

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 胡松

引用本文:

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 等. 光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析[J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220226.

Du J, Liu J B, Quan H Y, et al. Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220226.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220226>

收稿日期: 2022-09-15; 修改日期: 2022-10-26; 录用日期: 2022-11-11

相关论文

光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 胡松

光电工程 2023, (): doi: 10.12086/oe.2023.220226

基于自适应非线性粒子群算法的光刻光源优化方法

王建, 刘俊伯, 胡松

光电工程 2021, 48(9): 210167 doi: 10.12086/oe.2021.210167

基于运动补偿的DMD无掩模光刻拼接误差校正

姜旭, 杨絮, 刘红, 胡俊, 王英志

光电工程 2020, 47(6): 190387 doi: 10.12086/oe.2020.190387

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 | 光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220226

光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 胡松*

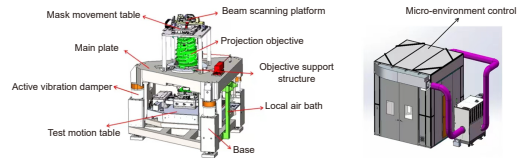
中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室,
四川 成都 610209

摘要: 在光刻投影物镜的畸变检测中, 位移测量误差是光刻投影物镜畸变检测的重要误差源之一, 深度分析误差源并减小误差项, 可提高光刻投影物镜的畸变检测精度。本文将运动台的定位与测量技术相结合, 着重分析利用夏克-哈特曼波前传感器对投影物镜进行畸变检测时像质检测台的位移测量误差。并以一套投影物镜像质检测台为例, 对其在投影物镜畸变检测中的位移测量误差进行分析, 利用该像质检测台对某一投影物镜进行畸变检测, 畸变检测结果约 80 nm, 其中该像质检测台的位移测量误差会给畸变检测结果带来约 22 nm 的不确定度。

关键词: 畸变检测; 波前检测; 位移测量; 投影物镜

中图分类号: TN305.7

文献标志码: A



杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 等. 光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析[J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220226

Du J, Liu J B, Quan H Y, et al. Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220226

Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective

Du Jing, Liu Junbo, Quan Haiyang, Hu Song*

State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: In the distortion detection of the lithography projection objective, the displacement measurement error is one of the important error sources. Depth analysis of the error sources and reduction of the error terms can improve the distortion detection accuracy. Combining the positioning and measurement technology of the moving stage, this paper analyzes the displacement measurement error of the image quality detection stage when the Shack-Hartmann wavefront sensor is used to detect the distortion of the projection objective. In this paper, a set of image quality detection platform is taken as an example to analyze the displacement measurement error in the distortion detection of the projection objective, and the image quality detection platform is used to measure the distortion of a projection objective. The distortion detection result is about 80 nm, in which the displacement measurement error of the image quality detection platform will bring about an uncertainty of about 22 nm to the distortion detection result.

Keywords: distortion measurement; wavefront measurement; displacement measurement; projection objective

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2022-10-26; 录用日期: 2022-11-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3200204); 中国科学院青年创新促进会 (2021380)

*通信作者: 胡松, husong@ioe.ac.cn.

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

光刻机的三大核心指标分别是分辨率、套刻精度和生产率。其中光刻的套刻精度是衡量光刻工艺的关键参数之一, 套刻精度衡量的是硅片上下两层图形的位置误差, 由于集成电路芯片的制造是通过多层电路叠加而成, 套刻精度的高低将直接影响产品的性能。投影物镜是光刻机的核心部件, 光刻机投影物镜的畸变是影响套刻精度最重要的因素之一, 它造成曝光到硅片上的图形相对于其理想位置发生偏移, 从而引起套刻误差。目前用于投影物镜畸变的检测技术分别有曝光检测法、空间像检测法和波前检测法。其中曝光检测法依赖于曝光工艺和设备, 检测流程复杂, 适合光刻工艺厂商, Litel 仪器^[1]和上海微电子装备^[2-3]都开发了基于曝光法的畸变检测技术。空间像测量法采用空间像传感器, 检测标记的实际成像位置, 与标记的理想成像位置比较可得到物镜成像位置偏移量, NIKON^[4]、ASML^[5-6]和上海微电子装备^[7]都对基于空间像传感器的畸变检测技术开展了深入的研究; 波前测量法采用波前传感器, 可测出每个波前测试标记的实际成像位置, 将理想成像位置与实际成像位置的差值拟合计算投影物镜的畸变, 并且该方法可以同时测量物镜的波像差, NIKON^[8-9]、上海微电子装备^[10-11]、中国科学院^[12]均开展了使用夏克-哈特曼对投影物镜进行畸变和波像差检测的研究, 其中 NIKON 开展了利用夏克-哈特曼传感器对物镜进行畸变测量的方法及原理装置的研究, 上海微电子装备对基于哈特曼传感器测量的物镜性能测试装置及方法进行优化改进, 该方法是基于掩模板的物镜性能测量, 并且采用参考测量的方法, 因此对于掩模板上标记之间的相对位置精度要求不高, 很大程度上降低了对掩模板加工制造的要求, 也有助于大视场物镜的测量精度的提高; 中国科学院光电技术研究所则主要针对夏克-哈特曼波前测量传感器本身的测量精度展开深入研究, 其测量精度可优于 0.4 nm。在利用夏克-哈特曼传感器对投影物镜进行畸变检测时, 哈特曼传感器的定位误差、掩模板的加工制造误差、掩模板安装的位置误差^[13]、测试光源的稳定性^[14]以及畸变检测中的位移测量误差均会给畸变检测结果带来影响, 其中位移测量误差是光刻投影物镜畸变检测中的重要误差源之一。目前国内外对利用夏克-哈特曼传感器对投影物镜进行畸变检测技术的介绍主要针对于测量方法及装置原理的介绍, 本文针对光刻投影物镜畸变检测的工程应用,

将畸变检测原理与运动台的定位和测量技术相结合, 着重讲述利用夏克-哈特曼波前传感器对投影物镜进行畸变检测时像质检测台的位移测量误差分析, 提出畸变测量时的位移测量误差源包括干涉仪的测量误差、运动台畸变检测中的水平阿贝误差及哈特曼定位点位置测量的复现性误差, 为提高畸变检测精度提供依据。

2 投影物镜畸变的检测原理

光学系统中, 实际像相对于理想像发生变形, 这种使像对物变形的像差称作畸变, 畸变产生的原因是主光线通过光学系统时存在球差^[15]。光学系统只存在畸变时, 整个物平面能够成一清晰的像, 但像的大小和理想像的大小不相等。光刻投影物镜在使用前需要对畸变进行检测, 根据检测结果, 可通过调整物镜内的可变动镜对像差进行补偿, 从而改善成像质量。光刻投影物镜的畸变要求是所有光学指标中最为严格的, 达到了纳米量级, 也对畸变的检测提出了更高的要求。对于不同的检测方法, 数据处理原理基本是相同的, 即将物面上不同视场点经过投影物镜所成像的实际位置 (x_i, y_i) , 与名义成像位置 (x_i, y_i) 做差, 得到物镜 X 和 Y 方向的成像位置偏移量 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 然后拟合得到畸变等误差^[16]。

如图 1 所示为使用哈特曼传感器对投影物镜进行畸变检测的原理图。掩模板上有 $m = a \cdot b$ 个小孔, 每个标记的间距为 D , 掩模板上的小孔采用电子束加工。为了消除掩模板的制造误差对畸变检测的影响^[17], 可提前用掩模板位移测量设备检测掩模板标记的位置误差, 然后基于测量结果对标记的理想成像位置进行修正。记每个小孔在掩模面的位置为 (x_{Ri}, y_{Ri}) , 掩模板上的小孔作为畸变测量的基准。哈特曼传感器分别与每个小孔标记的实际成像位置对准, 测量小孔的实际成像位置 (x_{ri}, y_{ri}) 。计算小孔的名义成像位置 (x_i, y_i) , 等于小孔在掩模面的位置 (x_{Ri}, y_{Ri}) 乘以投影物镜的名义微缩倍率 M , 即:

$$(x_i, y_i) = (x_{Ri}, y_{Ri}) \cdot M. \quad (1)$$

成像位置偏移量 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 为小孔实际成像位置与名义成像位置的差:

$$(\Delta x_i, \Delta y_i) = (x_{ri}, y_{ri}) - (x_i, y_i). \quad (2)$$

采用哈特曼传感器对投影物镜的畸变进行检测时, 成像位置的偏移除畸变造成外, 掩模板制造误差、哈特曼的定位测量误差、倍率误差及哈特曼传感器对

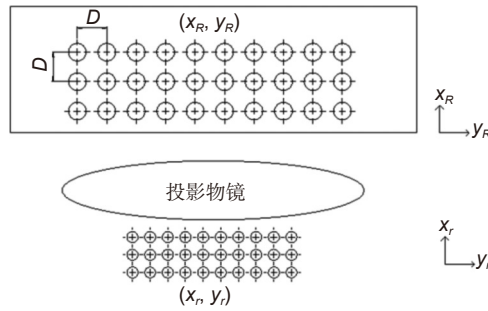


图 1 投影物镜畸变检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the projection objective distortion measurement

Zernike 系数的测量误差都会造成成像位置的偏移。将不同的误差因素导致的成像位置偏移量分量相加即为 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 方程 (3) 和 (4) 称为误差模型^[18]:

$$\Delta x_i = T_{xi} - \theta_i y_i + M_x x_i - k_i x_i r_i^2 + r_x, \quad (3)$$

$$\Delta y_i = T_{yi} - \theta_i x_i + M_y y_i - k_i y_i r_i^2 + r_y, \quad (4)$$

其中: T_{xi}, T_{yi}, θ_i 分别为搭载哈特曼的测试运动台在测试第 i 个小孔的成像位置偏移量时的平移和旋转误差, M_x, M_y 为物镜在 X 方向和 Y 方向的倍率误差, (x_i, y_i) 为第 i 个掩模小孔的名义成像位置, $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 为第 i 个小孔的名义像点到像面坐标系原点的距离, k_i 为三阶畸变系数, r_x, r_y 为 X 方向和 Y 方向的拟合残差值。假设 T_{xi}, T_{yi}, θ_i 在所有视场点均是相同的, 则共有六个未知数, 采样点足够多时即可实现被测物镜倍率和畸变参数的拟合。

从误差模型可以看出, 小孔的实际成像位置 (x_i, y_i) 测量的准确度将直接影响拟合后畸变的准确度。

3 投影物镜像质检测台的结构组成

投影物镜像质检测台是专用于投影物镜的像质检测的设备, 如图 2 所示, 投影物镜像质检测台由测试

运动台、掩模台、光束扫描台、框架结构及环控系统组成。其中测试运动台搭载哈特曼传感器, 采用双频激光干涉仪作为测量系统, 实现六自由度的高精密度定位, 以完成哈特曼传感器对投影物镜像质的检测; 掩模台用于实现掩模板的固定及相对于物镜的位置调整; 光束扫描台搭载测试光源和聚光镜, 实现检测光源的步进运动, 检测光源依次照亮掩模板上的小孔; 框架结构包含主基板、基座、吊篮等; 环控系统包括主动减振器及微环控系统。其中主基板、吊篮、测试运动台、掩模台、光束扫描台、投影物镜均处于主动减振器的内部世界, 微环控系统处于整个像质检测台的外部, 为其内部的位移测量系统及物镜提供稳定的环境温度。

哈特曼传感器在对投影物镜进行畸变检测时, 搭载哈特曼的测试运动台与搭载测试光源和聚光镜的光束扫描台需要配合同步运动, 由于畸变检测的核心是测距, 哈特曼定位的静态稳定精度需要达到纳米级。图 3 是测试运动台的实物图, 采用宏微结合的机构形式, 宏动台采用气浮导轨导向, 直线电机驱动, 微动台采用柔性铰链导向, 压电陶瓷驱动, 位置的闭环控制采用双频激光干涉仪作为位移测量传感器, 该测试

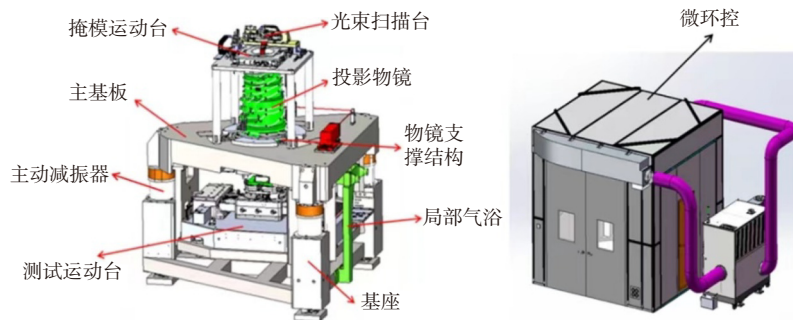


图 2 投影物镜像质检测台结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of the projection objective image quality detection platform

运动台静态稳定精度优于 10 nm; 光束扫描台的静态稳定精度与掩模板小孔直径相关, 通常掩模板小孔直径为微米级, 则光束扫描台的静态稳定精度需要达到亚微米级。图 4 是光束扫描台的实物图, 采用滚动导

轨和滚珠丝杠的机构形式, 伺服电机作为驱动, 一维光栅作为位移测量传感器, 该光束扫描台的静态稳定精度优于 200 nm。图 5 为投影物镜像质量检测台内部结构实物图。



图 3 测试运动台结构实物图

Fig. 3 Structural object picture of the test motion table



图 4 光束扫描台结构实物图

Fig. 4 Structural object picture of the beam scanning platform

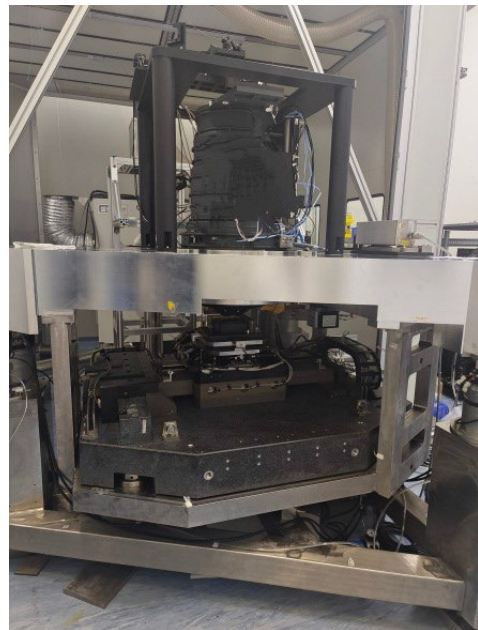


图 5 投影物镜像质量检测台内部结构实物图

Fig. 5 Internal structural object picture of the projection objective image quality detection platform

4 投影物镜像质量检测台位移测量误差分析

从投影物镜畸变检测原理可以看出, 对于哈特曼传感器来说, 需要精确与每个小孔标记的实际成像位置对准, 即定位准。对于投影物镜像质量检测台来说, 需要精确检测每个小孔标记的实际成像位置, 即测量

准。根据畸变检测原理以及像质量检测台的测距原理, 影响投影物镜像质量检测台位移测量精度的因素主要包括以下几个方面: 双频激光干涉仪的测量误差、畸变测量时的水平阿贝误差及哈特曼定位点位置测量的复现性误差。

4.1 双频激光干涉仪的测量误差

双频激光干涉仪基于迈克尔逊干涉原理, 其测量

系统由激光器、反射镜、分光镜、激光干涉仪、接收器和激光计数卡组成。其中激光头、反射镜、分光镜、激光干涉仪和接收器组成测量装置部分, 如图 6 所示, 激光计数卡组成信号处理部分。图 7 为测试运动台的双频激光干涉仪布局图, 双频激光干涉仪采用九轴测量, 其中 X 轴干涉仪共有五轴光路, 分别为 x_1, x_2, x_3, z, l_{xr} , 可测量哈特曼传感器的 X, θ_y, θ_x, Z 坐标以及 X 方向物镜参考镜坐标的变化量; 其中 Y 轴干涉仪共有四轴光路, 分别为 y_1, y_2, y_3, l_{yr} , 可测量哈特曼传感器的 Y, θ_x, θ_y 坐标以及 Y 方向物镜参考镜坐标的变化量。可以看出, θ_z 的测量为冗余设计, 可用于干涉仪 L 镜面形的测校。双频激光干涉仪可以测出哈特曼传感器的实时位置, 即可测出掩模板上的小孔通过物镜的实际成像位置 (x_{ri}, y_{ri}) 。

根据畸变检测原理, 掩模板上的小孔通过物镜的实际成像位置 (x_{ri}, y_{ri}) 的测量准确度直接影响物镜畸变

检测的准确度。双频激光干涉仪是测试运动台激光测量系统的度量基准, 其测量分辨率由激光波长细分获得, 虽然经电子细分可获得很高的分辨率, 但实际上其测量精度还受物理环境的干扰影响, 双频激光干涉仪的测量误差分为以下几类: 仪器误差、几何误差、环境误差。

双频激光干涉仪的仪器误差项包括波长稳定性、电细分误差、光学非线性误差、数据采集误差及光束的平行度误差。仪器误差是双频干涉仪出厂前的系统误差, 其中部分误差与运动台的速度、被测行程及死程相关。比如, 波长稳定性指激光头输出光的波长本身存在一定的精度和稳定性, 从而会影响激光干涉仪测量的精度, 这项误差还和测量行程、死程长度相关; 电细分误差和双频激光干涉仪的最小分辨率相等; 光学非线性误差是一个和激光干涉仪相关的固定值; 数据采集误差与测试运动台的速度相关; 光束的平行度



图 6 双频激光干涉仪实物图
Fig. 6 Object picture of the dual-frequency laser interferometer

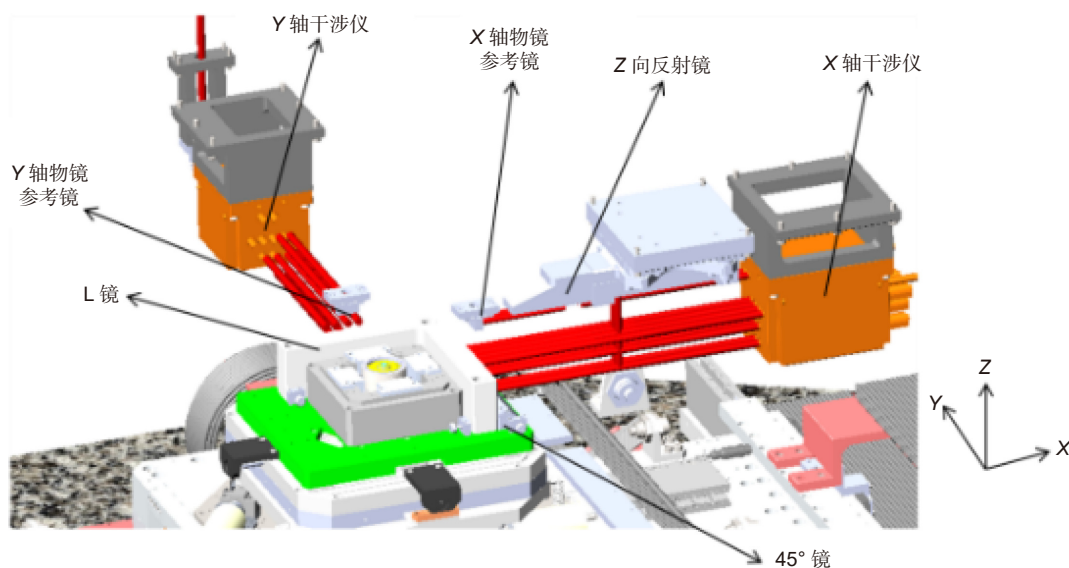


图 7 双频激光干涉仪布局图
Fig. 7 Arrangement diagram of the dual-frequency laser interferometer

误差与运动台的被测行程相关^[19]。以上海拍频的一套双频激光干涉仪为例, 采用 Keysight 公司的 5517 系列激光器, 波长为 632.991354 nm, 干涉仪光学细分为 4, 电子细分为 512, 干涉仪分辨力为 0.31 nm。结合像质检测台的被测行程、死程和被测速度, 其仪器误差如表 1 所示。

双频激光干涉仪的几何误差包括垂向阿贝修正残差、余弦修正残差和反射镜的面形误差。其中垂向阿贝误差是由于干涉仪测量轴与哈特曼焦面存在高度差 h 造成, 如图 8 所示, 产生的原因是由于运动台移动时存在俯仰。高度差越大, 测量的阿贝误差越大; 余弦误差是由于干涉仪的光轴与运动台的运动方向存在夹角, 造成测得的距离和实际的运动距离有差异; 反射镜的面形误差是由于平面镜的制造工艺、夹持方式以及环境因素综合影响产生, 双频激光干涉仪测量时会将反射镜的面形误差当作哈特曼传感器的位移, 而将这部分误差计入小孔的实际成像位置 (x_n, y_n) 。

双频激光干涉仪的几何误差与干涉仪的布局、运动台的机械性能以及干涉仪的装调精度相关。想要减小双频激光干涉仪的几何误差, 在设计时, 需要尽量减小干涉仪测量轴与哈特曼焦面的距离; 干涉仪装调

时, 使用垂直度检测工装, 通过自准直仪检测干涉仪光束与反射镜的夹角, 可以将干涉仪光束与反射镜的夹角调到 5" 以内; 反射镜设计时根据加工水平尽量提高面形指标; 同时, 需要使用运动台六自由度位置的算法模型, 该算法由九轴干涉仪的原始条纹数转换而来, 同时考虑了阿贝误差、余弦误差、反射镜面形等, 从而提高双频激光干涉仪的位移测量精度^[20]。激光干涉仪位置算法模型的相关常量如图 9 所示, 这些常量都是干涉仪测量的机器常数。

九轴双频激光干涉仪的六自由度位置算法模型如下:

$$Xg = \frac{x_1 + x_2}{2} - lxr + \left(Kx - \frac{kx}{4} + \frac{X}{2} \right) \times (Ry^2 + Rz^2) - ax \times Ry - ee \times Rz + YTX, \quad (5)$$

$$Rz \times g = \frac{x_2 - x_1 + \left(Kx - \frac{kx}{2} + x \right) (Ry \cdot dRyixh + Rz \cdot dRzixh)}{4cx} - Rx \cdot Ry + ux \cdot Ry + YRZ, \quad (6)$$

$$Ryg = \frac{x_3 - \frac{x_1 + x_2}{2}}{bx}, \quad (7)$$

表 1 双频激光干涉仪仪器误差汇总

Table 1 Instrument errors summary of the dual-frequency laser interferometer

仪器误差	3σ/nm	相关参数	参数值
波长稳定性误差	0.25	被测行程+死程/mm	40+80
电细分误差	0.31	分辨率/nm	0.31
光学非线性误差	1.5	固定值/nm	1.5
数据采集误差	0.01	被测速度/(m/s)	0.01
光束平行度误差	0.04	被测行程/mm	40
合计	1.55		

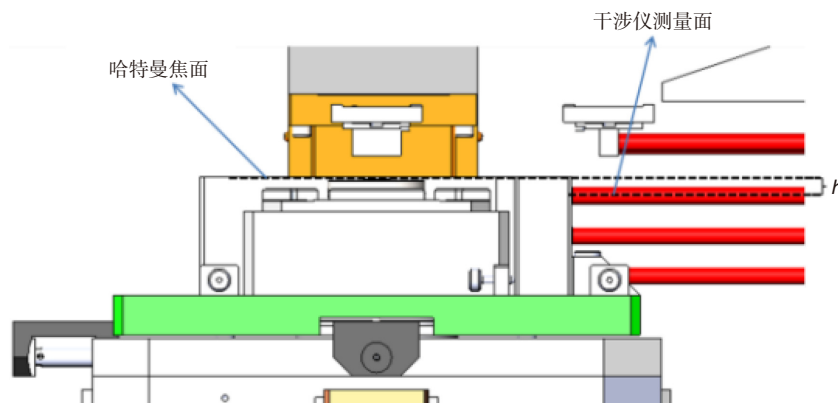


图 8 垂向阿贝误差示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the vertical abbe error

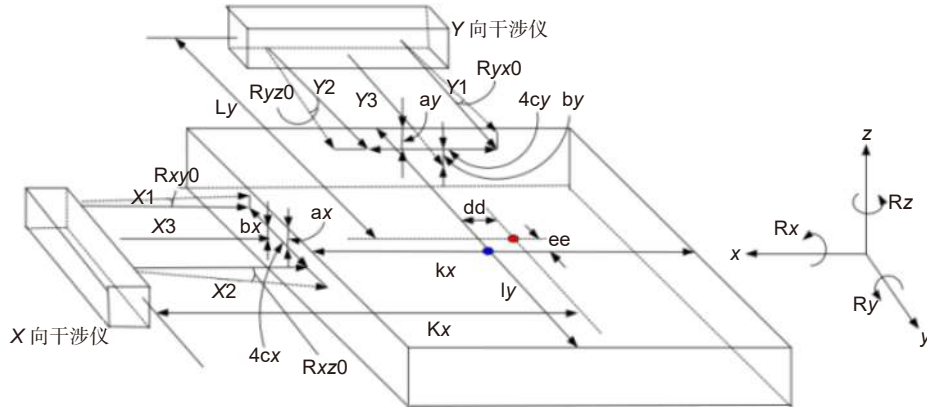


图 9 激光干涉仪相关常量

Fig. 9 Related constants of laser interferometer

$$Y_g = -\frac{y_1 + y_2}{2} + l_{yr} - \left(L_y - \frac{l_y}{4} - \frac{Y}{2} \right) \cdot (R_x^2 + R_z^2) - a_y \cdot R_x + d_d \cdot R_z + XTY, \quad (8)$$

$$R_{zyg} = \frac{y_2 - y_1 + \left(L_y - \frac{l_y}{2} - Y \right) (R_x \cdot d_{Rxiyh} + R_z \cdot d_{Rziyh})}{4c_y} - w_y \cdot R_x + XRZ, \quad (9)$$

$$R_{xg} = \frac{y_3 - \frac{y_1 + y_2}{2}}{b_y}, \quad (10)$$

$$Z_g = -R_x^2 \cdot X + d_{zxax} \cdot R_x^2 + R_x \cdot R_z \cdot X + d_{zxza} \cdot R_x \cdot R_z - 2R_y^2 \cdot X + d_{zyya} \cdot R_y^2 + e_{zxya} \cdot R_y \cdot X + d_{zzza} \cdot R_z^2 + R_y \cdot Z + e_{zya} \cdot R_y - z + x_3 + XTZ + YTZ, \quad (11)$$

上式中, $X_g, R_{zxg}, R_{yg}, Y_g, R_{zyg}, R_{xg}, Z_g$ 为当前时刻运动台的六自由度位置, $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, z,$ l_{xr}, l_{yr} 为当前时刻干涉仪九轴的读数, $X, R_{zx}, R_y, Y, R_{zy}, R_x, Z$ 为上一时刻运动台的六自由度位置。 $YTX, XRZ, XTY, XRZ, XTZ, YTZ$ 是反射镜面形补偿, 可以通过反射镜面形测校获得补偿数据。其余参数均

为机器常数, 可以通过 WA 对准对机器常数进行测校, 从而提高双频干涉仪的位移测量精度。

以上海拍频的这套干涉仪为例, 结合测试运动台的被测行程、阿贝臂、测试过程中运动台的俯仰角及反射镜面形测校, 将未采用与采用六自由度位置全局模型算法的几何误差进行比较, 如表 2 所示。可以看出, 运动台采用六自由度全局模型算法可以明显减小干涉仪测量的几何误差。

环境因素 (温度、气压等) 是影响像质检测台的位移测量精度相当关键的因素, 如果不进行环境的控制和补偿, 其带来的误差至少在 ± 9 ppm 以上, 即测量范围为 20 mm 的激光干涉测量系统将会因环境引起 180 nm 的误差。因此, 投影物镜像质检测台的双频激光干涉仪想要实现高精度的位移测量, 必须进行环境的控制和补偿。

为了减小环境因素带来的位移测量误差, 投影物镜像质检测台搭建在独立地基上, 并且内部世界采用主动减振器进行隔振, 同时采用微环控系统对环境温度进行控制。主动减振器可以减少外界振动对运动台控制及干涉仪位移测量的影响, 微环控系统可以将受

表 2 双频激光干涉仪几何误差汇总

Table 2 Geometrical errors summary of the dual-frequency laser interferometer

几何误差	使用六自由度解算模型 3σ /nm	未使用六自由度解算模型 3σ /nm	相关参数	参数值
阿贝误差	0.25	1.2	阿贝臂/mm	6
			最大俯仰角/ μ rad	0.2
			测量行程/mm	40
余弦误差	0.31	5.5	光轴与运动方向夹角/mrad	0.5
			测量范围/mm	40×40
反射镜面形误差	1	30	面形加工误差/nm	30
合计	1.08	30.52		

控设备置于恒温腔体中, 如图 10 所示为该套像质检测台的微环控系统, 其系统参数如表 3 所示。

微环控系统的恒温腔体提供全局气浴和局部气浴, 控制腔体内的温度稳定性, 为受控设备提供所需的运行环境; 同时, 干涉仪需采用环境传感器实时测量当前环境的各项指标 (包括压力、温度、相对湿度), 进而将当前环境的压力、温度、相对湿度代入补偿算法对测量光波长的变化进行补偿; 其次, 由于环境因素改变时, 干涉仪死区的变化会引起测量误差, 干涉仪在 X、Y 方向设计物镜参考镜, 物镜参考镜安装在物镜上, 干涉仪物镜参考轴位移测量的变化可抵消部分

死程误差, 从而可减小死程带来的测量误差影响, 如图 11 所示。

双频激光干涉仪使用时的环境误差包括环境引起的被测行程长度误差、干涉仪热漂移、材料热膨胀、死程误差及机械振动。以上海拍频的这套干涉仪为例, 环控系统局部气浴温度的稳定性为 ± 10 mk, 压力稳定性为 0.1 mmHg, 反射镜材料为微晶玻璃, 反射镜底座材料为殷钢, 像质检测台采用主动减振器隔振, 结合像质检测台的被测行程、死程长度、环境温度压力的稳定性及材料的热膨胀系数, 其环境误差如表 4 所示。



图 10 微环控系统恒温腔体及控制柜

Fig. 10 Constant temperature chamber and control cabinet of the micro-environment control system

表 3 微环控系统参数

Table 3 System parameters of the micro-environment control system

类别	参数
运行环境温度/($^{\circ}\text{C}$)	22 \pm 2
运行环境温度变化梯度/($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	≤ 0.5
温度设定范围/($^{\circ}\text{C}$)	21~23
全局气浴温度稳定性	± 0.1 $^{\circ}\text{C}@8$ h
局部气浴温度稳定性	± 0.01 $^{\circ}\text{C}@4$ h

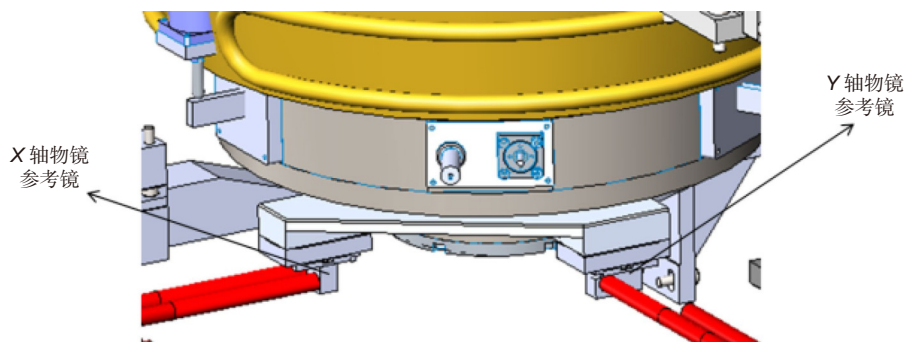


图 11 物镜参考镜示意图

Fig. 11 Schematic diagram of objective reference mirror

表 4 双频激光干涉仪环境误差汇总

Table 4 Environmental errors summary of the dual-frequency laser interferometer

环境误差	$3\sigma/\text{nm}$	相关参数/mm	参数值
被测行程长度误差	1.63	被测行程	40
干涉仪热漂移	0.4	-	-
材料热膨胀	0.8	干涉仪离反射镜最大距离	128
死程误差	4.5	死程长度	80
机械振动	1	-	-
合计	4.97		

4.2 运动台畸变检测中的水平阿贝误差

采用哈特曼传感器对物镜畸变进行检测时, 通常会在物镜视场范围内采集几十甚至上百个点的位置信息对畸变进行拟合。如图 12 所示, 从原理上来说, 由于 X 轴和 Y 轴干涉仪的光轴是通过物镜中心, 只有中心视场点的位置信息干涉仪可以准确测出, 其余点测量时, 由于运动台的偏摆造成的水平阿贝误差干涉仪无法测出。为了尽量减小这一误差, 运动台在设计及装调时, 要保证在测量行程范围内运动台的偏摆 Rz 尽量小, 同时六自由度运动台采用双频激光干涉仪做全局闭环, 将运动台的偏摆 Rz 做高精度控制, 可减小水平阿贝误差对位移测量带来的影响。以文中所描述的投影物镜像质检测台为例, 测试运动台经六自由度位移闭环控制后在测量行程范围内偏摆角 θ_z 的控制精度为 $0.1 \mu\text{rad}$, 最远视场点相对于中心视场点在 X 和 Y 方向的距离 (a_x, b_y) 为 $(22 \text{ mm}, 22 \text{ mm})$, 测试运动台的水平阿贝误差带来的位移测量误差在 X 和 Y 方向分别为 2.2 nm 和 2.2 nm , 那么在物镜的边缘视

场点进行畸变检测时, 此项误差将影响该位置小孔的实际成像位置 (x_{ri}, y_{ri}) 坐标的测量准确度。

4.3 哈特曼定位点位置测量的复现性误差

光刻投影物镜畸变检测的复现性是指一定时间内多次对同一物镜进行畸变检测, 其畸变拟合结果的标准差。畸变检测时, 采用哈特曼进行定位, 其定位点位置测量的复现性可以体现畸变检测的复现性。影响哈特曼定位点位置测量复现性的因素包括干涉仪数值的波动、运动台的位置控制精度、干涉仪长期的漂移、哈特曼传感器的稳定性、测试光源的稳定性以及物镜光学性能的稳定性等。以文中所描述的投影物镜像质检测台为例, 在对某一投影物镜进行畸变检测时, 连续三天采集哈特曼定位的 25 个点的位置信息, 每天早中晚各采集一次, 每次每个点采集 100 组数据, 计算这 9 次每个点位置信息的标准差, 该标准差可以体现像质检测台位置测量的复现性, 其结果如表 5 所示。可以看出, 像质检测台位置测量的复现性误差在 X 轴方向最大为 17.42 nm , 在 Y 轴方向最大为 11.96 nm 。

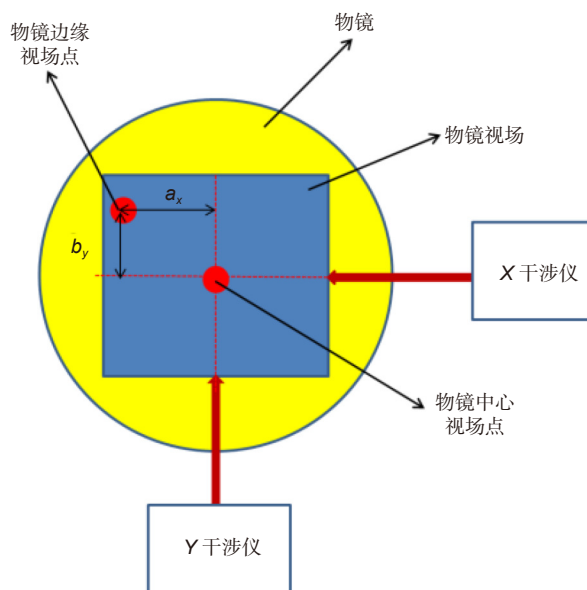


图 12 畸变测量时水平阿贝误差示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the horizontal abbe error in distortion measurement

表 5 像质检测台位置测量复现性

Table 5 Positon measurement reproducibility of the image quality detection platform

点序号	X轴复现性/nm	Y轴复现性/nm	点序号	X轴复现性/nm	Y轴复现性/nm
1	12.29	2.63	14	2.74	7.06
2	12.69	0.93	15	2.76	8.30
3	14.26	0.17	16	3.73	9.56
4	17.42	0.59	17	7.73	7.09
5	13.70	0.40	18	6.55	10.43
6	8.81	1.82	19	3.36	8.46
7	6.12	3.79	20	2.93	7.35
8	8.86	2.79	21	3.70	10.74
9	9.65	0.87	22	1.40	9.4
10	7.97	0.77	23	0.56	8.01
11	1.57	4.23	24	0.11	6.57
12	2.17	9.51	25	0.74	11.96
13	0.46	6.19			

5 实验分析与结果

根据误差等概率分布的原则, 将投影物镜像质检测台的位移测量误差汇总计算如下:

$$\Delta w = \sqrt{(\Delta c_1)^2 + (\Delta c_2)^2 + (\Delta c_3)^2 + (\Delta m)^2 + (\Delta k)^2}, \quad (12)$$

其中: Δw 为投影物镜像质检测台的位移测量误差, Δc_1 为干涉仪位移测量的仪器误差, Δc_2 为干涉仪位移测量的几何误差, Δc_3 为干涉仪位移测量的环境误差, Δm 为畸变检测中的水平阿贝误差, Δk 为像质检测台位置测量的复现性误差。

根据式 (12) 可以计算出文中列举的投影物镜像质检测台在哈特曼传感器 40 mm×40 mm 的测量范围内, 其位移测量误差为 22.01 nm。在影响投影物镜像质检

测台位移测量的误差项中, 当干涉仪本身具有良好光电性能, 像质检测台具有良好的机电性能, 并且采用干涉仪六自由度位置解算模型后, 干涉仪的仪器误差、几何误差及畸变检测中的水平阿贝误差带来的位移测量误差是较小的。而环境因素对位移测量精度的影响较大, 不仅会影响干涉仪位移测量的环境误差 (系统误差), 还会影响像质检测台位移测量的复现性误差 (随机误差)。以文中所描述的投影物镜像质检测台为例, 当微环控系统关闭后, 连续三天采集哈特曼定位的 25 个点的位置信息, 每天早中晚各采集一次, 每次每个点采集 100 组数据, 计算这 9 次每个点位置信息的标准差, 其结果如表 6 所示。可以看出, 当关闭微环控系统后, 像质检测台位置测量的复现性误差

表 6 像质检测台位置测量复现性 (关闭微环控系统)

Table 6 Positon measurement reproducibility of the image quality detection platform (micro-environment control system off)

点序号	X轴复现性/nm	Y轴复现性/nm	点序号	X轴复现性/nm	Y轴复现性/nm
1	90.38	62.10	14	204.77	185.13
2	130.90	50.33	15	228.85	74.61
3	104.52	145.49	16	236.94	103.03
4	128.89	27.5	17	270.60	159.11
5	141.70	92.99	18	243.22	177.69
6	170.90	153.34	19	252.73	171.02
7	154.09	156.13	20	235.13	174.26
8	190.73	152.25	21	218.89	173.47
9	181.26	160.74	22	207.70	170.62
10	189.27	165.97	23	210.58	147.87
11	210.64	187.02	24	219.43	169.11
12	218.64	185.13	25	235.15	186.93
13	186.24	167.52			

在 X 轴方向最大为 270.60 nm, 在 Y 轴方向最大为 187.02 nm, 这将导致投影物镜像质检测台的位移测量误差在达到 300 nm 以上。

利用该投影物镜像质检测台对某光刻投影物镜进行畸变检测, 该投影物镜视场大小为 40 mm×40 mm, 畸变最终要求达到 70 nm。通过像质检测台测得其在可变动镜调整前的畸变分布如图 13 所示, 可以看出该光刻投影物镜在动镜调整前的畸变检测结果为 80 nm。该光刻投影物镜最终通过曝光法测得畸变为 100 nm, 根据检测结果, 调整物镜内的可变动镜进行像差补偿, 最终该投影物镜的畸变可以达到 65 nm。可以看出, 该光刻投影物镜像质检测台可以满足其对应的投影物镜畸变检测的精度要求。

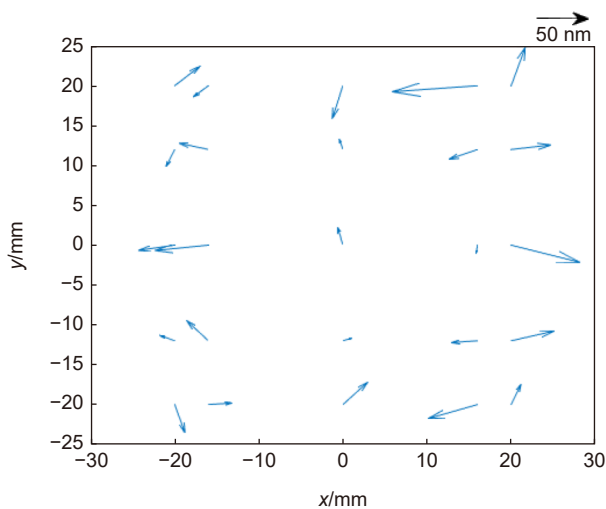


图 13 畸变分布图

Fig. 13 Distortion distribution map

6 结论

本文针对光刻投影物镜畸变检测的工程应用, 将畸变检测原理与运动台的定位和测量技术相结合, 着重分析利用夏克-哈特曼波前传感器对投影物镜进行畸变检测时像质检测台的位移测量误差。文中对影响位移测量精度的误差源进行逐一分析, 包括干涉仪的测距误差、畸变检测中的水平阿贝误差以及哈特曼定位点位置测量的复现性误差, 其中干涉仪的测距误差包括仪器误差、几何误差和环境误差; 畸变检测中的水平阿贝误差是由畸变检测原理决定的, 不可避免; 影响哈特曼定位点位置测量的复现性的因素包括干涉仪数值的波动、运动台的位置控制精度、干涉仪长期的漂移、哈特曼传感器的稳定性、测试光源的稳定性

以及物镜光学性能的稳定性等一系列随机误差。文中给出像质检测台位移测量误差的计算公式, 并结合一套光刻投影物镜像质检测台, 对某投影物镜进行畸变检测, 物镜的畸变检测结果为 80 nm, 其中像质检测台的位移测量误差给畸变检测结果带来约 22 nm 的不确定度。像质检测台的位移测量误差是光刻投影物镜畸变检测中的重要误差源之一, 深度分析误差源并减小误差项, 比如采用更高性能的双频激光干涉仪、合理布局双频激光干涉仪与运动台的空间位置关系、提高运动台的机械及电控性能, 提升微环控系统的温度控制精度等, 可明显提高光刻投影物镜的畸变检测精度。

参考文献

- [1] Smith A, McArthur B, Hunter Jr R. Method and apparatus for self-referenced projection lens distortion mapping: 6573986[P]. 2003-06-03.
- [2] Li S X, Wang F. On-site measurement method of image quality of lithography and positioning accuracy of worktable: 101261451B[P]. 2011-06-29.
李术新, 王帆. 光刻机成像质量及工件台定位精度的现场测量方法: 101261451B[P]. 2011-06-29.
- [3] Yang Z Y. The detection device and method for the magnification error and distortion of the projection objective: 101387833A[P]. 2009-03-18.
杨志勇. 投影物镜倍率误差及畸变的检测装置及方法: 101387833A[P]. 2008-11-07.
- [4] Hagiwara T, Kondo N, Takane E, et al. Aerial image measurement method and unit, optical properties measurement method and unit, adjustment method of projection optical system, exposure method and apparatus, making method of exposure apparatus, and device manufacturing method: 20020041377 [P]. 2002-04-11.
- [5] van Haren R, Steinert S, Mouraille O, et al. The impact of the reticle and wafer alignment mark placement accuracy on the intra-field mask-to-mask overlay[J]. *Proc SPIE*, 2019, 11178: 111780R.
- [6] Lazar B M. ASML alignment sequence generator[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2012.
- [7] Ding G M, Han C Y, Li S X. Device, method and apparatus for testing distortion and field curvature of objective lens: 110941144A[P]. 2020-03-31.
丁功明, 韩春燕, 李术新. 一种物镜畸变和场曲的测试装置及方法、设备: 110941144A[P]. 2020-03-31.
- [8] Mizuno Y. Wavefront aberration measuring instrument, wavefront aberration measuring method, exposure apparatus, and method for manufacturing micro device: 6975387[P]. 2005-12-13.
- [9] Ishikawa J. Exposure apparatus, exposure method, and device manufacturing method: 6914665[P]. 2005-07-05.
- [10] Shu J W, Liu G G. A method for detecting distortion and field curvature of projection objective lens: 102540751A[P]. 2012-07-04.
舒建伟, 刘国淦. 一种检测投影物镜畸变和场曲的方法: 102540751A[P]. 2012-07-04.

- [11] Li T P, He J L. A reticle-based projection objective lens performance test device and method: 105890875B[P]. 2018-12-14.
李天鹏, 何经雷. 一种基于掩模板的投影物镜性能测试装置以及方法: 105890875B[P]. 2018-12-14.
- [12] Guo T, Zhang B, Gu N T, et al. Research on polarization Hartmann wavefront detection technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(7): 210076.
郭庭, 张彬, 顾乃庭, 等. 偏振哈特曼波前探测技术研究[J]. *光电工程*, 2021, **48**(7): 210076.
- [13] Yang W, Cao W, Shang H B. Effect of alignment errors of reticle on distortion in lithographic projection lens[J]. *Opt Precis Eng*, 2016, **24**(3): 469-476.
杨旺, 曹玮, 尚红波. 掩模位置误差对光刻投影物镜畸变的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(3): 469-476.
- [14] Wang J, Liu J B, Hu S. Source optimization based on adaptive nonlinear particle swarm method in lithography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(9): 210167.
王建, 刘俊伯, 胡松. 基于自适应非线性粒子群算法的光刻光源优化方法[J]. *光电工程*, 2021, **48**(9): 210167.
- [15] 郁道银, 谈桓英. 工程光学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 120-121.
- [16] Cao Y S, Tang F, Wang X C. Measurement techniques for distortion of lithography projection objective[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2022, **59**(9): 0922012.
曹译莎, 唐锋, 王向朝. 光刻投影物镜畸变检测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, **59**(9): 0922012.
- [17] Sudoh Y, Kanda T. New lens barrel structure utilized on the FPA-6000AS4 and its contribution to the lens performance[J]. *Proc SPIE*, 2003, **5040**: 1657-1664.
- [18] 王向朝, 戴凤钊. 光刻机像质检测技术-上册[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 95-97.
- [19] Cheng W M, Ge Y J. Error analyses for measuring of laser interferometer in precision positioning[J]. *J Shanghai Univ Eng Sci*, 2006, **20**(4): 287-290.
程维明, 葛轶君. 精密定位中的激光干涉测量误差分析[J]. *上海工程技术大学学报*, 2006, **20**(4): 287-290.
- [20] Cheng J S. Study on interferometer measurement error model in wafer stage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
程吉水. 工件台激光干涉仪测量误差模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

作者简介



杜婧(1989-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为微纳光刻装备。

E-mail: dujing@ioe.ac.cn

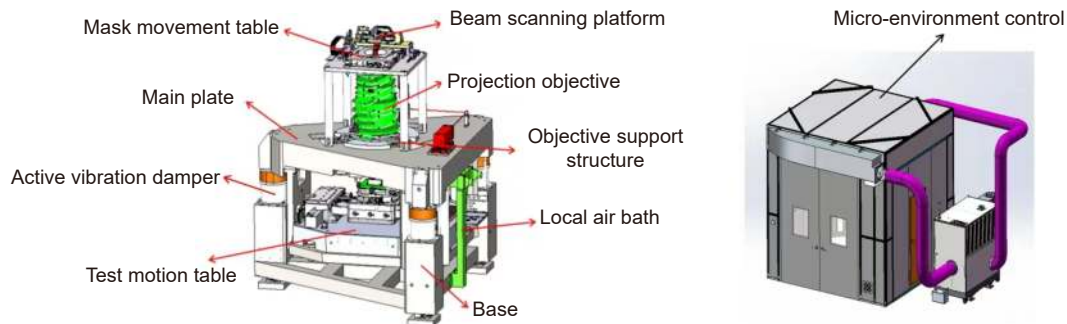


【通信作者】胡松(1965-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光刻关键技术的研究, 四川省重大仪器设备专家组专家, 全国半导体设备和材料标准化技术委员会微光刻分会副主任。主持和参与多个国家重大仪器装备专项项目和国家重大科技专项课题。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective

Du Jing, Liu Junbo, Quan Haiyang, Hu Song*



Structural schematic diagram of projection objective image quality detection platform

Overview: Lithography accuracy is one of the key parameters to measure the lithography process. Lithography projection objective is the core component of a lithography machine. The distortion of the lithography projection objective is one of the most important factors that affect the overlay accuracy. It causes the position offset exposed on the silicon wafer from the ideal position to the actual position. At present, the detection techniques for the distortion of the projection objective are exposure measurement, aerial image measurement, and wavefront measurement. The exposure measurement that is suitable for lithography manufacturers depends on the exposure process and equipment, thus its detection process is complex. The repeatability of exposure measurement is better than 1 nm. Both the aerial image measurement and the wavefront measurement without exposure are based on the photoelectric sensors. Its detection speed is fast, and the measurement accuracy can be better than 0.4 nm. The image quality detection platform of the projection objective is a device for detecting the optical performance of the projection objective. The wavefront sensor is a device for measuring wavefront aberrations and can also be used for distortion measurement. According to the principle of distortion measurement, when the Hartmann sensor is used to detect the distortion of the projection objective, the measurement accuracy of the mask's actual imaging position through the objective directly affects the accuracy of the distortion detection. So this paper focuses on the analysis of the displacement measurement errors of the image quality detection platform when using the Shack-Hartmann sensor to detect the distortion of the projection objective. The factors that affect the displacement measurement accuracy of the image quality detection stage mainly include the following aspects: the measurement error of the dual-frequency laser interferometer, the horizontal Abbe error of the distortion measurement, and the reproducibility error of the Hartmann position measurement. The measurement errors of the dual-frequency laser interferometer include the instrument error, the geometric error, and the environmental error. These errors are related to the performance of the interferometer, the layout of the interferometer, the performance of the image quality detection stage, and the environmental conditions. The horizontal Abbe error in distortion measurement is due to the fact that the dual-frequency laser interferometer cannot accurately measure the position coordinates of other points outside the central field in distortion detection. The reproducibility error of the Hartmann position measurement means the reproducibility of the Hartmann sensor position information measured aiming at a same objective in a period of time. The factors that affect the reproducibility error of the Hartmann position measurement include the fluctuation of the interferometer value, the position control accuracy of the motion stage, the long-term drift of the interferometer, the long-term stability of the Hartmann sensor, the long-term stability of the test light source, the optical properties stability of the objective, etc. In this paper, a set of projection objective image quality detection platform is taken as an example to analyze the errors of its displacement measurement. Its displacement measurement error is about 22 nm within the measurement range of 40 mm × 40 mm. At the same time, the distortion of a projection objective is detected by this image quality detection platform, and the measurement result is about 80 nm. The displacement measurement error in the distortion detection of the lithographic projection objective is one of the important error sources of distortion detection. Depth analysis of the error sources and reduction of the error terms can improve the distortion detection accuracy.

Du J, Liu J B, Quan H Y, et al. Displacement measurement analysis in distortion detection of lithography projection objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220226; DOI: 10.12086/oe.2023.220226

Foundation item: National Key Research and Development Plan (2021YFB3200204), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (2021380)

State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

* E-mail: husong@ioe.ac.cn