

用于光刻调焦调平的反射式投影光学系统设计

孙生生^{1,2**}, 王丹¹, 齐月静^{1,2}, 宗明成^{1,2*}

¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 调焦调平传感器是光刻机关键分系统之一,用于曝光前对硅片高度形貌进行测量。投影光学系统是调焦调平传感器的核心,其成像质量直接影响传感器测量精度。根据调焦调平传感器的测量原理与像差理论,分析得到投影光学系统放大倍率、畸变、远心度和分辨率对调焦调平系统测量精度的影响规律。为此,优选反射式投影光学系统设计方案,该方案具有结构简单、无色差、畸变小等特点,并利用 ZEMAX 软件进行设计优化和公差分析,所设计系统工作波长为 600~1000 nm,放大率为 1.000,视场 3 mm×26 mm 范围内弥散斑均方根半径小于 0.189 μm,调制传递函数为 0.74@33 lp/mm,最大畸变为 0.0008%,远心度为 0.04 mrad。结合目前光机制造和装配能力可知,用于光刻调焦调平的反射式光学投影系统设计可工程实现。

关键词 光学设计; 调焦调平; 反射式; 投影光学

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1522002

Design of Reflective Projection Optics Used in Lithographic Focusing and Leveling System

Sun Shengsheng^{1,2**}, Wang Dan¹, Qi Yuejing^{1,2}, Zong Mingcheng^{1,2*}

¹Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The focusing and leveling sensor is one of the key subsystems in lithography system. It is used to measure the height map of silicon wafers before exposure. The projection optics is the most important module of the focusing and leveling sensor, its' imaging quality directly affect the measurement accuracy of the sensor. According to the measurement principle of the sensor and aberration theory, the influence of magnification, distortion, telecentricity, and resolution on the measurement accuracy of focusing and leveling sensor is analyzed. A reflective optical design is chosen for the projection optics, which has characteristics of simple structure, no chromatic, and small distortion. After the optimization and tolerance analysis by using Zemax software, the working wavelength of designed system is 600-1000 nm, root-mean-square radius of the diffuse spot is less than 0.189 μm within a field of view of 3 mm×26 mm, its magnification is 1.000, maximum distortion is 0.0008%, modulation transfer function is 0.74@33 lp/mm, and telecentricity is 0.04 mrad. The results show that the reflective optical design for lithographic focusing and leveling sensor is engineering feasible with the current opto-mechanical manufacturing and assembling capability.

Key words optical design; focusing and leveling; reflective; projection optic

OCIS codes 220.3740; 220.4830; 120.3620; 120.4820

1 引 言

调焦调平系统是光刻机关键分系统之一^[1],用于对硅片表面高度形貌进行测量。随着光刻关键尺寸的减小,光刻机焦深控制范围越来越小。焦深控

制精度是光刻机投影物镜、工件台、调焦调平等相关分系统共同影响的结果。例如,光刻机焦深控制精度要达到 110 nm^[2],需要调焦调平系统的测量精度小于 10 nm。

目前,国际主流光刻机供应商 ASML、Nikon、

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101006)

* E-mail: zongmingcheng@ime.ac.cn; ** E-mail: sunshengsheng@ime.ac.cn

Canon 的调焦调平系统均基于光学三角法测量原理^[3-6]实现。调焦调平投影光学系统根据光线传输方式可分为透射式和反射式,其中 Nikon IC 光刻机中采用透射式投影光学系统^[4],ASML 早期单工件台光刻机采用透射式双远心投影光学系统^[7],后期 XT/NXT 等系列双工件台光刻机则采用反射式双远心投影系统^[8]。

国内一些单位对调焦调平技术进行了研究,2007 年华中科技大学李小平等^[6]在分析调焦调平传感器时使用了简化模型,将投影成像系统视为等大倒立实像;2014 年中国科学院光电技术研究所 Yan 等^[9]研究了调焦调平系统的投影成像系统采用 $4f$ 透射式双远心系统;2016 年中国科学院微电子研究所孙裕文等^[10]开展了一种基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术研究;2017 年上海交通大学庄亚政等^[11]开展基于扫描反射镜调制的调焦调平系统测试方法研究,其投影光学系统采用向甫鲁(SC)双远心成像系统,该系统由十几个透镜组件组成,像差较大,在量程两端存在较大非线性。综上所述,调焦调平系统的相关研究主要基于透射式投影系统,尚未见针对反射式投影光学系统的相关报道。

调焦调平投影光学系统要求在较宽光谱范围内,具有较小的畸变、较大的景深,传统的透射式成像系统,往往需要较多镜片,优化及安装调试都相对复杂。而 Offner 系统作为反射式成像系统,自身无色差,仅由两个反射镜构成,结构简单,易于集成,在光谱仪系统中已得到应用^[12]。基于以上考虑,本文在给出一种用于光刻调焦调平的反射式投影光学结构的基础上,根据调焦调平系统测量原理与像差理论,分析得到投影系统光学指标对调焦调平系统测量精度的影响规律,以典型的 Offner 光学系统为基础,设计完成

了应用于光刻调焦调平传感器的反射式光学投影系统,并对其进行了像质评价和公差分析。

2 一种用于光刻调焦调平传感器的反射式光学结构

作为调焦调平传感器的核心,投影系统的成像质量直接影响测量精度。待测表面形貌是根据投影光栅像与探测光栅所形成的莫尔条纹进行测量得到,投影系统畸变将直接导致探测光栅像畸变,从而造成莫尔条纹变化,引起测量误差。为保证投影光学系统在测量范围内都能够对投影光栅进行清晰成像,要求投影系统具有较大的景深。另外,传感器需满足光刻工艺适应性,调焦调平测量系统需采用宽光谱光源,带宽一般大于 300 nm ^[7]。研究设计具有小畸变、大景深、小色差的投影成像系统是提高调焦调平传感器性能的一个途径,也是调焦调平传感器测量精度的保障。

本文设计了一种用于光刻调焦调平传感器的反射式光学系统,结构示意图如图 1 所示。两个投影成像系统均为典型 Offner 结构,包含两个反射镜,一个是凹球面反射镜作为主镜,另一个是凸球面反射镜作为次镜,光线在两个反射镜之间发生三次反射,属于三反射成像系统。此外,次镜凸球面反射面位于主镜焦面上,在次镜凸球面反射镜位置处设置孔径光阑,光阑位于主镜焦面位置,构成物方远心系统,又因为 Offner 系统为对称结构,构成双远心成像系统^[13]。为满足传感器在光刻机中机械空间及接口要求,在系统入射光路中加入了平面反射镜 Mirror1、Mirror2、Mirror3、Mirror4,对系统光轴进行折转,其中 Mirror2、Mirror3 还用于调节测量表面光线入射角度。

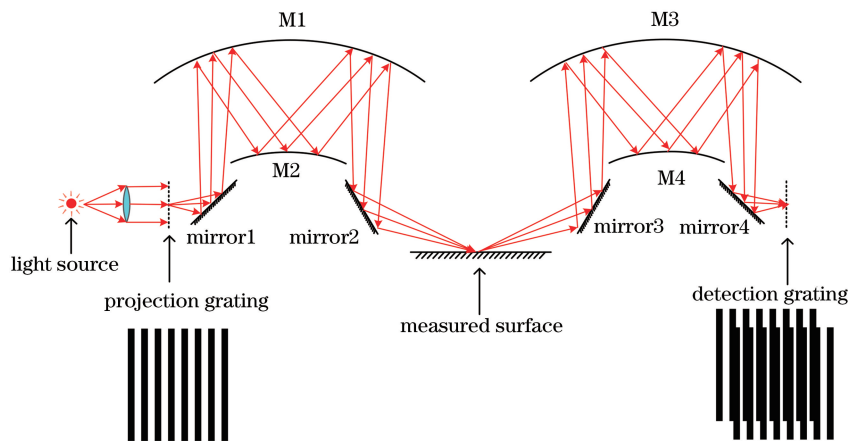


图 1 反射式调焦调平传感器光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of focusing and leveling sensor with reflective optical design

3 反射式投影光学系统设计

透射式双远心投影系统一般由多个透镜组成^[11],为满足色差等条件需要大量优化设计,并且机械安装也相对复杂。Offner 反射式双远心投影系统光学结构无色差,系统结构简单,仅由两个球面反射镜和两个平面反射镜组成,后期优化设计与工程实现相对容易。本文优选反射式投影系统,原理如图 2 所示,物面到平面反射镜 Mirror1 距离为 l_1 ,平面反射镜 Mirror1 到球面反射镜 M1 距离为 l_2 ,球面反射镜 M1 与球面反射镜 M2 之间光束传输距离为 l_3 、 l_4 ,球面反射镜 M1 与平面反射镜 Mirror2 之间距离为 l_5 ,平面反射镜 Mirror2 到像面距离为 l_6 ,其中两个球面反射镜曲率半径分别为 R_1 、 R_2 ,且两个球面球心重合。

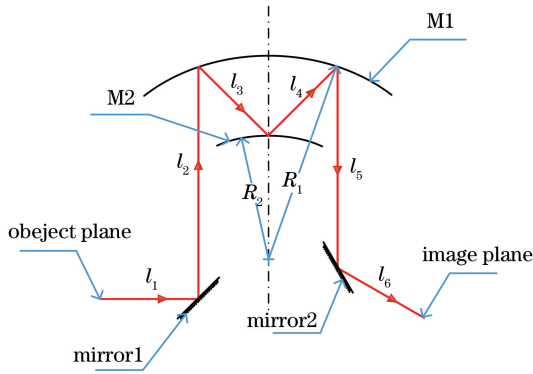


图 2 反射式投影系统原理图

Fig. 2 Schematic of reflective projection system

投影系统成像质量影响系统的测量精度,其中放大倍率、畸变、远心度直接影响投影光栅像的周期、成像相对位置,分辨率影响投影光栅像的对比度,也将对系统的测量精度产生影响,为满足测量精度的要求,需要研究像差对测量精度影响规律,建立理论模型进行分析。

根据文献[10]中调焦调平传感器测量原理,推导出高度测量公式为

$$h_m = G \frac{\frac{8}{\pi} \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{P} 2h \sin \alpha\right)}{\left[1 + 2\operatorname{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\right)\right]}, \quad (1)$$

式中: P 为投影光栅周期; h 为测量面实际相对高度; h_m 为系统测量高度; G 为比例系数; α 为测量面光线入射角度。

根据 SEMI MF657-0707E 标准,300 mm 标准硅片厚度变化范围为 $-1.25 \sim 1.25 \mu\text{m}$,将该范围作为调焦调平传感器的测量范围,并由此得到光栅

的周期,取(1)式中类正弦曲线零点附近幅值 $\pm 50\%$ 范围作为线性区间,即

$$\sin\left(\frac{2\pi}{P} 2h \sin \alpha\right) \leq \frac{1}{2}. \quad (2)$$

又因 $0 \leq \sin \alpha \leq 1$,因此 $P \geq 30 \mu\text{m}$,并且光栅周期越小,测量分辨率越高,因此选择投影光栅和探测光栅周期为 $30 \mu\text{m}$ 。拟采用振幅型光栅为投影光栅,其复振幅透过率为

$$t(x, y) = \left[\operatorname{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nP) \right] \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{y}{L}\right), \quad (3)$$

式中: a 为光栅狭缝宽度; L 为光栅宽度; x 为垂直光栅线栅方向; y 为平行光栅线栅方向。

照明光源照射到投影光栅,投影光栅经过投影系统后,投影光栅像复振幅为

$$E(x, y) = \frac{a}{P} \operatorname{rect}\left(\frac{y}{L}\right) \left[1 + 2\operatorname{sinc}\left(\frac{a}{P}\right) \cos 2\pi \frac{x}{P} \right]. \quad (4)$$

放大倍率将改变光栅周期 P 与光栅宽度 L ,当放大倍率为 β 时,根据(4)式可知,投影光栅像复振幅为

$$E(x, y) = \frac{a}{P \times \beta} \operatorname{rect}\left(\frac{y}{L \times \beta}\right) \times \left[1 + 2\operatorname{sinc}\left(\frac{a}{P \times \beta}\right) \cos 2\pi \frac{x}{P \times \beta} \right]. \quad (5)$$

远心度将改变光栅像大小,当远心度为 α ,离焦量为 d 时,根据(4)式可知,投影光栅像复振幅为

$$E(x, y) = \frac{a}{P} \operatorname{rect}\left(\frac{y}{L + d \times \tan \alpha}\right) \times \left[1 + 2\operatorname{sinc}\left(\frac{a}{P + d \times \tan \alpha}\right) \cos 2\pi \frac{x}{P + d \times \tan \alpha} \right]. \quad (6)$$

此外,为产生畸变,设置畸变矩阵对光栅图像进行处理,通过修改矩阵参数,得到不同畸变的像;为实现分辨率改变,设置不同的数字滤波器,通过改变数字滤波器参数得到不同分辨率的光栅像。分别仿真计算出不同像差条件下投影光栅像,如图 3 所示。

调焦调平传感器采用莫尔条纹与光学三角法的测量原理,探测部分采用空间分光技术^[10]。投影光栅的像与探测光栅形成莫尔条纹,再经分光系统后得到两组莫尔条纹,最终根据莫尔条纹的光强通过多项式拟合得到测量高度。采用文献[10]中测量高度方法进行测量误差分析,当测量高度为 $1.25 \mu\text{m}$ 时,测量误差随各像差的变化曲线如图 4 所示。

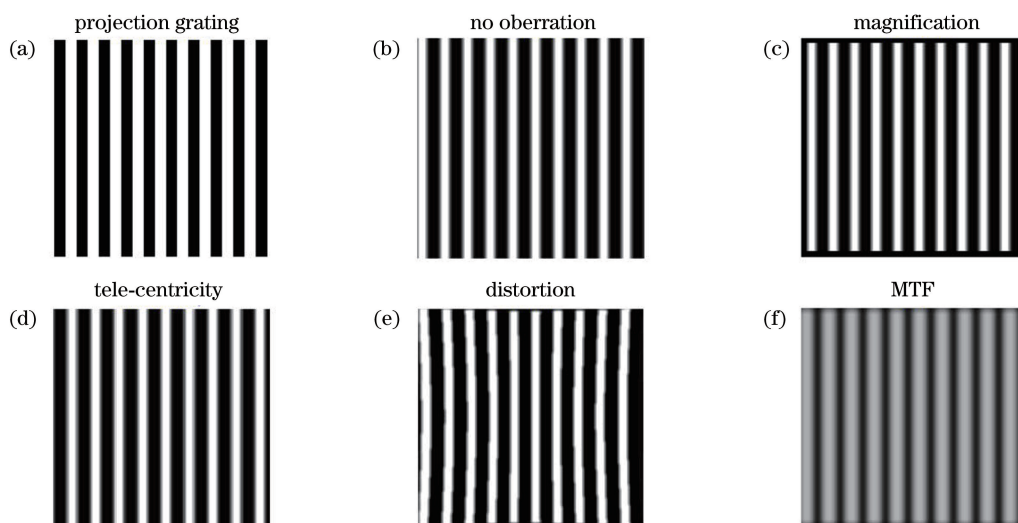


图 3 模拟投影光栅与不同像差条件下投影光栅的像。(a)投影光栅;(b)无像差的像;(c)放大倍率为 0.95 时的像;
(d)远心度为 5 mrad 时的像;(e)畸变为 0.08 时的像;(f)调制传递函数(MTF)值为 0.70 时的像

Fig. 3 Simulated projection grating and its imaging with different aberrations. (a) Projection grating; (b) imaging with no aberration; (c) imaging with 0.95 magnification; (d) imaging with 5 mrad tele-centricity; (e) imaging with 0.08 distortion; (f) imaging with 0.70 modulation transfer function (MTF)

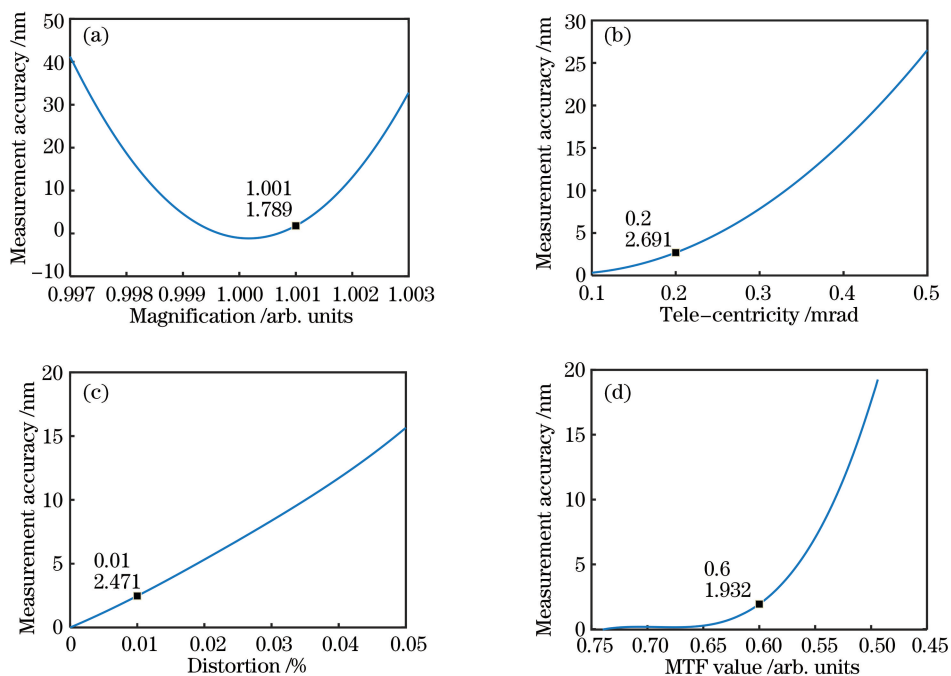


图 4 系统测量精度随不同像差的变化曲线。(a)放大倍率;(b)远心度;(c)畸变;(d) MTF 值

Fig. 4 Measurement accuracy of system with different aberrations. (a) Magnification; (b) tele-centricity; (c) distortion; (d) MTF value

根据放大倍率、畸变、远心度、分辨率与调焦调平传感器测量精度关系的仿真结果,参考光刻机焦深控制预算分配方式^[14],为满足调焦调平传感器测量精度小于 10 nm,确定相关参数如下:放大倍率为 1.001,测量误差 $\delta_1 = 1.789$ nm;远心度为 0.2 mrad,测量误差 $\delta_2 = 2.691$ nm;畸变为

0.01%,测量误差 $\delta_3 = 2.471$ nm;MTF@33 lp/mm 为 0.60,测量误差 $\delta_4 = 1.932$ nm;总测量误差为 $\delta = 2 \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = 9.00$ nm,满足调焦调平传感器测量精度要求。得到投影光学系统的性能指标要求如表 1 所示。

表 1 系统性能指标要求

Table 1 Requirement for system performance index

Parameter	Value
Field / (mm×mm)	3×26
Tele-centricity /mrad	<0.2
NA	0.065
Magnification	-1±0.001
Wavelength range /nm	600-1000
Distortion /%	<0.01
MTF(@33 lp/mm)	>0.60

将表 1 中指标作为输入条件,以远心度、放大倍率、畸变为约束条件,优化过程中将 R_1 、 R_2 、 l_2 、 l_3 、 l_6 设置为变量,最终得到反射式投影系统结构参数如表 2 所示,TTHI 为面厚度。

表 2 系统结构参数

Table 2 Structure parameter of the system

Element	Parameter	Value /mm
M_1	Semi-diameter	70.000
	Radius	384.389
M_2	Semi-diameter	20.000
	Radius	192.182
l_1	TTHI	100.000
l_2	TTHI	289.381
l_3	TTHI	193.738
l_4	TTHI	193.738
l_5	TTHI	269.381
l_6	TTHI	120.000

4 反射式投影光学系统性能评估及公差分析

4.1 反射式投影光学系统成像性能评估

点列图是通过光学系统物点像的光线集中度来研究系统成像质量,根据调焦调平系统所采用的投影光栅结构,将视场设置为(-1.5, -13)、(-1.5, 13)、(-1.5, 5.9)、(-1.5, -5.9)、(0, 0)、(1.5, 5.9)、(1.5, -5.9)、(1.5, 13)、(1.5, -13),投影系统点列图如图 5 所示,从该投影系统弥散斑图可以看出,在照明光源波长范围内,视场最大均方根半径是 $0.189 \mu\text{m}$ 。图 6 所示为投影系统 MTF 曲线,MTF 曲线接近衍射极限,MTF@33 lp/mm 为 $0.74 > 0.60$ 。图 7 所示为投影系统 X、Y 两个方向上的畸变,均小于 0.002%;根据以上成像系统像差结果可知,该投影系统满足设计技术要求。

4.2 投影系统公差分析

光学系统公差主要有制造公差、机械装配公差,根据调焦调平传感器测量精度指标要求,对光学的

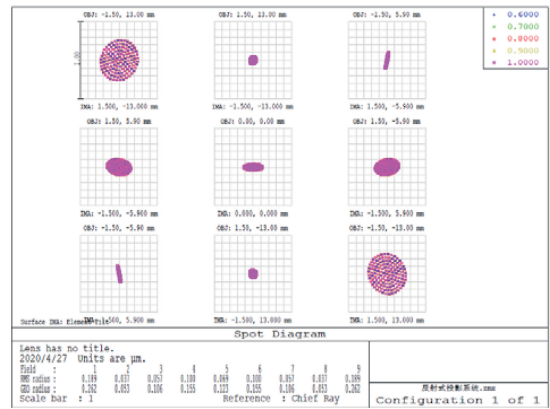


图 5 投影系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of projection system

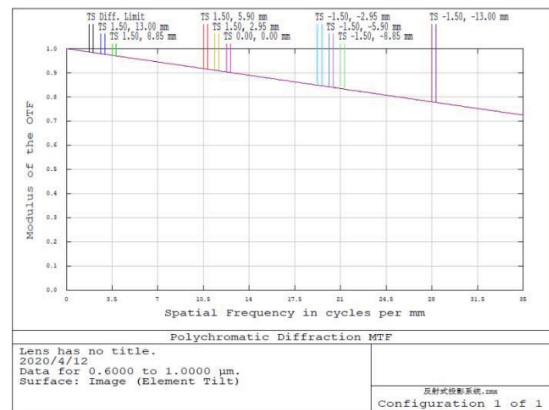


图 6 投影系统 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of projection system

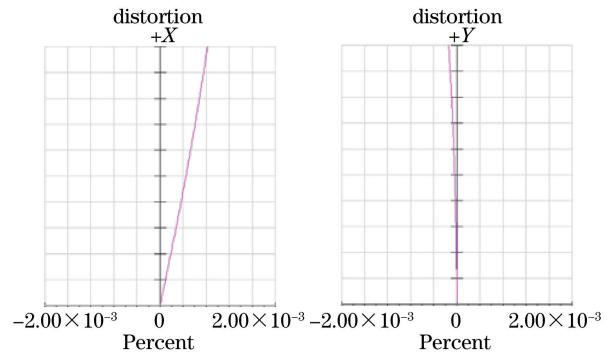


图 7 投影系统畸变

Fig. 7 Distortion of projection system

公差进行分配,如表 3 所示,两个球面反射镜表面曲率半径的偏差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,加工偏心公差(DEC)为 $\pm 0.05 \text{ mm}$,倾斜公差(TILT)为 $\pm 0.01^\circ$,两个球面反射镜与两个平面反射镜的表面不规则度为 0.1 个光圈;装配公差包含两球面反射镜间距公差 $\pm 0.05 \text{ mm}$,装配偏心公差 $\pm 0.05 \text{ mm}$,倾斜公差 $\pm 0.01^\circ$,阿贝数为 1%。

以 MTF@33 lp/mm 处值作为标准,对该成像

系统进行敏感度分析。影响投影系统光学传递函数 MTF@33 lp/mm 处值的前 10 个公差如表 4 所示, TETY 为元件 Y 方向倾斜公差, TSTY 为标准面 Y 倾斜公差, TSDX 为标准面 X 偏心公差, TEDX 为元件 X 方向偏心公差。从结果来看, 公差影响系统

MTF 对应参数结构有: 球面反射镜 M1 与平面反射镜 Mirror2 的距离 l_5 , 球面反射镜 M1 到平面反射镜 Mirror1 的距离 l_1 , 以及球面反射镜 M1 偏心、倾斜、偏移, 主要是球面反射镜 M1 相对位置引起, 以上公差都与装配相关, 需要通过装配精度来保障。

表 3 反射式投影系统公差分配

Table 3 Tolerances distribution of the reflection projection system

Surface	Radius /mm	TILT	TILT	DEC	DEC	Irregularity / fringe	Position /mm	Abbe /%
		X/(°)	Y/(°)	X/mm	Y/mm			
M1	±0.1	±0.01	±0.01	±0.05	±0.05	±0.1	±0.05	1.00
M2	±0.1	±0.01	±0.01	±0.05	±0.05	±0.1	±0.05	1.00
Mirror1	-	±0.01	±0.01	-	-	±0.1	±0.05	-
Mirror2	-	±0.01	±0.01	-	-	±0.1	±0.05	-

表 4 公差对 MTF 的影响

Table 4 Effect of tolerances on MTF

Type	Object	Value /mm	Criterion	Change
TTHI	l_5	0.05	0.732679	-0.00921
TETY	M1	-0.01	0.735228	-0.00666
TSTY	M1	-0.01	0.735228	-0.00666
TETY	M1	0.01	0.735408	-0.00648
TTHI	l_5	-0.05	0.735733	-0.00615
TTHI	l_1	0.05	0.737226	-0.00466
TSDX	M1	0.05	0.737690	-0.00419
TEDX	M1	0.05	0.737690	-0.00419
TEDX	M1	-0.05	0.737799	-0.00409
TTHI	l_1	-0.05	0.739291	-0.00259

4.3 光学零件可制造性和装配过程

本文投影光学系统中核心零件是两个球面镜反射镜, 其中球面镜 M2 有效口径相对较小, 为 40 mm, 零件加工能够满足表面不规则度小于 0.1 个光圈, 曲率半径公差 0.1 mm 的指标要求。球面镜 M1 要求口径 140 mm 范围内, 表面不规则度小于 0.1 个光圈, 曲率半径公差 0.1 mm, 相对来说加工难度较大, 但目前国内的加工水平也可以达到。

投影光学系统中光学元件精密装配, 通过机械镜筒加工精度保证。为保证光机装配后两球面镜件距离小于 0.1 mm, 要求机械镜筒在筒长 193 mm 范围内公差控制在 ±0.05 mm。同时, 为保证光机装配后两球面镜偏心和倾斜满足指标, 要求机械镜筒上与球面接触处圆弧跳动公差小于 10 μ m。以上提到的机械镜筒加工精度可通过精密联动数控机床保证。其次, 装配过程中借助于 Leitz 超高精密三坐标测量机, 其测量精度小于 1 μ m, 对系统中光学元件安装位置进行在线测量, 实时进行精细调整, 以进一步提高元件装配精度以及最终系统成像性能。

最后, 采用蒙特卡罗分析方法对公差进行评价, 对反射式投影系统进行综合性能分析, 计算分析了 100 个样本, 每个样品作为一个实际加工并装调后的反射式投影系统模拟, 得到 MTF 统计结果如表 5 所示, 90% 以上的反射式投影系统, MTF 值大于 0.72。在该公差分配情况下, 像质满足系统设计技术要求, 可以工程化实现。

表 5 蒙特卡罗分析结果

Table 5 Monte Carlo analysis results

Percent /%	MTF
90	>0.722339
80	>0.729696
50	>0.734511
20	>0.738964
10	>0.740203

5 结 论

本文根据调焦调平测量原理与像差理论, 分析了像差与测量精度之间的关系, 得到了满足测量精度小于 10 nm 的调焦调平传感器的投影光学系统性能指标, 设计了一种用于光刻调焦调平传感器的反射式投影光学系统。通过 Zemax 软件进行优化后, 该系统放大率为 1.000, 工作波长 600 ~ 1000 nm, 视场 3 mm × 26 mm 范围内弥散斑均方根半径小于 0.189 μ m, 调制传递函数 MTF @ 33 lp/mm 为 0.74, 最大畸变为 0.0008%, 远心度为 0.04 mrad, 满足设计要求。该光学系统中的投影成像系统只有两个球面反射镜与两个平面反射镜组成, 具有结构简单、无色差、畸变小等优点。通过公差分析, 结合目前的光机制造和装配能力, 可工程化实现, 为高精度光刻调焦调平传感器提供了一种光学设计方法。

参 考 文 献

- [1] Fontaine B M L, Hauschild J, Dusa M V, et al. Study of the influence of substrate topography on the focusing performance of advanced lithography scanners[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 570-581.
- [2] Boeij W P D, Pieternella R, Bouchoms I, et al. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831L.
- [3] Kerr P B, Fuchs J, Crouch R T. internet based method and system for worldwide promoting and offering for sale or license patent rights and patent application rights: US20180158160[P]. 2018-06-07.
- [4] Hidaka Y, Ishikawa M. Surface position detecting apparatus, exposure apparatus, surface position detecting method, and device manufacturing method: US8223345[P]. 2012-07-17.
- [5] Kobayashi T, Kosugi Y. Surface position measuring method and apparatus: US7668343[P]. 2010-02-23.
- [6] Li X P, Chen F B. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1987-1991.
李小平, 陈飞彪. 投影光刻机硅片调焦调平测量模型[J]. 光学学报, 2007, 27(11): 1987-1991.
- [7] van der Werf J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1992, 10(2): 735-740.
- [8] Jasper J C M, Loopstra E R, Modderman T M, et al. Off-axis levelling in lithographic projection apparatus: US20040130691[P]. 2004-04-29.
- [9] Yan W, Yang Y, Chen W F, et al. Moiré-based focusing and leveling scheme for optical projection lithography[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): 5959-5963.
- [10] Sun Y W, Li S G, Zong M C. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0512002.
孙裕文, 李世光, 宗明成. 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0512002.
- [11] Zhuang Y Z, Qi J C, Chen X J. Research on test method of focusing and leveling system based on scanning mirror modulation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(10): 45-47.
庄亚政, 齐景超, 陈小娟. 基于扫描反射镜调制的调焦调平系统测试方法研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(10): 45-47.
- [12] Zhu Y J, Yin D Y, Chen Y H, et al. Design of hyperspectral resolution ultraviolet Offner imaging spectrometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0222001.
朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外 Offner 成像光谱仪系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222001.
- [13] Huang Y S, Ni Z J. Research of the concentric three-reflection optical system[J]. Optical Instruments, 2005, 27(2): 42-46.
黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. 光学仪器, 2005, 27(2): 42-46.
- [14] Jang J H, Park T, Park K D, et al. Focus control budget analysis for critical layers of flash devices[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9050: 90502F.