

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.09

# 基于数字微镜设备的全场谱域干涉技术与应用

张金旭, 杨越棠, 吴冠豪\*

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 现有的全场谱域干涉技术依赖于波长或振镜扫描, 制约了其单次探测全场信息的能力。针对该问题, 本文提出了基于数字微镜设备的全场谱域干涉技术, 通过数字微镜设备对空间光场分布进行编码, 采集顺序加载掩膜对应的时变谱域信息, 进一步解码得到空间各像素处的幅值响应, 结合测量算法实现全场信息获取。实验结果表明: 该技术能够有效实现高精度光谱干涉距离测量和光谱椭偏膜厚测量, 且显著提升了全场测量效率。基于数字微镜设备的全场谱域干涉技术适用于稀疏表面的三维结构快速恢复和重建, 为抛光晶圆、硅绝缘片及键合界面的厚度与形貌高效表征提供了有力支撑。

**关键词:** 数字微镜设备; 谱域干涉; 全场测量; 微纳检测; 空间光场编码; 解码分析; 三维结构重建; 形貌表征

中图分类号: TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 01-0140-07

## Full-field spectral-domain interferometry and its application based on a digital micromirror device

ZHANG Jinxu, YANG Yuetang, WU Guanhao\*

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Current full-field spectral-domain interferometry relies on wavelength or galvanometer scanning, which limits its ability to acquire full-field information in a single detection. To address this issue, this paper proposes a full-field spectral-domain interferometry technique based on a Digital Micromirror Device (DMD). By encoding the spatial light field distribution via the DMD, time-varying spectral signals corresponding to sequentially loaded masks are acquired, which are further decoded to obtain the amplitude response at each spatial pixel. Combined with the measurement algorithm, full-field information retrieval is achieved. Experimental results demonstrate that the proposed technique enables high-precision spectral interferometric distance measurement and spectroscopic ellipsometric film thickness measurement, while significantly improving full-field measurement efficiency. The DMD-based full-field spectral interferometry technique is suitable for rapid three-dimensional structure recovery and reconstruction of sparse surfaces, providing strong support for efficient thickness and topography characterization of polished wafers, Silicon-On-Insulator (SOI) substrates, and bonded interfaces.

收稿日期: 2025-10-16; 修回日期: 2025-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0617801)

引用格式: 张金旭, 杨越棠, 吴冠豪. 基于数字微镜设备的全场谱域干涉技术与应用[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 140-146.

Citation: ZHANG J X, YANG Y T, WU G H. Full-field spectral-domain interferometry and its application based on a digital micromirror device [J]. Metrology &amp; Measurement Technology, 2026, 46(1): 140-146.



**Key words:** digital micromirror device; spectral-domain interferometry; full-field measurement; micro-nano metrology; spatial light field encoding; decoding analysis; three-dimensional structure reconstruction; morphological characterization

## 0 引言

精密测量是“中国制造2025”的关键部分<sup>[1-2]</sup>, 表面特征分布和尺寸厚度的高精度、高效率表征, 对集成电路、微机电系统、增材制造、光电子器件等具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。微纳形貌检测分为非干涉和干涉式2类, 非干涉式技术通常基于时差测量或强度衰减等原理探测, 其中条纹结构光法<sup>[6]</sup>和共焦法<sup>[7]</sup>通过直接获取图像或强度信息实现深度复原, 然而, 结构光法测量精度受限且存在投影遮挡问题; 共焦法测量速度受限, 完成全场测量通常需要数分钟至数小时<sup>[8]</sup>。

干涉式检测技术更为常用, 其基于光波的相位变化或干涉现象实现亚波长级别的高灵敏度测量, 被广泛用于表面形貌的高效、在线、无损检测<sup>[9]</sup>。干涉式技术的典型方法及特性如下: 移相法<sup>[10]</sup>可溯源至单波长相位实现高精度全场测量, 而系统量程和精度受限于光源参数, 通常适用于表面光滑或深度有限的特征测量。相干扫描法<sup>[11-12]</sup>通过机械臂长扫描或脉冲扫描实现全场形貌测量, 由于面阵探测器受到数据传输带宽的限制, 难以兼顾高像素密度和高帧速率。当轴向深度范围较大时, 相干扫描法需要获取大量的干涉图以确定相干位置, 导致动态性能低、环境敏感性高和计算负担大等问题。双光梳法<sup>[13]</sup>以重频差为刷新速率获取距离信息, 可实现高刷新率和大量程测距, 但纳米级高精度测量对光源系统要求较高, 通常采用紧密锁定等技术手段<sup>[14]</sup>。随着集成电路工艺和三维结构复杂度的不断提高, 谱域干涉技术<sup>[15]</sup>由于具备层析穿透能力、测量精度高、高度量程大等优势, 被广泛用于表面检测和芯片制造<sup>[16]</sup>。然而传统谱域干涉技术只能进行单点测量, 若想实现全场测量, 则需要应用额外的扫描装置或复杂光纤束<sup>[17-18]</sup>, 测量系统体积大、操作效率低。

为充分发挥谱域干涉的技术优势, 实现高通量和高测速表面形貌测量, 本文提出了基于数字微镜设备(Digital Micromirror Devices, DMD)的全场

谱域干涉测量技术, 利用DMD对空间光场分布进行高效编码, 获得顺序加载掩膜对应的时变谱域幅值数据, 解码分析得出空间各像素处的幅值响应, 结合相关算法实现全场测量。开展微毫米级台阶高度测量和纳米级薄膜厚度解算实验, 验证基于DMD的全场谱域干涉技术的应用效果。

## 1 基本原理

谱域干涉测量原理如图1(a)所示( $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 均为反射镜, BS为分光镜), 利用光谱分析仪探测两臂干涉后的各光频处的幅值信息, 通过傅里叶或希尔伯特变换、取辐角、解包裹等步骤可提取相频信息, 进一步求取斜率, 计算得到轴向深度 $L$ <sup>[19]</sup>, 谱域干涉已广泛应用于微毫米级绝对距离测量领域。当待求深度在傅里叶域无法分辨时, 如图1(b)所示( $E$ 为电场,  $f$ 为频率), 可结合光谱椭圆偏法, 获取样品引入前后水平偏振分量 $p$ 和垂直偏

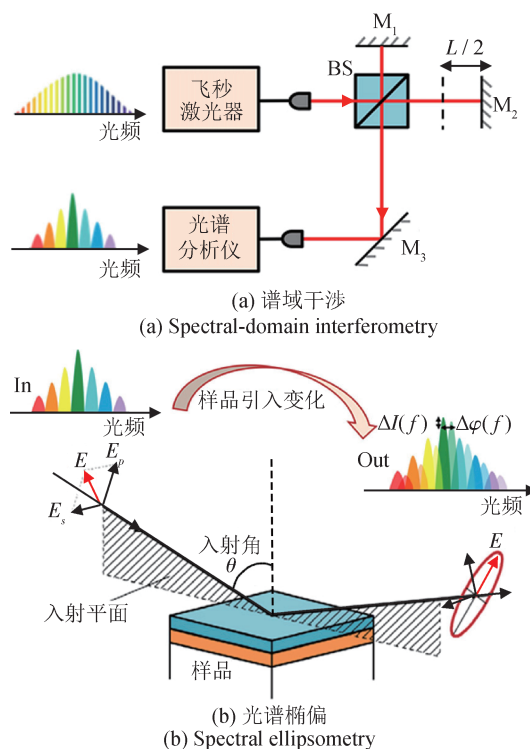


图1 谱域干涉及光谱椭圆偏测量原理

Fig.1 Principle of spectral-domain interferometry and spectral ellipsometry

振分量  $s$  的强度比  $\Delta I$  和相位差  $\Delta\varphi$  的变化量, 结合菲涅尔公式迭代, 可实现纳米级膜厚测量<sup>[20]</sup>。

为了探测前述所需的相频信息, 接收器件的一个维度需要捕获光谱值, 这意味着二维探测器只能进行线场信息测量。因此, 为了获取全场轴向信息, 通常需要结合位移台或振镜进行单线或逐点扫描<sup>[21]</sup>。

本文将数字微镜设备引入谱域干涉实现全场测量。基于DMD的编码测量为组合式探测, 也被称为复用技术或多通道技术<sup>[22]</sup>。设不同空间坐标的待测点函数为  $X(m, n)$ , 其可以排列为列向量  $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$ , 其中,  $N$  为空间像素数,  $N = m \times n$ 。因此, 当全采样时, 一次全基测量包含  $N$  次不同编码掩膜(掩膜大小为  $m \times n$ ), 将单次加载的  $m \times n$  编码矩阵按行展开为  $1 \times N$  行向量, 即  $W_i (i = 1, \dots, mn)$ , 共构成了大小为  $N \times N$  的编码矩阵  $W$ ,  $W = [W_1, W_2, \dots, W_N]^T$ , 则测量结果列向量  $I$  为

$$I = WX + E \quad (1)$$

式中:  $E$  为误差列向量, 即不同编码测量下的探测

器测量噪声,  $E = [E_1, E_2, \dots, E_N]^T$ 。

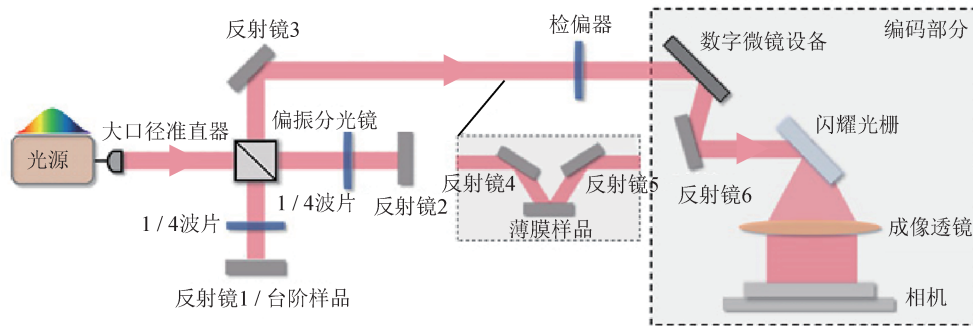
设空间像素  $k (k = 1, \dots, mn)$  在光频  $f_i$  处强度为  $X_k(f_i)$ , 加载掩膜序列  $i$  时相机探测的强度为  $I_i(f_i)$ , 编码矩阵中各元素为  $w_k$ ,  $E_i(f_i)$  为掩膜序列  $i$  的探测器测量噪声, 则有

$$I_i(f_i) = \sum_{k=1}^N w_k X_k(f_i) + E_i(f_i) \quad (2)$$

依次遍历各光频坐标, 结合  $N$  次掩膜加载过程, 矩阵解算后获取待测目标的各空间坐标沿光频的强度分布, 进而实现干涉测距及椭圆偏测量。

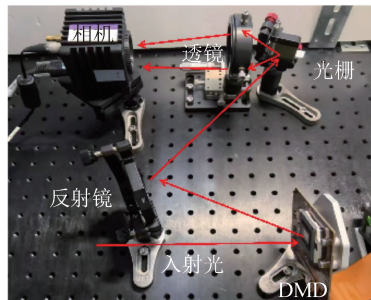
## 2 实验系统

基于DMD编码的全场谱域干涉技术如图2所示, 光源为实验室自制的非线性偏振旋转型飞秒脉冲激光器, 光源重频未锁定, 经过掺铒光纤放大器后输出功率约为 50 mW, 光源中心波长为 1 550 nm, 半高宽约为 40 nm。脉冲光经大口径准直器后, 输出空间光直径约为 14 mm, 由偏振分光镜分为两束正交偏振光, 分别经过 1/4 波片、反射镜/台阶样品后, 再次合光, 经检偏器进入后续编码调制部分。当检测薄膜样品时, 需在光路中插



(a) 全场谱域干涉实验装置

(a) Experimental setup of the full-field spectral-domain interferometry



(b) 编码部分实物图

(b) Photograph of the coding section



(c) DMD掩膜加载过程

(c) Loading process of DMD mask

图2 基于DMD编码的全场谱域干涉技术

Fig.2 Schematic of DMD-based full-field spectral-domain interferometry

入反射镜4和反射镜5,使得光束斜入射待测薄膜样品;当检测台阶样品时,无需引入该部分。

图2(b)为编码部分实物图,DMD加载时变的掩膜序列以改变入射光束的选通部分,闪耀光栅(600线/mm)将空间光色散,光谱沿空间展开,被选通的空间光经过光栅色散,最终由成像透镜聚焦于相机(1 024像素,像元大小为25 μm)。图2(c)展示了DMD掩膜加载过程,使用的DMD型号为DLP6500,其分辨力为1 920×1 080,微镜间距为7.56 μm,微镜调制速率可达9.5 kHz,加载编码选择S型哈达玛编码矩阵。

当探测微米级至毫米级台阶面型时,首先基于反射镜1标定初始波面分布,DMD加载时变的掩膜序列,探测时变的干涉信号,由式(2)解编码,即可得到各空间坐标对应的光谱信号,根据图1(a)描述的原理实现测量;之后在实验系统中放入待测台阶,重复上述步骤。当探测纳米级膜

厚分布时,利用反射镜1和反射镜2构成正交偏振光的固定光程差,在反射镜4和反射镜5组成的可动部分中,采用未镀膜的纯硅片标定系统的初始相位分布,加载编码后,再放入待测薄膜样品,经过编码,根据图1(b)原理获取各空间坐标的椭圆偏振光谱相位差,实现膜厚测量。

对DMD编码和解码的过程进行仿真验证,空间像素划分为5×3区域,加载大小为15×15的编码矩阵,空间光程分布在0.5 mm和1 mm附近,仿真引入随机白噪声和非线性响应等误差。图3(a)和图3(b)展示了2张不同编码掩膜对应的归一化编码光谱图,由于覆盖空间光程分布差异,其在谱域呈现不同的条纹振荡,通过矩阵运算,即可获得空间各像素的相频斜率解,从而解耦光程分布。图3(c)为空间15个像素点的测距误差图,图3(d)展示了100次仿真对应的 $x_1$ 和 $x_2$ 处重复性测距结果,标准差优于110 nm。

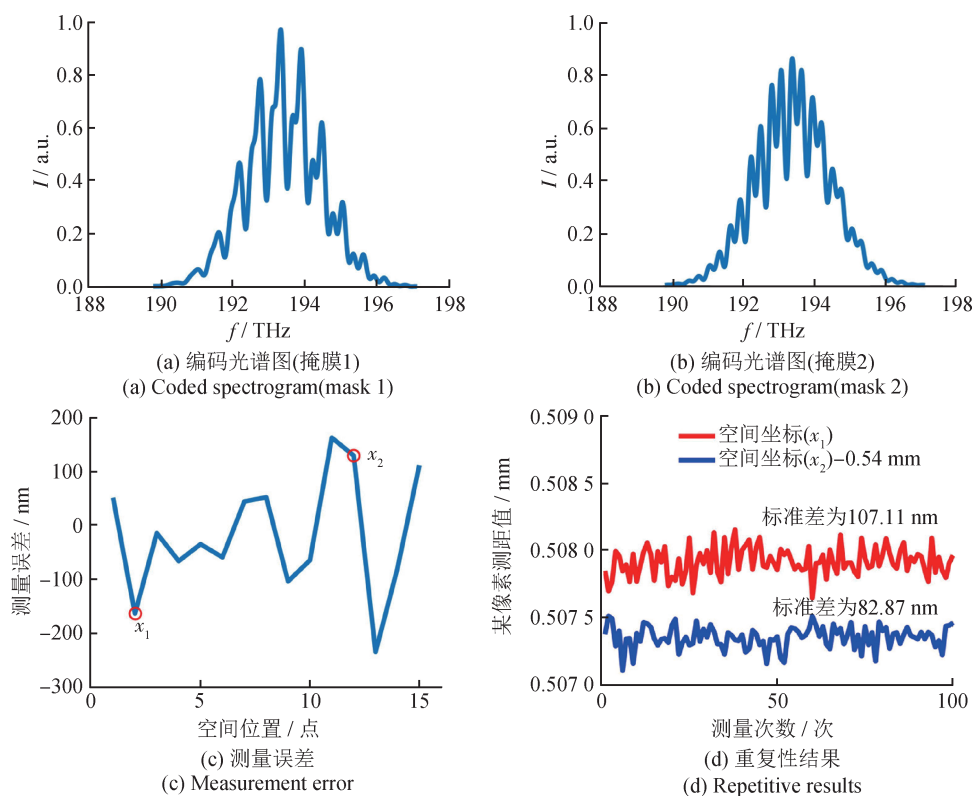


图3 编码仿真结果

Fig.3 Simulation results of encoding process

### 3 实验结果

开展实验验证基于DMD的全场谱域干涉技术

的台阶面型恢复效果,台阶高度经商用白光干涉仪标定,参考值分别为19.765 μm和490.435 μm,如图4(a)和图4(b)所示。实验加载大小为255×

255的S型哈达玛编码矩阵,将空间像素划分为 $17 \times 15$ 区域,其中,每个像素覆盖 $50 \times 50$ 微镜单元,空间分辨力为 $0.38 \text{ mm} \times 0.38 \text{ mm}$ ,样品测量区域约为 $6.43 \text{ mm} \times 5.67 \text{ mm}$ 。由于测量光路采用平行设计,掩膜编码区域和编码单元与实际测量面积和分辨力相等。图4(c)和图4(d)分别展示了 $20 \mu\text{m}$ 和 $490 \mu\text{m}$ 台阶测量结果,实验测量台阶高度分

别为 $20.087 \mu\text{m}$ 和 $490.004 \mu\text{m}$ ,与商用仪器参考高度值的偏差分别为 $0.322 \mu\text{m}$ 和 $0.431 \mu\text{m}$ 。进一步进行重复性测量,DMD采用 $9.5 \text{ kHz}$ 速率调制,加载全遮挡掩膜进行掩膜顺序指示,单次测量时间为 $26.9 \text{ ms}$ 。图4(e)和图4(f)展示了某像素处的30次重复性测量结果,标准差分别为 $247 \text{ nm}$ 和 $256 \text{ nm}$ 。

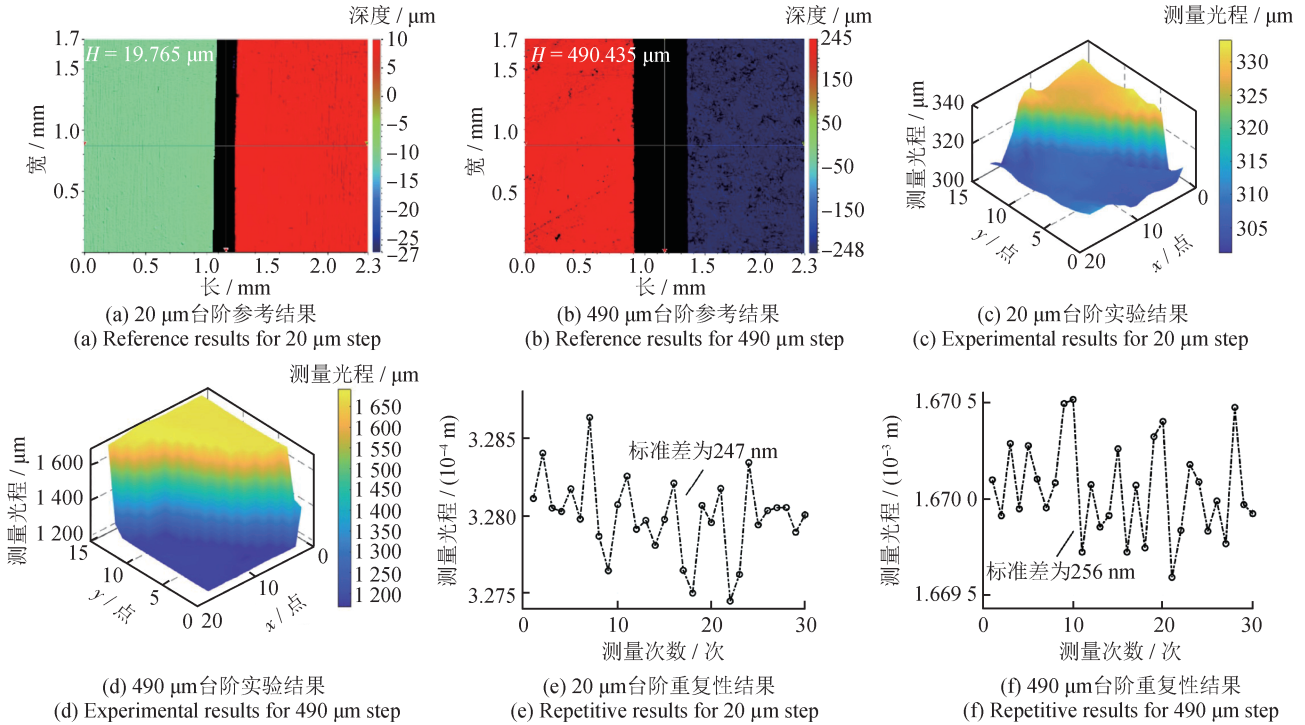


图4 台阶测量结果

Fig.4 Measurement results of steps

在光路中引入由反射镜4和反射镜5构成的反射模块,开展实验验证单抛硅基上镀二氧化硅薄膜的膜厚测量结果。首先,放置未镀膜的单面抛光纯硅片标定系统的初始相位,之后将待测薄膜样品放置于光路。利用商用椭偏仪(型号为V-VASE)测量样品,得到膜厚参考值为 $92.00 \text{ nm}$ 。椭偏迭代对相位精度要求较高,因此加载大小为 $15 \times 15$ 的S循环矩阵,空间区域划分为 $5 \times 3$ 像素点,经过微镜数量扫描,选用 $120 \times 120$ 微镜单元作为单个像素测量区域,对应空间分辨力为 $0.91 \text{ mm} \times 0.91 \text{ mm}$ ,测量膜厚范围为 $4.54 \text{ mm} \times 2.72 \text{ mm}$ 的矩形区域,DMD工作模式增加全遮挡掩膜进行掩膜顺序指示,单次全场膜厚测量的时

间为 $1.68 \text{ ms}$ 。

样品沿各像素的膜厚分布如图5所示。全场膜厚测量平均值为 $93.67 \text{ nm}$ ,以变异系数(不同像素膜厚测量值标准差与平均值之比)评价薄膜均匀性,经计算,变异系数为 $2.33\%$ ,30次测量的重

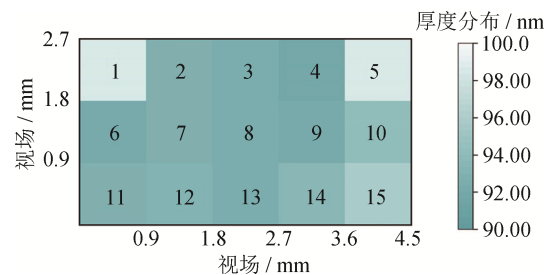


图5 膜厚测量结果

Fig.5 Measurement results of film thickness

复性误差(以各像素30次测量标准差的平均值计算)为0.54 nm, 而各像素点间重复性误差的标准差为0.40 nm。实验所测结果平均值与商用仪器参考膜厚值偏差小于2 nm。设置V-VASE型商用椭圆仪校准光谱范围为1 500~1 600 nm, 波长分辨力为1 nm, 采用高精度模式运行, 单点测量时间约为1 min, 测量5×3像素点耗时10 min以上。本文提出的方法在保证亚纳米级测量精度的前提下, 用时降低至1.68 ms, 测量效率提升了5个数量级。

此外, 通过光路设计和算法优化, 可补偿DMD自身微纳器件产生的衍射效应, 已经诞生了双DMD衍射预补偿、编码矩阵修正等解决方法<sup>[23-24]</sup>。当成像目标满足稀疏特性时, 可以通过排序掩膜矩阵编码组, 实现在单次完整测量中调制掩膜次数少于测量点次数的压缩采样, 在不损失测量精度的前提下进一步提高测量效率。

#### 4 结论

为解决谱域干涉难以单次探测全场信息的问题, 本研究团队提出了基于DMD的全场谱域干涉技术, 利用空间光场调制实现了无需波长或位移扫描的全场谱域干涉测量。开展光谱干涉距离测量和光谱椭圆膜厚测量实验, 展示了该技术微纳级的测量精度和毫秒级的测量效率。基于DMD的全场谱域干涉技术有望应用于半导体晶圆、柔性显示面板、光学元件中低频面形误差检测等领域。得益于全场光谱信息的获取, 未来可进一步实现基于编码的高光谱成像、单系统多维测量, 结合压缩采样和神经网络, 进一步提高系统性能<sup>[25-26]</sup>。

#### 参考文献

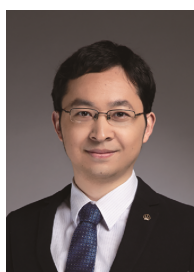
- [1] 谭久彬. 超精密测量与高端装备制造质量[J]. 中国工业和信息化, 2020(6): 18-23.
- TAN J B. Ultra-precision measurement and manufacturing quality of high-end equipment[J]. China Industry & Information Technology, 2020(6): 18-23. (in Chinese)
- [2] 周济. 智能制造: “中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- ZHOU J. Intelligent manufacturing — main direction of "made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese)
- [3] DE GROOT P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography [J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 1-65.
- [4] ORJI N G, BADAROGLU M, BARNES B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices [J]. Nature Electronics, 2018, 1(10): 532-547.
- [5] GUO T. Microelectromechanical systems surface characterization based on white light phase shifting interferometry [J]. Optical Engineering, 2011, 50(5): 053606.
- [6] YU J, GAO N, ZHANG Z H, et al. High sensitivity fringe projection profilometry combining optimal fringe frequency and optimal fringe direction [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106068.
- [7] HAMILTON D K, WILSON T. Three-dimensional surface measurement using the confocal scanning microscope [J]. Applied Physics B, 1982, 27(4): 211-213.
- [8] TIZIANI H J, UHDE H M. Three - dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy [J]. Applied Optics, 1994, 33(10): 1838-1843.
- [9] 李铭聪, 刘盼, 史建华. 基于白光干涉技术的表面微观形貌测量方法 [J]. 计量与测试技术, 2024, 51(9): 109-111.
- LI M C, LIU P, SHI J H. Surface microtopography measurement based on white -light interferometry [J]. Metrology & Measurement Technique, 2024, 51(9): 109-111. (in Chinese)
- [10] LU S H, LEE C C. Measuring large step heights by variable synthetic wavelength interferometry [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(9): 1382.
- [11] DE GROOT P, DECK L. Three-dimensional imaging by sub-nyquist sampling of white-light interferograms [J]. Optics Letters, 1993, 18(17): 1462-1464.
- [12] JOO W D, KIM S, PARK J, et al. Femtosecond laser pulses for fast 3-D surface profilometry of microelectronic step - structures [J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15323-15334.
- [13] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [14] WANG C, DENG Z J, GU C L, et al. Line-scan spectrum -encoded imaging by dual-comb interferometry [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1606-1609.
- [15] SCHWIDER J, ZHOU L. Dispersive interferometric profilometer [J]. Optics Letters, 1994, 19(13): 995-997.
- [16] JIN J, WAN J, KANG C S, et al. Precision depth mea-

- surement of through silicon vias (TSVS) on 3D semiconductor packaging process [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5011–5016.
- [17] ZHAO H H, ZHANG Z Q, XU X Y, et al. Three-dimensional imaging by frequency-comb spectral interferometry [J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1743.
- [18] KATO T, UCHIDA M, TANAKA Y, et al. One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43778.
- [19] JOO K N, KIM S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5954–5960.
- [20] DEMBELE V, JIN M, CHOI I, et al. Interferometric snapshot spectro-ellipsometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1333–1341.
- [21] SHANG Z Y, WANG J H, DU H B, et al. High-precision measurement of gear tooth profile using line spectral confocal method [J]. *Measurement*, 2023, 223: 113779.
- [22] EDGAR M P, GIBSON G M, PADGETT M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13–20.
- [23] GRAFF D L, LOVE S P. Adaptive hyperspectral imaging with a MEMS-based full-frame programmable spectral filter [J]. *Next - Generation Spectroscopic Technologies VII*, 2014, 9101: 910111.
- [24] LIU W L, LIU X B, WANG S, et al. Reconstruction of Hadamard coded spectral data based on diffraction theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(9): 094201.
- [25] 郗有田, 宋萍, 郝创博. 无线传感网络中大数据量压缩感知编解码算法 [J]. *计测技术*, 2019, 39(3): 28–33.
- QIE Y T, SONG P, HAO C B. Compressed sensing codec algorithm for big data in wireless sensor networks [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2019, 39(3): 28–33. (in Chinese)
- [26] 王晶星, 陈诗琳, 李一鸣, 等. 基于卷积神经网络的压力仪表 OCR 系统 [J]. *计测技术*, 2025, 45(3): 111–122.
- WANG J X, CHEN S L, LI Y M, et al. OCR system for pressure instruments based on convolutional neural network [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(3): 111–122. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



**第一作者:** 张金旭(1999—), 女, 助理研究员, 博士, 2020年获得天津大学学士学位, 2025年获得清华大学博士学位, 主要研究方向为光频梳光谱干涉测量技术、微纳光学干涉传感等。



**通信作者:** 吴冠豪(1981—), 男, 清华大学精密仪器系特别研究员, 博士生导师, 博士, 光电工程研究所所长, 主要从事光频梳及精密测量领域研究。主持国家重点研发计划重点专项、国家自然科学基金、北京市科技计划等项目。已在 *Nature Communications*、*eLight*、*Engineering & Laser & Photonics Reviews* 等国际著名期刊上发表论文 70 余篇, 获“中国计量测试学会科学技术奖”一等奖、“中国机械工业科学技术奖”特等奖、“金燧奖”中国光电仪器品牌榜金奖等奖项, 获得相关授权专利 30 余项。