

光刻机投影物镜热像差主动补偿方法研究

陈 华 苏东奇 隋永新* 章明朝 田 伟 杨怀江 张 巍

(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 非均匀照明导致的热像差是光刻机投影物镜工作过程中成像性能劣化的主要因素,对其补偿是必要的。针对物镜热像差的补偿问题,提出了分区式加热补偿镜的方案,利用玻璃材料折射率随温度变化的特点,采用电薄膜加热器在镜片的周围加热,从而产生可控的波前变化以补偿物镜由照明引起的热像差。建立了补偿方案的理论模型,并以一片平板透镜为对象开展了实验验证,实验结果表明,补偿前后镜片的波前由 12.52 nm[均方根(RMS)]变化至 2.95 nm(RMS),表明该补偿方案是可行、有效的。

关键词 成像系统;热像差;主动补偿;光刻机;投影物镜

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0811001

Active Compensation of Thermal Aberrations in Lithographic Projection Lens

Chen Hua Su Dongqi Sui Yongxin Zhang Mingchao Tian Wei
Yang Huaijiang Zhang Wei

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

Abstract Thermal aberrations caused by absorption of laser energy are the key factors that make the image performance of lithographic projection lens degrade. Compensation of thermal aberrations is inevitable. A new compensation method of wavefront aberrations by controllable heating of a lens using film heater matrix is presented. For the refractive index of glass changes with temperature, heating on the periphery of a lens will produce a controlled wavefront change that can compensate for the system's thermal aberrations. The feasibility of the compensation method is validated by compensating the wavefront of a plate lens. The results show that the wavefront of lens changes from 12.52 nm root mean square (RMS) to 2.95 nm (RMS) after compensation, indicating that the compensation method is effective and feasible.

Key words imaging systems; thermal aberration; active compensation; lithography; projection lens

OCIS codes 110.5220; 120.6810; 110.1080

1 引 言

在光刻机工作过程中,尽管投影物镜的镜片和镜片表面的膜系吸收的激光能量很少,但由于这些光能所导致的热像差却是不可忽略的,这也是导致物镜成像性能劣化的主要因素^[1-3]。为了达到高的成像分辨率,就需要对热像差进行补偿。传统的补偿方法是采用驱动器调节镜片间隔以补偿温升引起

的离焦、球差和倍率误差^[4]。随着光刻机更高产量、更高分辨率的发展要求,热像差的影响也越趋严重。一方面,产量越高,镜片上的热量密度越大,热像差越严重;而另一方面,分辨率的提高要求更高的成像质量。传统的补偿方法已经难以满足要求,主动补偿成为必然需求。例如 Nikon 的 193 nm 投影物镜采用两路红外激光照射单个镜片,利用镜片吸收的

收稿日期: 2014-03-06; 收到修改稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家重大科技专项基金

作者简介: 陈 华(1983—),女,博士,副研究员,主要从事光刻机投影物镜热像差控制方面的研究。

E-mail: chenhuatyb@126.com

* 通信联系人。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

热量来均匀物镜非均匀受热状态,从而达到补偿像散的目的^[5]。该方法的缺点是需要引入复杂的加热系统,且可补偿的像差形式较少。Nikon 和 SVG 公司均提出采用主动变形镜来补偿热像差的方法^[6-7],即引入驱动装置在某片镜片的背部施力,从而改变镜片的面形。该方法的优点是能够快速补偿较多形式的像差,缺点是需要引入反射镜和精密驱动装置,使得物镜的光机系统变得更为复杂。

本文提出了一种新的热像差补偿方法,该方法利用镜片的折射率随温度变化的特点,通过在透镜的边缘分区域加热产生可控的波前变化。已有的研究表明,透镜受热情况下,波前变化主要是由折射率变化贡献的,面形变化的影响较小^[8],以熔石英为例,193 nm 波长下,1 mm 厚的材料温度变化 1 °C,光程变化量约为 20.3 nm,因而该方法能够达到较高的补偿效率,并且能够补偿较多形式的 Zernike 像差。

2 原 理

设计了原理如图 1 所示的模型。将厚度约为 0.2 mm 的薄膜电加热器贴在一个平板透镜的边缘,根据需要进行分区(如采用 24 个加热区域),并设计控制电路对各个分区加热。

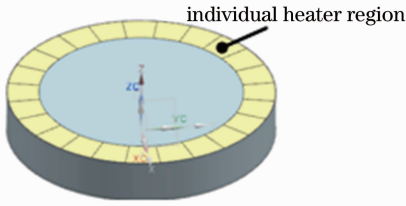


图 1 补偿方案示意图

Fig. 1 Prototype of the compensation method

玻璃材料的折射率随温度会发生变化,当光线通过温度非均匀分布的镜片后,光程也会相应发生变化,光程变化量(F_{OPD})可表示为

$$F_{OPD} = \int_L \Delta T \frac{dn}{dt} \cdot dL, \quad (1)$$

式中 L 为光线在镜片中的传播路径, ΔT 为镜片中的温度变化, $\frac{dn}{dt}$ 为镜片材料的温度折射率系数。显然,当在如图 1 所示的 24 个区域上加热时,则必然会产生一个相应的波前变化,记为 $\sum_{i=1}^{24} \omega_i$, 如果产生的波前变化和需要补偿的波前差满足如下关系:

$$\sum_{i=1}^{24} \omega_i + W_{aberr} = 0, \quad (2)$$

则热像差就可被补偿。式中 ω_i 为第 i 个加热区域单独加热时产生的波前变化, W_{aberr} 为需要补偿的波前。(2)式成立的前提是,各个区域加热产生的波前变化满足线性可叠加原理。其中线性表示为

$$\omega_i^p = p \cdot \omega_i^{mit}, \quad (3)$$

式中 ω_i^p 表示第 i 个加热区域在 p W 热量单独加热时产生的波前变化, ω_i^{mit} 表示第 i 个加热区域在单位热载加热时产生的波前变化。

叠加性可表示为

$$\omega_{1-i} = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_i, \quad (4)$$

即第 1~ i 个区域同时加热产生的波前变化等于这些区域分别单独加热时产生的波前变化之和。

镜片受热达到稳态后的温度分布可记为^[9]

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\varphi}{\lambda} = 0, \quad (5)$$

式中 φ 为镜片内热源, λ 为镜片导热系数。由于(1)式和(5)式为线性的,所以(3)、(4)式两个假设显然是成立的。因而,(2)式可以改写为

$$\begin{bmatrix} \omega_1^{mit} & \omega_2^{mit} & \omega_3^{mit} & \dots & \omega_{24}^{mit} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & \dots & k_{24} \end{bmatrix}^T = -W_{aberr}, \quad (6)$$

式中 $\begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & \dots & k_{24} \end{bmatrix}^T$ 为系数矩阵,记为 \mathbf{K} 。如果采用 Zernike 多项式描述波前像差,则 ω_i^{mit} 可记为 $\omega_i^{mit} = \mathbf{Z}_1 \mathbf{A}_1(x, y) + \mathbf{Z}_2 \mathbf{A}_2(x, y) + \dots + \mathbf{Z}_n \mathbf{A}_n(x, y) = \mathbf{Z}$, 其中 $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ 为 Zernike 多项式函数, $\mathbf{A} = [A_1(x, y), A_2(x, y), \dots, A_n(x, y)]$ 为 n 项 Zernike 多项式。为便于设计补偿算法,文中像差均采用 Zernike 多项式描述的方法。如果取 $n=36$, 则(6)式可记为 $\mathbf{A} \times \mathbf{Z} \times \mathbf{K} = -W_{aberr}$, 即

$$\mathbf{A} \times \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & z_{1,3} & \dots & z_{1,24} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & z_{2,3} & \dots & z_{2,24} \\ z_{3,1} & z_{3,2} & z_{3,3} & \dots & z_{3,24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{36,1} & z_{36,2} & z_{36,3} & \dots & z_{36,24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_{24} \end{bmatrix} = -W_{aberr}. \quad (7)$$

通过仿真或实测得出 ω_i^{mit} , 则很容易计算出系数矩阵 \mathbf{Z} 和 \mathbf{K} 。在实际条件下,由于补偿能力有限,补偿存在残差,即(7)式等号左边不完全等于右边,补偿算法的目的就是要使得残差最小。

3 仿真及实验验证

为了验证上述方法的有效性,在仿真的基础上设计了实验系统,测试原理及测试装置如图 2 所示。选取一片直径为 $\Phi 150$ mm、厚为 20 mm 的平板透镜作为实验对象,在透镜非通光区域粘贴加热片,其

中加热片分为 24 个加热区域,各个加热区域可以通过控制电路单独控制,最小加热量为 0.001 W,最大加热量为 0.5 W。为了减小加热片漏热的影响,在加热片与镜片接触侧涂导热脂,在与空气接触侧粘保温层。将透镜安装到一台 12 inch(1 inch=2.54 cm)

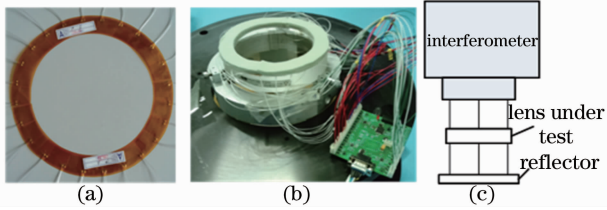


图 2 实验系统。(a)电薄膜加热器;(b)贴完加热片后的平板透镜;(c)波前测试方案

Fig. 2 Setup of the experimental system. (a) Electric film heater matrix; (b) plate lens with heater matrix attached; (c) wavefront test system

Zygo 干涉仪上,加热前测试镜片的透射波前,记为 W_0 ,加热后达到稳态时再次测试镜片的透射波前,记为 W ,则由加热引入的透射波前变化 $\omega = W - W_0$ 。仿真分析的方法和过程可参考文献[8]。

3.1 线性测试结果

对 3 个区域分别进行了线性测试,测试时将加热片的热载荷按 0.005 W 的步距从 0.005 W 逐步升至 0.095 W,逐步测试镜片在各个热载荷下达到稳态后的波前变化,获得的实验结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,尽管存在漏热的影响(导致非线性的原因),透镜的波前变化与加热载荷之间仍然满足线性关系。

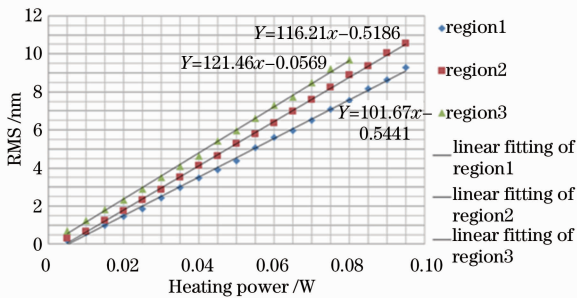


图 3 波前变化与输入功率的线性关系测试

Fig. 3 Test of linear relationship between the input power and the wavefront change

3.2 叠加性测试结果

叠加性的测试方法为:1)在第一、二个区域分别加 0.01 W 热载荷,获得波前 $\omega_{1,2}^{unit}$;2)计算 $\omega_{1,2}^{add} = (\omega_{1,2}^{unit} + \omega_{2,2}^{unit})$;3)比较 $\omega_{1,2}^{unit}$ 与 $\omega_{1,2}^{add}$ 的差异。同样加热第一、二、三个区域,获得 $\omega_{1,3}^{unit}$ 和 $\omega_{1,3}^{add}$ 。结果比较如图 4 所示。

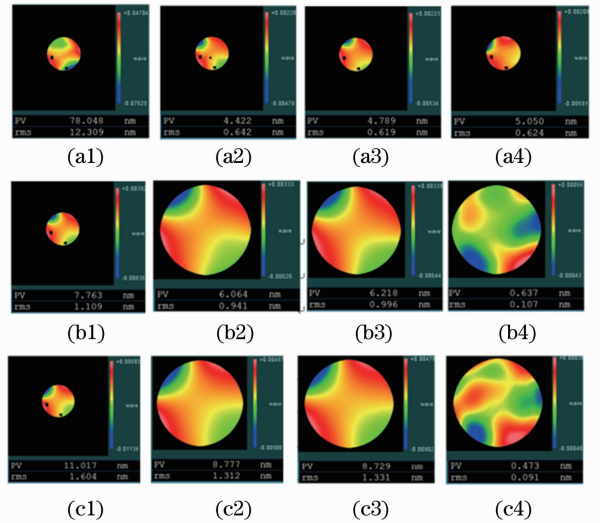


图 4 叠加性测试结果。(a1) W_0 ; (a2)~(a4) $\omega_{1,2}^{unit}$, $\omega_{2,2}^{unit}$, $\omega_{3,2}^{unit}$; (b1) $\omega_{1,2}^{unit}$; (b2) $\omega_{1,2}^{unit}$ 的 Zernike 描述; (b3) $\omega_{1,2}^{add}$; (b4) $\omega_{1,2}^{unit}$ 与 $\omega_{1,2}^{add}$ 之差; (c1) $\omega_{1,3}^{unit}$; (c2) $\omega_{1,3}^{unit}$ 的 Zernike 描述; (c3) $\omega_{1,3}^{add}$; (c4) $\omega_{1,3}^{unit}$ 与 $\omega_{1,3}^{add}$ 之差

Fig. 4 Experimental results of the linear superposition property of the system. (a1) W_0 ; (a2)~(a4) $\omega_{1,2}^{unit}$, $\omega_{2,2}^{unit}$, $\omega_{3,2}^{unit}$; (b1) $\omega_{1,2}^{unit}$; (b2) Zernike plot of $\omega_{1,2}^{unit}$; (b3) $\omega_{1,2}^{add}$; (b4) difference between $\omega_{1,2}^{unit}$ and $\omega_{1,2}^{add}$; (c1) $\omega_{1,3}^{unit}$; (c2) Zernike plot of $\omega_{1,3}^{unit}$; (c3) $\omega_{1,3}^{add}$; (c4) difference between $\omega_{1,3}^{unit}$ and $\omega_{1,3}^{add}$

从图 4(b4)和(c4)可以看出,叠加计算得到的透射波前变化与直接加热测试获得的波前变化相比,差值在 0.1 nm[均方根(RMS)]左右,考虑到测试过程中气流扰动的影响,该差值可以忽略不计,证明叠加性是成立的。

3.3 补偿能力验证

上述分析和实验表明,分区加热补偿波前差法的算法原理是成立的,因此可以根据(7)式编制计算程序,验证该方法的补偿能力。为了减小实验系统的复杂程度,以上述实验中的平板透镜为补偿对象,

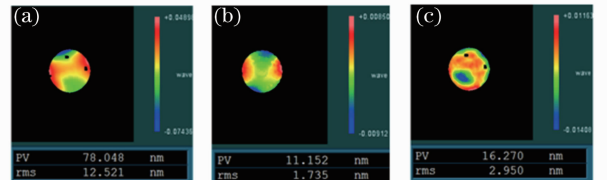


图 5 加热补偿效果测试。(a)加热前透射波前;(b)仿真获得的理想情况下补偿结果;(c)实测补偿结果

Fig. 5 Verification of the compensation ability of the method. (a) Wavefront before compensation; (b) simulated wavefront after compensation; (c) experimental wavefront after compensation

即将加热前平板的透射波前作为需要补偿的波前,通过单片加热的实验数据生成加热载荷矩阵,从而计算得到系数矩阵 \mathbf{K} ,最终使得加热后平板的透射波前接近于零。

图 5 是仿真和实测结果的比对。从图 5 可以看出,加热前镜片的透射波前为 12.52 nm(RMS),仿真表明,理想情况下平板的透射波前能被补偿到 1.735 nm(RMS),实际上由于各个区域的电阻不一致以及电路误差和镜片散热问题,实测最终补偿后的波前为 2.95 nm(RMS),约 76% 的透射波前被透过加热的方式补偿掉。

4 结果与分析

仿真及实验结果表明,分区加热补偿波前差法能够补偿大部分透镜的透射波前,能以较小的加热量实现较大的波前补偿量。由于电加热膜结构简单、制作工艺成熟,与已有的补偿方法相比,实现起来不需要复杂的控制系统或结构保障,因此其优点是显然的。但是,该方法也有其局限性。由于采用在周边分区加热的方法,轴对称形式的像差,如球差难以被补偿,而对非轴对称项,如像散、三叶、四叶等像差形式具有很好的补偿效果。另外从实验中也发现,该补偿方法对于低阶像差的补偿能力很强,对于高价像差具备一定的补偿能力,但补偿效果较小。虽然分区加热补偿波前差法具有上述的局限性,但是物镜传统的补偿方法能够补偿球差,这两种补偿方法结合在一起,仍然能够为物镜提供较为完善的补偿方案。

5 结 论

提出了一种新的物镜热像差补偿方法,基于玻璃材料折射率随温度变化的原理,设计了采用薄膜电加热器在镜片周围分区加热的办法,以一片平板透镜为对象开展了仿真和实验验证,结果表明,补偿前后镜片的波前由 12.52 nm(RMS)变化至 2.95 nm(RMS),约 76% 的透射波前被透过加热的方式补偿掉,表明该补偿方案是有效的。

参 考 文 献

- 1 K Mann, A Bayer, U Leinhos, *et al.*. Measurement of wavefront distortions in DUV optics due to lens heating [C]. SPIE, 2011, 7973: 79732B.
- 2 J Zhou, Y Zhang, P Engblom, *et al.*. Improving aberration control with application specific optimization using computational lithography [C]. SPIE, 2010, 7640: 76400K.
- 3 W Wang, F Tan, B Lü, *et al.*. Three-dimensional calculation of high-power, annularly distributed, laser-bam-induced thermal effects on reflectors and windows [J]. Appl Opt, 2005, 44(34): 7442-7450.
- 4 Y Uehara, T Matsuyama, T Nakashima, *et al.*. Thermal aberration control for low k1 lithography [C]. SPIE, 2007, 6520: 65202V.
- 5 T Nakashima, Y Ohmura, T Ogata, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
- 6 Y Ohmura, T Ogata, T Hirayama, *et al.*. An aberration control of projection optics for multi-patterning lithography [C]. SPIE, 2011, 7973: 79730W.
- 7 H Sewell, J McClay, A Guzman, *et al.*. Control for 70 nm optical lithography [C]. SPIE, 2001, 4404: 279-289.
- 8 Chen Hua, Yang Huaijiang, Yu Xinfeng, *et al.*. Simulated and experimental study of laser-beam induced thermal aberrations in precision optical systems [J]. Appl Opt, 2013, 52(18): 4370-4376.
- 9 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. 25-28.
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 162-165.

栏目编辑: 张浩佳