

超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的 光学设计

胡大伟 李艳秋 刘晓林

(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, 北京 100081)

摘要 针对 45 nm 及以下节点光刻相关技术的研究需求, 确定了实验型投影光刻物镜的结构型式及设计指标。依据像差理论在非同心小遮拦的 Schwarzschild 反射系统中添加折射补偿镜组来进一步减小系统的中心遮拦, 扩大像方数值孔径。设计了一套小中心遮拦, 数值孔径为 1.20 的 Schwarzschild 折反式投影光刻物镜。设计结果表明, 该投影光刻物镜工作带宽为 100 pm, 像方视场为 $\phi 50 \mu\text{m}$, 线中心遮拦比为 13%, 光学分辨力为 80 nm 时 (6240 lp/mm) 的系统调制传递函数大于 0.45, 全视场最大畸变为 6.5 nm, 满足了 45 nm 深紫外 (DUV) 浸没光刻实验平台对投影光刻物镜的需求。

关键词 光学设计; 投影光刻物镜; 超高数值孔径; Schwarzschild; 深紫外

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0122004

Optical Design of Hyper Numerical-Aperture Schwarzschild Projection Lithographic Lens

Hu Dawei Li Yanqiu Liu Xiaolin

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract To meet the research requirements of 45 nm node or even below microlithography, the configurations and specifications of experimental lens are determined. Based on the aberration theory, several refractive elements are inserted into a non-concentric all-reflective Schwarzschild system with a small central obstruction so as to achieve smaller obstruction and hyper-numerical aperture. A Schwarzschild catadioptric lithographic lens whose numerical aperture is 1.20 is designed with a small central obstruction. Designing results show that the objective's working bandwidth is 100 pm, viewing field of image is $\phi 50 \mu\text{m}$, the linear obstruction ratio is 13%, modulation transfer function is greater than 0.45 at the resolution of 80 nm (6240 lp/mm), and its distortions of all field points are below 6.5 nm. It can meet the requirement of deep ultraviolet immersion lithographic experiment with 45 nm nodes.

Key words optical design; projection lithographic lens; hyper numerical aperture; Schwarzschild; deep ultraviolet

OCIS codes 220.2740; 110.3960; 140.7240

1 引 言

实验型投影光刻物镜通常用于下一代曝光节点光刻相关技术的前瞻性研究,并不用于工业化生产,具有高数值孔径、小视场、大工作带宽和较低的成本等特点。实验型投影光刻物镜通常采用全折射结构,

Newtonian 折反结构和反摄远型的 Schwarzschild 结构^[1~7]。其中全折射光学系统结构复杂,使用光学元件较多,且在深紫外波段消色差困难^[1,2]; Newtonian 折反系统同样结构复杂,且光能损失严重^[3,4]; 而 Schwarzschild 光学系统拥有大像方数值孔径,较宽的

收稿日期: 2012-07-19; **收到修改稿日期**: 2012-09-13

基金项目: 国家科技重大专项和国家自然科学基金重点项目 (60938003) 资助课题。

作者简介: 胡大伟 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: hudawei_bit@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)

工作波段和足够大的后工作距离,可以在一定视场范围内实现极高空间分辨成像。1950年,Gray^[5]基于Schwarzschild结构设计了一系列物镜用于显微成像及早期的光刻实验,数值孔径在0.4~0.7之间。20世纪90年代中期及21世纪初,针对193 nm深紫外波段投影光刻实验需求,Webb等^[6,7]设计了一系列Schwarzschild折反式实验型投影光刻物镜,其数值孔径在0.6~1.05之间,在 $\phi 100\ \mu\text{m}$ 的视场内曝光得到100 nm的特征线条。针对45 nm及以下节点光刻相关技术的研究,上述设计已不能满足实验需求。

本文结合传统小数值孔径Schwarzschild物镜的设计方法,进一步添加补偿镜组改进了Schwarzschild系统,设计了小中心遮拦,数值孔径为1.20的折反浸没式投影光刻物镜(结合分辨率增强技术,数值孔径等于1.20的投影光刻物镜可满足45 nm节点光刻需求^[8])。该系统在不使用任何分辨率增强技术的前提下,拥有高于80 nm的光学分辨率。最后对该浸没式投影光刻物镜的像质进行了公差分析。

2 指标要求

针对45 nm及以下节点光刻实验需求,由光刻分辨率公式可得

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中 R 为光刻最小特征尺寸, k_1 为工艺因子, λ 为曝光波长, NA 为物镜的像方数值孔径。其中 $R=45\ \text{nm}$, $\lambda=193\ \text{nm}$, $k_1=0.28$ 时(结合分辨率增强技术,单次曝光情况下 k_1 因子的取值极限为0.25),计算可得 $NA=1.20$ 。

工业化生产用极窄线宽ArF激光器的线宽通常不会超过 $1\ \text{pm}$ ^[9],而实验用窄线宽ArF激光器的成本相对较低,其输出激光通常具有数十皮米的线宽。然而能用于193 nm波段下的物镜材料仅有融石英和氟化钙,色差校正比较困难,其中融石英材料具有较低的膨胀系数和较高的透过率,其制造技术相对成熟;氟化钙材料价格昂贵,难抛光,且具有双折射效应^[10]。另外,使用单一材料的光学系统对玻璃的折射率不敏感,可以在一定的温度范围内保持良好的成像质量^[11]。故要求实验型投影物镜在仅使用融石英材料的前提下,具有至少数十皮米的工作带宽。

实验型投影光刻物镜具有较小的像方视场,根

据实验需求,确定其视场范围不小于 $\phi 50\ \mu\text{m}$ 。为降低实验系统中物方掩模板的加工难度和成本,物镜应采用大倍率设计形式,确定其缩小倍率为0.01。传统的Schwarzschild系统具有较大的中心遮拦,会导致中频对比度显著降低,在Schwarzschild实验型投影光刻物镜的设计中,必须限制其中心遮拦,线中心遮拦比不宜超过15%。另外该系统还需要满足:1)成像质量达到衍射极限;2)物像方近双远心;3)极小的畸变。具体设计指标如表1所示。

表1 物镜设计指标

Table 1 Lens design specifications

Parameters	Specification
Numerical aperture N_{NA}	1.20
Wavelength λ / nm	193.28 ± 0.05
Exposure area / μm	$\phi 50$
Reduction	0.01
Telecentricity / mrad	≤ 4
Linear obstruction ratio	$\leq 15\%$
Immersion fluid	High-purity water
Root mean square of wavefront error / nm	≤ 13
Distortion / nm	≤ 10

3 光学系统的设计

3.1 初始结构的建立

分析系统技术指标要求,整套系统的设计难点在于同时实现较小的中心遮拦和超高数值孔径,以及拥有一定的像方视场。在系统设计中,应采用小遮拦Schwarzschild反射系统与折射补偿镜组相结合的设计方案,先得到轴上像质优良的小遮拦Schwarzschild反射系统,再与补偿镜组一起优化进一步提高数值孔径和像方视场。Schwarzschild反射系统的结构如图1所示。

由于投影物镜的物方工作距离通常较大,为简化计算,可先建立无限共轭距的全反射式

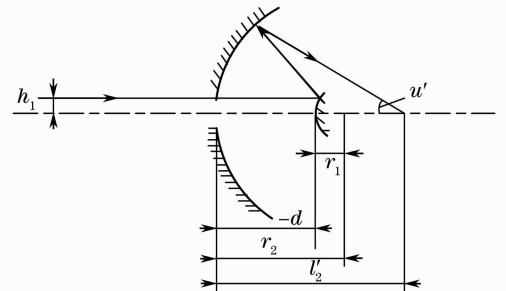


图1 Schwarzschild系统

Fig. 1 Schwarzschild system

Schwarzschild 初始结构。这里定义物方为无穷远，即 $l_1 = \infty$ 。定义 $m = \frac{r_2}{r_1}$ ， r_1 为主反射镜的半径， r_2 为次反射镜的半径。 f' 为系统的有效焦距， s 为工作距离， ϵ 为系统的线中心遮拦比， S_I 为赛德尔球差系数， S_{II} 为赛德尔彗差系数， S_{III} 为赛德尔像散系数。由高斯光学可导出参数关系式为^[12]

$$\begin{cases} r_2 = r_1 - d \\ f' = \frac{mr_1}{2(m-1)} \\ NA = \frac{2h_1}{mr_1}(m-1) \\ s = l'_2 + d = \frac{(3m-2)}{2(m-1)}r_1 \\ \epsilon = \frac{m}{3m-2} \end{cases}, \quad (2)$$

该同心反射系统的初级像差系数分别为

$$\begin{cases} \sum S_I = -\frac{2h_1^4}{r_1^3 m^3}(m^3 - 4m^2 + 4m - 1) \\ \sum S_{II} = -\frac{2h_1^3 u'}{r_1^2 m^3}(m^3 - 4m^2 + 4m - 1) \\ \sum S_{III} = -\frac{2h_1^2 u'^2}{r_1 m^3}(m^3 - 4m^2 + 4m - 1) \\ \sum S_{IV} = \frac{j^2}{f'} \end{cases}, \quad (3)$$

由(3)式可见，当该系统校正了 S_I 以后， S_{II} 和 S_{III} 自动校正。故令 $m^3 - 4m^2 + 4m - 1 = 0$ ，可得 $m = \frac{3+\sqrt{5}}{2}$ ， $\epsilon = 44.72\%$ 。选择合适的 r_1 与 r_2 的值，得到了完全校正三阶球差，彗差和像散的同心反射系统。但是其线中心遮拦比达到了 44.72%，这会导致系统中频的对比度显著降低。

要减小该系统的中心遮拦，需要在上述同心反射系统初始结构上做进一步的优化。减小主反射镜的半径，增大次反射镜的相对孔径以及增加两镜的间距来减小中心遮拦比，在这个过程中无法保证初级球差和初级彗差同时为零。引入的彗差会导致系统的可用视场急剧减小。在该非同心反射系统初级球差和二级彗差为零时，且认为由于彗差使中心亮斑光能下降 22.6% 的前提下，系统的线中心遮拦，视场直径和数值孔径的近似公式为^[12,13]

$$D = \frac{3.82\lambda}{b_3 NA^3} \sqrt{(1-\epsilon^2) \left(0.08 - \frac{\epsilon^2}{2} - \frac{\epsilon^4}{8}\right)}, \quad (4)$$

式中 D 为视场直径， b_3 为初级彗差系数， ϵ 为线中心遮拦比。

根据系统的指标要求，这里取 $\epsilon = 15\%$ ， $D =$

50 μm ，其中初级彗差系数的取值随中心遮拦的大小而变化， $\epsilon = 15\%$ 时，初级彗差系数 b_3 约为 0.03^[12]，计算可得 $NA = 0.5$ 。故可以得到一个 $NA = 0.5$ ， $\epsilon = 15\%$ 的非同心 Schwarzschild 反射系统。

3.2 超高数值孔径 Schwarzschild 系统的设计

Schwarzschild 系统能够达到的数值孔径大小取决于球差的校正程度，视场大小取决于彗差和匹兹伐场曲的校正程度。要进一步减小系统的中心遮拦，增大像方数值孔径，必须将非同心反射系统进一步复杂化，加入折射补偿镜组。在超高数值孔径折反系统中，折射镜片组一方面可以承担一定的光焦度，会聚出射光线，增大数值孔径；另一方面也可以起到平衡像差的作用^[14]，两镜反射系统残余球差，彗差，像散和场曲都需要折射镜组来补偿。

为满足超高数值孔径投影物镜的设计要求，可以在非同心 Schwarzschild 反射系统中的 4 个位置处引入折射补偿镜组，如图 2 所示。

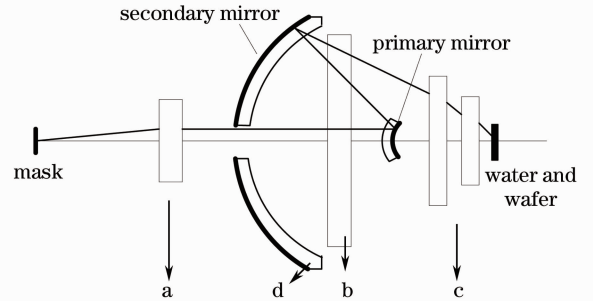


图 2 Schwarzschild 系统中 4 个折射镜组位置示意图

Fig. 2 Four locations for refractive elements in Schwarzschild system

位置 a 位于物面和次反射镜之间。a 处折射镜片组处于光线入射高度较小的位置，引入的球差很小，主要用来补偿系统残留的彗差和像散。同时，调整该处镜片组可用来改变 Schwarzschild 投影光刻物镜的倍率以及物方远心度。位置 b 位于两反射镜之间。位置 b 处的折射镜组可用于补偿反射系统残余的彗差和场曲。但是由于该处镜组被光线穿过 3 次，其面型和倾斜敏感度会非常高，增加了加工装调的难度和成本。位置 c 位于主反射镜和像面之间。该位置处的镜片组一方面用来承担一定的光线偏角，扩大像方数值孔径，其具有一定的正光焦度；另一方面主要用来补偿反射系统残余球差，且要保证其球差符号与反射系统残余球差符号相反。为了能在扩大数值孔径的同时，保留一定的像方视场，需要把位置 c 处的折射镜组进一步复杂化，引入一些负光焦度的元件在一定程度上补偿两反射镜残留的彗

差和场曲。在靠近像面位置处使用非球面很好地校正剩余球差和彗差,改善了像方视场大小。位置 d 在反射镜表面引入折射材料构成曼金镜设计。由于该物镜系统采用小遮拦设计,整个反射镜组残余较大的匹兹伐场曲。其残余场曲与位置 a、c 处折射补偿镜组场曲符号一致,使系统场曲进一步恶化。两反射镜使用曼金镜设计,用以补偿反射镜组残余场曲^[15],扩大像方视场。

在实际装调时,主反射镜必须要有支撑结构,且要尽量避免支撑结构带来的衍射效应。参考美国专利 6560039 中的设计形式^[16],主反射镜位于曼金元件的后表面中心区域,即在一个透射镜片的后表面中心制作了小凹面,在其表面镀高反射膜形成凸面反射镜,这种设计形式可进一步改善 Schwarzschild 折反系统的中心遮拦和最终像质。如图 3 所示。

考虑到降低加工及装调成本,本光学系统不在位置 b 处添加补偿镜组,反射系统残余彗差和场曲的补偿由 c 处折射镜组承担。在 c 处折射补偿镜组

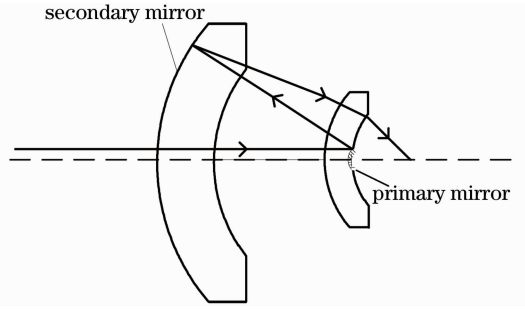


图 3 新的 Schwarzschild 折反结构

Fig. 3 Catadioptric structure of Schwarzschild new system

中,在靠近光阑的左侧引入一枚弯向物方的负光焦度弯月透镜一定程度上补偿了残余彗差和场曲,在靠近像面的位置处引入了非球面来补偿剩余的球差和彗差,采用去离子水作为浸没液体来进一步提高像方数值孔径。考虑了实际的镜片加工检测水平,设置合理的镜片厚度和相对孔径等约束条件,在 CODE V 程序上进行优化和像质评价。图 4 给出了 $NA=1.20$ 的 Schwarzschild 投影光刻物镜结构图。

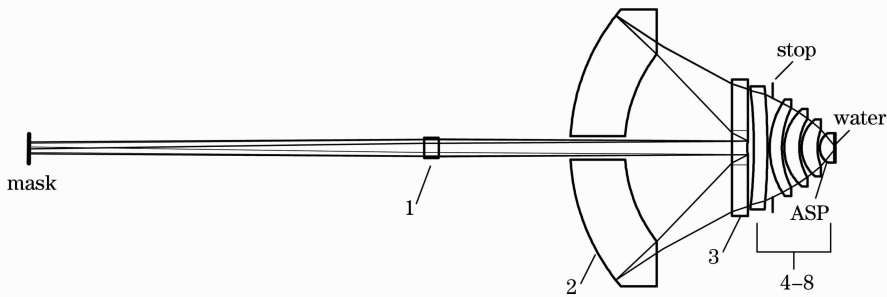


图 4 $NA=1.20$ 时 Schwarzschild 光刻物镜结构图

Fig. 4 Structure of Schwarzschild lithographic lens when $NA=1.20$

光学系统共使用了 8 枚镜片,透镜材料仅使用了融石英,浸没液体使用去离子水,工作带宽为 100 pm。该光学系统物像方共轭距为 305 mm,像方工作距离(水层厚度)0.5 mm,最大通光口径 90 mm,线中心遮拦比为 13%。

整套光学系统可分为前折射镜片组,两曼金反射镜构成的反射系统,后折射镜片组。其中前折射镜片组为一枚正光焦度的凸透镜,用来调整光学系统的倍率同时保证了该系统的物方远心度小于 4 mrad。两曼金反射镜组承担了系统大部分的光焦度。为便于检测和装调,主反射镜的支撑结构采用了平行平板设计。在平行平板的后表面中心制作了小凹面,在其表面镀高反射膜形成凸面反射镜,作为主反射镜。由于该光学系统具有超高的数值孔径,其像面光线投射角度较大,意味着次反射镜具有较大的相对孔径。考虑到现阶段反射镜的加工检测能

力,限制其通光口径为 90 mm, F 数为 0.8 左右,可用常用 Zygo 干涉仪检测。后方折射镜片组承担了一定的光线偏角,具有一定的光焦度,由于透射镜片仅使用了一种材料,无法完全校正色差,使整套折反系统的工作带宽变窄。该光学系统允许光源线宽为 100 pm。

在后折射镜片组中使用了一枚弯向物面的负弯月透镜,一定程度上补偿了反射系统残余的场曲和彗差。主反射镜左侧的平行平板引入了较大的高级正球差,这可由两镜分离引入的三阶负球差平衡,但整个曼金反射镜组仍残余一些高级正球差,从而在后折射镜片组中使用了多枚弯向像方的正弯月物镜产生负球差与之平衡。系统最后一枚平凸透镜的前表面使用了 10 次非球面,来进一步的校正系统剩余球差和彗差,增大了该投影光刻物镜的可用视场,最终保证了该光学系统 $\phi 50 \mu\text{m}$ 的圆形视场范围内的

像质达到了衍射极限。

4 结果分析

4.1 波像差分析

波像差即为光程差,对光学系统而言,波像差能够全面的反映像面成像质量的情况。图 5 为该光学系统不同波长下,不同视场的光程差曲线图。

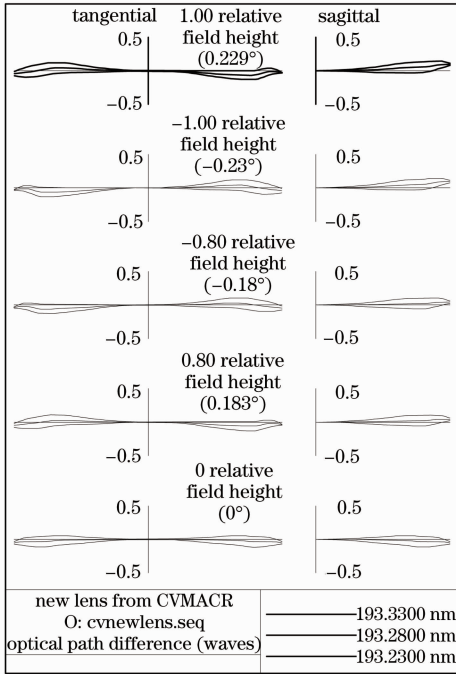


图 5 光程差图

Fig. 5 Optical-path difference

该投影光刻物镜在 193.23~193.33 nm 共 100 pm 的线宽范围内,以中心波长的光线(193.28 nm)为参考时中心视场的均方根波像差为 4.8 nm,边缘视场的均方根波像差最大值为 7.3 nm。

4.2 光学调制传递函数评价

光学调制传递函数(MTF)能全面反映光学系统的成像性质,能直接评价物镜的分辨力。本系统的 MTF 已基本达到了衍射极限。在全场范围内,MTF 与空间频率的关系如图 6 所示。由于光刻胶为强非线性介质,通常认为 MTF 大于 40% 时,光刻胶中的成像有较好的对比度。从图 6 中可以看出,对于频率为 6240 lp/mm 的 MTF 达到了 0.45,说明该投影物镜对于 80 nm 分辨力有很好的成像对比度。

图 7 为对应线宽为 80 nm 时,各视场 MTF 随像面离焦量的变化。从图中可以看出在 80 nm 的焦深范围内,空间频率为 6240 lp/mm(对应线宽为 80 nm)的线条在系统全视场范围内传递函数均大

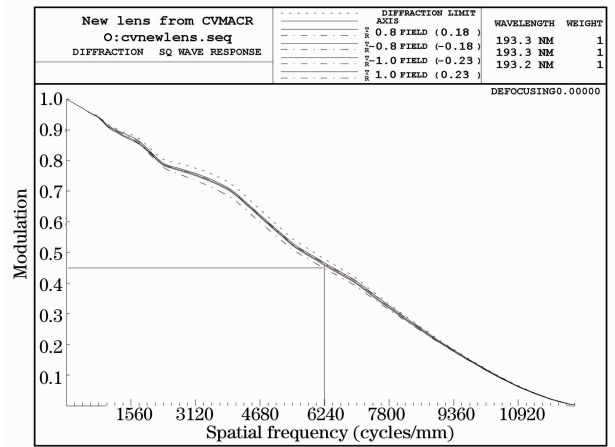


图 6 MTF 与空间频率的关系

Fig. 6 Relation between MTF and spatial frequency

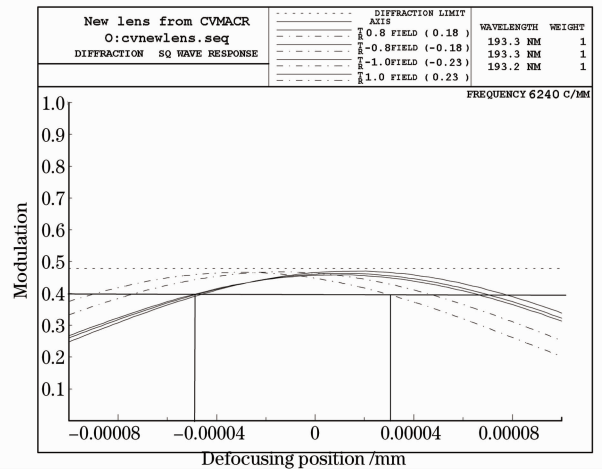


图 7 空间频率 6240 lp/mm 时 MTF 随焦深的变化

Fig. 7 MTF versus depth of focus when spatial frequency is 6240 lp/mm

于 40%。因此,在焦深 80 nm 的范围内均可达到要求的成像分辨力。

4.3 焦面偏移

由于系统存在像差,所以全视场内各点的最佳像面置并不重合,利用光学设计软件 CODE V 对各视场点成像质量进行折中,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。其中各视场偏离最大者对系统最佳像面的偏移为 7.23 nm,小于其实际焦深的 1/10。

4.4 畸变

图 8 为投影光刻物镜全视场下的相对畸变图。横坐标为相对畸变,纵坐标为像高。畸变随视场变化,在边缘视场处畸变最大,相对畸变为 0.0258%,全视场最大畸变为 6.5 nm。

4.5 达到的技术指标

上述投影光刻物镜像方数值孔径为 1.20,曝光视

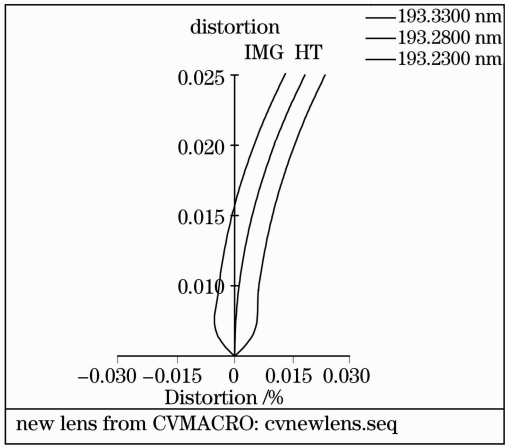


图 8 畸变

Fig. 8 Distortion

场为 $\phi 50 \mu\text{m}$, 工作波长为 $(193.28 \pm 0.05) \text{ nm}$, 倍率为 0.01, 物方远心度为 4 mrad, 像方远心度为 0.2 mrad, 线中心遮拦比为 13%, 分辨率 80 nm (6240 lp/mm) 的 MTF 大于 0.45, 全视场最大畸变为 6.5 nm, 满足了设计要求。

表 2 加工公差 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)

Table 2 Manufacturing tolerances ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)

Fringe power / λ	Surface irregularity / λ	Central thickness / mm	Wedge / mm
0.1~0.5	0.03~0.1	0.002~0.035	0.002~0.003

在该光学系统 8 枚镜片, 元件 2 和元件 3 作为反射元件在该折反系统中承担了较多的光焦度, 需要严格控制其面型误差, 其对样板光圈仅为 0.1λ , 局部光圈为 0.03λ 。剩余元件的对样板光圈为 $0.2\lambda \sim 0.5\lambda$, 局部光圈为 $0.05\lambda \sim 0.1\lambda$ 。

表 3 装调公差

Table 3 Alignment tolerances

Airspace / mm	Tilt / (")	Decenter / mm
0.005~0.02	10~36	0.001~0.01

该系统对元件的装调精度要求较高, 其中元件的倾斜和偏心误差对系统最终波像差影响较大。反射元件 2 和元件 3 对倾斜误差及偏心误差要求最为严格, 其倾斜误差在 $10''$ 左右, 偏心误差仅为 $1 \mu\text{m}$ 。其余元件的偏心误差也应控制在 $10 \mu\text{m}$ 之内, 故在系统装校中需要超高精度的定心, 才能保证系统的精度。

图 9 为投影光刻物镜的公差分析结果图。可见按照上述公差标准, 90% 的概率可以使加工装调后的物镜的波像差小于 0.06λ , 即全视场波像差小于 11.6 nm, 满足了实验需求。

5 初步公差分析

光学系统中元件的加工误差和系统装配误差会导致像质恶化。在这种高精度物镜加工和装配中, 一方面要保证严格的加工和装调公差; 另一方面也要选择合理的补偿器来提高物镜的整体性能^[17], 降低苛刻的公差要求。

应该对该光学系统进行像差敏感度分析以确定合理的补偿器。通过对元件轴向移动, 进行三阶和五阶像差敏感度分析, 确定了元件 5 作为轴向调整元件, 补偿对称性误差引起的球差; 同理, 根据元件径向移动引起的波像差拟合 Zernike 系数变化, 确定了元件 4 作为径向调整元件, 补偿加工和装调引入的偏心和倾斜误差。根据 Marechal 判据, 系统最终波像差在 $\frac{1}{14}\lambda$ 以内, MTF 曲线接近衍射极限, 可认为系统是完善的。结合选取的补偿器, 使用 CODE V 软件进行公差分析, 当系统波像差降至 $\frac{1}{14}\lambda$ 时, 投影物镜的元件加工公差和装调公差如表 2 和表 3 所示。

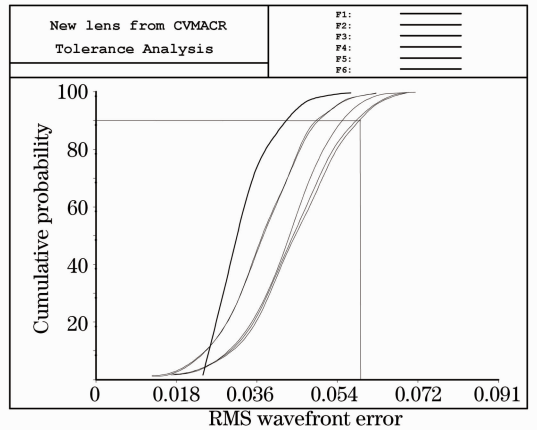


图 9 公差分析结果

Fig. 9 Results of tolerance analysis

由以上分析可得出, 为保证良好的成像质量, 该实验型投影光刻物镜对元件加工和装调的精度要求较为严格。为进一步降低加工及装配的难度, 且保证能够实现高分辨率, 在实际加工装配过程中, 还需要结合复算、面型精修和计算机辅助装调等像质补偿方案, 对该光学系统做更深入的分析。

6 结 论

针对 45 nm 及以下节点光刻技术的研究需求, 依据像差理论在 Schwarzschild 反射系统中添加折射补偿镜组来减小中心遮拦, 扩大像方数值孔径, 设计了一套数值孔径为 1.20 的小视场 Schwarzschild 投影光刻物镜。该物镜仅使用融石英材料, 曝光视场为 $\phi 50 \mu\text{m}$, 工作带宽为 100 pm, 线中心遮拦比为 13%, 全视场最大畸变为 6.5 nm, 且对 80 nm (6240 lp/mm) 节点的曝光图形有着良好的成像对比度。该系统可用于搭建深紫外波段浸没式光刻实验平台, 结合离轴照明或相移掩模等分辨率增强技术, 探索 45 nm 及以下节点的光刻相关技术。

参 考 文 献

- 1 E. W. Arriola. Diamond turning assisted fabrication of a high numerical aperture lens assembly for 157 nm microlithography [C]. *SPIE*, 2003, **5176**: 36~43
- 2 J. Webb, J. Benley, P. Michaloski *et al.*. Optical design forms for DUV & VUV microlithographic processes[C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 566~567
- 3 D. S. Grey, P. H. Lee. A new series of microscope objectives: I. catadioptric Newtonian systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, **39**(9): 719~723
- 4 A. R. Phillips Jr, P. F. Michaloski. Imaging System for Deep Ultraviolet Lithography[P]. U. S. Patent US, 5650877, July 22, 1997
- 5 D. S. Grey. A new series of microscope objectives: III. Ultraviolet objectives of intermediate numerical aperture[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1950, **40**(5): 283~290
- 6 J. E. Webb. Using multi-function components to solve optical design challenges for DUV microlithographic applications[C]. *SPIE*, 2005, **5874**: 1~15
- 7 J. E. Webb, L. Denes. Immersion lithography objectives[C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 788~797
- 8 W. Boeij, G. Swinkels, N. L. Masson *et al.*. Enabling the 45 nm node by hyper-NA polarized lithography[C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61540
- 9 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
- 10 J. Burnett, Z. H. Levine, E. L. Shirley. Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(24): 1~4
- 11 D. R. Shafer, Y. H. Chuang, J. J. Armstrong. Small catadioptric microscope optics[C]. *SPIE*, 2004, **5523**: 12~18
- 12 Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 292~295
王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 292~295
- 13 D. S. Grey. Computed aberrations of spherical Schwarzschild reflecting microscope objectives[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, **41**(3): 183~192
- 14 Hao Peiming, Li Kexin, Yuan Liyin. Third-order aberration correction of two-mirror optical systems with zero-optical power corrector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222004
郝沛明, 李可新, 袁立银. 带有无光焦度校正板两镜系统的三级像差校正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222004
- 15 Li Jie, Ming Jingqian, Lu Ruofei. Design of an ameliorating infrared Cassegrain optical system[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(2): 73~80
李 婕, 明景谦, 卢若飞. 一种改进型的红外卡塞格林光学系统设计[J]. *红外技术*, 2010, **32**(2): 73~80
- 16 J. E. Webb, T. Tienvieri. Double Mirror Catadioptric Objective Lens System with Three Optical Surface Multifunction Component[P]. U. S. Patent US, 6560039B1, May 6, 200316
- 17 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122003
许伟才, 黄 玮, 杨 旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122003

栏目编辑: 韩 峰