

# 同轴两反式高NA投影光刻物镜热像差补偿方法研究

徐象如<sup>1,2</sup> 黄 玮<sup>1</sup> 贾树强<sup>1</sup> 徐明飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 热像差是导致光刻物镜工作状态下像质劣化的主要原因之一。针对同轴两反式高数值孔径(NA)投影光刻物镜的结构特点,提出了将元件位移法和元件分区加热法相结合,共同补偿热像差的方案。元件位移法通过改变元件的间隔、偏心或倾斜量来调节像质;元件分区加热法利用光学材料折射率随温度变化的特点,通过控制元件的温度分布产生可控波前。采用上述补偿方案对偶极照明模式下的热像差进行补偿,波像差从129.78 nm减小至1.69 nm,畸变从12.24 nm减小至1.31 nm,将物镜像质补偿至接近设计水平。

**关键词** 成像系统; 投影光刻物镜; 热像差; 元件位移; 分区加热

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1011003

## Compensation Method of Thermal Aberration for On-Axis Two-Mirror High NA lithographic Lens

Xu Xiangru<sup>1,2</sup> Huang Wei<sup>1</sup> Jia Shuqiang<sup>1</sup> Xu Mingfei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** Thermal aberration is one of the main reasons for imaging quality degradation of lithographic lens in working status. According to the structure feature of on-axis two-mirror high numerical aperture (NA) lithographic lens, a combination of element position shift and district heating method is proposed to compensate thermal aberration. The element position shift method takes advantage of element space, decentration and tilt to adjust the imaging quality; the district heating method takes advantage of the feature that the refractive index of optical material changes along with the temperature to control the temperature distribution on the lens and generate a controllable wavefront. The thermal aberration under dipole illumination model is compensated by the proposed method, and the wavefront aberration and distortion are recovered from 129.78 nm and 12.24 nm to 1.69 nm and 1.31 nm, respectively. The proposed method can basically recover the imaging quality of lens to design level.

**Key words** imaging systems; lithographic lens; thermal aberration; element position shift; district heating

**OCIS codes** 110.5220; 120.6810; 220.1000

## 1 引 言

高产出和高分辨率是对现代光刻机的基本要求,离轴照明作为一种分辨率增强技术被广泛应用于光刻中<sup>[1]</sup>。光刻物镜对像质要求极其苛刻,波像差与畸变需优化至1 nm左右<sup>[2-3]</sup>。生产率的提高带来单位时间内曝光剂量的增加,离轴照明使入射光不再充满物镜的光阑,而是汇聚在光阑的一小片区域,导致镜片受热不均,产生热像差<sup>[4-10]</sup>。周连生等<sup>[11]</sup>通过光、机、热集成分析得出结论:温度变化导致的光学材料的折射率改变是热像差产生的主要原因。热像差将会严重影响光刻机的分辨率,因此,热像差的补偿成为协调光刻机高

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-06-06

基金项目: 国家重大专项子课题基金(2012ZX02701001-007)

作者简介: 徐象如(1990—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: xuxiangru@foxmail.com

导师简介: 黄 玮(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: huangw@ciomp.ac.cn(通信联系人)

产出与高分辨率之间矛盾的关键。

传统的元件位移法采用驱动器调节元件的间隔、偏心及倾斜量,可以补偿热像差的低阶成分<sup>[8-10]</sup>。Nikon S610C 型号光刻机<sup>[8-9]</sup>采用红外激光束照射光阑附近元件的非受热部分,以补偿热像差中的像散。该方法能补偿的像差形式少,且响应慢,很难实时精确补偿。Nikon S620D 型号光刻机<sup>[9]</sup>和 SVG 公司的 157 nm 光刻机<sup>[10]</sup>都采用主动变形镜的方法补偿热像差,变形镜是位于光阑附近的反射镜,通过改变其面形可以补偿较多形式的像差。该方法优点是能实时补偿,响应快;缺点是机械结构复杂,需在反射镜背面安装大量驱动器,且对反射镜的位置有要求。陈华等<sup>[12]</sup>提出了一种分区加热透镜的方法,在镜片周围用多个独立电薄膜加热器对其进行加热,从而产生可控的波前变化,以补偿热像差。该方法机械结构简单,对非对称形式的像差具有较好的补偿效果。

同轴两反式光刻物镜由于结构紧凑、易于装调(相比于离轴三反式)、无镜像、掩膜具有继承性、偏振像差小等优点<sup>[13-14]</sup>,被应用于光刻机中。但由于其两反射镜位置均离光阑较远,变形镜技术已不能有效补偿热像差。针对上述情况,本文采用元件位移法与元件分区加热法相结合的补偿方案,对偶极照明模式下的同轴两反式光刻物镜的热像差进行补偿,可将物镜的波像差与畸变补偿至接近设计水平。

## 2 热像差对成像质量的影响

同轴两反式光刻物镜的基本参数如表 1 所示,各视场最大波前均方根值(RMS)与畸变分别是 0.66 nm 与 0.71 nm。

表 1 光刻物镜基本参数

Table 1 Parameters of the lithographic lens

Parameters	Specifications
Central wavelength of spectral band	193.368 nm
NA	1.35
Field of object	104 mm×22 mm
Magnification	-0.25
Wavefront RMS	<0.66 nm
Distortion	<0.71 nm
Number of lens elements	26

图 1 给出了物镜的光路图、坐标系以及采用偶极照明(相干因子 $\sigma=0.97/0.82$ ,极张角 $20^\circ$ )后,各个元件的热像差。图中热像差是温度变化引起的各元件光程差(OPD)的改变量。

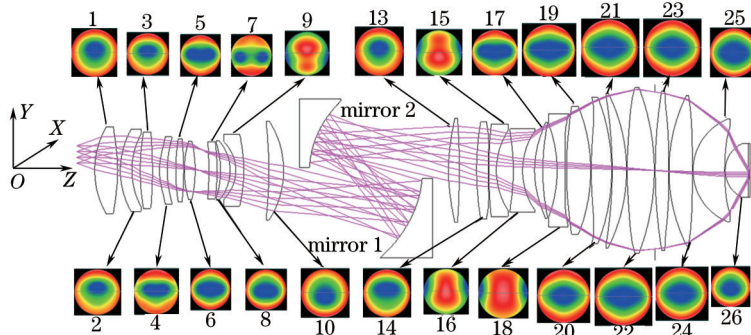


图 1 偶极照明模式下各元件的热像差

Fig.1 Thermal aberrations of each element under dipole illumination

由于反射镜 1 和反射镜 2 对光线的遮挡,物镜采用离轴视场,物面上 X、Y 方向视场范围分别是 -52~52 mm、14~36 mm,如图 2 所示。其中,灰色部分代表被遮挡的区域,矩形部分代表工作视场区域,矩形中的点代表补偿热像差时的 33 个评价视场。

考虑热像差后,各视场最大波前 RMS 劣化为 129.78 nm,最大畸变劣化为 12.24 nm。以中间视场(0, 14)

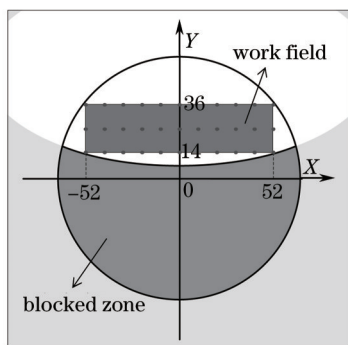


图2 物方视场为 104 mm×22 mm

Fig.2 Object field of view is 104 mm×22 mm

和边缘视场(52, 36)为例,其波前泽尼克多项式系数如图 3(a) 所示,各视场的 X、Y 向畸变如图 3(b) 所示。采用的泽尼克多项式为 Code V 软件中提供的条纹泽尼克多项式,各项未归一化。

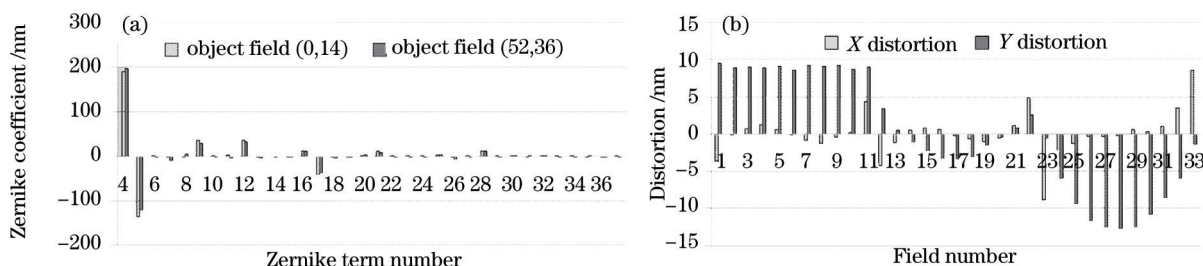


图3 考虑热像差后物镜的像质。(a) 波前泽尼克系数; (b) 畸变

Fig.3 Imaging quality with thermal aberrations. (a) Wavefront Zernike coefficient; (b) distortion

由图 3 可知,考虑热像差后,低阶像差(Z4~Z16)增大了几十至几百纳米,高阶像差(Z17~Z37)增大了几至十几纳米,X、Y 向畸变增大了数纳米,相比于设计值都大幅增大。所以,在补偿热像差时,不仅要考虑低阶像差,还要考虑高阶像差,以及畸变。

### 3 补偿策略

#### 3.1 元件位移法

传统元件位移法采用驱动器调节元件的间隔、偏心和倾斜量,达到补偿的目的。图 4 展示了反射镜 1 沿光轴向像面(Z 向)移动 1  $\mu\text{m}$  后,物镜中间、边缘视场的波前泽尼克系数的变化量,以及各视场畸变的变化量。

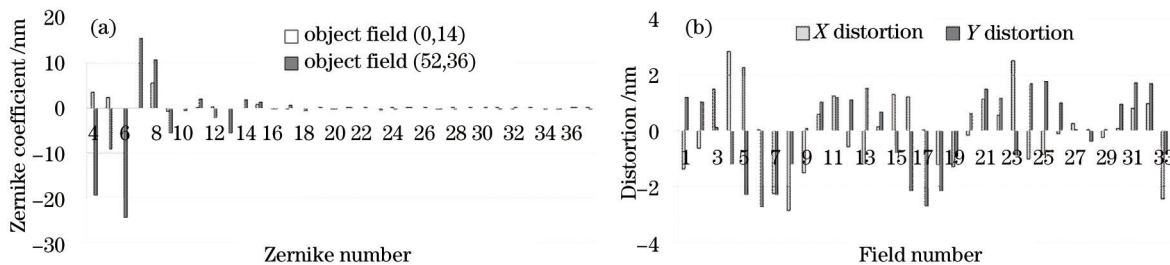


图4 反射镜 1 向 Z 移动 1  $\mu\text{m}$  后的波前泽尼克系数与畸变的变化量。(a) 波前泽尼克系数; (b) 畸变

Fig.4 Variation of wavefront Zernike coefficient and distortion after mirror 1 moving 1  $\mu\text{m}$  in Z direction.

(a) Wavefront Zernike coefficient; (b) distortion

由图 4 可知,反射镜 1 的移动能有效调节低阶像差 Z4~Z16,对高阶像差调节能力较弱,调节幅度不到 1 nm。同时,对畸变也有较大的影响。所以,元件位移法可以补偿低阶像差与畸变。

对反射镜 1 沿 Z 向从 -5  $\mu\text{m}$  到 5  $\mu\text{m}$  进行等间隔移动,间隔为 0.1  $\mu\text{m}$ ,观察波前泽尼克多项式系数及畸变的变化规律。这里,以中间视场和边缘视场的波前泽尼克系数以及 X、Y 向畸变为例,画出其随反射镜 1 移动量的变化趋势,如图 5、6 所示。

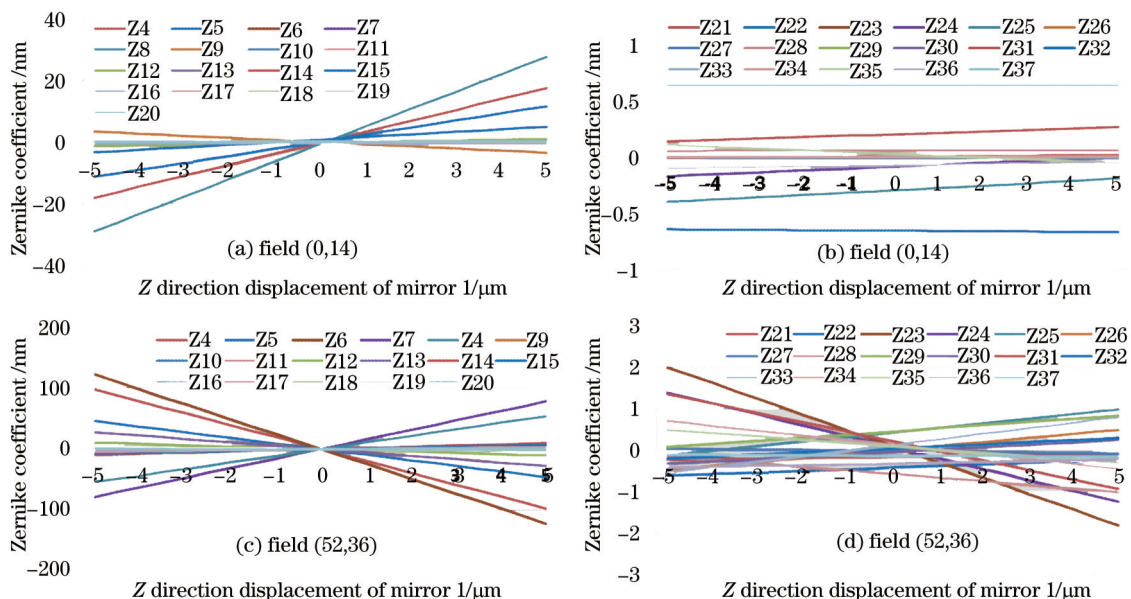


图 5 波前泽尼克系数随反射镜 1 移动量的变化

Fig.5 Variation of wavefront Zernike coefficient with mirror 1 displacement

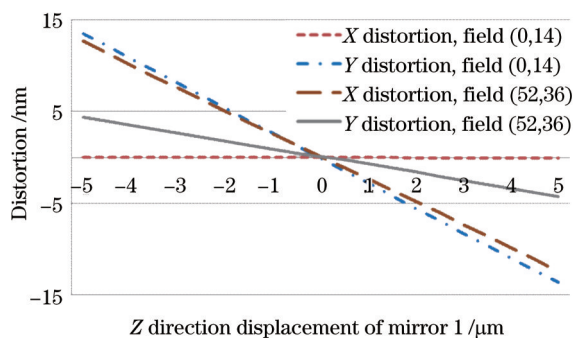


图 6 畸变随反射镜 1 移动量的变化

Fig.6 Variation of distortion with mirror 1 displacement

从图 5、6 中的曲线能够看出,泽尼克多项式系数和畸变值的变化随元件位置的移动有极好的线性度。经考察,在所有视场上,泽尼克多项式系数和畸变随元件的小范围( $\pm 5 \mu\text{m}$ )移动都有类似的线性变化规律。据此,可以建立元件位移补偿法的线性数学模型。

### 3.2 元件分区式加热法

元件分区式加热法利用光学材料折射率随温度变化的特点,采用电薄膜加热器在透镜元件周围加热,产生可控的光程差变化,以补偿热像差,如图 7 所示。文献[12]提出了分区式加热透镜元件以补偿投影光刻物镜热像差的方案,并在一块平板上对分区式加热法的精度、线性、叠加性及补偿能力进行了测试,结果表明该方法是可行、有效的。

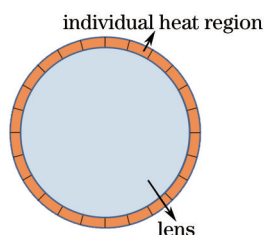


图 7 分区式加热法示意图

Fig.7 Schematic diagram of district heating method



由于是在透镜周围分区加热,所以可以使透镜较高精度地产生形如象散、三叶像差、四叶像差等的OPD变化。透镜整体的OPD可以用泽尼克多项式进行分解。对光阑附近元件23的OPD中的Z5、Z10、Z17、Z26项分别增加 $0.1\lambda$ ,物镜中间、边缘视场的波前及各视场畸变的变化量如图8所示。

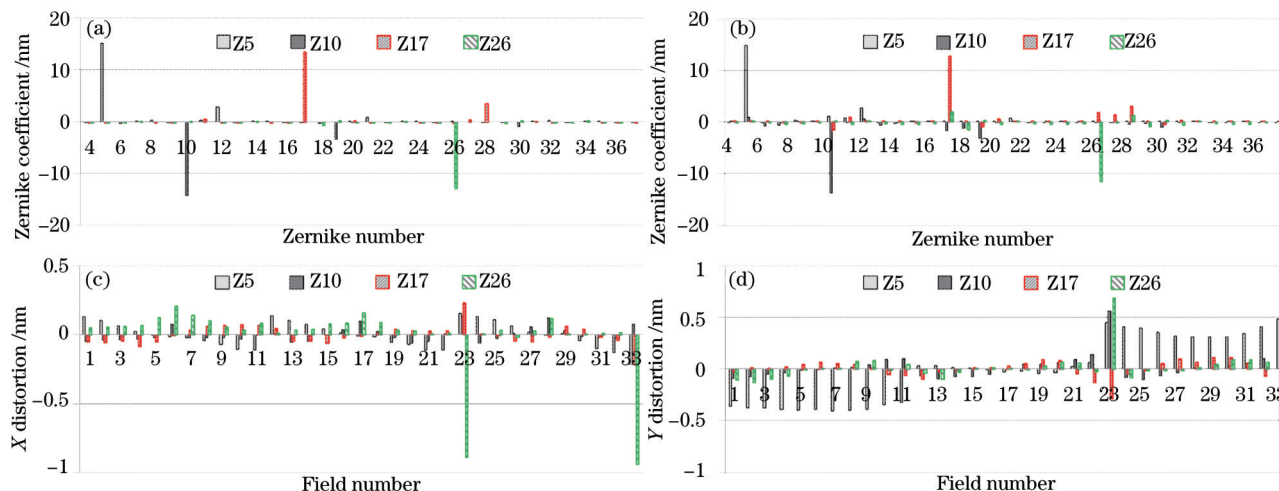


图8 元件23 OPD变化对像质的改变量。(a) 中间视场波前泽尼克系数;(b) 边缘视场的波前泽尼克系数;(c) X向畸变;(d) Y向畸变  
Fig.8 Imaging quality variation with OPD of 23th element. (a) Wavefront Zernike coefficient of middle field;  
(b) wavefront Zernike coefficient of marginal field; (c) X distortion; (d) Y distortion

由图8可知,元件23 OPD的变化不仅对低阶像差有调节作用,对高阶像差如Z19、Z26、Z28等也有调节作用,调节幅度可达几纳米至十几纳米。同时,对各视场畸变的调节能力较弱,调节幅度不到1 nm。因此,可用元件分区加热法补偿热像差的低阶成分和高阶成分。以元件23的OPD中的Z5、Z10、Z17、Z26项为例,分别将其系数从 $-5\lambda$ 至 $5\lambda$ 进行等间隔变化,间隔为 $0.55\lambda$ ,相应的边缘视场(52, 36)的波前泽尼克系数的变化如图9所示。

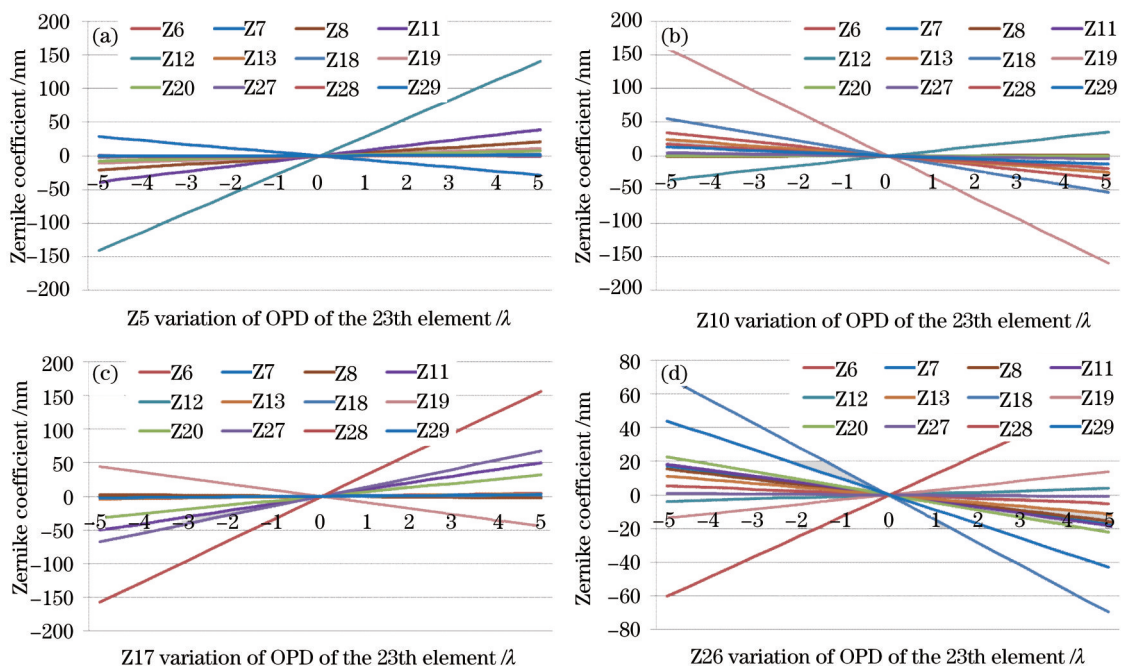


图9 波前泽尼克系数随元件23 OPD的变化。(a) Z5;(b) Z10;(c) Z17;(d) Z26

Fig.9 Variation of wavefront Zernike coefficient with OPD of the 23th element. (a) Z5; (b) Z10; (c) Z17; (d) Z26

由图9可知,元件OPD中的泽尼克项系数的变化对波前泽尼克系数的调节能力是线性的。经考察,其他视场也有类似的线性规律。据此,可以建立元件分区加热法的线性数学模型。

### 3.3 热像差补偿数学模型的建立

从上述分析可得,利用元件位移法能有效补偿低阶像差与畸变,利用元件分区加热法能有效补偿低阶像差和高阶像差,且两种方法的补偿效果与元件的调节量在一定范围内是线性关系。由此,建立了热像差补偿的数学模型:  $\mathbf{AX} = \mathbf{\Delta F}$ , 其中,  $\mathbf{A}$  为所有补偿器的敏感度矩阵,  $\mathbf{\Delta F}$  为补偿目标,即像质的设计值减去热像差扰动后的像质,  $\mathbf{X}$  为各补偿器的调整量,具体表示为

$$\begin{bmatrix} d_{1,1,4} & \cdots & d_{i,1,4} & h_{1,1,5,4} & \cdots & h_{1,1,j,4} & \cdots & h_{i,1,5,4} & \cdots & h_{i,1,j,4} \\ d_{1,1,5} & \cdots & d_{i,1,5} & h_{1,1,5,5} & \cdots & h_{1,1,j,5} & \cdots & h_{i,1,5,5} & \cdots & h_{i,1,j,5} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{1,1,37} & \cdots & d_{i,1,37} & h_{1,1,5,37} & \cdots & h_{1,1,j,37} & \cdots & h_{i,1,5,37} & \cdots & h_{i,1,j,37} \\ d_{1,1,x} & \cdots & d_{i,1,x} & h_{1,1,5,x} & \cdots & h_{1,1,j,x} & \cdots & h_{i,1,5,x} & \cdots & h_{i,1,j,x} \\ d_{1,1,y} & \cdots & d_{i,1,y} & h_{1,1,5,y} & \cdots & h_{1,1,j,y} & \cdots & h_{i,1,5,y} & \cdots & h_{i,1,j,y} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{1,n,4} & \cdots & d_{i,n,4} & h_{1,n,5,4} & \cdots & h_{1,n,j,4} & \cdots & h_{i,n,5,4} & \cdots & h_{i,n,j,4} \\ d_{1,n,5} & \cdots & d_{i,n,5} & h_{1,n,5,5} & \cdots & h_{1,n,j,5} & \cdots & h_{i,n,5,5} & \cdots & h_{i,n,j,5} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{1,n,37} & \cdots & d_{i,n,37} & h_{1,n,5,37} & \cdots & h_{1,n,j,37} & \cdots & h_{i,n,5,37} & \cdots & h_{i,n,j,37} \\ d_{1,n,x} & \cdots & d_{i,n,x} & h_{1,n,5,x} & \cdots & h_{1,n,j,x} & \cdots & h_{i,n,5,x} & \cdots & h_{i,n,j,x} \\ d_{1,n,y} & \cdots & d_{i,n,y} & h_{1,n,5,y} & \cdots & h_{1,n,j,y} & \cdots & h_{i,n,5,y} & \cdots & h_{i,n,j,y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_i \\ \Delta h_{1,5} \\ \vdots \\ \Delta h_{1,j} \\ \vdots \\ \Delta h_{i,5} \\ \vdots \\ \Delta h_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta Z_{1,4} \\ \delta Z_{1,5} \\ \vdots \\ \delta Z_{1,37} \\ \delta D_{1,x} \\ \delta D_{1,y} \\ \vdots \\ \delta Z_{n,4} \\ \delta Z_{n,5} \\ \vdots \\ \delta Z_{n,37} \\ \delta D_{n,x} \\ \delta D_{n,y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $d_{i,n,k}$  为第  $i$  个元件位移补偿器移动单位量对第  $n$  个视场的第  $k$  项泽尼克多项式系数的改变量,  $d_{i,n,x}(d_{i,n,y})$  为相应的  $x$  向( $y$  向)畸变改变量,  $h_{i,n,j,k}$  为第  $i$  个元件分区加热补偿器的 OPD 中  $Z_j$  项系数改变单位量对第  $n$  个视场的第  $k$  项泽尼克多项式系数的改变量,  $h_{i,n,j,x}(h_{i,n,j,y})$  为相应的  $x$  向( $y$  向)畸变改变量。  $\Delta d_i$  为第  $i$  个位移补偿器的调整量,  $\Delta h_{i,j}$  为第  $i$  个分区加热补偿器 OPD 中  $Z_j$  项系数的调整量。  $\delta Z_{n,k}$  为第  $n$  个视场的第  $k$  项泽尼克多项式系数的补偿目标,  $\delta D_{n,x}(\delta D_{n,y})$  为相应的  $x$  向( $y$  向)畸变的补偿目标。

用最小二乘法从方程组  $\mathbf{AX} = \mathbf{\Delta F}$  中解出补偿量  $\mathbf{X}$ , 从而指导各补偿器进行相应的调整, 达到补偿热像差的目的。

## 4 补偿结果

综合考虑下,选择物面、像面和两个反射镜沿光轴的  $Z$  向移动,以及物面、像面的倾斜,作为元件位移补偿器,元件 4,6,24 作为分区加热补偿器。以 33 个视场的条纹泽尼克多项式的第 4 至 37 项(包括低阶像差和高阶像差)和畸变的  $X$ 、 $Y$  分量作为校正对象,利用上述线性数学模型,求解各补偿器的调整量。元件位移补偿器的调整量如表 2 所示。

表 2 元件位移补偿器的调整量  
Table 2 Adjustment of position compensators

	Compensator	Adjustment value
Tilt / (")	object plane	-3.92
	image plane	1.04
Displacement in Z direction / μm	object plane	2.15
	image plane	-0.53
	mirror 1	3.44
	mirror 2	3.54

表 2 中的倾斜为  $XY$  平面绕  $X$  轴旋转,逆时针为正方向。

元件 4,6,24 的 OPD 变化量及相应的泽尼克多项式系数如图 10 所示,所修正的皆为泽尼克多项式的非旋转对称项,易于分区加热法实现。

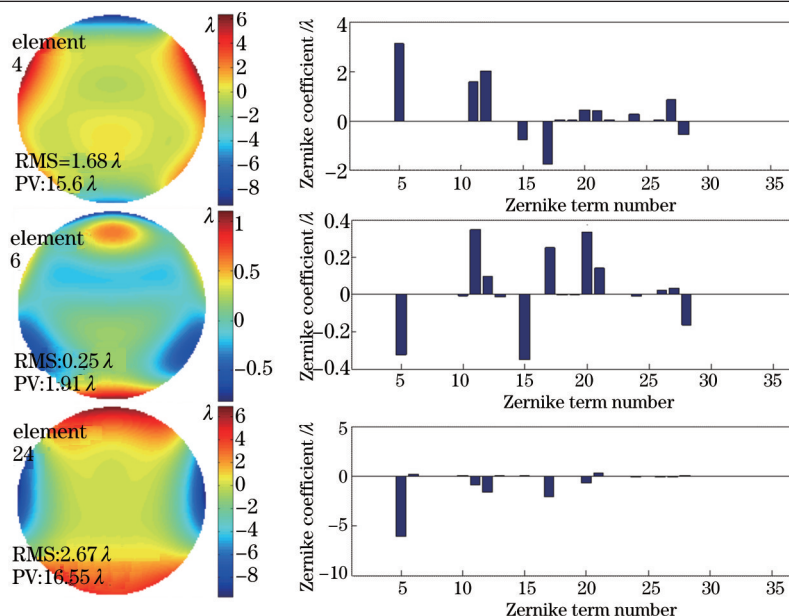


图 10 分区加热补偿器的 OPD 调节量

Fig.10 OPD adjustments of district heating compensators

补偿后,物镜的波前 RMS 与畸变如图 11 所示。各个视场的最大波前 RMS 减小到 1.69 nm(0.00874 λ),畸变减小到 1.31 nm。

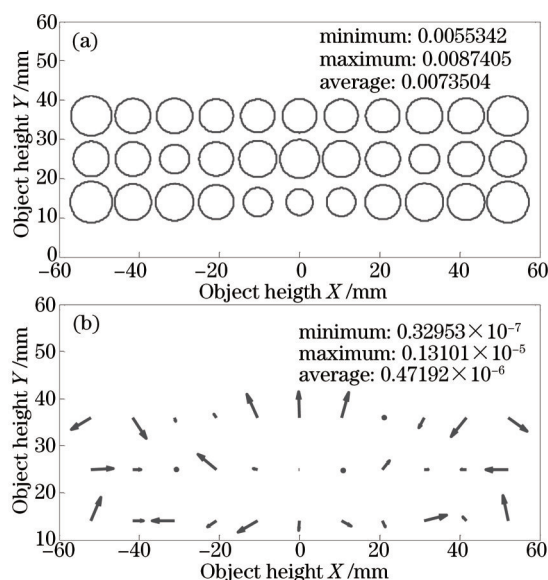


图 11 补偿后物镜像质。(a) 波前 RMS; (b) 畸变

Fig.11 Imaging quality after compensation. (a) Wavefront RMS; (b) distortion

用该方案对传统照明、环形照明和四极照明下的热像差分别进行了补偿,补偿结果如表 3 所示,补偿后物镜波像差和畸变均能恢复至 1 nm 左右。

表 3 各照明模式下热像差补偿结果

Table 3 Compensation results of thermal aberration under different illumination models

Illumination model	Before compensation		After compensation	
	wavefront RMS /nm	distortion /nm	wavefront RMS /nm	distortion /nm
Conventional illumination ( $\sigma=0.66$ )	169.79	10.46	1.03	0.90
Circular illumination ( $\sigma=0.66/0.81$ )	140.29	8.53	1.45	0.81
Quadrupole illumination ( $\sigma=0.82/0.97$ , opening angle: $20^\circ$ )	109.76	6.79	1.44	0.74

## 5 结 论

针对同轴两反式光刻物镜的结构特点,采用元件位移法和分区加热法相结合的补偿方案,补偿偶极照明模式下的热像差,建立了相应的数学模型。选取物面、像面的倾斜,以及物面、像面和两个反射镜的 $Z$ 向移动作为位移补偿器,选取元件4,6,24作为分区加热补偿器,利用最小二乘法求解出各补偿器的调节量。补偿后,物镜的波像差和畸变分别从129.78 nm和12.24 nm,减小至1.69 nm和1.31 nm,接近于设计值0.66 nm和0.71 nm,表明该补偿方案对热像差的补偿是有效的。同时,该方案对传统照明、环形照明和四极照明模式下的热像差也具有较强的补偿能力。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.  
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- 2 Zhao Feifei, Tang Jianyu, Huang Wei, *et al.*. Computer-aided alignment for the lithographic lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622001.  
赵菲菲, 唐剑宇, 黄 玮, 等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622001.
- 3 Yang Tianxing, Huang Wei, Shang Hongbo, *et al.*. Effect of material inhomogeneity on the image quality of optical systems with extremely small aberration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 112202.  
杨添星, 黄 玮, 尚红波, 等. 材料折射率非均匀性对极小像差光学系统像质的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 112202.
- 4 K Mann, A Bayer, U Leinhos, *et al.*. Measurement of wavefront distortions in DUV optics due to lens heating[C]. SPIE, 2011, 7973: 79732B.
- 5 J Zhou, Y P Zhang, P Engblom, *et al.*. Improving aberration control with application specific optimization using computational lithography [C]. SPIE, 2010, 7640: 76400K.
- 6 Y Uehara, T Matsuyama, T Nakashima, *et al.*. Thermal aberration control for low $k_1$  lithography[C]. SPIE, 2007, 6520: 65202V.
- 7 K Fukuhara, A Mimotogi, T Kono, *et al.*. Solutions with precise prediction for thermal aberration error in low- $k_1$  immersion lithography [C]. SPIE, 2013, 8683: 86830U.
- 8 T Nakashima, Y Ohmura, T Ogata, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens[C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
- 9 Y Ohmura, T Ogata, T Hirayama, *et al.*. An aberration control of projection optics for multi-patterning lithography[C]. SPIE, 2011, 7973: 79730W.
- 10 H Sewell, J A McClay, A Guzman, *et al.*. Aberration control for 70- nm optical lithography[C]. SPIE, 2001, 4404: 279-289.
- 11 Zhou Liansheng, Yu Xinfeng, Wu Zhihui, *et al.*. Analysis of influence factors of thermal aberrations based on the small lens system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 092204.  
周连生, 于新峰, 吴志会, 等. 基于小物镜系统的热像差影响因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 092204.
- 12 Chen Hua, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.*. Active compensation of thermal aberrations in lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0811001.  
陈 华, 苏东奇, 隋永新, 等. 光刻机投影物镜热像差主动补偿方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811001.
- 13 B Kneer, P Gräupner, R Garreis, *et al.*. Catadioptric lens design: The breakthrough to hyper-NA optics[C]. SPIE, 2006, 6154: 615420.
- 14 J Dirk. Projection exposure method, projection exposure system and projection objective. United States Patent: US9036129[P]. 2015.

栏目编辑: 苏 岑