

文章编号: 1003-501X(2007)12-0113-05

极紫外投影光刻两镜微缩投影系统的 optical 设计

王丽萍^{1,2}, 金春水¹, 张立超¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 极紫外投影光刻(EUVL)两镜微缩投影物镜通常采用 Schwarzschild 结构和平场结构。本文分析了这两种结构在 EUVL 不同发展阶段的设计特点, 并依据有限距反射系统像差理论, 从解析解出发, 设计了两套平场两镜系统, 分别用于对分辨率为 70nm、无遮拦、环形视场扫描曝光系统及目前研制的 EUVL 32nm 技术节点小视场曝光系统的研究。系统设计指标满足极紫外投影光刻要求。

关键词: 极紫外投影光刻; 投影物镜; 平场两镜系统; 光学设计; 光刻技术

中图分类号: TB851

文献标志码: A

Two-mirror system design study of reduced projection optics for EUV Lithography

WANG Li-ping^{1,2}, JIN Chun-shui¹, ZHANG Li-chao¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To study the two-mirror reduced projection optics for Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL), Schwarzschild design form and flat field design form were investigated. An analytic design method for flat field design form was employed. Formulas were set up based on the theory of reflective optics with finite object. The initial design of the two-mirror system free of third order spherical aberration, coma, astigmatism and field curvature were determined. Systems were optimized taking special requirements of EUVL into account. Finally, according to analytic solution, two flat-field imaging systems were designed. It is applied to unobstructed scanning system with 70nm spatial resolution and microfield exposure system for 32nm node. Analysis of design results suggests that the latter can satisfy rigid performance specification of EUVL application.

Key words: EUVL; projection optics; flat field two-mirror two-mirror system; optical design; lithography

引 言

极紫外投影光刻(Extreme Ultraviolet Lithography-EUVL)是最具有竞争力的新一代光刻技术,使用的是 13.0~13.5nm 波段的光源,理论上适用于特征尺寸为 70~30nm 的超大规模集成电路的生产制造。目前 EUVL 正朝向 32nm 技术节点迈进,预计 2010 年将达到 45nm 技术节点。EUVL 的微缩投影光学系统受其工作波段限制,只能采用全反射式系统。考虑到光源功率、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、增加表面所导致的反射光相互干涉、光路内机械结构的遮拦影响,系统要采用尽可能少的偶数片光学元件。因此,极紫外光刻光学系统的设计集中在不多于六片光学元件的光学系统方面。两镜系统的研究

收稿日期: 2007-03-06; 收到修改稿日期: 2007-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69625710)

作者简介: 王丽萍(1981-),女(汉族),吉林长春人,博士研究生,从事极紫外投影光刻微缩投影系统光学设计及计算机辅助模拟装调研究。

E-mail: wlp8121@126.com

是 EUVL 微缩投影光学系统各阶段研究的先导, 在 EUVL 发展中起到重要作用。微缩比为 10~20 的 Schwarzschild 物镜多用于做初期极紫外光刻技术的可行性分析^[1-3]; 具有环形视场、分辨力为 100nm 的平场两镜结构用于无遮拦、扫描曝光系统的初步研究^[4-5]; 矩形视场、数值孔径(NA)为 0.3 的平场两镜结构应用于目前研制的 EUVL 32nm 技术节点的小视场曝光系统^[6-7]。本文分析了这三种系统的设计特点, 依据 Dietrich Korsch 建立的有限距两镜系统初级像差公式^[8], 求出了消球差、慧差、像散及场曲的非球面两镜系统初始结构参数。在此基础上设计了 NA 为 0.15、分辨力优于 70nm、环形视场为 1mm×16mm 和 NA 为 0.3、分辨力优于 32nm、矩形视场为 300μm×500μm 的两套平场结构微缩投影物镜。

1 EUVL 微缩投影光学系统的要求

分辨力(RES)和焦深(DOF)是极紫外投影光刻成像系统的重要参量, 二者由夫琅和费(Fraunhofer)公式和瑞利(Rayleigh)公式给出^[9]:

$$RES = k_1 \lambda / NA \quad (1); \quad DOF = k_2 \lambda / (NA)^2 \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 是与系统工艺相关的。在通常的衍射限制的成像系统定义中 k_1 、 k_2 均取 1/2, 在 EUV 光刻系统中 k_1 可取 0.75。 λ 是成像系统所使用的波长, NA 是数值孔径。从(1)式中可看出, 提高分辨力可以通过减小 λ 和提高 NA 来达到。然而, 在提高 NA 导致 DOF 减小不利于光刻系统的调整。为此, 数值孔径 NA 值的选取要适当。为了满足高精度的成像质量要求, 许多光学系统要求达到近衍射极限的分辨力, 根据 Rayleigh 1/4 波长原则和 Marechal 条件, 其综合波像差分别为 $\delta=1/4\lambda$ 峰谷值(P-V), $\sigma=1/14\lambda$ 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

$$\delta = 1/(4n)\lambda, \text{ P-V} \quad (3); \quad \sigma = 1/(28\sqrt{n})\lambda, \text{ RMS} \quad (4)$$

式中 n 为光学元件的个数。近年来非球面加工检测技术不断进步, Nikon 制造的 HiNA 所使用非球面反射镜的面形精度已达到 0.18 nm RMS(均方根值)^[10], 装调后最终系统的波像差为 0.9 nm RMS^[11]。

2 Schwarzschild 光学系统

同心 Schwarzschild 物镜是 EUVL 研究初期微缩投影系统所选用的结构, 日本 NTT 公司与美国 AT&T 公司利用该结构的光学系统先后复制出了线宽为 0.15μm 和 0.05μm 的线条, 证实了 EUVL 的技术可行性。Schwarzschild 物镜通过同心条件用来校正慧差和像散。消三级球差的条件为^[1]

$$\frac{\alpha}{(\alpha-1)^2} = \frac{(1+m)^2}{(1-m)^2} \quad (5)$$

其中 α 为次镜与主镜的半径比。

限制着 Schwarzschild 的视场和数值孔径 NA 主要因素为: 远心条件、中心遮拦及没有得到校正的场曲。把孔径光阑置于球心时, 三级五级慧差、像散、畸变都得到校正, 但系统五级球差限制着数值孔径, 五级轴外球差、慧差限制曝光视场。为实现系统像方远心移动光阑将引入五级像散慧差及畸变, 减小了 NA 和视场。传统共轴照明 Schwarzschild 的中心遮拦降低了系统分辨力, 可采用离轴的光阑消除它, 这将破坏像方远心又将引入高级球差。改变镜间距时引入的三级球差可以用来平衡高级球差, 但同时需要引入非球面来校正轴外球差及慧差。场曲造成了像面弯曲, 若要获得平场像面则需让物面弯曲。这给实际应用带来极大不便, 无法获得大面积曝光视场; 此外, 该结构数值孔径较大, 将导致主镜上光线入射角增大不利于多层反射膜的镀制。因此, 微缩比为 10~20 的 Schwarzschild 物镜多用于做初期极紫外光刻技术的可行性分析。

3 环形视场平场两镜系统

经过技术可行性分析后, 寻找特征尺寸在 100nm 以下可用于实际生产的微缩投影物镜设计成为重点。在实际应用中, 投影光刻系统要求具有高分辨力和较大的视场。但即使采用非球面光学元件也无法实现一次曝光中就能覆盖整个硅片。因此, 极紫外投影光刻系统通过采用环形视场并辅以掩模硅片的同步扫描实现大面积光刻复制。光学系统采用了共轴的偏置环形视场形式, 以消除同轴系统中的中心遮拦。在结构上,

要求光阑位于系统物方焦点使微缩光学系统为像方远心光路，以避免焦深范围内的倍率变化。

环形视场非球面平场两镜系统成为了分辨率为 100nm、无遮拦、扫描曝光系统的初期研究对象，通过选择近似相等的主次镜半径校正场曲，满足 EUVL 平场要求。非球面平场两镜系统初始结构参数可通过有限距两镜系统初级像差公式确定，物在有限距的两镜系统初级球差、慧差、像散、场曲的三级像差系数分别为 A、B、C、D，其表达式为

$$A = -\tau^{-4} \left(\frac{v_2' \Omega}{2}\right)^3 [m_2^3(1-m_1)^3 \Delta\delta_1 + \Omega(1-m_2)^3 \Delta\delta_2] \tag{6}$$

$$B = \tau t A - \left(\frac{v_2'}{2} \Omega \tau^{-1}\right)^2 [1-m_1^2 m_2^2 - \frac{1-\Omega}{2m_2} (1-m_2)^3 \Delta\delta_2] \tag{7}$$

$$C = -2 \left[t \tau^2 \left(t + \frac{\tau d}{\Omega}\right) A - \tau \left(2t + \frac{\tau d}{\Omega}\right) B \right] + \frac{v_2'}{2m_2} [1 + m_1^2 m_2^2 - 2m_2 - \Omega(1 + m_1^2 m_2^2 - 2m_1 m_2^2)] \tag{8}$$

$$D = \frac{1}{2} C + \frac{v_2'}{2} [1 - m_2 + \Omega m_2 (1 - m_2)] \tag{9}$$

其中：

$$\Delta\delta_1 = \frac{-2\Omega(1-m_1^2 m_2^2)}{m_2^2(1-\Omega)(1-m_1)^3}, \quad \Delta\delta_2 = \frac{2m_2(1-m_1^2 m_2^2)}{(1-\Omega)(1-m_2)^3}, \quad \delta_i = \Delta\delta_i - \left(\frac{1+m_i}{1-m_i}\right)^2,$$

$$d = \frac{\Omega-1}{v_2' m_2 \Omega}, \quad \frac{1}{R_i} = \frac{1}{2}(v_i + v_i'), \quad \tau = 1 - vt, \quad \Omega = \frac{v_2'}{v_1}$$

式中： v 为物距 l 倒数， v' 为像距 l' 倒数， t 为入瞳与主镜间距， m 为垂轴放大倍率， δ 为反射面非球面系数。非球面两镜系统共有六个自由量，分别为(t 在此情况下失效)，若同时消除四种像差，则像差系数须满足 $A=B=C=D=0$ ，且根据微缩比为 5 : 1，物像共轭距为 800mm 的结构要求，需满足方程： $m = m_1 m_2 = 0.2$ ； $(-v_1)^{-1} + d + (v_2')^{-1} = 800$ ，由此，六个参数可唯一确定。解得系统初始结构参数为 $R_1 = 592.83$ ， $R_2 = 591.80$ ， $d = 492.67$ ， $l = -783.48$ ， $\delta_1 = 8.10$ ， $\delta_2 = 0.091$ 。

由于初始结构只校正了初级球差，慧差，像散及场曲而大视场全反射系统常受限于轴外五级球差和彗差且像方孔径角越大高级像差的影响就越明显。要得到高的像质，就必须加非球面高次项使初高级像差在环形区域内平衡。据以上考虑设计的非球面两镜系统可得到优于 70nm 的分辨力(空间频率为 7140cycles/mm 的方波衍射传函值均大于 0.7)，且各个视场点的传递函数都与衍射极限的传递函数偏离较小。

表 1 环形视场光学系统结构参数

Table 1 Structural parameter of ring-field system

Reduction ratio	Object distance	R_1	d	R_2	Total length
5:1	783.00	598.70	-500.34	601.181	800.97

表 2 环形视场光学系统非球面参数

Table 2 Aspheric coefficient of ring-field system

	Conic	2nd	4th
R_1	8.565 135	-0.000 009	1.202 094E-009
R_2	0.104 351	-0.000 001	-1.037 59E-011

镜面方程式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 \tag{10}$$

其中 c 为顶点曲率。像方视场 1mm×16mm，各视场残余波像差 RMS 值均小于 0.054λ ($\lambda=13\text{nm}$)。在焦深 0.6μm 内 MTF>0.5@7140cycles/mm。环形视场中心半径为 107.5mm；后截距(主镜到像面间距)为 18mm。该系统的光学系统结构图、场曲图、方波衍射传函曲线见图 1 至 3。

系统像差最小的区域是以光轴为中心的圆环，像散控制着系统的像差校正，环形视场的中心位于像散为零的位置。图 2 描述了这一像散节点。场曲图显示了三级和五级像散的平衡，这是通过在主镜和次镜面形上加二次和四次形变量实现的。从像差分析可知，三级和五级像散平衡情况决定着系统环形视场宽度的上限。系统数值孔径的增大受五级球差限制，轴外五级球差、彗差和像散限制了曝光视场。扫描曝光对系统畸变的校正要求非常严格，通常要求畸变小于分辨力的十分之一。把畸变看成环带内垂轴放大率的差异，可以通过减小环带宽度将畸变降低至 10nm，而环形视场的局部放大率与近轴放大率的差异带来的掩模硅片扫描时像点移动会导致像面模糊。两镜系统由于没有足够的变量校正畸变而无法应用于实际扫描系统，但仍为多镜环场扫描曝光系统研究作了铺垫。

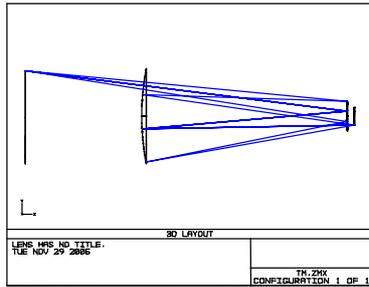


图 1 环形场光学系统结构

Fig.1 Systematic structure of ring-field system

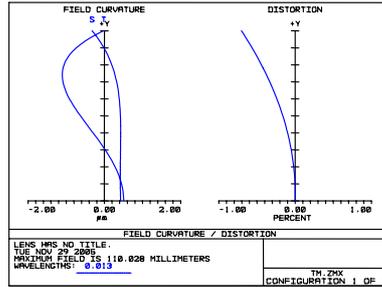


图 2 环形场光学系统场曲、畸变

Fig.2 Field curvature, distortion

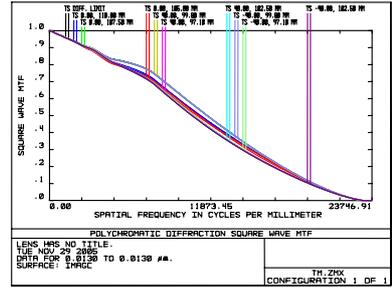


图 3 环形场光学系统方波衍射传递函数

Fig.3 Square wave MTF cure of ring-field system

4 矩形场平场两镜系统

近年来,为实现 EUVL 32nm 技术节点所研制的数值孔径为 0.3 的小视场曝光系统中采用的是平场两镜结构的微缩投影物镜。该系统用于 EUVL 的掩模、硅片检验及对光刻图形的缺陷研究。日本和美国都已于近两年成功研制出这种小视场曝光系统^[11-12],为 EUVL 商业化生产做好了准备。

参照上文已说明的求消球差、慧差、像散、场曲的非球面两镜系统初始结构的方法,设计出曝光波长为 13nm、NA 为 0.3、视场为 300 μ m \times 500 μ m、分辨力优于 32nm(空间频率为 15600cycles/mm 的方波衍射传递函数值均大于 0.7) 矩形场平场两镜系统,系统各视场残余波像差 RMS 值均小于 0.003 λ 。

表 3 矩形视场光学系统结构参数

Table 3 Structural parameter of rectangle-field system

Reduction ratio	Object distance	R_1	d	R_2	Total length
5:1	342.66	262.24	-218.57	262.98	350.66

表 4 矩形视场光学系统非球面参数

Table 4 Aspheric coefficient of rectangle -field system

	Conic	4th	6th
R_1	9.096720	1.189 393E-008	-9.651 88E-014
R_2	0.112227	-1.398 39E-010	-7.312 22E-016

由系统大数值孔径引起的球差和慧差的高级量通过非球面的引入得到了控制,在小视场内,场曲、像散畸变对系统像质影响较小。EUV 射线在主次镜上的光线入射角变化范围为分别为 1.2 $^\circ$ ~12.6 $^\circ$ 和 0.4 $^\circ$ ~3.4 $^\circ$ 。镜面上定周期多层膜的反射率在主镜入射角变化范围内变化较大,需镀制周期厚度随空间位置改变的梯形多层膜。图 4、图 5 为光学系统结构图及方波衍射传递函数曲线。

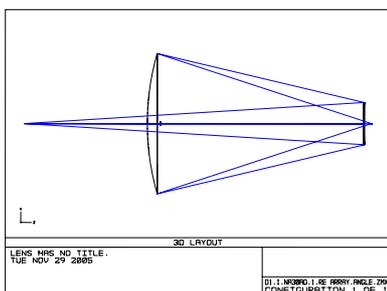


图 4 矩形场光学系统结构

Fig.4 Systematic structure of rectangle-field system

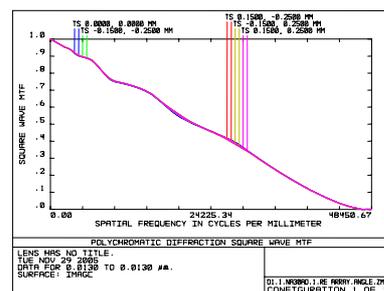


图 5 矩形场光学系统方波衍射传递函数

Fig.5 Square wave MTF curve of rectangle-field system

5 结论

根据我国现阶段的技术基础和研究目标,两镜微缩投影系统的研究仍为重点。本文分析了 EUVL 技术研究不同阶段所采用的两镜系统,并给出了用于分辨力为 70nm,无遮拦,扫描曝光系统及目前研制的 EUVL 32nm 技术节点小视场曝光系统研究的平场结构微缩投影物镜设计方法及设计结果。

参考文献:

[1] Jewell Tanya E. Reflective system design study for soft x-ray projection lithography [J]. *J.Vac.Sci.Technol*, 1990, **B8**(6):

- 1519-1523.
- [2] Goldsmitha John E M , Barra Pamela K , Bergera Kurt W. Recent advances in the Sandia EUV 10x microstepper [J]. **SPIE** , 1998 , **3331** : 11-19.
- [3] 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 Chun-shui , WANG Zhan-shan , CAO Jian-lin. Development of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography [J]. **Optics and Precision Engineering** , 2000 , **8**(1) : 66-70.
- [4] Kurihara Kenji. Two-mirror telecentric optics for soft x-ray reduction lithography [J]. **J.Vac.Sci.Technol** , 1991 , **B9**(6) : 3198-3192.
- [5] Jewell Tanya E. Two Aspheric mirror system design for SXP L[J]. **OSA Proceedings on Soft X-Ray Projection Lithography** , 1993 , **18** : 71-74.
- [6] Booth M ,Brioso O ,Brunton A. High-resolution EUV imaging tools for resist exposure and aerial image monitoring [J]. **SPIE** , 2005 , **5751** : 178-189.
- [7] Roberts Jeanette M , Bacuita Terence , Bristol Robert L. One small step: World's first integrated EUVL process line [J]. **SPIE** , 2005 , **5751** : 64-77.
- [8] Korsch Dietrich. **Reflective optics** [M]. San Diego : USA Academic Press , 1991.
- [9] Born M , Wolf E. **Principles of Optics 7th edition** [M]. Cambridge : Cambridge University Press , 1999.
- [10] Miura Takaharu ,Murakami Katsuhiko ,Suzuki Kazuaki. Nikon EUVL development progress summary [J]. **SPIE** ,2006 ,**6151** : 1-10.
- [11] Oizumi H , Tanaka Y. Lithographic Performance of High-Numerical-Aperture (NA=0.3) EUV Small-Field Exposure Tool (HINA) [J]. **SPIE** , 2005 , **5751** : 102-105.
- [12] Naulleau Patrick , Goldberg Kenneth A. EUV microexposures at the ALS using the 0.3-NA MET projection optics [J]. **SPIE** , 2005 , **5751** : 56-63.

~~~~~  
( 上接第 81 页 )

- [2] Georghiades Athinodoros S , Belhumeur Peter N , Kriegman David J. From few to many : Illumination cone models for face Recognition under variable lighting and pose [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 2001 , **23**(6) : 643-660.
- [3] SHAN Ying , LIU Zi-cheng , ZHANG Zheng-you. Model-based bundle adjustment with application to face modeling [A]. **Proceedings of Eighth IEEE International Conference on Computer Vision**[C]. Vancouver, BC, Canada : IEEE , 2001 , **2** : 644-651.
- [4] Rusinkiewicz Szymon , Hall-Holt Olaf , Levoy Marc. Real-time 3D model acquisition [J]. **ACM Transactions on Computer Graphics , Proceedings SIGGRAPH** , 2002 , **21**(3) : 438-446.
- [5] Gordon Gaile G. Face recognition based on depth on maps and surface curvature [J]. **SPIE** , 1991 , **1570** : 234-247.
- [6] Alessandro Colombo , Claudio Cusano , Raimondo Schettini. 3D face detection using curvature analysis [J]. **Pattern Recognition** , 2006 , **39**(3) : 444-455.
- [7] Volker Blanz , Thomas Vetter. Face Recognition based on Fitting a 3D Morphable Model [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence** , 2003 , **25**(9) : 1063-1074.
- [8] Chua Chin-Seng , Jarvis R. Point signature: A new representation for 3d object recognition [J]. **International Journal on Computer Vision** , 1997 , **25**(1) : 63-85.
- [9] Multimedia and Intelligent Software Technology Beijing Municipal Key Laboratory , Beijing University of Technology. The BJUT-3D Large-Scale Chinese Face Database [EB/OL]. [http://www.bjut.edu.cn/sci/multimedia/mul\\_lab/3dface/face\\_database.html](http://www.bjut.edu.cn/sci/multimedia/mul_lab/3dface/face_database.html).