

文章编号: 0253-2239(2004)07-865-4

50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究*

李艳秋

(中国科学院电工研究所, 北京 100080)

摘要: 极端紫外光刻(EUVL)作为实现 100~32 nm 特征尺寸微细加工的优选技术,其光刻物镜的光学性能是实现高分辨图形制作的关键。利用光学设计软件 CODE V 对 6 枚非球面反射镜构成的光刻物镜设计和光学性能分析,其分辨力可以实现 50 nm,曝光面积为 26 mm×1 mm。结果表明,光学性能对曝光场点的依赖关系。在全曝光场中进行了光学性能分析,其最大畸变为 3.77 nm,最大波面差为 0.031λ(均方根值),该缩小投影物镜完全可以满足下一代极端紫外光刻机的性能要求。

关键词: 应用光学; 光学设计; 极端紫外光刻; 下一代光刻

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Optical Performance of Extreme-Ultraviolet Lithography for 50 nm Generation

Li Yanqiu

(The Institute of Electrical Engineering, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 30 May 2003; revised 17 September 2003)

Abstract: Extreme-ultraviolet lithography (EUVL) is one of the promising technologies for the fabrication of critical dimension of 100~32 nm. The optical performance of projection optics is most important to realize the fabrication of high resolution pattern. The design of 6-mirror projection optics of extremes-ultraviolet lithography is presented and the optical performance is analyted by using optical design softwawe CODE V. The resolution can reach 50 nm and the exposure area is 26 mm × 1 mm. The performance of optics depends on the field points of the exposure area. The optical evaluation of optics is completed at full exposure area. The maximum distortion of 3.77 nm and the maximum wavefront error of 0.031λ (root-mean-square) can be reached. This projection optics can fully meet the requirements of EUVL for next generation.

Key words: applied optics; optical design; extreme-ultraviolet lithography; next-generation lithography

1 引 言

20 世纪 80 年代初期的芯片制备技术采用 g-line(436 nm 波长的光源)步进光刻机,其光刻的分辨力为 1 μm,20 世纪 90 年代,KrF 激光(248 nm)作为光源的光刻机实现了 200 nm 单线光刻分辨力(DRAM 256 Mb)。目前,用 ArF 激光(193 nm)作

为光源的扫描-步进光刻机可以实现 90 nm 单线光刻分辨力(DRAM 4 G,每平方厘米可以制备 1.8 亿个晶体管),使集成电路的集成度越来越高,预计 2012 年可实现 30 nm 单线光刻分辨力(DRAM 256 G)^[1]。在过去的 20 年中,传统光刻机(基于折射光学设计的物镜)在实现小尺寸光刻的过程中,是沿着缩短曝光波长、增大物镜数值孔径(NA)并结合其他分辨力增强技术(例如:离轴照明、相移掩模、双曝光等)的发展路径来实现的^[2]。ArF 光刻机结合分辨力增强技术实现 90 nm 单线光刻分辨力时,数值孔径已经达到了 0.85。2003 年 3 月 SPIE 会议报

* 中国科学院“引进国外杰出人才”2001 年资助课题。

E-mail: liyanq@mail. iee. ac. cn

收稿日期:2003-05-30;收到修改稿日期:2003-09-17

道了尼康,佳能和阿姆斯特丹欲通过浸没透镜实现数值孔径大于 1 ($NA = n \sin \theta$) 的物镜设计,将 ArF 光刻分辨力向 70 nm 延伸^[3]。然而,液体中的物镜、硅片、工件台、和抗蚀剂材料面临着许多工程技术问题有待解决(例如:液体折射率的均匀性,气泡等),同时,大数值孔径实现高分辨力光刻以牺牲焦深为代价[分辨力: $R = k_1 \lambda / NA$, 焦深: $F_D = k_2 \lambda / (NA)^2$],同时导致掩模误差因子的增加,造成工艺误差允许度的下降,使线宽均匀性无法达到制造的要求^[2]。因此,传统光学光刻在实现 50~30 nm 单线光刻分辨力时将遇到了无法克服的挑战。

极端紫外光刻(Extreme ultraviolet lithography, EUVL)原理实验早在 20 世纪 80 年代由日本木下提出并验证^[4],极端紫外光刻利用波长 13.5 nm 或 11.2 nm 光源(Mo/Si 或 Mo/Be 多层膜对该波长具有较高的反射率)、非球面反射物镜实现缩小投影曝光,由于波长的减小和使用非球面反射镜,极端紫外光刻作为实现 100 nm 直到 30 nm 分辨力的优选光刻技术之一得到了广泛的重视。20 世纪 90 年代末期,日本、美国和欧洲在政府经费支持下,开始了较大规模的原理样机研制和产业化设备的开发,近五年取得了较大的进展^[5~11]。

本文将从下一代产业化极端紫外曝光机要求出发,介绍极端紫外光刻物镜的设计要求,给出 6 枚非球面反射镜物镜系统的光学设计,这一设计在 $NA = 0.25$ 和 $1 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ 环带曝光面积内,实现 35 nm 分辨力,通过掩模硅片同步扫描实现 $26 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ 大面积曝光。利用光学设计软件 CODE V 对极端紫外光刻物镜进行 $1 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ 曝光区域内光学特性分析,曝光区域内各点的光学特性不同,全场光学性能分析表明该物镜设计使环带内所有的场点基本满足 50 nm 分辨力光刻的要求。

2 下一代产业化极端紫外曝光机对物镜的要求

早期赋予第一代极端紫外光刻的使命是实现特征尺寸 $L_{CD} = 70 \sim 100 \text{ nm}$,为了这一目标,中国长春光学精密机械与物理研究所、日本姬路工业大学同步辐射实验室和美国 Sandia 国家实验室分别研制了工程试验的极端紫外光刻装置^[4,6,10],这三套试验装置的物镜分别由 2 枚、3 枚和 4 枚非球面反射镜组成。但是,传统 ArF 光刻机通过分辨力增强技术

实现了 100 nm 特征尺寸(临界尺寸)的加工能力,所以,迫使极端紫外光刻的研制目标移向 $L_{CD} < 50 \text{ nm}$ 。2 枚、3 枚和 4 枚非球面反射镜构成的极端紫外光刻物镜无法通过进一步增大数值孔径来实现 50 nm 分辨力同时保证合理的曝光面积、畸变和像差的控制。进一步增大数值孔径带来的像差,必须通过增加非球面镜的数目来进行补偿。

在一定分辨力和产率的要求下,必须考虑高分辨力和 L_{CD} 控制、系统集成化、成本合理化、加工和检测精度、系统调试精度和工件台运动精度等因素。半导体工业对特征尺寸为 L_{CD} 的器件进行加工时,要求加工的图形均匀性满足: $\Delta L_{CD} < L_{CD} / 10$, 畸变: $D < L_{CD} / 10$, 套刻精度小于 $L_{CD} / 3$ 。一般来讲,光学物镜分担上述公差的二分之一,因此,下一代产业化极端紫外曝光机投影物镜设计应该考虑以下几个方面: 1) $L_{CD} = 50 \text{ nm}$, $\Delta L_{CD} < 2.5 \text{ nm}$, 畸变 $D < 2.5 \text{ nm}$, 波面差 $E_{WF} < 0.03\lambda$ (RMS); 套刻精度小于 3.6 nm; 2) 反射镜数目不大于 6 枚; 3) 曝光面积 $S \geq 26 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 保证较高的产率; 4) 远心聚焦系统; 5) 非球面偏差范围在加工检测限制的范围内; 6) 设计要控制每一个表面的入射角和多层膜设计的匹配; 7) 缩小倍率在 5:1, 并控制其变化在 L_{CD} 控制要求范围内; 8) 尽可能小的镜面尺寸; 9) 掩模到硅片的距离在 1500 mm 左右。本文介绍的产业化极端紫外光刻缩小投影物镜的主要技术指标如表 1 所示。

Table 1 The specifications of EUVL production tools

Parameters	Specification
Wavelength λ	13.5 nm
Numerical aperture NA	0.25
Reduction	5:1
Single field	26 mm \times 1 mm
Resolution	50 nm
RMS wavefront error	0.03 λ
Depth of focus	0.21 μm
Total track	<1500 mm
Aperture stop	Assemble on M_2 mirror

3 反射物镜的设计和光学性能评价

光刻物镜设计的中心任务是确定反射镜的结构、曝光波长和数值孔径来实现目标分辨力。由于 Si/Mo 和 Si/Be 多层反射膜在分别 13.5 nm 和 11.2 nm 波长处有最大反射率,考虑 Be 材料的毒副作用,通常采用曝光波长 13.5 nm。为了实现 50 nm 分辨力,需要 $NA = 0.25$ 和 6 枚非球面反射镜构成

的极端紫外缩小投影物镜(缩小倍率为 5)。设计的物镜配置如图 1 所示。极端紫外光源发出的光通过照明系统,以一定的相干因子(例如: $\sigma = 0.7$)和入射角均匀照明在反射掩模上,掩模图形通过缩小投影物镜成像在硅片上。该物镜的主要技术指标如表 1 所示。对于给定系统的技术指标,根据下一代产业化极端紫外曝光机对物镜的要求,确定反射镜的结构和相对位置,通过光学设计软件 CODE V 进行设计和光学性能分析,确定极端紫外光刻物镜基本满足下一代产业化极端紫外曝光机对物镜的设计要求,下面讨论极端紫外光刻物镜的几个主要光学特性。

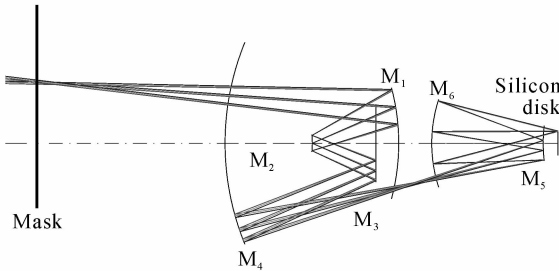


Fig. 1 Layout of 6-mirror optics of EUVL

3.1 光学调制传递函数

光学调制传递函数(MTF)及其随焦点位置的变化,是确定物镜分辨力和焦深的直接评价。由于掩模和芯片上的曝光面积是环带状,曝光区域内各点的光学特性不同,根据其对称性,我们选择 15 个场点进行物镜光学特性的评价,如图 2 所示。

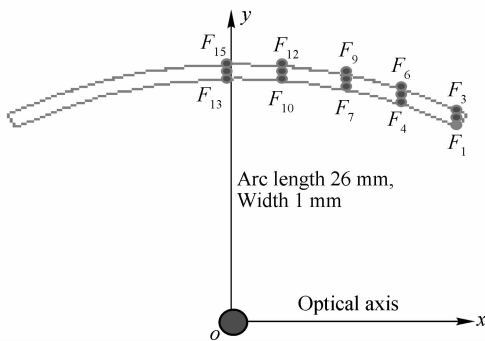


Fig. 2 Optical evaluation is done at 15 field points of exposure area

在全场范围内,图 3 所示的光学调制传递函数(F_{MT})表明,设计的光刻物镜可以在最佳(理想)像面上实现 25 nm 的分辨力(20000 lp/mm, $F_{MT} \approx 45\%$),而在理想像面分辨 50 nm 线对时, $F_{MT} \approx 80\%$ 。

图 4 表明了 50 nm 分辨力(线对)图型的 F_{MT} 随焦点位置变化的情况,这个结果揭示在 210 nm 焦深($F_D = 210$ nm)范围内均可以实现 50 nm 的分辨力($F_{MT} \approx 45\%$)。

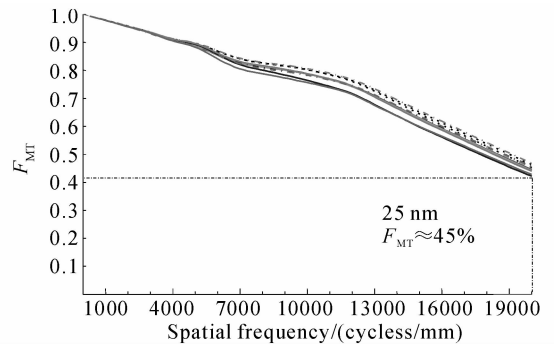


Fig. 3 The spatial frequency dependence of F_{MT}

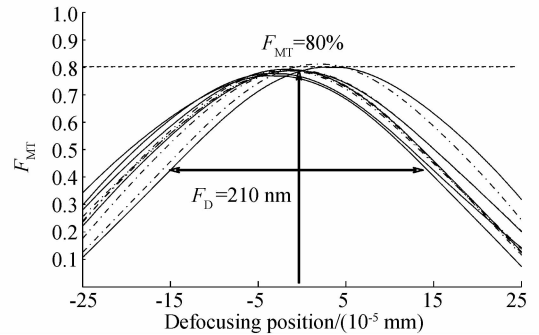


Fig. 4 MTF through focus of EUVL optics

3.2 像散和场曲导致的焦点偏离

像散导致水平方向和垂直方向聚焦在不同的位置,最佳焦点的位置偏离设计的理想像面位置,场曲随之产生。像散和场曲是限制曝光环带宽度的主要因素,导致环带每一个场点 x 方向和 y 方向聚焦位置偏离所设计的理想像面位置,我们用最大偏离值和最小偏离值的差来表示总偏离,即 $F_{tot} = F_{max} - F_{min}$,其最大值 $F_{tot}^{max} = 70$ nm(小于 $F_D/3$)。

3.3 畸变

掩模和硅片以一定的速度进行线性扫描,使掩模板上完整的图形通过缩小投影物镜被刻制到硅片上,它们将沿着图 2 所示的 y 方向进行扫描,这种扫描破坏了静态畸变的对称性,尤其是掩模和硅片扫描速度与物镜的缩小倍率不匹配时,导致成像光学特性随场点的变化,进一步导致像的模糊甚至弯曲。CODE V

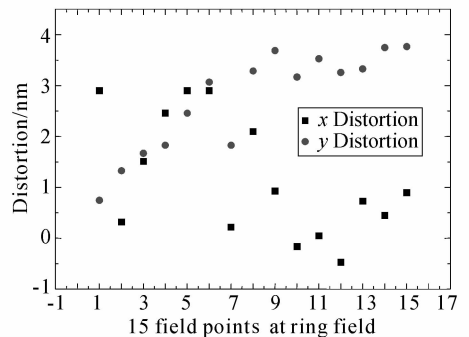


Fig. 5 Distortion of 15 field points at exposure ring area

光线追迹得到 15 个场点的静态畸变如图 5 所示。 x 方向最大畸变为 2.9 nm, 发生在 F_1 场点, y 方向最大畸变为 3.77 nm, 发生在 F_{15} 场点。

3.4 均方根波面差

一个像差得到很好修正的光学系统, 其成像质量不是由个别的像差来衡量, 而是由均方根(RMS)波面差来判断。我们设计的物镜可以很好分辨 50 nm 线对, 多项式泽尼克系数拟合出瞳处均方根波面差对不同场点的依赖关系如图 6 所示, 均方根波面差的最小值为 0.022λ (F_1), 最大值为 0.031λ (F_{15})。 F_{15} 相应的波面差在出瞳处分布(PMA: pupil map)如图 7 所示, 波面差峰谷(P-V)值为 0.21λ 。

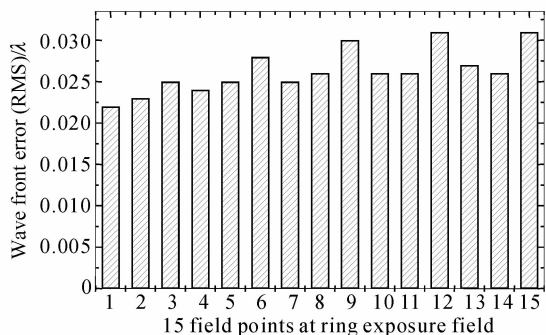


Fig. 6 15 field points dependence of wavefront error RMS (waves)

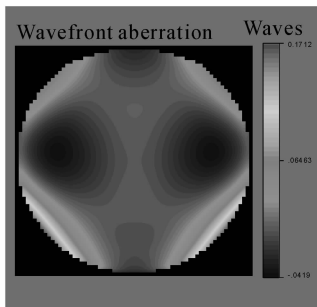


Fig. 7 PMA of F_{15} P-V= 0.21λ

数值孔径为 0.25, 缩小投影成像在 $26\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的环带区域内, 物镜的光学特性随曝光区域内不同的场点而变化。对曝光区域内各点的光学特性进行分析的结果表明, 在理想像面实现 50 nm 分辨力时, $F_{MT} \approx 80\%$, 最大畸变为 3.77 nm, 焦点最大偏离为 77 nm, 最大波面差为 0.031λ (RMS), 基本满足产业化极端紫外光刻机的物镜要求。

参 考 文 献

- 1 Buss D D. Technology in the Internet Era. Proceedings of SPIE-Optical Microlithography X IV, Santa clare: SPIE, 2001, **4346**: X Xi ~ X Xi
- 2 Li Yanqiu. The evolution and a tendency of optical lithography. *Microfabrication Technology* (微细加工技术), 2003, **2**: 1~5 (in Chinese)
- 3 Griff Resor. Lithography Review, *Semi Newsletter Service*, 2002, **4**(9), may, www.semi.org
- 4 Kinoshita H, Kurihara K, Ishii Y *et al.*. Soft X-ray reduction lithography using multilayer mirrors. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **B7**:1648~1652
- 5 Li Yanqiu, Kinoshita H, Watanabe T *et al.*. An illumination system design for three aspherical mirror projection camera of extreme ultraviolet lithography. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(19):3253~3260
- 6 Jin Cunsui, Ma Yueying, Pei Shu *et al.*. Study of the integration of EUVL experimental tool. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 852~857 (in Chinese)
- 7 Ota K, Nishiyama I, Ogawa T *et al.*. Current status of extreme ultraviolet lithography in Japan. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 424~429
- 8 Jin Chunshui, Ma Yueying, Pei Shu *et al.*. Development of an experimental EUVL system. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 418~423
- 9 Watanabe T, Kinoshita H, Nii H *et al.*. Development of the large field extrem ultraviolet lithography camera. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2000, **18**(6):2905~2910
- 10 Lee S H, Tichenor D A, Naulleau P. Lithography aerial-image contrast measurement in the extreme ultraviolet engineering test stand. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2002, **B20**(6): 2849~2855
- 11 Li Yanqiu, Ota K, Murakami K. Thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for EUVL. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, **B21**(1): 127~129

结论 本文介绍了利用 13.5 nm 的极端紫外光源实现 50 nm 分辨力产业化光刻机的光刻物镜的基本设计要求和性能评价结果。6 枚镀有 Si/Mo 多层反射膜的非球面镜构成极端紫外光刻物镜, 其光阑