

22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响

杨光华 李艳秋

(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 极紫外光刻技术(EUVL)是半导体制造实现 22 nm 及其以下节点的下一代光刻技术。在曝光过程中,EUVL 物镜的每一面反射镜吸收 35%~40% 的入射极紫外(EUV)能量,使反射镜发生热和结构变形,影响投影物镜系统的成像性能。基于数值孔径为 0.3,满足 22 nm 技术节点的产业化 EUV 投影物镜,采用有限元分析(FEA)的方法研究反射镜变形分布,再将变形导入光学设计软件 CODE V 中,研究反射镜变形其对成像特性的影响。研究表明:当达到硅片的 EUV 能量为 321 mW,产量为每小时 100 片时,反射镜最高升温 9.77 °C,通光孔径内的最大变形为 5.89 nm;若采用相干因子 0.5 的部分相干光照明,变形对 22 nm 线宽产生 6.956 nm 的畸变和 3.414% 的线宽误差。

关键词 热和结构变形;成像性能;有限元方法;极紫外光刻;投影物镜

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0322005

Thermal and Structural Deformation of Projection Optics and Its Influence on Optical Imaging Performance for 22 nm Extreme Ultraviolet Lithography

Yang Guanghua Li Yanqiu

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

Abstract Extreme ultraviolet lithography (EUVL) is the next generation lithography for the semiconductor manufacturer to achieve 22 nm node and below. In the process of exposure, the 35%~40% incident power will be absorbed by multilayers of extreme ultraviolet (EUV) optics, resulting in the thermal and structural deformation of the mirror, and consequently affecting the optical performance of the projection optics (PO). It is based on a six-mirror PO designed for EUVL at 22 nm technology generation with an image numerical aperture of 0.3. Finite element analysis (FEA) method is used for the deformation analysis of the six-mirror PO, and then the deformation is introduced to CODE V to evaluate its effect on the PO. The results show that the maximum temperature increase is 9.77 °C, and the maximum deformation at clear aperture is 5.89 nm, with the beam power of 321 mW onto the wafer and wafer throughput reaches 100 wafers per hour. While it is partial coherently illuminated (partial coherent factor 0.5), the distortions of 22 nm line and space is 6.956 nm, critical dimension (CD) error is 3.414%.

Key words thermal and structural deformation; optical imaging performance; finite element analysis; extreme ultraviolet lithography; projection optics

OCIS codes 220.4840; 120.6810; 110.4235; 230.4040

收稿日期: 2011-08-25; 收到修改稿日期: 2011-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、国家科技重大专项(2008ZX02501-009)和教育部长江学者特聘教授奖励计划资助课题。

作者简介: 杨光华(1984—),男,硕士研究生,主要从事极紫外光刻系统变形分析和控制等方面的研究。

E-mail: ygh_2011@126.com

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事高分辨成像及先进光刻技术、传感与微系统技术、微纳检测技术及精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

极紫外光刻技术(EUVL)作为 22~14 nm 技术节点大规模集成电路光刻工艺主流技术的地位日益显现。在 EUVL 中为了得到接近衍射极限的分辨率,投影物镜总波像差的均方根(RMS)值要小于 1 nm($\lambda/14, \lambda = 13.5 \text{ nm}$)。对于六镜系统,这就要求每一面镜子表面变形允许的 RMS 值小于 0.2 nm [$\lambda/(28\sqrt{n}), n=6$]^[1]。但在极紫外(EUV)波段,几乎所有已知光学材料都具有很强的吸收性,无法采用传统的折射式光学系统,所以 EUV 投影物镜系统采用反射式设计,同时反射镜上镀 Mo/Si 多层膜增强反射率。虽然 Mo/Si 多层膜反射率很高,仍然接近 35%~40%的 EUV 能量被反射镜吸收。由此造成反射镜表面温度升高,进而导致镜面结构变形,这对 EUV 光学成像系统的分辨率提出了挑战。所以需要研究 EUVL 投影物镜系统热和结构变形的大小以及变形对于光刻性能的影响。

Chaudhuri 等^[2~4]对于 100, 50 和 32 nm 技术节点 EUVL 投影物镜热和结构变形对成像性能的影响分别进行了研究。而对于 22 nm 技术节点,还未见到关于 EUVL 投影物镜热和结构变形对成像性能影响的报道。本文基于实验室设计的满足 22 nm 节点技术的产业化六面 EUV 投影物镜系统,对投影物镜进行热和结构变形瞬态分析,研究投影物镜温度和变相随时间的变化规律;在投影物镜

达到热和结构平衡时,研究投影物镜变形对成像质量的影响。

2 模型建立

2.1 结构

采用像方数值孔径为 0.3,像方视场宽度为 1.5 mm 满足 22 nm 节点技术的产业化六面 EUV 投影物镜系统作为研究对象^[5]。结构图如图 1 所示,且命名最靠近掩模的反射镜为 M1,靠近硅片的反射镜命名为 M6,其余各反射镜命名沿着光路依次类推。

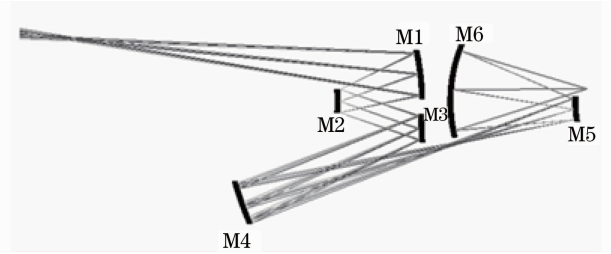


图 1 六面反射极紫外光刻投影物镜系统

Fig. 1 Six-mirror projection optics of EUVL

在 EUVL 中,入射 EUV 波长为 13.5 nm。在此波长下,大多数材料甚至气体对于 EUV 都有很强的吸收性。因此为减小反射镜变形和提高成像特性,反射镜基底选用膨胀系数极小的低膨胀系数(ULE)玻璃,并镀 41 层 Mo/Si 交替膜。表 1 是反射镜材料热和结构特性参数。

表 1 反射镜材料热和结构特性参数

Table 1 Thermal and structural parameters of mirror materials

	ULE	Si	Mo
Density / (g/mm ³)	2.205×10^{-3}	2.33×10^{-3}	1.03×10^{-2}
Thermal conductivity / [mW/(mm·K)]	1.31	148.0	138.0
Specific heat / [J/(g·K)]	0.766	0.712	0.255
Emissivity	0.735	0.122	0.122
Young's ratio / GPa	67.6	107.0	272.0
Poisson's ratio	0.17	0.25	0.25
Thermal expansion coefficient / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	0.02	2.50	5.35

2.2 边界条件

反射镜热变形分析包括热分析和结构分析两部分。相应的有限元分析(FEA)中边界条件分为:热边界条件和结构边界条件。其中热边界条件指在曝光过程中反射镜吸收 EUV 的能量和当反射镜温度高于环境温度时向外辐射的热量。根据典型的产业化 EUVL 样机技术参数模型^[6],如表 2 所示,可以计算出每一面反射镜吸收的 EUV 能量大小,如表 3

所示;同时可以确定出反射镜吸收 EUV 辐射 9 s,然后停止吸收 EUV 辐射 27 s,此种吸收-停止-吸收-停止循环的能量加载方式,如图 2 所示。设置环境温度为 20 ℃。结构边界条件指反射镜的装卡方式,这里采用运动学侧面 3 点支撑方式^[7]。在 3 个侧面中心节点实施完全约束:即约束 3 点在 X, Y, Z 3 个方向的位移和转动都为零。如图 3 所示。

表 2 产业化 EUVL 样机产率模型

Table 2 Throughout model of EUVL volume production tool

Throughput /h ⁻¹	100
Total time wafer /s	36
Stage overhead, wafer exchange, wafer alignment et al. /s	27
Exposure time /s	9
Wafer diameter /mm	300
Resist sensitivity /(mJ/cm ²)	5
Power at wafer /mW	321
Reflectivity of mirror /%	67.5
Number near normal mirrors	6

表 3 反射镜吸收 EUV 功率大小

Table 3 Absorbed EUV power on each mirror

Mirror	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Clear aperture area /mm ²	16683.55	1887.22	1904.68	41720.08	1766.97	23849.03
Absorbed EUV power /mW	1102.98	744.51	502.54	339.22	228.97	154.56
Absorbed power density / (mW/ mm ²)	6.611×10^{-2}	3.945×10^{-1}	2.638×10^{-1}	8.131×10^{-3}	1.296×10^{-1}	6.481×10^{-3}

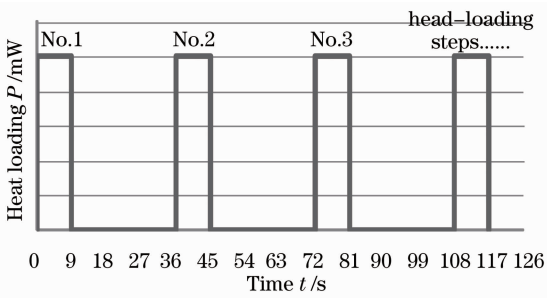


图 2 反射镜热负载示意图

Fig.2 Heat loading steps-time plot of mirror

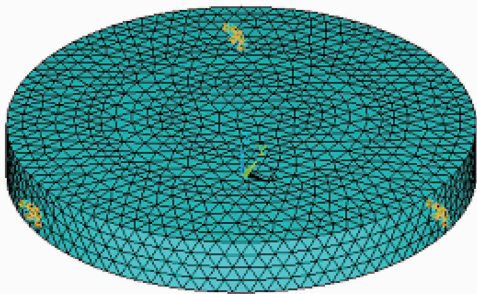


图 3 运动学侧面三点支撑方式

Fig.3 Kinematic mount side surface at three positions

3 热变形分析和结果

分析反射镜变形时,采用间接耦合分析的方法。先在反射镜上加载热边界条件,得到温度分布情况;然后将温度分布结合装卡约束条件再加载到反射镜上,得到结构变形分布。在反射镜中,对成像质量产生影响的是通光孔径的变形,而通光孔径的球面变形可以通过调整掩模和硅片之间的距离来校正,通

光孔径的非球面变形则很难校正,对投影物镜系统的成像特性产生影响,所以本文主要研究通光孔径的非球面变形。

3.1 热分析结果

图 4 是各面反射镜仿真最后时刻温度分布情况。从图中可以看出,各面反射镜在通光孔径区域温度较高,在远离通光孔径区域的边缘部分温度较低。其中 M2 反射镜由于体积最小,吸收 EUV 能量较大而通光孔径区域升温最高,最高升温为 8.3714 ℃;M4 反射镜虽然吸收 EUV 能量不是最少的,但是由于体积远远大于其他各面反射镜,因而导致通光孔径区域升温最低,通光孔径区域最高升温仅为 0.1668 ℃;其他各面反射镜最高升温介于 M1 与 M4 之间。

选取各面反射镜通光孔径区域中心节点,研究反射镜温度随时间的变化情况,如图 5 所示。从图中可以看出,各面反射镜节点温度随着时间的增加逐渐振荡增加,最后达到振荡平衡状态。这是由于反射镜吸收-停止-吸收-停止的循环热加载过程引起的。在热加载开始阶段,由于反射镜一个热加载周期内吸收的 EUV 能量大于向外辐射的热量,所以反射镜温度升高。随着反射镜温度的升高,反射镜向外辐射的热量逐渐增大。当反射镜温度升高到某一值时,反射镜在一个热加载周期内反射镜吸收 EUV 能量等于向外辐射热量,反射镜就达到了温度平衡状态。其中,M2 反射镜升温最高,达到平衡所用时间最短,达到平衡后温度振荡振幅最大,为

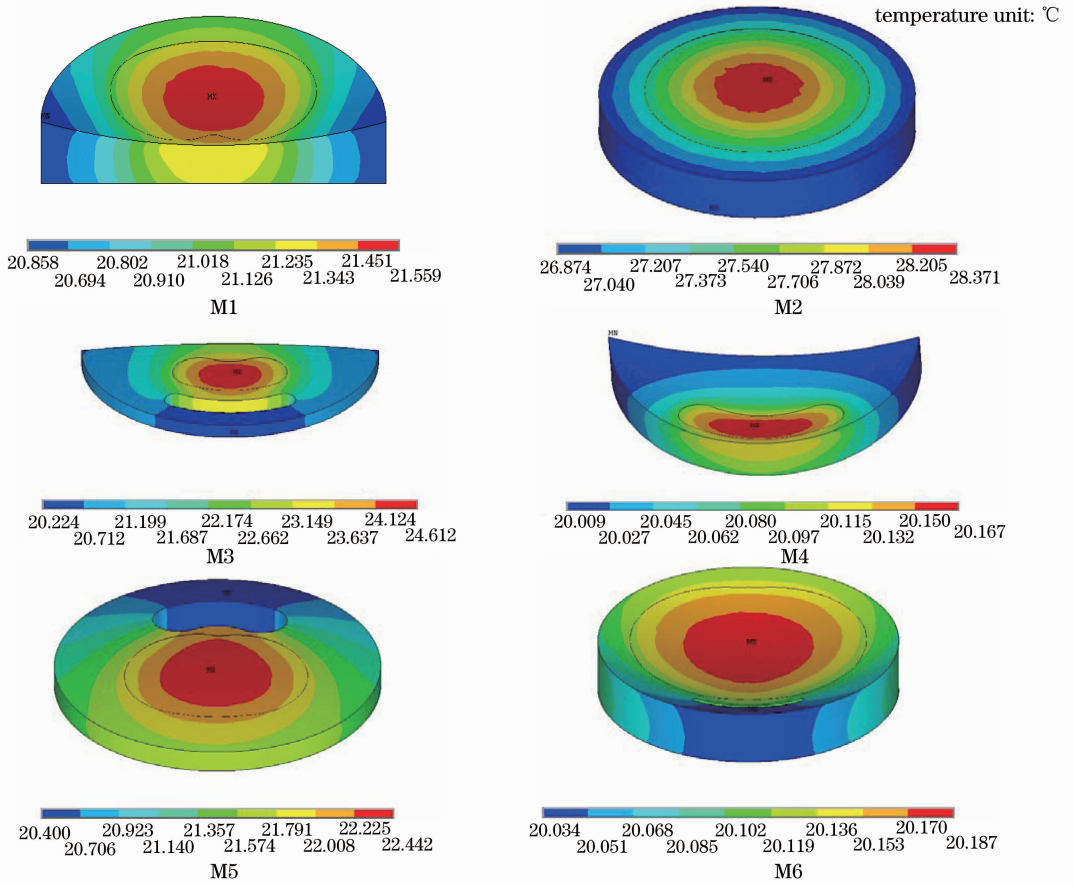


图 4 各面反射镜温度仿真最后时刻温度分布图

Fig. 4 Simulated temperature map of each mirror at the end of last-heat-loading step

表 4 各面反射镜热分析结果

Table 4 Thermal analysis results of six mirrors

Mirror	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Time approaching thermal equilibrium /h	5.56	1.74	3.33	8.89	2.22	8.75
Maximum temperature increase at thermal equilibrium state /°C	1.7904	9.7719	5.5225	0.1938	2.9056	0.1924
Minimum temperature increase at thermal equilibrium state /°C	1.5592	8.3714	4.6117	0.1668	2.4422	0.1699
Temperature oscillation amplitude at thermal equilibrium state /°C	0.2312	1.4005	0.9108	0.0270	0.4634	0.0225

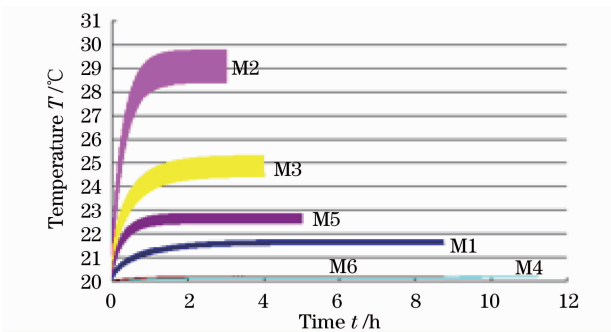


图 5 各面反射镜通光孔径区域中心节点温度随时间变化图

Fig. 5 Temperature increases at the central node of six-mirror clear aperture as a function of time

1.4005 °C; M4 反射镜升温最小,略高于 20 °C,达到平衡所用时间最长,为 8.89 h; M6 反射镜升温略高于 M4 反射镜升温,也和环境温度相差不大,达到平衡后温度振荡振幅最小,为 0.0225 °C。表 4 总结了各面反射镜热分析结果。

3.2 结构变形分析结果

图 6 是各面反射镜通光孔径区域仿真最后时刻的变形图。从图中可以看出,各面反射镜在通光孔径区域中心部分变形较小,而在通光孔径区域边缘部分变形较大。这与各面反射镜的热温度分布刚好相反。其中 M3 反射镜虽然升温不是最高,仅次于 M2 反射镜,但是通光孔径区域的最大变形却是最

大的,达到了 5.00 nm;M6 反射镜升温不是最低的,通光孔径区域最大变形却是最小的,仅为 0.33 nm;M2 反射镜升温是最高的,变形也较大仅次于 M3

反射镜的变形,达到了 4.32 nm。这是因为各面反射镜的变形大小不仅仅取决于升温大小,还与反射镜自身结构以及装卡方式密切相关。

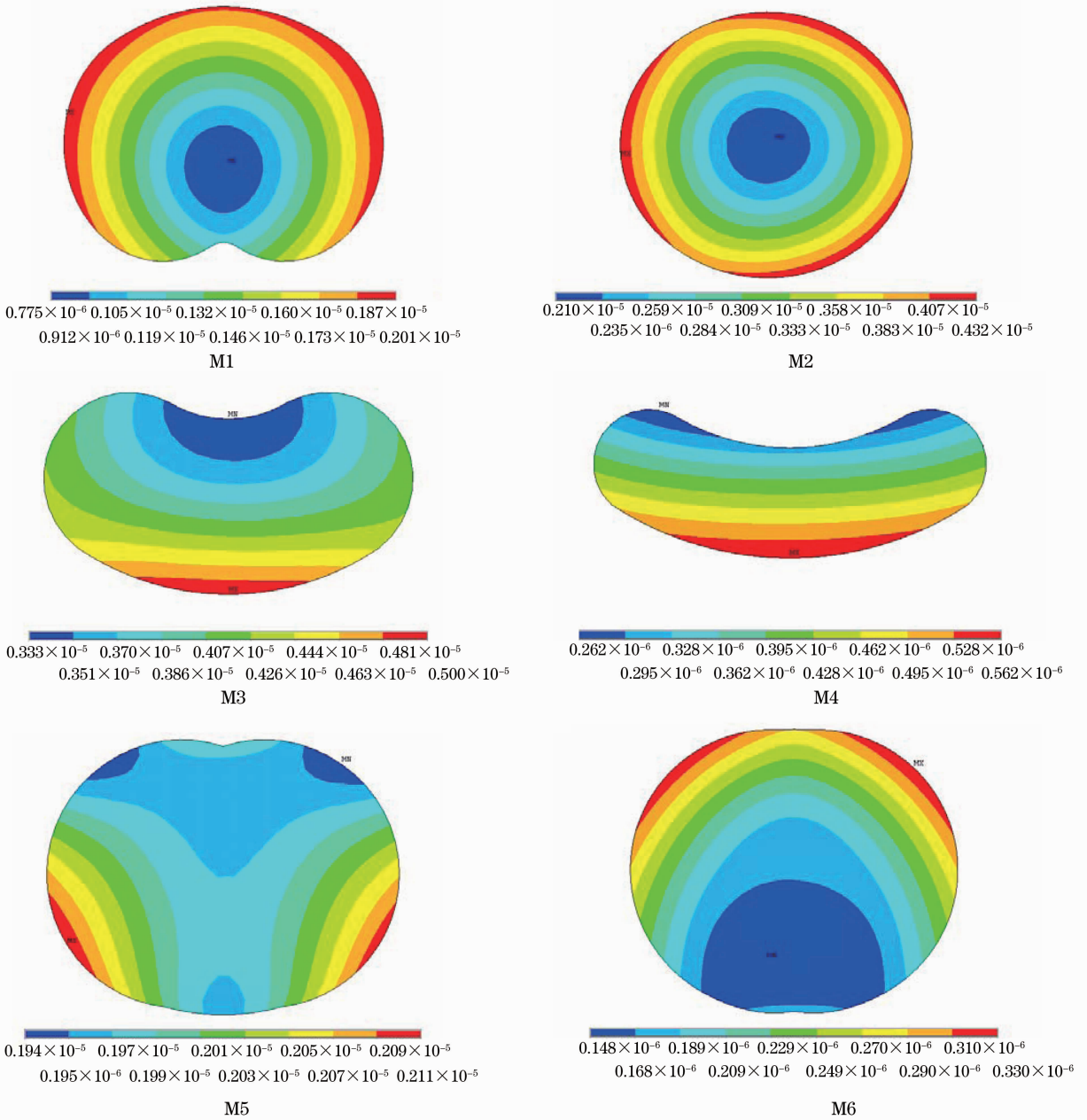


图 6 各面反射镜通光孔径区域仿真最后时刻结构变形图

Fig. 6 Simulated deformation maps of six-mirror at the end of last-heat-loading step

图 7 是各面反射镜通光孔径区域 3D、2D 结构变形的 RMS 值随时间的变化趋势图。从图中可以看出,与反射镜温度随时间的变化趋势相同,各面反射镜通光孔径区域的 3D、2D 结构变形也是振荡增加然后到达振荡平衡状态。其中达到平衡后,M3 反射镜通光孔径区域的 3D 结构变形 RMS 值最大,达到了 4.83 nm,振荡振幅也是最大的达到了 0.74 nm;M6 反射镜通光孔径区域 3D 结构变形的

RMS 值最小,为 0.22 nm,振荡振幅也是最小的,仅为 0.001 nm。虽然在达到平衡后,M2 通光孔径区域的 3D 结构变形仅次于 M3 反射镜通光孔径区域的 3D 结构变形,但是 M2 反射镜通光孔径区域的 2D 结构变形却是最大的,达到了 3.26 nm,振荡振幅也是最大的达到了 0.29 nm;M6 反射镜通光孔径区域的 2D 结构变形同 3D 结构变形一样都是最小的。

图 8 是各面反射镜通光孔径区域非球面变形

峰-谷(P-V)值和 RMS 值随时间的变化趋势图。从图中可以看出,各面反射镜通光孔径区域非球面变形的P-V值和 RMS 值随着时间增加迅速增加,然后缓慢达到振荡平衡状态。其中达到平衡后,M3 反射镜通光孔径区域非球面变形的 P-V 值和 RMS 值

都是最大的,分别为 3.07 nm 和 0.825 nm;M6 反射镜通光孔径区域的非球面变形的 P-V 值和 RMS 值是最小的,分别为 0.288 nm 和 0.0309 nm。

各面反射镜通光孔径区域的变形情况汇总,如表 5 所示。

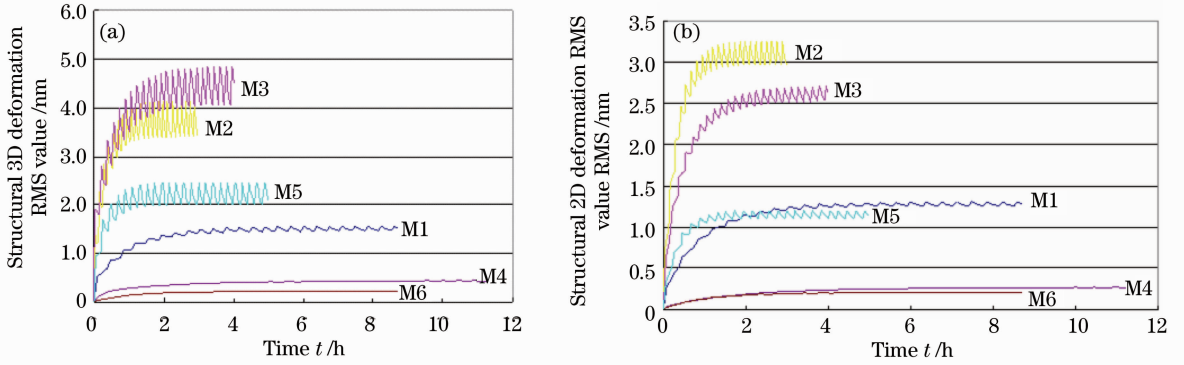


图 7 各面反射镜 clear aperture 区域 3D、2D 结构变形 RMS 值随时间变化图。(a) 3D 结构变形; (b) 2D 结构变形
Fig. 7 Structural 3D and 2D deformation at six-mirror clear aperture as a function of time. (a) Structural 3D deformation; (b) structural 2D deformation

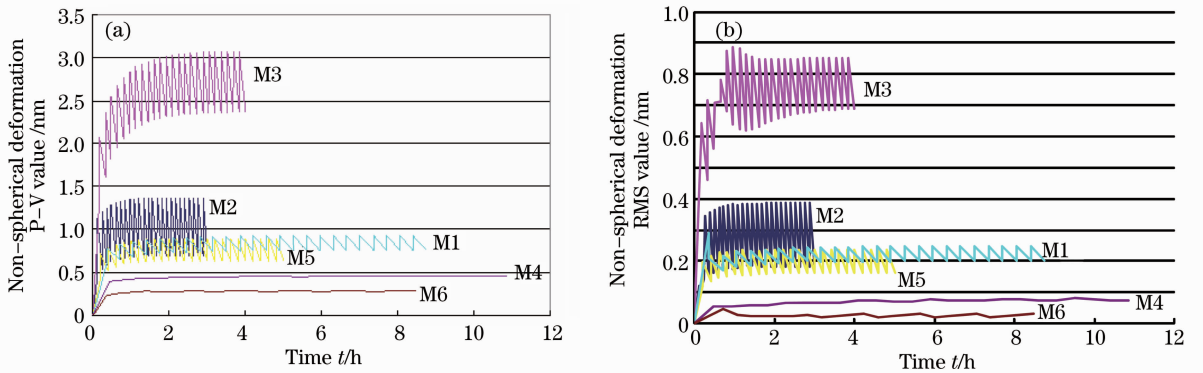


图 8 各面反射镜通光孔径区域非球面变形 P-V 值和 RMS 值随时间变化图。(a) P-V 值; (b) RMS 值
Fig. 8 Non-spherical deformation P-V and RMS values at six-mirror clear aperture as a function of time.

(a) P-V value; (b) RMS value

表 5 各面反射镜通光孔径区域变形
Table 5 Deformation analysis result of six-mirror clear aperture

Mirror		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Deformation at the end of last-heat-loading step /nm	Maximum	2.01	4.22	5.00	0.560	2.11	0.330
	Amplitude	0.10	0.73	0.74	0.008	0.46	0.001
Structural 3D deformation RMS value at thermal equilibrium state /nm	Maximum	1.56	4.13	4.83	0.433	2.46	0.220
	Amplitude	0.04	0.29	0.17	0.003	0.10	0.06
Structural 2D deformation RMS value at thermal equilibrium state /nm	Maximum	1.30	3.26	2.70	0.263	1.21	0.207
	Amplitude	0.04	0.29	0.17	0.003	0.10	0.06
Non-spherical deformation P-V value at thermal equilibrium state /nm	Maximum	0.929	1.37	3.07	0.46	0.898	0.288
	Amplitude	0.174	0.67	0.70	0.005	0.264	0.013
Non-spherical deformation RMS value at thermal equilibrium state /nm	Maximum	0.246	0.389	0.825	0.088	0.236	0.0309
	Amplitude	0.046	0.206	0.164	0.0052	0.072	0.0095

4 变形对成像特性的影响

根据反射镜变形,研究变形对投影物镜系统成像特性的影响。首先,通过数学软件 TABLE CURVE 3D 将反射镜变形分为球面变形和非球面变形。反射镜的球面变形可以校正,而反射镜的非球面变形对投影物镜系统成像特性产生的影响很难校正。通过 37 项泽尼克多项式拟合反射镜的非球面变形面,得到泽尼克系数。然后,将泽尼克系数通过 INT 文件导入 CODE V 中,研究反射镜变形对成像特性的影响。

初始投影物镜系统可以实现 22 nm 光刻分辨率的光刻胶成像。采用离轴环形视场,物方视场宽度为 1.5 mm(25 mm×26.5 mm),弦长 26 mm,如图 9 所示。选取子午面(yz 面)上的 16 个视场点(F1-F16)来研究反射镜变形对其成像特性的影响。

在光源相干因子 $\sigma=0.5$ 的情况下,通过以下 5 个方面来评价变形对 22 nm 线宽光刻性能的影响:1)最佳焦平面(best focus);2)波像差(WFE);3)畸变(DIS);4)线宽误差(LWA);5)施特雷尔比。如表 6 所示。

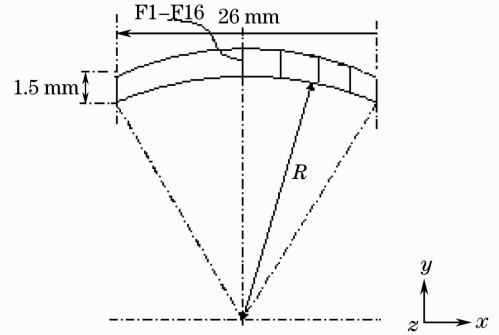


图 9 像方环形视场上的 16 个视场点
Fig.9 16 view field points on the image ring field of view

表 6 反射镜变形对 22 nm 光刻性能的影响

Table 6 Effect of optical deformation on lithographic performance for 22 nm line and space pattern

	Best focus /nm	WFE RMS /nm	DIS /nm	LWA /%	Strehl
Original design PO	0	0.306	1.552	1.600	0.947
Deformed PO at the minimum temperature state	40	0.310	5.071	2.957	0.940
Deformed PO at the maximum temperature state	96	0.388	6.956	3.414	0.917

由于反射镜的平衡状态是周期性振荡的,所以反射镜变形对于成像特性的影响也是周期性振荡的。在反射镜平衡后温度最高的高温态,反射镜变形最大,对投影物镜成像特性的影响最严重。此时,变形使投影物镜系统的波像差由 0.306 nm 上升为 0.388 nm,造成 6.956 nm 线宽畸变和 3.414% 的线宽误差。在反射镜平衡后温度最低的低温态,投影物镜的波像差为 0.310 nm,造成 5.071 nm 的畸变和 2.957% 的线宽误差。其他平衡状态变形对投影物镜系统的影响介于两者之间。由此可以看出,虽然初始投影物镜系统满足了 22 nm 光刻性能的要求,但是由于反射镜变形的影响,使得投影系统很难实现 22 nm 的分辨率。所以需要控制反射镜的温度。

5 结 论

通过 FEA 方法研究了 22 nm EUVL 投影物镜系统热和结构的变形,并用 CODE V 软件分析了变形对投影物镜系统成像特性的影响。在反射镜曝光过程中,由于各面反射镜的空间布局以及结构不同,

导致各面反射镜升高的温度和变形各不相同。其中 M2 反射镜升温最高,达到了 9.77 °C, M6 反射镜升温最低,仅为 0.192 °C; M3 反射镜透光区域的 3D 结构变形 RMS 值最大,达到了 4.83 nm,且其非球面 RMS 值也是最大的,达到了 0.825 nm。在光源相干因子 $\sigma=0.5$ 照明条件下,反射镜变形达到振荡平衡以后,对畸变的影响在 5.071 nm 与 6.956 nm 之间变化,线宽误差在 2.957%~3.414% 之间变化。所以对 22 nm 产业化 EUV 投影物镜系统来说,反射镜热和结构变形严重影响投影物镜系统成像特性,需要对反射镜的温度进行控制。

参 考 文 献

- 1 Russell M. Hudyma. An overview of optical systems for 30 nm resolution lithography at EUV wavelengths [C]. SPIE, 2002, 4832: 137~148
- 2 A. K. Ray-Chaudhuri, S. E. Gianoulakis, P. A. Spence *et al.*. Impact of thermal and structural effects on EUV lithographic[C]. SPIE, 1998, 3331: 10~12
- 3 Y. Li, K. Ota, K. Murakami. Thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography [J]. J. Vacuum Sci. Technol. B, 2003, 21(1): 127~129
- 4 Ke Liu, Yanqiu Li. Transient thermal and structural deformation

- and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(10A): 6568~6572
- 5 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 022200321
- 刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 022200321
- 6 Virek Bakshi. EUV Sources for Lithography [M]. Washington: SPIE Press, 2005. 31
- 7 Nikon Corporation. Hexapod kinematic mountings for optical elements, and optical systems comprising same [P], United States: US2007/0284502[P]. [2007-12-13]

栏目编辑: 李文喆