

激光与光电子学进展

光刻调焦调平测量技术的研究进展

齐月静^{1,2*}, 裴雨多^{1,2}, 宗明成^{1,2}, 李璟¹, 陈进新¹

¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光刻机利用调焦调平测量系统实现对硅片形貌的精密测量,是实现高质量曝光的关键。基于光学三角法实现硅片形貌测量的调焦调平测量技术是目前主流光刻机厂商普遍采用的技术。首先,介绍了光学三角法的测量原理和系统组成。然后,以实现高精度、高速硅片形貌测量为目标,重点分析了调焦调平测量系统的测量方式、工艺适应能力以及相适应成像探测光路涉及的关键技术及演化过程。最后,指出了调焦调平测量系统需要改进和优化之处,以应对极紫外光刻真空环境的要求。

关键词 光学设计; 光刻; 调焦调平; 形貌测量; 工艺适应能力; 极紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922015

Research Progress of Lithography Focusing and Leveling Measurement Technology

Qi Yuejing^{1,2*}, Pei Yuduo^{1,2}, Zong Mingcheng^{1,2}, Li Jing¹, Chen Jinxin¹

¹Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The precision measurement of morphology of wafer by focusing and leveling measurement system is the key to high-quality exposure. The focusing and leveling measurement technology based on optical triangulation is widely used to measure wafer morphology by mainstream lithography manufacturers. In this paper, first, the measurement principle and system composition based on optical triangulation is introduced. Then, aiming at realizing high-precision and high-speed wafer morphology measurement, the key technologies and their evolution process of focusing and leveling measurement system are specially analyzed around the measurement mode, process adaptability and the corresponding imaging optical path. Finally, the improvement and optimization of focusing and leveling measurement system is pointed out in order to meet the requirements of extreme ultra-violet lithography vacuum environment.

Key words optical design; lithography; focusing and leveling; morphology measurement; process adaptability; extreme ultra-violet lithography

1 引言

光刻技术在集成电路量产制造中有着重要作

用。随着集成电路产业的快速发展,对光刻机性能的要求也越来越高。由瑞利判据^[1]可知,通过减小曝光波长或增大数值孔径能获得更高的光刻分辨

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-16; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101006)

通信作者: *qiyejing@ime.ac.cn

率。随着相关技术的发展,光刻技术的曝光波长已逐渐从 436 nm (G 线)、405 nm (H 线)、365 nm (I 线)、248 nm (KrF 准分子激光)、193 nm (ArF 准分子激光) 缩短至 13.5 nm (极紫外光 EUV)^[2], 投影物镜的数值孔径也逐渐从 0.30 增大到了 0.93, 浸没式光刻技术使投影物镜的数值孔径进一步增大到了 1.35。

为了得到更高的分辨率, 光刻机逐渐从接触式曝光、接近式曝光、步进重复投影曝光发展到当前采用的主流步进扫描投影曝光。为了保证曝光质量, 在光刻机曝光过程中必须使硅片表面位于焦深范围内, 否则会严重影响集成电路的生产良率^[3]。因此, 需采用调焦调平测量系统测量硅片表面高度, 在曝光时通过承载硅片的工件台轴向调节硅片的偏移和倾斜, 使其处于投影物镜的最佳焦面处。曝光波长越小, 数值孔径越大, 光刻分辨率就越高, 但同时会导致焦深变小, 对焦控制精度要求也越来越高^[4-8]。随着对焦控制精度的提升, 采用的调焦调平测量技术从早期的机械轮廓仪接触式测量以及声学、电容原理、激光干涉的非接触式测量, 逐渐发展为目前主流基于光学三角法的测量^[5]。机械接触式测量易造成硅片缺陷和污染, 声波波长太长会限制分辨率, 电容传感器过于依赖基板的电气特性, 误差较大, 激光干涉易受环境影响且后端解调电路复杂、实时性差, 基于光学三角法的调焦调平测量技术具有工艺适应性较强, 不涉及复杂的图像处理算法, 测量速度快和测量精度高等优势, 成为国内外光刻机厂商采用的主流技术。

从最新的国际半导体技术路线图 (IRDS)^[9] 中可以发现, 在未来一年内, 半导体制造技术的分辨率将达到 12 nm, 之后的每个节点分辨率将会降低 2 nm, 预计到 2028 年达到 8 nm, 此时, EUV 光刻将成为必须采用的制造手段。本文主要介绍了基于光学三角法的调焦调平测量原理和系统组成, 以利用调焦调平测量技术实现高精度、高速硅片形貌测量为目标, 重点围绕调焦调平测量系统的测量方式、工艺适应能力以及相适应的成像探测光路涉及的关键技术及演化过程进行分析, 并指出调焦调平测量系统需要改进和优化之处, 以适应 EUV 光刻真空的环境要求。

2 测量原理和系统组成

基于光学三角法的调焦调平测量原理如图 1 所

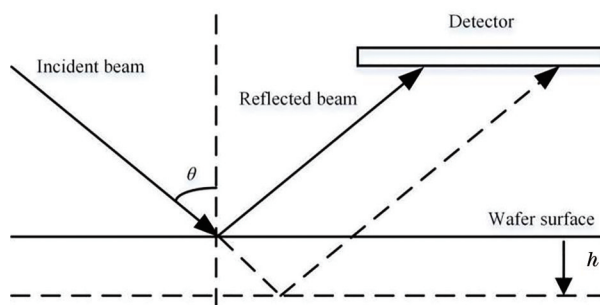


图 1 光学三角法的测量原理^[5]

Fig. 1 Principle of the optical triangulation^[5]

示^[5]。测量光束以较大的角度 θ 入射到硅片表面, 经硅片表面反射后被探测器接收。探测器上的图像位置随硅片表面高度偏移而变化, 根据几何关系可知, 当硅片表面高度变化 h 时, 探测器上的图像位移 Δx 可表示为

$$\Delta x = 2h \sin \theta. \quad (1)$$

通过测量光束在探测器上的图像位移变化量可计算硅片表面的高度信息, 进而根据多个位置点的硅片表面高度信息获得硅片的表面倾斜情况。光刻机曝光时, 根据获得的硅片形貌实时调整工件台的姿态, 保证硅片曝光位置始终处在投影物镜的最佳焦面处。

基于光学三角法的调焦调平测量系统一般包含光源、照明系统、投影标记、投影成像系统、探测标记、探测系统等部分。其中, 光源用于产生合适波长范围的照明光束以满足测量系统需求; 照明系统用于改变入射光束的光斑大小和数值孔径, 实现对投影标记的均匀照明; 投影成像系统分别位于投影标记和硅片之间以及硅片和探测标记之间, 可使投影标记分别成像在硅片和探测标记上; 探测系统可检测通过探测标记后的光强或图像变化, 并输出可转换成硅片表面高度信息的信号。

3 调焦调平测量关键技术

3.1 调焦调平测量方式

随着光刻机性能要求的提高, 人们对调焦调平测量方式 (包括投影标记及相应探测器) 进行了逐步改进, 总体来说可划分为三个阶段。

第一阶段: 早期投影物镜的焦深较长, 投影标记选用单个光斑或狭缝, 采用二象限或四象限探测器进行光度检焦。二象限光度检焦原理如图 2(a) 所示^[10], 通过对比两个象限中光斑的信号差异检测硅片表面向上或向下的离焦, 控制硅片在 Z 方向运动,

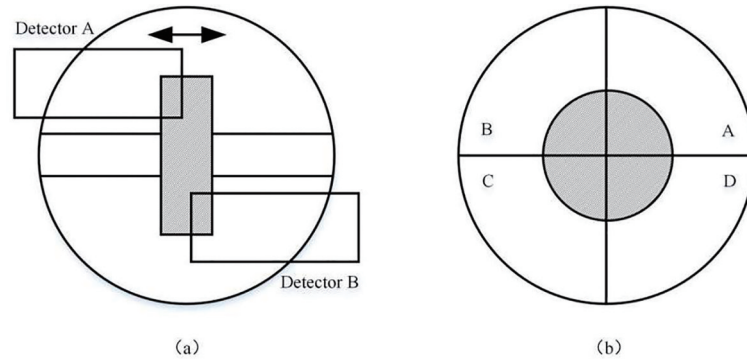


图 2 光度检焦的示意图。(a)二象限光度检焦^[10]; (b)四象限光度检焦^[11]

Fig. 2 Schematic diagram of the photometric focusing. (a) Two quadrant photometric focusing^[10]; (b) four quadrant photometric focusing^[11]

从而进行逐场调焦。四象限探测器主要有方形和圆形两种结构,形状对探测器性能的影响可忽略,以圆形为例,其光度检焦原理如图 2(b)所示。当特定能量分布的光斑照射到四象限探测器中心时,四个象限输出的电流相等;当光斑移动时,输出电流不同,可根据电流大小判断出硅片表面的高度变化,从而进行逐场调焦^[11]。飞利浦/阿斯麦(Philips/ASML)、尼康(Nikon)公司的早期步进重复投影光刻机均采用了光度检焦的调焦调平测量方式^[12]。

第二阶段:随着投影物镜焦深的减小,投影标记仍为单个光斑或狭缝,探测器改用精度较高的

CCD 进行探测。较早的 G 线、I 线步进重复投影光刻机中,调焦调平测量精度、重复性精度为百纳米量级。测量光束经过硅片表面反射及成像系统放大成像在 CCD 上,投影标记经过两次成像与 CCD 形成光学共轭关系,CCD 通过检测测量光束位置变化计算出硅片表面高度及倾斜值。1992 年,佳能(Canon)公司采用 CCD 进行逐场调平测量,其投影标记分布如图 3(a)所示,调焦系统如图 3(b)所示^[13-14]。此外,ASML 公司采用 CCD 对光斑投影标记进行了逐场调平测量^[15],Nikon 公司采用 CCD 对狭缝投影标记进行了逐场调平测量^[16]。

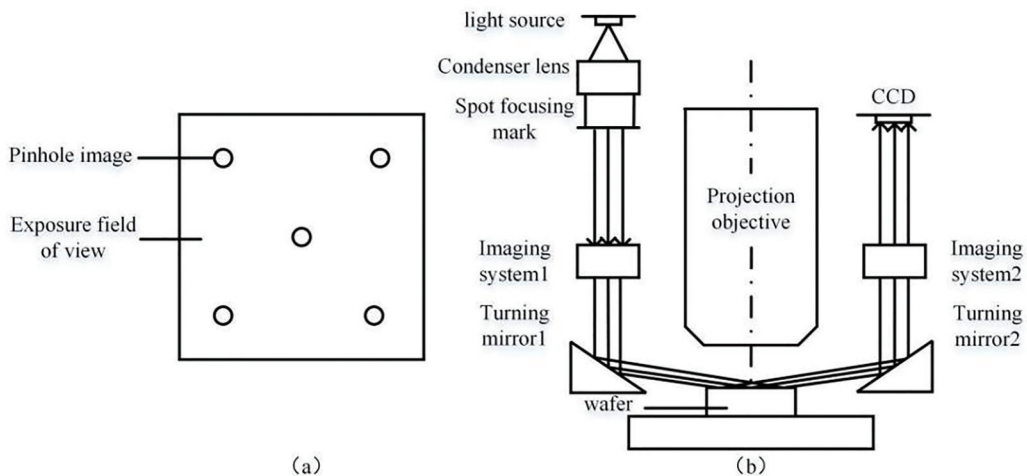


图 3 Canon 公司调焦调平测量的示意图。(a)光斑投影标记^[13]; (b)测量装置^[14]

Fig. 3 Schematic diagram of focusing and leveling measurement by Canon company. (a) Spot projection marker^[13]; (b) measuring device^[14]

第三阶段:由于分辨率的不断提高,投影物镜焦深急剧减小,投影标记采用阵列式狭缝、光斑或光栅,对应于投影标记的变化,探测标记、探测器相应地也改为阵列形式。通过阵列形式测量硅片表面高度,同时计算出硅片表面的倾斜值,并增加曝

光视场边缘对焦算法设计的自由度。Nikon 公司分辨率为 0.15 μm 的 KrF 步进扫描投影光刻机 NSR-S204,采用 45 点狭缝阵列(阵列沿扫描方向为 9 列 5 行)进行调焦调平测量,其原理如图 4 所示^[17]。此外,Canon、ASML 公司分别采用光斑阵列、光栅阵

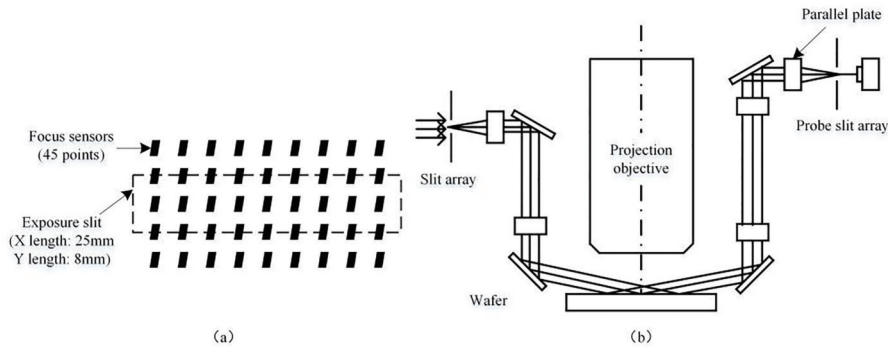


图 4 Nikon 公司调焦调平测量示意图。(a)狭缝阵列示意图;(b)测量装置^[17]

Fig. 4 Schematic diagram of focusing and leveling measurement by Nikon company. (a) Schematic diagram of slit array; (b) measuring device^[17]

列进行了调焦调平测量,探测器则为光电探测器阵列或 CCD 阵列^[18-19]。华中科技大学^[20]、中国科学院微电子研究所 (IMECAS)^[21]和上海光学精密机械研究所^[22]也采用阵列测量方式进行了调焦调平测量技术研究。

从上述调焦调平测量方式的发展可以看出,随着光刻机产率、分辨率的提高,为达到更高的调焦调平测量速度和精度要求,主流调焦调平测量方式从单个光斑或狭缝检测逐渐转变为阵列检测,相应的探测器也改为阵列形式,以面扫描检测方式提高测量速度以及边缘测量精度。

3.2 调焦调平测量系统的工艺适应能力

光刻工艺的主要步骤包括气相成底膜、旋转涂胶、软烘(前烘)、对准曝光、曝光后烘焙(后烘)、显影、坚膜烘焙和显影后检查等^[5]。对焦控制精度进入纳米量级后,硅片上的集成电路(IC)工艺对

调焦调平测量精度的影响很大。由光刻胶膜层结构引起的多光束干涉效应导致反射光相位和振幅发生变化并表现为焦点位移,位移的横向分量也被称为表面低洼假象(ASD),如图 5(a)所示^[3]。该现象与波长有关,有些波长对光刻胶厚度的微小变化很敏感,有些波长则非常稳定,如图 5(b)所示^[3]。当 $\lambda \approx 680 \text{ nm}$ 时,微小的厚度变化就会产生很大的 ASD 差异;当 $\lambda \approx 860 \text{ nm}$ 时,ASD 则非常稳定。此外,对于 10 nm 的光刻胶厚度变化,所有波长范围内的平均 ASD 仅变化 1 nm。因此,光刻调焦调平测量系统一般采用宽光谱以及大入射角入射,对硅片光刻胶膜层的多光束干涉效应进行平均,以获得更稳定的硅片高度测量。为了进一步减小工艺相关性误差,Philips/ASML、Nikon、Canon 公司以及国内研究院/所进行了多方面研究。

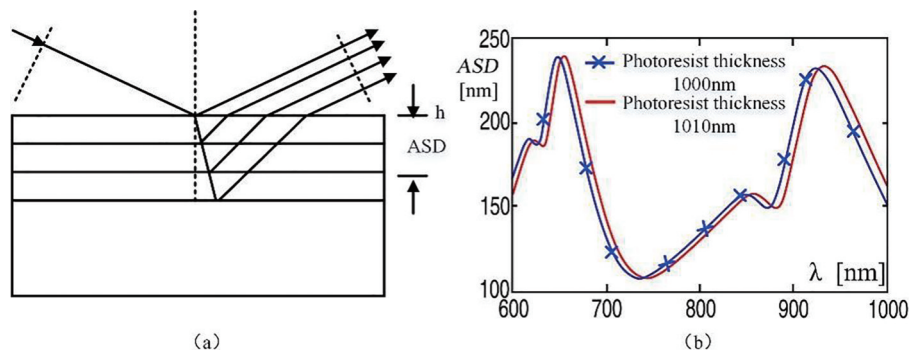


图 5 ASD 的示意图。(a)入射光在不同光刻胶膜层的反射;(b)不同波长下的 ASD^[3]

Fig. 5 Schematic diagram of the ASD. (a) Reflection of incident light on different photoresist films; (b) ASD at different wavelengths^[3]

Philips 公司提出采用波长范围为 600~1050 nm 的可见光源,且通过增加参考光路测量硅片表面高度,以提高硅片高度测量的稳定性^[23]。ASML 公司

的 Teunissen 等^[24]提出设置镀膜的平面反射镜补偿工艺相关性误差,为了进一步降低 ASD 误差,ASML 公司推出了一种基于气压的非光学传感器,由

AGILE (Air Gauge Improved process LLeveling) 管理使用^[25],通过喷气探头探测光刻胶表面的气压变化确定硅片表面的高度变化。但这种气压传感器测量速度较慢,不能快速获得大面积的测量数据。因此,ASML 公司进一步提出改用波长范围为 200~400 nm 的宽带紫外光代替可见光源,有效避免了光

刻胶下表面图案起伏导致的平整度噪声^[3,26]。

Nikon 公司提出引入去偏振器或 Nomarski 棱镜^[27],将其放置在调焦调平测量系统的投影镜头和硅片表面以及硅片表面和检测镜头之间,通过在整个波长范围内对每种偏振光的光强度进行平均来减小 ASD 误差,其原理如图 6 所示。

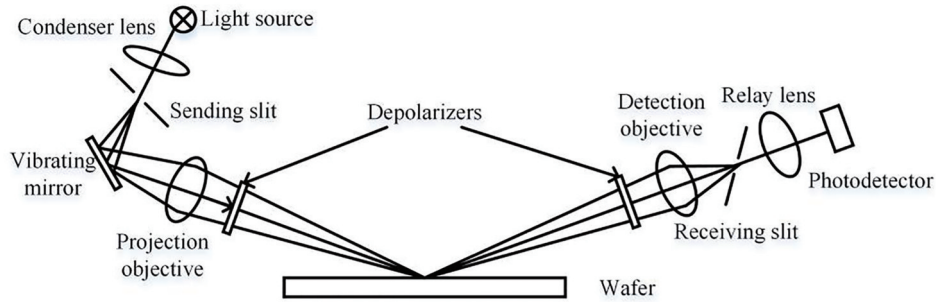


图 6 Nikon 公司减小 ASD 误差的示意图^[27]

Fig. 6 Schematic diagram of Nikon company reducing ASD error^[27]

Canon 公司提出在光路中加入光学校正系统,以保证探测器上成像稳定。该光学系统由六个独立的校正透镜和平行平板组成,六个校正透镜 (CL1、CL2、CL3、CR1、CR2、CR3) 相对于曝光狭缝的位置关系如图 7 所示^[28]。其中,透镜用于修正放大倍率以保证探测器上各光斑尺寸相等,平行平板用于补偿各投影标记到达探测器前的光程。

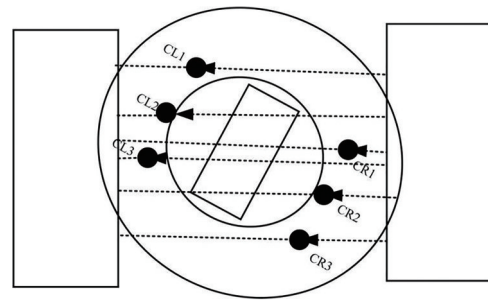


图 7 Canon 公司光学校正系统的示意图^[28]

Fig. 7 Schematic diagram of Canon company optical correction system^[28]

上海微电子装备有限公司 (SMEE) 设置了一个参数调节单元,如图 8 所示^[29]。一路测量光经过参数调节单元形成探测投影光束,通过参数与标准探测信号的对应关系和探测投影光束计算出误差补偿因子,根据误差补偿因子与未经过参数调节单元的测量投影光束得到硅片表面高度,以补偿工艺相关性误差。

的增益系数工艺相关性开展了理论仿真与实验研究,建立了增益系数工艺相关性理论模型,并仿真分析了增益系数与测量误差随不同光刻工艺材料

中科院微电子研究所针对调焦调平测量系统

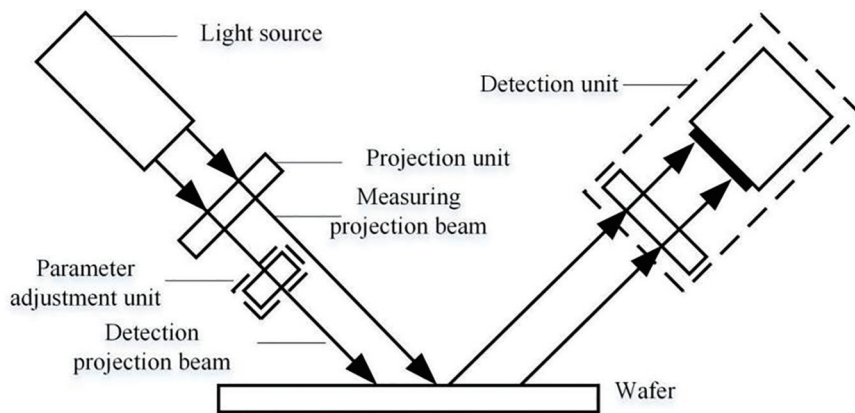


图 8 SMEE 调焦调平测量装置的结构示意图^[29]

Fig. 8 Structure diagram of the SMEE focusing and leveling measurement device^[29]

膜层厚度的变化规律。研究表明,采用表面覆盖特定膜层的硅片,进而标定调焦调平测量系统,可以有效降低增益系数工艺相关性的影响,减小测量误差^[30]。

3.3 投影成像系统光路结构的演变

根据光线传输方式可将调焦调平测量系统的投影成像光路结构分为透射式和反射式两类。Nikon 公司提出采用透射式投影成像系统的调焦调平测量

装置,其原理如图 9 所示^[31]。其中,3 为硅片,11 和 42 为光源,12、43 和 46 为聚光透镜,13、44 和 48 为光阑,14 和 21 为物镜,22 为四象限光强探测器,41 为二向色镜,45 为准直透镜,47 为振反镜,49 为光强探测器。虚线为硅片表面高度测量光路,实线为倾斜测量光路。测量光束通过聚光镜、透镜变为平行光入射到硅片表面,被反射后通过透镜成像到探测器,通过检测探测器上的光强变化获得硅片表面高度。

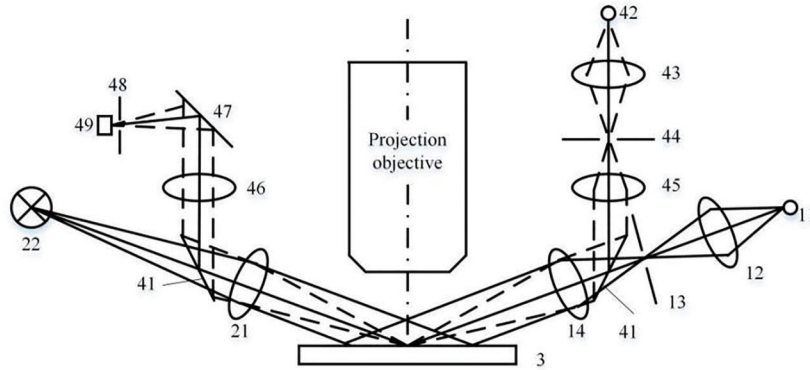


图 9 Nikon 公司透射式调焦调平测量装置^[31]

Fig. 9 Transmission focusing and leveling measurement device of Nikon company^[31]

Canon 公司提出采用透射式双远心投影成像系统的调焦调平测量装置,其原理如图 10 所示^[13]。测量光束经准直透镜变为平行光均匀照射到投影标记上,

通过成像系统将投影标记成像到硅片表面,经过硅片反射后成像到二维 CCD 探测器上,通过检测探测器上的光斑位置变化获得硅片表面的高度及倾斜值。

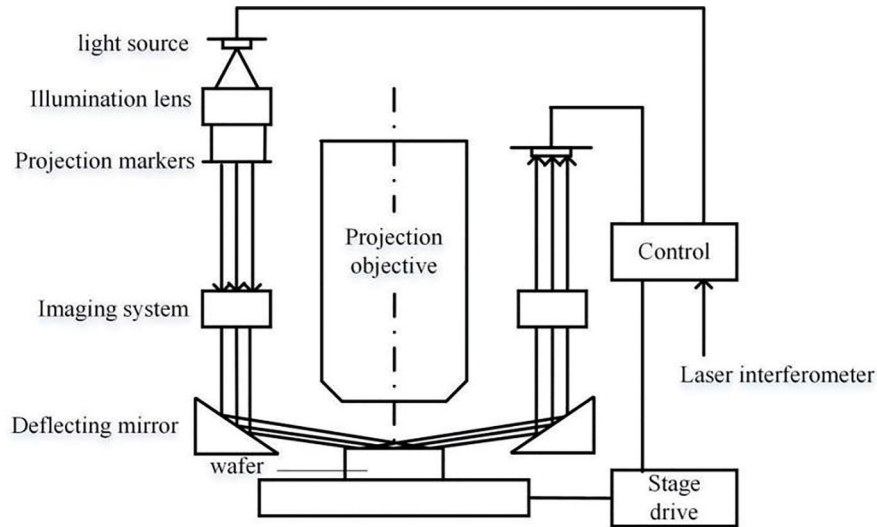


图 10 Canon 公司透射式调焦调平测量装置^[13]

Fig. 10 Transmission focusing and leveling measurement device of Canon company^[13]

ASML 公司提出采用透射式双远心投影成像系统的调焦调平测量装置,其原理如图 11 所示^[23]。测量光束分为测量光和参考光,两光路的测量原理一致。测量光探测硅片表面高度,参考光探测投影

物镜下表面的高度,根据二者的测量结果获得硅片表面相对于投影物镜下表面的相对高度。

随着集成电路的发展,ASML 公司研发了双工件台技术。用其中一个工件台完成上片、下片、对

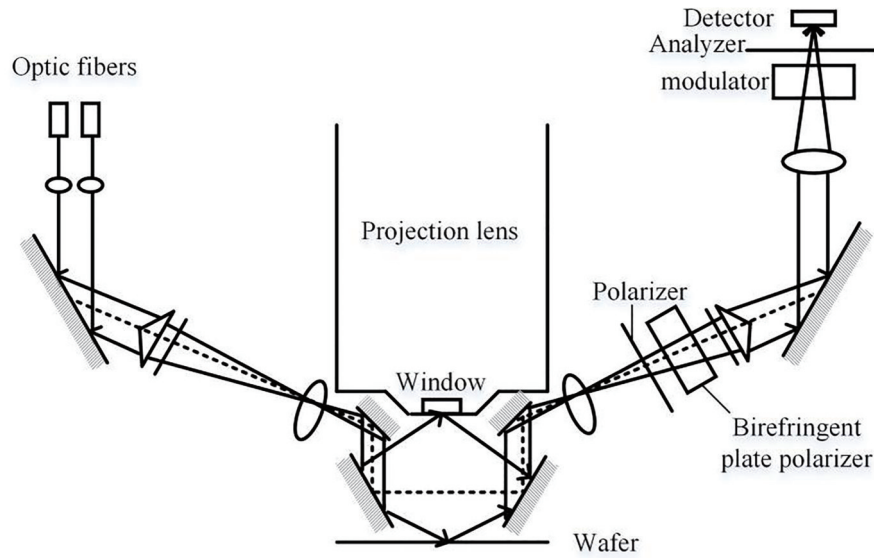


图 11 ASML 透射式调焦调平测量装置^[23]

Fig. 11 Transmission focusing and leveling measurement device of ASML company^[23]

准、调焦调平等功能,用另一个工件台进行扫描曝光,大大提高了光刻机产率^[21]。双工件台技术的发展给调焦调平测量提供了相对充足的空间,因此,ASML 公司将投影标记到探测标记之间的投影成像光路结构从透射式改为反射式。反射式投影成像系统具有结构简单、无色差、畸变小等优点。

ASML 公司双工件台光刻机采用的全反射式双远心投影成像装置如图 12 所示^[32]。其中,10 为调焦调平传感器,11 为光源结构,111 为光纤,112 为照明系统,113 为照明光栅,114 为投影双远心成像系统,115 和 116 为反光镜,12 为探测结构,121 为探测双远心成像系统,122 和 123 为反射镜,124 为偏振片,

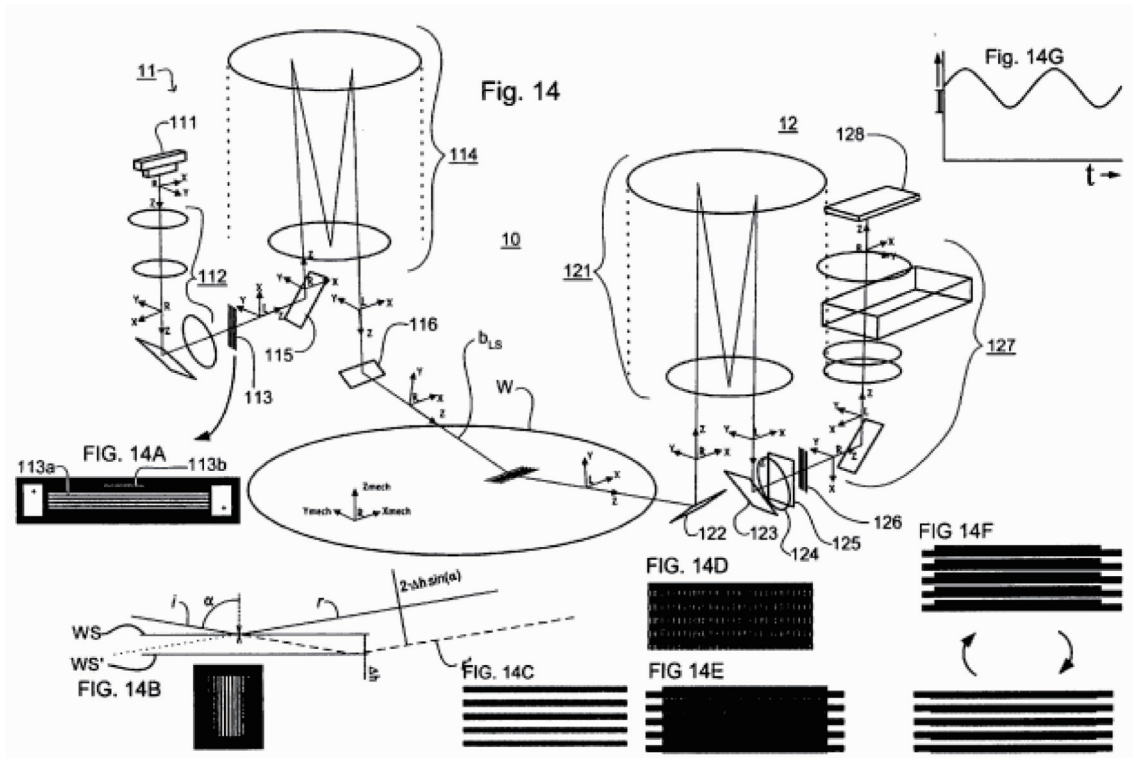


图 12 ASML 反射式调焦调平测量装置^[32]

Fig. 12 Reflective focusing and leveling measurement device of ASML company^[32]

125 为分光晶体, 126 为检测光栅, 127 为分光系统, 128 为探测器。测量光束经过两个相同的全反射式双远心成像装置在探测光栅处成像, 根据图像偏移量获得硅片表面的高度信息, 从而使宽带测量光不受成像系统剩余色差的影响^[33]。

为提高测量精度及速度, 对到达探测器前的测量光束要进行分光处理。具体实现时, 经硅片表面反射的测量光通过起偏器变为线偏振光, 再经过 1/4 波片变为圆偏振光, 然后通过分光结构分为两束偏

振态互相垂直的光束, 最后在探测光栅处成像并被光电探测器接收^[33]。ASML 公司分光光路结构的发展大致可分为三个阶段。第一阶段: 采用双折射晶体进行分光, 利用光弹调制器在时间上交替形成两偏振态互相垂直的光束, 被光电探测器接收后通过差分信号处理获得硅片表面高度, 其原理如图 13 所示^[34]。但光弹调制器的分时测量在硅片高速运动中易引入测量误差, 且作为有源器件, 散热会影响光刻机内部环境, 其后端解调电路也十分复杂。

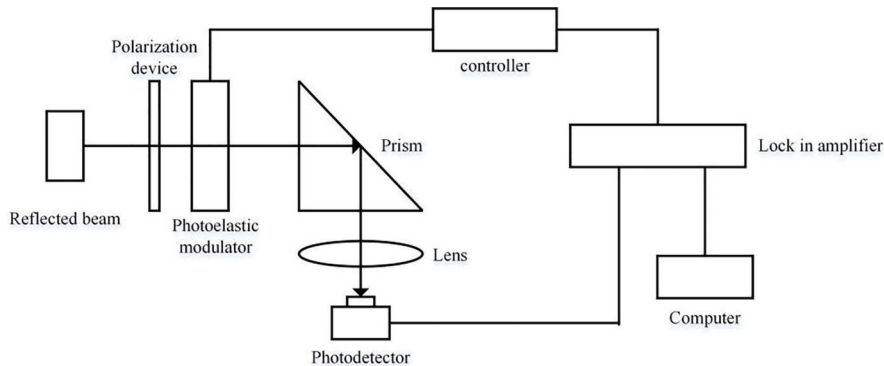


图 13 ASML 公司采用光弹调制器的分光光路结构示意图^[34]

Fig. 13 Schematic of optical path structure using photoelastic modulator of ASML company^[34]

第二阶段: 利用渥拉斯顿棱镜进行分光, 产生偏振态互相垂直的正常光(O)和非正常光(E), 两光束在空间上被相对移动半个光栅周期, 分别与探测光栅叠加形成莫尔条纹并被光电探测器同时接收。ASML

公司采用渥拉斯顿棱镜的空间分光光路结构如图 14 所示^[24], 该结构具有无差分信号时延、对光刻机环境影响较小、后端解调电路简单等特点, 但渥拉斯顿棱镜会产生色差, 造成波长相关的垂直探测误差。

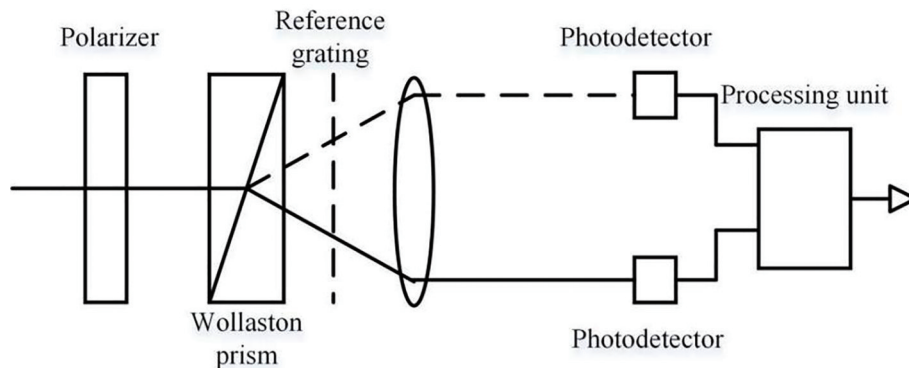


图 14 ASML 公司采用渥拉斯顿棱镜的空间分光光路结构示意图^[24]

Fig. 14 Schematic of spatial beam splitting optical path structure using Wollaston prism of ASML company^[24]

第三阶段: ASML 公司提出采用裂像棱镜光栅替代渥拉斯顿棱镜进行空间分光, 空间分光光路结构如图 15 所示^[24]。该结构具有无色差的特点, 可利用光电探测器进行实时检测。

国内, 中科院成都光电所、中国科学院微电子研究所、上海微电子装备有限公司等对投影成像系

统的光路结构也进行了一定研究。Yan 等^[35]对 $4f$ (f 为透镜焦距) 透射式双远心系统进行了研究; 孙裕文等^[21]提出了基于光学三角法和叠栅条纹法的调焦调平测量技术, 并采用渥拉斯顿棱镜进行空间分光; 孙生生等^[36]基于典型的 Offner 光学系统设计了反射式成像系统, 其结构如图 16 所示。该系统包含

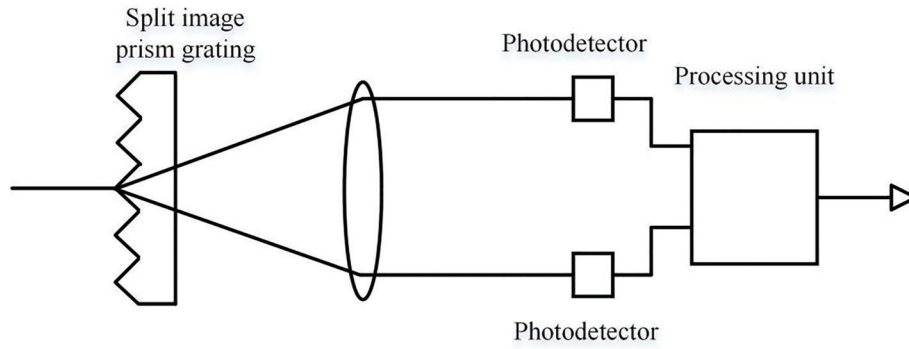


图 15 ASML 公司采用裂像棱镜光栅的空间分光光路结构示意图^[24]

Fig. 15 Schematic of spatial beam splitting optical path structure using split image prism grating of ASML company^[24]

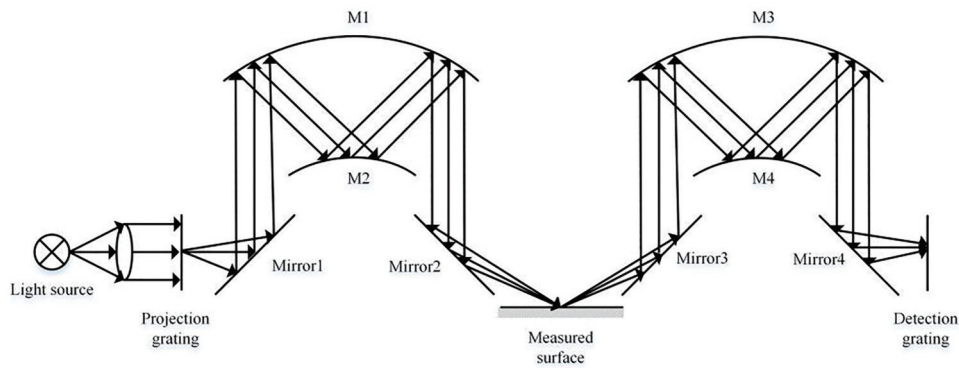


图 16 IMECAS 反射式调焦调平测量装置^[36]

Fig. 16 IMECAS reflective focusing and leveling measurement device^[36]

两个反射镜,主镜为凹球面反射镜,次镜为凸球面反射镜,光线在两个反射镜发生三次反射,最后在探测光栅处成像,属于三反射成像系统^[36]。

SMEE 提出的反射式调焦调平测量装置如图 17 所示,测量光束经照明模块入射至反射狭缝单元上,被反射后经投影单元投射至硅片上,通过成

像单元成像至探测模块,以获得硅片表面的高度信息。该装置能克服调焦投影标记对透射狭缝基底材料的依赖,采用反射狭缝以避免对基底材料透射波段的限制,且有利于提高调焦调平装置的能量利用率与探测信噪比^[37]。

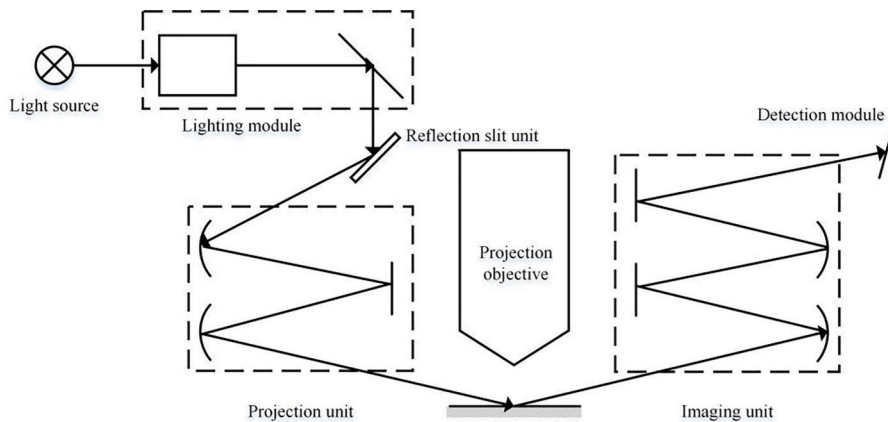


图 17 SMEE 反射式调焦调平测量装置^[37]

Fig. 17 SMEE reflective focusing and leveling measurement device^[37]

4 EUV 光刻调焦调平测量系统的改进

EUV 光刻机是未来应用于 7 nm 及以下技术节点集成电路制造的核心装备。由于采用 13.5 nm 曝光波长,其只能在真空中传播。因此,EUV 光刻机的调焦调平测量系统必须放在高真空环境中^[33]。相比传统的干式和浸没式光刻机,真空环境中调焦调平测量系统除了上述提到的各类技术外,还需考虑颗粒/气体污染和散热控制等方面的问题,并对系统进行相应的改进,以达到更高的测量精度。

为控制真空腔中调焦调平测量系统的温度,Nikon 公司提出了设置导热基板和主动冷却装置,通过在光学元件和基板之间加入流动气体进行散热^[38]。ASML 公司提出了一种在真空环境中操作的元件热调节方法,以气体为介质,通过动态调节冷却装置位置或方向达到所需温度^[39]。EUV 光刻机的调焦调平测量系统通常具有多个反射光学元件,减少每个元件上的污染可提高总反射率。Carl Zeiss 公司提出了一种测量 EUV 光刻装置真空室内残余气体的方法,可监测污染气体浓度,必要时需要中断设备运行进行清洁,并提出了一种用于清洁 EUV 光刻设备中污染物的方法,通过氢原子流与待清洁的分子反应形成挥发性化合物,可被真空泵抽走^[40]。

中国科学院微电子研究所在调焦调平测量系统真空环境适应能力方面先期开展了研究并提出一种电子学装置,将电子学系统(如光电探测器)放置于真空腔内的密封壳体中,有效阻挡了污染物^[41]。陈进新等^[42]提出了一种真空温度场测量装置及方法,既能实现真空中的测量,又能提高温度场的测量精度。徐天伟等^[43]提出将 EUV 调焦调平测量系统光源放置于真空腔外,并通过一种光纤传输装置将真空腔外的光传输进真空腔内供给传感器工作,可有效减小散热及真空腔内的污染^[43]。

5 结 论

综合基于光学三角法的调焦调平测量原理、系统组成以及关键技术可以发现,随着调焦调平测量精度和测量速度要求的提高,测量方式上普遍采用阵列式投影标记进行测量。为减小工艺相关性误差,采用了宽光谱以及大入射角掠入射。同时,ASML 公司提出了设置镀膜平面反射镜以及基于气压的非光学传感器,Nikon 公司提出引入去偏振

器或 Nomarski 棱镜,Canon 公司提出加入光学校正系统。上海微电子装备有限公司提出设置参数调节单元,中科院微电子研究所针对调焦调平测量系统的增益系数工艺相关性开展了理论仿真与实验研究。调焦调平测量系统的投影成像光路结构可分为透射式和反射式两种,为了进一步提高测量精度及速度,投影成像光路结构进行了分光处理,从利用双折射晶体和光弹调制器的分时差分发展为采用渥拉斯顿棱镜的空间分光,用裂像棱镜光栅替代了渥拉斯顿棱镜。

为适应 EUV 真空环境,调焦调平测量系统在颗粒/气体污染和散热控制等方面还需要进一步改进。集成电路技术的不断发展,对调焦调平测量技术的要求也在不断提高,尤其是国内调焦调平测量技术还需进行大量研究。

参 考 文 献

- [1] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of very large scale integrated circuits[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 冯伯儒, 陈宝钦. 无铬相移掩模光刻技术[J]. 光子学报, 1996, 25(4): 328-332.
Feng B R, Chen B Q. Chromeless phase shift mask photolithography[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(4): 328-332.
- [3] den Boef A J. Optical wafer metrology sensors for process-robust CD and overlay control in semiconductor device manufacturing[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2016, 4(2): 023001.
- [4] 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 J H, Tang Y, Xie Z Y, et al. Coaxial focusing method based on differential modulation evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0612001.
- [5] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Wang X Z, Dai F Z. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [6] 袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.
Yuan Q Y, Wang X Z. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 57-64.

- [7] Jang J H, Park T, Park K D, et al. Focus control budget analysis for critical layers of flash devices[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9050: 90502F.
- [8] van den Brink M. Many ways to shrink: the right moves to 10 nanometer and beyond[EB/OL]. (2014-12-24)[2021-12-05]. <https://wenku.baidu.com/view/c6201bad482fb4daa48d4b0d.html>.
- [9] IRDS. International Roadmap for Devices and Systems 2021 Update lithography[Z]. (2021-09)[2021-12-05]. <https://irds.ieee.org/editions/2021/lithography>.
- [10] 宋珂. 基于调焦调平系统的精密定位控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院光电研究院, 2013: 4-5.
Song K. Research on precision positioning control technology based on focusing and leveling system[D]. Beijing: Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 4-5.
- [11] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
Wu J B. The research for technology of high precise laser facula position detection based on the quadrant detector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [12] 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]. Proceedings of SPIE, 1988, 922: 270-276.
- [13] Kawashima H, Suzuki A. Method and apparatus for precisely detecting surface position of a patterned wafer: US5118957[P]. 1992-06-02.
- [14] 曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 24-30.
Zeng A J, Wang X Z, Xu D Y. Progress in focus and level sensor for projection lithography system[J]. Laser & Optics Progress, 2004, 41(7): 24-30.
- [15] Cramer H A J, Kiers A G M, Pellemans H P M. Inspection apparatus, lithographic apparatus, lithographic processing cell and inspection method: US9128065[P]. 2015-09-08.
- [16] Nakashima T, Hamatani M, Ozawa K. Scanning exposure apparatus: US5534970[P]. 1996-07-09.
- [17] Hagiwara T, Hamatani M, Tashiro H, et al. Wafer edge-shot algorithm for wafer scanners[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4691: 790-801.
- [18] Iwamoto K, Sakai F M. New scanners for the 100-nm era[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 621-633.
- [19] Baselmans J J M, Moers M H P, van der Laan H, et al. Lithographic projection apparatus, a grating module, a sensor module, a method of measuring wave front aberrations: US6650399[P]. 2003-11-18.
- [20] Li X P, Chen F B, Li Z D. Simulation on signal processing of focusing and leveling measurement system[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6724: 67241R.
- [21] 孙裕文. 纳米光刻中调焦调平系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 23-29.
Sun Y W. Research on focusing and leveling system in nanolithography[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 23-29.
- [22] 曾爱军, 王向朝. 基于光栅成像投影的微小位移检测方法[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 394-398.
Zeng A J, Wang X Z. Micro-displacement measurement based on grating projection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(3): 394-398.
- [23] van der Werf J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1992, 10(2): 735-740.
- [24] Teunissen P A A, Broodbakker P J M, Queens R M G J. Lithographic apparatus, level sensor, method of inspection, device manufacturing method, and device manufactured thereby: US7248337[P]. 2007-07-24.
- [25] Gatefait M, Lam A, le Gratiot B, et al. AGILE integration into APC for high mix logic fab[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9661: 96610P.
- [26] den Boef A J, Benschop J P H, Brinkhof R, et al. Level sensor arrangement for lithographic apparatus and device manufacturing method: US8842293[P]. 2014-09-23.
- [27] Hidaka Y, Uchikawa K, Smith D G. Error analysis and compensation method of focus detection in exposure apparatus[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 26(1): 10-18.
- [28] Kobayashi T, Kosugi Y. Surface position measuring method and apparatus: US7668343[P]. 2010-02-23.
- [29] 王晓庆, 王海江, 庄亚政. 一种调焦调平装置, 调焦调平方法及光刻设备: CN110376846A[P]. 2019-10-25.
Wang X Q, Wang H J, Zhuang Y Z. A focusing and leveling device, focusing and leveling method and lithography equipment: CN110376846A[P]. 2019-10-25.
- [30] 孙生生, 王丹, 宗明成. 调焦调平传感器增益系数工艺相关性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0412002.

- Sun S S, Wang D, Zong M C. Gain coefficient process dependency of focusing and leveling sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0412002.
- [31] Uehara M, Sudo T, Kanatani F. Horizontal position detecting device: US4558949[P]. 1985-12-17.
- [32] Jasper J C M, Loopstra E R, Modderman T M, et al. Off-axis levelling in lithographic projection apparatus: US6674510[P]. 2004-01-06.
- [33] 伍强. 衍射极限附近的光刻工艺[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- Wu Q. Photolithography process near the diffraction limit[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [34] Singh M. Lithographic apparatus and method: US7473917[P]. 2009-01-06.
- [35] Yan W, Yang Y, Chen W F, et al. Moiré-based focusing and leveling scheme for optical projection lithography[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 5959-5963.
- [36] 孙生生, 王丹, 齐月静, 等. 用于光刻调焦调平的反射式投影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1522002.
- Sun S S, Wang D, Qi Y J, et al. Design of reflective projection optics used in lithographic focusing and leveling system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1522002.
- [37] 毛静超, 徐荣伟, 庄亚政, 等. 调焦调平装置, 光刻设备及调焦调平方法: CN111352304A[P]. 2020-06-30.
- Mao J C, Xu R W, Zhuang Y Z, et al. Focusing and leveling device, lithography equipment and focusing and leveling method: CN111352304A[P]. 2020-06-30.
- [38] Sogard M R, Watson D C. Temperature-regulating devices for reflective optical elements: US20090147386[P]. 2009-06-11.
- [39] Janssen F J J, Loopstra E R. Method of cooling an optical element, lithographic apparatus and method for manufacturing a device: US8817229[P]. 2014-08-26.
- [40] Kraus D, Ehm D H, Stein T, et al. Method for cleaning an EUV lithography device, method for measuring the residual gas atmosphere and the contamination and EUV lithography device: US7911598[P]. 2011-03-22.
- [41] 宗明成, 孙裕文, 徐天伟, 等. 一种用于 EUV 真空环境中的电子学装置: CN103268058A[P]. 2013-08-28.
- Zong M C, Sun Y W, Xu T W, et al. An electronic device for EUV vacuum environment: CN103268058A[P]. 2013-08-28.
- [42] 陈进新, 齐威, 李璟, 等. 真空温度场测量装置及方法: CN110926617A[P]. 2020-03-27.
- Chen J X, Qi W, Li J, et al. Vacuum temperature field measuring device and method: CN110926617A[P]. 2020-03-27.
- [43] 徐天伟, 王丹, 马向红, 等. 用于 EUV 真空环境中的光传输装置及光刻机: CN110908249A[P]. 2020-03-24.
- Xu T W, Wang D, Ma X H, et al. Optical transmission device and lithography machine for EUV vacuum environment: CN110908249A[P]. 2020-03-24.