应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

面向芯片制造的检焦技术进展

唐白洋 王楠 李萍萍 袁欣蕾

Progress in focus detection technology for chip manufacturing

TANG Baiyang, WANG Nan, LI Pingping, YUAN Xinlei

引用本文:
唐白洋, 王楠, 李萍萍, 等. 面向芯片制造的检焦技术进展[J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1041–1055. DOI: 10.5768/JAO202647.0513005
TANG Baiyang, WANG Nan, LI Pingping, et al. Progress in focus detection technology for chip manufacturing[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1041–1055. DOI: 10.5768/JAO202647.0513005

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202647.0513005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于图像清晰度函数的调焦机构限区间变速控制方法

Method of variable speed control for focusing mechanism limited interval based on image definition function

应用光学. 2021, 42(6): 969–974 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601004

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase–shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703–708 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002

基于*N*次图像旋转法的两平晶三面互检技术研究

Two–flat crystal three–sided mutual test technology based on *N*–position image rotation method

应用光学. 2021, 42(1): 104–112 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103002

基于单次曝光光场成像的全焦图像重建技术

Single exposure light field imaging based all–in–focus image reconstruction technology

应用光学. 2021, 42(1): 71–78 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102004

改进型双光路测量法检测角锥棱镜直角误差

Improved double–pass measurement method for detecting right–angle errors of corner cube prisms

应用光学. 2025, 46(1): 148–155 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0103004

基于短波红外偏振成像的集成电路芯片污染缺陷检测

Detection of pollution defects in integrated circuit chips using short–wave infrared polarization imaging

应用光学. 2025, 46(2): 388–394 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2026) 05-1041-15
引用格式:唐白洋, 王楠, 李萍萍, 等. 面向芯片制造的检焦技术进展 [J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1041-1055.
TANG Baiyang, WANG Nan, LI Pingping, et al. Progress in focus detection technology for chip manufacturing[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1041-1055.

在线阅读

面向芯片制造的检焦技术进展

唐白洋[1], 王 楠[1,2], 李萍萍[1], 袁欣蕾[1]

(1. 西南交通大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 611756; 2. 香港科技大学 电子与计算机工程系, 中国香港 清水湾)

摘 要:高精度检焦技术是光刻、显微成像、精密光学检测及机器视觉等光学系统的核心关键技术,直接决定了系统成像清晰度、加工精度与检测稳定性。针对传统检焦技术存在的检测精度受限、抗干扰能力弱、动态响应慢以及大视场与复杂工况适配性差等问题,国内外学界与产业界持续围绕检焦原理、图像清晰度评价函数及检焦系统硬件方案开展迭代优化。本文系统阐述了离轴三角测量法、临界角法、像散法等主流检焦技术的工作原理,梳理了国外光刻龙头企业所采用的检焦技术方案,并分析了国内检焦技术近年来的研究进展。最后,总结了当前行业技术现状,提出了若干可优化的方向,并对检焦技术未来的蓬勃发展及多元化应用进行了展望。

关键词:检焦技术;图像清晰度评价函数;三角测量法;临界角法;像散法
中图分类号:TN305.7 **文献标志码**:A **DOI**: 10.5768/JAO202647.0513005

Progress in focus detection technology for chip manufacturing

TANG Baiyang[1], WANG Nan[1,2], LI Pingping[1], YUAN Xinlei[1]

(1. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Department of Electronic & Computer Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong SAR, China)

Abstract: High-precision focus detection technology is a core key technology in optical systems such as lithography, microscopic imaging, precision optical inspection, and machine vision, directly determining system image clarity, processing accuracy, and measurement stability. Addressing the limitations of traditional focus detection methods, including restricted detection accuracy, weak anti-interference capability, slow dynamic response and poor adaptability to large fields of view and complex operating conditions, academia and industry both at home and abroad have continuously iterated and optimized focus detection principles, image sharpness evaluation functions and hardware system designs. In this paper, the working principles of mainstream focus detection techniques, including off-axis triangulation, the critical angle method, and aberration-based methods, were systematically explained. The focus detection solutions adopted by leading international lithography companies were reviewed, and recent research progress in domestic focus detection technologies was analyzed. Finally, the current state of the industry was summarized, several potential optimization directions were identified, and the future development and diversified applications of focus detection technology were discussed.

收稿日期:2026-07-10; **修回日期**:2026-08-21
基金项目:四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0078)
第一作者:唐白洋, E-mail: 18384551611@163.com
通信作者:王楠, E-mail: 705679317@qq.com

Key words: focus detection technology; image clarity evaluation function; triangulation method; critical angle method; astigmatism method

引言

随着精密光学成像、微纳加工、机器视觉、激光检测与半导体光刻技术的高速发展[1-4]，光学系统的成像精度、分辨率与稳定性要求持续提升，精准、快速、稳定的检焦与对焦控制已成为保障光学设备工作性能的关键环节。在显微观测、精密测量、工业视觉检测、无人机航拍及光刻曝光等应用场景中[5]，物镜与被测面之间的焦面偏移、机械振动、环境温漂及载物台位移等因素，极易引发离焦模糊、成像畸变与加工精度下降等问题，直接制约设备的检测精度、加工良率与工作稳定性。因此，高性能检焦技术作为光学系统自动对焦、焦面锁定与误差补偿的核心支撑，是实现高精度、自动化与智能化光学作业的基础，对推动精密光学工程与高端装备制造领域的发展具有重要的工程价值与研究意义。

检焦技术通过光学探测、信号采集与算法解算，实时获取系统离焦量及离焦方向，为对焦闭环控制与焦面校准提供核心数据支撑。经过长期技术迭代，国内外已形成体系化的检焦技术方案，依据探测原理可分为被动式检焦与主动式检焦两类。其中，被动式检焦依托图像清晰度评价函数，提取图像灰度梯度、频谱及纹理特征[6]判定离焦状态，具有光路简单、成本低廉、无需辅助光源等优势，广泛应用于常规机器视觉与民用成像场景；主动式检焦则通过发射探测光束并接收光电反馈信号实现非接触式检焦，涵盖差动检焦、临界角检焦、激光共聚焦检焦及三角测距检焦等主流技术，凭借抗干扰能力强、响应速度快及检测精度高等优势，成为高端精密光电装备的核心检焦方案。

本文首先系统阐述了多种检焦技术的工作原理，继而介绍了国外三大光刻龙头企业的检焦技术方案，随后分析了国内近年来检焦技术的研究进展，最后对全文进行总结，并对检焦技术的未来发展趋势进行了展望。

1 各类检焦技术原理

被动式检焦的核心在于利用图像清晰度评价函数实现离焦状态的量化判定，其本质是通过提取清晰图像与离焦图像之间的固有特征差异来构建量化指标：光学系统精准对焦时，目标边缘锐利、细节丰富，特征差异显著；发生离焦时，光线弥散导致图像边缘模糊、细节衰减，特征趋于平滑。目前主流的清晰度评价机制主要基于灰度梯度特征、频域频谱特征及空间纹理特征三类原理实现。

灰度梯度是描述图像局部像素灰度变化剧烈程度的空间域特征，也是被动检焦中应用最广泛的基础特征。在光学成像过程中，清晰对焦图像的目标边缘与轮廓区域像素灰度突变明显，梯度数值整体偏大；而图像离焦后，成像光斑弥散造成像素灰度均值化，相邻像素间的灰度差异被抹平，整体梯度幅值显著降低。频谱特征的核心在于利用傅里叶变换将空间域图像转换为频率域信号，通过分析图像高频与低频分量的能量分布来判定离焦状态。从光学成像特性来看，图像的低频分量对应整体亮度、大面积背景等基础信息，高频分量对应边缘、细节、纹理等精细特征。纹理特征是表征图像局部区域灰度分布规律与空间重复性的综合特征，聚焦于图像局部区域的灰度相关性与分布均匀性，适用于复杂纹理目标的检焦场景。清晰图像的纹理结构规整、灰度分布差异大、局部相关性弱，纹理细节层次丰富；离焦图像则呈现纹理平滑、结构模糊、灰度分布趋于均匀的特征，局部像素相关性显著增强。

主动式检焦技术可细分为离轴三角测量法、同轴检焦法、激光干涉检焦法及气动检焦法等，其中同轴检焦法又包括像散法、临界角法和准直小孔调焦法。

离轴三角测量法[7-8]是早期光刻机等精密光学系统中主流的非接触式离焦检测技术，如图 1 所示，其核心是利用斜入射光束与三角几何关系，通过反射光斑在探测器上的位置偏移反推硅片表面的离焦量与倾斜量。光源发出的测量光束以固定倾斜角 θ 入射至硅片表面某测量点，经硅片表面反射后，由成像透镜会聚至位置敏感探测器 (position-sensitive detector, PSD)、电耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 等探测器上。此时投射光轴与接收光轴形成固定夹角，构成三角测量基线。当硅片沿 z 轴(即垂直物镜光轴方向)产生离焦量 h 时，反射光束的出射角将发生微小变化，导致探测器上光斑像产生位移 Δy，由相似三角形关系可近似表示为

$$\Delta y = 2h\tan\theta \tag{1}$$

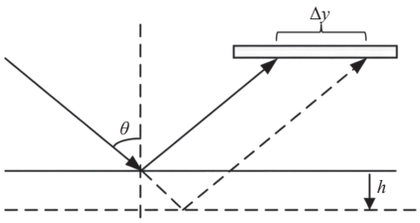


图 1　离轴三角法

Fig. 1　Off-axis triangle method

随着检焦技术的不断发展, 三角测量法因其技术原理的局限性, 在应用上逐渐受到制约。投影物镜的数值孔径持续提高[9], 物镜与基片之间的间距不断缩小, 加之浸没式投影物镜的使用使得两者之间还存在液体介质, 因此像散法、临界角法、准直小孔调焦法等同轴检焦方法及其他检焦技术[10-18]逐渐占据主导地位。

像散法检焦[11]利用柱面透镜的像散特性实现离焦检测, 如图 2 所示。其核心在于接收光路中引入柱透镜, 使光学系统在子午方向与弧矢方向上拥有两个相互独立且位置不重合的焦平面。当硅片处于最佳聚焦位置时, 子午焦面与弧矢焦面关于探测面中心对称, 探测器上形成均匀规整的圆形光斑; 当硅片发生正向或负向离焦时, 两个正交方向的聚焦位置相对探测器平面发生偏移, 光斑随之拉伸为横向或纵向椭圆, 且离焦量越大, 椭圆畸变程度越明显。

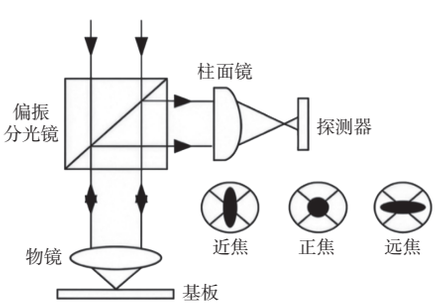


图 2　像散法

Fig. 2　Astigmatism method

随后, 通过光电探测器采集光斑的二维光强分布, 解析光斑长短轴比值及形态畸变规律, 并结合标定关系, 即可定量计算出实际离焦数值与离焦方向。该方案光路结构紧凑、成本低廉、实时性强, 属于光强与光斑形态联合检测方案; 但其易受硅片表面图形、膜层反射率及倾斜角度的影响, 可能导致光斑光强分布发生畸变, 从而限制纳米级超高检焦精度的实现。

临界角法检焦[12]的工作原理如图 3 所示。当被测基底处于物镜正焦位置 F_0 时, 反射的检焦光束为平行光。此时, 可通过调整临界角棱镜的姿态, 使入射光束刚好满足全反射条件, 出射光斑呈均匀圆形, 四象限探测器(four-quadrant detector, QD)4 个象限接收的光通量相等, 输出的差动信号为零。

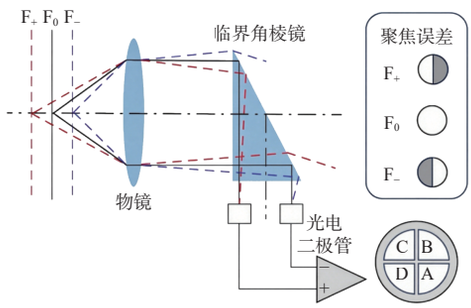


图 3　临界角法

Fig. 3　Critical angle method

当基底处于正离焦位置 F_+时, 反射光经投影透镜后变为会聚光束。此时, 光轴上侧(对应探测器 C、D 象限)的光线入射角大于临界角, 发生全反射; 光轴下侧(对应 A、B 象限)的光线入射角小于临界角, 部分能量因折射而损失, 反射光强减弱。因此, 探测器上侧光通量明显大于下侧, 输出差动电流为正。反之, 当基底处于负离焦位置 F_-时, 反射光变为发散光束, 光轴下侧光线发生全反射, 上侧光线部分折射, 探测器下侧光通量大于上侧, 输出差动电流为负。通过差动电流的正负与大小, 即可判断离焦方向与离焦量。

准直小孔调焦法检焦[11]的核心在于利用针孔滤波约束与光路聚焦成像特性实现离焦判别, 如图 4 所示。系统在检测光路中设置微小尺寸的针孔光阑, 照明光束经光学系统入射至硅片表面后发生反射, 反射光线原路折返并汇聚至针孔平面。当硅片处于最佳焦面位置时, 反射光束的焦点严格落在针孔中心平面, 光束能量可最大限度透过针孔, 后端光电探测器接收到的光强达到峰值且数值稳定; 一旦硅片产生正向或负向离焦, 反射光束的聚焦点会偏离针孔基准平面, 光束在针孔处发生弥散、光斑扩大, 仅有少部分光线能够穿过针孔, 导致探测器接收光强显著衰减, 且离焦量越大, 光强损耗越严重。结合光强衰减的变化规律与标定曲线, 不仅可以获取实时离焦量, 还能依据光强变化趋势判断离焦偏移方向。该方法结构简单、抗环境杂散光干扰能力强, 依靠针孔的空间

滤波作用可有效过滤杂散反射光与衍射杂光，检测稳定性优异。然而，受针孔孔径大小、光路衍射效应及光源均匀度的限制，在超大范围、超高精度纳米级检焦场景中仍存在一定局限性。

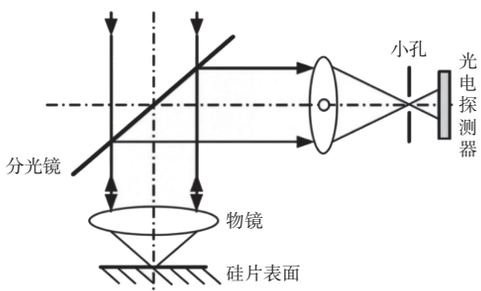


图 4 准直小孔调焦法

Fig. 4 Alignment small-hole focusing method

激光干涉检焦原理[19-20]如图 5 所示，可简述为：He-Ne 激光器提供初始光源，经分光棱镜分为参考光与测量光。测量光经硅片表面反射后原路返回，CCD 采集测量光与参考光叠加形成的干涉条纹。硅片表面的高度起伏与倾角偏差将导致干涉条纹的周期及相位发生变化，借助傅里叶变换及其逆变换对检焦信号进行处理，提取条纹相位信息，即可还原得到硅片表面形貌。这使得激光干涉检焦技术能够获取曝光场内一个区域的形貌图，而传统检焦方法通常采用多点测量方式拟合硅片曝光场内的形貌。该检测方案应用于 i 线光刻机后，其高度测量与倾斜量测量的重复性精度分别可达±0.02 μm 和±0.24 μrad[20]。

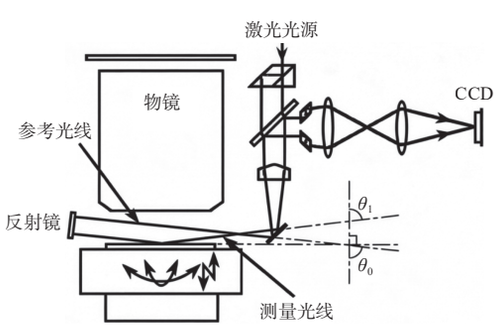


图 5 激光干涉检焦

Fig. 5 Laser interferometry for focusing adjustment

尽管激光干涉检焦技术在垂直高度与倾斜量检测上具备极高的测量精度，但由于其光路结构的特殊性，该方法仍存在若干不足，例如横向分辨力偏低；同时，硅片表面不同膜层的厚度及材质差异会改变激光反射后的干涉效果，破坏测量光束的波前完整性，进而引入测量偏差。此外，激光干涉检焦的信号处理流程较为繁琐，系统响应速度慢，实时性不足。受上述问题的共同制约，该技术难以在步进扫描光刻机中得到广泛应用。

气动检焦技术原理[21-24]如图 6 所示。恒定气流经分流管路后分为测量端与参考端两条气路：其中，参考端喷气喷嘴与基准平面位置保持固定；而测量端喷嘴与待测硅片表面的间隙大小随硅片表面高度起伏而发生变化。当喷嘴与被测面之间的间距变化时，两条气路之间将产生气压差值，借助气压传感器采集该压差信号，即可实现对硅片表面形貌的检测。通常情况下，气压传感器可识别低至 1 Pa 的气压波动，对应被测面与喷嘴之间的检测灵敏度可达亚纳米量级。

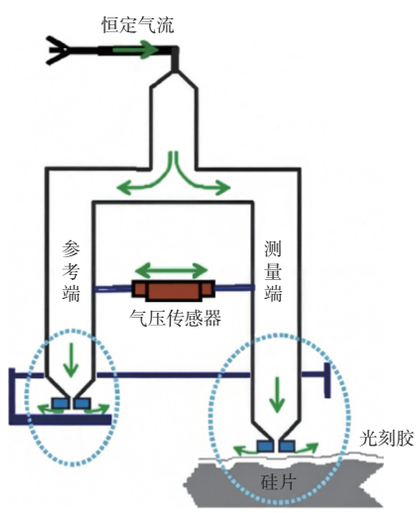


图 6 气动检焦技术

Fig. 6 Pneumatic focusing technology

与光学检焦技术不同，气动检焦技术不易受待测样品物理与化学性质的干扰，具备优异的工艺适配能力。但该技术同样存在明显短板：其一，气动检测响应速度有限，难以在短时间内完成大范围区域的快速测量，因此大多仅用于对传统光学检焦结果进行校准与误差补偿；其二，极紫外（extreme ultraviolet, EUV）光刻需全程处于真空工作环境，受此条件限制，气动检焦无法应用于 EUV 光刻场景中[25]。

2 国外三大光学公司检焦技术

前文介绍了多种检焦技术的原理，并总结分析了各自的优缺点。下面简要介绍国外三家主流公司所采用的检焦技术，其效率、精度与稳定性等综合指标引领着整个行业的发展。

2.1　Canon 公司检焦技术

1987 年, 佳能公司的早期步进式光刻机便引入了光学自动检焦系统[26], 其结构如图 7 所示。该系统的照明单元选用了 3 组中心波长均为 800 nm 的不同波段发光二极管 (light-emitting diode, LED), 光束以特定角度入射至硅片表面后, 经透镜成像并传输至 PSD; 根据光斑在 PSD 感光面上的坐标信息, 即可解算出硅片的离焦偏移量。该系统引入多波长检测机制, 一方面可有效抑制硅片光刻胶薄膜带来的多光束干涉干扰, 另一方面可利用不同波长下反射光能量与光刻胶厚度的关联关系, 对 3 组测量值进行加权平均以提升离焦量检测精度。同时, 系统在出射光路中增设一路参考 LED 光, 用于补偿 PSD 中心漂移与工作不稳定性, 进一步增强整体抗干扰能力与工作稳定性。整套系统最终可实现 0.05 μm 的检测精度。

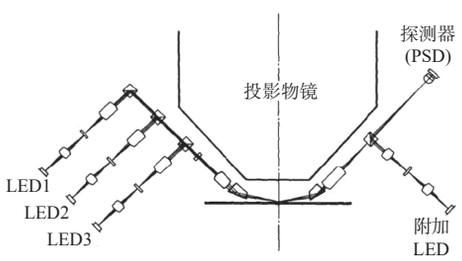


图 7　Canon 公司早期光学检焦系统[26]

Fig. 7　Early optical focusing system of Canon[26]

随着光刻机进入步进重复光刻发展阶段, 佳能公司的 KAWASHIMA H 等提出了如图 8 所示的检焦检测方案[27]。该方案定义了多波长斜入射与 CCD 阵列检测架构, 具有里程碑意义。其照明单元采用激光器或高亮度 LED, 通过准直系统将光束整形为平行光后, 照射至检焦标定处。检焦标定处设有多个呈中心对称分布的针孔结构, 光束依次经过成像镜头 1 与反射棱镜后, 将检焦标记成像投射至光刻机当前曝光视场中, 形成图 8(b) 所示的标定像。随后, 该标定像通过右侧后续光路成像于二维探测器件的探测面上。当硅片发生垂直方向偏移或绕 x、y 轴发生倾角偏转时, 二维探测器采集的各针孔标记像将随之产生位置偏移; 通过解算各标记像的偏移量, 即可在单个曝光场内解算出 5 个测量点位的高度信息。

光刻机完成从步进重复向扫描工作模式的技术升级后, 投影物镜出射成像区域由方形视场切换为狭缝型视场, 必须依靠工件台的同步扫描运动, 方可实现掩模图形向硅片的复制转移。受光

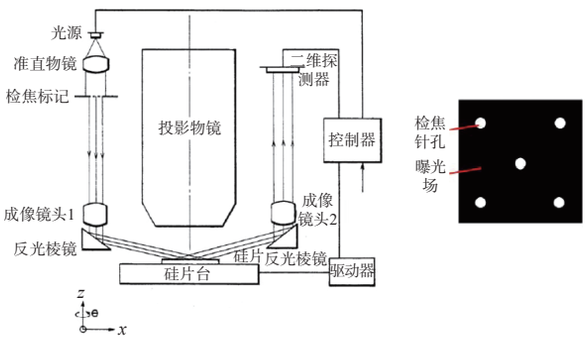


图 8　Canon 公司步进重复光刻机检焦系统[27]

Fig. 8　Focusing system of step-and-repeat lithography machine of Canon[27]

刻物镜焦深不断减小与工件台扫描速率显著提升的双重影响, 检焦技术亟需同步提高检测速率与测量精度。佳能公司在步进光刻机成熟检焦架构的基础上完成了系统升级, 针对照明光源、检测标记、光路结构、测量逻辑及探测器件等多个维度进行了优化设计[28]。在曝光视场预检测阶段, 设备采用双向扫描策略, 通过上下两组相反扫描路径重复采集硅片高度信息, 并结合误差修正模型, 以缓解单一扫描方向易受硅片表面形貌波动干扰所带来的测量误差问题[29]。该优化后的检焦体系在硅片离焦与倾斜参数的检测性能上实现了显著突破。相关研究资料表明, 将该检测方案集成至 FPA-5000AS2 光刻设备后, 倾斜角度检测精度可达 2.85 μrad, 垂直方向测量精度可达 32.6 nm[30]。

2.2　Nikon 公司检焦技术

在早期步进重复光刻机平台上, 尼康公司采用焦面检测与倾角检测一体化的光路方案, 其原理结构如图 9 所示[31-32]。

在 NSR-S201A 步进扫描光刻机中, 尼康公司采用了多点探测技术, 其检焦标记由点阵与狭缝阵

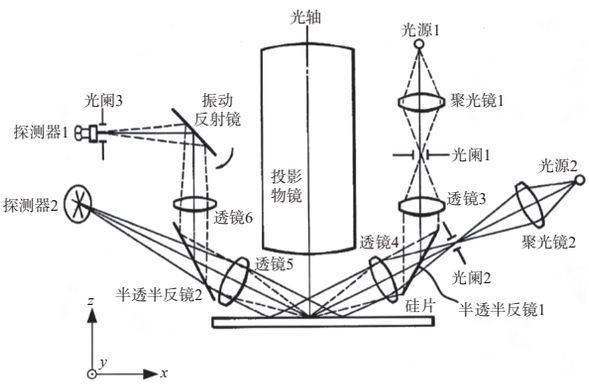


图 9　Nikon 公司光学检焦系统[31]

Fig. 9　Optical focusing system of Nikon[31]

列构成，不仅覆盖当前曝光狭缝，还向前后延伸[33]，且可将狭缝曝光区间对应的检焦测量结果用作伺服电机位置闭环回路的实时传感依据。而曝光狭缝外的检焦数据，则可用于提前获取硅片的形貌信息。这些预先测得的数据可在曝光狭缝移动至下一个曝光位置前，完成硅片离焦量与倾斜量的补偿。

随后，HAGIWARA T 等对 NSR-S201A 的检焦标记进行了优化，将其替换为狭缝阵列，并从 45 个狭缝中筛选出 9 个采样点，用于硅片离焦量与倾斜角度的计算。该采样结构可适应不同的曝光扫描方向，同时针对硅片边缘曝光场的形貌测量，能够灵活调整采样点位，缩短光刻机扫描移动路径，从而提升曝光速度[34]。

在 193 nm S305 光刻机型中，尼康公司对其光学通路进行了多项改良设计。在光路元件层面，摒弃了原有反射镜组件，改用五边形棱镜完成光路折转，以简化整机光路调试工作，如图 10 所示。该棱镜结构具有较强的抗角度偏移能力，轻微旋转误差不会造成输出光束位置与传播角度的偏移。在检测标记设计方面，全新采用了 7×7 狭缝阵列，覆盖面积更大[35-36]。

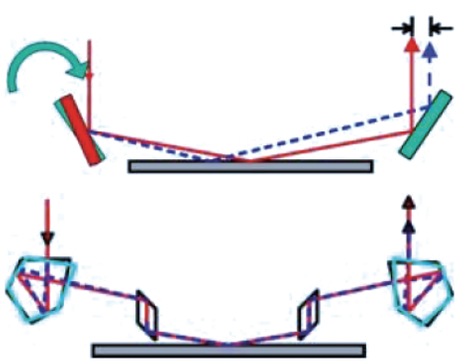


图 10 五边棱镜优化方案[35]

Fig. 10 Optimization scheme for pentaprism[35]

2.3 ASML 公司检焦技术

ASML 早期检焦技术与 Canon、Nikon 类似，也采用结构较为简易的三角入射光度检焦方式，如图 11 所示。通过调整光路中平行平板的倾斜角度，可使检焦光束产生横向位移，从而在最佳焦面处校正成像光斑位置。该方案以差分探测手段捕捉检焦光斑，其信号随离焦量变化的曲线中，横、纵坐标分别表征离焦偏移量与差分信号幅值。在焦平面附近区间内，二者呈线性变化关系，信号归零处对应理想对焦位置。该方案测量精度有限，仅能满足早期低精度光刻设备的使用需求[37-38]。

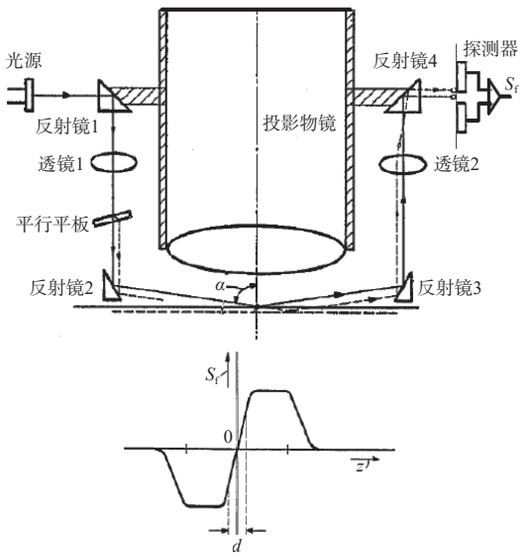


图 11 ASML 早期检焦系统及检焦信号[37]

Fig. 11 Early optical focusing system of ASML and focusing signal[37]

光刻机步入步进重复式架构后，ASML 引入了 Philips 研发的光强调制光闸条纹检焦技术[39-40]。该技术在单个曝光场内布设 4 路检焦光路，可分别采集各区域的高度信息，以此解算曝光场的离焦量与倾斜量，如图 12 所示。系统工作时，照明光纤出射光经准直透镜转换为平行光，再通过分光镜分光后，入射至周期为 40 μm 的线式物光栅。光束经多次成像后，与同周期像光栅叠加形成莫尔条纹。同时，在右侧光路中集成偏振器、Savart 板、光弹调制器及检偏器，通过调制莫尔条纹光强，拓宽系统动态范围并提升光路对照明不均匀、杂散光及光路漂移的抗干扰能力。该检焦光路还将光束分为物镜与硅片两路，以差动检测方式获取两者间的相对间距变化，可有效抑制共模干扰，进一步提升系统工作稳定性。此外，VAN DER WERF J E 针对光刻膜层光束干涉所引发的表观表面凹陷 (apparent-surface-dip, ASD) 效应展开了研究，通过采用宽光谱光源实施检焦，大幅削弱了光刻胶厚度波动带来的检焦误差。该方案垂直离焦测量重复性可达 25 nm，倾斜离焦测量重复性可达 2 μrad[40-41]。ASML 后续相关实验数据也证实，在 1 000 nm 和 1 010 nm 两种膜层厚度条件下，该检焦方式产生的 ASD 误差仅为 1 nm[42]。

为持续抑制 ASD 效应带来的不利影响，ASML 将近紫外宽光谱光源搭载于 NXT 光刻机中[43]。试验结果表明，被胶层吸收的检焦光线不会诱发光刻胶性能劣化，且光刻胶薄膜对近紫外光具有较

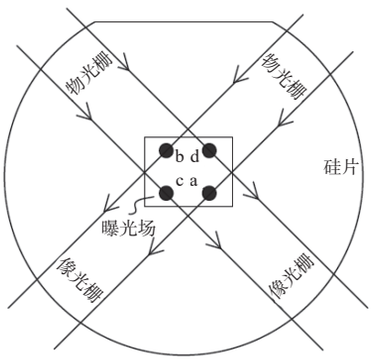


图 12　ASML 的 4 路检焦技术[39]

Fig. 12　Four-beam focusing technology of ASML[39]

高的吸收效率, 可有效降低膜层内部光反射, 压制多光束干涉干扰。

进入极紫外光 (extreme ultraviolet, EUV) 光刻时代后, 由于 13.5 nm 极紫外光几乎被所有材料吸收, 无法使用透射透镜, 系统须在真空环境下利用光线的全反射特性, 由此构建了“掠入射反射式光学三角法-相干衍射相位测量-多传感器融合闭环控制”的一体化检测体系。其中, 反射镜片主要采用 Mo/Si 多层膜结构[44]。Mo/Si 材料在该波段具有较大的折射率对比度, Mo 和 Si 自身的吸收水平相对较低, 且经过长期研究积累已形成较为成熟的界面调控手段, 现已实际应用于半导体 EUV 光刻设备。理论计算表明, Mo/Si 多层镜的近正入射反射率可超过 0.74, 经实验工艺优化后, 实际器件的近正入射反射率可达 0.7 以上。但由于光刻机光学系统包含多片反射镜, 多次反射会导致光通量显著衰减。此外, Mo 与 Si 在热力学条件下易发生互扩散并生成 $MoSi_2$ 硅化物, 沉积过程中界面会形成非晶混合反应层, 受热后扩散进一步加剧, 反应层会破坏理想的折射率分布, 导致反射性能退化。为抑制硅化物生成, 行业通常引入 B_4C 或 Be 作为扩散阻挡层, 以获得更陡峭的界面并提升反射率。在制备技术方面, 磁控溅射、离子束溅射等溅射工艺是 EUV 光刻多层镜的主流制备方案, 所制器件性能已接近理论极限。

近期, ASML 与三星的 OP'T ROOT W 等[45] 开展了基于光学衍射的 EUV 曝光焦点偏差测量方法研究, 利用不同图形之间最佳焦平面的差异, 设计了焦点敏感型计量标靶。该标靶搭配光学计量设备, 即可实现 EUV 焦点检测。实验采用 24 nm 节距的线-间隔图形, 搭配低 n 值 EUV 掩模吸收层材料、金属氧化物光刻胶 (metal oxide resist, MOR) 及 0.33 数值孔径 (numerical aperture, NA) 的 EUV 扫描光刻机, 最优标靶实现了 1.4 nm 的总焦点测量不确定度。实验发现, 仿真与实测标靶性能之间存在偏差, 主要源于未校准的光刻模型及掩模吸收层参数不匹配, 但仿真生成的标靶池仍能筛选出符合指标的标靶。采用该标靶测得晶圆焦点分布, 经扫描仪反馈校正后, 焦点 3σ 波动由 19 nm 改善至 16 nm, 证实该技术具备向 0.55 NA EUV 工艺拓展的潜力。

全球三家主流光刻机厂商的检焦技术各具代表性, 其技术演进大致可分为以下阶段。发展初期, 主要利用单狭缝或单点检焦标记, 以倾斜角度入射硅片表面, 通过 PSD、CCD 等探测器捕捉狭缝或光斑的成像偏移量, 进而解算硅片离焦量。发展中期, 技术升级为依托光斑、狭缝或光栅阵列, 对单次曝光区域内多点位进行高度检测, 结合后端探测器收集的光强与位置变化信息, 同步计算离焦量与硅片倾斜量。后期, 光刻机全面迈入步进扫描工作模式, 业内对传统检焦方案进行了全方位优化升级, 从照明方式、检焦标识设计到光路架构均做出了改进, 大幅提升了检焦的测量精度与检测速率。目前, ASML 在 EUV 光刻领域处于领先地位, 也是唯一实现 EUV 光刻机量产的企业, 垄断了 7 nm 及以下先进制程。关于上述 3 家公司的检焦技术, 齐月静等[46] 与李世光等[47] 已有相关介绍, 本文则从不同角度梳理了相关技术进展, 并对 EUV 光刻中的检焦技术进行了补充。

总体来看, 国外主流光刻机检焦原理可归纳为成像位置检测与成像光强检测两大类型。为实现纳米级超高检测指标, 必须搭配复杂的硬件电路, 完成信号滤波、降噪、放大、采样与量化等精密处理, 导致检焦系统研发与制造成本居高不下。另一方面, 受核心技术保密机制限制, 相关设备的具体结构参数、完整信号处理流程及核心算法极少在公开文献中披露, 这也在早期对我国光刻机检焦技术的自主研发与技术突破造成了显著阻碍。

3　国内近年检焦技术发展

国内从事光刻机检焦技术研究的机构主要包括中国科学院光电技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、华中科技大学及上海微电子装备 (集团) 有限公司等[48-53]。早期受限于国内光刻机整体分辨力水平较低, 检焦精度通常处于亚微米级别[54], 与国外先进技术相比存在一定差

距。华中科技大学基于三轴激光干涉仪的检焦技术研究，以及中国科学院光电技术研究所开展的光栅成像莫尔条纹检焦技术研究，对国内检焦技术的发展起到了重要推动作用。

近年来，随着国内外检焦技术的持续进步，以及国家对半导体行业的高度重视，高校、科研院所和企业等在半导体相关技术领域的投入持续加大，我国与国外在检焦技术上的差距正逐步缩小。

3.1 主动式检焦技术

主动式检焦通过主动发射探测光束，结合光学调制、差分探测、干涉测量及偏振调控等技术实现离焦量检测，具备检测精度高、抗干扰能力强的特点，是高端装备实现纳米级检焦的主流技术路线。

3.1.1 像散法检焦技术

像散法检焦技术主要围绕柱面镜与四象限探测器（four-quadrant detector, FQD）的优化研究展开。2018 年，BAI Z 等[55]在传统像散法基础上增加了一个柱面镜，提出了一种采用双柱面透镜的像散法，通过提取聚焦误差信号 (focus-error-signal, FES) 实现聚焦误差检测，并进行了理论分析与仿真模拟。随后，建立了聚焦误差检测系统以验证理论分析结果。实验表明，聚焦误差信号曲线具有良好的“S”形特性，线性跟踪范围可达 18 μm，跟踪精度约为 50 nm。理论与实验结果均表明，该双柱面透镜像散法是一种兼具高精度与大动态范围的有效自动对焦与自动跟踪方法。

2021 年，DU J L 等[18]针对传统单探测器像散法易受杂散光与气流扰动影响、噪声大、稳定性差，且难以适配高 NA 物镜极浅焦深（百纳米级）下纳米级检测要求的问题，将像散检焦原理与差动技术相结合，提出了差动像散离焦检测方法，如图 13 所示。该方法在柱透镜焦平面前后放置两个四象限探测器（FQD1、FQD2），以两路 FES 的差值 (ΔF_{ES}) 表征离焦量，利用差分共模抑制特性抵消环境干扰，从而提升系统抗噪性与稳定性。

DU J L 等通过仿真分析了探测器与柱透镜间距（d_1、d_2）、物镜与柱透镜间距对 ΔF_{ES} 曲线线性范围与灵敏度的影响。以线性检测范围不小于 5 μm、光斑半径适配探测器靶面、系统结构紧凑为约束条件，设计了参数优化算法，求解出最大灵敏度下的最优系统参数（l=200 mm, d_1=70 mm, d_2=130 mm），获得了线性区间最长、灵敏度最优的差动信号曲线。随后，通过实验确认了光斑形状随离焦量的变化规律与仿真结果一致；进一步测试差动系统，获得了线性良好的 ΔF_{ES} 曲线，最大线性范围分别达 6.0 μm 和 7.8 μm，如图 14 所示。对比实验表明，差动像散系统的信号波动远小于单通道像散法，抗干扰能力与稳定性显著提升。

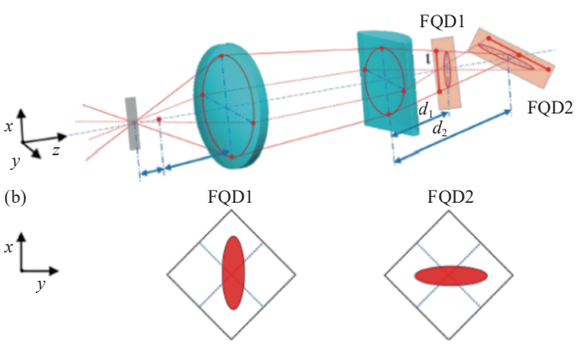


图 13 差动像散检焦方法[18]

Fig. 13 Differential astigmatic focusing method[18]

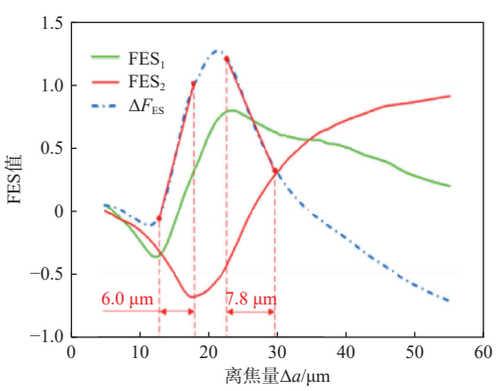


图 14 系统实验结果[18]

Fig. 14 System experiment results[18]

2026 年，田耕等[56]为进一步增强四象限探测器输出信号的稳定性，提出了一种基于卡尔曼滤波与小波阈值降噪相结合的联合滤波方法，用以抑制信号中的误差干扰。效果如图 15 所示。实验结果表明，采用联合滤波后，采集信号的均方根误差与峰峰值误差降幅均超过 70%，信号稳定性得到有效提升；系统最小可分辨位移量由 88 nm 提升至 38 nm，检测精度提升 56.8%。所提方案通过数字滤波方式对基于像散法的离焦检测系统进行了进一步优化，相较传统方案，不仅简化了光学系统结构，还提高了信号采集系统的鲁棒性与检测精度。

3.1.2 差动调制度解析同轴检焦技术

2021 年，冯金花等[10]提出了一种基于差动调制度解析的同轴检焦方法，通过编码光栅投影、傅里

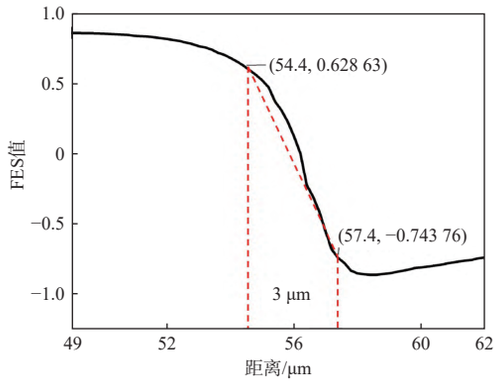


图 15　联合滤波后的 FES 曲线[56]

Fig. 15　FES curve after joint filtering[56]

叶变换解析调制度及差动双路探测实现离焦测量，从原理上抑制光强噪声，简化光路结构。如图 16 所示，系统采用白光 LED 照明，经物理光栅生成正弦编码条纹后投影至被测基片表面；反射光经 Tube 透镜与分光镜分为两路，由位于焦平面处的 CCD1 和偏离焦平面微小距离的 CCD2 同步采集，构成差动探测结构。通过对受基片高度调制的编码光强信号进行二维傅里叶变换，提取基频分量并进行逆变换，获得图像调制度分布，从而将离焦量转化为调制度变化。

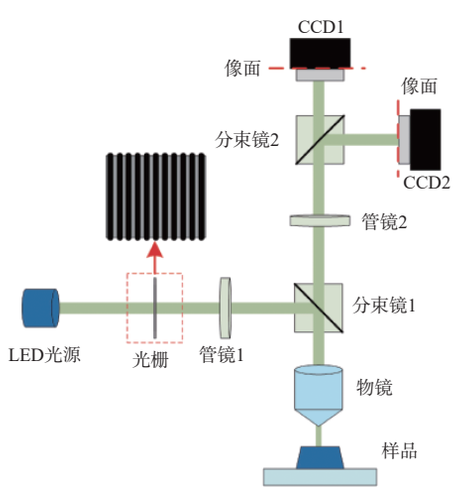


图 16　基于差动调制度解析的同轴检焦系统[10]

Fig. 16　Coaxial focusing system based on differential modulation analysis[10]

系统将差动调制度分布定义为

$$M_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \tag{2}$$

式中：M_1 和 M_2 分别代表 CCD1 和 CCD2 探测图像的调制度分布；d 为差动量，是一个 CCD 与成像平面之间距离有关的常量，当探测器与成像平面重合时，d=0。

实验验证了差动调制度与离焦量之间的线性关系。实测结果表明，在全行程范围内，检焦系统与工件台读数的最大误差为 8.8 nm，检焦精度优于 10 nm，且重复性良好，充分证明该方法可满足新型超分辨光刻对高精度同轴检焦的要求。

2023 年，HAN C 等[57] 对该技术进行了进一步优化，提出了改进型差动调制度解析同轴检焦技术。相较于 2021 年的方法，其主要创新在于从原理上消除了样品表面反射率不均所带来的检焦误差，同时将检焦精度由 10 nm 提升至优于 5 nm，更加适配高 NA 物镜的超精密焦面控制需求。

如图 17 所示的系统仍采用差动调制度 M_d 作为核心检测量，进一步从理论上证明了反射率 R 可在解析过程中被完全约去，从而从原理上消除表面反射率差异所引入的检焦偏差。

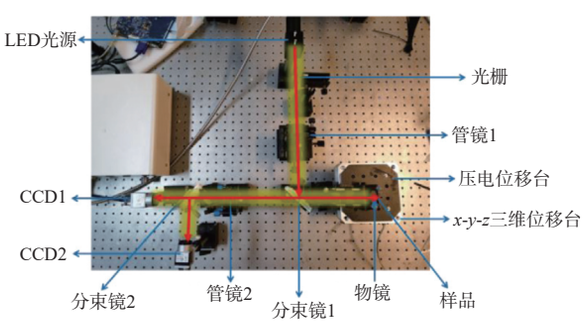


图 17　系统实物图[57]

Fig. 17　System physical diagram[57]

$$M_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} = \frac{RC_1(x,y,z) - RC_2(x,y,z)}{RC_1(x,y,z) + RC_2(x,y,z)} = \frac{C_1(x,y,z) - C_2(x,y,z)}{C_1(x,y,z) + C_2(x,y,z)} \tag{3}$$

式中 C_1、C_2 分别为 CCD1、CCD2 收集的图像对比度。

实验结果表明，该系统检焦误差控制在 5 nm 以内，最大重复性误差仅为 2.34 nm，实现了优于 5 nm 的超高检焦精度。如图 18 所示，系统在玻璃与铬层两种不同反射率的样品表面均能保持稳定一致的检焦结果，有效消除了反射率差异所带来的检测偏差。此外，系统在完成一次轴向扫描标定后，仅需单次成像即可完成检焦，具有较快的检测速度。

3.1.3　其他主动式检焦技术

2019 年，刘璐等[58] 提出一套基于数字光栅投影与双线阵对比检焦的显微自动对焦系统。该系统区别于传统面阵图像处理对焦与单点光电探测器主动对焦路线，依靠线阵一维信号实现高速对

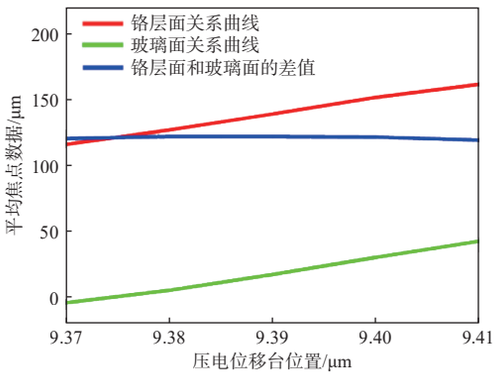


图 18　玻璃与铬层检焦关系曲线[57]

Fig. 18　Relationship curve between glass and chromium layer for focusing[57]

焦，并通过光程差双光路差分法同时判别离焦方向与离焦量，进一步提出变周期随机光栅以拓展对焦区间并降低被测表面干扰。其所提出的正态随机分布变周期数字光栅对焦方案，以最优等周期宽度为基准随机生成条纹间距，有效消除了规则周期所带来的重复灰度信息干扰。相较于最优等周期光栅，对焦范围由 0.3 mm 拓宽至 0.4 mm，对焦误差降至−0.000 852 mm，线性度更优；随机条纹可弱化液晶面板高亮区域及表面划痕等被测物纹理对光栅对比度的干扰，鲁棒性更强，如图 19 所示。

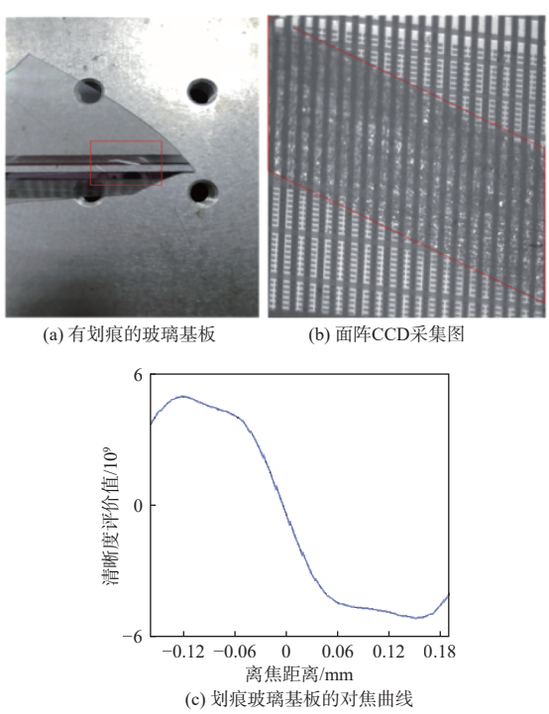


图 19　系统对玻璃基板的实验结果[58]

Fig. 19　Experimental results of system for glass substrate[58]

2021 年，王建等[16] 提出一种基于偏振调制的高精度焦面检测技术，其结构布局如图 20 所示。该系统构建了粗检焦与精检焦两级一体化方案。粗检焦采用光学三角法，将硅片 Z 向位移转换为狭缝像位移，结合 Sobel 边缘提取与最小二乘拟合，负责将硅片快速拉入精检焦窗口；精检焦则采用叠光栅空间像剪切原理，将光栅像位移转化为光强变化，并引入 Savart 板偏振剪切与光弹调制器高频偏振调制，将直流光强信号转换为交流信号，从原理上抑制光源波动、表面反射率及杂散光干扰，实现纳米级相位解调。此外，系统设计有平行平板自动调零机构，以保证其工作在最高灵敏度区间。

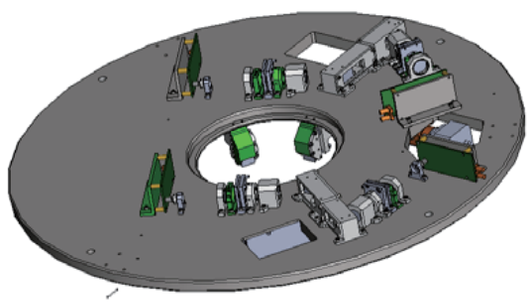


图 20　检焦系统结构布局[16]

Fig. 20　Structural layout of focus-sensing system[16]

该系统通过粗检焦实现大于 1 mm 的大量程定位，分辨率达 0.6 μm；精检焦基于偏振调制与叠光栅剪切原理，将位移信号转化为交流相位信号，配合弱信号解调与噪声抑制电路提升抗干扰能力，在真空环境下，实测获得 6 μm 线性范围内检测精度优于±3.9 nm（3σ）、重复性误差 2.6 nm 的性能，整体系统满足 32 nm 分辨率极紫外光刻原理装置对大范围、纳米级焦面检测的工程需求。

2023 年，李旺等[17] 提出基于扫描白光干涉的硅片检焦方案，如图 21 所示。系统采用 Linnik 型干涉光路，在 6 μm 扫描范围内开展检焦测试，将硅片干涉波形分为单峰、双峰全融合、双峰半分离、双峰全分离共 4 类，分别对比重心法、包络法与模板匹配法的定位精度与处理速度。结果表明，模板匹配法对 4 类波形的综合精度最高，平均绝对误差最小可达 7.7 nm、最大为 54.58 nm；重心法处理耗时均在 1 ms 内，对单峰波形误差约 20 nm；包络法精度较高但耗时约 25 ms。据此提出按波形自适应选择算法的策略，最终整套系统焦面测量最大平均绝对误差仅 57 nm、最小可达 8 nm，兼具高精度与较快的处理速度，能够适应不同工艺硅片的检焦需求。

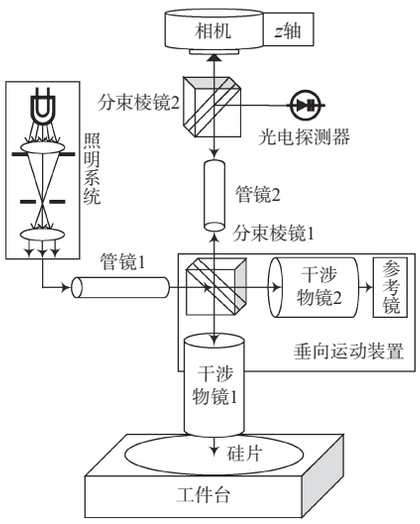


图 21　扫描白光干涉测量[17]

Fig. 21　Scanning white light interferometry measurement[17]

同年, 彭玲娜等[59]研究了差动临界角检焦技术。该方法在传统临界角检焦技术基础上引入双路差动信号处理, 利用两套临界角棱镜与四象限探测器获取差动检焦信号, 并选用高折射率棱镜搭建实验系统。实验表明, 在 532 nm 激光下, NA=0.3 物镜的检焦线性范围达±22 μm, NA=0.45 物镜的检焦线性范围为±14 μm, 系统检焦分辨率可达 25 nm。相较于传统临界角检焦技术, 差动处理可放大检焦信号、抑制探测器畸变与零漂, 并降低基底不平整所造成的误差。该同轴方案光损耗小、调试简便, 适用于微纳加工聚焦伺服场景。

3.2　被动式检焦技术

2022 年, 杨聚圃等[60]提出一种两阶段同轴自动检焦方案, 融合深度学习粗检焦与图像清晰度评价精检焦, 结构如图 22 所示。该方案通过光路共轭设计与算法级联优化, 在不增加光学系统复杂度的前提下, 实现大离焦范围下的快速粗定位与小范围内的高精度对焦, 为高分辨率微纳光刻提供了一种轻量化、工程化的检焦技术路径。

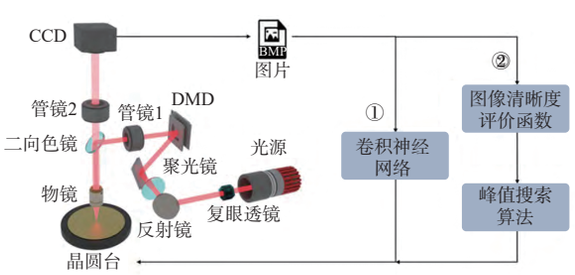


图 22　基于深度学习的数字光刻自动检焦系统[60]

Fig. 22　Automatic focus detection system for digital lithography based on deep learning[60]

粗检焦和精检焦示意如图 23 所示。实验结果表明, 该方法检焦精度可达 2 μm, 粗检焦单张图像推理时间仅 90 ms, 整体检焦总耗时不超过 300 ms, 对多种 DMD 图案均具备稳定的检测性能。误差统计显示, 精检焦后误差集中在±1 μm 以内, 可完全满足系统 8 μm 焦深要求。与传统基于清晰度评价函数的全域搜索方法相比, 该方法检焦步骤大幅减少, 总耗时缩短约 3/4, 且有效降低了位移台回程误差与环境振动带来的干扰, 综合性能优势显著。

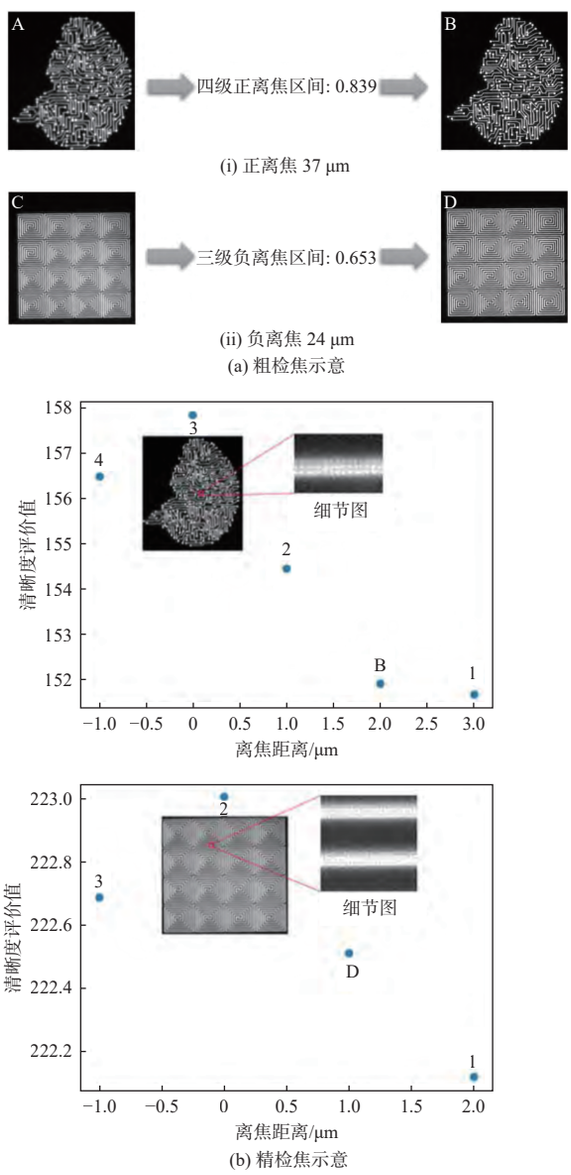


图 23　粗检焦和精检焦示意[60]

Fig. 23　Schematic diagram of sketchy focusing and elaborate focusing[60]

2024 年, LIU Y 等[61]提出一种基于图像清晰度评价与变步长峰值搜索的自动聚焦方法。选取 Laplacian、Tenengrad、SML、Brenner、Roberts、SMD

及熵函数共 7 种常用清晰度评价函数，从无偏性、实时性、对比度与陡峭度等 4 项指标进行综合评估。结果表明，Tenengrad、Brenner、Roberts 函数在 10×、20×、40×倍率下均能准确定位焦平面，其中 Tenengrad 函数对比度最高、峰值最陡峭、对微弱离焦最敏感，综合性能最优，被选为最终聚焦评价函数。变步长峰值搜索策略采用“大步快速逼近-中步缩小范围-小步精确定焦”的三级变步长方式，根据不同倍率物镜设置对应步长（小步小于物镜焦深），通过连续三幅图像的清晰度值判断运动方向，在保证搜索速度的同时避免超焦游荡，平衡检焦效率与定位精度，如图 24 所示。

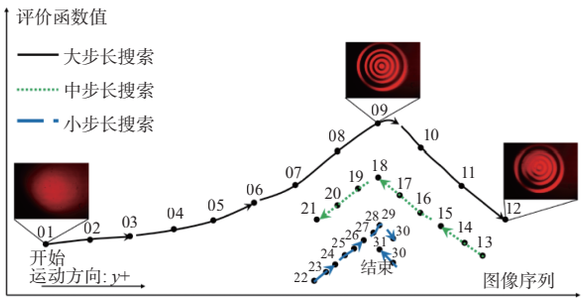


图 24　基于变步长峰值搜索的自动对焦示意图[61]

Fig. 24　Schematic diagram of automatic focusing based on variable-step size peak search[61]

通过上述梳理可以看出，当前检焦技术的发展呈现出明显的多原理融合趋势。部分方案采用两步式检焦策略，即先通过粗检焦实现大范围快速定位，再借助精检焦完成高精度对准；另一些方案则将多种检焦原理直接耦合，在同一光路或同一算法框架中实现离焦量的综合解算。无论是分步执行还是深度融合，均体现了从单一探测手段向多原理协同、多信息融合的新思路转变，具体归纳如表 1 所示。

表 1　部分检焦技术融合方法

Table 1　Fusion methods for partial focus-sensing technologies

文献	融合的方法	成果
[10]	差动技术+调制度解析	最大误差为 8.8 nm，检焦精度优于 10 nm
[16]	三角测量法+叠光栅空间像剪切差动技术+像散法检焦	粗检焦分辨率0.6 μm，精检焦6 μm 线性范围内检测精度优于 ±3.9 nm
[18]	差动技术+像散法检焦	1 h内重复定位精度为 30 nm，静态系统噪声仅 10 nm
[60]	深度学习+图像清晰度评价	精检焦后误差集中在 ±1 μm 以内，耗时缩短约 3/4
[61]	变步长峰值搜索+图像清晰度评价	10×、20×、40× 物镜下分别实现 280 μm、160 μm、105 μm 的检焦范围，自动聚焦精度均达到 0.625 μm

4　结束语

本文系统梳理了当前光学精密系统中主流检焦技术的研究进展与技术体系，按照被动式检焦与主动式检焦两大技术类别，分类阐述了各类检焦方法的基本原理、性能特点及应用场景，并介绍了各类检焦技术的发展历程。

尽管国内外检焦技术发展迅速，研发投入逐年增加，但仍存在若干可优化提升的方向：1）被动式检焦可进一步推进多特征融合与算法优化，融合灰度空间特征、频域特征、纹理特征及边缘特征等多维度信息，通过加权融合、自适应阈值筛选及抗噪模型优化等手段，提升清晰度评价函数的单峰性、抗干扰性与通用性；2）主动式检焦技术可继续深化多原理耦合，将差动检焦、像散法、临界角法、三角测距法及干涉法等多类检焦光路进行一体化集成，通过多路离焦信息的互补融合，实现大景深范围内的高精度、线性化离焦检测，兼顾大范围调焦与微纳级精准对焦需求；3）随着人工智能技术在光学检测领域的深入应用，基于深度学习的智能清晰度评价、噪声抑制、峰值识别与离焦量预测模型有望成为新的研究热点。通过数据驱动方式自动拟合复杂工况下的离焦映射关系，可有效突破传统物理模型的局限性，实现系统参数自适应调整、误差智能补偿与动态对焦跟踪。

总体而言，随着光学器件性能的提升、相关算法的优化以及多原理融合技术的推进，各类检焦技术将持续蓬勃发展，在显微观测、精密测量、光刻曝光、工业视觉检测、无人机航拍及光学精密加工等场景中发挥重要推动作用。尤其是近年来国内半导体产业链的快速演进与国家层面的高度重视，将进一步拓宽检焦技术的应用场景，推动其向更加多元化的方向发展。

参考文献：

[1] ZHANG S Y, TANG S J, FENG S F, et al. High-*Q* poly-

mer microcavities integrated on a multicore fiber facet for vapor sensing[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(20): 1900602.

[2] XIONG Z, LIU H, TAN X Q, et al. Diffraction analysis of digital micromirror device in maskless photolithography system[J]. Journal of Micro, 2014, 13(4): 043016.

[3] ZHAO Z, TIAN X X, SONG X Y. Engineering materials with light: recent progress in digital light processing based 3D printing[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(40): 13896-13917.

[4] CHIEN H L, LEE Y C. Three dimensional maskless ultraviolet exposure system based on digital light processing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(5): 937-945.

[5] HARRIOTT L R. Limits of lithography[J]. IEEE, 2001, 89(3): 366-374.

[6] XIA H S, YU F H. Auto focusing algorithm of digital microscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0400002.

[7] DAMMERT W R, NAGEL F. Messung von zweidimensionalen Verschiebungen mittels laser-triangulation/ measuring of two-dimensional displacements using laser triangulation[J]. tm-Technisches Messen, 1992, 59(11): 428-435.

[8] TANAKA Y, AIKOH H, YANO I, et al.Single telephoto lens for focus error detection with Astigmatic method[J]. Optical Review, 1994, 1(): 33-35.

[9] 赵圆圆, 金峰, 董贤子, 等. 飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术[J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220048.
ZHAO Yuanyuan, JIN Feng, DONG Xianzi, et al. Femtosecond laser two-photon polymerization three-dimensional micro-nanofabrication technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(3): 220048.

[10] 冯金花, 唐燕, 谢仲业, 等. 基于差动调制度解析的同轴检焦方法[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0612001.
FENG Jinhua, TANG Yan, XIE Zhongye, et al. Coaxial focusing method based on differential modulation evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0612001.

[11] 潘萍. 差动像散离焦检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
PAN Ping. Study on differential astigmatism detection technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[12] 梁凤超. 临界角法激光直写聚焦伺服系统静态特性研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 59-62.
LIANG Fengchao. Static characteristics of auto-focusing servo system based on critical angle method for laser direct writing[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5): 59-62.

[13] 郝贤鹏, 任建岳, 邹振书. 临界角法检焦系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 537-541.
HAO Xianpeng, REN Jianyue, ZOU Zhenshu. Design of focus error detection system based on critical angle method[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 537-541.

[14] 龚健文, 王建, 刘俊伯, 等. 基于投影光刻技术的微透镜阵列加工方法[J]. 光电工程, 2023, 50(12): 230281.
GONG Jianwen, WANG Jian, LIU Junbo, et al. Microlens array machining method based on projection lithography[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(12): 230281.

[15] 李光, 朱江平, 陈铭勇, 等. 基于干涉的同轴检焦新方法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208005.
LI Guang, ZHU Jiangping, CHEN Mingyong, et al. Novel coaxial focusing method based on interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1208005.

[16] 王建. 基于偏振调制的高精度焦面检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2021.
WANG Jian. Study on high precision measurement technology of wafer focus based on polarization modulation[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021.

[17] 李旺, 张文涛, 杜浩, 等. 扫描白光干涉技术在硅片检焦过程中的应用[J]. 现代电子技术, 2023, 46(15): 140-146.
LI Wang, ZHANG Wentao, DU Hao, et al. Application of scanning white light interferometry in process of silicon wafer focusing[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(15): 140-146.

[18] DU J L, YAN W, LIU L W, et al. Focal surface detection of high numerical aperture objective lens based on differential astigmatic method[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 5800208.

[19] OSHIDA Y, TANAKA M, TANIMOTO T, et al. Chip leveling and focusing with laser interferometry[J]. SPIE Proceedings, 1990, 1264: 244-251.

[20] WATANABE M, OSHIDA Y, NAKAYAMA Y, et al. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry for optical lithography[J].

SPIE, 1994, 2197: 980-989.

[21] THOMAS T, HAMAKER C, MARTYNIUK J, et al. Nanometer-level autofocus air gauge[J]. Precision Engineering, 1998, 22(4): 233-242.

[22] GRANDY D, KOSHY P, KLOCKE F. Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces[J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 515-518.

[23] ANDREW H B. Air gauge sensor: US4953388[P]. 1990-09-04.

[24] BOGUSLAW F G, KENNETH M B, OTHERS. High-resolution gas gauge proximity sensor: US7010958[P]. 2006-03-14.

[25] KOSTER N, MERTENS B, JANSEN R, et al. Molecular contamination mitigation in EUVL by environmental control[J]. Microelectronic Engineering, 2002, 61/62: 65-76.

[26] SUZUKI A, YABU S, OOKUBO M. Intelligent optical system of a new stepper[J]. SPIE, 1987, 772: 58-65.

[27] KAWASHIMA H, SUZUKI A. Method and apparatus for precisely detection surface position of a patterned wafer: US5118957[P]. 1992-06-02.

[28] TAKEHIKO I, YUICHI Y, SHIGEYUKI U. Surface position detecting method and scanning exposure method using the same: EP19970301291[P]. 1997-09-03.

[29] KOBAYASHI T, KOSUGI Y. Surface position measuring method and apparatus: US20050169515[P]. 2005-08-04.

[30] IWAMOTO K, SAKAI F M. New scanners for the 100-nm era[J]. SPIE, 2001, 4346: 621-633.

[31] SUWA K, USHIDA K, LIN B J. The optical stepper with a high numerical aperture I-line lens and a field-by-field leveling system[J]. SPIE, 1988, 922: 270-276.

[32] UEHARA M, SUDO T, KANATANI F. Horizontal position detecting device: US4558949[P]. 1985-12-17.

[33] SUZUKI K, WAKAMOTO S, NISHI K J. KrF step-and-scan exposure system using higher-NA projection lens[J]. SPIE, 1996, 2726: 767-779.

[34] HAGIWARA T, HAMATANI M, TASHIRO H, et al. Wafer edge-shot algorithm for wafer scanners[J]. SPIE, 2002, 4691: 790-801.

[35] MORI S. Higher-NA ArF scanning exposure tool on new platform for further 100-nm technology node[J]. SPIE, 2001, 4346: 651-658.

[36] HIDAKA Y, NAGAYAMA T. Surface position detection apparatus, exposure apparatus, and exposure method: US20150248064[P]. 2015-09-03.

[37] VAN DER WERF J E, BIESTERBOS J W M. Optical imaging arrangement comprising an opto-electronic focusing-error detection system: US4866262[P]. 1989-Sep-12.

[38] WITTEKOEK S, VAN DEN BRINK M A, LINDERS H F, et al. Deep-UV wafer stepper with through-the-lens wafer to reticle alignment[J]. SPIE, 1990, 1264: 534-547.

[39] VAN DER WERF J E, VAN DEN BRINK M A, LINDERS H F D, et al. Imaging apparatus having a focus-error and/or tilt detection device: US5191200A[P]. 1993-03-02.

[40] VAN DER WERF J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 1992, 10(2): 735-740.

[41] VAN DEN BRINK M A, STOELDRAIJER J M D, LINDERS H F. Overlay and field-by-field leveling in wafer steppers using an advanced metrology system[J]. SPIE, 1992, 1673: 330-344.

[42] DEN BOEF A J. Optical metrology of semiconductor wafers in lithography[J]. SPIE, 2013, 8769: 876907.

[43] DE BOEIJ W P, PIETERNELLA R, BOUCHOMS I, et al. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[J]. SPIE, 2013, 8683: 86831L-1-9.

[44] EJIMA T. Interface formation and optical design of EUV reflective multilayer mirrors[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2026, 65(5): 050802.

[45] OP'T ROOT W, PARK J, NAM Y S, et al. Optical diffraction-based methodology to measure on-product EUV exposure focus variations[C]//Conference on Metrology, Inspection, and Process Control XXXVIII. San Jose: SPIE, 2024: 129552Q-1-13.

[46] 齐月静, 裴雨多, 宗明成, 等. 光刻调焦调平测量技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922015.
QI Yuejing, PEI Yuduo, ZONG Mingcheng, et al. Research progress of lithography focusing and leveling measurement technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922015.

[47] 李世光, 郭磊, 曾海峰, 等. 光刻技术中的聚焦控制[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922016.
LI Shiguang, GUO Lei, ZENG Haifeng, et al. Focus control in optical lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922016.

[48] 胡淞, 姚汉民, 张津, 等. 0.35 μm 投影光刻机的逐场调平技术与套刻步进模型[J]. 光电工程, 1998, 25(S1): 42-46.
HU Song, YAO Hanmin, ZHANG Jin, et al. Field-by-field leveling techniques and overlapping stepping model for 0.35 μm projection stepper[J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(S1): 42-46.

[49] 金小兵, 李小平, 陈飞彪, 等. 硅片调焦调平测量系统测试平台[J]. 电子工业专用设备, 2006, 35(10): 53-56.
JIN Xiaobing, LI Xiaoping, CHEN Feibiao, et al. The test bench for wafer focusing and leveling sensor[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2006, 35(10): 53-56.

[50] 胡建明, 王向朝, 曾爱军. 用于投影光刻机的调焦调平传感器: CN200510025793.3[P]. 2005-11-23.
HU Jianming, WANG Xiangzhao, ZENG Aijun. Focus and leveling sensor for projection lithography machine: CN200510025793.3[P]. 2005-11-23.

[51] 王兴海. 基于 PSD 的光刻机调焦调平系统[J]. 科技信息, 2013(5): 139.
WANG Xinghai. Mask aligner focusing and leveling system based on PSD[J]. Science & Technology Information, 2013(5): 139.

[52] 肖倩, 陈旭南, 罗先刚. 亚半微米投影曝光机的逐场调焦调平技术[J]. 电子工业专用设备, 1997, 26(4): 23-26.
XIAO Qian, CHEN Xunan, LUO Xiangang. Field-by-field focusing and leveling technology of sub-half micron projection exposure machine[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 1997, 26(4): 23-26.

[53] DI C L, YAN W, HU S, et al. A moiré-based four-channel focusing and leveling scheme for projection lithography[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 2800112.

[54] RUBINGH R, MOERS M, SUDDENDORF M, et al. Lithographic performance of a dual-stage, 0.93 NA ArF step and scan system[J]. Optical Microlithography XVIII, 2005, 5754: 681-692.

[55] BAI Z, WEI J S. Focusing error detection based on astigmatic method with a double cylindrical lens group[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 145-151.

[56] 田耕, 张敬巍, 赵苗, 等. 基于像散法的高精度聚焦误差检测技术研究[J]. 应用激光, 2026, 1-12. [2026-09-09]. https://link.cnki.net/urlid/31.1375.T.20260429.1040.002.
TIAN Geng, ZHANG Jingwei, ZHAO Miao, et al. Research on high-precision focus error detection technology based on astigmatism method[J]. Applied Laser, 2026, 1-12. [2026-09-09]. https://link.cnki.net/urlid/31.1375.T.20260429.1040.002.

[57] HAN C, TANG Y, CHENG X L, et al. A novel coaxial focus position detection technique based on differential modulation evaluation for laser direct photolithography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 161: 107396.

[58] 刘璐, 闫佩正, 但西佐, 等. 基于条纹投影的显微镜自动对焦研究[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0818001.
LIU Lu, YAN Peizheng, DAN Xizuo, et al. Microscope autofocus research based on stripe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0818001.

[59] 彭玲娜, 赵圆圆, 张杨, 等. 差动临界角法高精度动态检焦技术研究[J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240113.
PENG Lingna, ZHAO Yuanyuan, ZHANG Yang, et al. Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(7): 240113.

[60] 杨聚圃, 杜佳林, 李凡星, 等. 基于深度学习的数字光刻自动检焦方法[J]. 光子学报, 2022, 51(6): 0611002.
YANG Jupu, DU Jialin, LI Fanxing, et al. Deep learning based method for automatic focus detection in digital lithography[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6): 0611002.

[61] LIU Y, LUO N N, CHEN Z R, et al. Research on high precision and large range automatic focusing method for digital lithography[J]. SPIE. 2024, 13104: 131041n.