

文章编号 1674-2915(2010)05-0452-10

极紫外投影光刻光学系统

王丽萍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 1300332)

摘要: 极紫外光刻(EUVL)是半导体工业实现32~16 nm技术节点的候选技术,而极紫外曝光光学系统是EUVL的核心部件,它主要由照明系统和微缩投影物镜组成。本文介绍了国内外现有的EUVL实验样机及其系统参数特性;总结了EUVL光学系统设计原则,分别综述了EUVL投影光学系统和照明光学系统的设计要求;描述了EUVL投影曝光系统及照明系统的设计方法;重点讨论了适用于22 nm节点的EUVL非球面六镜投影光学系统,指出了改善EUVL照明均匀性的方法。

关键词: 极紫外光刻; 投影光学系统; 照明光学系统; 光学设计

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

Optical system of extreme ultraviolet lithography

WANG Li-ping

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Extreme UltraViolet Lithography(EUVL) has been regarded as a promising lithographic technology following ArF immersion lithography for the 32 nm hp node and beyond and the EUV optical exposure system consisting of a illumination system and a projection system is a key part in the EUVL. This paper introduces several kinds of EUVL tools at home and abroad and gives their optical specifications. Then, it summarizes the principles of optical design for EUVLs and reviews the design requirements for the illumination and projection systems, respectively. Finally, it describes the design methods of illumination and projection systems in EUVLs, especially, it discusses a aspheric 6-mirror projection optics which is suitable for 22 nm EUVL technology and gives the improvement method of illumination uniformity for the illumination system.

Key words: Extreme UltraViolet Lithography(EUVL); projection system; illumination system; optical design

1 引言

极紫外光刻(EUVL)是以波长为11~14 nm的EUV射线为曝光光源的微电子光刻技术,适用于特征尺寸为32 nm及更细线宽的集成电路的大

批量生产^[1]。EUV光源的特点决定了EUVL必须采用镀有多层膜的反射光学元件。为满足光刻成像的质量要求,EUVL光学系统像差要控制在1 nm以内。波像差需细致地分配到影响成像质量的每个细节因素之中,如反射镜基底、膜层厚度等等。由于元件工作面的中、高频粗糙度直接影

响像面对比度和系统能量传输,元件的面形精度和粗糙度要达到深亚纳米量级。经过20年的发展,随着对波像差、元件面形粗糙度及多层膜厚度要求的改进和提高,EUVL的光学加工、装调及镀膜技术日趋成熟。光学元件面形误差及中、高频粗糙度加工精度达 0.1 nm rms 的大口径EUVL元件已经集成到EUV光学系统中,EUV光学系统的波像差达到衍射极限^[2,3]。EUV光学技术的发展为与之有相似研究平台的科学领域,如空间光学、X射线显微镜、等离子体诊断等技术的进步提供了支持。本文详细介绍了现有EUVL实验样机及其光学系统的参数特性,总结了EUV光学系统设计原则,深入讨论了EUV投影曝光系统及照明系统设计方法。

2 EUVL 实验样机及其光学系统

随着极紫外投影光刻(EUVL)技术的不断进步,EUVL系统经历了可行性验证、关键技术评估、商业化生产3个发展阶段。根据不同阶段目标要求,该光学系统历经了一系列演变。

EUVL光学系统由照明系统和微缩投影光学系统组成,受其工作波段限制只能采用全反射式系统。而镀制了Mo/Si多层膜的反射元件,正入射时只能获得70%左右的反射率,因此,EUVL光学系统必须尽可能减少反射镜的个数。

微缩投影光学系统的设计指标体现了EUVL不同阶段的发展目标。考虑到扫描曝光时掩模和硅片位于系统同侧引起的硅片移动受限和光路内机械结构的遮拦等影响,光学系统设计宜采用少于8片的偶数片光学元件。

EUVL研究初期,日本NTT公司、美国LLNL以及美国(AT&T)公司采用非球面两镜曝光系统分别获得了 100 nm 线宽/间距曝光条纹,论证了EUVL成为新一代光刻技术的可行性^[4~9]。此阶段的两镜系统设计有Schwarzschild、Offner及平场结构,其数值孔径(NA)取值接近0.1,后两者采用环形视场用于大视场、无遮拦、扫描曝光系统的初步研究。上述两镜系统均属于原理性实验装置,直到2000年,美国能源部下属的3个实验室开发出ETS(Engineering Test Stand)原型机,EU-

VL向产业化迈进的技术路线才得到了验证。ETS实现了 100 nm 分辨率全视场扫描曝光,真正奠定了EUVL向商业化发展的道路。该系统由4个反射镜组成,如图1所示,图中 M_1, M_2, M_4 为非球面, M_3 为球面,镜面的面形精度达 0.22 nm ,每个镜面均镀制有中心波长为 13.4 nm 的Mo/Si多层反射膜。系统的NA为0.1,微缩比为4:1,像方扫描视场为 $26\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的环形视场,成像分辨率 $< 100\text{ nm}$,设计残差 $< 0.25\text{ nm RMS}$ 值。装调后EUV干涉仪检测得到的系统波像差RMS值达到 1.2 nm 。第一套ETS系统获得了 100 nm 线宽/间距扫描曝光条纹,第二套Set2系统获得了 60 nm 线宽/间距静态曝光条纹^[10],如图2所示。

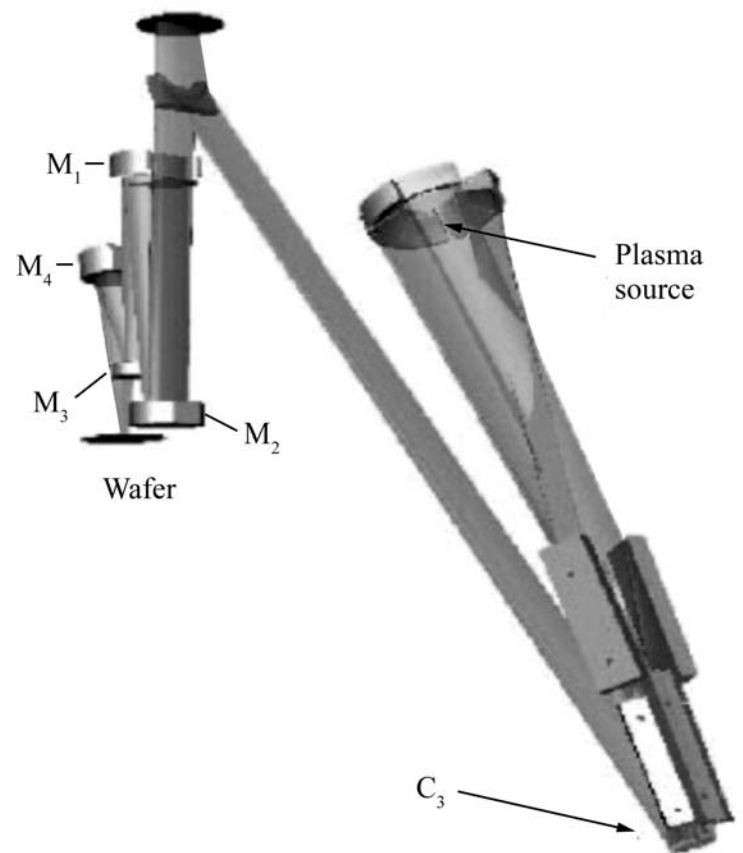


图1 ETS光学系统
Fig.1 Optics of ETS

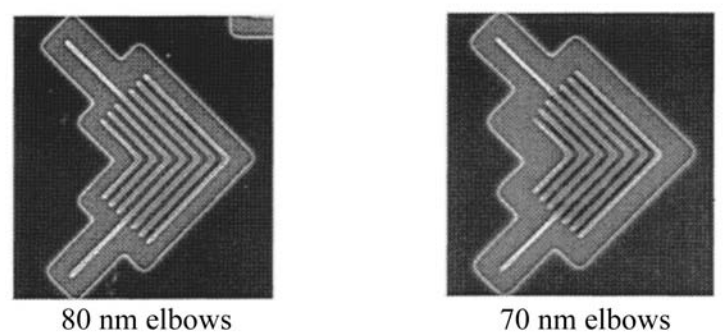


图2 ETS Set2 静态曝光条纹
Fig.2 Elbow patterns printed by ETS Set2

随着 EUVL 技术的发展及 193 nm 浸液式光刻 45 nm 节点的产业化技术的成熟, 2000 年后 EUVL 直接迈向 32 nm 的技术节点。在此期间的关键任务是攻克实现 32 nm 技术节点产业化的各项单元技术, 如光学元件的制造、检测, 掩模及抗蚀剂制造, 真空系统及环境控制等, 为商业化生产提供技术支持。Sematech、Nikon、Canon 等公司均已成功研制了 NA 为 0.3, 微缩比为 5:1 的小视场两镜曝光系统—MET、HINA、SFET 见图 3~6, 为 32 nm 技术节点商业化生产做出了技术积累与评估^[11~16]。这些系统为掩模及抗蚀剂制造技术进一步发展提供了实验平台, 亦可作为 EUVL 技术在生产条件下使用的测试平台, 发现并解决量

产过程中出现的问题。这是 EUVL 产业化过程中的关键阶段, 各项技术在此阶段逐步走向成熟。2001 年~2005 年间, Sematech 公司研制了 4 套 MET, Nikon 公司研制了 3 套 HINA, 在不断的技术改进过程中系统逐渐完善。MET 光学系统由 Carl Zeiss 公司提供, 镜面的面形精度达 0.21 nm, 像方曝光视场为 0.2 mm × 0.6 mm, 装调后系统波像差 RMS 值达到 0.7 nm。Nikon 公司的 HINA 的面型加工精度达到 0.25 nm^[17], HINA、SFET 像方曝光视场均为 0.3 mm × 0.5 mm, 装调后系统波像差 RMS 值达到 0.9 nm^[18]。MET、HINA、SFET 最终都获得了 32 nm 线宽/间距曝光条纹, 完成了 32 nm 节点产业化技术评估。

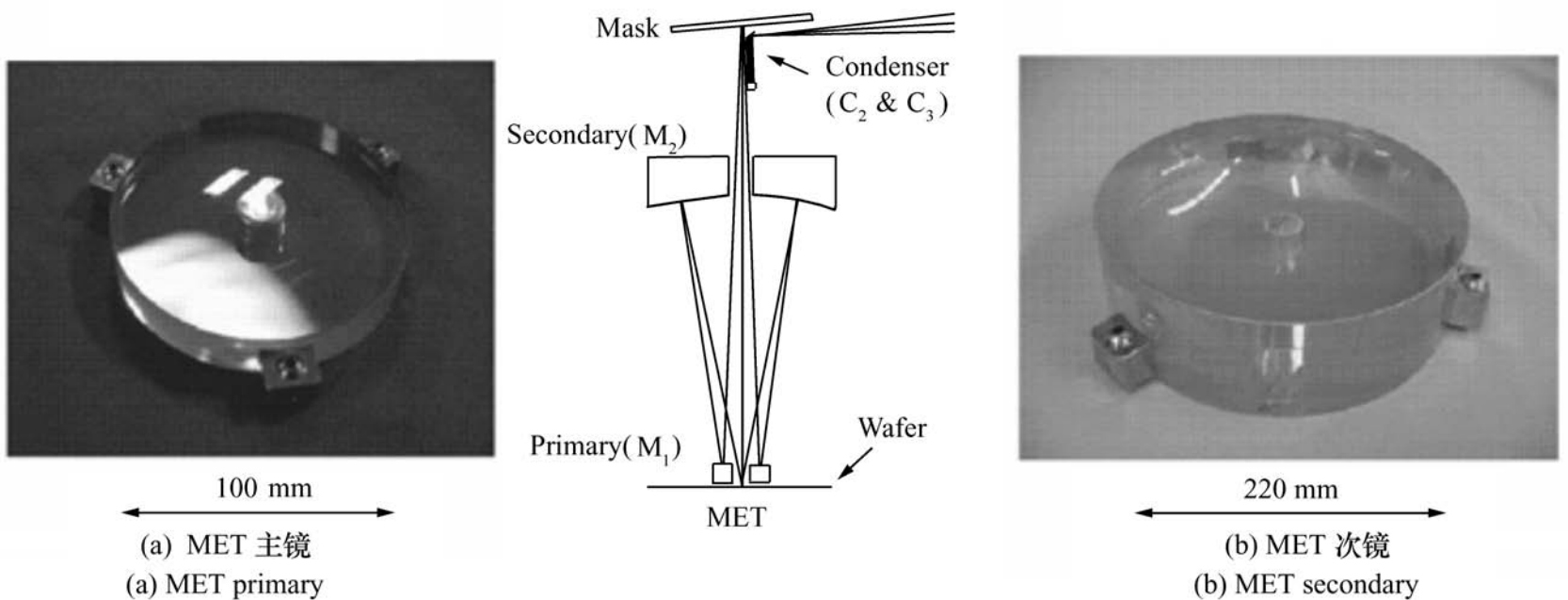


图 3 MET 的光学元件
Fig. 3 Optical element of MET

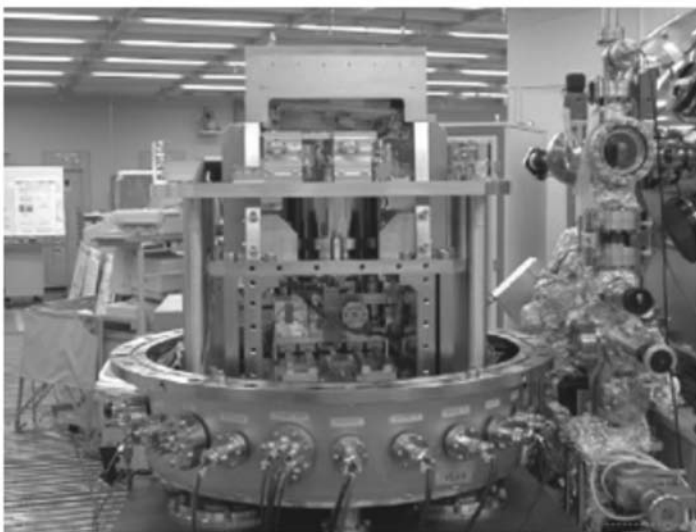


图 4 HINA 的外廓图
Fig. 4 Internal structure of HINA

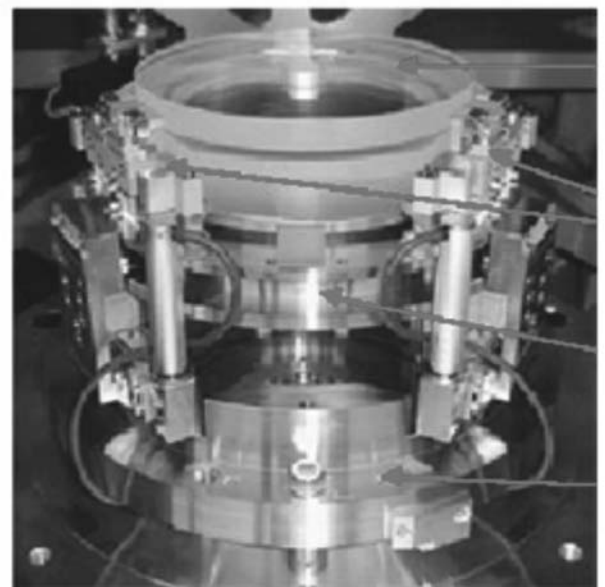


图 5 HINA 元件的安装图
Fig. 5 Photographs of projection optics of HINA

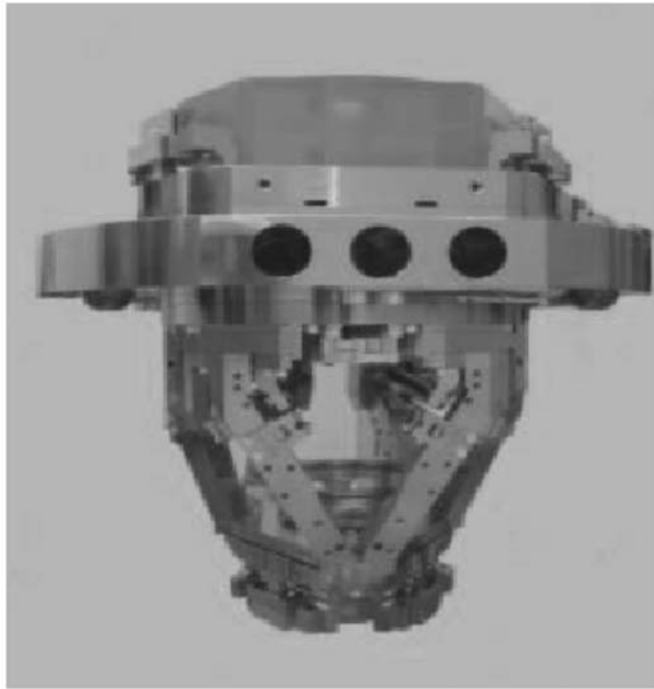


图 6 SFET 的投影光学系统
Fig. 6 Projection optics of SFET

2006 年, ASML 的两套 Alpha 样机 ADT 研制成功, 分别交付美国 CNSE 与比利时 IMEC。ADT 是世界上第一台 NA 为 0.25, 可实现 35 nm 线宽/间距分辨率、26 mm × 33 mm 全视场曝光的全功能 EUV 光刻设备^[19-21], 见图 7。ADT 的最初设计目标是为 EUVL 积累技术, 因此, 该设备的产量不高。投影光学系统系统包含 6 个反射镜, 由 Carl Zeiss 公司设计加工, 镜面的面形精度达 0.25 nm, 微缩比为 4:1, 像方曝光视场为 26 mm × 2 mm 的环形场, 系统的成像分辨率 < 40 nm, 装调后 EUV 干涉仪检测得到的系统波像差 RMS 值达到 1.1 nm。2007 年, ADT 在 80 nm 焦深范围内获得了 32 nm 线宽/间距曝光条纹。目前 ADT 的研发目标是 EUVL 22 nm 及 32 nm 技术节点的曝光光学系统 3300B 和 3300C^[22]。

Nikon 六镜系统 EUV1 (图 8) 的各视场波像差 RMS 均值达到 0.4 nm, 获得了 26 nm 节点(密线及单线)曝光图形。该系统环形曝光视场为 26 mm × 2 mm, 微缩比为 4:1。图 9 为 EUV₁ 光学元件的低频、中频、高频粗糙度 (Low-spatial-frequency Roughness, LSRF; Mid-spatial-frequency Roughness, MSFR; High-spatial-frequency Roughness, HSFR) 和功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD), 其系统反射元件的面形精度已达 27 pm^[23, 24]。Canon 公司六镜系统 VSI 仍处于研发

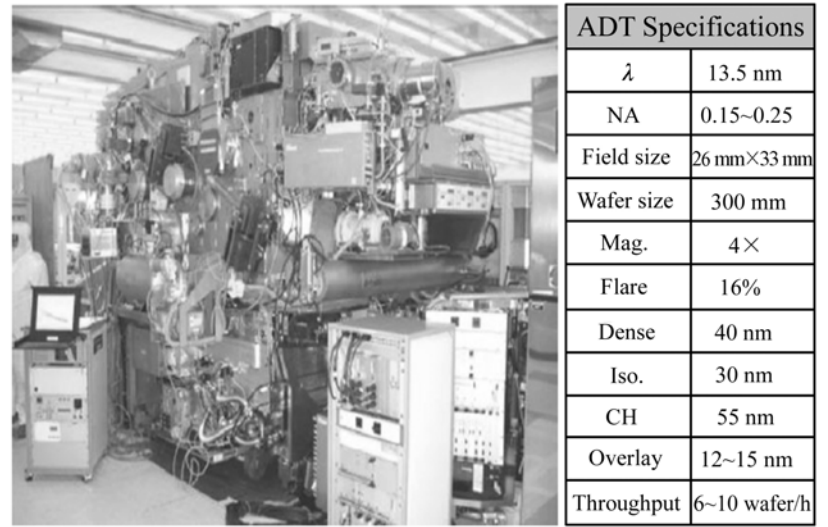


图 7 ADT 的外廓图及设计指标
Fig. 7 Photograph of ADT and its specification

阶段, 两套系统都以实现 EUVL 的量产为目标^[25]。

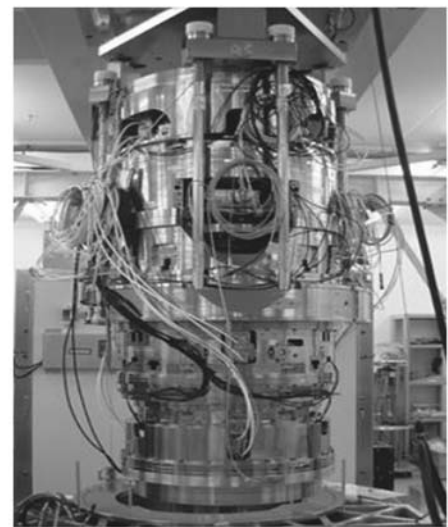


图 8 EUV1 光学系统模块
Fig. 8 Photograph of projection optics of EUV1

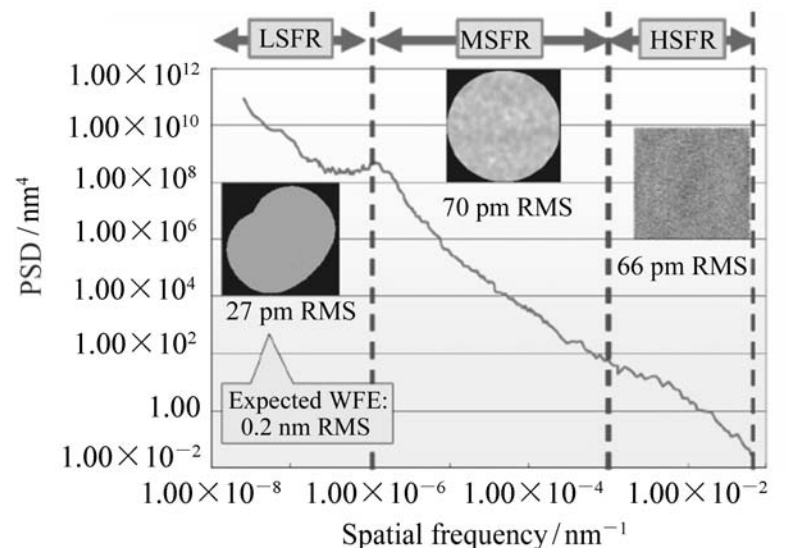


图 9 EUV1 光学元件加工精度
Fig. 9 LSRF, MSFR, HSFR and PSD of a polished aspheric mirror in projection optics of EUV1

2008年,美国LBNL实验室设计了NA为0.5的曝光系统MET2^[26],为16~11 nm节点EUVL技术研究做储备,设计分辨率为8 nm的MET2将为大数值口径EUVL系统研究提供帮助,促使半导体工业向新技术节点迈进。

3 EUVL光学系统设计原则

3.1 EUVL投影光学系统设计要求

(1) 非球面加工因素

EUVL光学系统每一个参数的选定都需要有充分的考虑。曝光系统的设计不仅要达到衍射极限分辨率的要求,更要兼顾到影响系统集成的各种因素以降低系统研制风险^[31]。非球面光学元件加工、检测水平是其中最严重的制约因素。设计过程中首先要考虑镜面最大非球面度的允许值,它决定了干涉仪最大条纹数及补偿光学系统参数。非球面度的增大会带来中频波纹度升高的风险。非球面度在径向上的梯度变化是更重要的指标,它决定了干涉仪的测量精度即局部条纹密度。梯度变化越快,所需的加工磨头越小,加工时间越长,在此过程中由磨头定位、震动引起的中频波纹度将会增加,最终导致中频波纹度平滑效率下降。

(2) 系统结构参数

考虑到真空系统及机械结构方面要求,后工作距应留有一定余量,以保证像方机械调整及系统波像差检测的顺利进行。微缩倍率的选取需兼顾物像距、掩模条纹大小等因素。曝光系统微缩比通常为5:1和4:1。

(3) 多层膜对系统波像差影响

考虑到光学元件表面需镀制Mo/Si多层反射膜,镜面曲率及入射光在镜面上的角度变化都要加以控制,入射角度变化范围大的元件需镀制梯形膜。多层膜缺陷不仅带来振幅变化,影响镜面反射率,它还带来位相变化,影响系统的波像差^[27,28]。薄膜位相变化常引入两种波像差:离焦和像散。它带给光学系统的波像差通常在毫波长级,一般光学系统对此影响可忽略不计,但对于大数值孔径、成像质量达到衍射极限的反射式EUVL光学系统,则必须考虑此因素的影响。

3.2 EUVL照明系统设计要求

照明系统也是EUVL的核心部分之一,光源发出的光束经照明系统后照明掩模板,再由投影物镜系统将掩模板上的电路图形复制到硅片表面。对线宽只有32 nm甚至更小的线条图形进行精确复制,要求照明系统与投影系统必须协调工作^[29]。

投影光刻对照明系统的要求:

(1) 照明分布均匀

照明区域内照度均匀是获得均匀曝光量的必备条件,EUV要求照明均匀性应 $< \pm 1\%$ 。如果照度不匀,在掩模上相同线宽的图形,在硅片上因图形位置不同会复制出不同线宽。

(2) 相干因子

照射到掩模各点的照明光NA与投影光学系统掩模侧NA的比值称为照明相干因子,它是控制曝光装置分辨率的关键量。 $\sigma = 0$ 时是相干照明; $\sigma = 1$ 时是非相干照明。实际装置的相干因子位于 $0 < \sigma < 1$ 之间。折中考虑EUVL曝光系统所需的分辨率和像对比度,选值为0.7。

σ 是直接影响投影光学系统分辨率的参数,如果照明区 σ 值不均匀,各向异性将导致分辨率因曝光范围或图形方向不同而不同^[30,31]。

(3) 元件数量及光线入射角限制

采用反射式系统,反射角度分为近似正入射和掠入射两种,前者入射角 $< 25^\circ$;后者入射角 $> 75^\circ$ 。两种情况下,反射元件的反射率分别为70%和90%左右,增加反射元件的数量会减小硅片上的曝光强度,所以极紫外照明系统使用的反射元件数量必须严格控制。

(4) 结构紧凑

考虑到真空系统及机械结构调整要求,照明系统应结构紧凑,保证照明系统光轴与投影系统光瞳衔接及系统波像差检测的顺利进行。

4 EUVL投影光学系统及照明系统设计方法

4.1 EUVL投影光学系统设计

分辨率(RES)和焦深(DOF)是极紫外投影光

刻成像系统的重要参量,二者由 Fraunhofer 公式和 Rayleigh 公式给出^[32]:

$$RES = k_1 \lambda / NA, \quad (1)$$

$$DOF = k_2 \lambda / (NA)^2, \quad (2)$$

式中, k_1 、 k_2 与系统工艺相关, λ 为成像系统所使用的波长。从式(1)可以看出,提高分辨率可以通过减小 λ 和提高 NA 来达到。为了满足高精度的成像质量要求,光学系统要求达到近衍射极限的分辨率,根据 Rayleigh 1/4 波长原则和 Marechal 条件,其综合波像差分别为: $\sigma = 1/4$ 峰谷值(P-V), $\sigma = 1/14$ 均方根值(RMS),而分配到每个光

学元件的面形精度要求更高,分别为:

$$\sigma = 1 / (4n) \quad \text{P-V}, \quad (3)$$

$$\sigma = 1 / (28 \cdot 2) \quad \text{RMS}. \quad (4)$$

制约 EUVL 提高 NA 的主要因素是焦深减小和设计加工难度。表 1 给出了 NA、特征尺寸与工艺因子 k_1 及焦深的关系。 $k_1 > 0.5$ 时,通过光学邻近效应校正满足分辨率要求; $0.3 < k_1 < 0.4$ 时,需要引入离轴照明等其它分辨率增强技术。NA > 0.3 的 EUVL 光学系统可用于 22 nm 节点技术研究; NA > 0.4 的可用于 16 nm 节点; NA 超过 0.5 的光学系统可用于 11 nm 节点技术研究^[24]。

表 1 NA, k_1 与焦深的关系

Tab.1 Relationship among NA, k_1 and DOF

HP	k_1					DOF/nm
	32 nm	22 nm	16 nm	11 nm	8 nm	
NA0.25	0.59	0.42	0.29	0.21	0.15	216
NA0.30	0.71	0.50	0.35	0.25	0.18	150
NA0.35	0.82	0.58	0.41	0.29	0.21	110
NA0.40	0.94	0.67	0.47	0.33	0.24	84
NA0.45		0.75	0.53	0.38	0.27	67
NA0.50		0.83	0.59	0.42	0.29	54

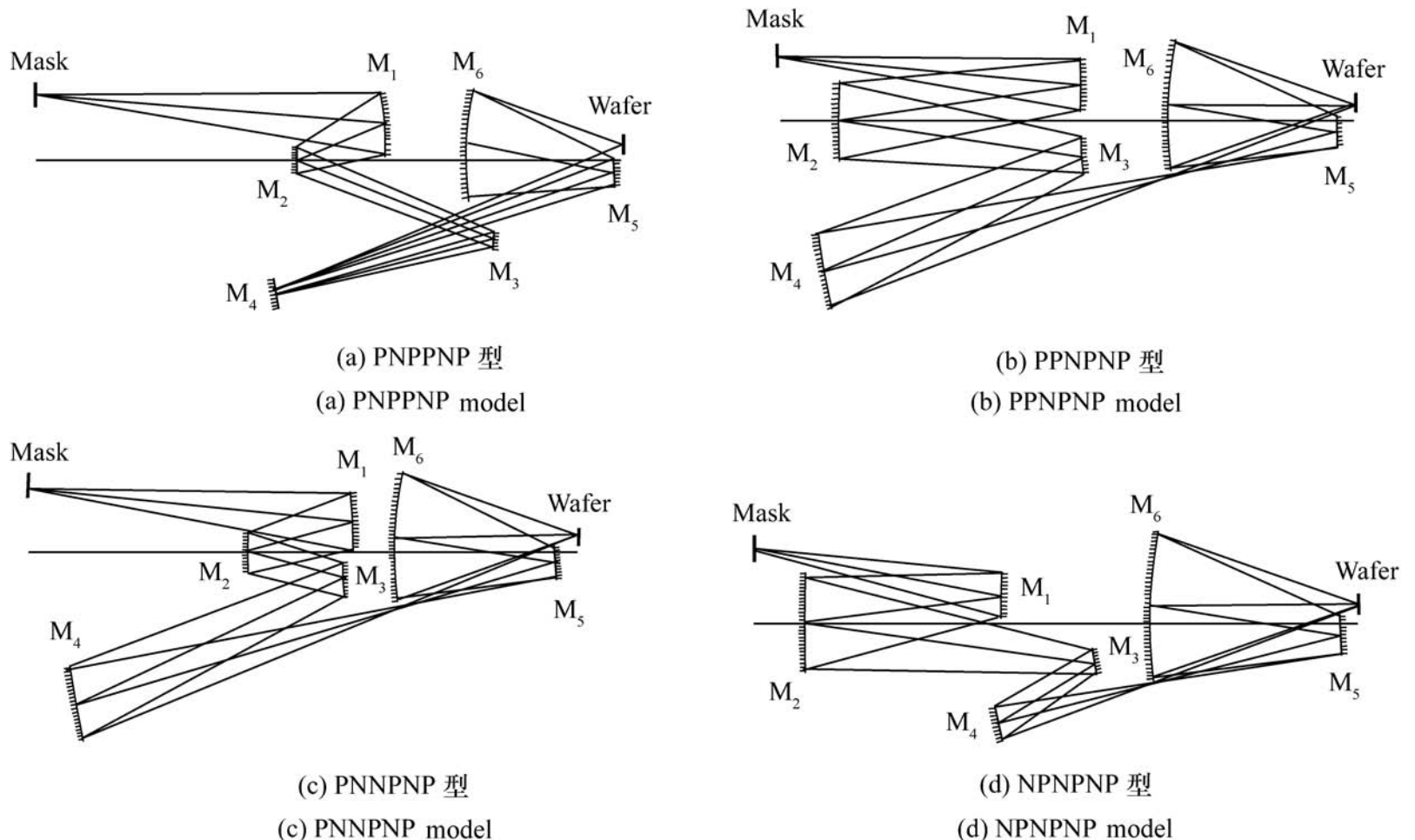


图 10 非球面 6 镜投影光学系统结构

Fig.10 6-mirror projection optics of EUVL

EUVL 技术批量化生产很可能在 22 nm 技术节点实现, 通过使用分辨率增强技术, 适应于 22 ~16 nm 节点的投影光学系统 NA 约为 0.35。环形视场非球面 6 镜设计可以满足此要求。EUVL 6 镜投影系统如图 10 所示, 常用型式有 4 种^[33~35]:

(1) PNPPNP 型(P 表示凹面镜; N 表示凸面镜)

与凹面镜相比, 凸面镜的检测更困难。此结构包括凹面镜数量多, 可降低元件加工难度和成本。光阑位于 M_2 上, 易于调节相干因子。 M_1 承担了较大的系统光焦度, 导致 M_1, M_2, M_3 面上入射角度大, 在薄膜设计优化时要考虑此因素。此结构的缺点是后工作距过小, M_6, M_5 镜非球面度及陡度大。

(2) PPNPNP 型

将正光焦度分配到 M_1, M_2 上可减小各光学面主光线入射角度, 降低了反射膜的设计和镀制难度。此结构元件非球面度小, 总长较大。 M_4 元件口径过大是系统的主要缺点, 也是减小入射角度的代价。

(3) PNNPNP 型

此结构采用正负镜连续组合的形式来消场曲, 像差校正较好。非球面度和各镜面主光线入射角度控制适当, 具有扩大视场, 提高系统 NA 的潜力。此结构的缺点与 PPNPNP 型相同, 中间像点前的 M_4 镜口径在加工、镀膜中需注意。

(4) NPNPNP 型

虽然凸镜的检测困难, 但凸镜的使用可减小主光线入射角度及非球面口径。 M_2, M_3 及 M_4 近同心, 像差得到有效的控制, 有扩大视场, 提高系统 NA 的潜力。

从综合像差特性、光线入射角度、后工作距及降低加工检测风险考虑, PPNPNP 结构是最合适的选择。同时, NPNPNP 和 PNNPNP 结构也具有较强的可塑性。

16 nm 技术节点 EUVL 投影光学系统的 NA 需大于 0.4, 光学设计与加工难度将显著提高。NA 越大, 满足光学性能要求的环形视场宽度越小。增加反射镜数量, 允许中心遮拦可以为 EUVL 光学系统设计提供更大的自由度, 更可能实现

大 NA 的系统设计。8 镜投影光学系统 NA 可超过 0.4, 但能量损失会显著增大, 且元件面形误差要达到 pm 级。如果设计中允许中心遮拦出现, 投影系统 NA 可大于 0.5, 但光瞳面光强分布不均将破坏系统的成像质量。

Oana Marinescu 利用鞍点构建方法优化 EUV 投影光学系统, 获得了新型投影物镜结构^[36]如图 11 所示, 但新设计的实用可行性有待分析。

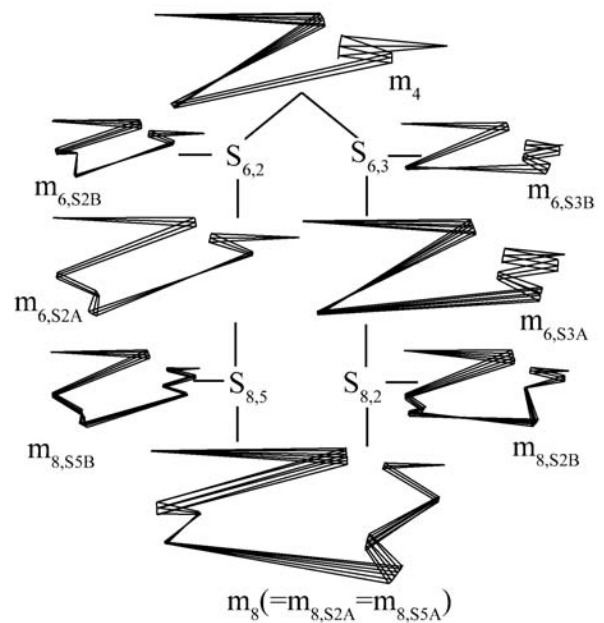
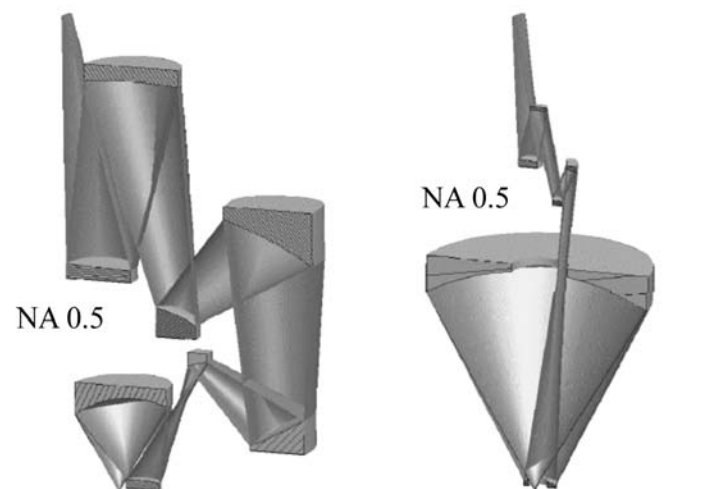


图 11 由鞍点构建方法设计的投影光学系统结构

Fig. 11 Projection optics generated with saddle-point construction

Carl Zeiss 公司设计了分辨率可达 11 nm 的投影光学系统^[37]。图 12(a) 为 8 镜无遮拦系统, 图 12(b) 为 6 镜有遮拦系统。两种结构的 NA 都为 0.5。



(a) 8 镜投影光学系统
(a) 8-mirror system without central obscuration

(b) 6 镜投影光学系统
(b) 6-mirror system with central obscuration

图 12 Carl Zeiss 设计的 NA 为 0.5 的投影光学系统

Fig. 12 Different type systems with NA of 0.5

4.2 EUVL 照明光学系统设计

照明系统通常采用正入射复眼反射镜的柯勒照明来确保照度及口径均匀性。复眼结构是一种光学积分仪,将光源发射光束进行空间分离,形成由多个会聚点组成的二次光源。将这种二次光源当作发散光源。柯勒照明将光源像成像于投影光学系统入瞳。来自光源各处的光重叠照射在掩模板上,确保照度均匀性^[38],图 13 表述了这些原理。

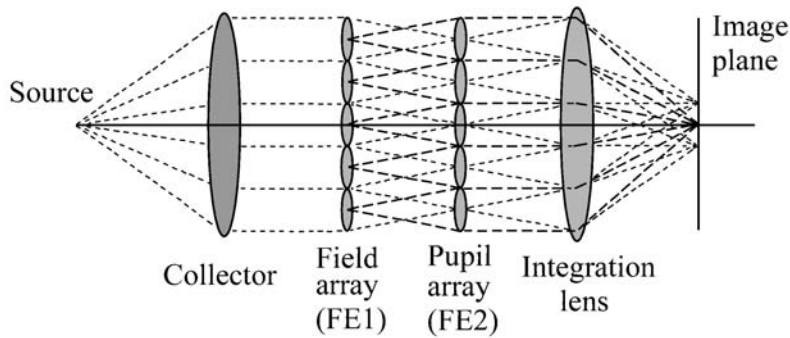


图 13 复眼照明系统原理图

Fig 13 Principle of fly eye illumination optics

以下 4 种方法可以提升照明系统性能^[39-41]:

(1) 改变复眼反射镜的排列方式,将小镜面由边缘对齐的结构调整为边缘不对齐的分布结构。由图 14(a)、(b) 比较可发现,(b) 所示复眼反射镜形成的子光源在孔径光阑内分布更均匀,更容易实现光能的均匀分布。

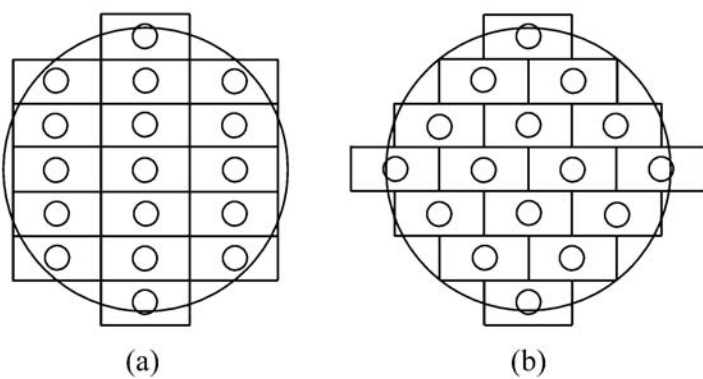


图 14 复眼元件排列方式

Fig. 14 Arrangement of facets

(2) 根据光源辐射特性,调整部分小镜面倾斜角度,改变前后组复眼中小镜面空间对应关系,改善掩模面照度均匀性。

(3) 改变后组复眼反射镜中小镜面的截面形

状,提高照明系统能量利用率。当被照明区域长宽比大时,小镜面形成的子光源大小将受到小镜面较小边限制,不利于光能收集,影响均匀照明。如图 15 所示,改变前后组小镜面横截面形状对应关系,前组的小镜面横截面形状与掩模照明区相同,后组的小镜面横截面形状接近方形。可以更有效地收集能量。

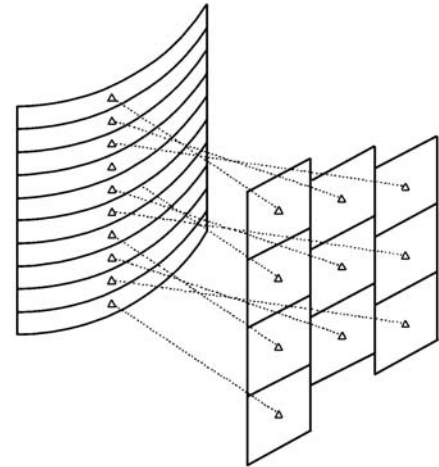


图 15 前后组复眼元件对应方式

Fig. 15 Rule of correspondence between the two facets

(4) 可根据光路设计要求将元件面形复杂化以补偿元件数量的限制,例如可通过将元件非球面化,提高照明系统性能。

5 结束语

今天,极紫外光刻已被认为是最有前景的光刻技术之一,其中,曝光光学系统性能直接决定着光刻图形质量。本文介绍了 EUVL 实验样机及其曝光系统设计,讨论了 EUVL 光学系统设计原则。对比分析了适用于 22 nm 节点的 EUVL 非球面六镜投影光学系统,提出了改善 EUVL 照明均匀性的方法。

EUVL 技术经过近 20 年的发展,在光学元件加工、系统检测、装调等关键单元技术方面均已逐步成熟。尽管随着技术的进步,未来的光刻技术将是多元化的,应用领域也会不断延深,但就占有率最大的半导体和微电子领域,极紫外光刻仍是最被期待的,有理由认为, EUVL 很可能在 22 nm 节点实现量产。

参考文献:

- [1] HUDYMA R M. An overview of optical systems for 30 nm resolution lithography at EUV wavelengths[J] . *SPIE*, 2002, 4832: 137-148.
- [2] WOODA O, KOAYB C-S, PETRILLOB K. EUV Lithography at the 22 nm technology node [J] . *SPIE*, 2010, 7636: 76361M/1-76361M/8.
- [3] BAKSHI V. *EUV Lithography*[M] . Bellingham: SPIE Press, 2009.
- [4] JEWELL T E. Reflective system design study for soft X-ray projection lithography[J] . *J. Vac. Sci. Technol.* , 1990, B8(6) : 1519-1523.
- [5] GOLDSMITHA J E M, BARRA P K, BERGERA K W. Recent advances in the Sandia EUV 10x microstepper[J] . *SPIE*, 1998, 3331: 11-19.
- [6] KURIHARA K. Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography[J] . *J. Vac. Sci. Technol.* , 1991, B9(6) : 3198-3192.
- [7] JEWELL T E. Two aspheric mirror system design for SXPL[A] . OSA Proceedings on Soft X-Ray Projection Lithography [C] . Monterey, California, May 10-12, 1993, 18: 71-74.
- [8] GOLDSMITH J E M, BERGER K W, BOZMAN D R, *et al.* . Sub-100-nm imaging with an EUV 10x microstepper[J] . *SPIE*, 1999, 3676, : 264-271.
- [9] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J] . 光学 精密工程, 2000, 8(1) : 66-70.
JIN CH SH, WANG ZH SH, CAO J L. Development of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2000, 8(1) : 66-70. (in Chinese)
- [10] TICHENOR D A, RAY-CHAUDHURI A K, REPLOGL W C, *et al.* . System integration and performance of the EUV engineering test stand[J] . *SPIE*, 2001, 4343: 19-37.
- [11] BOOTH M, BRIOSO O, BRUNTON A. High-resolution EUV imaging tools for resist exposure and aerial image monitoring [J] . *SPIE*, 2005, 575: 178-89.
- [12] 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] . *Appl. Opt.* , 2007, 46: 3736-3746.
- [13] GOLDBERG K A, NAULLEAU P P, DENHAM P E, *et al.* . At-wavelength alignment and testing of the 0.3-NA MET optic[J] . *J. Vac. Sci. Technol.* , 2005, B22(6) : 2956-2961.
- [14] ROBERTSL J M, BACUITAL T, BRISTOLL R L. One small step: world s first integrated EUVL process line[J] . *SPIE*, 2005, 5751: 64-77.
- [15] NAULLEAU P P, ANDERSON C N, Dean K, *et al.* . Recent results from the Berkeley 0.3-NA EUV microfield exposure tool[J] . *SPIE*, 2007, 6517: 65170V/1-65170V/8.
- [16] NAULLEAU P P, ANDERSON C N, BACLEA-AN L-M, *et al.* . The SEMATECH Berkeley microfield exposure tool: learning at the 22-nm node and beyond[J] . *SPIE*, 2009, 7271: 72710W/1-72710W/11.
- [17] OIZUMI H, TANAKA Y, KUMASAKA F, *et al.* . Lithographic performance of high-numerical-aperture(NA = 0.3) EUV Small-Field Exposure Tool(HINA) [J] . *SPIE*, 2005, 5751: 102-105.
- [18] UZAWA S, KUBO H, MIWA Y, *et al.* . Path to the HVM in EUVL through the development and evaluation of the SFET [J] . *SPIE*, 2007, 6517: 651708/1-651708/10.
- [19] MEILING H, BOON E, BUZING N, *et al.* . Performance of the full-field EUV systems[J] . *SPIE*, 2008, 6921: 69210L/1-69210L/13.
- [20] MEILING H, BUZING N, CUMMING S K, *et al.* . EUVL systems: moving towards production[J] . *SPIE*, 2009, 7271: 727102/1-727102/15.
- [21] HARNED N, GOETHALS N, GROENEVELD R, *et al.* . EUV lithography with the Alpha Demo Tools: status and challenges[J] . *SPIE*, 2007, 6517: 651706/1-651706/12.
- [22] WAGNER C, HARNEDA N, KUERZB P, *et al.* . EUV into production with ASML s NXE platform[J] . *SPIE*, 2010,

- 7636: 76361H/1-76361H/16.
- [23] MIURA T, MURAKAMI K, SUZUKI K, *et al.*. Nikon EUVL development progress summary[J]. *SPIE*, 2006, 6151: 1-10.
- [24] MIURA T, MURAKAMI K, KAWAINIKON H, *et al.*. EUVL development progress update [J]. *SPIE*, 2010, 7636: 76361G/1-76361G/16.
- [25] MORI I, SUGA O, TANAKA H, *et al.*. Selecte s EUV program: progress and challenges[J]. *SPIE*, 2008, 6921: 692102 / 1-692102 /12.
- [26] GOLDSTEIN M, HUDYMA R, NAULLEAU P, *et al.*. Extreme-ultraviolet microexposure tool at 0.5 NA for sub-16 nm lithography[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(24) : 2995-2997.
- [27] SOUFLI R, SPILLER E, SCHMIDT M A, *et al.*. Multilayer optics for an extreme ultraviolet lithography tool with 70 nm resolution[J]. *SPIE*, 2001, 4343: 51-59.
- [28] CHEN L, MICHAEL, DESCOUR R, *et al.*. Multilayer-coating-induced aberrations in extreme-ultraviolet lithography optics[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(1) : 129-135.
- [29] MICHALOSKI P. Requirements and designs of illuminators for microlithography[J]. *SPIE*, 2004, 5525: 1-10.
- [30] HAGA T, KINOSHITA H. Illumination system for extreme ultraviolet lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1995, 13(6) : 2914-2918.
- [31] KOMATSUDA H. Novel illumination system for EUVL[J]. *SPIE*, 2000, 3997: 765-776.
- [32] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics 7th Edition*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [33] HUDYMA R M. High numerical aperture projection system for extreme ultraviolet projection lithography: US, 6072852 [P]. 2000-06-00.
- [34] CHAPMAN H N, HUDYMA R M, SHAFER D R, *et al.*. Reflective optical imaging system with balanced distortion: US, 5973826[P]. 1999-10-26.
- [35] HUDYMA R M. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet projection lithography: US, 6033079[P]. 2000-03-07.
- [36] MARINESCU O, BOCIORT F. Saddle-point construction in the design of lithographic objectives[J]. *Opt. Eng.*, 2008, 47(9) : 093002 /1-093002/6.
- [37] LOWISCH M, KUERZ P, MANN H-J, *et al.*. Optics for EUV production[J]. *SPIE*, 2010, 7636: 763603 /1-763603/11.
- [38] ANTONI M, SINGERA W, SCHULTZ J, *et al.*. Illumination optics design for EUV-lithography[J]. *SPIE*, 2000, 4146: 25-34.
- [39] MURAKAMI K, OSHINO T, KONDO H. Development of optics for EUV lithography tools[J]. *SPIE*, 2007, 6517: 65170J/1-65170J/8.
- [40] OSHINO T, SHIRAIISHI M, KANDA K, *et al.*. Development of illumination optics and projection optics for high-NA EUV exposure tool(HiNA) [J]. *SPIE*, 2003, 5037: 75-81.
- [41] SMITH D G. Modeling EUVL illumination systems[J]. *SPIE*, 2008, 7103: 71030B/1-71030B/8.

作者简介: 王丽萍(1981—),女,吉林长春人,助理研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: wlp8121@126.com