

光学学报

极紫外光刻机曝光系统光学设计与进展

李艳秋*, 南雁北, 陈雨情, 闫旭, 张心怡, 刘丽辉**

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 极紫外光刻曝光光学系统是极紫外光刻机的核心部件,其设计直接影响极紫外光刻机的性能。极紫外光刻机曝光系统的设计难度大、研究周期长,国外极紫外光刻机产品已经用于高端芯片的制造,但国外对中国禁运相关产品。国内极紫外光刻机曝光系统的设计和研发始于 2002 年。国内相关领域的研究主要聚焦在极紫外光刻机曝光光学系统的光学设计、像差检测、公差分析、热变形分析等。结合国内外极紫外光刻机曝光光学系统设计研究的历史和现状,较为系统地综述了极紫外光刻投影物镜和照明系统的设计研究与进展,包括:极紫外光刻机投影物镜系统及其设计方法、极紫外光刻照明系统及其设计方法、极紫外光刻曝光光学系统的公差分析、热变形及其对成像性能的影响研究,这为我国从事极紫外光刻机研制、曝光系统光学设计与加工的学者、工程师等提供了极紫外光刻机曝光系统设计研究的历史、现状和未来趋势的相关信息,助力我国极紫外光刻机的设计和研制。

关键词 极紫外光刻; 光刻机曝光系统; 物镜系统; 照明系统; 光学设计

中图分类号 TN305.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230739

1 引言

光刻机是超大规模集成电路(Integrated circuit, IC)制造所需的关键设备,其技术和设备的发展历程如图 1 所示^[1-2]。光刻机沿摩尔定律预言发展至今,光刻成像分辨率不断跨越光学成像分辨率极限。因此,需不断提高光刻机曝光系统(照明系统和物镜系统)的光学

成像性能,这将导致光刻机曝光系统光学设计和研制难度不断攀升。7~1 nm 技术节点,迫切需要高性能、高数值孔径(Numerical aperture, NA)(0.33~0.55)以及变倍率极紫外(Extreme ultraviolet, EUV)光刻机^[3]。曝光光学系统主要由光源、照明系统、反射式掩模、物镜系统、硅片等部分组成^[4-5],曝光光学系统的性能直接影响光刻成像性能和芯片制造如图 2 所示。

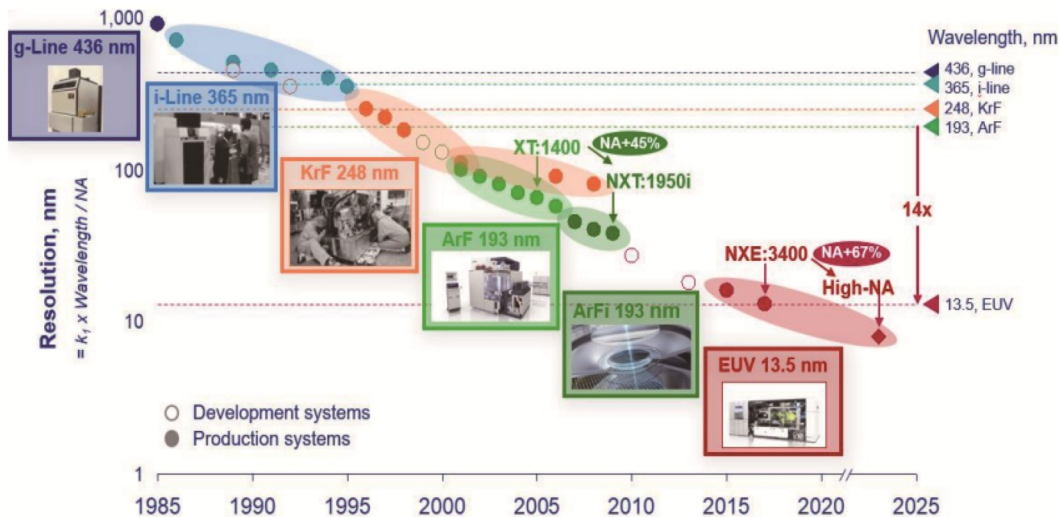


图 1 摩尔定律下 ASML 光刻机的发展历程^[2]

Fig. 1 Development of lithography machine for ASML under Moore's Law^[2]

光刻机曝光系统设计方法、加工技术和分辨率增强技术的不断突破,光刻分辨率不断提高。光刻分辨

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-01; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(6217514)、国家科技重大专项(2017ZX02101006-001)

通信作者: *liyanqiu@bit.edu.cn; **liulihui@bit.edu.cn

率定义为满足光刻性能要求的、晶圆上光刻胶成像的最小特征尺寸(CD)^[6],可表示为

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中:CD为光刻特征尺寸; λ 为曝光光源波长;NA为物镜系统的像方数值孔径; k_1 为工艺因子,多种分辨率

增强技术可实现 $k_1 < 0.61$ 。如图1所示,光刻机沿着缩短曝光光源波长、增大物镜系统NA和降低 k_1 的路径发展,不断地提高光刻分辨率,光刻机光源的波长经历了436 nm(g-line)、365 nm(i-line)、248 nm(KrF)、193 nm(ArF)和13.5 nm(EUV)^[2,7-8]。本文重点介绍EUV光刻机及其曝光系统的 optical 设计研究与进展。



图2 EUV光刻照明和物镜示意图^[5]

Fig. 2 Schematic diagram of EUV lithography lighting and objective^[5]

EUV光刻机的曝光波长为13.5 nm,为了避免EUV光被吸收,EUV光刻机曝光光学系统需要采用多层膜反射镜构成全反射式结构^[9]。然而,多种因素导致EUV光刻技术经历了漫长的发展过程。20世纪80年代,日本电报电话公司(Nippon Telegraph & Telephone, NTT)的木下博雄(Kinoshita)首次公布了波长为11 nm的软X射线光刻获得200 nm线宽的曝光结果^[10-13]。1999年,日本成立ASET(Association of Super-Advanced Electronics Technologies)联合研发机构。1999—2000年,日本姬路工业大学(Himeji Institute of Technology, HIT)木下博雄团队作为ASET联合研发机构成员,利用13.5 nm同步辐射光源和自主研制的EUV曝光系统,获得了56 nm图形的大面积曝光结果,实验证明大面积EUV光刻的可行性^[14-16],后期,在10 mm×10 mm区域获得60 nm密集线条和40 nm孤立线条的大面积曝光^[17]。

1998年,美国虚拟实验室(Virtual National Laboratory, VNL)等曾联合欧洲的研究机构研发了NA为0.1的研究型EUV光刻机ETS(Engineering Test Stand, ETS),其由四面反射镜构成的物镜缩小倍率为4倍,曝光视场为26 mm×1.5 mm^[18]。2001年,VNL通过ETS实验型样机实现了100 nm的特征尺寸曝光^[19-20],2003年,VNL通过改进的样机ETS2实现了60 nm特征尺寸曝光^[21]。2004年,美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)联合蔡司(Zeiss)研制了小视场曝光系统MET。其非球

面两反物镜的光瞳遮拦比为30%,光刻物镜综合均方根(RMS)波像差为0.4 nm。在200 μm×600 μm的静态曝光区域,实现分辨率为32 nm的光刻成像^[22-23]。

2006年,荷兰阿斯麦公司(ASML)研制了NA为0.25的EUV样机ADT(Alpha Demo Tools, ADT),其由六面反射镜构成的物镜缩小倍率为4倍、扫描曝光视场为26 mm×33 mm,获得了32 nm技术节点的曝光图形^[24]。2007年,日本Nikon研制了NA为0.25的光刻样机EUV1,其物镜缩小倍率为4倍,由六面非球面反射镜构成,单次曝光可实现30 nm的分辨率^[25-26]。

2007年,ASML公司陆续研制了TWINSCAN NXE:3X00系列EUV光刻机,该系列EUV光刻机包括NXE:3100^[27]、NXE:3300B^[27]、NXE:3350B^[28]、NXE:3400B^[29]、NXE:3400C^[29]、NXE:3600D^[29-30]等,这些光刻机的光学曝光系统均由德国光学制造商蔡司公司设计和制造^[31],其曝光光学系性能如表1所示。

为了获得更高的分辨率,满足更高技术节点的IC制造需求,需要进一步增大EUV光刻机的NA。为了降低掩模阴影效应^[32],并综合考虑产率等因素,提出的NA为0.55、采用变倍率物镜的下一代EUV光刻机,其扫描方向的缩小倍率为8倍,垂直于扫描方向的缩小倍率为4倍^[33-35]。根据ASML公司公布的最新规划,位于Veldhoven的高NA联合实验室,正在集成第一台高NA(NA为0.55)的EUV光刻平台EXE系列,并有望于2023年建成并投入使用^[4]。

2002年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了国内第一套由小视场Schwarzschild物镜

表 1 ASML 的 EUV 光刻机曝光光学系统性能

Table 1 Performance of EUV lithography projection and illumination system of ASML

Model of lithography tool	Demagnification	NA	Resolution /nm	Wavefront aberration RMS /nm	Distortion /nm	Illumination mode
NXE:3100	4×	0.25	27	<0.8		1 illumination mode
NXE:3300B	4×	0.33	22	<0.4	<1	7 illumination modes
NXE:3350B	4×	0.33	16	<0.3	<0.5	7 illumination modes
NXE:3400B	4×	0.33	13	<0.2	<0.5	Arbitrary
NXE:3400C	4×	0.33	13	<0.2	<0.5	Arbitrary
NXE:3600D	4×	0.33	13	<0.2	<0.3	Arbitrary

构成的 EUV 光刻原理实验装置,实现了 $0.75\ \mu\text{m}$ 特征尺寸的曝光^[36]。2017年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道其研制的小视场 EUV 曝光光学系统,由两面反射镜构成的投影物镜波像差 RMS 值优于 $0.75\ \text{nm}$,构建了 EUV 光刻静态曝光装置,获得了 $32\ \text{nm}$ 线宽的光刻胶曝光图形,建立了 EUV 光刻关键技术验证及工艺测试平台^[37]。

光刻机曝光系统的设计是光刻机的关键技术。然而,EUV 光刻机曝光系统的设计技术、优化方法、设计数据、公差分析、总体协同设计等都是光刻机研制的核心机密,光学设计详实、全面的信息鲜见报道。国内外文献和专利中,曝光系统设计的性能指标的披露,也有所保留,鲜有全面、完整、详实、明晰的全套技术指标或数据信息^[38-60]。

本文将结合国内外 EUV 光刻机曝光光学系统进行光学设计研究,对国内外 EUV 光刻投影物镜系统、照明系统的发展历程及其相关设计方法进行综述性介绍。主要介绍极紫外光刻机投影物镜系统及设计方法,极紫外光刻照明系统及其设计方法,曝光光学系统设计的关联技术。

2 极紫外光刻机投影物镜系统及其设计方法

EUV 光刻投影物镜是将掩模 IC 图形复制到硅片面的核心子系统。光刻投影物镜的设计难点为必须在大视场内,实现高 NA、极小像差的设计需求。早期试验机型的 EUV 光刻投影物镜的结构是由两面或四面反射镜构成。产品 EUV 光刻机由六面反射镜构成。本节将按照物镜系统反射镜的数量和结构特征对应的曝光系统,依次对其设计方法进行介绍。

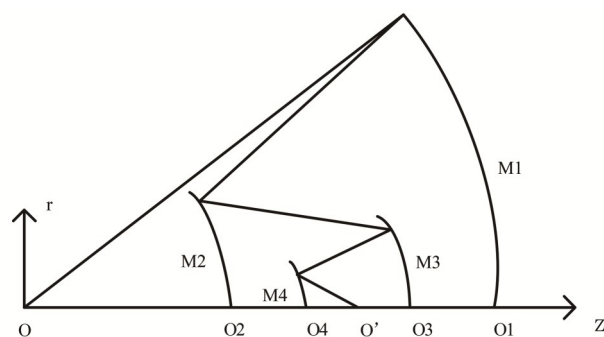
2.1 研究型 EUV 光刻投影物镜系统设计方法

早期实验型 EUV 光刻机样机的设计方法主要有微分方程法、 $y-\bar{y}$ 法、仿形设计法以及初级像差方程法,确定初始结构参数。主要方法包括:

1) 微分方程法

1991年,Wang等^[61-62]提出了微分方程法。该方法首先给定球面初始结构,以及第一面镜与第四面镜的

非球面参数;然后,利用理想光学系统的等光程原理,构建中间两个反射镜的微分方程;通过求解该微分方程获得面型数据,并将其重新拟合合成连续的非球面即可实现由四面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜,其设计示意图如图 3 所示。

图 3 微分方程法示意图^[61]Fig. 3 Schematic diagram of differential equation method^[61]

2) $y-\bar{y}$ 法

2000年,Lerner等^[63]通过设定反射镜上主光线高度 y 与反射镜边缘高度 \bar{y} ,建立反射镜光焦度、镜间距离和光线投射高度的关系,利用拉格朗日不变量对前述关系式进行计算,求解出物镜系统的结构参数。

3) 仿形设计法

2000年,Li、Kinoshita等^[14]设计了 NA 为 0.15 的由四面反射镜构成的非球面 EUV 光刻投影物镜,在 $25\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ 的弧形视场内,实现 $50\ \text{nm}$ 光刻分辨率,在全视场范围内畸变小于 0.01% ,像散几乎为零。

4) 初级像差方程法

2010年,北京理工大学常军等^[64-65]提出了一种基于初阶像差方程的由四面反射镜构成的物镜设计方法。该方法将由四面反射镜构成的物镜的结构参数划分为两类:一类是反射镜的非球面系数,另一类是与系统外形尺寸有关的结构参数。在计算过程中,首先确定物镜中“部分”与系统外形尺寸有关的结构参数,然后求解初级像差方程,计算剩余结构参量,从而获得所需的 EUV 光刻投影物镜系统。通过上述方法设计了 NA 为 0.13、缩小倍率为 2.3 倍的由四面反射镜构成

的 EUV 光刻投影物镜系统, 在 50 mm 的视场内物镜系统的光学调制函数 (Modulation transfer function,

MTF) 接近衍射极限, 如图 4 所示。

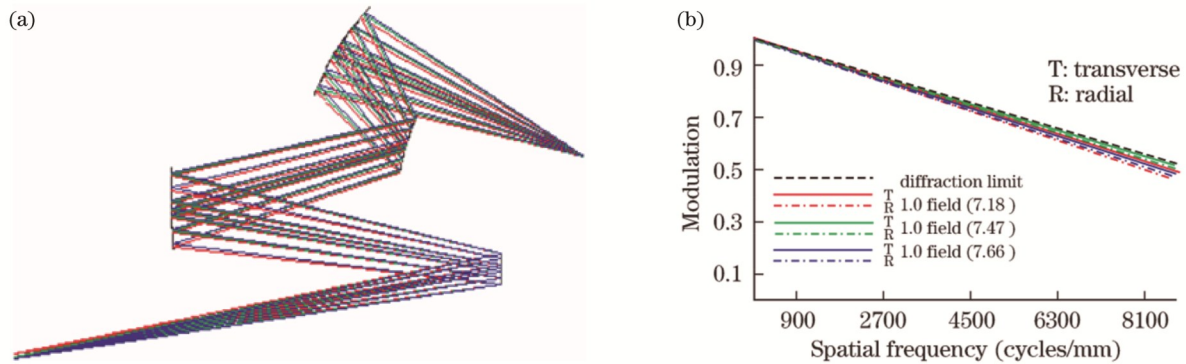


图 4 利用初阶像差方程组求解法得到 EUV 物镜示意图^[64]。(a) 物镜示意图; (b) 系统 MTF

Fig. 4 Layout of EUV four-mirror objective is obtained by solving the first order aberration equations^[64]. (a) Layout of the four-mirror objective; (b) MTF of the four-mirror objective

2.2 匀倍率由六面及多面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜设计方法

IC 技术对更高分辨率 EUV 光刻机的需求, 牵引研究人员设计低像差、大视场、由六面和多面反射镜构成的物镜系统。设计方法主要包括: 基于现有结构的仿形设计法、近轴搜索法、鞍点构造法、分组设计法以及基于初级像差求解的自动设计方法。

1) 仿形设计法

2003 年, 李艳秋^[66]根据 EUV 光刻投影物镜结构, 仿形设计了 NA 为 0.25 的大视场由六面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜。2004 年提出了 NA 为 0.25 的由六面反射镜构成的物镜的设计优化方法, 该设计在 26 mm × 1 mm 的视场内, 波像差小于 0.4 nm, 畸变小于 3.77 nm, 分辨率可达到 50 nm^[67]。

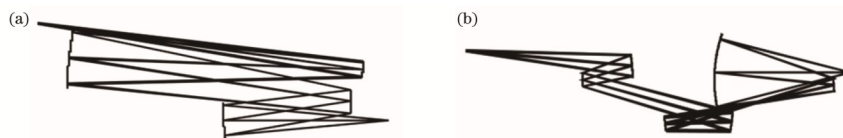


图 5 利用近轴搜索法得到的 EUV 光刻投影物镜示意图^[70]。(a) NA 为 0.1 由四面反射镜构成的物镜示意图; (b) NA 为 0.25 由六面反射镜构成的物镜示意图

Fig. 5 Schematic diagram of EUV lithographic objective obtained by paraxial search method^[70]. (a) Layout of NA is 0.1 four-mirror objective; (b) layout of NA is 0.25 six-mirror objective

3) 鞍点构造法

2008 年, 荷兰代尔夫特大学 Marinescu^[71-73]提出了鞍点构造法, 即: 在现有初始结构中引入鞍点的方法。设计了多套六面反射镜和八面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜。该方法在某一物镜初始结构中, 插入两面反射镜, 构造一个“鞍点”, 该“鞍点”的两侧对应不同的优化路径 (即评价函数下降的路径)。沿上述两条路径对系统进行优化, 得到 2 个与评价函数局部极小值所对应的新结构, 其设计过程如图 6 所示。

2) 近轴搜索法

2003 年, Bal 等^[68-69]提出了近轴搜索法, 以寻找由多面反射镜构成的极紫外光刻投影物镜可能的结构解空间。该方法基于矩阵光学原理, 通过引入约束条件减少系统结构变量的数目, 并对剩余的结构变量进行穷举式搜索, 最后利用近轴光线追迹进行遮拦判定, 筛选出无遮拦的物镜结构。2009 年, 中国科学院光电技术研究所杨雄等^[70]利用近轴搜索法设计了 NA 为 0.25 的由六面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜以及 NA 为 0.1 的由四面反射镜构成的物镜, NA 为 0.25 的物镜在 1 mm 的视场中, 波像差小于 0.26 nm, 畸变小于 3 nm, NA 为 0.1 的物镜在相同视场内, 波像差小于 0.64 nm, 畸变小于 3 nm, 结构如图 5 所示。

4) 分组设计法

2013 年, 北京理工大学李艳秋、刘菲等^[74-77]提出了极紫外光刻投影物镜的近轴分组设计法。通过近轴分组设计, 解决设计方法实施中计算量大、设计方向盲目等问题, 设计了 NA 为 0.25~0.7、包含 6~10 面反射镜的 EUV 光刻投影物镜。

2013 年, 北京理工大学李艳秋、曹振等^[78-79]针对高 NA 的 EUV 物镜设计需求, 提出了基于真实光线追迹的分组设计方法。避免了近轴分组设计光线追迹反复迭代, 高效实现最优设计, 使得各镜组的光瞳可以直接

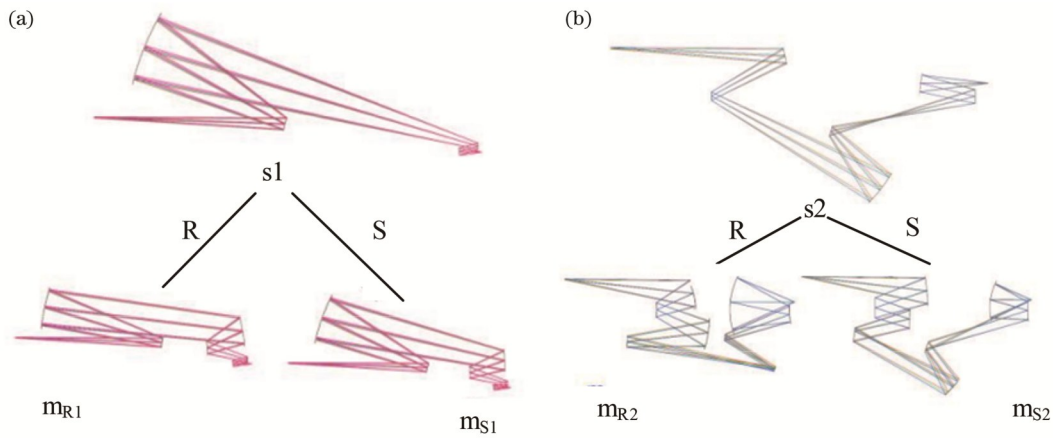


图 6 鞍点构造法过程示意图^[71-73]。(a)由六面反射镜构成的物镜示意图;(b)由八面反射镜构成的物镜示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the saddle point construction method^[71-73]. (a) Layout of six-mirror objective; (b) layout of eight-mirror objective

匹配。并通过上述方法完成了缩小倍率为 4 倍 NA 为 0.33、缩小倍率为 8 倍 NA 为 0.5 的 EUV 光刻投影物镜系统的设计。

2015 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王君等^[80-83]以公开的由六面反射镜构成的 EUV 光刻物镜为基础,利用分组设计法,结合渐进优化的方式和 Q-type 非球面,设计了 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜系统,在 26 mm×2 mm 的视场内波像差小于 0.36 nm,畸变小于 1.5 nm^[84]。

2018 年,台湾大学 Hsiao 等^[85-86],利用广义高斯常数对分组设计法进行分析,并开发了 NA 为 0.4、由八面反射镜构成的 EUV 光刻物镜系统的自动设计程序。该方法通过广义高斯函数,分析了各镜组参数之间的关系,并将其作为在优化过程中物镜光学性能的约束,利用此方法设计了 NA 为 0.4 的由八面反射镜构成的 EUV 光刻物镜。

2020 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Wu 等^[87]提出了一种基于实际光线追迹并结合初始结构参数与像差平衡的分组设计方法。该方法建立了初始结构参数与初级像差之间的关系,通过模拟粒子群退火算法,筛选初级像差平衡的初始结构,设计完成了一套离轴 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜,该物镜在 26 mm×2 mm 的弧形视场中波像差小于 0.19 nm,畸变小于 1 nm。

2022 年北京理工大学李艳秋、闫旭等^[88]提出了基于双向真实光线追迹的分组设计方法。该方法通过在正向光路和逆向光路中的理想共轭视场点,进行真实光线追迹,实现了非球面 EUV 光刻物镜初始结构的计算。通过该方法设计完成了在 26 mm×2 mm 的弧形视场内畸变小于 0.25 nm,波像差小于 0.2 nm、NA 为 0.33 的极紫外光刻物镜系统如图 7 所示。

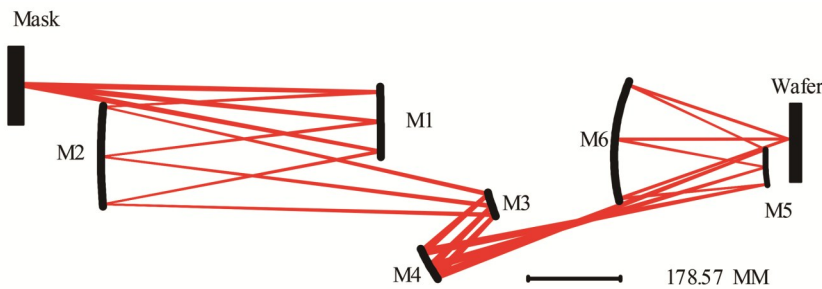


图 7 利用分组设计法得到 NA 为 0.33 的大视场 EUV 光刻投影物镜结构图^[88]

Fig. 7 Layout of NA is 0.33 EUV lithography projection objective by group design method^[88]

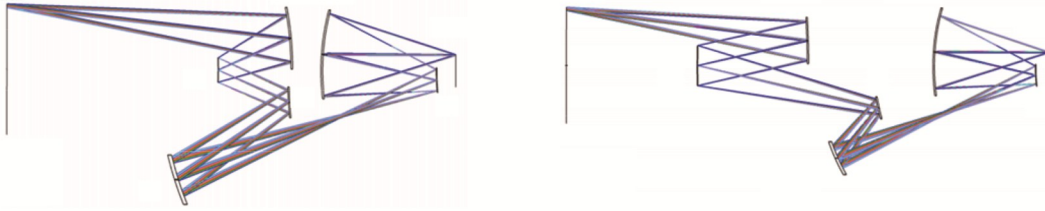
5) 利用求解初级像差方程的自动设计方法

2022 年,华中科技大学 Tan 等^[89]提出一种基于 Seidel 像差理论求解离轴的由六面反射镜构成的 EUV 光刻投影系统球面初始结构参数,借此进行方法设计。该方法通过对初始结构进行光线追迹,用结构参数表达初级像差,并设置不同的初始条件,获得不同的初始

结构。通过该方法设计完成了两组 NA 为 0.25 的 EUV 光刻投影物镜系统,该物镜在 26 mm×1.5 mm 的视场内波像差分别小于 0.53 nm 和 0.58 nm,畸变分别小于 1.2 nm 和 0.8 nm,其结构如图 8 所示。

2.3 高 NA 变倍率 EUV 光刻投影物镜系统设计方法

研制中的 NA 为 0.55、变倍率采用 EUV 光刻机,

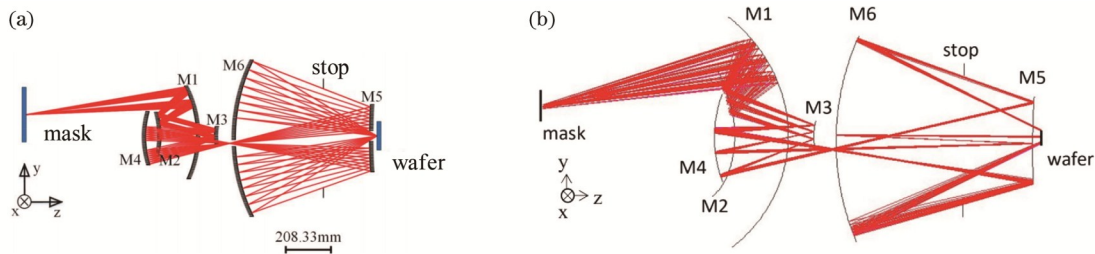
图 8 利用 Seidel 像差求解得到的 NA 为 0.25 的 EUV 光刻投影物镜结构图^[89]Fig. 8 Layout of NA is 0.25 EUV lithography projection objective by Seidel aberration solution^[89]

引起学术界和产业界的广泛关注,国内外尚未公开完善且成熟的物镜系统设计方法。公开的设计方法主要有基曲率组合法^[90]、分组设计法^[91]、基于矢量像差理论的初始结构计算法^[92]。

尚未公开设计方法的专利包括:2012年,Mann^[93]的专利披露由六面反射镜构成的 NA 为 0.5 以及由八面反射镜构成的 NA 为 0.65 的变倍率光刻投影物镜系统的设计。2016年,Zeiss 公司 Schwab 等^[94]的专利披露 NA 为 0.55 的由八面反射镜构成的变倍率光刻投影物镜系统设计结果和照明系统的部分设计参数。2017年至今,Zeiss 公司公开了多套由六面反射镜、多面反射镜(>6)构成的变倍率曝光系统的设计案例^[94-95]。

2016年,北京理工大学李艳秋、刘岩等^[90]根据非

对称光学系统的一阶成像理论,提出了曲率组合设计方法。该方法以缩小倍率为 8 倍的物镜系统初始结构为基础,优化得到缩小倍率为 4 倍的同构系统,通过组合两个球面系统的曲率参数,得到了变倍率初始结构的设计。并利用该方法,完成了一套 X 方向缩小倍率为 4 倍,Y 方向缩小倍率为 8 倍,NA 为 0.5 的离轴、变倍率、中心遮拦 EUV 光刻投影物镜的设计,其结构如图 9(a)所示,该物镜在 $26\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的视场中波像差小于 0.73 nm ,畸变小于 4.9 nm 。2021年,北京理工大学李艳秋、刘陌^[96]通过高阶自由曲面实现了大视场 NA 为 0.55 变倍率光刻投影物镜的设计,该物镜在 $26\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的视场中波像差小于 0.85 nm ,畸变小于 0.9 nm ,其结构如图 9(b)所示。

图 9 变倍率 EUV 光刻投影物镜结构图^[90,96]。(a) NA 为 0.5 极紫外光刻投影物镜示意图;(b) NA 为 0.55 极紫外光刻投影物镜示意图Fig.9 Structure of anamorphic EUV lithographic projection objective^[90,96]. (a) Layout of NA is 0.5 EUV lithography projection objective; (b) layout of NA is 0.55 EUV lithography projection objective

2022年,北京理工大学李艳秋、闫旭等^[91]针对 NA 为 0.55 的 EUV 光刻物镜最后一面反射镜直径过大的问题,提出了一种大离轴、变倍率极紫外光刻物镜分组设计方法。该方法对物镜结构进行了创新性设计,设计了大离轴变倍率 EUV 物镜结构,实现了照明系统出射并经掩模反射后的光线,定向到合理的位置,物镜系统和照明系统彼此之间不会发生光路遮拦,获得结构和性能均优的大离轴、变倍率 EUV 的物镜。该方法设计的 NA 为 0.55 的大离轴、变倍率 EUV 光刻投影物镜,该物镜在 $26\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的视场中波像差小于 1.02 nm ,畸变小于 0.12 nm ,如图 10 所示。

2021年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Yue 等^[92]基于矢量像差理论提出了一种离轴反射式变倍率物镜系统的设计方法。该方法根据空间光线追迹和分组设计原理,建立了变倍率物镜结构参数和

光学性能相关的评价函数,通过模拟粒子群退火算法,选择了合适的物镜系统初始结构。利用此方法设计了一套 NA 为 0.55 的变倍率 EUV 光刻投影物镜,该物镜在 $26\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的视场中波像差小于 0.42 nm ,畸变小于 2 nm ,其结构如图 11 所示。

综上所述,国内外对匀倍率和变倍率的 EUV 物镜系统设计研究均进行全面深入的研究。国外匀倍率极紫外光刻物镜系统的设计、加工及制造技术已经成熟,并有成熟的 EUV 光刻物镜产品用于 IC 制造中。国内对匀倍率 EUV 光刻物镜系统的设计进行大量研究。目前,在物镜系统的光学设计方面已经达到国际先进水平。变倍率光刻物镜的光学设计,国内外均处于深入研究阶段。其中,国外位于 Veldhoven 的高 NA 联合实验室,正在集成第一台高 NA 为 0.55 的 EUV 光刻平台 EXE 系列,并有望于 2023 年提供给用户使用。国

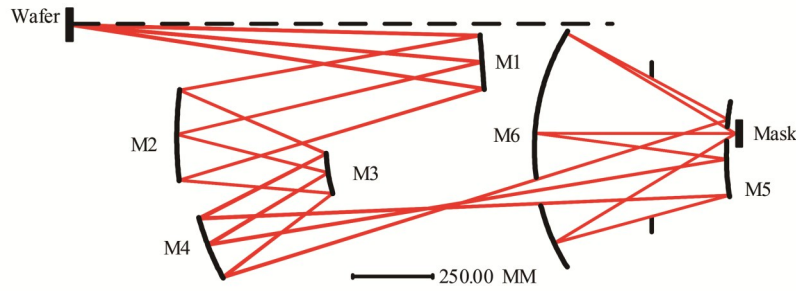


图 10 NA 为 0.55 大离轴变倍率 EUV 光刻投影物镜^[91]

Fig. 10 Large off-axis NA is 0.55 anamorphic EUV lithography projection objective^[91]

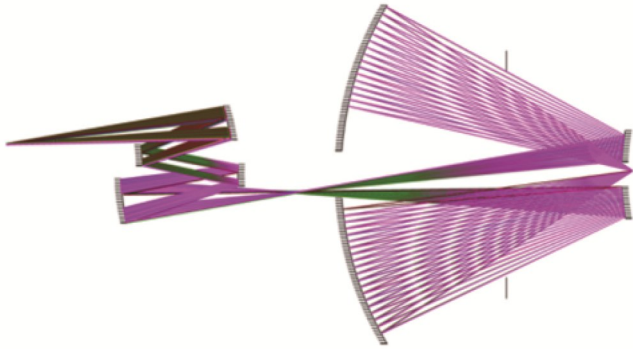


图 11 NA 为 0.55 变倍率 EUV 光刻投影物镜^[92]

Fig. 11 NA is 0.55 anamorphic EUV lithography projection objective^[92]

内,北京理工大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对 NA 为 0.33 和 NA 为 0.55 的 EUV 曝光系统的光学设计进行长期深入的研究,设计方法和设计效果可比肩国际已披露的同类设计。

3 极紫外光刻照明系统及其设计方法

极紫外光刻照明系统是极紫外光刻曝光光学系统的重要组成部分之一,要求在掩模面实现高均匀照明(即照明非均匀度小于 1%)^[97],同时能够在出瞳面实

现分辨率增强技术所需的多种离轴照明模式。

早期,照明系统多采用临界照明结构,将光源直接成像至掩模面,将孔径光阑成像至照明出瞳面^[98,16]。1995 年,Haga 等^[98]采用临界照明原理设计了一种与两反非球面物镜系统相匹配的照明系统,该系统为由四面反射镜构成的掠入射式系统,可在掩模面实现一个 100 mm×2.4 mm 的弧形均匀照明区域。2000 年,日本姬路工业大学李艳秋、Kinoshita 等^[16]针对同步辐射光源束线特征和约束限制,根据临界照明原理设计了一种与由三面反射镜构成的球面物镜系统相匹配的由四面反射镜构成的照明系统,该系统实现了 150 mm×3 mm 的环形均匀照明区域。

虽然临界照明系统易于实现,但照明均匀性受光源均匀性影响较大,难以实现光刻照明系统对照明均匀性的严格要求。因此为实现光刻需求的高照明均匀性,研究人员采用科勒照明结构,并将波纹板或双排复眼等匀光元件引入照明系统,以提高其照明均匀性^[99]。目前使用的极紫外光刻照明系统主要由光源、匀光单元和中继镜组组成,如图 12 所示^[100]。其中 EUV 光源主要同步辐射源、放电等离子光源(DPP)和激光等离子光源(LPP)^[101-102]。目前,产品 EUV 光刻机采用 LPP 光源。

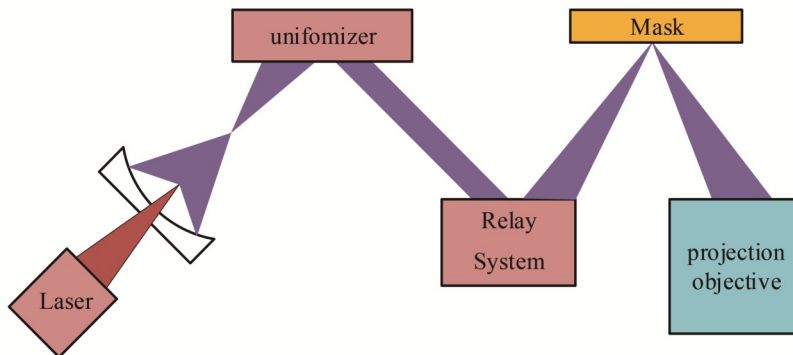


图 12 极紫外光刻照明系统光路示意图

Fig. 12 Schematic diagram of EUV lighting system

3.1 匀光单元

EUV 光刻照明系统中的匀光单元的主要作用是在掩模面实现高均匀照明。早期的 EUV 光刻照明系

统中使用的匀光元件是波纹板,但是其结构较为复杂,光学元件较多,无法显著提升照明系统的光能利用率。所以后期采用的匀光元件是反射双排复眼,以实现各

种离轴照明模式和均匀性优于 99% 的高均匀性照明。

1) 波纹板

1999 年, Chapman 等^[103]首次将波纹板用于 EUV 光刻照明, 该系统在扫描方向实现了科勒照明, 并结合重叠匀光以实现高照明均匀性, 如图 13 所示。2005 年, Tsuji 等^[104-105]设计了一种单一匀光器的波纹板照明系统。该系统需要七面反射镜, 其光能利用率仅为

9.5%。2009 年, Kajiyama 等^[106]设计了一套波纹板照明系统, 该系统中继镜组包含三面反射镜, 照明系统波纹板两侧放置平面反射镜, 提高了照明均匀性; 也可用两片或多片波纹板提高照明均匀性, 光能利用率小于 32.1%。上述设计波纹板结构比较复杂, 所用光学元件较多, 光能利用率并没有得到显著提高, 因此未在光刻机中得到广泛应用。

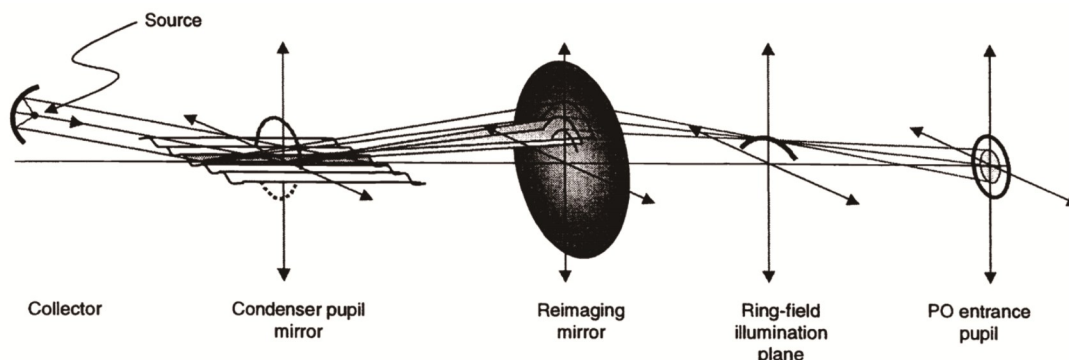


图 13 波纹板照明系统^[103]

Fig. 13 Layout of the ripple plate illumination system^[103]

2) 双排复眼

目前, EUV 光刻照明系统采纳双排复眼作为匀光元件。双排复眼第一排称为视场复眼, 与掩模面共轭, 第二排称为光阑复眼, 与照明光瞳面共轭。来自光源的光经过视场复眼后, 形成多个子光束, 每一个子光束在光阑复眼附近形成一个二次光源。二次光源经过中继镜组后, 成像于照明系统出瞳面。同时, 视场复眼形成的子光束与对应的光阑复眼组成匀光通道, 各匀光通道的照明光通过中继镜组后, 叠加成像在掩模面上, 实现高均匀照明。

a) 双排复眼设计方法

双排复眼包括视场复眼和光阑复眼, 视场复眼和光阑复眼由视场复眼微反射镜和光阑复眼微反射镜组成。其中, 通常各视场复眼微反射镜等间距地紧密排布在圆形基板上, 形成视场复眼, 根据投影物镜物方视场形状不同, 视场复眼微反射镜的形状可以是矩形或弧形。光瞳面的栅格划分决定光阑复眼数量, 每一个光阑复眼微反射镜对应投影物镜入瞳上一个栅格, 通过光线追迹确定其位置。光阑复眼微反射镜的数量应多于视场复眼微反射镜的数量, 以实现无光能损失的照明模式变换。

2005 年, Antoni 等^[107]针对 EUV 光刻双排复眼照明系统提出了一套初始结构设计方法。首先, 根据设计经验确定双排复眼的位置和结构参数, 然后利用等光程原理分别完成两片中继镜的设计, 保证视场复眼和光阑复眼能分别准确地成像在掩模面和系统出瞳面上。

2013 年, 北京理工大学李艳秋、梅秋丽、刘菲^[108-109]提出一种照明系统初始结构的逆向设计方法。该方法

定量地确定了各元件参数之间的关系, 避免了元件反复调整, 有效地提高了系统设计效率。2015 年, 该团队提出了一套具有高能量利用率的、由 3 面反射镜构成的 EUV 光刻自由曲面照明系统新结构, 该系统由双排复眼和一片二次曲面中继镜组成, 并在保证照明均匀性的同时大幅度地提高系统能量利用率^[110]。

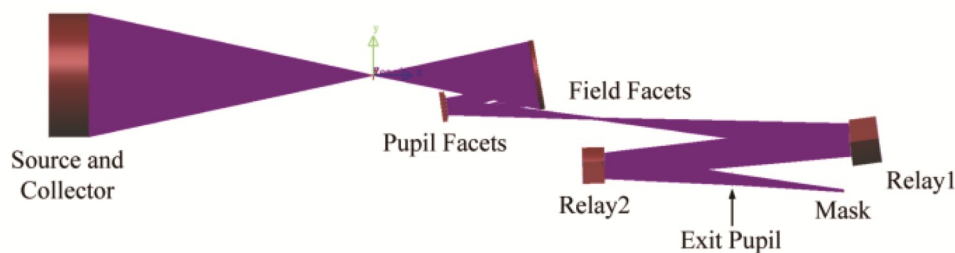
2021 年, 北京理工大学李艳秋、郝倩等^[100]提出了一种极紫外光刻照明系统视场复眼的自动排布设计方法。该方法建立了视场复眼临界间距计算模型, 通过该模型计算无碰撞的视场复眼, 有效地解决了调整相邻复眼微反射镜时, 产生的碰撞和光线遮蔽的问题, 使用该方法设计完成一套照明均匀性 99% 的匹配 NA 为 0.6 变倍率物镜系统的照明系统, 如图 14 所示。

b) 双排复眼匹配方法

双排复眼是 EUV 光刻照明系统的主要匀光元件, 同时也是其实现多种离轴照明模式的关键部件^[111-112]。由于每一个视场复眼微反射镜都可以与某种照明模式下参与照明的光阑复眼微反射镜相匹配, 而每一个光阑复眼微反射镜也都可以接受来自任一视场复眼微反射镜的照明光束。所以, 通过调整视场复眼微反射镜和光阑复眼微反射镜的对位匹配关系, 改变光阑复眼上的光强分布, 从而实现多种照明模式。

早期的极紫外光刻照明系统所需照明模式较为简单, 所以双排复眼的匹配对位关系调整问题并不突出。2008 年, Mann 等^[113]提出双排复眼对位关系应遵循“就近原则”, 即每一个视场复眼微反射镜应和距离其最近的光阑复眼微反射镜匹配, 以减小复眼微反射镜倾斜角, 有利于照明模式的调整变换。

2018 年, 北京理工大学李艳秋、姜家华等^[114]提出

图 14 匹配 NA 为 0.6 变倍率物镜系统的 EUV 照明系统^[100]Fig. 14 EUV illumination system matching the NA is 0.6 anamorphic objective^[100]

了一种双排复眼匹配对位关系自动优化方法,根据双排复眼微反射镜的倾斜引起掩模面照明光斑倾斜的特点,利用组合优化算法,求解出双排复眼的最佳对位匹配关系,以及此时复眼微反射镜的倾斜角。

3.2 中继镜组

中继镜组是照明系统的关键组成部分,用以保证科勒照明结构要求的两组共轭关系:即视场复眼和掩模面的共轭、光阑复眼和照明光瞳面的共轭。中继镜组一般位于双排复眼匀光单元之后、掩模面之前,匀光单元出射的各子光束经中继镜组叠加成成像到系统掩模面上。

2000年,Zeiss公司Antoni等^[99]提出了双排复眼照明系统的中继镜设计要求,并在双排复眼照明系统中,利用掠入射中继镜产生投影物镜要求的弧形视场,但未给出中继镜组的具体设计方法。

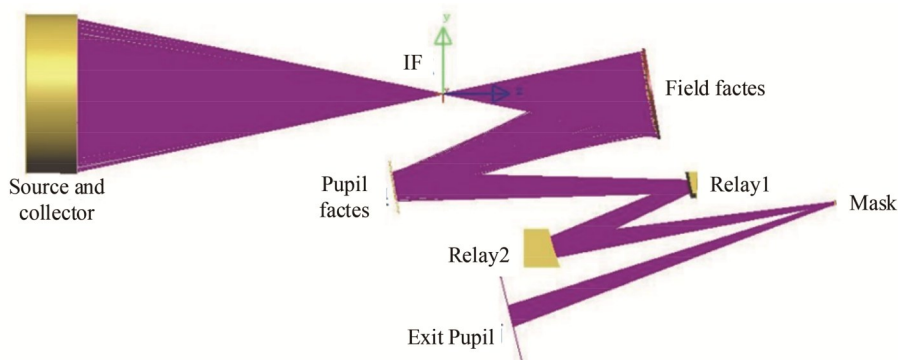
2005年,Antoni等^[107]提出一种基于二次曲面几何焦点等光程性质计算二次曲面中继镜面型及位置的方法。在正向光路中,该方法依据设计者的设计经验确定视场复眼和光阑复眼的位置以及结构参数,再根据

二次曲面等光程原理进行中继镜组的设计。

2008年,Mann等^[113]提出了一种结合轴向放大率计算中继镜组一阶参数的方法。该方法通过类比深紫外照明系统光路,给出了极紫外照明系统中继镜组对光瞳面和掩模面的放大倍率公式,并结合已知的照明系统设计参数求解中继镜组的一阶参数^[113]。

2016年,Schwab等^[94]给出了由八面反射镜构成的变倍率光刻投影物镜系统设计结果以及与之匹配的照明系统的部分设计参数。其照明系统采用双排复眼结构,两片掠入射中继镜为变形非球面,且曲率半径极大,近似平面镜。

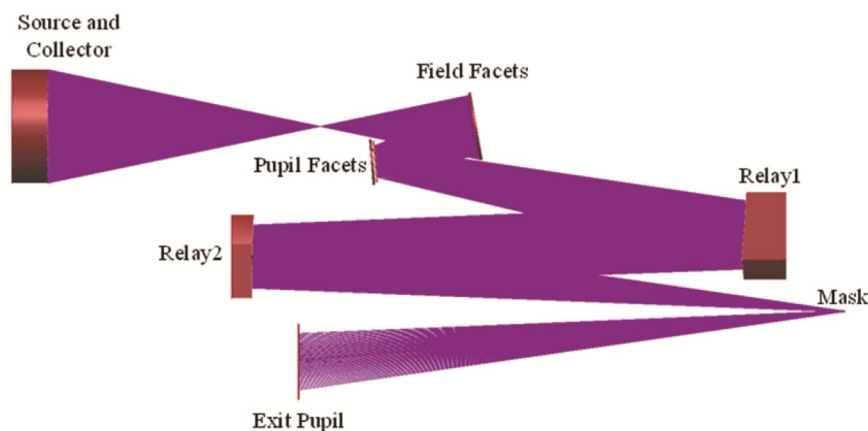
2017年,北京理工大学李艳秋、姜家华等^[115-116]以矩阵光学为基础,建立了一种 EUV 光刻照明系统中继镜组设计方法。该方法根据中继镜组的成像特性要求和其结构参数之间的关系,可以直接获得多种满足预定成像特性要求的中继镜组结构,有效提高照明系统的设计效率,该方法设计的 EUV 照明系统很好地匹配 NA 为 0.5 的变倍率物镜系统如图 15 所示。

图 15 匹配 NA 为 0.5 的变倍率物镜系统的 EUV 照明系统^[115]Fig. 15 EUV illumination system matching the NA is 0.5 anamorphic objective^[115]

2022年,北京理工大学李艳秋、闫旭等^[117]利用矩阵光学理论和方法,提出了一种自由曲面中继镜组设计极紫外光刻照明系统方法。该方法通过使用变倍率中继镜组,对外包络为圆形的二次光源进行不同倍率的放大,从而得到所需要的椭圆形光源,并使用该方法设计完成了一套结构更加合理、性能更好的、匹配 NA 为 0.55 的变倍率物镜系统的照明系统,如图 16 所示。

综上所述,国内外对于匀倍率和变倍率的 EUV 照

明系统设计均进行全面深入的研究。国外匀倍率极紫外光刻照明系统的设计、加工及制造技术已经成熟,并有成熟的 EUV 光刻照明产品用于 IC 制造中。国内对匀倍率 EUV 光刻照明系统的设计进行了大量研究。目前,在照明系统的优化设计方面已经达到国际先进水平。变倍率光刻照明系统的优化设计,国内外均处于深入研究阶段。其中,国外位于 Veldhoven 的高 NA 联合实验室,正在将其设计加工完成的照明系统和物

图 16 匹配 NA 为 0.55 的变倍率物镜系统的 EUV 照明系统^[117]Fig. 16 EUV illumination system matching the NA is 0.55 anamorphic objective^[117]

镜系统集成到 NA 为 0.55 的 EUV 光刻平台 EXE 系列中,并有望于 2023 年提供给用户使用。国内,北京理工大学对 NA 为 0.33 和 NA 为 0.55 的 EUV 曝光系统的光学设计,进行长期深入的研究,设计方法和设计效果可比肩国际已披露的同类设计。

4 极紫外光刻机曝光系统设计的关联技术

高性能极紫外光刻机曝光系统的设计研制,不可避免地涉及加工、制造、应用方面的约束,例如极紫外曝光系统的公差分析以及热像差分析,介绍 EUV 光刻投影物镜系统的公差分析、物镜系统的变形及其对成像性能的影响研究。

4.1 EUV 光刻投影物镜系统公差分析

EUV 光刻投影物镜系统的设计和制造中,需要严格控制各项制造公差。公差分析的结果可作为物镜可制造性的评价依据,也能约束加工、装调,实现高性能光刻投影物镜系统的研制和集成。但公开的公差分析方法和加工、装调工艺数据报道有限。

2010 年,北京理工大学常军等实现了全视场畸变小于 0.25% 的由四面反射镜构成的光刻投影物镜系统设计,并进行了公差分析,其结果表明,在 5000 lp/mm 时,在累积概率 80% 和 50% 的情况下,MTF 值分别高于 0.35 和 0.55,证明了其结构参数具有一定的可制造性潜力^[64]。

2015 年,北京理工大学李艳秋团队曹振等^[118]提出了基于蒙特卡罗法的补偿器定位精度分析方法。通过该方法对 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜进行补偿器选择和制造公差分析,分析结果表明:各视场点波像差均方根值在 97.7% 的置信概率下小于 1 nm。同年,该团队孙圆圆等^[119]提出了高 NA 极紫外光刻物镜的公差分析的奇异值分解法。该方法针对 NA 为 0.5 的 EUV 光刻投影物镜,进行补偿器选择和制造公差分析,结果表明在 97.7% 的置信概率下物镜系统的波像

差 RMS 值小于 0.5 nm。2022 年,该团队马悦等^[120]提出了一种全视场自适应公差分析方法。通过该方法针对 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜,进行了补偿器的选择和制造公差分析,结果表明物镜系统波像差在置信概率为 97.7% 时,RMS 值小于 0.6 nm。

4.2 EUV 光刻投影物镜系统变形及其对成像性能的影响研究

EUV 光经过投影物镜系统后,将有 35% 的光能量被吸收。因此该情况会引起 EUV 光刻投影物镜热变形,进一步导致 EUV 光刻系统成像性能下降。

1) 热像差对 EUV 光刻性能影响分析

1998 年, Ray-Chaudhuri 等^[121]利用有限元分析方法,分析了由四面反射镜构成的 EUV 光刻投影物镜热变形引起的波像差和离焦。结果表明:在 EUV 产率为 20 wafer/h,光刻投影物镜系统的热变形引起的波像差 RMS 值增加 0.09 nm、离焦量变化 140 nm,可以满足 100 nm IC 制造要求。

2002 年 6 月,李艳秋在美国三束会议邀请报告中,公布了 EUV 光刻投影物镜热变形分析及其对成像性能的影响的研究。2003 年 2 月,李艳秋对其设计的 NA 为 0.25 的由六面反射镜构成的非球面共轴 EUV 光刻物镜,进行热变形分析及其热变形对成像性能影响进行详细、系统研究^[66,122]。研究结果表明:在 EUV 产率为 80 wafer/h、部分相干照明下,由六面反射镜构成的投影物镜系统的热变形引起的线宽变化为 0.39 nm、波像差 RMS 值增加 0.7 nm,最大畸变为 8.51 nm。其结果表明热变形对系统的成像性能产生了显著的影响。

2007 年,刘克、李艳秋等^[123]在 32 nm 技术节点、NA 为 0.25 的 EUV 光刻投影物镜、100 wafer/h 的产率下,进行了 EUV 物镜动态热变形分析,及其对成像性能影响研究。研究结果表明,M5 反射镜最高升温为 8.48 °C,最大热变形量 RMS 为 2.55 nm。反射镜的热变形导致了 52 nm 的焦面移动、0.32 nm 的波像差和

1 nm 的畸变。可见,反射镜热变形引起的波像差进一步增大。

2012—2016 年,北京理工大学李艳秋团队杨光华、刘岩^[124-126]在 125 wafer/h 产率条件下,对面向 22 nm 及更低技术节点的光刻物镜的热变形及其影响进行了分析补偿。研究表明,反射镜最高升温为 9.77 °C,最大热变形量 RMS 为 4.83 nm。反射镜的热变形导致了 96 nm 的焦面移动、0.39 nm 的波像差 RMS 和 6.96 nm 的畸变。文中研究了热变形的补偿技术,补偿热变形后的物镜波像差小于 0.69 nm、畸变小于 5.43 nm。

2) EUV 光刻物镜系统热像差影响补偿及控制方法

随着技术节点不断提升,反射镜变形对成像性能的相对影响也就越来越大,因此需要对 EUV 光刻物镜热像差效应进行有效控制。

Zeiss, Nikon 等公司公布了多种反射镜热变形的控制方法^[127-129]。这些方法在反射镜基底加入冷却通道,通过冷却气体或液体的循环流动来降低反射镜的热量,从而控制反射镜通光表面的温度分布。

2013 年荷兰代尔夫特大学的 Saathof 等^[130-132]提出了一种自适应主动镜装置。该装置通过热辐射激励器来控制变形镜的面形进而补偿附加像差,避免了与变形镜的直接接触,确保了物镜系统的机械稳定性。

2015 年 Habets 等^[133-134]提出了压电陶瓷激励的变形镜、反射镜刚体位移和工件台的刚体位移协同调整方案。仿真结果可知,通过该方案可以校正约 93% 的热像差。

2016 年北京理工大学李艳秋、刘岩等^[135]提出了离球量预修正法对反射镜热、重力变形引起的附加像差进行控制。该方法依据有限元分析和光学仿真预测的附加像差,对各自由曲面离球量进行重新设计和修改,引入与附加像差类型相同,大小相等,符号相反的补偿像差,现在在光学设计阶段对附加像差的预控制,使物镜系统在实际应用中维持高成像性能,进一步降低反射镜附加像差的控制难度和系统的复杂度。

5 结 论

介绍了极紫外光刻机曝光光学系统光学设计与进展。从 20 世纪 80 年代 H. Kinoshita 首次公布了 EUV 光刻曝光结果开始, EUV 光刻机曝光光学系统的发展依次经历了 NA 小于 0.25 的实验型 EUV 光刻系统、NA 为 0.33 的 EUV 光刻系统以及 NA 为 0.55 的变倍率 EUV 光刻系统。国内外对 EUV 光刻机的物镜系统和照明系统的设计方法均进行深入的研究。近年,国外已经具备 EUV 光刻机物镜系统和照明系统的设计、加工、检测及制造能力, NA 为 0.33 的 EUV 光刻机已用于 7~3 nm 技术节点的 IC 制造,且正在研制 NA 为 0.55 的变倍率 EUV 光刻物镜系统和照明系统。

国内相关研究聚焦在物镜系统和照明系统的设计、公差分析、曝光系统热变形分析及其控制研究,北京理工大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所长期从事高性能 EUV 光刻物镜及照明系统的设计研究,设计方法及设计效果与国际披露的同类设计处于相似水平,这为我国 EUV 光刻机的研制奠定了良好的基础、培养输送了大量的人才。

参 考 文 献

- [1] Suzuki K, Smith B W. *Micro lithography: science and technology* [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [2] Graeupner P, Kuerz P, Stammler T, et al. EUV optics: status, outlook and future[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12051: 1205102.
- [3] The International Roadmap for Devices and Systems 2022[EB/OL]. [2023-04-30] <https://irds.ieee.org/>.
- [4] Raley A, Huli L, Grzeskowiak S, et al. Outlook for high-NA EUV patterning: a holistic patterning approach to address upcoming challenges[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12056: 120560A.
- [5] Migura S, Kneer B, Neumann J T, et al. Anamorphic high-NA EUV lithography optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9661: 96610T.
- [6] Born M. *Principles of optics*[M]. Oxford: Pergamum Press, 1980.
- [7] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922031.
Chen B Q. Lithography technology during the past six decades [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922031.
- [8] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922006.
Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922006.
- [9] Nicolosi P, Patelli A, Pelizzo M G, et al. First realization and characterization of multilayer EUV reflective coatings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4506: 76-83.
- [10] Kinoshita H, Kaneko T, Takei H, et al. Study on X-ray reduction projection lithography[J]. *The Japanese Society of Applied Physics*, 1986: 28p-ZF-15.
- [11] Kinoshita H. Soft X-ray reduction lithography using multilayer mirrors[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1989, 7(6): 1648.
- [12] Kurihara K, Kinoshita H, Mizota T, et al. Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1991, 9(6): 3192-3189.
- [13] Goldsmith J E M, Barr P K, Berger K W, et al. Recent advances in the Sandia EUV 10x microstepper[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3331: 11-19.
- [14] Kinoshita H, Watanabe T, Li Y, et al. Recent advances of 3-aspherical mirror system for EUVL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3997: 70-75.
- [15] Li Y Q, Watanabe T, Kinoshita H, Design of EUVL camera with large numerical aperture[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3997: 759-764.
- [16] Li Y Q, Kinoshita H, Watanabe T, et al. Illumination system design for a three-aspherical-mirror projection camera for extreme-ultraviolet lithography[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(19): 3253-3260.
- [17] Kinoshita H. *Extreme ultraviolet lithography*[M]. Singapore: WORLD SCIENTIFIC, 2008: 235-284.
- [18] Sweeney D W, Hudyma R M, Chapman H N, et al. EUV

- optical design for a 100-nm CD imaging system[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3331: 2-10.
- [19] Tichenor D A, Ray-Chaudhuri A K, Replogle W C, et al. System integration and performance of the EUV engineering test stand[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4343: 19-37.
- [20] Tichenor D A, Chaudhuri A K, Lee S H, et al. Initial results from the EUV engineering test stand[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4506: 9-18.
- [21] Naulleau P P, Goldberg K A, Anderson E H, et al. Static EUV micro-exposures using the ETS Set-2 optics[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 36-46.
- [22] Soufli R, Hudyma R M, Spiller E, et al. Sub-diffraction-limited multilayer coatings for the 0.3 numerical aperture micro-exposure tool for extreme ultraviolet lithography[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3736-3746.
- [23] Goldberg K A, Naulleau P P, Denham P E, et al. At-wavelength alignment and testing of the 0.3 NA MET optic[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(6): 2956-2961.
- [24] Meiling H, Meijer H, Banine V, et al. First performance results of the ASML alpha demo tool[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6151: 615108.
- [25] Miura T, Murakami K, Suzuki K, et al. Nikon EUVL development progress summary[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6151: 615105.
- [26] Miura T, Murakami K, Suzuki K, et al. Nikon EUVL development progress update[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7636: 76361G.
- [27] Pirati A, Peeters R, Smith D, et al. Performance overview and outlook of EUV lithography systems[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94221P.
- [28] Kerkhof M, Jasper H, Es R V, et al. Enabling sub-10 nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10143: 101430D.
- [29] ASML. EUV lithography systems[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>.
- [30] Smeets C, Salmaso G, Carbone J, et al. 0.33 NA EUV systems for high-volume manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12051: 1205103.
- [31] Lowisch M, Kuerz H, Mann H J, et al. Optics for EUV production[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7636: 763603.
- [32] Neumann J T, Gräupner P, Kaiser W, et al. Mask effects for high-NA EUV: impact of NA, chief-ray-angle, and reduction ratio[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 867915.
- [33] Neumann J T, Rösch M, Gräupner P, et al. Imaging performance of EUV lithography optics configuration for sub-9nm resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94221H.
- [34] van Ingen Schenau K, Bottiglieri G, van Schoot J, et al. Imaging performance of the EUV high NA anamorphic system [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9661: 96610S.
- [35] van Schoot J, van Ingen Schenau K, Valentin C, et al. EUV lithography scanner for sub-8nm resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94221F.
- [36] 金春水. 极紫外投影光刻中若干关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- Jin C S. Research on some key technologies in extreme ultraviolet projection lithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [37] 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 02 专项“极紫外光刻关键技术研究”项目顺利完成验收前现场测试[EB/OL]. (2016-11-30) [2023-02-01]. http://www.ciomp.cas.cn/xwdt/zhxw/201611/t20161130_4713258.html 2017.
- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. The 02 special project "Research on Key Technologies of Ultraviolet Lithography" has successfully completed on-site testing before acceptance[EB/OL]. (2016-11-30) [2023-02-01]. http://www.ciomp.cas.cn/xwdt/zhxw/201611/t20161130_4713258.html 2017.
- [38] Komatsuda H. Imaging optical system and exposure apparatus: US6781671B2[P]. 2004-08-24.
- [39] Hudyma R, Mann H J, Dinger U. Projection system for EUV lithography: US6985210 B2[P]. 2006-01-10.
- [40] Hudyma R, Mann H J, Dinger U. Projection system for EUV lithography: U7251592 B2[P]. 2006-12-09.
- [41] Hudyma R. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography: US6033079[P]. 2000-03-07.
- [42] Takahashi T. Catoptric reduction projection optical system and projection exposure apparatus and method using same: US6172825B1[P]. 2001-01-09.
- [43] Braat J M. Mirror projection system for a scanning lithographic projection apparatus, and lithographic apparatus comprising such a system: US6396067B1[P]. 2002-05-28.
- [44] Braat J M. Mirror projector system for a scanning lithographic projection apparatus, and lithographic apparatus comprising such a system: US 6299318B1[P]. 2001-09-09.
- [45] Mann H J, Ulrich W, Seitz G. 8 Mirror microlithography projection objective: US 6710917 B2[P]. 2004-03-23.
- [46] Hudyma R, ShaferDavid R. High numerical apertures ring field projection system for extreme ultraviolet lithography: US6188513B1[P]. 2001-12-13.
- [47] Mann H J, Ulrich W, Hudyma R M. Reflective projection lens for EUV photolithography: US6927901B2[P]. 2005-08-09.
- [48] Takahashi T. Projection optical system and exposure apparatus equipped with the projection optical system: US2004/0125353A1[P]. 2004-07-01.
- [49] Suzuki M. Projection optical system, exposure apparatus, and device manufacturing method: US 6995829B2[P]. 2006-02-07.
- [50] Williamson D M. High numerical aperture ring field optica reduction system: US5815310[P]. 1998-09-29.
- [51] Zellner J, Dodoc A, Pretorius M. Imaging optics and projection exposure installation for microlithography with an imaging optics of this type: US2012/0069314 A1[P]. 2012-03-22.
- [52] Zellner J, Mann H J, Endres M. Projection objective for microlithography: US2011/0026003A1[P]. 2011-02-03.
- [53] Shafer D R. Projection lithography system and method using all-reflective optical elements: US5686728[P]. 1997-11-11.
- [54] Takahashi T. Reflection-type projection optical systems, and exposure apparatus comprising same: US 7470033B2[P]. 2008-10-30.
- [55] Takahashi T. Projection optical system and exposure apparatus with the same: US7692767B2[P]. 2010-04-06.
- [56] Mann H, Shafer D, and Ulrich W. Catoptric objective and systems using catoptric objectives: US7682031B2 [P]. 2010-03-23.
- [57] Takahashi T. Projection optical system, exposure apparatus, and device manufacturing method: US 7283206B2 [P]. 2000-10-16.
- [58] Mann H J, Ulrich W, Pretorius M. Catoptric objectives and systems using catoptric objectives: US 8169694 B2 [P]. 2002-05-01.
- [59] Mann H J, Ulrich W, Loopstra E. Imaging optical system and projection exposure installation for microlithography with an imaging optical system of this type: US2012/0069312A1[P]. 2012-03-22.
- [60] Mann H J. Imaging optical system: US8018650B2 [P]. 2011-09-13.
- [61] Wang C, Shealy D L. Differential equation design of finite-conjugate reflective systems[J]. Applied Optics, 1993, 32(7): 1179-1118.
- [62] Wang C. A differential equation design method for finite-conjugate, multi-mirror imaging systems[D]. Tuscaloosa: The University of Alabama at Birmingham, 1992.
- [63] Lerner S A, Sasian J M, Descour M R. Design approach and

- comparison of projection cameras for EUV lithography[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(3): 792-802.
- [64] Chang J, Zou M F, Wang R R, et al. All-reflective optical system design for extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(11): 1082-1084.
- [65] Zou M F, Chang J, Talha M M, et al. Design and analysis of the four-mirror optical system[J]. *Optik*, 2010, 121(20): 1900-1903.
- [66] Li Y Q, Ota K, Murakami K. Thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2003, 21(1): 127-129.
- [67] 李艳秋. 50 nm 分辨率极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(7): 865-868.
Li Y Q. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 865-868.
- [68] Bal M F. Next-generation extreme ultraviolet lithographic projection systems[D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2003.
- [69] Ball M F, Bociort F, Braat J J M. The effect of obstructions on the design of reflective ring-field projection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4506: 25-31.
- [70] 杨雄, 邢廷文. 极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2520-2523.
Yang X, Xing T W. Design of extreme ultraviolet lithographic objectives[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2520-2523.
- [71] Marinescu O, Bociort F. The network structure of the merit function space of EUV mirror systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5874: 587402.
- [72] Marinescu O, Bociort F. Designing lithographic objectives by constructing saddle points[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 63420L.
- [73] Marinescu O, Bociort F. Saddle-point construction in the design of lithographic objectives, part 2: application[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(9): 093003.
- [74] Liu F, Li Y Q. Grouping design of eight-mirror projection objective for high-numerical aperture EUV lithography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29): 7137-7144.
- [75] Liu F, Li Y Q. Design of multi-mirror optics for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Optical Review*, 2013, 20(2): 120-126.
- [76] 刘菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222003.
Liu F, Li Y Q. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222033.
- [77] Li Y Q, Liu F. Design method of extreme ultraviolet lithography projection objective: US20140368805[P]. 2014-12-18.
- [78] Cao Z, Li Y Q, Liu F. Grouping design method with real ray tracing model for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(12): 125102.
- [79] 曹振, 李艳秋, 刘菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0822005.
Cao Z, Li Y Q, Liu F. Manufacturable design of 16-22 nm extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0922005.
- [80] Mann H J, Hudyma R. Projection system for EUV lithography: WO 02/056114A2[P]. 2002-01-04.
- [81] Hudyma R, Mann H J, Dinger U. Projection system for EUV lithography: USRE42118[P]. 2011-02-08.
- [82] Hudyma R. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography: US006033079A[P]. 2000-03-07.
- [83] 李艳秋, 曹振, 刘菲. 一种极紫外光刻物镜: CN 102608737 A [P]. 2012-07-25.
- Li Y Q, Cao Z, Liu F. An extreme ultraviolet lithographic objective: CN 102608737A[P]. 2012-07-25.
- [84] 王君. 极紫外光刻物镜系统光学设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015: 109-112.
Wang J. Optical design of extreme ultra-violet lithography (EUVL) objective system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 109-112.
- [85] Hsiao L J, Lin H Y. Extreme ultra violet lithographic optical projection system design method using Code V lens module and generalized Gaussian constants[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10450: 1045021.
- [86] Hsiao L J, Lin H Y. Reflective EUVL tool design with generalized Gaussian constant mathematics[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5884-5892.
- [87] Wu Y E, Wang L P, Yu J E, et al. Design method for off-axis aspheric reflective optical system with extremely low aberration and large field of view[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(32): 10185-10193.
- [88] Yan X, Li Y Q, Li Y H, et al. Design of an extreme ultraviolet lithography projection objective with a grouping design method through forward and reverse real ray tracing[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(25): 7449-7454.
- [89] Tan W, Ji H R, Mo Y, et al. Automatic design of an extreme ultraviolet lithography objective system based on the Seidel aberration theory[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(29): 8633.
- [90] Liu Y, Li Y Q, Cao Z. Design of anamorphic magnification high-numerical aperture objective for extreme ultraviolet lithography by curvatures combination method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4917-4923.
- [91] Yan X, Li Y Q, Liu L H, et al. Grouping design method dependence on an illumination system and large off-axis distance for an anamorphic extreme ultraviolet lithography objective[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): 806811.
- [92] Wu Y E, Wang L P, Zhang X, et al. Design method for an off-axis reflective anamorphic optical system with aberration balance and constraint control[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4557.
- [93] Mann H J. Imaging optical system: US 2012/034995[P]. 2012-03-22.
- [94] Markus S, Ralf M. Optical subsystem for projection lithography and illumination optical unit for projection lithography: WO2016/078818A1[P]. 2016-05-26.
- [95] Ruoff. Imaging optics for projection lithography, has mirror of imaging optics that are accommodated in space-cuboid, and has extension in direction of object field coordinates: DE 102019202759A1[P]. 2019-04-18.
- [96] Liu M, Li Y Q. Anamorphic objective design for extreme ultraviolet lithography at the 5~1 nm technology node[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(24): 7254-7258.
- [97] Sommargren G E, Seppala L G. Condenser optics, partial coherence, and imaging for soft-x-ray projection lithography[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(34): 6938-6944.
- [98] Haga T, Kinoshita H. Illumination system for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1995, 13(6): 2914-2918.
- [99] Antoni M, Singer W, Schultz J, et al. Illumination optics design for EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4146: 25-34.
- [100] Hao Q, Yan X, Liu K, et al. Design of an illumination system for high numerical aperture anamorphic extreme ultraviolet projection lithography[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10982-10996.
- [101] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 28-42.
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on

- laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [102] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922002.
- Lin N, Yang W H, Chen Y Y, et al. Research progress and development trend of extreme ultraviolet lithography source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922002.
- [103] Chapman H N, Nugent K A. Novel condenser for EUV lithography ring-field projection optics[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3767: 225-236.
- [104] Tsuji T. Illumination optical system and exposure apparatus: US20050057737[P]. 2005-03-17.
- [105] Tsuji T. Illumination optical system and exposure apparatus: US20050057738[P]. 2005-03-17.
- [106] Kajiyama K, Tsuji T. Illumination optical system and exposure apparatus including the same: US7538856[P]. 2009-05-26.
- [107] Antoni M, Escudero-Sanz I, Singer W, et al. Multi mirror system for an illumination system: US6840640[P]. 2005-01-11.
- [108] Mei Q L, Li Y Q, Liu F. A reverse design method for EUV lithography illumination system[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 867923.
- [109] 刘菲. 共轴极紫外投影光刻物镜设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- Fei L. Design of coaxial extreme ultraviolet lithography projection objection [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [110] Mei Q L, Li Y Q. Design of three-mirror illumination system with free-form fly's eye for extreme ultraviolet lithography[J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2091-2097.
- [111] Singer W. Illumination system with variable adjustment of the illumination: US20020136351[P]. 2002-09-26.
- [112] Fischer T. Illumination optical unit for EUV projection lithography: US9411239[P]. 2016-08-09.
- [113] Mann H J, Singer W, Schultz J, et al. Illumination system particularly for microlithography: US7456408[P]. 2008-11-25.
- [114] Jiang J H, Li Y Q, Shen S H, et al. Design of a high-numerical-aperture extreme ultraviolet lithography illumination system[J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5673-5679.
- [115] 姜家华. 11 nm 以下技术节点极紫外光刻照明系统设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- Jiang J H. Design of extreme ultraviolet lithography illumination system for sub-11nm node[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [116] 郝倩. 高 NA 组合变倍率极紫外光刻照明系统设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.
- Hao Q. Design of a high-numerical-aperture anamorphic illumination system for extreme ultraviolet lithography[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [117] 李艳秋, 闫旭, 刘丽辉, 等. 变倍率极紫外光刻投影曝光光学系统: CN114253089A[P]. 2023-02-17.
- Li Y, Yan X, Liu L, et al. Variable-magnification extreme ultraviolet lithography projection exposure optical system: CN114253089A[P]. 2023-02-17.
- [118] 曹振, 李艳秋, 孙圆圆. 极紫外光刻物镜补偿器的选择及定位精度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1211003.
- Cao Z, Li Y Q, Sun Y Y. Compensator selection and accuracy analysis for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1211003.
- [119] 孙圆圆, 李艳秋, 曹振. 超大数值孔径极紫外光刻物镜的公差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122207.
- Sun Y Y, Li Y Q, Cao Z. Tolerance analysis of high-numerical aperture extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122207.
- [120] Ma Y, Zhong X N, Yan X, et al. Full field adaptive tolerance analysis of extreme ultraviolet lithography objective[C]//2022 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS), October 21-22, 2022, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2022.
- [121] Ray-Chaudhuri A K, Gianoulakis S E, Spence P A, et al. Impact of thermal and structural effects on EUV lithographic performance[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3331: 124-132.
- [122] Griff R. Lithography review important developments in microlithography[J]. SEMI Newsletter Service, 2002, 4(10): 1-8.
- [123] Liu K, Li Y Q, Zhang F C, et al. Transient thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(10A): 6568-6572.
- [124] 杨光华, 李艳秋. 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322005.
- Yang G H, Li Y Q. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322005.
- [125] Yang G H, Li Y Q. Analysis and control of thermal and structural deformation of projection optics for 22-nm EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8322: 83222V.
- [126] Liu Y, Li Y Q. Aspherical surfaces design for extreme ultraviolet lithographic objective with correction of thermal aberration[J]. Optical Engineering 2016, 55(9): 095108.
- [127] Phillips A H, Coon D, Watson D C. Liquid cooled mirror for use in extreme ultraviolet lithography: US7591561 B2[P]. 2009-09-22.
- [128] Kierey H, Le Maire M, Anderl W, et al. Reflective optical element for use in an EUV system: US8342701 B2 [P]. 2013-01-01.
- [129] Kino Y. Cooling apparatus, optical element having the same, and exposure apparatus: US7292307 B2[P]. 2007-11-06.
- [130] Saathof R. Adaptive optics to counteract thermal aberrations[D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2013.
- [131] Saathof R, Schutten G J M, Spronck J W, et al. Actuation profiles to form Zernike shapes with a thermal active mirror[J]. Optics Letters, 2015, 40(2): 205-208.
- [132] Saathof R, Schutten G J M, Spronck J W, et al. Design and characterisation of an active mirror for EUV-lithography[J]. Precision Engineering, 2015, 41: 102-110.
- [133] Habets M, Merks R, Weiland S, et al. A multiphysics modeling approach for thermal aberration prediction and control in extreme ultraviolet lithography[C]//Imaging and Applied Optics 2015, June 7-11, 2015, Arlington, Virginia. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2015: AOM4B.2.
- [134] Habets M, Scholten J, Weiland S, et al. Multi-mirror adaptive optics for control of thermally induced aberrations in extreme ultraviolet lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9776: 97762D.
- [135] Liu Y, Li Y Q. Aspherical surfaces design for extreme ultraviolet lithographic objective with correction of thermal aberration[J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 095108.

Research and Progress on Optical Design of Exposure Systems in Extreme Ultraviolet Lithography

Li Yanqiu^{*}, Nan Yanbei, Chen Yuqing, Yan Xu, Zhang Xinyi, Liu Lihui^{**}

Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Significance Lithography technology is the key production technology supporting the integrated circuit (IC) manufacturing. With the continuously improved chip integration and performance, and the decreasing chip feature size, the extreme ultraviolet (EUV) lithography has replaced the deep ultraviolet lithography and become the most potential lithography technology to realize large-scale industrialization and commercial production.

The exposure system of the EUV lithography tool is composed of the EUV light source, illumination system, reflective mask, projection objective system, and synchronous workpiece platform. In this system, the light beam emerges from the light source, is shaped and homogenized by the illumination system, and then irradiates to the mask. After being reflected by the mask, the light is incident on the projection objective system, and finally on the wafer. As for the source, there is mainly discharge plasma source (DPP) and laser plasma source (LPP), which can meet the industrial exposure requirements on such aspects as energy and band. In recent years, the LPP source has gradually become the first choice for EUV lithography systems due to its high power and good stability. The illumination system concentrates on and shapes the light beam emitted by the light source to form a curved lighting field with high uniformity on the mask. The illumination system needs to match the light source size and the beam divergence angle and form highly uniform light spots on the arc-shaped field of the given size. In addition, the matching conditions of the corresponding pupil of the projector should be met. The function of the projection objective system is to image the graphics on the mask onto the silicon chip. The object surface of the projection objective is the mask, and the image surface is the silicon chip. The numerical aperture (NA) of the image space is determined by the exposure line resolution, and the magnification of the objective lens is determined by the exposure line size and the size of the mask pattern size, which is a strict integer multiple reduction ratio. Additionally, as most optical materials have strong absorption in EUV bands, the exposure system of EUV lithography tools is required to be a fully reflective system.

To continue the life of Moore's Law, continuously shorten the technical node, and ensure a certain yield, the exposure system of EUV lithography tools requires high NA and extremely high imaging quality. However, with the increasing NA on the image space of the projection objective, the "shadow effect" caused by the mask will be particularly significant. To this end, we propose an anamorphic EUV projector. In recent years, the NA0.33 EUV lithography tool has been put into production, and the next-generation NA0.55 anamorphic exposure system is under development. Relevant research institutions at home and abroad have invested a great deal of manpower and material resources in this field, and thus it is necessary to summarize the relevant work.

Progress We first introduce the exposure system development of EUV lithography tools. With the continuously advancing technical nodes of large-scale IC manufacturing technology, the structural performance of existing EUV lithography tools is not sound enough to support their further development. The next-generation anamorphic lithography technology is introduced and completely new optical design methods are needed. Then, the relevant design methods of the projection objective system, anamorphic projection objective system, and illumination system at home and abroad are introduced. Finally, the trend of EUV lithography exposure systems at home and abroad is discussed.

Conclusions and Prospects Exposure systems of EUV lithography have been widely applied in the latest technology node, but the research on large fields of view and high image quality systems is still insufficient. To develop EUV lithography in our country and pre-research on high NA anamorphic EUV lithography, it is necessary to engineer related EUV lithography tools, including the mirror film design, tolerance analysis of the projection system and illumination system, and the control device design of fly's eye array.

The high NA anamorphic projection objective system tends to have a large pupil aberration due to the demagnification

differences between the scanning direction and the vertical scanning direction. However, the illumination system and the objective lens system are connected through the pupil. According to the reverse design scheme of the illumination system, the entrance pupil of the objective lens is the starting point of the illumination system design, and thus the pupil plays an important role in the illumination system design. Therefore, to better design the illumination system and objective system, it can be considered to realize the collaborative design of the anamorphic projection objective system and illumination system by controlling the pupil aberration of the projection objective system.

Key words EUV lithography; lithography exposure system; projection system; illumination system; optical design