

文章编号 1004-924X(2015)11-3033-08

精密光学系统的热像差

张 巍, 于新峰*, 周连生, 王学亮, 倪明阳, 彭海峰

(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)

摘要:为了精确控制与补偿物镜的热像差,设计了一套三镜实验光学系统,基于该系统验证了热像差计算方法的准确性。介绍了热像差分析方法及验证实验方案。开展不同热载工况下热像差测试实验,并与仿真结果进行了对比。最后,综合实验与仿真结果,分析了特定热载条件下系统热像差中非轴对称像差成分以及系统最佳焦面的变化趋势,获得了热像差的瞬态特性。实验结果显示:在输入热载大小之比为 1:4:9 的情况下,实验和仿真获得的热像差均方根(RMS)值之比分别为 1:3.75:9 和 1:4.01:9.01,光学系统所加热载和热像差之间呈线性关系;在实验热载荷作用下,系统最佳焦面的稳态时间小于 450 min,而热像差中一阶像散(标准 Zernike Z_4)的稳态时间小于 48 min,一阶四叶(标准 Zernike Z_{11})的稳态时间小于 9 min,最佳焦面稳态时间远大于非轴对称成分的稳态时间。基于该三镜实验光学系统所获得的热像差特性能够为投影光刻物镜或其它精密光学系统的热像差控制与补偿提供有力支撑。

关键词:精密光学系统;激光辐照;投影光刻物镜;热像差

中图分类号:TN305.7;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3033

Thermal aberration in precision optical system

ZHANG Wei, YU Xin-feng*, ZHOU Lian-sheng, WANG Xue-liang, NI Ming-yang, PENG Hai-feng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yu_xfeng@126.com

Abstract: To control and compensate the thermal aberration of objective lens accurately, a special three lens integrated experiment optical system was designed, and the calculation method for the thermal aberration was verified based on the designed system. Firstly, thermal aberration simulation method and corresponding verified experiment were introduced. Then, a series of experiments were carried out in different thermal load conditions and comparison of experimental and simulated results were also presented. Finally, combining experimental and simulated results, asymmetric aberrations and focus drift trends of the optical system under a certain thermal load were analyzed, and transient properties of thermal aberration were obtained. The results show that the ratios of RMS(Root Mean Square) values of thermal aberration from the experiments and simulations are 1:3.75:9.00 and 1:4.01:9.01 when the thermal load ratio of the optical system is 1:4:9. The data suggests that the thermal aberration is proportional to a heat load it suffers. For transient thermal aberration, simulation results show that stable time of the best focus position is less than 450 min whereas the stable time of Z_4 and Z_{11} are 48 min and 9 min respectively. The stable time of best focus is much

收稿日期:2015-02-06;修订日期:2015-03-24.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX02205)

longer than that of asymmetrical aberration. Thermal aberration properties obtained through the three lens integrated optical system provide references for thermal aberration reduction and calibration strategies both for lithography objective lenses and other similar optical systems.

Key words: precision optical system; laser irradiation; projection lithographic objective lens; thermal aberration

1 引言

精密光学系统如投影光刻物镜对成像质量的要求极为严格,除了保证加工制造以及集成过程中的公差外,工作过程中还要克服振动、外部环境变化、透镜材料对曝光能量吸收等引起的像质劣化。目前,遵循摩尔定律的发展趋势,投影光刻物镜的分辨率及产量不断提升。除了缩短曝光波长、提高投影光刻物镜的数值孔径外,人们还提出提高激光光源功率、采用分辨增强技术,如离轴照明、相移掩模技术等来提升集成电路分辨率及降低批量制造的成本^[1-2]。但是,曝光能量的提升及分辨率增强技术的使用会导致系统产生热像差,从而极大地降低系统的成像质量。其主要原因为:采用更高的热载及离轴照明技术时,物镜镜片和表面膜层将吸收更多的热量,不仅导致物镜整体温度的升高,还使光学元件产生温度差异而形成非均匀的温度分布。鉴于光学材料的热光学特性,投影光刻物镜元件的温升和温度分布不均匀性会使材料折射率和元件面形发生变化,进而形成系统热像差。研究表明,该类热像差的幅值和成分主要取决于照明条件、掩模图案及它们之间的相互作用^[2-3]。

国际主流的光刻机制造商 ASML 及 Nikon 公司均对投影光刻物镜热像差及控制进行了深入的研究,以降低工作过程中热像差导致的成像质量劣化。目前,热像差的评估主要分为两步:首先计算掩模的衍射,并与照明模式进行卷积运算获得衍射图案;然后,通过动态热模型计算像差的变化^[4-5]。对于热像差的补偿,Nikon 公司在 S610C、S620D 机型中,采用红外热补偿技术(IAC)及反射式变形镜来补偿常数项像散^[1-2,6]。而 ASML 公司则采用了不同的热像差补偿路线,其早期采用透射式变形镜技术(ALE)进行低阶及高阶像散的补偿^[7],而后又集成了 FlexWave

热像差控制单元,使矫正能力达到了标准 Zernike 64 项^[8]。

通常在物镜系统设计阶段,应预先评估特定的曝光剂量与曝光模式下物镜的热效应,并基于仿真结果制定热像差的标定与补偿策略^[4,9];否则一旦物镜进入制造阶段,补偿策略的制定将受到极大的限制。因此,热像差仿真结果的准确性至关重要。为进一步实现对物镜热像差的精确控制与补偿,须掌握光学系统热像差的特性。本文设计了一套三镜实验光学系统,用以验证热像差计算方法的准确性,并基于该三镜实验系统获取了系统的热像差特性。相关分析方法及结果能够用以支撑投影光刻物镜等精密光学系统热像差的评估及控制。

2 光学系统热像差的计算

系统热像差的产生原因主要有元件表面热变形、受热导致材料折射率变化及热应力三方面。其中,受热导致材料折射率变化是投影光刻物镜系统产生热像差的主要因素,与之相比,元件表面热形变与热应力的影响可以忽略^[10]。因此,本文的热像差计算仅考虑受热导致材料折射率变化。材料折射率变化改变了光束经过透镜的光程差,这是它产生热像差的根本原因,该光程差变化可通过近似计算获得^[11]。

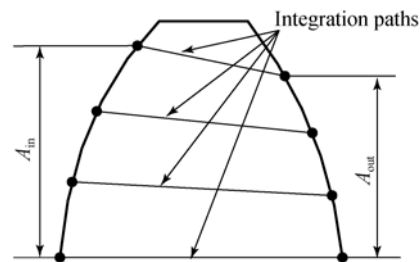


图 1 透镜中计算光程差的积分路径示意图

Fig. 1 Schematic illustration of integration path in lens

用于计算光程差的积分路径如图 1 所示,以入射面上某点为起始点,出射面上的对应点为出射点,入射点与出射点的对应关系由入射面与出射面的通光口径决定。因此,积分路径上的任意点坐标可以由入射点坐标、通光口径以及一个参数化变量唯一确定。它在柱坐标系下的坐标可表示为:

$$z = (1 - \eta)Z_{in}(R_{in}) + \eta \left[Z_{out} \left(R_{in} \frac{A_{out}}{A_{in}} \right) + t_0 \right],$$

$$r = \eta R_{in} \frac{A_{out}}{A_{in}} + (1 - \eta)R_{in},$$

$$\theta = \theta_{in}, \quad (1)$$

其中: $(R_{in}, \theta_{in}, Z_{in}(R_{in}))$ 为入射点坐标, A_{in}, A_{out} 分别为入射面、出射面的通光口径, η 为参数化变量(取值为 $0 \sim 1$), t_0 为透镜中心厚,而 $Z_{in}(R_{in})$ 和 $Z_{out}(R_{in} A_{out}/A_{in})$ 可以通过入射、出射表面矢高方程计算得到。该点对应的温度可通过热分析得到的周围点温度的插值计算获得。基于上述参数计算积分路径光程差的离散公式为:

$$OPD = \sum_{i=1}^N \Delta n_i \Delta L_i, \Delta n_i = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_i, \quad (2)$$

其中: Δn_i 为积分路径离散化后第 i 点折射率的变化量, N 为积分路径上离散点的数量, ΔL_i 为第 i 点对应的积分路径长度, ΔT_i 为插值获得的积分点的温差。

由此可见,当透镜受热引起材料折射率分布发生改变时,积分路径上的光程差会随之改变。利用上述方法计算各透镜的光程差变化便可获得系统热像差,并评估成像质量的劣化情况。但上述光程差计算的积分路径与实际系统中的光线路径略有差异,这会影响热像差计算的准确性。不过本研究中采用的三镜实验光学系统的焦距较长,并且只针对中心视场点进行分析,因此偏差较小,经评估上述方法能够满足光程差计算的精度要求。

3 实验方案

3.1 光学系统

如图 2 所示,三镜实验光学系统由 3 片透镜组成,透镜的材料为熔石英,系统焦距为 516.86 mm,入瞳直径为 150 mm。第一片与第三片透镜采用环面支撑,其支撑环面与透镜支撑面具有相同的

曲率,并安装弹性压圈以防止透镜绕接触面球心发生旋转。第二片透镜采用运动学支撑结构^[12],以保证透镜元件受热膨胀过程中不受支撑结构限制。第一片与第三片透镜采用环形支撑能够在光学系统内部形成封闭腔,更加接近投影光刻物镜的内部环境条件。

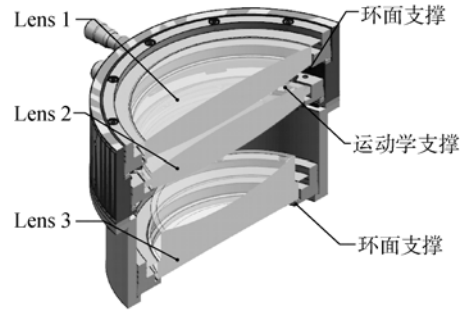


图 2 实验光学系统

Fig. 2 Experimental optical system

3.2 实验系统

如图 3 所示,热像差测量实验系统包括三镜光学系统、温度控制系统和波前测量系统。其中,温度控制系统主要用于控制水套温度,环境控制计算机通过网络通信接口获取控制点的温度信号,并根据特定的控制算法向 TCU 和流速控制板卡发送控制指令,以保证水套温度始终保持在 $(22 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ 。铝制水套厚 2 mm,表面布有水管,保证内部温度均匀性,以隔绝外部环境的影响。

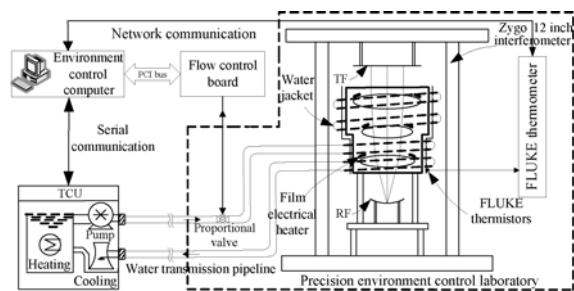


图 3 热像差测量实验系统示意图

Fig. 3 Frame work of experimental system for thermal aberration measurement

这里采用干涉法测量系统波像差。波前测量系统中,菲索干涉仪发出的平面波经三镜光学实验系统汇聚于焦点处,再经置于焦点附近的球面

镜反射后返回,形成双光路干涉,从而实现系统波像差的测量。考虑到波前测量过程中对温度、振动控制的要求,环境控制计算机与温度控制分系统均放置于精密环境控制实验室的外部。

实验中采用薄膜电加热片模拟激光作为透镜的加热源,以简化激光热源测试系统。薄膜电加热片产生的热载输出功率可以通过调节电压进行精确控制。在三镜实验光学系统中,薄膜电加热片在各透镜表面的安装位置如图 4 所示。直径为 20 mm 的薄膜电加热片粘贴在透镜的同一圆周上,其背面贴有保温材料。由于安装的电加热片阻挡了部分检测光路,故系统的有效测量口径降低为原来的 60%,但并不影响对热像差的测量和特性分析。

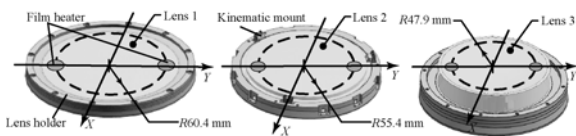


图 4 透镜表面薄膜电加热片的安装位置示意图

Fig. 4 Locations of film electrical heaters on lens surfaces

4 仿真实验及分析

4.1 实验设定

在实验过程中,由于干涉测量获得了系统的波像差,其中除热像差外,还包含了光学制造、集成公差所导致的系统初始波像差。由于本实验重点关注系统的热像差特性,因此,在热像差实验前需要测试未加热状态下的系统初始波像差,并在热实验测试数据中将该初始波像差去除,以获得准确的热像差数据。此外,实验前已标定了干涉仪系统自身的测量误差,并在热像差测试数据中将它一并去除。同时,通过控制热载的输入功率使热像差与初始波像差为同一数量级,以避免热像差幅值过小影响热像差的测量精度。

实验步骤如下:

(1) 安装实验系统;

(2) 启动温度控制系统,当系统达到热平衡时,利用干涉仪测量系统的初始波像差;

(3) 启动电加热装置,通过设置输入电压获得特定的热载,实时测量系统的波像差,直到系统在该特定热载下达到热平衡;

(4) 重复步骤(2)、(3),通过调节电加热装置的输入电压来改变热载,开展不同工况下热像差的测试。

由于测量系统机械结构自身特性的影响,长时间测量时波像差测量结果中 Tilt 项和 Power 项必然产生一定的漂移。因此,后续给出的波像差测试结果中均不包含 Tilt 项和 Power 项。统计结果显示,该实验系统对波像差的测量重复性为 $\pm 0.1 \text{ nm}(\text{rms}, 1\sigma)$ 。考虑到空气湍流和系统机械结构漂移的影响,实验系统对热像差的测量重复性约为 $\pm 0.11 \text{ nm}(\text{rms}, 1\sigma)$ 。表 1 列出了 3 组不同实验条件的各电加热片电压及对应热载。

表 1 三组实验工况下单片电加热片电压及对应热载数值

Tab. 1 Voltages of single electrical film heater and corresponding heat loads in different work conditions

实验工况	电压/V	功率/W
工况 1	1	0.031 2
工况 2	2	0.125 0
工况 3	3	0.281 0

4.2 热仿真边界条件设定

热仿真分析的过程中,三镜实验系统第一片透镜上表面与第三片透镜下表面与空气接触,对流换热系数设为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。镜框外表面与恒温水套之间的空气间隙较小,设置为以空气为导热介质的热传导,恒温水套温度设置为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。镜片与镜片之间、镜片与镜框之间以气体为导热介质进行热量传递,该传递为基于路径距离的热耦合方式。热载荷则依照薄膜电加热片的安装位置定为面载荷的方式。表 2 给出了热仿真过程中的材料属性。

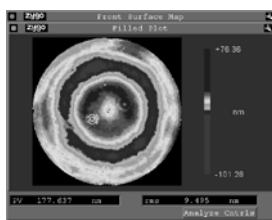
表 2 仿真过程中的材料属性

Tab. 2 Physical properties of materials in simulation

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	热焓/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	热传导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	dn/dT ($\times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$) @ $\lambda=632.8 \text{ nm}$
熔石英	2.201	741	1.3	10.5
钢钢	8.050	500	10.5	—

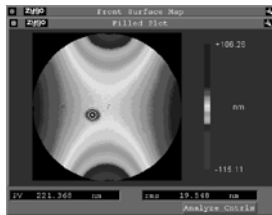
4.3 实验结果及分析

测试结果如图 5 所示,其中图 5(a)为实验系统集成后初始波像差的测量结果(9.495 nm,RMS);图 5(b)~图 5(d)分别为不同热载幅值条件下系统热像差的测量结果。表 3 为 3 组实验条件下热像差测试结果与仿真结果的对比。对比 3 组结果可见,热像差仿真值较测量值均偏大,其中第二组实验条件下的偏差最大,约为 10%。该偏差主要是由长时间测量导致电压源不稳定、功率偏小带来的。但总体上仿真结果基本与实验测试结果吻合,热像差仿真与计算方法的有效性得到了验证。



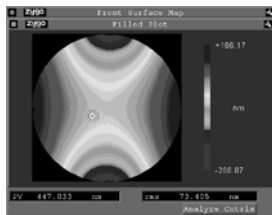
(a) 初始波像差

(a) Initial wavefront aberration



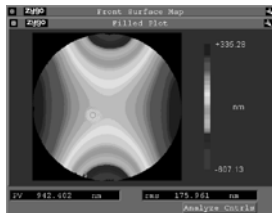
(b) 电压 1 V 时系统的热像差

(b) Thermal aberration with voltage of 1 V



(c) 电压 2 V 时系统的热像差

(c) Thermal aberration with voltage of 2 V



(d) 电压 3 V 时系统的热像差

(d) Thermal aberration with voltage of 3 V

图 5 实验结果

Fig. 5 Experiment results

表 3 不同实验工况下热像差测量与仿真结果对比

Tab. 3 RMS values of thermal aberration from different experiments and simulation cases (nm)

实验工况	实验 RMS 值	仿真 RMS 值
工况 1	19.55	20.39
工况 2	73.41	81.68
工况 3	175.96	183.80

进一步比较表 3 的实验结果可得,在 0.031 2, 0.125, 0.281 W 3 组不同热载条件下,3 组热像差的实验测量值之比与 3 组仿真值之比分别为 1 : 3.75 : 9 和 1 : 4.01 : 9.01,热像差随输入热载基本呈等比例变化,特别是仿真结果更加符合该规律。热像差的这一特性对于精密光学系统的热像差控制具有重要意义。由此可以通过减小透镜厚度、减少光学材料的热吸收等方法降低系统热载,从而实现抑制系统热像差的目的。

根据上述实验结果,利用标准 Zernike 函数拟合第一组实验条件下的热像差,其中 $Z_4 \sim Z_{45}$ 项 Zernike 系数对比结果如图 6 所示。根据电加热片的放置位置可以大致确定热像差的成分除 Power 项外主要为像散(Z_4)、四叶(Z_{11})和六叶(Z_{22})像差,图 6 所示结果与预期基本一致。通过对比,实验测试结果总体上略小于仿真结果,像散项偏差最大约为 2.8 nm。相比于上述的主要像差项,热像差中的球差项、三叶像差项等幅值较小,分析表明它们主要来自三镜集成过程中薄膜电加热片的安装位置误差。

根据图 6 所示的分析结果,对热像差主要贡献项 Z_4 和 Z_{11} 进行了瞬态特性分析。如图 7 所示,在一定热载下, Z_4, Z_{11} 系数绝对值的实验值与仿真值的变化趋势相同,且两者符合度较好,充分验证了热像差仿真方法的准确性。通过 3 组实验结果的对比分析可知,不同热载下热像差主要成分的变化趋势基本一致,幅值随热载等比例变化,幅值变化规律与表 3 中的结果相符。

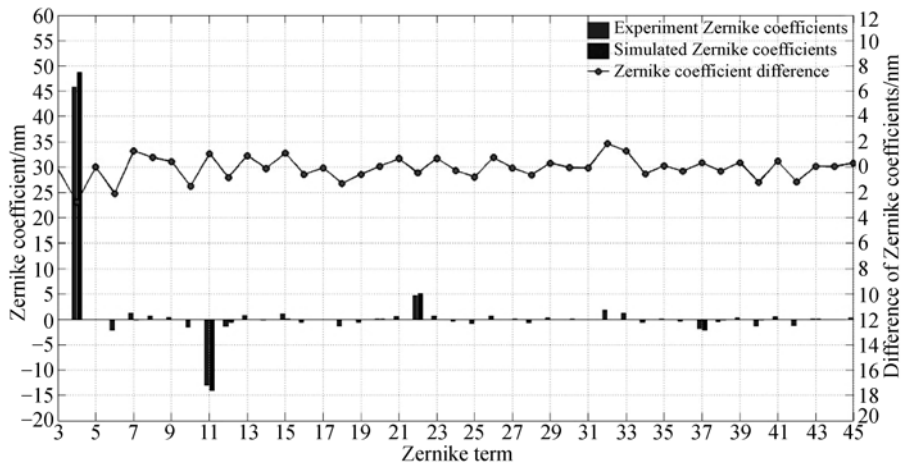
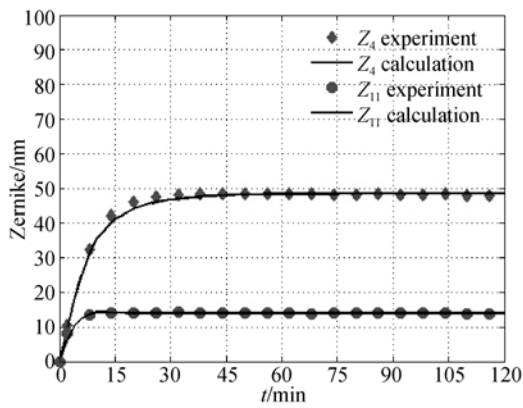


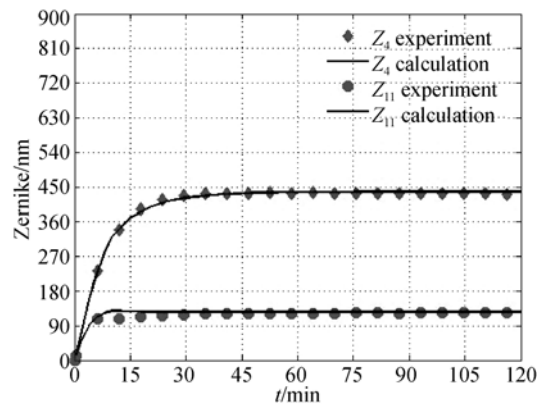
图 6 热像差标准 Zernike 各项系数测试与仿真值对比

Fig. 6 Comparison between experimental and simulated Code V standard Zernike coefficients



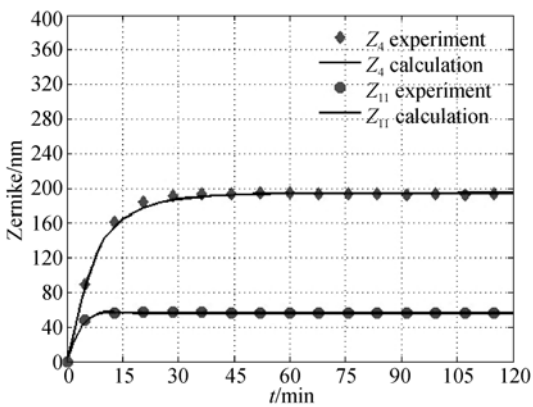
(a) 电压 1 V

(a) Voltage of 1 V



(c) 电压 3 V

(c) Voltage of 3 V



(b) 电压 2 V

(b) Voltage of 2 V

图 7 不同热载工况下热像差主要成分的瞬态特征

Fig. 7 Transient characteristics of main aberrations induced by different heat loads

为了定量描述瞬态结果, 稳态时间的计算规定: 从 t_0 时刻开始以特定热载持续加热, 经过一段时间后的某个时间点 t_1 一直到 t_∞ 这段时间内, 由热效应导致的各量变化小于 t_∞ 状态的 1.0%, 称 t_1 为稳态时间。由于实验测量值均为离散点, 无法准确获得稳态时间, 因此稳态时间均由仿真数据获得。表 4 中给出了相应的数据, 由表可以看出, 不同工况的稳态时间极为相近, Z_4 的稳态时间小于 48 min, Z_{11} 的稳态时间小于 9 min。

表 4 不同实验工况下 Z_4 以及 Z_{11} 的稳态时间
Tab. 4 Stable time in different experimental cases
(min)

实验工况	稳态时间	
	Z_4	Z_{11}
工况 1	48	9
工况 2	47	9
工况 3	47	8

如前所述,受系统波像差测量方法的限制,热效应中另一主要变化项 Power 项 (Z_5) 难以准确测量。因此,基于以上对仿真分析方法有效性的验证,从仿真角度分析了与热像差中 Z_5 项相关的系统最佳焦面。图 8 给出了在不同热载条件下,三镜实验光学系统的最佳焦面随时间的变化曲线。由图可知,区别于 Z_4 , Z_{11} 等非轴对称像差项,最佳焦面需要更长的稳态时间。按照上述关于稳态时间的定义,薄膜电加热片电压 1, 2 和 3 V 所对应的最佳焦面稳态时间分别为 442, 450 和 450 min。

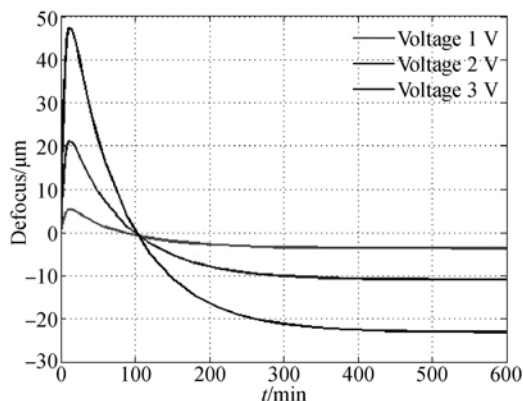


图 8 不同热载条件下系统最佳焦面随时间的变化特性
Fig. 8 Transient characteristics of best focus position induced by different heat loads

参考文献:

- [1] UEHARA Y, MATSUYAMA T, NAKASHIMA T, *et al.*. Thermal aberration control for low k_1 lithography [J]. SPIE, 2007, 6520:65205V1-65205V11.
[2] NAKASHIMA T, OHMURA Y, OGATA T, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens

由上述结果推知,在系统达到热平衡之前,热像差中的轴对称项较非轴对称项需要更长的稳态时间。进一步分析可知该现象产生的机理为:在加热开始阶段系统除整体温升外,热吸收主要在透镜内部产生非轴对称的温度分布,导致热像差中非轴对称项的产生,并且该项随着加热时间变化;48 min之后透镜的温度分布不均匀性逐渐趋于稳定,非轴对称像差基本不再变化;然后,热吸收主要体现在为透镜整体温度的升高,热像差中的轴对称成分随之增长,直至系统达到热平衡状态。

5 结 论

本文基于三镜实验光学系统对精密光学系统的热像差开展了实验与仿真研究。通过对热像差测试与仿真结果进行标准 Zernike 分解及比对可知,像散项偏差最大,约为 2.8 nm,小于测量值的 6%,验证了本文热像差仿真分析的准确性和有效性。同时,当光学系统热载输入比为 1:4:9 时,热像差 RMS 值的测量及仿真结果比分别为 1:3.75:9 和 1:4.01:9.01,说明热像差随输入热载基本呈等比例变化。以上述验证为基础,进一步分析了系统的瞬态热像差,结果显示特定热载荷作用下,实验系统焦面的稳态时间小于 450 min,热像差中 Z_4 的稳态时间小于 48 min, Z_{11} 的稳态时间小于 9 min,系统焦面的稳态时间远大于热像差中非轴对称像差的稳态时间。本实验采用电加热片替代实际系统的激光光源,虽然加热机制不同,但其产生的热载效果具有可比性,且电加热方式有助于简化实验系统,并能够准确控制热载,有助于验证仿真方法的准确性。

综上,本文采用的热像差分析方法所得到的热像差特性分析结果能够为投影光刻物镜或其它精密光学系统的热像差控制与补偿提供有益的参考。

[J]. SPIE, 2008, 6924:69241V1-69241V9.

- [3] LIU P, SNADJR M, ZHANG X, *et al.*. A computational method for optical application specific lens control in microlithography [J]. SPIE, 2010, 7640:76400M1-76400M9.
[4] FUKUHARA K, MIMOTOGI A, KONO T, *et al.*. Solutions with precise prediction for thermal

- aberration error in low k_1 immersion lithography [J]. *SPIE*, 2013, 8683:86830U1-86830U7.
- [5] BEKAERT J, ANLOOK L, VANDENBERGHE G, *et al.*. Characterization and control of dynamic lens heating effects under high volume manufacturing conditions [J]. *SPIE*, 2011, 7973: 79730V1-79730V11.
- [6] OHMURA Y, OGATA T, HIRAYAMA T, *et al.*. An aberration control of projection optics for multi-patterning lithography [J]. *SPIE*, 2011, 7973: 79730W1-79730W11.
- [7] MULKENS J, KLERK J, LEENDERS M, *et al.*. Latest developments on immersion exposure systems [J]. *SPIE*, 2008, 6924: 69241P1-69241P12.
- [8] STAALS F, ANDRYZHIEUSKAYA A, BAKKER H, *et al.*. Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner [J]. *SPIE*, 2011, 7973:79731G1-79731G13.
- [9] YOSHIHARA T, SUKEGAWA T, YABU N, *et al.*. Advanced aberration control in projection optics for double patterning [J]. *Optical Microlithography XXII*, *SPIE*, 2009, 7274:72741L1-72741L9.
- [10] CHEN H, YANG H J, YU X F, *et al.*. Simulated and experimental study of laser-beam induced thermal aberrations in precision optical systems [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18):4370-4376.
- [11] DOYLE K, GENBERG V, MICHELS G. *Integrated Optomechanical Analysis* [M]. Washington: SPIE Press, 2002.
- [12] YU X F, NI M Y, ZHANG W, *et al.*. Analysis and experiments of the thermal-optical performance for a kinematically mounted lens element [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4370-4376.

作者简介:



张 巍(1978—),男,黑龙江大庆人,博士,副研究员,2007年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事精密光机系统协同设计与计算机辅助装调、衍射光学元件设计与应用等方面的研究。E-mail:zhangw@sklao.ac.cn

通讯作者:



于新峰(1987—),男,内蒙古奈曼旗人,硕士,助理研究员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光机结构设计及分析方面的研究。E-mail:yu_xfeng@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)