

16 nm 极紫外光刻物镜热变形对成像性能影响的研究

李艳秋^{1*}, 刘岩², 刘丽辉¹

¹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;

²北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076

摘要 16 nm 极紫外光刻(EUVL)物镜热变形是影响其高分辨成像的主要因素之一。为了给 EUVL 系统热管理提供可靠的技术依据,对数值孔径为 0.33 且满足 16 nm 技术节点的典型 EUVL 物镜进行热变形仿真研究。采用有限元软件 ANSYS 仿真曝光过程中反射镜的瞬态温度和变形分布。以 Zernike 多项式为接口拟合变形面,分析热变形对成像性能的影响。结果表明:物镜的最高温升和最大变形分别为 3.9 °C 和 10.2 nm,高温态物镜的热变形引起的最大波像差均方根和畸变分别为 0.1 λ 和 56 nm,超出了合理范围。M3 和 M4 反射镜热变形累加引起的波像差和畸变的占比分别为 88% 和 99%,对成像性能的影响起主导作用,需要对其进行严格控温。

关键词 光学设计; 热变形; 极紫外光刻; 有限元分析; 反射系统; 成像性能

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0122001

Effect of Thermal Deformation on Imaging Performance for 16 nm Extreme Ultraviolet Lithography Objective

Li Yanqiu^{1*}, Liu Yan², Liu Lihui¹

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China

Abstract Thermal deformation of 16 nm extreme ultraviolet lithography (EUVL) objective is one of the main factors influencing its high resolution imaging. In order to provide a reliable technical basis for the thermal management of EUVL system, we simulate the thermal deformation of a typical 16 nm EUVL objective with 0.33 numerical aperture. The finite element software ANSYS is used to simulate the transient temperature and thermal deformation of each mirror during exposure. The deformed mirror surface is fitted with Zernike polynomial as an interface tool to evaluate the effect of the thermal deformation on imaging performance. The results show that the maximum temperature rise and the maximum thermal deformation of the objective are 3.9 °C and 10.2 nm, respectively. The thermal deformation of the objective in the high temperature state causes maximum wavefront error root mean square (RMS) of 0.1 λ and the distortion of 56 nm, which are beyond the reasonable range. The wavefront error RMS and the distortion caused by the thermal deformation of M3 and M4 mirrors together account for 88% and 99%, which play leading roles in the imaging performance. The temperatures of these two mirrors should be controlled strictly.

Key words optical design; thermal deformation; extreme ultraviolet lithography; finite element analysis; catoptric system; imaging performance

OCIS codes 220.4840; 340.7480; 120.6810; 230.4040

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)技术支撑半导体制造实现 16 nm 及以下技术节点^[1-2]。目前,我国已掌握 22 nm EUVL 关键技术^[3-5],并已进入到 16 nm 技术节点的

工程化研究阶段^[6-8]。16 nm EUVL 需要成像性能接近衍射极限的高分辨投影物镜系统,然而,在光刻曝光过程中,反射元件因吸收光源辐射能量而导致的热变形会影响系统的成像性能,在工程化研究阶段必须对热变形进行定量分析。

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-08-23; 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001-002)

* E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn

早在 1998 年, Raychaudhuri 等^[9] 在产率为 20 wafer/h 的条件下, 对包含 4 片非球面反射镜且满足 100 nm 技术节点的 NA0.2 EUV 光刻物镜进行了热变形研究, 结果表明: 当加载一定时间的热能后, 反射镜的温度和热变形将趋于平衡状态; 反射镜的最高温升为 1.5 °C, 最大形变量为 1.8 nm, 仅引起了 0.09 nm 的波像差 (WFE), 不需要进行温控。2003 年, Li 等^[10] 在产率为 80 wafer/h 的条件下, 对含有 6 片非球面反射镜且满足 50 nm 技术节点的 NA0.3 EUV 光刻物镜进行了热变形研究, 结果表明: 反射镜的最高温升为 8.39 °C, 最大热变形量的均方根 (RMS) 为 1.98 nm, 引起了 0.3 nm 的波像差和 8 nm 的畸变, 超出了合理范围, 需要进行温控。2011 年, 杨光华等^[11] 在产率为 100 wafer/h 的条件下, 对含 6 片非球面反射镜且满足 22 nm 技术节点的 NA0.3 EUV 光刻物镜进行了热变形分析, 结果表明: 反射镜最高温升为 9.77 °C, 最大热变形量为 4.83 nm (RMS), 引起的附加波像差为 0.39 nm (RMS), 畸变为 6.96 nm, 热变形对成像性能的相对影响程度进一步加大, 需要进行严格温控。以上研究对于 100~22 nm EUVL 系统产业化具有重要的工程价值, 但存在以下两方面问题: 1) 前人均采用简化的运动学三点支撑结构模型进行仿真研究, 仿真结果的真实性、准确性存在偏差; 2) 未明确每个反射镜的热变形对系统像质影响的具体贡献量, 不能为系统的热管理提供充分依据。

目前, 16 nm EUVL 系统具备更高的数值孔径 (0.33)、更高的产率及光源功率 (125 wafer/h 和 250 W)^[12], 需要在全新的条件下, 更加准确、真实、全面地研究物镜热变形对成像性能的影响, 以支撑 16 nm EUVL 系统的工程化研制, 但目前尚未见相关研究报道。

本文以满足 16 nm 技术节点、数值孔径为 0.33 的 PPNPNP 型共轴六反 EUVL 物镜作为研究对象, 依据 125 wafer/h 的产率模型设定瞬态仿真条件来研究物镜的热变形及其对成像性能的影响。应用有限元分析软件 ANSYS 建立反射镜的实际支撑结构模型, 仿真计算不同时刻各反射镜及机械支撑结构的瞬态温度和变形分布。将镜面变形数据拟合成 Zernike 系数, 导入光学软件 CODE V 中分析其对系统成像性能的影响。在此基础上, 研究各反射镜变形对像质影响的贡献程度, 确定需要重点控温的反射镜。最后, 从几何光学角度分析了仿真现象产生的具体原因。

2 有限元仿真分析

2.1 EUVL 物镜选型

本研究参考荷兰 ASML 公司 NXE: 3350B EUV 光刻机中的经典投影物镜类型^[13], 选择倍缩比为 4:1、数值孔径为 0.33 的 PPNPNP 型共轴六反 EUVL 物镜作为研究对象 (PPNP 为反射镜光焦度空间排列顺序, P 为正光焦度, N 为负光焦度), 该物镜设计已公开发表^[14], 光路图如图 1(a) 所示。物镜系统包含 6 片非球面反射镜, 将靠近掩模的反射镜命名为 M1, 靠近硅片的反射镜命名为 M6。系统在全视场范围内具有低于 0.03λ (RMS) 的波像差和小于 1 nm 的畸变, 光学调制传递函数 (MTF) 几乎与衍射极限重合, 如图 1(b) 所示, 初始成像性能满足 16 nm 光刻技术节点的需求。

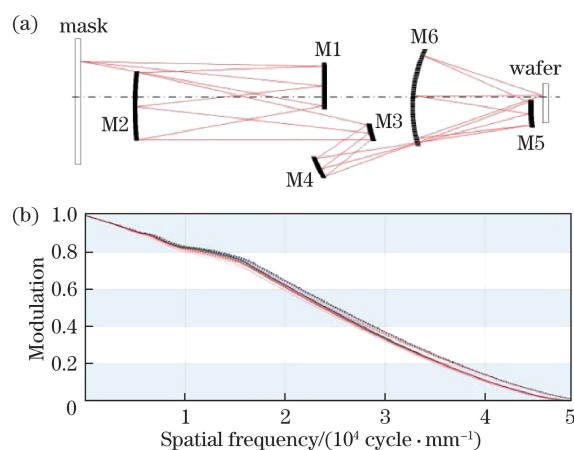


图 1 (a) EUVL 物镜光路图; (b) MTF
Fig. 1 (a) Layout of EUVL objective;
(b) modulation transfer function

2.2 反射镜有限元模型的建立

根据光学设计参数, 在有限元软件 ANSYS 中建立各反射镜的有限元模型, 图 2 给出了 M1 反射镜及支撑结构的有限元模型。从物镜系统的光路图

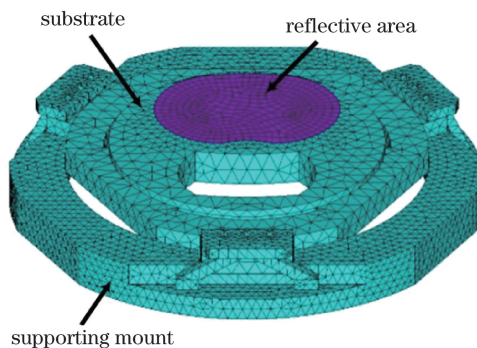


图 2 M1 反射镜的有限元模型
Fig. 2 Finite element model of M1 mirror

可以看出,每片反射镜都采用“挖孔”的结构形式来避免对曝光光路的遮拦。为减小反射镜的变形,反射镜的基底选用膨胀系数极小的低膨胀玻璃(ULE玻璃)^[15]。基底表面镀有40层厚度为276 nm的Mo/Si交替膜层,该膜层可对13.5 nm EUV波段光实现峰值约为74%的反射率^[16]。参考Zeiss公司

专利^[17]建立反射镜的实际支撑结构模型。机械支撑结构的材料选用殷钢,该钢又名因瓦合金(Invar),是一种镍质量分数为36%的铁基底合金,具有较低的热膨胀系数^[18],可以进一步提高支撑结构的稳定性。反射镜基底、膜层和支撑结构的材料属性如表1所示。

表1 反射镜及支撑结构材料的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of mirrors and supporting mount materials

Parameter	ULE	Si	Mo	Invar
Density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.205	2.33	10.3	8.12
Thermal conductivity /($\text{mW}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.31	148	138	1.09
Specific heat /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.766	0.712	0.255	-
Emissivity	0.735	0.122	0.122	0.28
Young's ratio /GPa	67.6	107	272	134
Poisson's ratio	0.17	0.25	0.25	0.3
Thermal expansion coefficient /(10^{-6} K^{-1})	0.02	2.50	5.35	1.06

划分网格时,支撑结构采用三维热结构单元solid70,该单元是一个具有导热能力的单元,有8个节点,每个节点只有一个温度自由度。为了更加精确地求解最受关注的反射镜热结构的变形情况,反射镜基底单元采用三维八节点实体单元solid70的更高次形式solid90单元,该单元由20个节点定义而成,每个节点有一个温度自由度。Mo/Si多层膜的总厚度在纳米量级,所以采用二维热结构单元shell132。表面效应单元采用surf152单元,该单元可用于各种变化载荷和表面效应,可以覆盖在任一3D热单元面上,用于3D热分析。反射镜的反射区域变形直接影响成像性能,属于关键求解区域,因此,细化反光区域的网格,以提高计算精度。支撑结构的安装面与反射镜的安装面之间设置接触单元,支撑结构底面各节点在x、y、z方向的位移全部被约束。

2.3 仿真条件

2.3.1 产率模型

依据ASML公司公开的125 wafer/h产率模型来设定仿真条件^[12],如表2所示。从表中可以看出,由于光刻机系统工作时需要不断地更换硅片进行曝光,光源能量以周期循环的方式加载到EUVL物镜的各反射镜反射区域内,如图3所示。

2.3.2 照明模式

16 nm技术节点EUVL系统需要具备更高的光刻分辨率,因此,采用内相干因子为0.5、外相干因子为0.8的离轴环形照明模式来代替传统的照明模式,以提高光刻胶表面上像的对比度,进而提高光刻

表2 16 nm产业化EUVL样机产率模型

Table 2 Model of 16 nm EUVL prototype productivity

Item	Value
Throughout /($\text{wafer}\cdot\text{h}^{-1}$)	125
EUV power of intensity focus /W	250
Total time for one wafer /s	28.8
Exposure time /s	7.2
Wafer exchange time /s	721.6
Wafer diameter /mm	300
Resist sensitivity /($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)	15
Power at wafer /mW	689

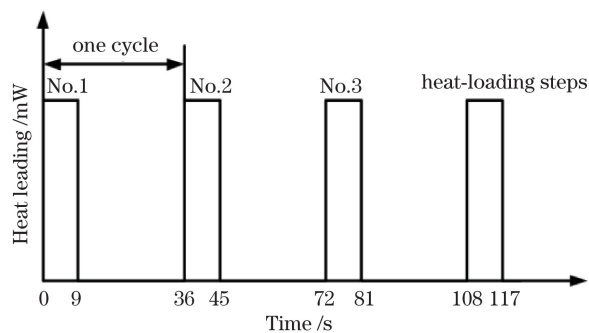


图3 反射镜热加载-时间图

Fig. 3 Heat loading steps-time plot of mirror

分辨率。照明系统的出瞳需与物镜的入瞳相匹配,直径为220 mm,相干因子环带宽度为33 mm,如图4(a)所示。采用双排复眼对照明光进行匀光,以提高照明的均匀性,经双排复眼匀光后,掩模面上照度分布的非均匀度仅为2.6%,如图4(b)所示。

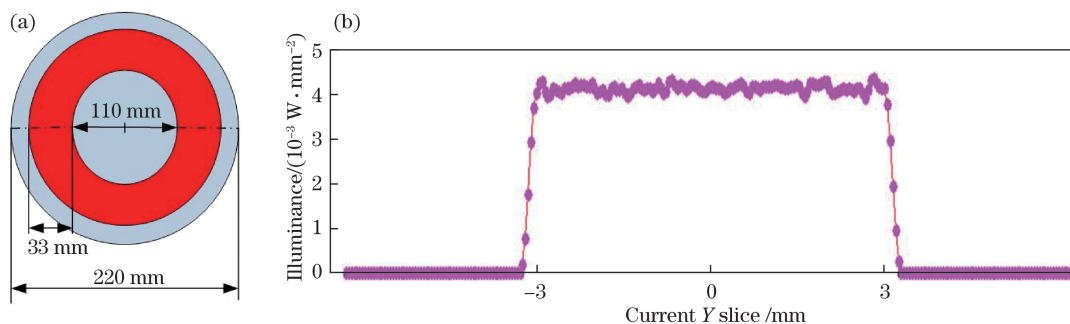


图 4 (a) 环形照明光瞳的光强分布; (b) 掩模面上的照度分布

Fig. 4 (a) Annular distribution of luminous intensity; (b) distribution of illuminance on mask

2.3.3 加载能量密度

由于 EUVL 物镜工作在真空腔内(初始温度为 20 °C),不存在气体对光能的吸收,因此,除反射的光能外,其余的光能均被反射镜吸收。吸收的能量决定于反射镜的反射率。Mo/Si 多层膜对 EUVL 光的反射率随入射角的变化而变化,如图 5 所示。

本研究选择的物镜对象在设计时已经充分考虑了膜层反射率与入射角的关系。为了提高能量利用率,对入射角及其带宽进行严格控制,以保证各反射镜对极紫外光的平均反射率约为 67.5%,如表 3 所示。根据 2.3.2 节的讨论,可以认为光能是近似均匀分布于反射区域,这样,用吸收的能量与反射区域面积相除,即可求得各反射镜反射区域加载的能量密度。

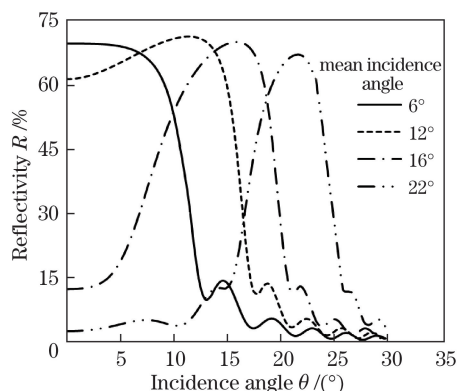


图 5 Mo/Si 多层膜反射率相对入射角的变化曲线

Fig. 5 Curve of reflectivity of Mo/Si multilayer relative to incidence angle

表 3 各反射镜吸收极紫外光能量密度相关计算数据

Table 3 Relevant calculating data of the absorbed EUV power density for each mirror

Mirror	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Mean incidence angle / (°)	6.3	6.6	22.4	11.5	12.4	4.7
Mean reflectivity / %	67.5	67.7	67.3	67.6	67.7	67.5
Absorbed EUV power / mW	2402.19	1609.03	1102.80	735.38	495.58	337.59
Reflective area / mm ²	17439	33338	4782	12508	5077.4	55102
Absorbed power density / (mW·mm ⁻²)	0.138	0.048	0.231	0.059	0.098	0.006

3 反射镜温度及热变形仿真分析

在有限元软件 ANSYS 中建立仿真模型,设定仿真条件后,即可开始对温度、变形进行仿真求解。本次仿真研究采用间接耦合分析方法,即先进行温度仿真,再将温度场加载到有限元模型进行热结构变形分析。这里以 M1 为例来展示反射镜温度及热变形的仿真结果,如图 6 所示。

图 6(a)给出了 M1 反射镜及支撑结构在最后仿真时刻(10 h)的温度及热变形分布图,可以看出:反射镜最高温度出现在反射镜的通光区域内,在远离通光孔径区域的边缘部分的温度较低,最高温升

为 3.1 °C,最低温升为 0.04 °C;支撑结构最高温度出现在与反射镜直接接触并接近通光孔径部分的位置,最高温升为 0.26 °C;最低温度出现在支撑结构边缘位置,最低温升几乎接近于 0 °C。图 6(b)给出了对应时刻,反射镜及支撑结构整体的热变形分布图,可见:最大变形量出现在反射镜的边缘位置,为 10.2 nm;支撑结构的最大变形出现在安装座的上方,为 6.6 nm。

以上是在光刻曝光过程中反射镜在某一时刻的瞬态温度及变形分布,反射镜的温度分布及热变形是随时间变化的,图 7 给出了反射镜中心节点温度及反射区域内变形量的 RMS 值随时间的变化曲线,

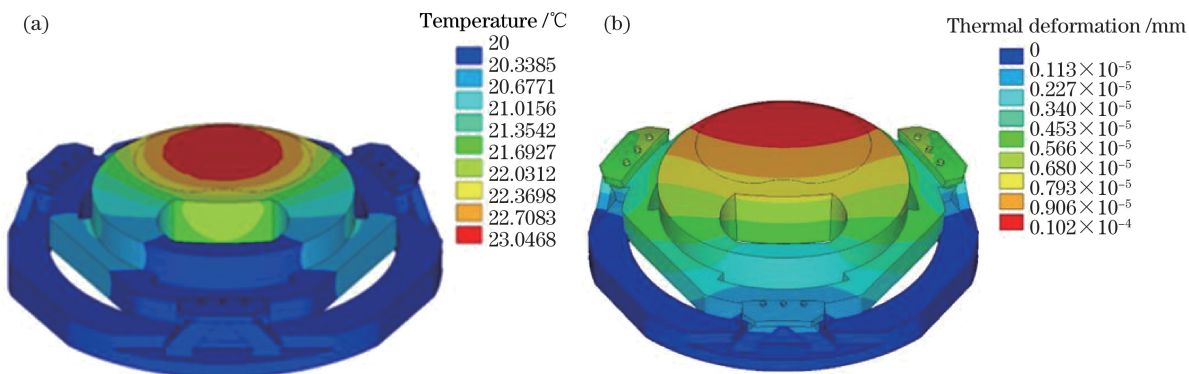


图 6 M1 反射镜最后仿真时刻的(a)温度分布图和(b)热变形分布图

Fig. 6 (a) Temperature and (b) thermal deformation maps of M1 mirror at the end of last-heat-loading step

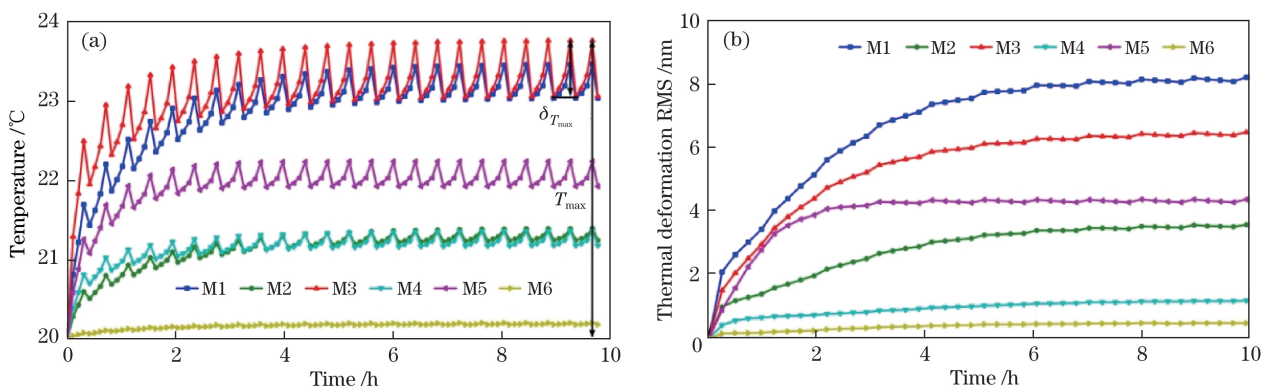


图 7 各反射镜的(a)温度和(b)热变形 RMS 随时间的变化曲线

Fig. 7 Curves of (a) temperature and (b) thermal deformation RMS value of each mirror relative to time

可以看出:在一个热加载周期内,前 7.2 s 为曝光时间,反射镜主要吸收能量,温度升高;之后的 21.6 s 为换片、对准时间,反射镜主要向外辐射能量,温度降低。在系统工作前期,反射镜的温度呈周期振荡增加的趋势,超过某一时刻后,当一个热加载周期内反射镜吸收的能量等于向外辐射的能量时,反射镜的温度就会呈周期性变化,每个周期内的温度变化完全相同,这个时刻的状态称为热平衡态。由于吸收热量及外形体积的差异,各反射镜达到热平衡态的时间不同,M1~M6 达到热平衡态分别经历了 4.2,2.3,2.8,1.9,1.8,1.5 h。对于光刻系统来说,需要预热至热平衡态后才能开始工作^[9]。

对于处于热平衡态的反射镜来说,在一个热加载周期内温度最高的时刻为高温态,温度最低的时刻为低温态。高温态 M3 反射镜具有最高的温升 (T_{max}) 和最大的温度振幅 (δT_{max}),分别为 3.91 °C 和 0.71 °C。反射镜反射区域热变形 RMS 的变化规律与温度的变化规律一致,高温态下的热变形最大,低温态下的热变形最小。在 6 片反射镜中,高温态的 M1 反射镜具有最大的 RMS 变形及振幅,分别为

8.25 nm 和 0.13 nm。

4 物镜热变形对系统成像性能的影响

初始态物镜系统可以实现 16 nm 光刻分辨率的光刻胶成像。实验采用离轴环形物方视场(宽度为 6 mm,弦长为 104 mm),如图 8 所示。将各反射镜高、低温态下的热变形数据拟合的 Zernike 系数编写成 int 文件,导入 CODE V 中进行像质分析。由于光学系统绕光轴旋转对称,故仅在子午面 (yz) 内取 (0,136), (0,137), ..., (0,142) 共 7 个物方视场点来分析反射镜变形对其成像性能的影响。以波像差 RMS 和畸变两项指标来评价成像性能。

图 9 分别给出了光学系统各个视场在高温、低温及原始状态下的波像差和畸变。系统各视场的波像差和畸变在高温态时刻处于最大值,在低温态时刻为最小值,其余时刻位于两者之间。高温态热变形引起的最大波像差为 0.1 λ (RMS),引起的最大畸变为 56 nm,对比 16 nm 产业化 EUVL 投影物镜成像性能的要求(见表 4)^[19]可知,这显然远超合理范围。因此,需要对物镜的温度进行严格控制。

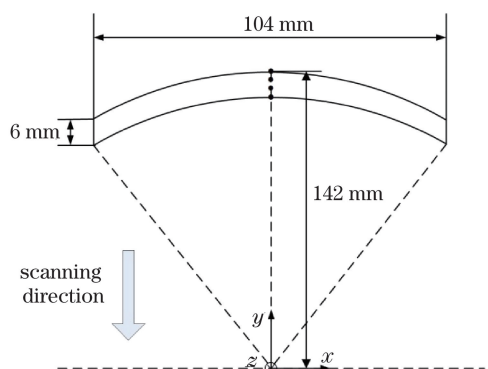


图 8 像方环形视场

Fig. 8 Image annular field of view

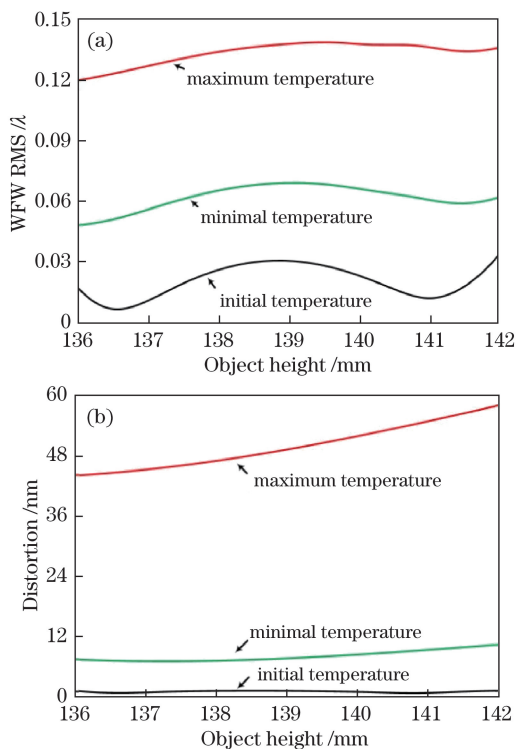


图 9 高低温态时刻物镜系统的(a)波像差 RMS 和(b)畸变
Fig. 9 (a) WFE RMS and (b) distortion of objective system on the moments of maximum temperature and minimal temperature

表 4 物镜成像性能要求

Table 4 Imaging performance demands for objective

Item	Value
WFE RMS	$<0.03\lambda$
Distortion	$<1.1 \text{ nm}$

为了给温控策略提供更加明确的技术依据,分析了各高温态反射镜热变形对边缘视场像差的贡献量。在光学软件中去除某个反射镜加载变形面,使该面处于理想状态,其余表面仍处于高温态。此时,

波像差和畸变的变化即为该反射镜热变形对像差的贡献量,如图 10 所示。由图 10 可知:M3 和 M4 反射镜引起了 0.067λ (RMS) 和 0.0559λ (RMS) 的波像差,两者引起的波像差占总波像差的比例高达 88%;M4 反射镜的热变形引起了 40.4 nm 的最大畸变,M3 反射镜次之,引起了 14.7 nm 的畸变,二者引起的畸变占总畸变的比例达到了 99% 以上。因此,需要对这两片反射镜进行重点控温。

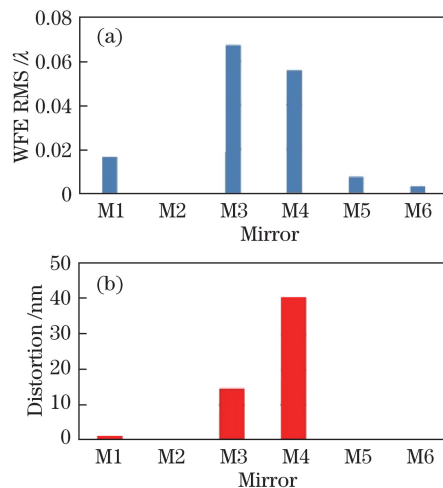


图 10 各高温态反射镜热变形引起的边缘视场的
(a)波像差 RMS 和(b)畸变

Fig. 10 (a) WFE RMS and (b) distortion of edge image field of view caused by thermal deformation of each mirror on maximum temperature moment

5 讨 论

与前人的研究相比,本研究面向的是 16 nm EUVL 的需求,采用了新的研究对象(数值孔径为 0.33 的 EUVL 物镜),物镜系统具有更高的数值孔径及光学分辨率。建立反射镜的实际支撑结构来替代传统简化的运动学三点支撑结构,反射镜边界条件由圆周均布的三点位移约束变为支撑结构的应力支撑,更贴近实际情况。采用 125 wafer/h 的 EUVL 产率模型,单个热载周期缩短,各反射镜反射区域的热载能量升高。将 16 nm EUVL 物镜与文献[11]中 22 nm EUVL 物镜(分别用 PO1 与 PO2 表示)的热变形结果进行对比(表 5),可明显看出:除 M2 外,PO1 物镜中各反射镜的热变形量均比 PO2 大。M2 是孔径光阑,其形变量对畸变的影响很小。在此条件下,PO1 热变形引起的波像差和畸变分别为 PO2 的 17 倍和 8 倍。这说明随着 EUVL 特征尺寸的降低及产率的提高,物镜的热变形对成像性能的影响也随之增大。

表 5 16 nm 与 22 nm EUVL 物镜的热变形分析结果
Table 5 Analysis of thermal deformation for 16 nm and 22 nm EUVL objectives

Item	PO1	PO2
3D thermal deformation (M1-M6) /nm	8.3,3.8,6.2, 1.1,4.2,0.5	1.6,4.1,4.8, 0.4,2.5,0.2
WFE RMS / λ	0.1	0.006
Maximum distortion /nm	56	7

热变形对成像性能的影响除了与形变量有关外,还与物镜系统的结构特点有关。从热变形分析结果看,M3 与 M4 的热变形量并非最大,M3 的热变形量次于 M1,M4 的热变形量仅高于 M6,但 M3 与 M4 反射镜的热变形对成像性能的影响却起到了主导作用,这一现象说明成像性能除了与反射镜的热变形量有关,还与像质对各反射镜面形变化的敏感程度密切相关。

由前人的研究可知,像质对光学元件面形变化的敏感程度与元件的曲率、主光线的入射角及投射高度有关^[20],即像质对曲率大、主光线入射角及投射高度高的元件的面形变化更敏感。图 11 为物镜系统各反射镜曲率、主光线入射角度及投射高度数据的直方图,为了方便对比,对数据进行了归一化处理。从图中可以看出,在 6 片反射镜中,M3 反射镜具有最大的曲率,M4 次之,M3 反射镜具有最大的主光线入射角,M4 具有最大的主光线投射高度。从曲率、主光线入射角度和高度三方面进行综合评价,系统像质对 M3、M4 反射面的形变最为敏感。因此,即便两者的变形并非最大,但仍对像质起主导作用。因此,在光学设计过程中,应尽量控制各元件光焦度分配及光线的入射角度和投射高度,以降低像质对元件表面变形的敏感度,提高系统成像性能的稳定性。

6 结 论

针对 16 nm EUVL 物镜系统工程化的研制需求,本课题组研究了数值孔径为 0.33 的共轴六反物镜热变形对成像性能的影响。在 ANSYS 中建立了带有实际支撑结构的反射镜有限元模型,依据 125 wafer/h 的新产率模型设定瞬态仿真条件,保证了仿真计算结果的真实性和准确性。通过光机集成分析法确定了物镜热变形对系统成像性能的影响,以及各反射镜热变形对像差的贡献量。结果表明:M1 反射镜具有最大的热变形(10 nm),高温态物镜

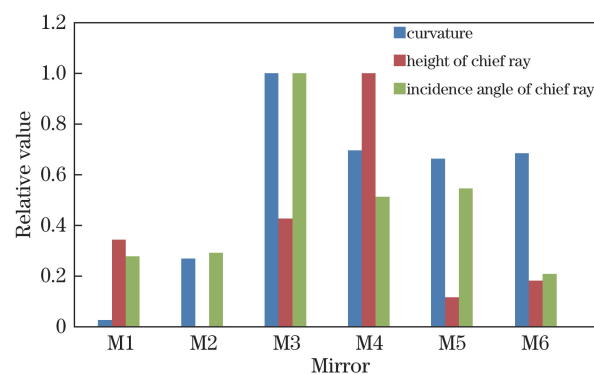


图 11 各反射镜曲率、主光线投射高度和入射角
Fig. 11 Curvature of each mirror, height of chief ray and incidence angle of chief ray

的热变形引起的最大波像差 RMS 和畸变分别为 0.1 λ 和 56 nm。其中,M3 和 M4 反射镜热变形累加引起的波像差和畸变高达 88%和 99%,对像质的影响起主导作用,因此,需要重点对这两片反射镜进行温度控制。最后,从几何光学角度说明了反射镜热变形对成像性能的影响程度除与形变量有关外,还与像质对各反射镜面形变化的敏感程度密切相关。另外,通过与以往的研究结果进行对比可以发现,随着 EUVL 特征尺寸的降低及产率的提高,物镜的热变形对成像性能的影响程度也随之增大。本研究为 16 nm EUVL 系统的热管理及物镜的工程化设计提供了可靠的技术依据。

参 考 文 献

- [1] Wagner C, Harned N. Lithography gets extreme[J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 24-26.
- [2] Pirati A, van Schoot J, Troost K, *et al.* The future of EUV lithography: enabling Moore's law in the next decade[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10143: 101430G.
- [3] Liu F, Li Y Q. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.
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.
- [4] Wang L P. The project of "study of key technology for extrem-ultraviolet lithography" passed the acceptance inspection[J]. Analytical Instrumentation, 2017(4): 96.
王丽萍. 长春光机所承担的国家科技重大专项项目“极紫外光刻关键技术研究”通过验收[J]. 分析仪器, 2017(4): 96.
- [5] Zhang H, Li S K, Wang X Z. Fast simulation method of extreme-ultraviolet lithography 3D mask

- based on variable separation degradation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0505001.
张恒, 李思坤, 王向朝. 基于变量分离分解法的极紫外光刻三维掩模快速仿真方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0505001.
- [6] 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.
曹振, 李艳秋, 刘菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0922005.
- [7] Liu F, Li Y Q. Design of multi-mirror optics for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Optical Review*, 2013, 20(2): 120-126.
- [8] Shen S H, Li Y Q, Jiang J H, *et al.* Graded multilayer film design for anamorphic magnification EUV lithographic objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0822002.
沈诗欢, 李艳秋, 姜家华, 等. 组合倍率极紫外光刻物镜梯度膜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0822002.
- [9] Raychaudhuri 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
杨光华, 李艳秋. 22 nm 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.
- [12] Pirati A, Peeters R, Smith D, *et al.* EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9776: 97760A.
- [13] Lowisch M, Kuerz P, Mann H J, *et al.* Optics for EUV production[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7636: 763603.
- [14] 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.
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.
- [15] Shiraishi M. Surface-corrected multilayer-film mirrors with protected reflective surfaces, exposure systems comprising same, and associated methods: 0204861A1[P]. 2008-08-28.
- [16] Folta J A, Bajt S, Barbee T W, *et al.* Advances in multilayer reflective coatings for extreme ultraviolet lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3676: 702-710.
- [17] Frommeyer A, Morrison G F, Keller W, *et al.* Optical subassembly and projection objective in semiconductor lithography: US7448763B2[P]. 2008-12-11.
- [18] Jasthi B K, Arbegast W J, Howard S M. Thermal expansion coefficient and mechanical properties of friction stir welded Invar (Fe-36%Ni)[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18(7): 925-934.
- [19] Peeters R, Lok S, Alphen E, *et al.* ASML's NXE platform performance and volume introduction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86791F.
- [20] Sasian J M, Descour M R. Power distribution and symmetry in lens system[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(3): 1001-1004.