级的针孔降低了光路的装调难度，提高了系统的抗干扰性。

2.3.2 中继放大镜焦距

本系统测量光路在收集透镜后设置中继放大镜，以此来对成像到探测器上的艾里斑主瓣直径进行放大。

为满足系统的测量精度要求，目标光斑需实现约 8 倍的放大效果。由几何光学原理可知，若选取较大焦距的放大透镜，将导致像距增加，从而

拉长整个光学系统的机械尺寸。综合考虑所需的放大倍数、物像距分配以及传感器设备的小型化设计，本文最终选用焦距为 10mm 、直径为 8mm 的中继放大透镜。

利用 Zemax 软件对该放大光路进行仿真。设置物高为 1mm ，当物距为 11.25mm 、像距为 90mm 时，像高达到 8mm ，实际放大倍数达到 8 倍，满足前文提到的设计需求。其仿真布局如图 10 所示。

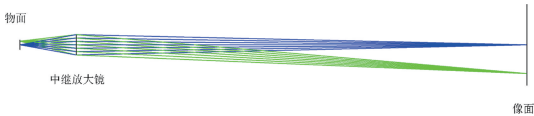


图 10 中继放大镜仿真布局图

2.3.3 振镜偏转角仿真

根据系统共焦光路成像视场需求，在 $20\times$ 物镜下，样品实际成像视场需达到 $700\times700\mu\text{m}$ ，利用 Zemax 建立共焦扫描光路模型，对振镜偏转角进行仿真，在振镜扫描系统中，振镜偏转角决定了光束经偏转后在样品上的落点位置，从而决定系统的实际成像视场。采用多重结构设置 9 种振镜偏转配置，对应其在 X、Y 两个方向的正、负偏转。图 11 给出了不同振镜偏转配置下样品面上的扫描落点分布。通过光线追迹得到样品面上 XY 方向扫描范围如表 5 所示，可以看出，当振镜偏转角达到 $\pm3.7^\circ$ 时，光束中心在样品面上的覆盖范围可达到 $704\times704\mu\text{m}$ ，满足系统设计需求。

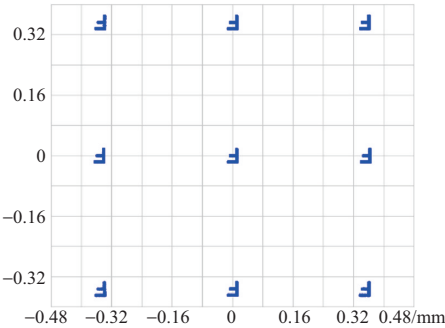


图 11 振镜偏转下扫描落点分布

表 5 样品面扫描范围结果数据

方向	最小坐标/mm	最大坐标/mm	扫描范围/mm
X 方向	-0.352057	0.352057	0.704113
Y 方向	-0.352198	0.352016	0.704214

3 实验验证

3.1 白光干涉-共焦显微测量传感器系统

根据上述测量原理，搭建了多模式白光干涉-共焦测量传感器系统。其各部分的协同处理示意图如图 12 所示。

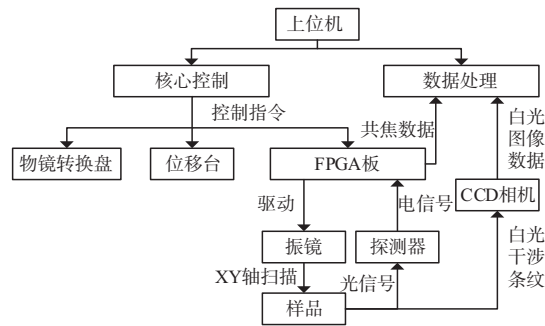


图 12 测量系统协同处理示意图

在该系统中，FPGA 板卡与上位机为主要处理模块。自研 FPGA 板卡通过控制振镜驱动板驱动振镜 XY 轴偏转，完成对样品表面的扫描覆盖，实验中共焦图像采样点数为 1024×1024 ，单幅图像采集时间约为 $0.744 \sim 1.011\text{s}$ 。同时探测器将采集到的样品光信号转换为电信号传输给 FPGA。上位机作为系统的核心控制单元，通过读取指令控制物镜转换盘以及位移台的动作，同时处理 FPGA 采集的共焦图像数据以及 CCD 采集的白光干涉条纹图像，最终实现两种测量方式的三维形貌恢复。

为满足复合测量系统对光源特性的不同需求，选用波长为 450nm 的线偏振激光器作为共焦测量光源，同时选用功率为 2.5W 的白光光源用于干涉测量。在轴向扫描与定焦方面，选用 PI 公司的高精度位移台驱动样品沿光轴方向运动，其轴向分辨率可达 0.5nm ，能够满足本系统高精度垂直扫描的需求。系统关键器件参数选型汇总如表 6 所示。

表 6 系统关键参数选型汇总

器件名称	关键参数	参数取值
共用管镜	焦距/mm	165
白光光源	功率/W	2.5
CCD 相机	靶面/inch	1
适配器	放大倍率/ $\times$	0.5
激光器	波长/nm	450
针孔	直径/ μm	160
中继放大镜	焦距/mm	10
振镜	偏转角/ $^{\circ}$	± 3.7
位移台	分辨率/nm	0.5

最终系统构建实物如图 13 所示，其实际尺寸为 $120 \times 188 \times 226\text{mm}$ ，满足小型化设计需求。



图 13 多模式白光干涉—共焦测量系统实物图

3.2 轴向性能测试

为验证系统轴向性能，通过测量系统噪声水平来测试其轴向重复性。以光滑平面作为待测样品，在同一位置重复测量 10 次，并将低频形貌去除来获得系统本身高频噪声，测得 10 个无形貌信息的 RMS 值，最后计算十组的测量重复性。其 10 次测量结果的 RMS 如图 14 所示。由图中数据计算得出，该系统测量重复性为 1.548nm ，可以说明其轴向重复性优于 2nm 。

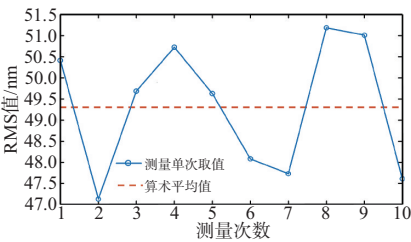


图 14 轴向重复性测试结果

3.3 横向性能比较

为比较系统白光和共焦测量横向分辨力差异，分别用两种测量方式对同一刻线样品进行测量。使用的样品为高为 $5\mu\text{m}$ ，周期为 $50\mu\text{m}$ 的标准台阶光栅刻线，将两种测量结果统一至同一坐标系下，如图 15 所示，从图中可以看出，共焦的测量结果台阶边缘更锐利、清晰，而白光干涉的测量结果台阶边缘较为圆滑，因此可以看出，共焦测量边缘细节表征能力优于白光干涉，为白光干涉与共焦测量相结合实现优势互补提供了横向实验依据。

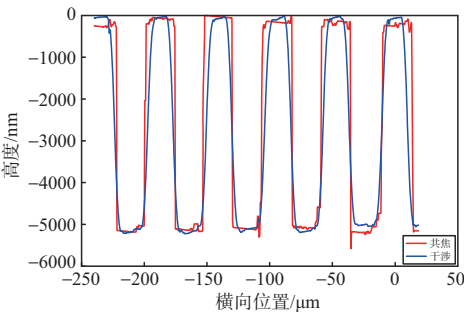
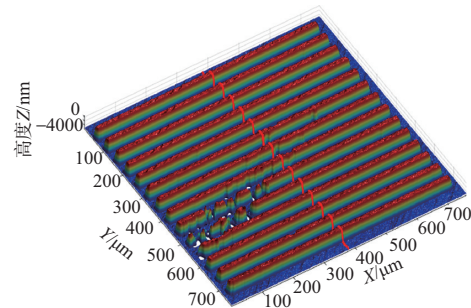


图 15 系统横向分辨力测试结果

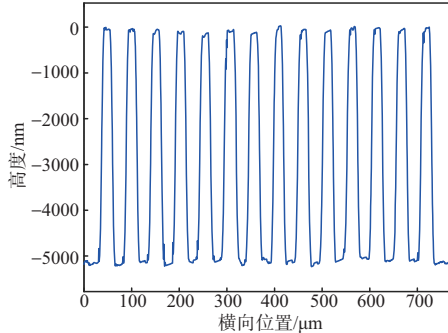
3.4 样品测量实验

3.4.1 标准台阶光栅测量

通过测量高为 $5\mu\text{m}$ ，周期为 $50\mu\text{m}$ 的标准台阶光栅刻线，验证系统的测量精度。分别使用白光干涉模块和激光共焦模块对该样品同一区域进行测量，形貌结果如图 16 和 17 所示。根据形貌恢复结果，可以看出白光模式下测量视场范围大于 $700 \times 700\mu\text{m}$ ，达到视场设计需求；共焦的视场大约为 $600 \times 600\mu\text{m}$ ，略小于设计需求，这主要与振镜实际偏转角偏差、系统装调误差及边缘视场通光孔径限制有关。



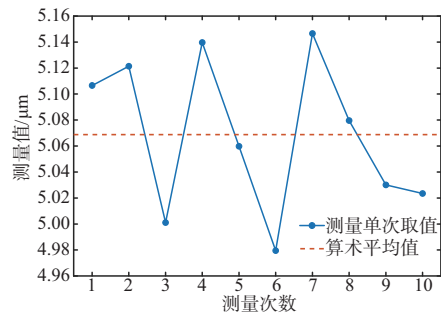
(a) 白光干涉模块三维测量结果



(b) 白光干涉模块截面测量结果

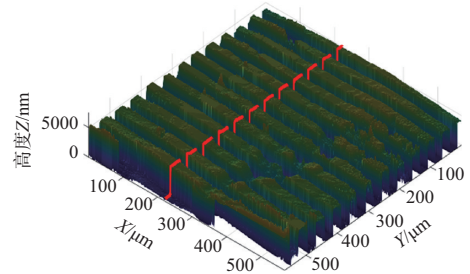
图 16 白光干涉台阶测量结果

在台阶的上、下界面稳定区域内分别选取 10 个点求平均来计算系统一次所测台阶高度，并进行 10 次重复测量。两种测量方式的测量结果如图 18 所示，白光干涉的高度测量结果平均值为 $5.069\mu\text{m}$ ，标准差为 59.24nm ，共焦的结果平均值为 $5.060\mu\text{m}$ ，标准差为 92.53nm 。对比测量结果可知，两种方式测量结果一致，且标准差均小于标

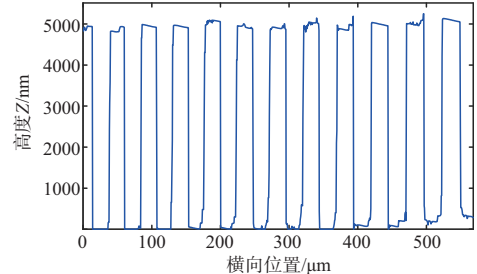


(a) 白光干涉 10 次测量结果

称高度的 2%，表明白光干涉与共焦均可准确表征被测样品的三维形貌信息。



(a) 共焦模块三维测量结果

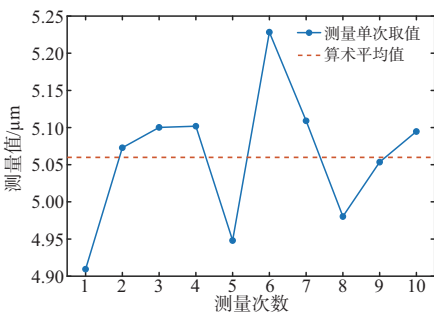


(b) 共焦模块截面测量结果

图 17 共焦台阶测量结果

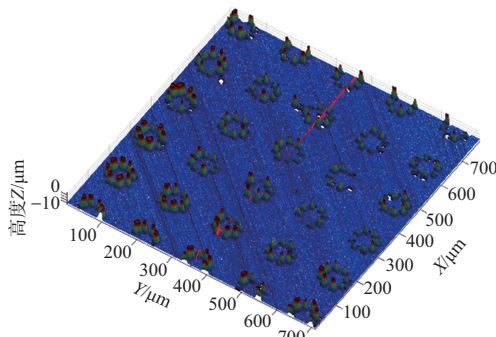
3.4.2 半导体晶圆测量

采用两种测量方式对半导体晶圆表面进行测量，其测量结果如图 19 所示。白光干涉模式测量的晶圆焊点高度为 $10.11\mu\text{m}$ ，共焦模式测得的高度为 $10.38\mu\text{m}$ 。两种测量方式均能够获得晶圆表面的三维形貌分布，样品表面的阵列状微结构及局部凸起特征均能够被有效识别。

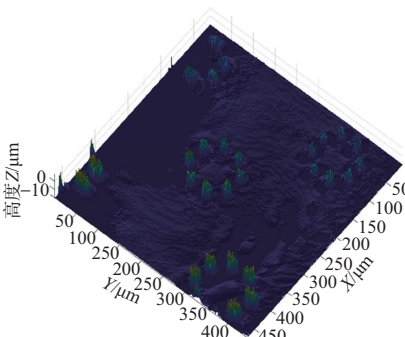


(b) 激光共焦 10 次测量结果

图 18 台阶刻线高度 10 次重复测量结果



(a) 白光干涉测量结果



(b) 激光共焦测量结果

图 19 半导体晶圆测量结果

4 结 论

本文提出了一种基于白光干涉与激光共焦双光路融合原理的高分辨三维形貌测量方法,并完成了光学测量传感器的搭建。该传感器通过共用管镜与分光棱镜实现了白光干涉和共焦光路的同轴合束,并引入振镜实现共焦模式下的横向扫描,提高了测量区域选择的灵活性。实验结果表明,系统能够完成白光干涉与激光共焦双模式三维形貌测量;光滑平面测试中,系统轴向重复性优于 2nm;标准台阶光栅样品重复测量中,两种模式测得的台阶高度标准差均小于标称高度的 2%。同时,半导体晶圆表面形貌测量结果表明,该系统能够识别晶圆表面的阵列状微结构和局部凸起特征。白光干涉模块可用于表面高度轮廓恢复,共焦模块可对边缘细节和局部结构进行补充表征,两种测量模式在形貌信息获取方面具有互补性。该方法为复杂微纳结构的多模式三维形貌测量提供了一种技术途径。

参考文献:

- [1] 高思田,李琪,施玉书,等.我国微纳几何量计量技术的研究进展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1822—1829.
Gao Sitian, Li Qi, Shi Yushu, et al. Research progress of micro/nano geometric metrology technology in China[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1822—1829.
- [2] 范松如,范朦,陈冬晖,等.基于时域相移技术的结构光三维微纳形貌检测方法[J].光电工程,2021,48(4):200430.
Fan Songru, Fan Meng, Chen Donghui, et al. Structured-light 3D micro/nano morphology measurement method based on temporal phase-shifting technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(4): 200430.
- [3] Wu Z, Li A, Xue R, et al. High-precision surface profilometry on a micron-groove based on dual-comb electronically controlled optical sampling[J]. Applied Optics, 2023, 62: 8793—8797.
- [4] De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 1—65.
- [5] 李桥林,刘健志,吴柏荣,等.微纳表面光学精密测量技术及仪器(特邀)[J].激光与光电子学进展,2026,63(05):50—84.
Li Qiaolin, Liu Jianzhi, Wu Bairong, et al. Optical precision measurement technologies and instruments for micro/nano surfaces (Invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2026, 63(5): 50—84.
- [6] O'Mahony C, Hill M, Brunet M, et al. Characterization of micro-mechanical structures using white-light interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(10): 1807—1814.
- [7] 马龙,李颖,郝敬堂,等.白光干涉信号相位噪声分析与抑制方法研究[J].计测技术,2026,46(1):105—128.
Ma Long, Li Ying, Hao Jingtang, et al. Analysis and suppression methods of phase noise in white-light interferometric signals[J]. Metrology & Measurement Technique, 2026, 46(1): 105—128.
- [8] Lei Z, Liu X, Chen L, et al. A novel surface recovery algorithm in white light interferometry[J]. Measurement, 2016, 80: 1—11.
- [9] 王代君,陈春根,朱丽华,等.白光干涉数据的三维去噪研究[J].光电工程,2015,42(3):60—65.
Wang Daijun, Chen Chungen, Zhu Lihua, et al. Three-dimensional denoising of white-light interferometric data[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(3): 60—65.
- [10] Lehmann P, Tereschenko S, Xie W. Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2016, 4(2): 024004.
- [11] Zhang J, Yuan Q, Fan X, et al. Quantitative evaluation of the batwing effect on depth measurement in coherence scanning interferometry for rectangular gratings[J]. Photonics, 2024, 11: 341.
- [12] 聂磊,谢怡君,徐怡心,等.白光干涉测量系统中的相位噪声抑制方法研究[J].光学学报,2025,45(07):119—128.
Nie Lei, Xie Yijun, Xu Yixin, et al. Research on phase noise suppression methods in white-light interferometric measurement systems[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(7): 119—128.
- [13] Ji C, Luo S, Sasaki O, et al. Exact surface measurement based on phase error insensitive method for white-light scanning interferometer[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2024, 12: 025025.
- [14] Li Y, Yuan Q, Huo X, et al. Fourier ptychographic coherence scanning interferometry for 3D morphology of high aspect ratio and composite micro-trenches[J]. Light: Science & Applications, 2026, 15: 93.
- [15] 青乐康.基于白光干涉的高精度形貌恢复技术研究[D].成都:电子科技大学,2025.
Qing Lekang. Research on high-precision morphology reconstruction technology based on white-light interferometry[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [16] Artigas M. Imaging confocal microscopy[M]//Leach R. Optical Measurement of Surface Topography. Berlin: Springer, 2011: 237—286.
- [17] 谭久彬,张杰.微型差动式共焦自聚焦光聚焦探测系统[J].光学学报,2003,23(2):202—206.
Tan Jiubin, Zhang Jie. Miniature differential confocal auto-focusing optical detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 202—206.
- [18] 杨帅,邱丽荣,汤亮,等.激光差动共焦干涉高精度测量技术及仪器[J].光学学报,2023,43(15):46—54.
Yang Shuai, Qiu Lirong, Tang Liang, et al. High-precision laser differential confocal interferometric measurement technology and instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 46—54.
- [19] Artigas R, Laguarda F, Cadevall C. Dual-technology optical sensor head for 3D surface shape measurements on the micro- and nanoscales[C]//Optical Metrology in Production Engineering. Proceedings of SPIE, 2004, 5457: 166.
- [20] 深圳市中图仪器股份有限公司.一种用于实现两种表面三维轮廓测量的光学测量装置:CN201920127563.5[P].2019-08—13.
Shenzhen Zhongtu Instrument Co., Ltd. Optical measuring device for realizing two kinds of three-dimensional surface profile measurement: CN201920127563.5[P]. 2019-08-13.
- [21] Niehues J, Lehmann P. Improvement of lateral resolution and reduction of batwings in vertical scanning white-light interferometry[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. SPIE, 2011, 8082: 278—285.
- [22] Wang W, Gu K, You X, et al. Interference confocal microscope integrated with spatial phase shifter[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1358.