

文章编号 1004-924X(2025)17-2661-30

## 极紫外光学元件全频段面形误差检测与 缺陷探测技术研究进展

李佳慧<sup>1,2</sup>, 匡翠方<sup>1,2\*</sup>, 徐月暑<sup>2</sup>, 卞殷旭<sup>2</sup>, 梁佳栋<sup>2</sup>, 崔玉栋<sup>1,2</sup>, 刘旭<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江大学 杭州国际科创中心, 浙江 杭州 311215)

**摘要:**极紫外光刻作为半导体制造领域的核心技术,对光学元件表面质量提出了原子级精度的严苛要求,并要求光学元件近乎为零的表面/亚表面损伤。本文聚焦光学元件超精密制造,介绍了光学元件材料特性与制造工艺引起的表面误差形成机理,剖析了不同空间尺度误差检测的技术挑战与研究进展。针对低频面形误差检测,重点分析了绝对检测技术与子孔径拼接检测技术。对于粗糙度检测,分析了白光干涉显微技术、原子力显微技术,超分辨白光干涉技术的研究进展。针对光学元件表面/亚表面缺陷的多模态表征需求,对比了各类电镜、干涉、探针、散射等检测方式的优缺点。最后,基于当前技术瓶颈与高性能光学元件需求,展望了光学元件检测技术向智能化、多物理场耦合表征及原位监测等方向的发展趋势,为关键装备部件国产化提供技术参考。

**关键词:**先进光学制造;光学测量;面形检测;粗糙度检测;缺陷检测

中图分类号:TN247 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253317.2661 CSTR:32169.14.OPE.20253317.2661

## Research progress of full-spatial frequency error measurement and defect detection technology for extreme ultraviolet optical components

LI Jiahui<sup>1,2</sup>, KUANG Cuifang<sup>1,2\*</sup>, XU Yueshu<sup>2</sup>, BIAN Yinxiu<sup>2</sup>, LIANG Jiadong<sup>2</sup>,  
CUI Yudong<sup>1,2</sup>, LIU Xu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou 310027, China;

2. ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, Zhejiang University,  
Hangzhou 311215, China)

\* Corresponding author, E-mail: cfkuang@zju.edu.cn

**Abstract:** Extreme ultraviolet lithography, a pivotal technology in semiconductor manufacturing, imposes atomic-scale precision requirements on optical surfaces and necessitates negligible surface and subsurface damage. This paper addresses ultra-precision fabrication of optical components by first elucidating the mechanisms by which material properties and manufacturing processes induce surface errors. Technical

收稿日期:2025-06-20;修订日期:2025-07-29.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFF722702);中国博士后科学基金面上资助项目(No. 2025M770817)

challenges and recent advances in measuring surface errors across spatial scales are then analyzed. For low-spatial-frequency figure errors, emphasis is placed on absolute measurement methods and sub-aperture stitching techniques. For mid-to high-spatial-frequency roughness, developments in white-light interferometry microscopy, atomic force microscopy, and super-resolution white-light interferometry are reviewed. To meet multi-modal characterization requirements for surface and subsurface defects, the advantages and limitations of complementary detection methods-including electron microscopy, interferometry, scanning probe techniques, and scattering approaches-are comparatively assessed. Finally, against the backdrop of prevailing technical bottlenecks and the demand for high-performance optics, future directions are delineated, highlighting intelligent measurement systems, multi-physical coupled characterization, and in-situ monitoring. This analysis is intended to serve as a technical reference to support domestic production of critical equipment components.

**Key words:** advanced optical manufacturing; optical measurement; surface metrology; surface roughness measurement; defect measurement

## 1 引言

光刻机是集成电路的关键制造装备,其光刻分辨率直接决定了芯片制造的工艺极限。为延续“摩尔定律”,光刻系统通过缩短曝光波长与增大投影系统数值孔径来实现分辨率突破<sup>[1-3]</sup>。目前,极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光刻技术采用 13.5 nm 工作波长<sup>[4]</sup>,由于绝大多数光学材料对极紫外波段存在强吸收特性,极紫外光刻物镜采用反射式光学系统。光刻系统数值孔径的不断增大导致光学元件口径过大,虽然通过大偏离量离轴非球面设计可有效压缩单镜尺寸并减少镜片数量,但由于 EUV 光刻对系统波像差要求极高,ASML NEX 3600 的 EUV 光刻物镜系统光学元件尺寸依旧达到 300 mm~1 m 的大口径<sup>[5]</sup>,且需要在 450 mm 在口径内获得优于 50  $\mu\text{m}$  的面形精度<sup>[6]</sup>。

光刻物镜系统成像质量直接影响光刻精度<sup>[7]</sup>。光学元件表面不同频段的空间尺度误差对系统成像质量具有显著差异<sup>[8-9]</sup>,如图 1 所示。极紫外光刻系统定义光学元件表面空间波长 1 mm 到全口径尺寸的面形误差为低频误差,该误差引起系统成像扭曲;空间波长 1  $\mu\text{m}$  到 1 mm 的误差为中频空间误差(Mid-Spatial Frequency Roughness, MSFR),该误差导致光束产生小角度散射,造成成像对比度下降;空间波长小于 1  $\mu\text{m}$  的误差为高频粗糙度(High-Spatial Frequency Roughness, HSMR)误差,引起光束发生大角

度的散射,导致光能损失<sup>[10]</sup>。极紫外光刻技术对光学元件提出了前所未有的要求:低频面形精度优于 80  $\mu\text{m}$  RMS,中频空间误差需控制在 140  $\mu\text{m}$  RMS 以下,高频表面误差则需达到 100  $\mu\text{m}$  RMS。此外,光学元件缺陷在极端应用场景服役时缺陷会扩展<sup>[11]</sup>,如图 2 所示,因此光刻光学元件需要近乎无表面/亚表面损伤。由于光学元件表面中频误差对系统杂散光影响较大<sup>[12]</sup>,故 ASML 和 Carl Zeiss 公司长期致力于降低中频误差以提升系统性能。目前 ASML NEX 3400 的光刻物镜低频面形优于 75  $\mu\text{m}$  RMS,中频粗糙度优于 85  $\mu\text{m}$  RMS,高频粗糙度优于 100  $\mu\text{m}$  RMS。然而,ASML NEX 3600 EUV 光刻系统对 1 m 级光刻物镜的面形精度提出了 20  $\mu\text{m}$  的超高精度要求,其光学元件尺寸与精度的比例达  $10^{11}$  量级<sup>[13]</sup>。

光学元件在铣磨成型后,需通过分阶段加工检测实现面形精度的逐级收敛<sup>[14]</sup>:粗抛光阶段一般采用三坐标测量机进行轮廓扫描,通过接触式探针获取光学元件宏观形貌,此时面形精度约为微米量级;在精抛光阶段,利用多波长干涉仪或激光干涉仪将面形精度提升至纳米量级,粗糙度一般采用白光干涉仪和原子力显微镜进行采样检测。然而,对于 EUV 光刻光学元件的极端指标,目前检测技术还面临众多挑战:干涉检测精度受到环境稳定性与参考面面形精度限制,需严格分离环境误差与系统误差才可能实现皮米量级面形精度检测;激光干涉仪受限于单次检测视

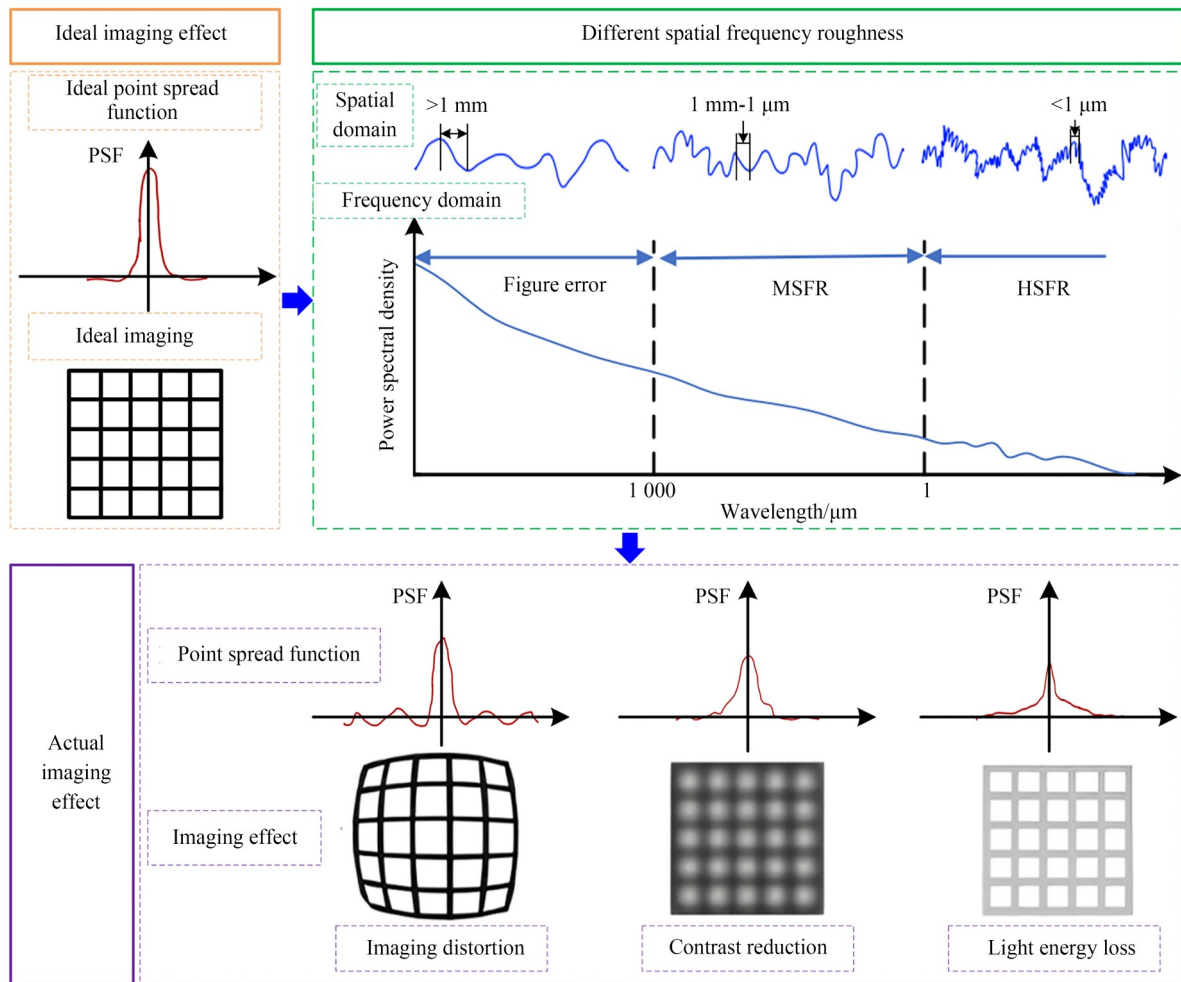


图 1 极紫外光刻光学元件表面不同频段误差对光学成像质量的影响

Fig. 1 Influence of different spatial frequency roughness of photoetching optical components on optical imaging quality

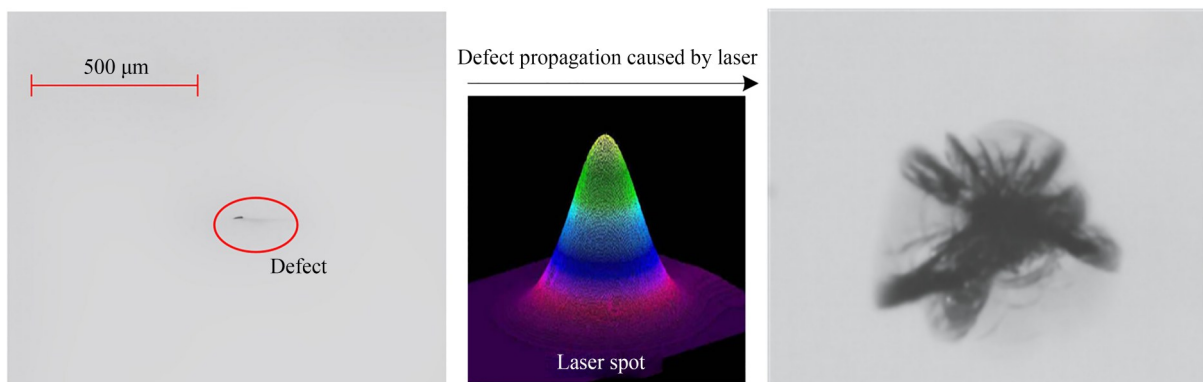


图 2 光学表面缺陷在服役过程中的演变

Fig. 2 Evolution of optical surface defects in service

场,常通过子孔径拼接实现全口径检测,需严格消除拼接过程中引入的定位误差和相位匹配误差;高频粗糙度检测受衍射极限制约,常规光学

检测方法横向分辨率难以直接表征高频误差,而探针类显微镜虽可达纳米级分辨率,但扫描速度却无法满足不同口径快速检测需求。

在极紫外光刻技术的牵引下,光学元件制造已经迈入原子级制造和检测的极端范畴<sup>[15-17]</sup>。本文针对极紫外光刻光学元件的需求,分析了复杂光学元件制造过程中所涉及的检测手段,主要介绍了低频面形检测中的绝对检测、大口径复杂光学元件拼接检测,粗糙度检测中的白光干涉显微及超分辨白光干涉、原子力显微,表面和亚表面缺陷多模态表征等关键技术的研究进展,最后展望了极端光学检测技术的发展趋势。

## 2 光学表面误差及缺陷产生机制

光学元件表面形貌的完整性是材料本征属性与光学加工外场激励耦合的结果,其误差与缺陷的形成机制具有典型的多物理场耦合特征。从能量演化的视角看,材料内部晶格畸变能、表面自由能及加工输入机械能之间的非平衡转化过程,决定了表面形貌的空间频谱分布特性。这种能量传递效应使得表面误差呈现从宏观面形偏差到纳米级粗糙度的多尺度误差的转变,因此,针对超高精度光学元件,明确材料-工艺对光学元件形貌的影响,可以为定制化跨尺度检测策略制定提供理论依据。

### 2.1 材料自身因素

多相复合体系及各向异性材料具有微观结构非均质特性,因此对外部作用的响应不同。以微晶玻璃及碳化硅(SiC)为代表的典型光学材料,其晶界取向差异或各相材料差异会导致抛光过程中存在材料去除效率波动<sup>[18]</sup>,进而形成具有特征波长的纹理<sup>[19]</sup>。同时,加工残余应力场的非均匀分布可能诱发相变或晶格畸变,在表面形成局域凸起/凹陷,增加表面形貌和检测的复杂性<sup>[20]</sup>。在材料缺陷方面,制备工艺引入的微观不连续结构成为表面/亚表面损伤的初始源,在抛光载荷作用下易引发局部应力集中,通过位错与微裂纹扩展形成亚表面损伤层。这种材料本征缺陷在加工中的演化行为,要求检测技术需具备从原子级空位到微米级裂纹的全尺度表征能力。

### 2.2 加工工艺

不同加工方法通过特定的材料去除原理实现对表面形貌的选择性修正。例如,离子束修形技术基于物理溅射效应实现原子级材料去除<sup>[21]</sup>,其高斯型去除函数在抑制低频面形误差方面具

有显著优势,但受离子入射角偏差及能量沉积非均匀性影响,易在加工表面引入亚微米级周期性波纹,导致高频粗糙度恶化<sup>[22]</sup>。磁流变抛光技术能在一定程度提升表面粗糙度<sup>[23-24]</sup>,但是规律的走刀路径可能残留 EUV 应用场景中的中频误差。基于计算机控制的加工方法,需要严格计算控制材料去除点在表面的定位精度和去除量以尽可能地减少中频误差<sup>[25]</sup>。弹性发射加工是一种保持低频面形,有效提升中高频粗糙度的方法,但是由于对抛光间隙敏感,目前仅有日本 Nikon 公司及 JTEC 公司在大阪大学支持下,将该技术商用于 EUV 光刻原理样机中光学元件及 X 射线反射镜的制造<sup>[26]</sup>,国内近些年探究了弹性发射加工的材料去除机理,在熔融石英、单晶硅和超低膨胀石英玻璃(Ultra Low Expansion, ULE)上获得了无损伤的粗糙度均优于 0.1 nm RMS 超光滑表面<sup>[18, 27-29]</sup>。

对于基于游离磨粒的加工方式,加工中磨粒的空间分布密度、运动轨迹及流体动力学特性直接影响材料去除均匀性。若磨粒分布不均匀或抛光液粘度存在梯度,会导致光学表面不同位置处材料去除率差异,进而形成表面误差;同时,抛光系统的稳定性(如机床定位精度、材料去除函数稳定性)也会进一步影响表面误差的生成与演化<sup>[30]</sup>。当磨粒对材料施加的力超过材料的弹性变形极限时,光学元件表面产生的变形无法完全恢复,磨粒会在表面留下划痕<sup>[31]</sup>,甚至引起亚表面损伤;若磨粒若嵌入光学元件,则会通过残余应力场导致亚表面缺陷,这些缺陷在光学元件镀膜或者服役阶段可能因热载荷或机械振动而扩展<sup>[32-33]</sup>。此外,磨粒残留还可能降低光学元件激光损伤阈值<sup>[34]</sup>。尽管非接触式抛光技术可避免机械接触损伤,但诸如等离子体或激光加工中的热-应力耦合效应可能引发新的损伤模式。当激光能量密度超过材料蒸发阈值时,熔融再凝固过程产生的热应力可诱导表面形成褶皱结构,从而影响光学性能。

上述工艺-形貌耦合机制表明,光学表面误差的形成是材料响应特性与加工机制在多个尺度下协同作用的结果。建立多样化的表面误差和缺陷评估机制,已成为突破超精密光学制造瓶颈的关键科学问题。

### 3 低频面形检测技术

光学元件低频面形误差的超高精度检测是保障 EUV 光刻系统波前质量的关键环节。传统几何坐标测量技术通过触觉或光学传感器实现三维形貌数据采集,其发展经历了从单点接触式探针到非接触式激光跟踪仪的技术迭代,在亚微米级精度甚至纳米级精度形成了几何特征的高效检测能力。例如:荷兰 IBS 精密机械公司的 Isara 400 超精密测量仪的各个运动轴均满足零阿贝误差原则;日本松下公司 UA3P 系列超高精度三维轮廓测量仪在运动轴基台上集成激光器通过干涉原理精确定位各个运动轴位置,二者配合微纳力感知探针实现对大口径自由曲面的纳米精度检测。然而,几何测量技术逐渐显露出三大局限性:其一,测量精度有限,且触觉测量易引入表面接触变形,对超光滑表面存在二次损伤风险;其二,离散点云拟合算法在处理复杂曲面时存在高频信息丢失问题。因此,该类技术主要定位于元件粗加工阶段的形貌初检,难以满足精抛光后低频面形误差的亚纳米级表征需求。

基于光波干涉原理的检测技术为突破上述瓶颈提供了解决方案。激光/波面干涉仪通过解析参考波前与被测波前的干涉场分布,可实现全场、非接触、亚纳米级精度的面形误差检测,尤其适用于低频面形特征的提取。然而,当检测对象扩展至 EUV 级大口径非球面时,传统干涉检测面临双重挑战:一方面,系统误差(如参考镜面形误差、环境扰动)会直接耦合至测量结果,需通过绝对检测技术实现误差分离;另一方面,单次测量视场难以覆盖全口径形貌,需借助子孔径拼接策略,但当子孔径非球面度过大时,仍然可能导致干涉条纹密集和回程误差<sup>[35]</sup>。因此,对于大口径复杂曲面元件高精度检测需要结合子孔径拼接和补偿器,而补偿器的引入又会带来像差和表面误差耦合。

针对上述矛盾,低频面形检测技术朝向两个方向发展:一是基于误差分离原理的绝对检测技术,需解耦系统误差与被测面形,且针对 EUV 光学元件低中频分界已提升至  $1 \text{ mm}^{-1}$  空间频率的需求,需提高面形检测的高频保真度;二是结合计算全息(Computer Generated Hologram,

CGH)补偿与子孔径拼接的复合检测方法。CGH作为实现复杂光学面形高精度零位干涉检验的核心手段,其技术近年来取得了显著进展。在精度控制方面,针对 CGH 基板厚度误差和位置失调引入像差的解决方案逐渐成熟,通过优化载频设计可有效抑制多级衍射和基底反射产生的鬼像干扰<sup>[36]</sup>。在应用扩展方面,为突破单块 CGH 的口径或特定面形的适用性限制,其与子孔径拼接测量技术的结合可通过采用近零位补偿或零位补偿策略实现大口径凸非球面的高精度拼接重构,也可结合白光干涉显微术实现小口径复杂曲面的全口径跨尺度形貌表征。

尽管如此,对于 CGH 和子孔径拼接的复合检测方法,其误差溯源与分离对检测精度的影响至关重要<sup>[37-38]</sup>,建立高效、高精度表征及误差解耦的物理建模,是实现面向 EUV 光刻的纳米乃至亚纳米级绝对精度检测的关键环节。此外,仍需开发通用测量技术,在无需补偿器的情况下实现大部分非球面的纳米精度检测,以推动光学制造向高效化发展。

#### 3.1 绝对检测技术

光刻与同步辐射等尖端光学系统对元件检测提出了深亚纳米级面形控制<sup>[39]</sup>、极端环境稳定性及系统误差溯源等核心挑战。为应对这些需求,ASML 光刻物镜核心供应商德国 Carl Zeiss 的研发团队针对其激光干涉仪系统实施了多参数优化策略,通过缩短干涉腔物理长度、构建主动温控回路、填充低折射率惰性气体及强化腔体对流循环等手段,削弱热漂移与空气扰动的影响<sup>[40]</sup>;同时采用扩展光源与宽光谱照明技术,进一步减少波前探测干扰<sup>[41]</sup>。尽管上述改进已大幅度降低环境误差干扰,但光学元件检测中残留的系统误差分量仍是制约检测精度达到亚纳米量级的主要因素。因此,发展高精度的绝对检测技术以实现被测面形与系统误差的解耦分离,成为突破深亚纳米级检测甚至皮米量级检测瓶颈的关键。

##### 3.1.1 高精度系统误差分离提升方法

光学面形绝对检测方法主要包含三平面互检法、双球面法、旋转平均法、平移差分法、奇偶函数法及随机球法<sup>[42]</sup>。针对传统相移干涉仪仅提供相对测量数据的局限性,Bloemhof 提出了

空间偏移差分法<sup>[43]</sup>。通过在被测表面正交方向引入微米级横向偏移,结合波前重建技术分离出参考表面相位贡献。相较于传统三平面法,该方法无需辅助光学元件即可实现绝对检测,减少了测量次数并提升了平面度测定精度,支持全二维表面形貌的高灵敏度重建。美国亚利桑那大学 Zhou 等针对干涉仪校准中误差来源复杂且难以量化的问题<sup>[44]</sup>,提出了基于随机球测试的三维误差分析框架。通过解构随机误差、几何误差和衍射误差,建立了误差传递的闭环控制机制。该方法显著提升了校准精度,降低了对高精度参考表面的依赖,实现了亚纳米级干涉仪系统的自校准。

为解决极端环境应用场景中对光学非球面的深亚纳米检测精度要求,研究人员在旋转平移绝对检测技术的基础上发展了一系列高精度的分离系统误差方法<sup>[39,45-46]</sup>。Chen 等提出一种基于伪剪切干涉术的绝对形貌表征方法,通过两次正交空间平移测量结合亚像素级波前重建算法,实现了平面、球面及圆柱面的准绝对检测<sup>[47]</sup>。该方法在保持测试灵活性的同时,缩减了测量次数,并支持任意剪切量。为解决圆柱面干涉检测中 CGH 衍射波前畸变引入的系统误差,该团队进一步开发了准绝对干涉测试技术<sup>[48]</sup>,通过猫眼位、共焦零位的三位置测量及 CGH 旋转操作,结合加减与翻转处理,分离出与 CGH 相关的误差和圆柱面的表面误差,从而获得圆柱面的准绝对

表面误差。

Chen 等针对旋转对称非球面镜,提出了一种基于 CGH 的  $N$  次等角度旋转法和旋转平移法并建立了表面绝对面形的计算模型<sup>[49]</sup>。其中, $N$  位置法通过多次旋转被测表面并使用 CGH 的  $+1$  级衍射光消除非旋转对称的误差项(图 3(a)),旋转平移法则通过 CGH 的  $0$  级衍射光在多个位置对平面进行测量,以分离和消除旋转对称的误差项(图 3(b))。实验结果表明,该方法可有效解耦 CGH 与透射标准平面引入的波前误差,测量精度达到亚纳米量级。中国科学院光电技术研究所(以下简称中科院光电所)宋伟红等针对传统  $N$  次等角度旋转法存在的  $kN\theta$  项误差缺失问题,在采用等角度旋转法获得旋转非对称误差的基础上,提出增加额外平移的优化方法,通过最小二乘法拟合泽尼克旋转对称多项式计算旋转对称误差,提升检测精度<sup>[50]</sup>。实验结果显示,优化后的方法测量结果更接近双球面标定结果,RMS 误差更小。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(以下简称中科院光所)杨彧等提出了一种误差抑制策略,通过降采样处理、广义区域波前重构算法及多步平移剪切技术的融合,结合去倾斜校正、边界误差补偿和最佳平移距离分析等手段,有效抑制了随机误差对检测结果的耦合效应<sup>[51]</sup>。仿真与实验表明,在 17% 口径最佳平移距离条件下,重构误差 RMS 值可降低至低频随机误差的一半。

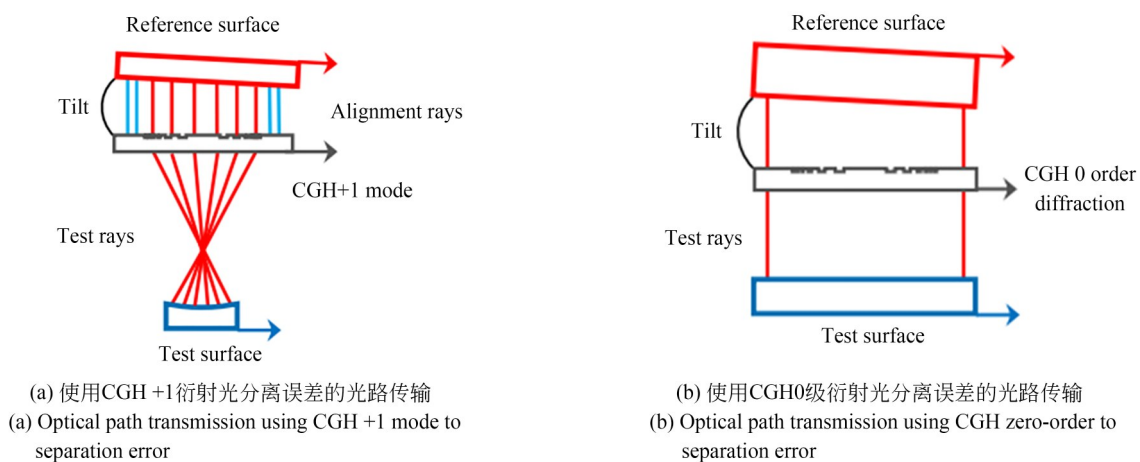


图3 基于CGH的绝对检测<sup>[49]</sup>

Fig. 3 Absolute testing based on CGH<sup>[49]</sup>

### 3.1.2 面向空间频率信息完整性的绝对检测

绝对检测主要面向低频信息,由于极紫外光刻中已经将低频面形的截止频率提升至  $1\text{ mm}^{-1}$ ,因此在绝对检测中保留尽可能多的相对高频信息至关重要。泽尼克多项式拟合法检测次数少,但其基函数特性导致了拟合后的面形低频成分占主导; $N$ 次等角度旋转法虽然能够保留较多的高频信息,但其测量次数多、效率低下;伪 $N$ 次等角度旋转法减少了旋转次数,提高了测量效率,但由于数据处理包含大量旋转导致原始面形中的相对中高频误差被放大。针对上述问题,宋伟红等利用了 $N$ 次等角度旋转法和泽尼克多项式拟合法的优点,提出了改进的多次旋转法。实验结果表明,改进的旋转法保留了更多的相对中高频信息,在保证检测精度的同时,提高了检测效率。针对旋转对称部分的相对中高频信息<sup>[52-53]</sup>,通过直接从平移测量数据中提取出携带有像素级空间频率信息的旋转对称表面偏差,并将二维的旋转对称表面误差简化为一维问题,在保留更多的相对中高频误差信息的基础上,减少了需要处理的未知数数量,提高了计算效率和精度<sup>[54]</sup>。之后,宋伟红等又提出直接利用像素级的未知变量来计算测试面和参考面的绝对面形偏差,通过在共焦位置、一次90度旋转测量以及在 $x$ 和 $y$ 方向上各一次平移测量,从而无需将面形偏差分解为旋转对称和非对称分量,避免使用正交多项式进行拟合,提高了相对中高频面形信息的保持能力<sup>[55]</sup>。Liu等通过结合 $N$ 个旋转和正交横向移位测试,并采用子孔径划分和最小二乘法拟合的波前重建算法,该方法适用于大位移情况,避免了奇异解,有效实现了低噪声传播比以及高空间分辨率的球面绝对检测<sup>[56]</sup>。实验结果表明,重复性达到0.03 nm RMS,复现性达到0.04 nm RMS。胡小川等提出了一种基于影响函数的平移旋转绝对检测方法,引入自适应光学中的影响函数模型替代传统泽尼克多项式进行表面拟合,通过优化影响函数间距与耦合系数,结合多位置平移旋转测量策略,提高表面误差的拟合精度和空间分辨率,该方法能够灵活适应不同空间频率的检测需求<sup>[57]</sup>。Franck等提出基于傅里叶积分的频域响应模型,明确了平

移量与频谱截止频率及口径的关系,通过优化平移量抑制微分误差,降低600 mm平面镜重建残差,减少大口径元件频域信息丢失的问题<sup>[58]</sup>。针对平面绝对干涉测量中参考表面误差影响测量精度的问题,Soltani等引入拉普拉斯算子,通过构建相位差分布的二阶导数模型,结合傅里叶变换求解拉普拉斯方程,抑制高空间频率成分丢失<sup>[59]</sup>。模拟与实验证实,该方法较共轭微分法噪声敏感性降低40%,提升了高空间频率表面形貌保真度,为纳米级平面检测提供了新方法。

### 3.2 子孔径拼接技术

对于大口径、复杂曲面光学元件,全口径面形检测因干涉仪视场与系统通光口径限制而面临挑战。为解决这一问题,美国Arizona光学研究中心的Kim团队提出子孔径拼接技术,通过将大口径复杂光学元件表面划分为多个相邻的子区域,分别对每个子孔径进行高精度面形检测,再利用拼接算法将这些子孔径的面形数据进行融合,从而重构出全口径光学表面的面形信息。子孔径拼接的关键在于从包含各种调整误差的子孔径测试波前中精确重构出待测元件的全口径测试波前。根据子孔径测试波前的描述方式,可以将其分为基于泽尼克多项式的子孔径拼接和基于离散相位的子孔径拼接。

泽尼克多项式作为正交完备基函数系,可将复杂波前像差分解为离焦、像散、彗差等独立像差分量,其正交性有效抑制多项式交叉项干扰,特别适用于平移、倾斜、离焦等刚性调整误差的解耦分离。然而,基于泽尼克多项式的子孔径拼接方法相对于低频面形对中高频信息拟合精度有限。Stuhlinger等提出了基于离散相位的子孔径拼接算法,通过子孔径间的重叠区域信息求解各个子孔径之间的相对调整误差,并以一个参考面为标准进行校正,最终获得全口径的面形信息。目前,美国QED公司率先实现了商业化子孔径拼接干涉仪ASI的产业化应用,中国科学院长光所<sup>[60]</sup>、中国科学院光电所<sup>[61]</sup>、国防科技大学<sup>[62]</sup>、同济大学<sup>[63]</sup>和浙江大学<sup>[64]</sup>等单位在拼接检测领域也开展了大量研究,涵盖光路设计,拼接系统搭建、算法改进优化等,并成功实现对圆柱

面<sup>[65]</sup>、半球壳<sup>[62]</sup>、球面<sup>[64,66]</sup>等元件的高精度拼接检测。

在光刻、同步辐射、空间光学等领域,针对大口径或高数值孔径非球面的检测需求,补偿器与子孔径拼接技术的协同应用成为突破全口径高精度检测瓶颈的有效方法,并能够通过子孔径拼接降低大口径补偿器的制作难度。目前,研究人员通过补偿器与拼接技术的融合,已实现大口径天文望远镜、X射线聚焦镜的纳米级面形精度表征<sup>[60,67]</sup>。图4展示了基于补偿器和子孔径拼接的光学元件检测过程。补偿器用于产生与待测子孔径匹配的波面,通过围绕光轴旋转待测光学元件逐个获得子孔径面形信息,之后基于拼接算法将各个子孔径匹配获得全口径面形信息。现有补偿器和子孔径拼接测试分为零位测试和非零位测试。基于零位测试的拼接精度高、结果直观<sup>[68]</sup>,但大尺寸补偿器制造困难、灵活性不足。基于非零位测试的拼接灵活性高、成本低,可扩展大口径元件测量能力<sup>[69]</sup>,但数据处理复杂且受残余像差影响。

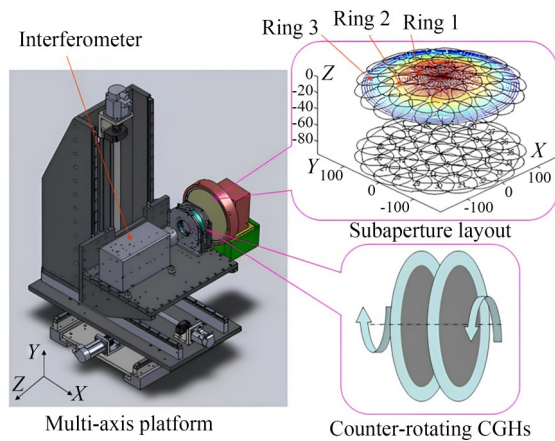


图4 基于补偿器的子孔径拼接<sup>[70]</sup>

Fig. 4 Sub-aperture stitching based on compensator<sup>[70]</sup>

在基于补偿器的非球面光学表面形貌测试中,非球面相对于测试波前的对准误差会影响测量精度<sup>[69,71]</sup>。针对补偿器引入所导致的子孔径未对准像差和表面误差的解耦问题,戴一帆和陈善勇团队通过光线追迹模拟圆柱面在不同失调情况下的干涉图和相位图<sup>[72]</sup>,明确失调误差的类型和表现形式<sup>[73]</sup>,并关联失调偏差和重叠偏差,将像差分解为补偿器与待测表

面未对准引起的像差、像差与形貌耦合以及无法通过算法校正的残差这三部分,前两者分别通过最小二乘法优化和泽尼克多项式表示去除误差。通过理论分析和模拟发现,零位光学元件的未对准会在不同离轴距离的子孔径上引入几乎相同的像差,被测表面则对中心子孔径的未对准对像差影响较小<sup>[70]</sup>。基于此,团队提出两步法误差校正策略:首先通过中心子孔径测量标定补偿器失调像差,再在全局拼接过程中实施像差补偿。实验表明,该方法使凸非球面检测的残余误差降低,与后向零位检测结果具有高度吻合,证明了所提方法的可靠性。Zhang等基于二维切比雪夫多项式建立了子孔径调整与其对应像差之间的映射模型,提出了一种基于自残差迭代算法的全局拼接算法,该方法利用全局拼接矩阵和子孔径空间位置约束,迭代优化子孔径位置<sup>[74]</sup>。实验结果表明,相较于传统的CGH全口径测量,该方法能够获得更光滑的拼接表面,拼接重复性优于0.7 nm RMS。

为了解决传统多项式拟合方法在基于CGH的拼接干涉测量中的局限性并提高信息保真度,Wang等结合勒让德多项式和傅立叶级数的优势,提出了基于勒让德-傅立叶多项式的对准像差补偿方法,并构建了勒让德多项式与对准像差之间的内在联系,在保证拼接精度的同时避免了子孔径之间相互匹配时的大量迭代计算,提升了拼接效率<sup>[63]</sup>。戴一帆等结合勒让德-傅里叶多项式描述圆柱表面形状的优势,提出了自校准干涉测量拼接方法,在拼接过程中对CGH系统误差进行实时评估与补偿,将校准后的拼接误差降低至0.09 nm PV和0.01 nm RMS<sup>[75]</sup>。

针对宏观形貌与微观结构复合的光学元件检测难题,传统补偿器方案因难以适应形状突变而受限,基于显微成像的子孔径拼接技术成为研究热点<sup>[76]</sup>。法国同步辐射光源、国防科技大学和中科院光电所等单位开展了相关研究,实现了对X射线聚焦镜<sup>[77]</sup>、曲率反转的鸥翼型非球面元件<sup>[78]</sup>、带有螺旋槽的半球体<sup>[79]</sup>以及大面积衍射光学元件<sup>[80]</sup>的全口径检测。实验结果表明,显微拼接测量技不仅能应用于面形表征,并且能够提供

更丰富和精细的形貌数据<sup>[81]</sup>,提高了全口径图像中的横向分辨率,在异形光学元件和高分辨检测方面具有应用前景。

### 3.3 通用检测技术

零位检测方法需要根据待测非球面面形设

计制造相应补偿器,虽检测精度较高,但缺乏通用性,增加了检测成本与研发周期。在此背景下,发展不依赖于特定补偿器的通用高精度检测技术成为光学计量领域的核心需求。表1对比了不同通用检测技术的优缺点。

表 1 通用检测技术性能对比

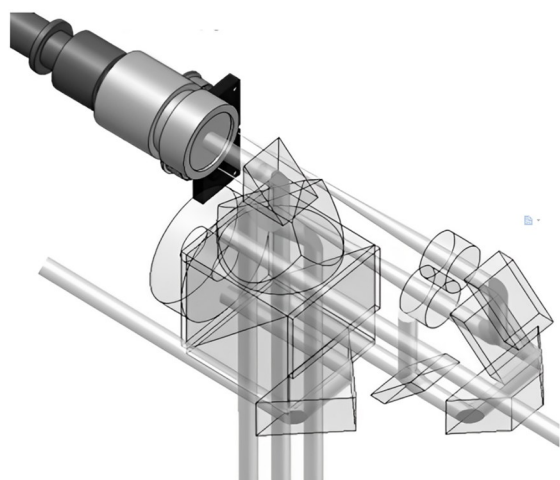
Tab. 1 Performance comparison of general measurement technologies

Technology and manufacturers	Curvature measurement	Advantage	Application
Geometric probe measurement technology (Netherlands IBS, Japan Panasonic)	Yes	Efficient measurement of geometric features	Measurement of rough machining stage of optical components
Tilted Wave Interferometer (Germany Mahr)	No	The system error is less and the measurement speed is fast	Rapid measurement of aspheric surface
Subaperture stitching system (America QED)	No	High repeatability, laser displacement interferometer can be selected to measure curvature	High-precision measurement of large-aperture complex components
DUI measurement system (America QED)	Yes	Large range of nanometer resolution, fast measurement speed	Rapid measurement of large-aperture complex components
LUPHOScan interferometer (Britain Taylor Hobson)	Yes	Large range, can measure rough surface and transparent surface	Measurement of aspheric surface in different processing stages

德国 Mahr 公司推出的倾斜波干涉仪可通过微透镜阵列生成多角度倾斜波前,在固定被测件位置条件下实现全口径采样,避免了机械运动误差。该设备不需要补偿器和拼接,检测效率高,适用于高陡度非球面元件<sup>[82]</sup>。美国 QED 公司基于开发的商业化子孔径拼接系统,通过六自由度精密运动平台控制子孔径位置移动精度,结合可变补偿器获取子孔径面形分布,结合先进的误差分离与补偿算法,可实现大口径非球面的高精度形貌重构,并能够提高横向分辨率,特别适用于凸面非球面等光学元件<sup>[83-85]</sup>,并可选配激光位移测量干涉仪以提供光学元件曲率半径信息。

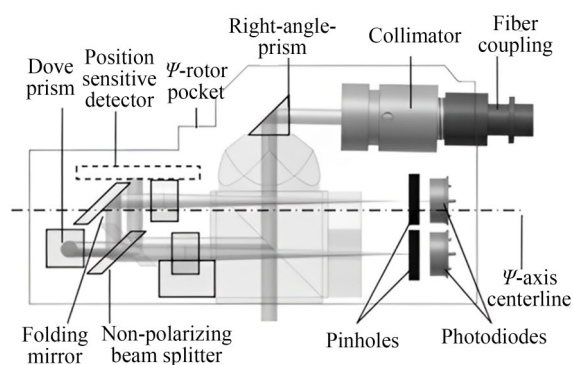
激光/波面干涉仪无法直接提供光学元件形状特征信息。基于多维运动轴系构建的点扫描探针集成系统,可避免对补偿元件的依赖,实现大矢高面形高精度检测,并同步获取光学元件的曲率。除几何坐标测量技术之外,该方面设备主要有荷兰 TNO 公司的 DUI 检测设备以

及英国 Taylor Hobson 公司的 LUPHOScan 检测设备。荷兰 TNO 公司在 NANOMEFOS 设备的基础上发展了 DUI 测量系统,目前已被美国 QED 公司收购。该系统可实现对大口径复杂曲面的纳米级精度快速检测,通过干涉方法高精度测量扫描探针相对于系统框架的位置,探针采用双级协同探测方案确保在大量程范围内保持纳米级分辨率<sup>[86]</sup>,如图 5 所示。其中,一级探测系统基于差分共聚焦测量原理,测量光经物镜聚焦至被测表面,反射光经偏振分光镜耦合后由双离焦针孔探测器生成聚焦误差信号。该信号经归一化处理后输入闭环控制器,动态调整音圈电机驱动的物镜位置,维持光斑最佳聚焦状态,实现表面形貌的绝对距离测量与主动跟踪。二级探测系统通过外差干涉技术,利用双光束产生拍频信号,经解调后获得物镜轴向位移的亚纳米级监测数据。该分级探测机制既保证高扫描速度下的动态响应,又实现全量程纳米级分辨率,有效解决了大范围测量与高分



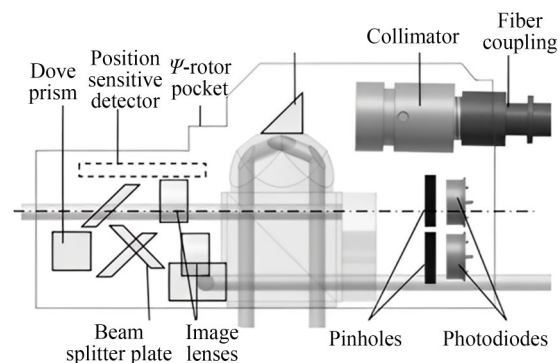
(a) 系统整体示意图

(a) Overall schematic of the system



(b) DCS光路侧视图

(b) Side view of DCS beam path



(c) IF光路侧视图

(c) Side view of IF beam path

图5 DUI检测系统差动共焦系统和干涉仪光路<sup>[87-88]</sup>Fig. 5 Differential Confocal System (DCS) and Interferometer (IF) beams<sup>[87-88]</sup>

分辨率之间的矛盾。

英国 Taylor Hobson 公司研发的 LUPHO-Scan 非球面检测系统将高精度运动轴与基于多波长干涉原理的探针相结合,形成了适用于大口径非球面光学元件的高精度形貌表征方法。系统集成气压传感器与四通道温度补偿模块,通过实时环境参数监测与误差补偿算法,抑制环境变化对测量精度的影响。检测过程中被测元件置于高精度旋转平台上,探针沿非球面理想轮廓扫描采集表面各点的高度信息,最终生成的三维点云数据图表征了实际面形与理想轮廓的偏差分布。LUPHO-Scan 检测系统的运动轴所在位置由两个参考传感器监控<sup>[14,89]</sup>,结合基于多波长干涉原理的探针的优势,在保证测量精度的基础上,拓展了可测量的表面高度范围,对处于不同加工阶段的光学表面具有良好的适用性。

#### 4 中高频空间尺度误差检测技术

光学元件表面中高频空间尺度误差表征要求检测系统具备亚微米级横向空间分辨率以捕获微观形貌特征,从而计算功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)函数以表征不同空间波长尺度误差对成像质量的影响。激光共聚焦显微术、白光干涉显微及原子力显微术(Atomic Force Microscope, AFM)通过垂直扫描实现亚微米以及亚纳米级横向分辨率的三维形貌重构,光散射技术则基于角度分辨散射光谱获取表面统计参数。但上述技术在垂直测量范围、视场(宽频率响应)和空间分辨率存在相互限制,如何快速实现宽频率响应且高分辨的微观形貌或粗糙度检测一直是研究人员重点关注的方向。

##### 4.1 三维形貌获取技术

激光共聚焦显微能够表征具有陡峭边缘特征的微纳结构,适用于粗抛光阶段后的微米级粗糙度表面形貌检测。白光干涉技术能够达到亚纳米量级的垂直分辨率,可以用于具有纳米或亚纳米量级粗糙度的光滑表面。白光干涉属于相干扫描干涉术(Coherence Scanning Interferometry, CSI)<sup>[90]</sup>,受限于光学衍射极限,面临空间分辨率和视场之间的权衡。美国 Zygo 公司<sup>[91]</sup>、中国科学院长春光机所<sup>[92-93]</sup>、南京理工大学<sup>[94-95]</sup>、西安

交通大学<sup>[96]</sup>等单位的研究人员一直在致力于从光学系统设计和信号处理等方面提升白光干涉仪的视场和横向分辨率。

#### 4.1.1 白光干涉技术

白光干涉仪采用具有远心成像的无限共轭光学系统,放大倍数由物镜和镜筒透镜的综合决定。为满足不同检测需求,Zygo公司研发团队开发了一系列白光干涉系统,覆盖从低倍率到大视场的多元化检测场景,表2系统总结了各类系统应用场景及技术优劣<sup>[97-98]</sup>。Mirau物镜采用同轴式干涉腔体设计,集成微型参考镜组与分光元件,形成紧凑型共光路结构。但其固有中心遮蔽效应导致低倍率应用时存在光线阻挡问题,且有效视场受限。相较之下,Michelson物镜系统通过分光棱镜构建非共路干涉系统,避免中心遮蔽效应,理论视场不受限制,适用于低倍率检测场景。然而在极低倍率下,Michelson类型镜头的物理尺寸较大。针对大视场检测需求,Zygo公司的Peter等开展了宽视场物镜设计,采用两个部分透明的平行板作为同轴分束器,并通过轻微倾斜设计以引导杂散反射光离开成像光路,从而提升视场范围内的干涉条纹对比度。该设计在 $0.5\times$ 以及 $1.4\times$ 的低倍率条件下实现 $12\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 和 $34\text{ mm}\times 34\text{ mm}$ 的高对比度大视场成像。在相同放大倍数下,可以看出宽视场物镜在尺寸、重量和自由度方面相对于Michelson物镜具有明显的优势,便于与高倍率物镜集成,如表2所示。由于EUV光刻系统中光学元件口径达 $300\text{ mm}\sim 1\text{ m}$ ,提升白光干涉仪的视场至关重要。目前,Carl Zeiss公司采用 $5\text{ mm}$ 视场的干涉仪视场检测光学元件表面中频误差<sup>[17]</sup>。

对于需要大工作距离与高倍放大的检测场景,Linnik型双光路架构成为优选方案。该系统通过前置分光镜形成对称式参考-测量光路,通过匹配双物镜与分光镜的光学参数,可最小化波前像差并最大化干涉条纹对比度。KAL公司研发了基于Linnik型光路的显微测量系统,实验数据显示其对半导体线宽和缺陷的检测清晰度明显优于传统显微镜<sup>[99]</sup>。

在光源方面,Wu等利用飞秒激光的宽光谱特性和高相干性结合相位补偿技术,减少干涉条

纹周期,在保证干涉信息密度的前提下获得了 $16\text{ mm}$ 的超宽视场<sup>[100]</sup>。Veeco计量公司的研究人员Olszak基于商业化WYKONT-2000轮廓仪提出一种白光横向扫描干涉仪,将传统垂直扫描干涉仪的扫描方向改为横向,并设计相干面倾斜,扩大测量视场。在检测过程中,被测表面沿横向移动时,倾斜相干面与表面形貌产生干涉信号,配合干涉仪倾斜角度调节,进一步优化测量范围,可实现大尺寸工件表面形貌高精度三维重建,并有效规避传统垂直扫描中因视场拼接导致的累积误差问题<sup>[101]</sup>。

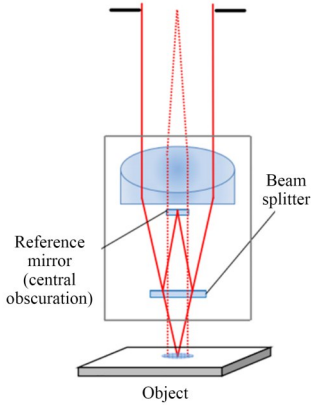
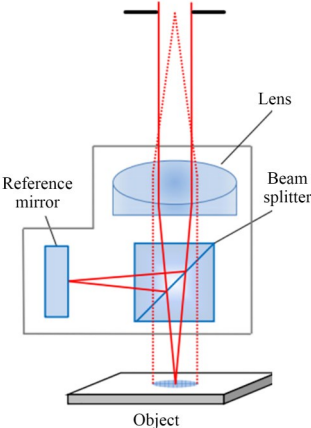
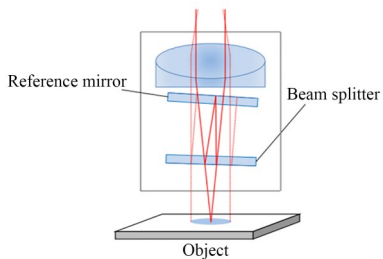
在三维形貌重建方面,Zygo公司的Peter等提出了白光干涉测量和严格耦合波分析(Rigorous Coupled-Wave Analysis,RCWA)结合的建模方法,通过构建表面亚波长结构与测量信号之间的矢量响应模型,实现了对周期 $190\text{ nm}$ 、线宽 $80\text{ nm}$ 的深亚波长光栅结构的高精度检测,测量灵敏度优于 $1\text{ nm}$ <sup>[102]</sup>。Liu等提出了基于超分辨率卷积神经网络的白光干涉仪信号增强方法提升横向分辨率。该方法通过构建干涉图数据集,以均方误差为损失函数并利用自适应矩估计优化权重,从而增强图像清晰度并保留细节<sup>[103]</sup>。采用质心法结合五步相移法提取干涉信号的零光程差位置实现表面三维高精度重建。实验结果表明,当采用 $10\times$ 物镜进行数据采集时,重建表面在横向分辨率、垂直分辨率及三维形貌方面与 $100\times$ 物镜测量具有高度一致性。

#### 4.1.2 白光超分辨成像

光学成像系统的衍射极限是由于远场传播过程中倏逝波呈现指数衰减,这些承载物体高空间频率信息的近场分量在自由空间传输时发生指数型能量耗散,导致亚波长尺度细节无法被常规显微系统捕获。然而,亚波长尺度误差在EUV光刻系统中会引起光束大角度散射,因此,超分辨白光成像为检测纳米尺度误差快速非接触检测提供了解决思路。曼彻斯特大学Li Lin与洪明辉团队提出微球辅助超透镜成像方案<sup>[104]</sup>。该技术通过将介质微球与商用光学显微镜耦合,利用微球的光子喷射效应实现近场-远场信息转换。微球在近场区域激发亚波长尺度的强局域光场,将倏逝波携带的细节信息转换

表 2 Zygo干涉物镜性能对比

Tab. 2 Performance comparison of Zygo interference objective lens

Objective type	Optical system design	Advantage	Disadvantage	Application
Mirau type	<p>Coaxial lens, beam splitter and reference mirror</p> 	Compact common optical path structure with high integration	The central obscuration blocks light and the effective field is limited	Precision measurement of mid and high magnification
Michelson type	<p>Non-common-path interferometric system</p> 	Avoid central obscuration, and the theoretical view field is unlimited	At very low magnification, the physical size is large and the system complexity is high	Low magnification and wide range measurement
Wide-field objective	<p>Use partially transparent parallel plate as beam splitter</p> 	The advantages of size and weight are obvious and easy to integrate	It is necessary to accurately control the tilt angle of the beam splitter, and the freedom of optical path adjustment is increased	Wide field measurement

为可传播的远场辐射模式,并在远场形成虚拟像源,从而将光学系统的横向分辨率提升至 50 nm。研究表明,微球超透镜的聚焦特性呈现多参数依赖性,其光子喷射效应的光斑尺寸由介

质折射率、微球直径及样品表面形貌共同调制,进而影响系统最终的空间分辨率。在后续研究中,该团队将微球超透镜与激光共聚焦扫描技术融合,通过光路优化实现了横向分辨率为 25

nm 的超分辨成像<sup>[105]</sup>。

在三维超分辨成像领域,中国科学院自动化研究所 Li 等提出近场辅助白光干涉显微术<sup>[106]</sup>。该方法融合白光干涉仪的轴向形貌探测能力与微球超透镜的横向超分辨特性,构建了具有 50 nm 横向分辨率与 10 nm 轴向分辨率的三维成像系统,如图 6 所示。相较于原子力显微镜的逐点扫描模式,该检测系统的效率提升了 40 倍。值得注意的是,介质微球的光场调控效应可有效降低系统对物镜数值孔径的依赖,在相同横向分辨率条件下实现工作距离的扩展<sup>[107]</sup>。

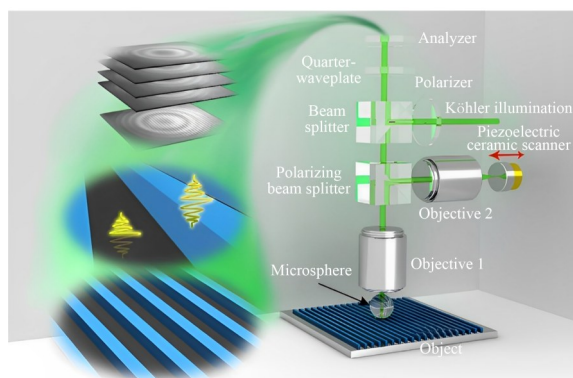


图 6 三维超分辨近场辅助白光干涉显微<sup>[106]</sup>

Fig. 6 Three-dimensional super-resolution morphology by near-field assisted white-light interferometry<sup>[106]</sup>

为深入解析微球增强成像的物理机制, Tang 等采用时域有限差分方法系统模拟了不同照明条件下的光子喷射效应<sup>[108-109]</sup>。研究揭示了暗场照明模式可显著增强光子纳米喷射的散射对比度,通过抑制低频空间频率成分实现高频细节的增强采集,最终提升成像对比度。Pahl 等基于波矢量分析指出,微球作为近场耦合元件可改变入射光场的波前曲率,使原本截止的高空间频率分量重新进入物镜的接收孔径<sup>[110]</sup>。Kassamakov 等提出基于聚合物微纤维的介质超透镜阵列方案,通过飞秒激光加工与多光子光刻技术制备复合结构,在扩大成像视场的同时优化干涉条纹对比度,实现放大倍数与视场范围的共同提升<sup>[111-113]</sup>。

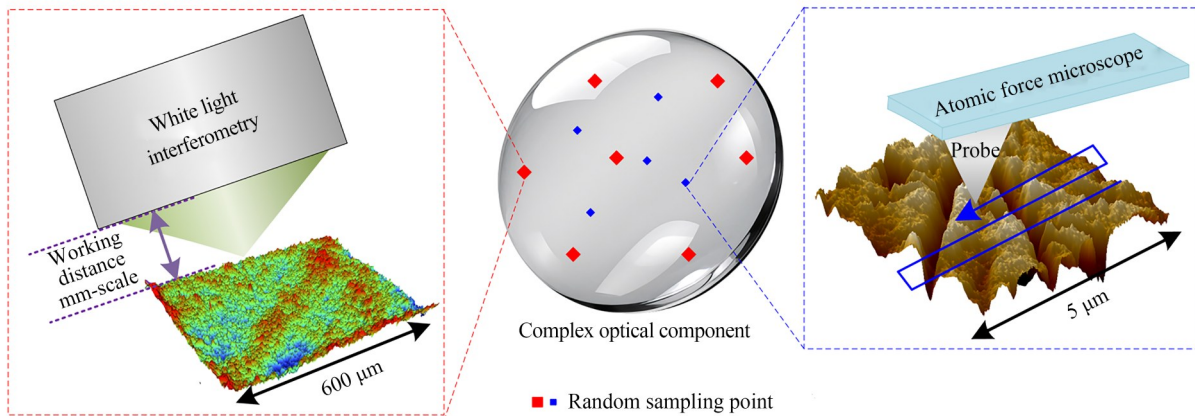
#### 4.1.3 原子力显微技术

原子力显微镜作为纳米尺度表征的有效手

段,其工作原理基于近场原子间范德华力的探测。系统采用微悬臂梁作为力-位移转换元件,其一端固定,另一端为探针针尖。当针尖与样品表面相互靠近时,原子间排斥力引发微悬臂梁弹性形变,通过激光干涉或电容位移传感器实时监测悬臂偏转量,结合压电扫描平台的二维运动控制,即可获取样品表面三维形貌。该技术通过调整扫描范围与采样密度可获取不同空间频率成分的表面形貌信息,但其固有的逐点扫描机制导致检测效率受限,尤其难以适用于大面积样品检测以及局部区域定位。

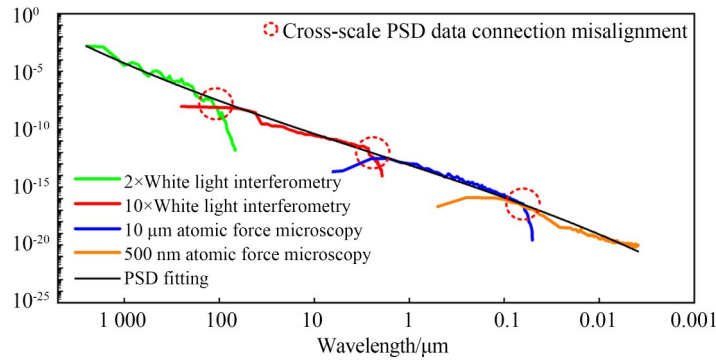
在极紫外光刻系统中,收集镜表面的微纳光栅结构通过布拉格衍射调控 EUV 光束传播<sup>[114]</sup>,其侧壁陡度与三维形貌保真度直接影响 EUV 光通量传输效率。传统白光干涉仪受衍射极限制约,难以解析微米级光栅的纳米边缘特征;而常规原子力探针因悬臂梁几何遮挡,在探测高深宽比结构时存在侧壁盲区,导致光栅槽底形貌与边缘倾角测量失真。近年来,研究人员开发了一系列探针以实现特殊微纳形状的三维全方位检测<sup>[115]</sup>。其中,裙摆式探针采用开口式针尖结构,通过单次扫描即可同步获取顶面、侧壁及底面形貌数据,但复杂的三维探针轮廓加剧了磨损速率。组装式探针技术通过微加工与微组装,定制出满足特定测量需求的组合式探针,但制备难度大。卡尺式双探针利用两个探针同时扫描三维结构的相邻或相对侧壁,在提升横向分辨率的同时缩短了检测周期,但双探针的系统配置复杂且需精确对准双探针针尖。碳纳米管探针具有优异的机械性能和高纵横比,可实现微纳沟槽侧壁形貌探测,为极端结构三维检测提供解决方案<sup>[116-117]</sup>。

整体而言,商用白光干涉仪和原子力显微镜在检测高陡度超高精度光学元件中高频误差时,均采用局部采样策略,受限于测量头几何尺寸及近场工作距离约束,在检测高曲率复杂曲面时存在空间可达性问题,且由于衍射极限和探针尺度,不同倍率白光干涉仪或不同分辨率原子力显微镜获取的局部 PSD 曲线在频段重叠区域存在拼接偏差,引入频域分析不确定性,图 7 汇总了商用白光干涉仪和原子力显微镜检测



(a) 单次测量视场小,局部采样随机,误差定位和溯源困难,以及工作距离近

(a) Single measurement has small field of view, random local sampling, difficult error location and traceability, and near-field working distance



(b) 跨尺度频谱数据衔接失准

(b) Cross-scale PSD data connection misalignment

图 7 商用白光干涉仪和原子力显微技术检测大口径超高精度光学元件中高频误差时存在的问题

Fig. 7 Problems existing in commercial white light interferometry and atomic force microscopy for measuring mid and high-spatial frequency errors in large-aperture ultra-high precision optical components

技术检测大口径超高精度光学元件中高频误差时存在的问题。此外,由于现在光学系统数值孔径不断增加,光学元件尺寸也在一直在增大,白光干涉仪和原子力显微镜应用于在线检测场景中的时候需要解决二者的振动敏感和环境依赖性。

#### 4.2 角分辨散射检测技术

光散射检测可快速提供大面积的粗糙度和缺陷等结构信息<sup>[118-120]</sup>,尤其是对于大口径空间望远镜,亟需能够实现横向空间分辨率跨越全口径到亚微米量级的原位检测技术。光学元件表面中高频误差定义的本质是表面光散射效应在空间上的角度特性,散射特征作为光与表面误差相

互作用的直接载体,可直观表征光学元件性能和成像质量<sup>[121-122]</sup>。因此,散射测量成为检测中高频误差的合理有效方法。同时,通过调控待测样品表面光波的入射角度和波长,能够获得宽频段的连续功率谱函数。自20世纪80年代美国佛罗里达大学与中国浙江大学率先开展光学表面散射特性研究以来,全球科研机构包括德国 Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering 研究所(简称 IOF 研究所)、英国诺丁汉大学、同济大学、中国科学院、国防科技大学及美国 KLA 公司等机构持续推动该领域发展<sup>[123-124]</sup>,在理论模型、测量系统与工程应用等方面均取得显著突破。在这些研究中,如何提升散

射检测的精度和速度一直是研究人员追求的重要目标。

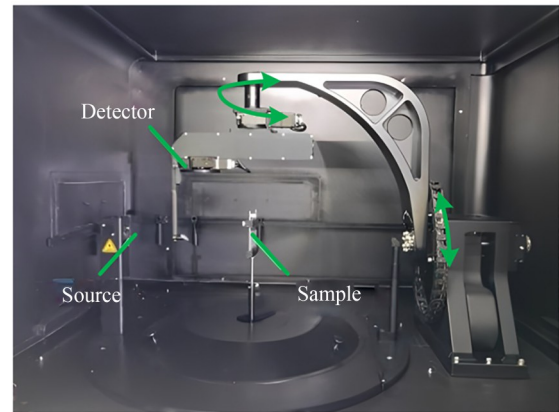
#### 4.2.1 基于半球空间角分辨散射光谱的高精度粗糙度测量技术

表面粗糙度高精度反演依赖于全空间散射光获取。通过探测器在三维空间内围绕样品旋转扫描,获取散射光强度在半球空间内随空间角度分布信息以高精度求解表面粗糙度,如图 8 所示。该技术优势在于选择光电倍增管作为全场散射光分布探测器,灵敏度高且动态范围大,通过空间滤波与锁相放大技术抑制背景噪声,对于粗糙度优于 0.1 nm RMS 的表面具有高精度分辨能力,可通过改变波长和入射光角度获得中高频连续功率谱密度。然而,探测器半球空间扫描导致测量效率低,严重制约大口径光学元件表征效率。为提高测量重复性,Schroder 等分析了总散射测量与角度分辨散射的测量标准,提出基于 Coblenz 半球与积分球的校准方案,开发了“数据缩减算法”通过横向扫描消除局部缺陷影响,显著提升了表面粗糙度优于 0.1 nm RMS 的超抛光基底的测量重复性<sup>[125]</sup>。Schroder 等通过多波长协同与广角探测设计,提升可测空间频率上限<sup>[126]</sup>。

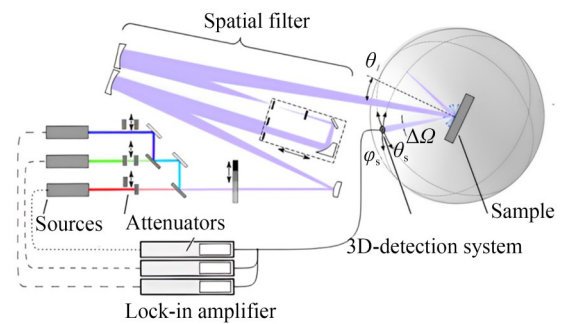
在应用方面,Trost 等利用了表面粗糙和缺陷的极化效应不同,提出“线性偏振度”参数,有效区分表面粗糙度与亚表面损伤对散射的贡献<sup>[127]</sup>,为光学加工工艺的在线监测提供了非破坏性评价手段。Schroder 等开发了用于极紫外波段的散射测量技术,结合矢量微扰理论,实现了面向 13.5 nm 波长的极紫外光刻收集镜表面误差的定量表征<sup>[128]</sup>,并研制了集成激光损伤阈值与角度分辨散射分析的光谱散射测量系统<sup>[129]</sup>。该系统采用可调谐光参量振荡器光源,结合原位散射映射技术,观测了铝镜抛光后激光损伤阈值下降情况,为高功率激光元件性能评估提供了新方法。由此可见,作为极端光学元件制造的核心检测工序,半球空间角分辨散射光测量技术的科学研究与工程应用潜力巨大。

#### 4.2.2 基于局部角分辨散射光谱的表面粗糙度原位快速测量

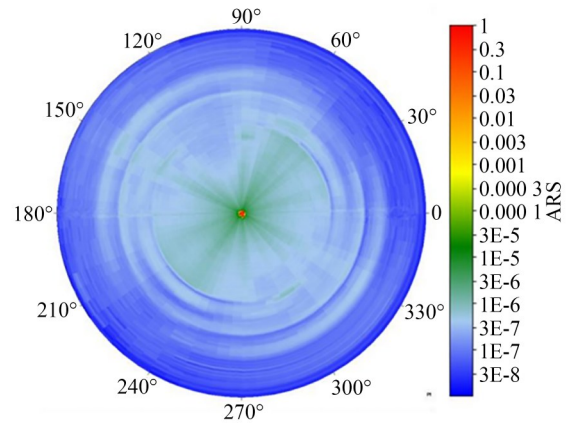
面向大口径光学元件的高效检测需求,快速



(a) 实验装置  
(a) Experimental equipment



(b) 光路示意图  
(b) Schematic of optical path



(c) 全场散射光分布  
(c) Full field distribution of scattered light

图 8 基于探测器运动的半球空间散射光测量装置  
Fig.8 Full-field scattered light measuring equipment based on detector motion

角分辨散射测量技术快速发展,且 CMOS/CCD 传感器灵敏度提升也推动了散射测量系统从大型仪器向集成设备的转型。Tobias 等固定光束入射角,采用 CMOS 传感器直接捕获反射光附近

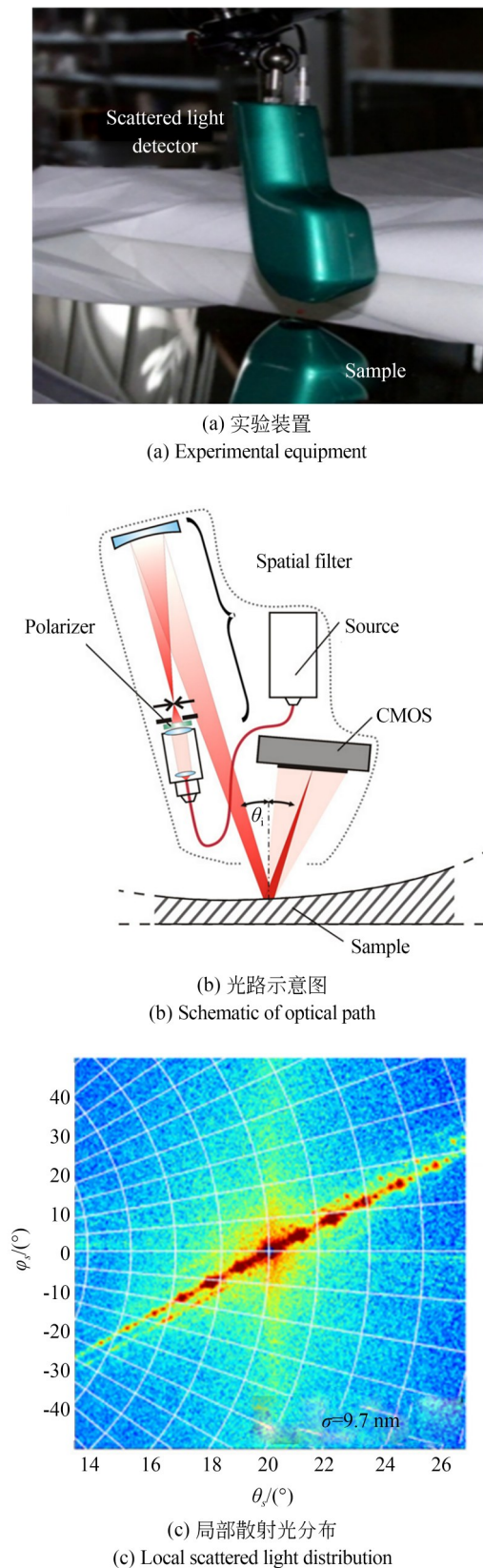


图9 基于图像传感器的局部散射光快速测量

Fig. 9 Rapid measuring equipment of local scattered light based on image sensor

的二维散射分布,实现了快速、高效的局部散射特性表征<sup>[130-131]</sup>,如图9所示。由于入射角固定,散射角接受范围有限,CCD的动态范围较小,其角度分辨能力和测量精度受限,但能满足表面粗糙度在0.3 nm RMS量级的光学元件检测需求,可与抛光机床集成实现快速原位检测。为提高检测速度和检测精度,研究者提出了基于多探测器阵列的并行测量系统,或采用双路光源和探测器以采集表面各向异性散射分布,但受限于探测器空间位置固定,角度分辨能力难以提升。针对角度限制导致的PSD测量频段压缩问题,Trost等开发了多波长光源和多种传感器并行探测系统,通过计算PSD曲线上的部分参数,结合分形模型拓宽测量频段范围<sup>[132]</sup>。美国KLA公司采用双通道激光器和探测器实现了表面粗糙度在径向和周向的分离,将表面粗糙度测量精度提升至0.3 nm RMS。上海光机所苏榕等基于Kirchhoff近似开发了适用于局部角分辨散射的高功率谱密度反演算法,在 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}^{-1}$ 频段与原子力显微镜的测量一致性达到99.1%<sup>[133]</sup>。

在应用方面,Trost等将快速散射测量系统集成到磁流变抛光设备和超精密金刚石车床中,通过在线检测表面粗糙度,缩短了抛光工艺的优化周期<sup>[134]</sup>。此外,面向大口径复杂形状光学元件,Schroder等将快速散射测量系统与机器人臂集成,结合路径规划算法实现了极紫外光刻收集镜以及世界紫外空间望远镜中直径1.7 m主镜的表面质量验收测试<sup>[128,135]</sup>。

表3展示了目前商用中高频粗糙度检测方式及性能对比。白光干涉仪与原子力显微镜存在局部采样、检测范围小、跨频段重叠区域数据失准等问题,无法实现大口径光学元件中高频误差的快速检测和溯源与确定性跨频段功率谱检测。散射测量能获得连续功率谱密度,然而呈现出性能分化特征,即基于图像传感器的散射光探测技术检测速度快,但精度局限在0.3 nm RMS量级;基于光电倍增管动态扫描的散射光检测技术在探测半球空间散射光分布的基础上精度可优于0.1 nm RMS,但对于大口径光学元件存在检测效率不足的缺点。因此,需开发能够兼顾光学元件大范围快速高空间分辨表征和亚纳米精度的测量技术。

### 5 光学元件缺陷检测技术

光学元件缺陷不仅会缩短其使用寿命,还会造成光学系统的波前畸变<sup>[136]</sup>。在光学加工领域,由机械作用引发的线性划痕、材料剥落形成的凹坑状缺陷、表面摩擦导致的擦痕等典型形貌,均属于缺陷检测范畴<sup>[137]</sup>。作为光学元件质量评价的核心指标,表面缺陷的特征参数(如数量、形貌及空间分布规律等)直接反映了制造工艺的稳定性与精度控制水平。尽管传统的人工目视检测方法仍为光学制造工业现场的主流检测方法,但其检测效果受限于人眼分辨率,且检测结果存在操作人员主观性差异。这种基于经验的评估模

式导致检测数据的可重复性较差,严重制约了质量追溯体系的数字化构建。因此,突破传统检测手段的局限性,发展自动化检测系统成为实现光学元件表面缺陷高精度定量表征、建立标准化质量数据库的必然路径。

目前,光学元件表面和亚表面缺陷检测呈现多模态分析需求,涉及数量、形貌以及热、力性质等维度<sup>[138]</sup>。表 4 从检测形式、检测维度、分辨率等多个方面系统对比了各类缺陷检测技术的性能。白光干涉仪对精密加工表面的划痕、凹坑等典型缺陷具有高灵敏度检测能力。但受光学衍射极限制约,当缺陷特征尺寸小于系统横向分辨率时,将难以检测到缺陷。此外,在检测具有锐

表 3 现有中高空间频率粗糙度测量方法的性能比较

Tab. 3 Performance comparison of existing mid and high spatial frequency roughness measurement methods

Parameter	Angle-resolved scattering measurement system		White light interferometry	Atomic force microscopy
	Full-field	Rapid measuring		
Surface roughness measurement limit (nm RMS)	<0.1	<0.3	0.1	<0.1
Measurable spatial wavelength error range	<2 mm (Incident wavelength, incident angle)		2 mm-1 μm (determined by objective lens)	<10 μm (Related to field of view and resolution)
	Continuous	Continuous	Segmented	Segmented
Power spectral density				
Single field measurement speed	Slow (The detector needs full space scanning)	Fast	Moderate	Very slow (The probe scans point by point, which takes a long time at high lateral resolution)
Full aperture measurement time for φ650 mm EUV lithography collector mirror	—	10 hours	7 days(2×)	Several years(50 μm×50 μm)
Large-scale characterization capability	More difficult	Better	Difficult	Very difficult
Sample damage risk	Non-contact No damage	Non-contact No damage	Non-contact No damage	Contact/Tapping mode (potential sample alteration)
Working distance from sample	No requirement	No requirement	Near	Very near
Economic cost	Moderate	Low	High	Very high

表 4 缺陷检测方式及性能对比

Tab. 4 Defect detection methods and performance comparison

Performance	White light interferometry	Atomic force microscopy	Darkfield microscopy	Angle-resolved scattering	Scanning electron microscopy	Transmission electron microscope	Optical coherence tomography
Surface/sub-surface defect detection capability	Surface	Surface	Surface	Surface	Surface	Surface/ Subsurface	Surface/ Subsurface
Contact	No	Yes	No	No	No	No	No
Sample damage	No	Yes	No	No	Yes (Sample preparation)	(Sample preparation)	No
Measurement dimension	Three-dimensional	Three-dimensional	Two-dimensional	Three-dimensional (reconstruction required)	Two-dimensional	Two-dimensional	Three-dimensional
Minimum detection scale	Lateral: micrometer axial: nanometer	Nanometer	Micrometer	Lateral: Submicron Axial: Nanometer	Submicron	Nanometer	Micrometer
Detection speed	Slow	Very slow	Fast	Fast	Slow	Slow	Moderate
Key limitation	Sharp defects cause fringe disruption; Full aperture inspection challenging; Vibration isolation required	Difficult defect localization; Point-scanning limitation; Full aperture inspection challenging; Vibration isolation required	The system only collects scattered light far away from the reflected light; No depth information; Particle/pit differentiation impossible	A detector with high dynamic range and large field of view is needed to realize fast full aperture detection	No depth information; Conductive coating required; Vacuum environment needed; Sample size limited	Complex sample preparation; Size limitations; High vacuum environment required	Material limitation; Limited imaging depth

利边缘的缺陷时,局部光强梯度突变可能引发干涉条纹断裂,造成相位解调困难。

AFM 具有亚纳米级分辨率,已成为光学元件表面微纳缺陷表征的关键技术。该技术能够实现亚纳米级划痕、麻点等缺陷的三维形貌可视化,为缺陷形态学分析(包括几何轮廓、深度分布及空间拓扑关系)提供定量数据支撑。当前基于 AFM 的研究聚焦于利用其评估抛光工艺对表面微纳缺陷的消除效果<sup>[18,139-140]</sup>,然而,受限于视场范围(通常为微米级)与扫描速率,AFM 在工业现场缺陷快速定位与工艺迭代需求面前存在明

显短板。

基于光散射原理的缺陷检测技术通过解析光与表面微观结构的相互作用,建立了缺陷特征与散射场参数之间的映射关系。根据检测原理的不同,该技术可分为显微暗场散射成像技术与角分辨散射分布技术。显微暗场散射成像技术采用环形阵列光源实现倾斜入射照明,如图 10 所示,缺陷对高频散射光具有很高的灵敏度<sup>[141-142]</sup>,因此仅收集缺陷区域产生的非镜面散射光,在 CCD 上形成高对比度的暗场图像<sup>[143]</sup>。浙江大学较早的开展了该技术的自动化研究,目前可完成

大口径光学元件表面微米级缺陷的定位、成像与分类<sup>[144-145]</sup>。

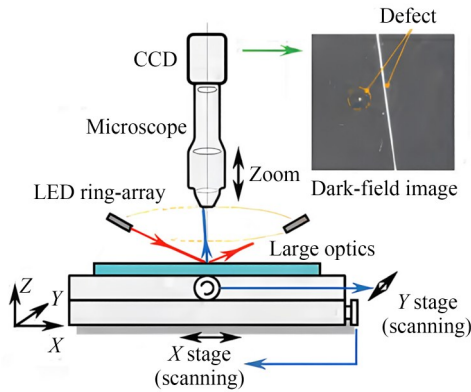


图 10 显微暗场散射成像系统<sup>[143]</sup>

Fig. 10 Microscopic dark-field scattering imaging system<sup>[143]</sup>

角分辨散射分布技术主要由德国 IOF 研究所展开,国内哈尔滨工业大学<sup>[146-148]</sup>、中国科学院<sup>[124,149-150]</sup>也开展了光学表面疵病和缺陷的散射场分布建模,实现了对表面缺陷和颗粒的有效区分。相较于显微暗场散射成像,角分辨散射分布通过明确缺陷相对于光滑表面在三维空间上的异常散射分布来确认缺陷的位置,对亚微米微小缺陷敏感,然而两者均无法直接获取缺陷的深度信息。此外,基于夫琅禾费衍射理论的缺陷表征方法通过分析衍射图样分布计算缺陷直径<sup>[151-152]</sup>,该技术对光源相干性要求较高,在实际工程应用中需权衡系统复杂度与检测精度。

扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)与透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)作为基于电子-物质相互作用原理的表征手段,在光学元件缺陷分析领域具有广泛价值。SEM通过聚焦电子束在样品表面激发产生二次电子、背散射电子等特征信号,实现样品表面形貌的二维成像。然而,其仅限于表面层信息获取,对亚表面缺陷的探测灵敏度不足。此外,SEM观测通常要求样品进行金属镀膜处理以增强导电性,该预处理步骤可能破坏原始表面形貌。TEM具有更高的加速电压与更薄的电子透射路径,通过采集透射电子束或衍射电子的强度信息可实现高空间分辨率的亚表面损伤探测,揭示光学元件内部微观结构信息,

适用于晶体材料中晶格缺陷、位错及层错表征。但TEM制样需采用离子减薄等破坏性处理技术,更适用于光学加工工艺开发阶段的机理验证。

光热弱吸收检测技术作为一种非接触式表面质量评估手段,通过构建热致折射率梯度场实现表面缺陷表征。其物理机制基于缺陷区域的光热转换效应,当激发光源照射样品时,局域吸收体将光能转化为热能并形成局部热扩散场,该热场引起周围介质折射率变化,导致探测光波前发生畸变。通过解析波前畸变参数,可获得样品的热吸收特征,从而评估样品表面质量,尤其适用于光学制造过程中吸收类缺陷及微量杂质残留的检测<sup>[153-155]</sup>。

亚表面损伤作为影响光学元件质量的关键因素,其损伤深度与分布关联着元件的服役寿命。然而,传统表面检测技术难以实现亚表面损伤检测,亟需发展具有层析能力的无损检测手段。激光扫描荧光显微技术为此类需求提供了解决方案<sup>[153,156-157]</sup>。在暗场及特定波长激光激发下,材料内部的缺陷、杂质相等亚表面特征将产生特征荧光发射,从而获得明场中无法探测的缺陷增强信号。中国工程物理研究院与中国科学院光电所的研究表明,通过激光扫描荧光显微的暗场成像模式可计算不同材料去除深度下的光学元件亚表面损伤的占比,从而评估亚表面质量<sup>[18,158]</sup>。

此外,基于物质与电磁辐射相互作用的光谱分析技术为亚表面损伤与残余应力表征提供了补充手段。X射线衍射技术通过晶面间距的布拉格衍射效应,可定量表征残余应力引起的晶格畸变场;拉曼光谱技术则利用分子振动模态的变化,实现化学键断裂、相变等亚表面损伤的识别。因此,通过技术融合构建从缺陷形貌表征到物性分析的检测体系,可为光学元件表面及亚表面质量控制提供多维度技术支撑。

## 6 发展趋势

随着光学制造迈向原子尺度极端制造,表面及亚表面质量检测技术经历从单一模态向多模态、从离线分析向原位闭环控制的转变。针对EUV光刻中大口径与复杂形状光学元件的制造

需求,检测技术需突破传统光学系统的视场与精度矛盾,在亚纳米级纵向分辨率基础上实现横向分辨率从纳米至全口径的跨尺度表征,同时构建覆盖宏观形貌、中高频误差及微观缺陷的全频段评价体系。光学表面检测技术的主要发展方向如下:

(1) 大口径光学元件表面形貌原位快速表征与定位技术: EUV 光学元件表面质量检测面临尺度与精度比的极端挑战,当前以离线检测为主的模式导致加工-检测-修正流程效率低,难以满足高精度制造需求,亟需发展大视场、高效率的高精度原位检测技术。为此,需开发与加工机床集成的抗振型原位检测系统,并设计适用于大口径光学元件的高精度、多轴联动原位扫描平台,以解决大口径元件全口径覆盖与精确定位问题。同时,需要建立从宏观形貌到微观缺陷的全局坐标映射体系,结合人工智能实现形貌或缺陷区域的实时定位与分类,为后续局部精修提供精确坐标与工艺参数指导。这有助于加工-检测-修正闭环控制的高效实现,缩短光学元件研制周期,推动极端光学系统向更高精度发展。

(2) 超分辨光学元件表面形貌无损检测技术: 现有光学检测技术受衍射极限制约,横向分辨率难以满足 EUV 波段对纳米级甚至亚纳米级表面/亚表面形貌或微观结构的表征需求。因此,需探究横向分辨率突破衍射极限,纵向分辨率达到深亚纳米级的无损检测技术,可基于深度学习驱动超分辨重建技术,利用物理模型约束或生成对抗网络,从传统仪器或干涉图像中提取超越衍射极限的信息,提升横向分辨率并增强缺陷识别能力。同时需要优化干涉测量技术的信噪比与纵向分辨率,探索新型光源或噪声抑制算法,以将纵向分辨率提升至深亚纳米级量级。

(3) 复杂曲面光学元件高精度形貌检测技术: EUV 光刻中采用了大量离轴非球面,其高斜率、大离轴量及非对称性,对传统零位/非零位干涉测量提出了严峻挑战,具体表现为动态范围不足、曲率失配、光学元件遮挡及空间可达性

受限等问题。为突破现有干涉测量的动态范围与精度极限,可结合自适应光学与干涉测量,利用可变形器件实时补偿由高斜率或离轴引入的动态波前畸变,拓展干涉测量的有效工作区域与动态范围,提升其对复杂曲面的全域适用性;或利用计算成像与无透镜检测技术,减少对复杂补偿光学元件的依赖,提高对复杂曲面检测的灵活性。

(4) 跨尺度多模态检测与数字孪生融合技术: EUV 元件性能受宏观面形、中频波纹、高频粗糙度、微观缺陷及亚表面损伤等多模态、多尺度因素共同影响。然而,现有检测技术普遍存在尺度覆盖有限,数据孤立等问题,难以形成对元件性能的全局性、关联性评估,且缺乏将检测数据与制造工艺、性能预测有效连接的物理模型。为此,融合光学、力学、电学等检测方式实现多模态(形貌、力学、光学、材料)的同步、无损、高分辨测量,建立多尺度(从全口径到高频空间)检测数据之间的物理关联模型,形成标准化、智能化的跨尺度检测平台。理解表面/亚表面微纳结构与 EUV 光散射、吸收等物理效应的关系,定量评估不同尺度/类型的误差对 EUV 光场(如波前畸变、光强均匀性、对比度)的综合影响,构建包含材料特性、制造工艺参数、多尺度检测结果及 EUV 光学性能模拟的全链条虚拟模型,支撑检测-评估-工艺修正的闭环控制,推动光学制造向智能制造发展。

#### 作者贡献声明:

李佳慧:文献调研和数据整理,论文构思和撰写,资金获取;

匡翠方:论文审核和指导,资金获取,项目管理;

徐月暑:文献调研,论文构思,数据整理,项目管理;

卞殷旭:文献调研,资金获取,项目管理;

梁佳栋、崔玉栋:数据管理;

刘旭:监督,资金获取。

#### 参考文献:

[1] YANG Y X, LIU K X, GAO Y H, *et al.* Advancements and challenges in inverse lithography technolo-

gy: a review of artificial intelligence-based approaches [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 250.

- [2] 李艳秋,南雁北,陈雨情,等. 极紫外光刻机曝光系统光学设计研究与进展[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 328-343.  
LI Y Q, NAN Y B, CHEN Y Q, *et al.* Research and progress on optical design of exposure systems in extreme ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 328-343. (in Chinese)
- [3] 张德福,李显凌,芮大为,等. 193 nm 投影光刻物镜光机系统关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(6): 565-581.  
ZHANG D F, LI X L, RUI D W, *et al.* Key technology progress of optomechanical systems in 193 nm projection objective [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2017, 47(6): 565-581. (in Chinese)
- [4] 曾志男. 超快极紫外光源产生及其在半导体检测中的应用(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(17): 127-141.  
ZENG ZH N. Generation of ultrafast extreme ultraviolet light source and its applications in semiconductor detection (invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(17): 127-141. (in Chinese)
- [5] SCHOOT V, WISCHMEIER L, GRAEUPNER P, *et al.* High-NA EUV lithography optics become reality[C]. *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography XI*: Vol. 1132308. 2020: 1-11.
- [6] 谭久彬. 超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 1-7.  
TAN J B. Ultra-precision measurement: The cornerstone of the lithography development [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 1-7. (in Chinese)
- [7] 王青蓝,全海洋,胡松,等. 光刻物镜波像差绝对检测技术综述[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 41-65.  
WANG Q L, QUAN H Y, HU S, *et al.* Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 41-65. (in Chinese)
- [8] 戴一帆,吴冬良,王贵林. 光学加工中高频误差对散射损失比的影响[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2365-2370.  
DAI Y F, WU D L, WANG G L. Influence of mid-and-high frequency errors from optical processing on ratio of scattering loss [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2365-2370. (in Chinese)
- [9] 张春雷,徐乐,刘健,等. 全频段亚纳米精度氟化钙材料加工[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2636-2643.  
ZHANG CH L, XU L, LIU J, *et al.* Sub-nanometer precision optical fabrication of CaF<sub>2</sub> materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2636-2643. (in Chinese)
- [10] WEISER M. Ion beam figuring for lithography optics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2009, 267(8/9): 1390-1393.
- [11] 蒋勇,张远恒,刘欣宇,等. 纳秒激光诱导K9光学元件体损伤增长特性[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 128-135.  
JIANG Y, ZHANG Y H, LIU X Y, *et al.* Bulk damage growth characteristics of K9 glass induced by nanosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 128-135. (in Chinese)
- [12] 杨旺,黄玮,许伟才,等. 光学表面中频误差对光刻物镜短程杂散光影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 235-239.  
YANG W, HUANG W, XU W C, *et al.* Analysis of mid-spatial frequency surface errors effects on local flare in lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 235-239. (in Chinese)
- [13] GRAEUPNER P, KUERZ P, STAMMLER T, *et al.* EUV optics: status, outlook and future[C]. *Optical and EUV Nanolithography XXXV. April 24-May 30, 2022. San Jose, USA. SPIE*, 2022: 3.
- [14] 刘锋伟,吴永前,陈强,等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 65-87.  
LIU F W, WU Y Q, CHEN Q, *et al.* Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 65-87. (in Chinese)
- [15] 戴一帆,彭小强,薛帅,等. 高性能光学制造[J]. 机械工程学报, 2023, 59(21): 1-14.  
DAI Y F, PENG X Q, XUE SH, *et al.* High-performance optical manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(21): 1-14. (in Chinese)
- [16] 雒建斌,郭东明,杨华勇,等. 原子级制造的关键基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2024, 38(1): 86-98.  
LUO J B, GUO D M, YANG H Y, *et al.* Key basic scientific issues in atomic level manufacturing [J]. *Bulletin of National Natural Science Founda-*

- tion of China, 2024, 38(1): 86-98. (in Chinese)
- [17] GRAEUPNER P, KUERZ P, VAN SCHOOT J, *et al.* High NA EUV optics: preparing lithography for the next big step[C]. *International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography* 2021. September 27-October 2, 2021. OnlyOnline, USA. SPIE, 2021: 29.
- [18] MA W H, LI J H, ZHANG X Q, *et al.* Manufacture of ultra-smooth surface with low damage by elastic emission machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2025, 338: 118780.
- [19] 谢超. 氟化钙单晶材料的磁流变抛光工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.  
XIE CH. *Research on Magnetorheological Finishing Technics of Optical Mirror Materials of CaF<sub>2</sub>* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [20] 王桂莲, 张广辉, 王治国, 等. 纳米抛光碳化硅压力对相变影响的分子动力学模拟[J]. *机械设计与制造*, 2021(2): 35-39.  
WANG G L, ZHANG G H, WANG ZH G, *et al.* Effect of pressure changes on the nano-polishing process of silicon carbide based on molecular dynamics [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(2): 35-39. (in Chinese)
- [21] LUO Z, ZHANG Z Y, ZHAO F, *et al.* Advanced polishing methods for atomic-scale surfaces: a review[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 27: 100841.
- [22] 廖文林. 亚纳米精度光学表面离子束修形的基础研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.  
LIAO W L. *Fundamental Research on Ion Beam Figuring for Sub-nanometer Precision Optical Surfaces* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 戴立达, 张争艳, 乔国朝. 磁流变抛光技术研究进展[J]. *机械设计与制造*, 2024(3): 254-260.  
DAI L D, ZHANG ZH Y, QIAO G CH. Research progress of magnetorheological finishing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(3): 254-260. (in Chinese)
- [24] 关浩龙, 董锐琦, 郭英晖. 磁流变抛光的研究进展综述[J]. *机电工程技术*, 2024, 53(9): 65-70.  
GUAN H L, DONG R Q, GUO Y H. Review on research progress of magnetorheological polishing [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(9): 65-70. (in Chinese)
- [25] WANG T Y, KE X L, HUANG L, *et al.* A comprehensive review of dwell time optimization methods in computer-controlled optical surfacing [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(3): 1.
- [26] 李佳慧, 侯溪, 张云, 等. 弹性发射光学制造技术研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1089-1103.  
LI J H, HOU X, ZHANG Y, *et al.* Research progress of elastic emission machining in optical manufacturing [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1089-1103. (in Chinese)
- [27] MA W H, LI J H, HOU X. Rolling model analysis of material removal in elastic emission machining [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 258: 108572.
- [28] MA W H, LI J H, HOU X. Profile prediction and analysis in active controlled elastic emission machining [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 275: 109274.
- [29] 马伟皓. 弹性发射加工超光滑表面生成机制与工艺研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2024.  
Ma W H. *Research on the Generation Mechanism and Process of Ultra-Smooth Surface by Elastic Emission Machining* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2024. (in Chinese)
- [30] 钟显云. 深紫外光刻物镜系统非球面的磁流变精抛技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020.  
ZHONG X Y. *Research on Ultra-precision Magnetorheological Finishing (MRF) Technology for Aspheric of Deep Ultraviolet Lithography Objective System* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [31] LI J Q, HU H X, QIAO G B, *et al.* Damage-free and ultra-smooth chemical mechanical polishing of calcium fluoride crystal surfaces[J]. *Precision Engineering*, 2025, 94: 725-735.
- [32] 李凌众, 王孝坤, 戚二辉, 等. 光学元件亚表面缺陷表征与检测技术研究现状分析(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 20220572.  
LI L ZH, WANG X K, QI E H, *et al.* Research status analysis of subsurface damage characterization and measurement technology of optical components (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*

- ing, 2022, 51(12): 20220572. (in Chinese)
- [33] 王娜, 刘立拓, 宋晓娇, 等. 基于过焦扫描光学显微镜的光学元件亚表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 120-127.  
WANG N, LIU L T, SONG X J, *et al.* Subsurface defect detection method of optical elements based on through-focus scanning optical microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(21): 120-127. (in Chinese)
- [34] LI Y J, LI L X, WEI H D, *et al.* Cerium contamination on silicon carbide optics during CMP: TOF-SIMS, XPS characterization, and ReaxFF MD simulation [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 703: 163390.
- [35] 宗毅, 孙晟遥, 史奎源, 等. 单光楔可变补偿的非球面子孔径拼接干涉测量方法[J]. 光学学报, 2024, 44(20): 91-101.  
ZONG Y, SUN SH Y, SHI X Y, *et al.* Aspheric subaperture stitching interferometry with single-wedge variable compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(20): 91-101. (in Chinese)
- [36] 陈善勇, 薛帅, 熊玉朋, 等. 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 177-190.  
CHEN SH Y, XUE SH, XIONG Y P, *et al.* Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 177-190. (in Chinese)
- [37] 李佳, 程强, 王孝坤, 等. 计算全息检测技术的精度溯源研究现状分析(内封面文章)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(8): 20240135.  
LI J, CHENG Q, WANG X K, *et al.* Analysis of the current status of research on accuracy traceability based on computational holographic detection technology (inner cover paper) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(8): 20240135. (in Chinese)
- [38] 王慎, 曹耘, 闫力松. 计算全息零位补偿离轴非球面干涉检测技术(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 262-268.  
WANG SH, CAO Y, YAN L S. CGH null compensation testing method of off-axis aspheric mirror surface(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 262-268. (in Chinese)
- [39] 侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 18-30.  
HOU X, ZHANG SH, HU X CH, *et al.* The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 18-30. (in Chinese)
- [40] DÖRBAND B, SEITZ G. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit [J]. *Optik*, 2001, 112(9): 392-398.
- [41] DÖRBAND B. High precision testing of optical components [C]. *International Optical Design Conference. Kailua-Kona, Hawaii. Optica Publishing Group*, 1998: JWD. 2.
- [42] 胡源, 侯祺敏, 蒋红梅. 光学面形绝对检测方法发展综述[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 1-12.  
HU Y, HOU ZH M, JIANG H M. Review on the development of optical surface absolute detection methods[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2024, 44(2): 1-12. (in Chinese)
- [43] BLOEMHOF E E. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2346-2348.
- [44] ZHOU P, BURGE J H. Limits for interferometer calibration using the random ball test[C]. *Optical Manufacturing and Testing VIII. San Diego, CA. SPIE*, 2009: 74260U.
- [45] 全海洋. 干涉面形绝对检测不确定度评估方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.  
QUAN H Y. *Uncertainty Evaluation for Interferometric Testing of Absolute Surface Figure Error* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [46] 余俊, 王占山, 黄秋实, 等. 极紫外及X射线波段超光滑反射镜的超精密加工与检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2688-2697.  
YU J, WANG ZH SH, HUANG Q SH, *et al.* Ultra-precision machining and testing of reflector mirrors for extreme ultraviolet and X-ray[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(21): 2688-2697. (in Chinese)
- [47] XUE S, CHEN S Y, ZHAI D D, *et al.* Quasi-absolute surface figure test with two orthogonal transverse spatial shifts [J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 133-143.
- [48] CHEN S Y, DAI Y F, ZHAI D D, *et al.* Quasi-

- absolute interferometric testing of cylinders [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2278.
- [49] XU H, LU W W, LUO G J, *et al.* Absolute testing of rotationally symmetric surfaces with computer-generated holograms[J]. *Optics Express*, 2024, 32(18): 31055-31074.
- [50] SONG W H, WU F, HOU X, *et al.* Optimized absolute testing method of shift-rotation [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 7028-7032.
- [51] 杨彧. 基于多步平移剪切法的高精度绝对检测关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2024.  
YANG Y. *Research on High-precision Absolute Test Technology Based on Multi-step Translation Shear Method*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2024. (in Chinese)
- [52] SONG W H, HOU X, WU F, *et al.* Comparative analysis of absolute methods to test rotationally asymmetric surface deviation [C]. *Modeling Aspects in Optical Metrology IV. Munich, Germany*. SPIE, 2013: 87890Z.
- [53] 宋伟红. 基于平移旋转的球面绝对检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.  
SONG W H. *Absolute Testing of Spherical Surface with Shift-rotation Method*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [54] SONG W, HOU X, WU F, *et al.* Simple and rapid data-reduction method with pixel-level spatial frequency of shift-rotation method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 5974.
- [55] SONG W H, HOU X, WU F, *et al.* Absolute interferometric shift-rotation method with pixel-level spatial frequency resolution[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 68-72.
- [56] LIU Y, MIAO L, ZHANG W L, *et al.* Extended shift-rotation method for absolute interferometric testing of a spherical surface with pixel-level spatial resolution [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (16) : 4886.
- [57] HU X C, ZHANG S, HOU X, *et al.* Absolute testing method of shift-rotation based on the influence function[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3808-3815.
- [58] MORIN F, BOUILLET S. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat[C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V. Munich, Germany*. SPIE, 2007: 66164G.
- [59] SOLTANI P, DARUDI A. Absolute interferometric testing of a flat surface based on the Laplacian method [J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (11) : 3026-3029.
- [60] WANG X K, LIU Z K, SU H, *et al.* Mixed compensation for the testing of large convex aspheres [J]. *Results in Physics*, 2023, 55: 107189.
- [61] ZHANG S, HOU X, YAN W, *et al.* Multidimensional stitching method with wavelength tuned interferometry and unconstrained support tooling for large-thin parallel plate[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41219-41233.
- [62] WANG X, XUE S, CHEN S Y, *et al.* Stitching interferometric characterization of geometric errors of hemispherical shells [J]. *Measurement*, 2021, 181: 109626.
- [63] SHENG P F, YU J, WANG K, *et al.* Alignment aberrations compensation for near-cylinder surface stitching interferometry with near-null Computer-Generated Hologram based on Legendre-Fourier polynomials [J]. *Measurement*, 2024, 235: 115000.
- [64] CAO Z H, ZHANG H J, LI G, *et al.* Full surface profile measurement of a small sized ball based on a stitching measurement method by reversal clamping [J]. *Measurement*, 2025, 240: 115577.
- [65] CHEN D F, WANG C, VALYUKH S, *et al.* Bayesian uncertainty evaluation of stitching interferometry for cylindrical surface [J]. *Measurement*, 2020, 157: 107626.
- [66] YANG Z, YANG S, LI R, *et al.* Nonholonomic spherical stitching measurement method for large-aperture angles based on differential confocal precise surface fixation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109892.
- [67] ZHAO C Y. CGH and stitching technique: powerful combination enabling full-surface figure measurements of certain classes of aspheres[C]. *Optical Design and Testing VIII. October 11-13, 2018. Beijing, China*. SPIE, 2018: 3.
- [68] CHEN W W, CHEN S Y, TIE G P, *et al.* Null

- test of large convex aspheres by subaperture stitching with replaceable holograms[J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125665.
- [69] KONG L W, CHEN S Y. Subaperture stitching test for large aperture mild acylinders[J]. *Optics Communications*, 2020, 455: 124526.
- [70] CHEN S Y, XUE S, DAI Y F, *et al.* Subaperture stitching test of convex aspheres by using the reconfigurable optical null [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 175-184.
- [71] 李雯研,程强,曾雪锋,等. 计算全息补偿检测自由曲面的高精度位姿测量[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(11): 1581-1592.
- LI W Y, CHENG Q, ZENG X F, *et al.* High-precise posture measurement for measuring free-form surface with computer generated hologram compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(11): 1581-1592. (in Chinese)
- [72] CHEN S Y, ZHAO C Y, DAI Y F, *et al.* Stitching algorithm for subaperture test of convex aspheres with a test plate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 307-315.
- [73] XUE S, CHEN S Y, SHI F, *et al.* Sub-aperture stitching test of a cylindrical mirror with large aperture [C]. *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment. Suzhou, China.* SPIE, 2016: 96840C.
- [74] ZHANG S, HOU X, HU X C, *et al.* Stitching interferometry using Computer-Generated Hologram (CGH) based on sub-aperture adjustment aberration of 2-D Chebyshev polynomial[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106618.
- [75] HU H, SUN Z Z, XUE S, *et al.* Self-calibration interferometric stitching test method for cylindrical surfaces [J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 39188-39206.
- [76] TANG S H. Stitching: high-spatial-resolution microsurface measurements over large areas[C]. *Laser Interferometry IX: Applications. San Diego, CA, USA.* SPIE, 1998: 43.
- [77] VIVO A, BARRETT R, PERRIN F. Stitching techniques for measuring X-ray synchrotron mirror topography [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 021710.
- [78] LU W W, GUO J Y, CHEN S Y. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9).
- [79] GUO J Y, ZHAI D D, LU W W, *et al.* Topography measurement of helical grooves on a hemisphere based on stitching interference microscopy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108133.
- [80] LU W W, CHEN S Y, ZHANG K, *et al.* Characterization of diffractive relief structures over large areas by stitching interference microscopic topography[J]. *Measurement*, 2022, 202: 111850.
- [81] 张帅. 高精度K-B镜面形检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
- ZHANG SH. *Research on High Precision K-B Mirror Surface Detection Technology* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [82] GARBUSI E, OSTEN W. Perturbation methods in optics: application to the interferometric measurement of surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26(12): 2538-2549.
- [83] MURPHY P, DEVRIES G, FLEIG J, *et al.* Measurement of high-departure aspheric surfaces using subaperture stitching with variable null optics [C]. *Optical Manufacturing and Testing VIII. San Diego, CA.* SPIE, 2009: 74260P.
- [84] KULAWIEC A, MURPHY P, DEMARCO M. Measurement of high-departure aspheres using subaperture stitching with the Variable Optical Null (VON)[C]. *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. Dalian, China.* SPIE, 2010: 765512.
- [85] TRICARD M, KULAWIEC A, BAUER M, *et al.* Subaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating a variable optical null[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 547-550.
- [86] HENSELMANS R, CACACE L A, KRAMER G F Y, *et al.* The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(4): 607-624.
- [87] CACACE L A. *An Optical Distance Sensor Tilt*

- robust Differential Confocal Measurement* [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009.
- [88] HENSELMANS R. *Non-contact Measurement Machine for Freeform Optics* [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009.
- [89] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 161-186.
- LIANG Z J, YANG Y Y, ZHAO H Y, *et al.* Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese)
- [90] 苏榕, 刘嘉宇, 乔潇悦, 等. 用于表面形貌测量的扫描白光干涉技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 70-90.
- SU R, LIU J Y, QIAO X Y, *et al.* Advances in scanning white light interferometry for surface topography measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 70-90. (in Chinese)
- [91] DE GROOT P J, BIEGEN J F. Interference microscope objectives for wide-field areal surface topography measurements [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 074110.
- [92] 梁瀚钢. 自适应白光干涉包络提取方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2024.
- LIANG H G. *Study on Adaptive White Light Interference Envelope Extraction Method* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2024. (in Chinese)
- [93] 姚东. 大视场白光干涉三维形貌测量关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- YAO D. *Research on Key Technologies of Large Field of View White Light Interferometry for 3D Topography Measurement* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [94] 徐舒成, 袁群, 范筱昕, 等. 白光显微干涉多倍率形貌数据融合方法研究 [J]. 光学学报, 2025, 45(8): 200-208.
- XU SH CH, YUAN Q, FAN X X, *et al.* Multi-magnification topographic data fusion method based on white light microscopic interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(8): 200-208. (in Chinese)
- [95] 于颢彪. 大视场白光干涉物镜的设计与装校技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- YU H B. *Design and Calibration of Large-field White Light Interference Objective* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [96] 刘涛, 王智彬, 胡佳琪, 等. 大视场白光干涉测量系统及性能研究 [J]. 光子学报, 2024, 53(1): 136-148.
- LIU T, WANG ZH B, HU J Q, *et al.* Research on large field-of-view white light interferometry measurement system and performance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(1): 136-148. (in Chinese)
- [97] BIEGEN J F, DE LEGA X C, DE GROOT P J, *et al.* Wide-field interference microscopy for areal topography of precision engineered surface [C]. ASPE 2014 Annual Meeting. 2014: 163-166.
- [98] DE GROOT P J, BIEGEN J F. A new class of wide-field objectives for 3D interference microscopy [C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. Munich, Germany*. SPIE, 2015: 95250N.
- [99] DAVIDSON M, KAUFMAN K, MAZOR I, *et al.* An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology [C]. *Integrated Circuit Metrology, Inspection, & Process Control. Santa Clara, CA*. SPIE, 1987: 233.
- [100] SHI L H, WANG Y, ZHANG R X, *et al.* Femtosecond-laser-based full-field three-dimensional imaging with phase compensation [J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 21899-21910.
- [101] OLSZAK A. Lateral scanning white-light interferometer [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22): 3906-3913.
- [102] DE GROOT P, COLONNA DE LEGA X, LIESENER J, *et al.* Metrology of optically-unresolved features using interferometric surface profiling and RCWA modeling [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 3970-3975.
- [103] XIN L, LIU X, YANG Z M, *et al.* Three-dimensional reconstruction of super-resolved white-light interferograms based on deep learning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 145: 106663.

- [104] WANG Z B, GUO W, LI L, *et al.* Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 218.
- [105] YAN Y Z, LI L, FENG C, *et al.* Microsphere-coupled scanning laser confocal nanoscope for sub-diffraction-limited imaging at 25 nm lateral resolution in the visible spectrum [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1809-1816.
- [106] WANG F F, LIU L Q, YU P, *et al.* Three-dimensional super-resolution morphology by near-field assisted white-light interferometry [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24703.
- [107] PERRIN S, LEONG-HOÏ A, LECLER S, *et al.* Microsphere-assisted phase-shifting profilometry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7249-7255.
- [108] ZHOU Y, TANG Y, DENG Q Y, *et al.* Contrast enhancement of microsphere-assisted super-resolution imaging in dark-field microscopy [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(8): 082501.
- [109] 周毅. 基于白光显微干涉术的微纳结构三维形貌及其超分辨检测[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
- ZHOU Y. *Three-dimensional Topography and Its Super-resolution Measurement of Micro/Nano Structures Based on White-Light Microscopy Interferometry* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [110] PAHL T, HÜSER L, HAGEMEIERS S, *et al.* FEM-based modeling of microsphere-enhanced interferometry [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(4): 1.
- [111] MACONI G, LAIDMÄE I, KASSAMAKOV I, *et al.* Wide field of view 3D label-free super-resolution imaging [C]. *Photonic Instrumentation Engineering V. January 27-February 1*, 2018. San Francisco, USA. SPIE, 2018: 39.
- [112] KASSAMAKOV I, MACONI G, JÄRVINEN M, *et al.* Label-free 3D super-resolution nanoscope [C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. June 24-27*, 2019. Munich, Germany. SPIE, 2019: 27.
- [113] KASSAMAKOV I, YLITALO T, NOLVI A, *et al.* Label-free 3D super-resolution nanoscope with large field-of-view [C]. *Photonic Instrumentation Engineering VI. February 2-7*, 2019. San Francisco, USA. SPIE, 2019: 10.
- [114] 孙诗壮. 激光等离子体极紫外光源收集镜多层膜若干问题研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- SUN SH Z. *Research on Multilayer Coating of EUV Collector Mirror of Laser Plasma Source* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [115] 耿俊媛, 张号, 孟祥和, 等. 基于原子力显微镜的三维表面多参数检测技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2024, 54(12): 2221-2254.
- GENG J Y, ZHANG H, MENG X H, *et al.* Three-dimensional multi-parametric surface detection technology based on atomic force microscopy [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2024, 54(12): 2221-2254. (in Chinese)
- [116] CHENG B Y, YANG S M, WOLDU Y T, *et al.* A study on the mechanical properties of a carbon nanotube probe with a high aspect ratio [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(14): 145707.
- [117] CHENG B Y, YANG S M, LI W, *et al.* Controlled growth of a single carbon nanotube on an AFM probe [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2021, 7: 80.
- [118] SHIMIZU Y, CHEN L C, KIM D W, *et al.* An insight into optical metrology in manufacturing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 042003.
- [119] 黄宝锐, 彭勃, 任柄锋, 等. 偏振微面双向反射分布函数建模与仿真研究[J]. *光学技术*, 2024, 50(5): 560-566.
- HUANG B R, PENG B, REN Q F, *et al.* Modeling and simulation of polarization microfacet bidirectional reflectance distribution function [J]. *Optical Technique*, 2024, 50(5): 560-566. (in Chinese)
- [120] HUANG B R, PENG B, REN Q F, *et al.* Modeling and analysis of spectral polarization BRDF based on Microfacet theory [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2024, 313: 108830.
- [121] 吕洋, 曾雪峰, 张峰. 镜面散射对离轴三反系统成像质量的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 425-432.

- LÜ Y, ZENG X F, ZHANG F. Effect of surface scattering on imaging performance for off-axis three mirror optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 425-432. (in Chinese)
- [122] 辛磊, 杨忠明, 孟君, 等. 基于损伤程度量化评估的光学薄膜元件激光损伤阈值测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(3): 201-210. XIN L, YANG ZH M, MENG J, *et al.* Method for measuring laser damage threshold of optical thin film elements based on quantitative damage evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(3): 201-210. (in Chinese)
- [123] ZHANG L, WEI Z Y, ZHANG J L, *et al.* Quantitative assessment and suppression of defect-induced scattering in low-loss mirrors [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6025-6028.
- [124] MA Z P, WANG H, CHEN Q F, *et al.* Theoretical derivation and application of empirical Harvey scatter model [J]. *Optics Express*, 2024, 32(6): 8986-8998.
- [125] SCHRÖDER S, VON FINCK A, DUPARRÉ A. Standardization of light scattering measurements [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2015, 4(5/6): 361-375.
- [126] VON FINCK A, TROST M, SCHRÖDER S, *et al.* Parallelized multichannel BSDF measurements [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33493-33505.
- [127] TROST M, SCHRÖDER S, DUPARRÉ A. Evaluation of subsurface damage and surface roughness by light scattering techniques [J]. 2014: OTh3B. 6.
- [128] SCHRÖDER S, TROST M, HERFFURTH T, *et al.* Surface characterization of high-end optical components using light scattering [J]. 2017: OW3B. 6.
- [129] SCHRÖDER S, GARRICK M, MUNSER A S, *et al.* Spectral laser damage testing of optical materials [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2017, 6(5): 359-369.
- [130] HERFFURTH T, SCHRÖDER S, TROST M, *et al.* Comprehensive nanostructure and defect analysis using a simple 3D light-scatter sensor [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3279-3287.
- [131] VON FINCK A, HERFFURTH T, DUPARRÉ A, *et al.* International round-robin experiment for angle-resolved light scattering measurement [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(24): 6638.
- [132] TROST M, SCHRÖDER S, HAUPTVOGEL M, *et al.* Device and method for measuring angle-resolved scattering: WO2010127872 [P]. 2013.
- [133] CHEN Z H, JIAN Z X, CHEN C, *et al.* Portable angle-resolved scattering system to measure high spatial frequency roughness for ultra-smooth surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 175: 108031.
- [134] TROST M, HERFFURTH T, SCHRÖDER S, *et al.* *In situ* and *ex situ* characterization of optical surfaces by light scattering techniques [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(9): 092013.
- [135] SCHRÖDER S, HAUPTVOGEL M, TROST M, *et al.* Light scattering characterization of optical components for space applications [C]. *International Conference on Space Optics-ICSO 2016. October 18-21, 2016. Biarritz, France.* SPIE, 2017: 98.
- [136] KHORIN P A, DZYUBA A P, KHONINA S N. Optical wavefront aberration: detection, recognition, and compensation techniques—a comprehensive review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 191: 113342.
- [137] 李明泽, 侯溪, 赵文川, 等. 非球面光学表面缺陷检测技术现状和发展趋势 [J/OL]. *红外与激光工程*, 2022: 1-18. (2022-08-29). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HWYJ20220826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. LI M Z, HOU X, ZHAO W CH, *et al.* Current situation and development trend of aspheric optical surface defect detection technology [J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022: 1-18. (2022-08-29). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HWYJ20220826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [138] 石峰, 乔硕, 邓明杰, 等. 熔石英元件小尺寸集群损伤修复及检测技术(特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 57-67. SHI F, QIAO SH, DENG M J, *et al.* Small-scale cluster damage mitigation and detection on fused silica surface (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 57-67. (in Chinese)
- [139] ZHANG W L, SHI F, DAI Y F, *et al.* Re-

- search on the surface evolution of single crystal silicon mirror contaminated by metallic elements during elastic jet polishing techniques[J]. *Materials*, 2019, 12(7): 1077.
- [140] QIAO S, SHI F, TIAN Y, *et al.* Modeling and experiment on elastic region low defect jet polishing for fused quartz[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 77: 831-837.
- [141] ZHU J L, LIU J M, XU T L, *et al.* Optical wafer defect inspection at the 10 nm technology node and beyond[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(3): 032001.
- [142] LIU J M, ZHU J L, YU Z, *et al.* Quasi-visualizable detection of deep sub-wavelength defects in patterned wafers by breaking the optical form birefringence [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7(1): 015601.
- [143] 王世通, 杨甬英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 227-236.
- WANG SH T, YANG Y Y, ZHAO L M, *et al.* Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 227-236. (in Chinese)
- [144] 吴凡. 基于暗场散射的精密表面微小缺陷检测能力提升技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- WU F. *Detection Capability Improvement Technology for Weak Defects on Smooth Surfaces Based on Dark Field Scattering*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [145] WANG S L, SUN H Y, HU X B, *et al.* Scanning strategy for surface defects evaluation of large fine optical components[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108473.
- [146] 高萍萍, 陆敏, 王治乐, 等. 表面纳米粒子缺陷的偏振散射特性区分[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 975-987.
- GAO P P, LU M, WANG ZH L, *et al.* Differentiation of polarization scattering characteristics of surface nanoparticle defects [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 975-987. (in Chinese)
- [147] 陆敏, 王治乐, 张树青. 表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 375-381.
- LU M, WANG ZH L, ZHANG SH Q. Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 375-381. (in Chinese)
- [148] LU M, ZHANG S Q, WANG Z L. Establishment and verification of diffraction BRDF model for scratched material surface[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106597.
- [149] 黄聪, 张科鹏, 王翔, 等. 基于总散射测量的表面质量检测新方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 150-157.
- HUANG C, ZHANG K P, WANG X, *et al.* Method for surface quality inspection based on total scattering measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 150-157. (in Chinese)
- [150] 张科鹏. 基于散射测量的光学元件表面质量评估方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- ZHANG K P. *Assessing Surface Quality for Optical Components by Light Scattering Measurement* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [151] KLINGSPORN P E. Determination of the diameter of an isolated surface defect based on Fraunhofer diffraction [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1435-1438.
- [152] 武勇军, 白闻喜. 激光衍射图样识别法检验光学零件表面疵病[J]. *光学技术*, 1996, 22(4): 4-6.
- WU Y J, BAI W X. Defects inspection of optical, surface by recognizing laser diffraction patterns[J]. *Optical Technique*, 1996, 22(4): 4-6. (in Chinese)
- [153] HUANG J, WANG F R, LIU H J, *et al.* Non-destructive evaluation of UV pulse laser-induced damage performance of fused silica optics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16239.
- [154] SONG J L, SHI F, XIAO Q, *et al.* Effect of elastic region nanoparticle SiO<sub>2</sub> jet polishing on the laser damage properties of fused silica [C]. *Pacific Rim Laser Damage 2017: Optical Materials for High-Power Lasers*. Shanghai, China. SPIE, 2017: 103392E.
- [155] ZHANG W L, SHI F, DAI Y F, *et al.* Single crystal silicon: surface evolution regularity of

- chemical etching and effect of nano jet polishing on damage precursor[C]. *Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging*. November 26-28, 2018. Hefei, China. SPIE, 2019: 105.
- [156] LIU H J, HUANG J, WANG F R, *et al.* Sub-surface defects of fused silica optics and laser induced damage at 351 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12204-12217.
- [157] LIU H J, HUANG J, WANG F R, *et al.* Photo-luminescence defects on subsurface layer of fused silica and its effects on laser damage performance [C]. *International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014*. Chengdu, China. SPIE, 2015: 92553V.
- [158] SUN L X, LIU H J, HUANG J, *et al.* Reaction ion etching process for improving laser damage resistance of fused silica optical surface [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 199-211.

**作者简介:**

李佳慧(1996—),女,河北河间人,博士,2024年毕业于中国科学院大学,主要从事光学元件原子级制造及检测技术的研究。Email:lijiahui\_1996@163.com

**通讯作者:**

匡翠方(1977—),男,江西南昌人,教授,博士生导师,主要从事三维超分辨光学显微成像、超分辨光刻及超精密光学检测技术的研究。E-mail: cfkuang@zju.edu.cn