

投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿

许伟才^{1,2} 黄 玮¹ 杨 旺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 100049

摘要 为满足严格的套刻需求, 双远心结构的投影光刻物镜需要选择恰当的元件移动来进行倍率的补偿和调节。提出了一种简单而实用的方法来进行倍率的公差分析。该方法利用商业优化设计软件和有限差分算法计算了多项公差对物镜倍率的敏感程度, 同时结合公差对系统波像差的敏感度选择最佳的倍率补偿元件。利用以上方法, 对一台双远心、工作波长 193 nm 以及数值孔径 0.75 的投影光刻物镜进行了倍率的公差分析和补偿器优选。结果显示, 系统较好地实现了 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的倍率调节功能, 而系统波像差劣化程度均方根值小于 1.5 nm。

关键词 光学设计; 倍率; 公差分析; 投影光刻物镜

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1122003

Magnification Tolerancing and Compensation for the Lithographic Projection Lens

Xu Weicai^{1,2} Huang Wei¹ Yang Wang¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To meet the stringent overlay requirements, it is desirable to select appropriate elements to compensate and adjust the magnification of the projection lithographic lens with double telecentricity. A simple and practical method to tolerance the magnification is presented. This method uses the commercial optical design software and the finite difference algorithm to calculate the magnification sensitivity for some tolerances, and then selects the optimal magnification compensator with the consideration of the wave aberration sensitivity. By using this method, the magnification tolerance is analysed and the magnification compensator is selected for a projection lens with the working wavelength of 193 nm and numerical aperture of 0.75. The results show that the lens achieves 50×10^{-6} magnification adjustment, and the root-mean-square degradation of lens wavefront aberration is less than 1.5 nm.

Key words optical design; magnification; tolerancing; projection lithographic lens

OCIS codes 220.1000; 110.6770; 220.3620

1 引 言

衡量投影光刻物镜的主要性能指标是视场大小和成像分辨率、透过率、畸变和远心度大小。现代投影光刻物镜的显著特点和要求就是大视场和极高成像分辨率、高透过率、极小的畸变和远心度^[1~4]。大视场和高分辨率意味着系统传输的信息量很大^[5],

投影光刻物镜之所以是最为复杂和精密的光学系统, 正是因为投影光刻物镜是传输信息量最大的光学系统。高透过率则意味着系统在硅片处的高曝光强度, 这样就能增加单位时间内完成曝光硅片的数量, 提高了曝光系统的生产效率。极小的畸变和远心度主要是为满足硅片套刻时的对准精度需求。为

收稿日期: 2011-05-06; 收到修改稿日期: 2011-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(409741107)资助课题。

作者简介: 许伟才(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事深紫外光学系统设计方面的研究。E-mail: xuweicaixx@163.com

导师简介: 黄 玮(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn

(通信联系人)

减小套刻误差,不仅需要光学设计过程中尽可能降低物镜的畸变和远心度,同时还需要在物镜工作过程中严格控制投影倍率的大小。

为实现高成像分辨率,需要有许多波像差补偿元件来降低物镜苛刻的制造公差^[6,7]。同样为满足严格的套刻需求,需要选择合理的方式来实现倍率的调节功能($10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级)。这样一方面可以补偿系统在制造和工作中的倍率变化,同时还能主动地改变倍率以适应套刻过程中不同曝光图形间的倍率偏差。

对于仅是像方远心的投影光刻物镜而言,通过改变掩模板与物镜间的距离(物距)可以非常方便地调节系统的倍率大小,系统成像质量基本不会降低。而对于双远心结构(物方和像方均是远心结构)的投影光刻物镜,改变物距仅能引起非常缓慢的倍率变化,并且还会导致物镜的成像质量急剧下降。

针对以上问题,本文提出了一种简单而实用的方法来进行倍率的公差分析和调节。该方法利用商业优化设计软件 Code V(美国 ORA 公司,参见 <http://www.opticalres.com>)和有限差分算法计算各项公差对物镜投影倍率的影响,同时结合公差对系统波像差的敏感度选择最佳的倍率补偿元件。利用以上方法,对一台数值孔径 0.75、工作波长 193 nm 的投影光刻

物镜进行了倍率的公差分析和补偿器优选。结果显示,系统较好地实现了 $\pm 50 \times 10^{-6}$ (倍率改变的绝对值大小)的倍率调节功能,而系统波像差劣化程度均方根值小于 1.5 nm。

2 投影光刻物镜倍率的调节要求

早期投影光刻物镜采用的是步进重复工作模式,物镜会使用像方远心结构来减小像面(硅片)离焦造成的曝光图形位置的变化。而现代高数值孔径投影光刻物镜采用的是步进扫描工作模式,即物面(掩模)和像面(硅片)在曝光过程中进行同步扫描。步进扫描式投影光刻物镜采用的是双远心结构。在扫描过程中,双远心结构能够有效降低倍率对掩模沿光轴位移的敏感程度。图 1 展示了一个像方远心结构的投影光刻物镜和一个双远心结构的投影光刻物镜^[8],其中图 1(a)为 20 世纪 90 年代初的 i 线步进式投影光刻物镜,图 1(b)则是 21 世纪初的 ArF 激光(193 nm)扫描式投影光刻物镜。它们的主要特征参数和倍率调节要求如表 1 所示,表 1 中 wavefront aberration(nominal design)指各视场单色波像差中最坏的情形,RMS 为均方根值,193 nm 投影物镜的静态视场为 $26 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,通过扫描实现 $26 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ 的动态视场。

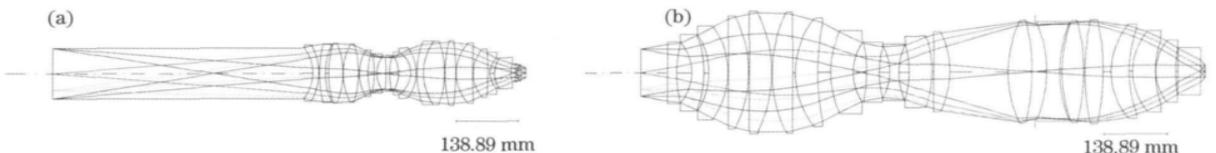


图 1 投影光刻物镜的结构图。(a) 数值孔径 0.42 像方远心物镜; (b) 数值孔径 0.75 双远心物镜

Fig. 1 Layout of the projection lithographic lenses. (a) Lithographic lens with image-side telecentricity (numerical aperture 0.42); (b) lithographic lens with double telecentricity (numerical aperture 0.75)

表 1 投影光刻物镜的参数特性和倍率调节要求

Table 1 Specifications of the projection lithographic lenses

Parameter	Lithographic lens with image-side telecentricity	Lithographic lens with double-telecentricity
Central wavelength of spectral band /nm	365.5	193.368
Numerical aperture	0.42	0.75
Field of image /mm	12×12 step and repeat	26×33 step and scan
Wavefront aberration (nominal design, RMS) /nm	28.8	0.8
Resolution /nm	<700	<100
Magnification	0.20	0.25
Magnification adjustment / 10^{-6}	± 100	± 50

针对以上两台光刻物镜的倍率调节要求,首先选择传统的倍率调节方式,即改变掩模面的位置进行模拟分析。利用商业光学设计软件(Code V)和自定义宏命令,得到表 2 所示倍率调节结果。

表 2 通过改变掩模面位置对倍率的调节

Table 2 Magnification adjustment through the displacement of reticle

Magnification adjustment / 10^{-6}	Image-side telecentricity lens		Double-telecentricity lens	
	Displacement of reticle /mm	RMS change in wavefront error /nm	Displacement of reticle /mm	RMS change in wavefront error /nm
100	0.3554	0.22		
50	0.1776	0	-0.4328	111.41
0	0	0	0	0
-50	-0.1776	0.23	0.4330	111.38
-100	-0.3550	0.67		

从以上结果可以很容易地看出,倍率对掩模面位置变化的敏感度分别为 $0.282 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$ (像方远心物镜) 和 $-0.115 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$ (双远心结构物镜)。对于像方远心物镜,掩模面移动约 $\pm 355 \mu\text{m}$ (负号表示减小掩模面到物镜的距离) 实现了 $\pm 100 \times 10^{-6}$ 的倍率调节,而系统额外增加单色均方根波像差不超过 0.67 nm (相比系统均方根波像差设计名义值 28.8 nm ,基本可以忽略)。对于双远心结构的物镜而言,虽然掩模面移动大约 $\pm 433 \mu\text{m}$ 可以实现 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的倍率调节,但均方根波像差已经急剧劣化了 111.4 nm 。显然对于双远心结构的投影光刻物镜不能通过改变物距来实现系统倍率的调节,这时就需要新的方式来进行倍率的公差分析和调节。

3 双远心物镜倍率的公差分析与补偿元件选择

投影光刻物镜的制造公差会造成倍率偏离名义设计值。倍率对各项公差的敏感程度可以采用最简单的有限差分法来计算:

$$S_i = \frac{\partial M(x_i)}{\partial x_i} = \frac{M(x_i + \Delta x_i) - M(x_i)}{\Delta x_i}, \quad (1)$$

式中 S_i 为第 i 项公差对倍率敏感度, $M(x)$ 为物镜倍率的名义设计值, x 为系统参数, Δx 即为该参数的公差大小。同样利用光学设计软件和以上公式可以很方便地计算各项公差对倍率的敏感度。分析表明,对倍率影响较大的主要是对称公差,如元件曲率半径、材料折射率、元件的厚度与间隔公差。而系统非对称公差如元件楔形、元件偏心、元件倾斜以及元件表面面形误差、材料折射率不均匀性对系统倍率的影响可忽略不计。

对于数值孔值 0.75 的双远心投影光刻物镜,选定以下公差大小作为倍率公差分析的基础:光圈(曲率半径) $\pm 1 \text{ fringe}$ (193.4 nm); 折射率 $\pm 10^{-5}$; 元件厚度与间隔 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。以上公差均采用等概率

分布模型。利用光学设计软件和有限差分算法,得到倍率的公差分析结果如图 2 所示。

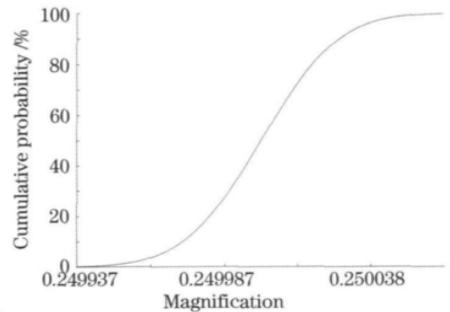


图 2 倍率的累积概率分布

Fig. 2 Cumulative probability of the magnification

以上公差分析结果表明,系统的倍率为 $0.25 \pm 44 \times 10^{-6}$,置信区间为 99.8% 。当然制造公差对倍率的改变可以通过系统 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的倍率调节功能来补偿。而下一步的关键则是如何选择最佳的倍率补偿元件。

虽然理论上可以选择任何公差参数作为补偿器,考虑到实际实现的可行性,通常能够采取的像质补偿措施是有限的,从物理实现角度来说,沿光轴移动元件是可行性较高的倍率补偿方式。但元件沿光轴移动也会劣化系统波像差,应用(1)式和 Code V 软件,可以非常方便地计算倍率和波像差的敏感度。图 3 即为各光学元件沿光轴移动 0.01 mm 对倍率和波像差的影响。

从图 3 可以看出元件 2 (倍率敏感度约 $1.1 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$)、元件 4 (倍率敏感度约 $1 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$)、元件 14 (倍率敏感度约 $0.9 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$) 对系统倍率影响较大,其中元件 4 对系统波像差的影响最小。故选择元件 4 沿光轴移动约 $\pm 50 \mu\text{m}$ 来实现 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的倍率调节,这样元件的移动行程相对较小(有利于提高倍率调节精度),同时引入的额外波像差也相对较小(有利于波像差的补偿)。

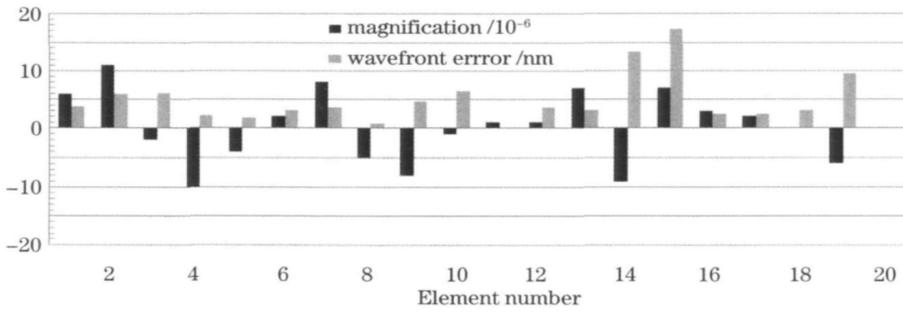


图 3 元件轴向移动对倍率与波像差的影响

Fig. 3 Effects of elements' axial displacement on the magnification and wave aberration

4 倍率调节功能的仿真验证

使用元件 4 调节倍率时会引入额外的系统波像差,引入的额外波像差可以很容易地使用其他波像差补偿元件(特别是沿光轴移动的元件)进行补偿,但这些元件补偿波像差的同时也会轻微地改变系统倍率,所以元件 4 实际的移动行程与 $\pm 50 \mu\text{m}$ 有些差别。在给定波像差补偿元件前提下^[9](元件 3、元件 9、元件 15、像面、物面),利用光学设计软件的优化功能计算元件 4 的实际移动行程,结果如表 3 所示。

表 3 双远心投影光刻物镜的倍率调节

Table 3 Magnification adjustment of the double-telecentricity lithographic lens

Magnification adjustment / 10 ⁻⁶	Displacement of element 4 / μm	RMS change in wavefront error / nm
50	0.0718	1.47
40	0.0573	1.11
30	0.0429	0.77
20	0.0284	0.44
10	0.0140	0.17
0	0.0000	0.00
-10	-0.0149	0.03
-20	-0.0293	0.09
-30	-0.0438	0.34
-40	-0.0582	0.66
-50	-0.0727	0.99

从表 3 可以看出,通过元件 4 沿光轴移动 $-73 \sim 72 \mu\text{m}$,系统倍率相应变化 $\pm 50 \times 10^{-6}$,二者保持着很好的线性关系,敏感度约为 $0.7 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$,而系统引入的额外均方根波像差不超过 1.5 nm。

5 结 论

针对现代双远心投影光刻物镜的套刻需求,结合一台数值孔径 0.75、工作波长 193 nm 的投影光刻物镜的实例,给出了倍率的公差分析和选取最佳倍率补偿元件的方法。结果显示,该双远心物镜较

好地实现了 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的倍率调节功能,而系统波像差劣化程度小于 1.5 nm。以上方法也能用于更高数值孔径投影光刻物镜倍率的公差分析和补偿。

文中倍率公差分析的结果未包含公差交叉项的影响,这是有限差分算法的固有缺点,可以结合蒙特卡罗公差分析方法来弥补这种分析的缺点,同时完善各项公差的概率分布模型,提高倍率的公差分析精度。有限差分法不仅适用于倍率的公差分析和补偿,也可用于光学系统的其他参数指标,如远心度、畸变和焦距等参数的公差分析和补偿。

参 考 文 献

- 1 J. Bruning. Optical lithography: 40 years and holding [C]. *SPIE*, **6520**: 652004
- 2 Jun Chang, Meifang Zou, Ruirui Wang *et al.*. All-reflective optical system design for extreme ultraviolet lithography [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1082~1084
- 3 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 222003
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 222003
- 4 Ma Bin, Li Lin, Chang Jun *et al.*. Refractive projection lens for 90 nm resolution lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 211~215
马 斌, 李 林, 常 军 等. 高分辨率折射式投影光刻物镜的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 211~215
- 5 Tomoyuki Matsuyama, Yasuhiro Ohmura, David M. Williamson. The lithographic lens: its history and evolution [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615403
- 6 David M. Williamson. Compensator selection in the tolerancing of a microlithographic lens [C]. *SPIE*, 1989, **1049**: 178~186
- 7 Tomoyuki Matsuyama, Issey Tanaka, Toshihiko Ozawa *et al.*. Improving lens performance through the most recent lens manufacturing process [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 801~810
- 8 Y. Omura. Projection Exposure Method and Apparatus and Projection Optical System [P]. European Patent 1139138, 1999
- 9 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001, 102~105
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001, 102~105

栏目编辑: 谢 婧