

# 高精度像差检测运动控制及图像采集系统设计

夏舒仪<sup>1,2,3</sup> 李 兵<sup>1,2</sup> 张清洋<sup>1,2</sup> 韩晓泉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电研究院 北京 100094; 2. 北京市准分子激光工程技术研究中心 北京 100094;  
3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 投影物镜是光刻机的重要组成部分,直接影响光刻技术指标,因此投影物镜波像差是光刻机中关键的检测指标之一。横向剪切干涉是重要的波像差检测方法,根据横向剪切原理,设计了高精度运动控制及图像采集系统以检测光刻机投影物镜波像差是否满足要求。该系统采用宏-微结构以同时满足行程和位置精度的要求;并由 CMOS 图像探测器实时采集保存剪切干涉图像。剪切干涉图像通过波前重建计算得到投影物镜的波像差,实验结果满足波像差检测重复性精度要求。该系统具有高集成、可扩展、操作简便和维护简单的特点,可广泛应用于相关领域中。

**关键词:** 横向剪切干涉;波像差;CMOS 图像探测器;位移台

**中图分类号:** TP273<sup>+</sup>.5 O435.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## High accuracy aberration detection motion control and image acquisition system designed

Xia Shuyi<sup>1,2,3</sup> LI Bing<sup>1,2</sup> Zhang Qingyang<sup>1,2</sup> Han Xiaoquan<sup>1,2</sup>

(1. Academy of Opto-electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
2. Beijing Excimer Laser Engineering Technology Research Center, Beijing 100094, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Projection lens is an important part of the lithography machine, directly affect the lithography technology index, so the wave aberration of the projection lens is one of the most important indexes of the lithography machine. Transverse shearing interferometry is an important method of wave aberration detection. Base on the transverse shear principle, a high precision motion control and image acquisition system is designed to detect whether the wave aberration of the projection lens is satisfied. And the macro-micro structure is adopted to meet the requirements of both stroke and position precision, and Real-time acquisition by the CMOS image detector to save the shear interference image. The wave front aberration of the projection objective is calculated by wave front reconstruction. The experimental results satisfy the requirement of the aberration of the wave aberration. The system is highly integrated, scalable, easy to operate and easy to maintain features, can be widely used in related fields.

**Keywords:** transverse shearing interferometry; wave aberration; CMOS image detector; displacement table

### 1 引言

光刻是半导体制造工艺中最为重要的步骤之一,决定了整个集成电路工艺的技术水平<sup>[1-2]</sup>,而投影物镜是光刻机的重要组成部分,直接影响到光刻机成像质量、光刻分辨率以及关键尺寸均匀性等光刻技术指标,因此光刻机的投影物镜波像差是光刻机中关键的检测指标。目前,用于投影物镜波像差检测的技术主要有剪切干涉法、哈特曼法、点衍射法<sup>[3]</sup>。剪切干涉因为不需要参考光波,是光波

和自身复制光波的干涉,因此特别适用于无法确定参考光波以及低相干性光源情况下的测量<sup>[4-5]</sup>。剪切干涉的方法具有对光源的相干性要求低,抗干扰能力强等优点,受到广泛关注。它的基本特征是自干涉,这种方法比较适用于投影物镜波像差的测量。采用横向剪切干涉法,其基本原理如图 1 所示。当投影物镜的波前通过剪切光栅时,被剪切光栅衍射出 0 级和 1 级波前,经过准直镜后,两个波前水平错开一定距离并在探测器上相干成像,通过波前重建算法解出投影物镜的波像差。

收稿日期:2017-03

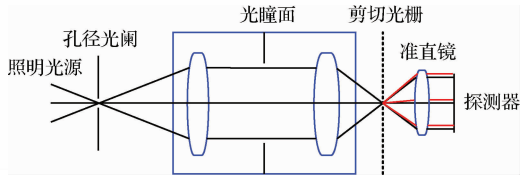


图1 横向剪切干涉仪原理

基于上述原理搭建了一套横向剪切干涉波像差检测曝光检测平台<sup>[6]</sup>，并为该平台设计了运动控制及图像采集系统，通过高精度纳米位移台的精确步进及定位、CMOS图像探测器的实时采集保存图像、波前重建算法分析得到投影物镜的波像差。由于像差测量精度为纳米量级，因此对位移台的运动控制、图像采集提出了较高的要求。从技术指标情况分析需要达到毫米级行程和纳米级定位精度。国内外现有的驱动设备很难同时满足行程和位置精度的要求，单执行器件的控制结构无法调和行程和精度的矛盾。为解决这一问题，采用宏动台结合微动台的宏-微结构，微动台实现纳米级定位精度，而宏动台提供毫米级的运动行程。

## 2 曝光检测平台

曝光检测系统主要包括掩模台、工件台、探测器、投影物镜、光源及其他辅助设备，图2所示为光学检测系统的整体结构。

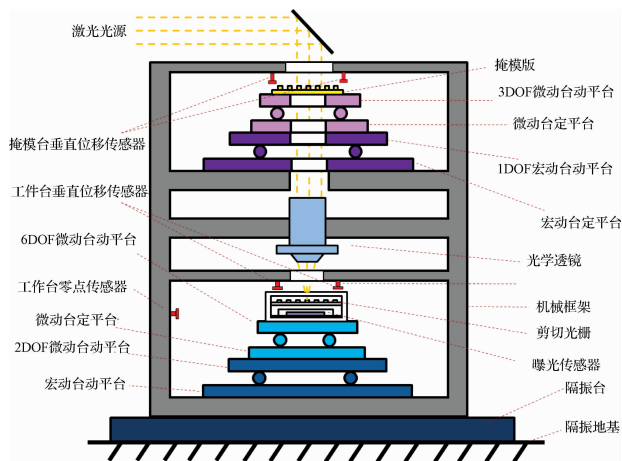


图2 曝光检测系统整体结构

曝光检测系统要求工件台和掩模台按照特定的位置轨迹运行并由CMOS图像探测器实时采集干涉图像。工件台宏动台提供 $x$ 、 $y$ 两个自由度的大行程直线运动，工件台微动台承载CMOS图像探测器和剪切光栅，经剪切光栅产生的多级干涉光，由探测器采集图像。掩模台宏动台提供 $y$ 向大行程运动，掩模台微动台承载着掩模版，掩模版分布有3种光栅标记，分别是U、V和C标记，曝光过程中需要分别采集U和V标记对应的剪切干涉图，然后对两幅干涉图进行合成获得一个视场点的完整波像差。投

影物镜视场划分为 $M \times N$ 个测量点，视场中的测量点都需要通过U光栅和V光栅进行检测。对投影物镜进行一次完整的波像差检测试验，基本流程如图3所示。

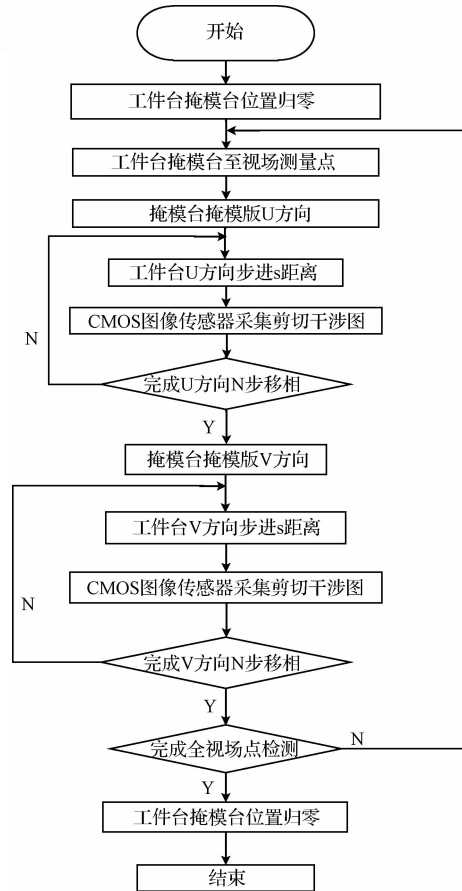


图3 波像差检测流程

## 3 运动控制及图像采集系统

### 3.1 功能需求

曝光检测试验的完整流程需要 $M \times N$ 个探测点进行检测，根据实际情况对某些特定的探测点进行检测，或者一次性完成整个实验流程。这就要求控制系统具备基本的步进运动功能、点对点运动功能、纳米级定位功能实时位置补偿功能、坐标转换功能和轨迹规划功能。同时，为了保证检测实验的顺利进行，系统必须具备系统监测、数据采集、实时通信、数据处理和存储等功能。运动控制及图像采集系统主要功能如下。

1) 控制图像尺寸大小、感兴趣区(AOI)大小，可实时调节图像大小，对图像的局部感兴趣区域保存。

2) 实时调节相机的曝光时间，相机在不同曝光时间下采集图像。

3) 设置运动系统的初始位置和速度、运动方向的选择和位置的输出，实现控制系统在任意位置以任意速度运动。

4) 实现控制系统等距离运动的功能，实时显示各个位移台的实际位置、位置偏差等数据量。

5) 实现步进模式,通过微动台的移动来带动 CMOS 图像探测器的移动,将剪切光栅进行  $N$  步移相,得到  $N$  幅剪切干涉图,将采集的图像,存放在指定目录下以  $Z$  轴命名的文件夹中。

6) 扫描模式与步进模式相似,不同在于在每一步步进后,让控制系统在步进的垂直方向,以一个图像曝光时间走一个光栅距离的速度进行移动,在移动的过程中采集图像。这样可以消除扫描方向的条纹而采集到单方向的剪切干涉图。

### 3.2 软件设计

#### 1) 图像采集控制模块设计

首先对图像采集参数进行初始化和配置,如图像的尺寸,曝光时间,缩放倍数等。利用 LABVIEW 函数选板—互连接口—库与可执行程序目录下的调用库函数节点来调用 CMOS 相机的动态链接库 (DLL) 来进行参数配置<sup>[7-8]</sup>。具体方法是调用库函数节点函数模块,正确设置 DLL 路径,填写、配置各参数。配置完毕之后就成功调用了一个 DLL 文件。然后应用 LABVIEW 的视觉与运动模块中的 IMAQdx Open Camera VI, IMAQdx Configure Grab VI, IMAQdx Get Image VI, IMAQdx Close Camera VI, IMAQ WriteFile VI 等函数采集图像<sup>[9]</sup>。要达到实时控制的目的,可在图像显示的 while 循环中加入一个事件结构, IMAQdx Get Image VI 函数放在时间结构的超时分支中,“曝光时间(ms)”值变化、“保存图片”值变化、“AOI 确定”值变化、“图像尺寸选择”值变化和“图像缩放倍数”值变化分别加载在这一事件结构中,这样当前面板上 CMOS 相机的参数发生变化,会触发时间结构的某一分支对相机的参数进行重新设置,设置结束后,会自动跳入超时分支中,继续进行图像显示,实现实时控制功能。图像采集系统控制界面如图 4 所示。

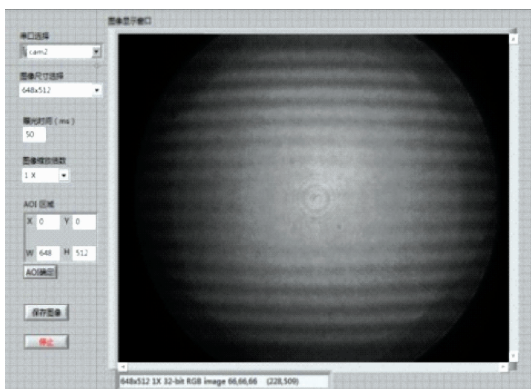


图 4 图像采集系统控制界面

#### 2) 运动控制模块设计

首先对运动控制模块初始化配置,然后对位移台功能子 VI 操作,如图 5 所示,通过数组输入和输出运动控制系统的位置,完成初始位置、速度的设置和当前位置的显示,数组中的各个元素代表运动控制系统的位置参数,如  $X$

轴的位置(速度)、 $Y$  轴的位置(速度)和  $Z$  轴的位置(速度)等<sup>[10-11]</sup>。通过 for 循环结构实现位移台等距离运动,利用 while 循环结构显示运动系统当前位置的均值、RMS 值和 PV 值以检测运动系统的稳定性是否满足实验要求,程序如图 6 所示。

MOV.vi	运动系统移动到绝对位置
MVR.vi	运动系统移动相对位置
VEL.vi	设置运动系统的移动速度
General wait for movement to stop.vi	等待运动系统的运动停止
POS?	显示运动系统的位置
Close connection if open.vi	断开运动系统的连接

图 5 运动系统的相关功能函数

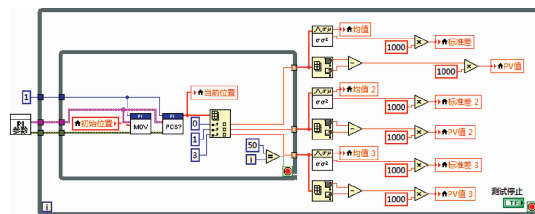


图 6 测试运动系统稳定性程序部分

#### 3) 集成运动控制及图像采集系统

利用 LABVIEW 的“创建文件夹”函数,在指定目录下生成以  $Z$  轴命名的文件夹,区别图像采集系统在不同  $Z$  轴位置下采集的图像,将图像保存在此文件夹下。集成控制系统以图像采集系统程序为主程序,为保证  $N$  步移相采集的图像为图像采集系统实时显示的图像,需把图像采集系统程序中显示图像部分的 while 结构和包含运动控制系统的程序的 while 结构并行置于一个顺序结构分支中,这样运动系统在运动中采集的图像是实时图像。在保存图片时并行显示运动系统当前位置的均值、RMS 值和 PV 值并记录下来,以文档形式保存在以  $Z$  轴命名的文件夹下。

扫描模式在步进模式基础上添加了在每次步进停止后,给一个与步进方向垂直的速度,这个速度由光栅的周期和图像采集系统的曝光时间决定,运动系统在此速度下运动中,采集图像,采集完图像后扫描方向回到初始位置,进行下一步进。

## 4 设计结果和试验验证

### 4.1 实验结果显示

高精度像差检测运动控制及图像采集系统界面如图 7 所示。系统实时显示控制相机,可手动输入运动初始位置,实时显示运动系统当前位置并显示当前位置的均值、RMS 值及 PV 值以检测位移台的稳定性是否满足实验要求。光栅周期和步进次数都可设置,可以适用于各种光栅和任意次数步数,满足实验的需求。

投影物镜全视场划分为  $5 \times 13$  个测量点,分别对视场

中的每一点进行波像差检测。工件台宏动台每次步进 2 mm,工件台微动台在每一测量点 16 步移相,掩模台宏动台完成 UV 光栅切换及步进 8 mm。实验轨迹结果如图 8 所示。

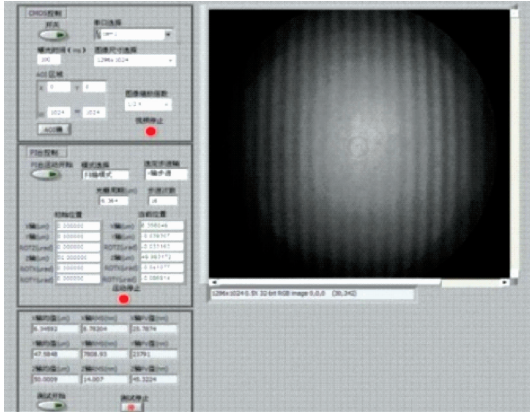


图 7 像差检测系统操作界面

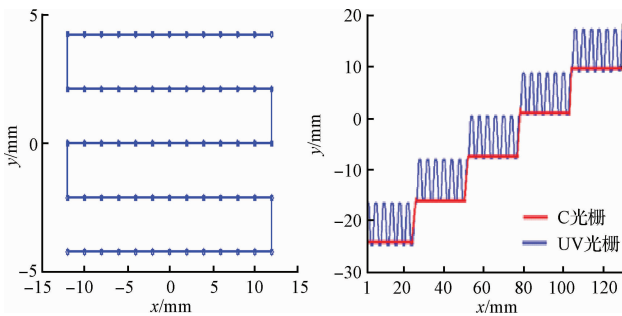


图 8 工件台宏动台(左)、掩模台宏动台(右)运动轨迹

#### 4.2 波像差检测结果

在软件系统控制下采集的剪切干涉图像如图 9 所示。

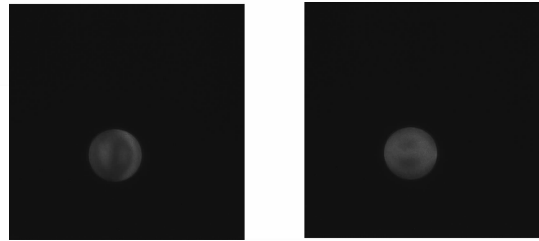


图 9 系统采集的剪切干涉图像

首先对 X 轴和 Y 轴扫描的 32 幅剪切干涉图像沿着移相的维数进行傅里叶变换,选取 X、Y 方向傅里叶变换图中一倍频图形的实部和虚部,然后带入计算位相公式,即得到 X、Y 方向的剪切位相图,最后利用解包裹、坐标转化和积分,即可算出波前的 Zernike 系数,得到投影物镜的波像差<sup>[12-14]</sup>,计算结果如图 9 所示。经过 10 次重复实验,拟合波前均方根值如表 1 所示,计算得出 10 次重复实验拟合波前的重复性精度为 0.196 9 nm<sup>[15]</sup>,可以满足投影物镜像差测量要求。

表 1 10 次重复实验拟合波前方差

第 N 次实验	1	2	3	4
实验结果	85.9	86.7	85.4	86.8
第 N 次实验	5	6	7	8
实验结果	86.6	86.8	85.5	86.0
第 N 次实验	9	10		
实验结果	85.7	86.5		

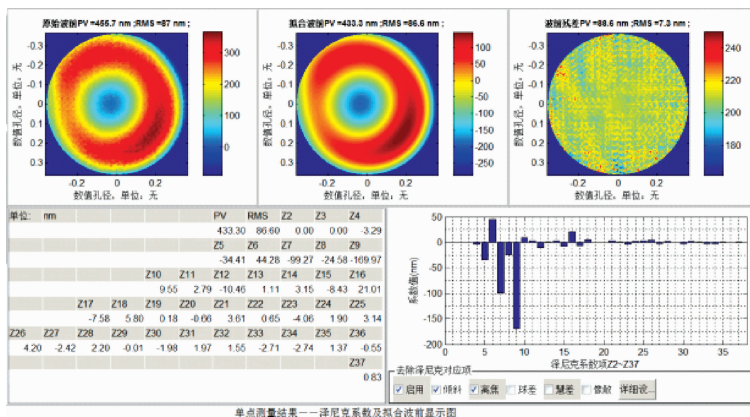


图 10 Zernike 拟合结果

### 5 结论

本文依据横向剪切干涉原理设计出应用于波像差检测的运动控制及图像采集系统,通过高精度纳米位移台和 CMOS 探测器实现剪切光栅及物光栅的精确步进及定位并同时完成剪切干涉图像的采集与实时保存。本文设计的高精度像差检测运动控制及图像采集系统的波像差检测重复性精度达到 0.196 9,较好的满足波像差检测的要

求。在光刻机使用过程中,可利用本系统对投影物镜波像差检测,以更好的对其波像差进行校正,以满足使用要求。

#### 参考文献

[1] 尹志生,李友如,李佩玥,等. 高精度六维激光测量系统误差补偿算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(8):1275-1281.

(下转第 120 页)