

大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计

刘 菲 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(筹), 北京 100081)

摘要 极紫外光刻技术(EUVL)是半导体制造实现 22 nm 及以下节点的下一代光刻技术,高分辨投影物镜的设计是实现高分辨光刻的关键技术。为设计满足 22 nm 产业化光刻机需求的极紫外光刻投影物镜,采用 6 枚高次非球面反射镜,像方数值孔径达到 0.3,像方视场宽度达到 1.5 mm。整个曝光视场内的平均波像差均方根值(RMS)为 0.0228λ ,不采用任何分辨率增强技术的情况下,75 nm 光学成像的焦深内,25 nm 分辨力的光学调制传递函数(MTF)大于 45%。在部分相干因子为 0.5~0.8 的照明条件下,畸变小于 1.6 nm,线宽变化小于 1.6%。物面到像面的距离为 1075 mm,像方工作距大于 30 mm。该物镜结合离轴照明或相移掩模等分辨率增强技术,能够在更大的焦深内实现 22 nm 光刻分辨率的光刻胶成像,满足半导体制造中 22 nm 节点技术对产业化极紫外光刻物镜的需求。

关键词 光学设计;投影物镜;高次非球面;极紫外光刻(EUVL)

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0222003

Design of High Numerical Aperture Projection Objective for Industrial Extreme Ultraviolet Lithography

Liu Fei 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. Design of the projection objective is a core technology for the high-resolution lithography. An optical projection system with six high-order aspheric mirrors is presented to meet the industrial needs of the extreme ultraviolet lithography at 22 nm node. In the catoptrics embodiment of the present design, an image numerical aperture of 0.3 and a field width of 1.5 mm are obtained resulting in a working resolution of 25 nm across the exposure field, while the depth of focus is greater than 75 nm and modulation transfer function (MTF) larger than 45% without any resolution enhancement technologies. The mean wave front error of 0.0228λ (RMS) is reached. And the distortions of all field points are below 1.6 nm, CD (critical dimension) error is smaller than 1.6% while it is partial coherently illuminated (partial coherent factor 0.5~0.8). The total length of the system is 1075 nm. Image working distance is above 30 mm. Combined with resolution enhancement technologies, such as off-axis illumination or phase-shift mask, a greater depth of focus for 22 nm resolution can be achieved within the photoresist to meet extreme ultraviolet lithography lens industry need with 22 nm nodes.

Key words optical design; projection objective; high-order asphere; extreme ultraviolet lithography (EUVL)

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 340.7480; 140.7240

收稿日期: 2010-05-14; 收到修改稿日期: 2010-07-16

基金项目: 国家科技重大专项, 教育部长江学者特聘教授奖励计划, 北京理工大学基础研究基金(20090442019)和北京理工大学优秀青年教师资助计划扩展项目(2010CX04020)资助课题。

作者简介: 刘 菲(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事极紫外光刻系统光学设计方面的研究。

E-mail: liufeicat@163.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(EUVL)投影物镜是极紫外光刻系统的重要组成部分,有着高像质、高分辨率的设计要求。极紫外光刻使用波长为 $10\sim 14\text{ nm}$ 的光源照明,由于几乎所有已知光学材料在这一波段都具有强吸收性,无法采用传统的折射式光学系统,所以极紫外光刻系统的照明系统、掩模和投影物镜均采用反射式设计,多数物镜设计使用偶数片反射镜,掩模和硅片置于投影物镜两侧,保证同步工件台有足够的装设空间。为使光刻机掩模工件台和硅片工件台以适当速度同步扫描,极紫外光刻投影物镜的放大倍率通常为 $1/4$ 或 $1/5$ 。

世界三大光刻机厂商 ASML、Nikon 和 Canon 都极为重视极紫外投影物镜的设计和制造。已经公开的极紫外投影物镜设计按镜片数目可分为 2 反射镜、4 反射镜、6 反射镜、8 反射镜和 10 反射镜设计等^[1]。2 反射镜和 4 反射镜设计多用于极紫外光刻原理装置、实验样机和测试系统^[2~4];6 反射镜设计能满足 22 nm 以下节点技术产业化对极紫外光刻物镜的需求^[5];8 反射镜和 10 反射镜设计主要用于学术研究和基础研究。除上述偶数片设计外,另有少量奇数片设计见于专利和论文^[6~8]。与本设计同类的典型 6 反射镜设计有 Carl Zeiss 公司的 Rusell Hudyma 的设计, J. M. Bratt 的设计等, SVG 公司的 David. M. Williamson 的设计以及 Nikon 公司的 Tomowaki 的设计等,以上设计的像方数值孔径(NA)多为 0.25 ,视场宽度为 $1.5\sim 2\text{ mm}$,放大倍率均为 $1/4$ ^[9~14]。国内李艳秋^[15]也进行了极紫外光刻技术光学设计的研究,其 6 镜投影物镜设计的像方数值孔径是 0.25 ,在 $26\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的成像视场内,光学分辨力达到 50 nm 时,光学调制传递函数(MTF)大于 80% ;MTF 为 45% 时,最佳像面处的光学分辨力为 25 nm 。杨雄等^[16]通过改进近轴搜索设计方法,设计出 4 反射镜和 6 反射镜系统,其中 4 反射镜系统,像方数值孔径为 0.1 ,视场宽度为 1 mm ,分辨力为 83 nm ,畸变大于 8 nm ;6 反射镜系统像方数值孔径为 0.25 ,视场宽度为 1 mm ,分辨力为 28 nm ,畸变小于 3 nm 。6 反射镜系统满足了 30 nm 以上技术节点要求。目前国内外已发表的 6 反射镜投影物镜设计像方数值孔径多为 0.25 ,完全能够达到 32 nm 技术节点的分辨率要求,但是对光刻曝光所需焦深内的像质变化和部分相干光照明条件下的成像性能未作出充分研究和论述,同时,以上设计尚不能满足 22 nm EUVL

技术节点的需求。

本文采用分组设计的方法,使用 6 枚非球面反射镜,由对小数值孔径初始结构的优化开始,逐步增大数值孔径和非球面次数,设计出像方数值孔径达到 0.3 的极紫外光投影光刻物镜,在不采用任何分辨率增强技术的情况下,该物镜能达到 25 nm 分辨力。从调制传递函数(MTF)、波相差均方根(RMS)、斯特雷尔比(Strehl ratio),焦面偏移以及部分相干照明条件下的畸变和线宽变化等方面对所设计的物镜进行了像质分析。

2 极紫外光刻投影物镜设计要求

典型的 EUV 投影物镜为共轴光学系统,物面、像面及所有反射镜均关于光轴旋转对称,这一设计有利于装调并且尽量避免了可能的像差。针对分辨力为 22 nm ,像方数值孔径为 0.3 的设计指标,极紫外光刻物镜宜采用 6 枚高次非球面镜片,最高非球面系数为 $10\text{th}\sim 20\text{th}$,实现紧凑的光路结构和优良的成像质量,同时兼顾了成像质量、工程可实现性和良好的经济实用性。

由于反射系统中存在光路折叠和遮挡,投影物镜应采用环形离轴视场设计,典型的设计值为:视场宽 $1\sim 2\text{ mm}$,弦长 26 mm ,弦角度不大于 60° 。

一般来说,除给定的设计指标外,EUV 投影物镜设计还需要满足下列要求:1)可实现的光阑面设置,一般位于第 $2\sim 5$ 个反射面的某一面上;2)足够大的物方、像方工作距,保证掩模和硅片的轴向安装空间;3)无渐晕设计,每个反射面的反射区域和通光区域之间都要留有一定的边缘余量;4)能够配合反射式掩模使用,光线以小角度入射到掩模上;5)高分辨率;6)极小的畸变;7)像方远心。

3 极紫外光刻物镜设计

极紫外光刻物镜的设计分为两个阶段:第一阶段为初始结构设计,第二阶段为系统优化设计。在初始结构设计阶段,由于极紫外光刻物镜是大数值孔径的反射式物镜,光路较为紧凑,为避免系统产生渐晕,初始结构必须具有在大数值孔径条件下继续优化且不产生光路遮挡的潜力。在系统优化设计过程中,必须慎重选择优化策略,合理安排优化步骤,使得投影物镜结构在不产生剧烈变化的情况下,实现优化函数的持续收敛,最终达到符合像质要求的设计。

3.1 初始结构设计

光刻投影物镜分为 2 个分镜头组 G1 和 G2, 前 4 枚镜片组成 G1 镜头组, 末 2 枚镜片组成 G2 镜头组。设计得到的系统二维结构如图 1 所示。

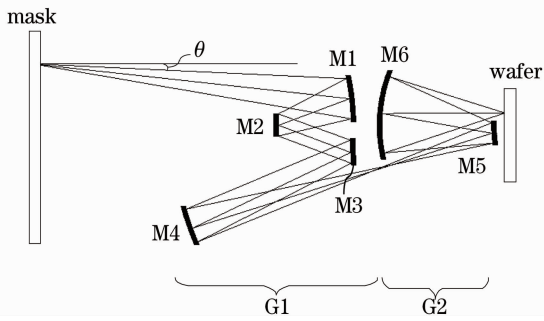


图 1 极紫外光刻物镜二维结构图

Fig. 1 2D design of the EUVL projective

两镜头组之间有中间像, 系统设置中间像的目的是为了减小光束口径, 如果反射式投影物镜按照光路“展开”, 会形成一系列的“腰”和“肚”, 正反射镜和负反射镜结合以校正像差。系统总长为 1075 mm, 采用离轴环形视场, 物方视场宽度为 1.5 mm (25 ~ 26.5 mm), 弦长 26 mm, 如图 2 所示。由于系统关于 y 轴对称, 所以只在 x 正方向取 32 个视场点进行计算, 又由于视场是圆心在光轴上的同心圆环的一部分, 关于光轴旋转对称, 所以仅取子午面 (yz 面) 上的 16 个视场点 (F1~F16) 进行像质评价, 子午面外的 16 个视场点用于判断系统有无渐晕, 同心圆环半径 R 为 25 mm。

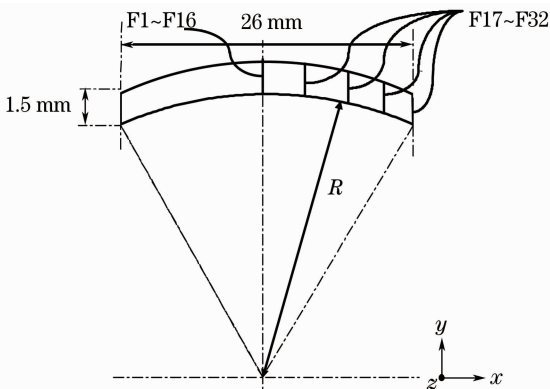


图 2 像方环形视场上的 32 个视场点

Fig. 2 32 view-field points on the image ring field

对于靠近物方的光路设计, 物方主光线与光轴夹角应控制在 6° 以内, 但角度不宜过小, 应保证在要求的物方数值孔径时, 光束的上边缘光线与光轴夹角 $\theta > 0$ (由光轴顺时针转到光线方向为正), 否则

将导致照明系统出射的光线无法进入投影物镜, 如图 1 所示。由于投影物镜系统为视场离轴设计, 初始结构应当很好地校正匹兹万场曲, 满足平像场条件, 即沿光线传播方向, 系统的匹兹万和为零。G1 镜头组为满足平像场条件, 第 1 镜和第 4 镜为凹面, 可以会聚光束, 减小光束口径, 第 2 镜和第 3 镜为凸面, 用于平衡第 1 镜和第 4 镜产生的匹兹万场曲。圆形光阑面设置在第 2 镜上, 可避免对其进行非对称加工, 降低了加工难度。

为了减小畸变并且保证得到足够的焦深, 光刻物镜应尽量达到像方远心的要求, 像方主光线出射角度与光轴夹角控制在 0.25° 以下。像方工作距离不宜过小, 控制在 30 mm 以上, 另外为防止第 6 反射镜上的反射光线和通过光线相互重叠, 像方工作距离也不宜过大, 这里控制在 45 mm 以下。以上两个条件将 G2 镜头组的参数控制在了一个较小的可调范围内。由设计经验可知, 第 6 面镜片的反射和通光部分光路最容易发生重叠, 在实际的制造中表现为通光口径的减小, 产生渐晕, 为了避免这一问题, 将中间像的位置设置在第 6 面镜片处, 由于中间像处光束口径最小, 可以最大程度上避免光路反射区域和通光区域发生重叠。

3.2 系统优化设计

由于极紫外光刻物镜极高的分辨率要求, 系统最后的优化函数值应该控制在一个很小的水平。极紫外光刻物镜的系统结构参数包括 7 个光学面间距、6 个曲率半径、每个反射面又设置了 4~16 次非球面系数 (共 $6 \times 7 = 42$ 个非球面系数), 如果在初始结构的基础上, 将这些参数同时设为变量进行优化, 误差评价函数可能很难收敛到一个较小的水平, 使用全局优化方法得到的结果又可能极大地偏离初始设计结构, 所以在大多数情况下, 不应采用这种优化方法。

为解决以上难题, 使用 CODEV 光学设计软件对系统进行渐进式优化, 图 3 为渐进式优化方法示意图, 以小像方 NA 设计为初始设计, 设置少量非球面系数为变量, 观察和控制初级像差的值, 然后增大像方 NA, 同时由低次到高次逐次加入非球面系数, 使得误差函数从一个较小的水平值上继续收敛, 保证系统结构的渐进变化。同时, 将畸变控制、放大倍率控制、系统总长控制, 后工作距控制等作为限制条件, 在镜头的优化过程中, 约束物方光线与像方光线的入射角度, 获得像质较好的优化设计。

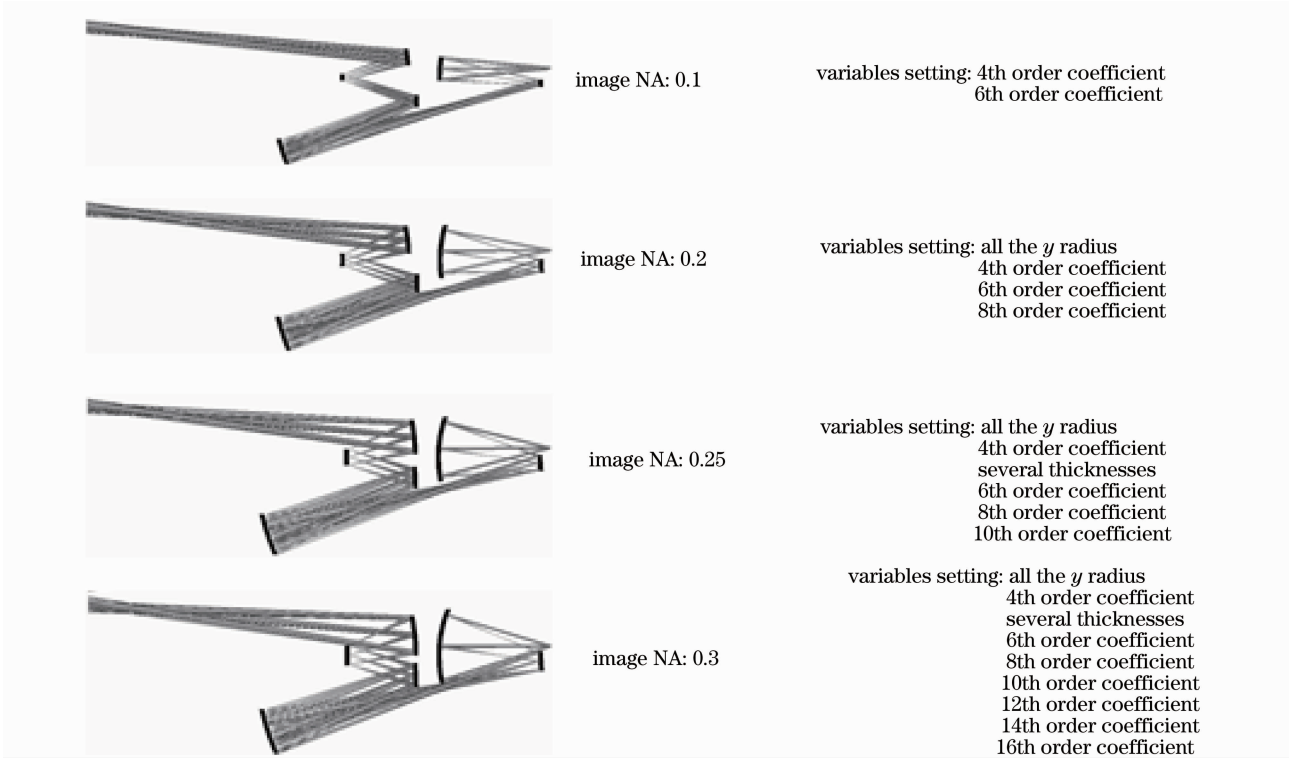


图 3 渐进式优化方法示意图

Fig. 3 Schematic of gradual optimization method

4 像质分析

采用调制传递函数、波像差均方根、斯特雷尔比、焦面偏移以及部分相干照明条件下的畸变和线宽均匀性等指标对极紫外光刻物镜进行像质评价。其中调制传递函数、波像差均方根和斯特雷尔比是对一般光学系统进行成像质量评价时常用的评价指标,也同样适用于评价极紫外光刻物镜;除此之外,由于极紫外光刻系统采用部分相干光进行照明,故对传统部分相干照明条件下,光刻物镜的畸变和线宽均匀性也进行了评价。

4.1 调制传递函数

极紫外光刻物镜的成像质量是极紫外光刻物镜设计的核心要求。分辨力是光刻投影物镜最重要的技术指标之一,由光刻物镜分辨力公式

$$f_{RES} = k_1 \lambda / NA,$$

当 k_1 因子为 0.5 时,针对分辨力为 25 nm 的光学成像,像方数值孔径 $NA=0.3$ 的投影物镜可以满足要求。设计得到的物镜系统的像方数值孔径为 0.3,经优化得到调制传递函数函数如图 4 所示,已经接近衍射极限。由于光刻胶是强非线性介质,调制传递函数为 0.45 时,光刻胶中的成像具有很好的对比度。如图 5 所示,在 75 nm (± 37.5 nm) 的光学焦深范围内,空间频率为 2×10^5 lp/mm (对应线宽为 25 nm) 的线

条在系统全视场范围内传递函数均大于 45%。

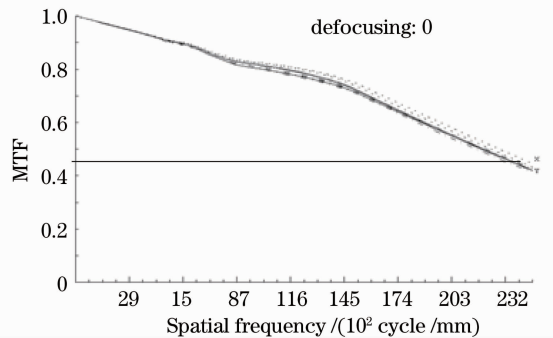


图 4 调制传递函数与空间频率关系

Fig. 4 Relation of MTF with spacial frequency

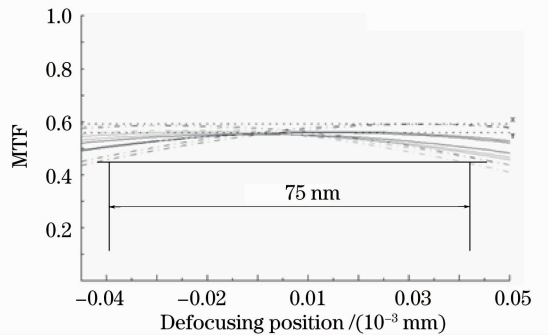


图 5 空间频率为 2×10^4 lp/mm 时 MTF 随焦深的变化

Fig. 5 MTF versus depth of focus when spatial frequency is 2×10^4 lp/mm

4.2 均方根波像差和斯特雷尔比

均方根波像差是表征一个光学系统整体成像性能的重要指标,同类光刻物镜的RMS约为 $0.02\lambda\sim 0.04\lambda$ 。如图6所示,本设计子午面上16个视场的波像差RMS小于 0.037λ ,其中最大值对应于第16视场(0,25 mm),其值为 0.0369λ ,全视场波像差RMS的平均值为 0.0228λ 。如图7所示,子午面上16个视场的斯特雷尔比均大于0.94,其中最差斯特雷尔比发生在第16视场,其值为0.947。如图8所示,最大波面PV为 0.191λ ,对应于第16视场(0,25 mm)。

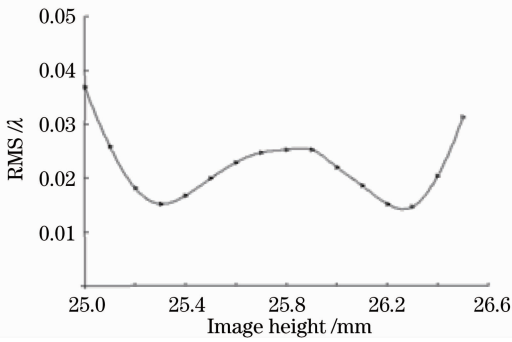


图6 子午面上16个视场点的波像差RMS值
Fig. 6 Wave-front aberration RMS of 16 field points on meridional plane

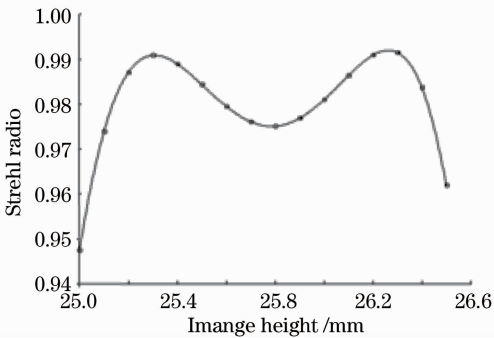


图7 子午面上16个视场点的斯特雷尔比
Fig. 7 Strehl ratio of 16 field points on meridional plane

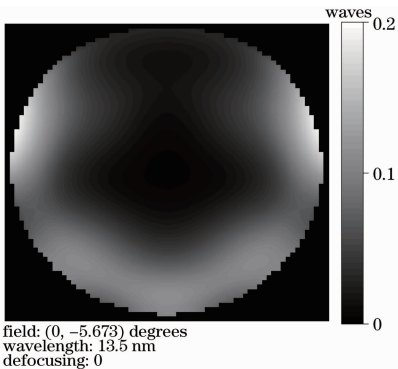


图8 第16视场的波面图
Fig. 8 Wave front of F16view field

4.3 焦面偏移

由于系统存在像差,所以各视场点的最佳像面位置并不重合,利用光学设计软件CODEV对各视场成像质量进行折中,选取一个最佳像面,计算各视场点最佳像面对系统最佳像面的偏离。其中各视场中偏离最大者对系统最佳像面的偏移为22 nm,小于光学焦深的1/3。

4.4 畸变和线宽误差

极紫外光刻系统采用部分相干光源照明,部分相干因子的传统定义为 $\sigma = D'/D$,其典型值为 $0.5\sim 0.8$,其中 D' 为照明系统出瞳直径, D 为投影物镜入瞳直径。给出了在部分相干因子 σ 为 $0.5\sim 0.8$,分辨力为22 nm时,光刻物镜的畸变(distortion)和线宽误差(CD error)。

如图9所示,在部分相干因子为 $0.5\sim 0.8$ 时,子午面上16个视场点的y方向静态畸变均小于1.6 nm。由于系统是非相干照明条件下的非物方远心设计,所以在相干因子较小时,静态畸变较大。当相干因子 σ 为0.5时,最大的静态畸变发生在第4视场点(0,26.2 mm),其值为1.55 nm。

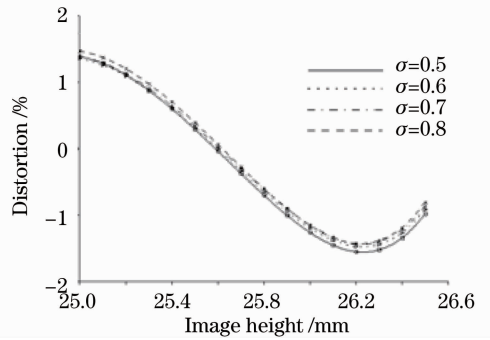


图9 子午面上16个视场点的y方向静态畸变
Fig. 9 Static distortion of the 16 field point on the meridional plane in y direction

为保证投影物镜成像位置的准确度和套刻精度,加工装调后的线宽误差应小于10%,设计线宽误差应小于3%,由于系统关于光轴旋转对称,所以只评价系统在y方向和45°方向的线宽误差。如图10所示,在相干因子 σ 为 $0.5\sim 0.8$ 时,子午面上视场的y方向线条的线宽误差均小于1.1%,其中相干因子为0.5时,第6视场(0,26 mm)线宽误差最大,其值为1.025%。如图11所示,子午面上16个视场45°方向线条线宽误差均小于1.6%,其中相干因子为0.5时,第1视场(0,26.5 mm)线宽误差最大,其值为1.6%。

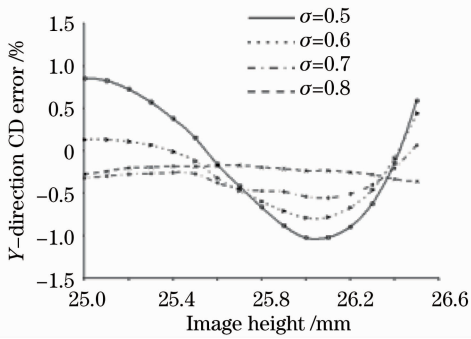


图 10 子午面上 16 个视场点的 y 方向线条的线宽误差
Fig. 10 CD error of the 16 field points on meridional plane in y direction

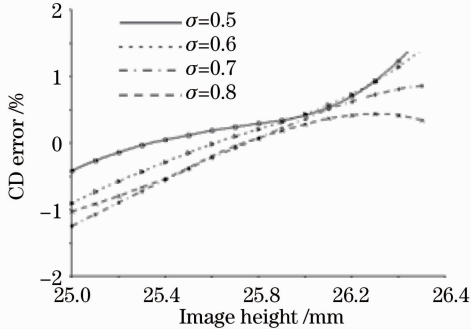


图 11 子午面上 16 个视场点的 45° 方向线条的线宽误差
Fig. 11 CD error of the 16 field points on meridional plane in 45° direction

5 初步公差分析

使用光学设计软件 CODEV 可以对光学系统进行初步的公差分析,对各反射镜的加工误差和系统装调误差对光学调制传递函数的影响进行了分析。当系统的 MTF 下降 10% 时,公差分析结果如下:

1) 元件加工误差:在系统 6 枚反射镜中,第 4 反射镜的半径误差要求最为严格,其误差范围要求 ± 100 nm;第 3 反射镜半径误差要求最为宽松,仅为 0.012 mm;余下 4 枚反射镜的半径误差在 $\pm 0.0005 \sim 0.003$ mm 之间。6 枚反射镜的配样板光圈均小于 0.25λ ,其中第 2 反射镜即光阑面的配样板光圈要求小于 0.02λ 。

2) 元件装调误差:6 枚反射镜之间的光学间距误差在 $\pm 0.1 \sim 0.4$ μm 之间。光阑面偏心误差要求小于 0.3 μm ,其余各面偏心误差均应小于 0.08 μm ,倾斜误差应小于 7×10^{-7} rad。

由以上分析可得出,为保证良好的成像质量,极紫外投影光刻物镜对元件加工和装调的精度要求非常严格。为了保证极紫外光刻物镜能够实现高分辨率,还需要对加工粗糙度等公差进行进一步的计算

和分析。

6 结 论

根据 22 nm 极紫外光刻技术的要求,设计了一套由 6 枚反射镜组成的投影物镜,照明波长 13.5 nm,放大倍率为 1/5,像方数值孔径达到 0.3,静态曝光场为 26 mm \times 1.5 mm,通过步进一扫描机制达到全曝光视场为 26 mm \times 33 mm。对这一系统进行的像质分析和误差分析结果表明,整个曝光视场内的平均波像差均方根值为 0.0228λ ,在 75 nm 的光学成像焦深内,25 nm 分辨力的光学调制传递函数大于 45%,相干因子为 0.5~0.8 的照明条件下畸变小于 1.6 nm,线宽变化小于 1.6%,物面到像面的距离为 1075 mm,像方工作距大于 30 mm。该物镜结合离轴照明或相移掩模等分辨率增强技术,能够在更大的焦深内实现 22 nm 光刻分辨率的光刻胶成像,满足半导体制造中 22 nm 技术节点对产业化极紫外光刻物镜的需求。

参 考 文 献

- Mann, H. U. R. W. Ulrich. Reflective high-NA projection lenses [C]. *SPIE*, 2005, **5962**: 332~339
- T. Peschel, H. Banse, C. Damm. Mounting an EUV schwarzschild microscope lens [C]. *SPIE*, 2005, **5962**: 430~437
- Wang Liping, Jin Chunshui, Zhang Lichao. Two-mirror system design study of reduced projection optics for EUV lithography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 113~117
王丽萍,金春水,张立超.极紫外投影光刻两镜微缩投影系统的光学设计[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12): 113~117
- Jin Chunshui, Ma Yueying, Pei Shu *et al.*. Development of elementary arrangement for extreme ultraviolet projection lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 852~857
金春水,马月英,裴舒等.极紫外投影光刻原理装置的集成研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 852~857
- H. Meiling, N. Buzing, K. Cummings. EUVL system: moving towards production [C]. *SPIE*, 2009, **7271**: 727102
- Udo Dinger. Microlithography projection objective and projection exposure apparatus [P]. U. S. Patent US20060198029. 2006-9
- Josephus J. M. Braat. Mirror projection system for a scanning lithographic projection apparatus, and lithographic apparatus comprising such a system [P]. U. S. Patent US, 6199991. 2001-03-13
- Hudyma, R. M. S. R. High numerical aperture projection system for extreme ultraviolet projection lithography [P]. U. S. Patent US, 6072852, 2000-06-06
- R. Hudyma. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography [P]. US, 6033079, 2000-03-07
- R. Hudyma. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography [P]. U. S. Patent US, 6188513, 2001-02-13
- R. Hudyma. High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography [P]. U. S. Patent US, 6318869, 2001-11-20
- Josephus J. M. Braat. Mirror projection system for a scanning

- lithographic projection apparatus, and lithographic apparatus comprising such a system. [P]. U. S. Patent US, 6255661, 2001-07-03
- 13 D. M. Williamson. High numerical aperture ring field optical reduction system[P]. U. S. Patent US, 5815310, 1998-09-29
- 14 Tomowaki Takahashi. Projection optical system and exposure apparatus equipped with the projection optical system[P]. U. S. Patent US, 20040125353, 2004-07-01
- 15 Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868
- 李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 865~868
- 16 Yang Xiong, Xing Tingwen. Design of extreme ultraviolet lithographic objectives[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2520~2523
- 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