

# 用于光刻机物镜像差补偿的透射式变形镜设计

邹有云,布一帆,杜文杰,邓杰,马剑强

(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

**摘要:**针对深紫外光刻机物镜工作一段时间后存在的低阶像差问题,提出了一种大口径、小变形量、高精度的透射式变形镜结构。通过有限元对变形镜的校正性能进行仿真,确定了致动器数目、玻璃厚度、内外环的宽度。仿真结果表明,重构 Z3-Z9 项 Zernike 像差,归一化残余误差小于 0.2%,整体满足 193 nm DUV 光刻机物镜像差的校正。研究了重力场及热吸收对透镜像差的影响,两者均为离焦像差最大但数值较小,可被变形镜校正。

**关键词:**DUV 光刻机物镜;变形镜;像差校正

**中图分类号:**TN384;TN256 **文献标识码:**A

## Design of a Transmissive Deformable Lens for Compensating Optical Aberrations of Lithography Object Lens

ZOU Youyun, BU Yifan, DU Wenjie, DENG Jie, MA Jianqiang

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** A transmission deformable lens structure with large aperture, small deformation, and high precision is proposed to solve the problem of low-order aberration of the objective lens of a deep ultraviolet (DUV) lithography machine following a period of operation. The correction performance of the deformable lens was simulated via finite element analysis, and the number of actuators, thickness of the glass, and width of the inner and outer rings were determined. The simulation results show that the normalized residual error is less than 0.2% when reconstructing the Zernike aberration of Z3-Z9 terms. The overall correction of the object image error of 193 nm DUV lithography machine is satisfied. Moreover, the effects of gravity field and thermal absorption on lens aberrations were studied, and it was found that both have the largest defocus aberration but small values, which can be corrected using deformable lens.

**Key words:** DUV lithography object lens; deformable lens; aberration correction

### 0 引言

光刻机是决定集成电路生产工艺的核心装备<sup>[1]</sup>。目前国际上最先进的光刻机包括 193 nm 光源的深紫外(DUV)光刻机和 13.5 nm 光源的极紫外(EUV)光刻机<sup>[2]</sup>,其中水浸没式深紫外光刻机是 65/55 以下技术节点的主力,通过多次曝光能够实现 7 nm 的工艺制程<sup>[3-4]</sup>。而光刻机投影物镜作为光刻机的核心部分,其热像差会严重降低光刻性能<sup>[5]</sup>。目前校正光刻机物镜像差主要有两种方式,一种是通过改变光学元件位置。Nikon 公司引入“I-MAC”系统,通过压电驱动器与传感器控制物镜产生纳米级精度的上下移动及倾斜运动,消除投影物镜的热

畸变<sup>[6]</sup>,但此方法的装调和集成难度较大。郭抗等<sup>[7]</sup>设计了柔性运动机构,使用行走式压电陶瓷作为驱动器,电容传感器作为测量装置,组成闭环控制系统用于提高系统的位移精度,但此结构未给出运动位移与像差之间的关系,调节精度未达到纳米以下,因此,系统的调节是粗调节,而不是对像差的精确补偿。另一种校正方式是改变光学元件的面形。Nikon 公司设计了快速反射镜(Quick Reflex),在变形镜的非反光面设置多个柱状推动器以控制反射镜的变形,从而实现低阶像差补偿的目的<sup>[8]</sup>。Delft 理工大学的 Saathof 等<sup>[9]</sup>设计了一种热驱动变形镜,通过摄影机投射的图像作用于变形镜的背

收稿日期:2024-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52475109)

作者简介:邹有云(1998-),男,河南省信阳市人,硕士生。通信作者:马剑强,男,副教授,博士。

面使其产生热变形,从而补偿光束像差。然而,将反射式变形镜引入光学系统需要增加折叠光路或中继光路,会导致系统集成难以及成本增加,反射式变形镜更适用于反射式光刻物镜(如 EUV 光刻机)的热像差补偿。Zeiss 公司设计了一种液体变形镜,在厚、薄两块平行放置的透明基板之间填充液体,下表面薄板之间放置一定数量的压电执行器,通过执行器使液体透镜发生变形,补偿光刻物镜的像差,但该结构只能校正边缘翘曲类像差,无法实现复杂像差的校正,在应用上有一定限制<sup>[10-11]</sup>。

与反射式变形镜相比,透射式变形镜无需增加额外的光学元件,集成度高,成本低。本文提出了一种大口径、小变形量、高精度、低成本的两环单压电透射式变形镜,通过有限元对变形镜的重构性能进行仿真,研究了重力及热吸收对变形镜像差的影响,为后续透射式变形镜的制备提供了理论基础。

## 1 结构和工作原理

如图 1(a)所示,变形镜主要由带有两环单压电执行器阵列的薄玻璃层、透明液体介质层和平面厚玻璃层组成,液体通过多个流道与储蓄池相连,薄玻璃层边缘固支于环形玻璃支撑上,中间透光区域为通光口径。如图 1(b)所示,两圈扇形的单压电执行器环均匀分布在通光口径的外侧,执行器驱动薄玻璃在工作口径内产生  $k-1$  倍机械变形( $k$  为透明液体介质的折射率,约为 1.4~1.5)。

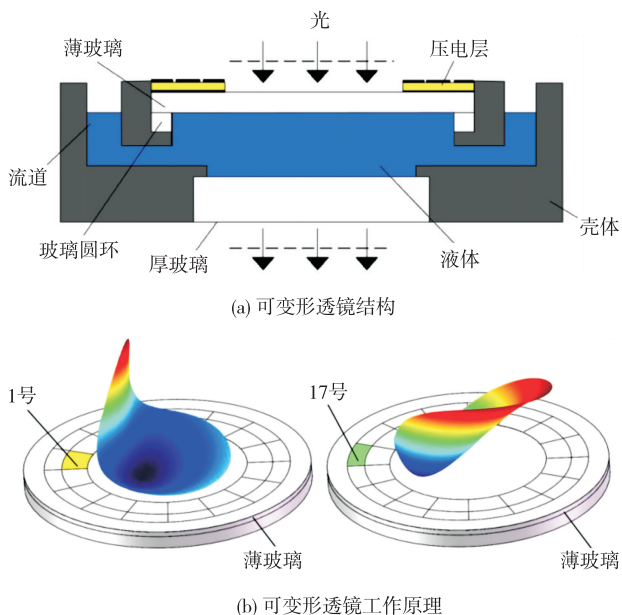


图 1 可变形透镜结构及工作原理图

目前透射式变形镜里填充的无色液体主要有去离子水和液体石蜡。液体石蜡具有色散率低、折射率高(1.47~1.48)的特点,在不同的光谱范围工作良好。液体石蜡与融石英的折射率相近(在 193 nm 时折射率约为 1.56),能够减少折射率不匹配带来的影响<sup>[12]</sup>。当通过光束产生波前像差共轭的波前变形,便可实现像差的校正。

## 2 性能仿真

### 2.1 重构性能仿真

使用 Ansys Workbench 软件进行结构优化分析,压电陶瓷片与融石英玻璃材料的各项物理性能参数如表 1 所示。

表 1 可变形透镜材料参数

| 参数                                   | 融石英玻璃 | 压电陶瓷片 |
|--------------------------------------|-------|-------|
| 杨氏模量/GPa                             | 90    | 68    |
| 泊松比                                  | 0.17  | 0.3   |
| 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )             | 2 200 | 7 500 |
| 压电系数 $d_{31}$ /(pC·N <sup>-1</sup> ) | -     | -400  |

由于粘接层及压电片上、下电极层相对于压电材料的弹性层较小,故在仿真时可以忽略不计。通过对内、外圈典型致动器加载电压,得到各个致动器对有效通光口径的影响函数。为了满足变形镜在光刻物镜像差校正过程中的小变形量、大口径要求,确定上压电环通光口径为  $\varnothing 50$  mm,薄玻璃镜面直径为  $\varnothing 90$  mm,厚玻璃直径为  $\varnothing 60$  mm。致动器数量过少会影响变形镜校正像差的性能,过多则会导致后续变形镜的制备困难。当致动器分成两环,且内、外环致动器数目相等(内、外环,数目各 16 个)时,对内圈致动器施加电压,可使通光口径产生局部凹曲变形;对外圈致动器施加电压,其在有效口径内产生边缘翘曲。两圈致动器共同工作,可实现边缘翘曲类以及复杂曲面像差的校正。圆环边缘固支部分过小会导致结构固支不稳定,影响变形镜校正性能,故选取内径  $\varnothing 75$  mm、外径  $\varnothing 90$  mm 的石英圆环与直径  $\varnothing 90$  mm 薄玻璃镜面进行固支。由于致动器分两圈排列,内圈与外圈的径向宽度不同会影响校正性能,需要量化分析不同的径向宽度对变形镜校正性能的影响。薄玻璃镜面厚度同样

对变形镜校正性能有影响。在实际制备过程中,镜面过薄会增加变形镜的制备难度,PZT与薄玻璃粘接后的初始像差难以控制在小范围内,还会导致重构幅值过大,由于短波长对应小变形量,所以不适合短波长(193 nm)DUV光刻物镜像差的补偿,而镜面过厚则会减弱变形镜的校正性能。

由以上分析可知,变形镜压电环内外圈的径向宽度、致动器数量以及薄玻璃的厚度对变形镜的校正性能均有影响。施加 $-75\sim+75$  V电压可对可变形透镜校正能力进行仿真,对不同情况下变形镜对各项 Zernike 像差的重构能力(Zernike 多项式 RMS 值)以及归一化残余误差(残余像差 RMS 值除以目标像差 RMS 值)进行量化分析,在满足小变形量的条件下,选取各项归一化残余误差较小以及重构幅值较大的参数。对致动器内、外圈不同径向宽度进行仿真,如图 2 所示,随着内圈致动器径向宽度增大,外圈致动器宽度减小;当致动器内、外圈径向宽度分别为 8 mm、4.5 mm 时,重构各项像差面型的 RMS 值较大,归一化残余误差较小。

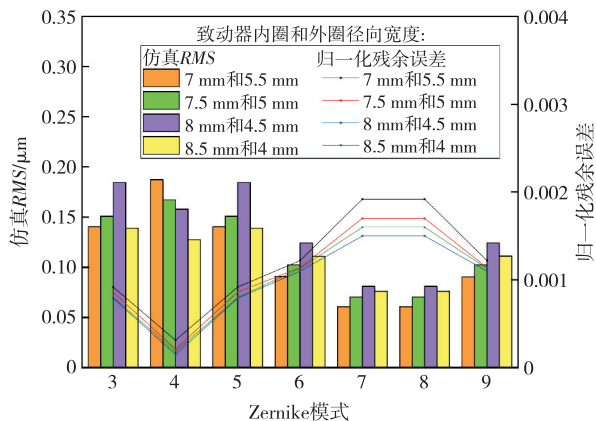


图 2 致动器不同内外圈宽度下的重构幅值及归一化残余误差

对内、外圈致动器数量进行仿真,如图 3 所示,在保证归一化残余误差较小的情况下,尽可能选取使重构 RMS 值较大的致动器数量。由图可知,当电极数量为 32 时(内、外圈致动器数量分别为 16),归一化残余误差较小,且重构 RMS 相对较大。对薄玻璃厚度进行仿真,如图 4 所示,随着玻璃厚度的增加,变形镜的重构能力下降;虽然在镜面厚度为 1.5 mm 时,重构 RMS 最大,归一化残余误差最小,但镜面厚度较薄会导致变形量过大,不适合补偿波长为 193 nm 的光刻物镜像差。在满足小波长对

应小变形量且保证校正精度的情况下,选取镜面厚度为 2 mm,重构 RMS 值适中,归一化残余误差较小。为了减小液体挤压厚玻璃产生变形导致的额外像差,下玻璃镜面厚度不宜过薄,取 5 mm。综上所述,变形镜致动器数量选取 32,薄玻璃厚度为 2 mm、直径 $\varnothing 90$  mm,厚玻璃厚度为 5 mm、直径 $\varnothing 60$  mm,内环径向宽度为 8 mm,外环径向宽度为 4.5 mm。

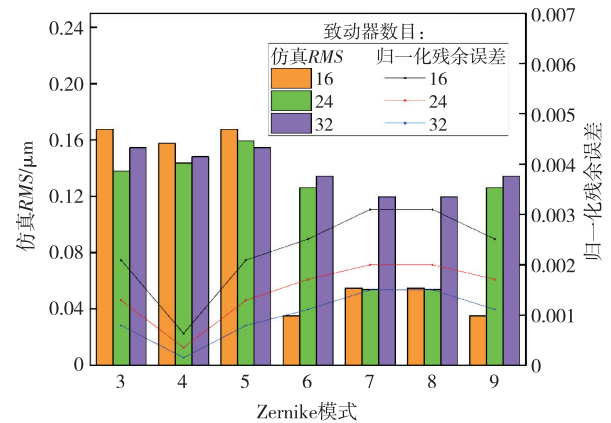


图 3 不同致动器数量下的重构幅值及归一化残余误差

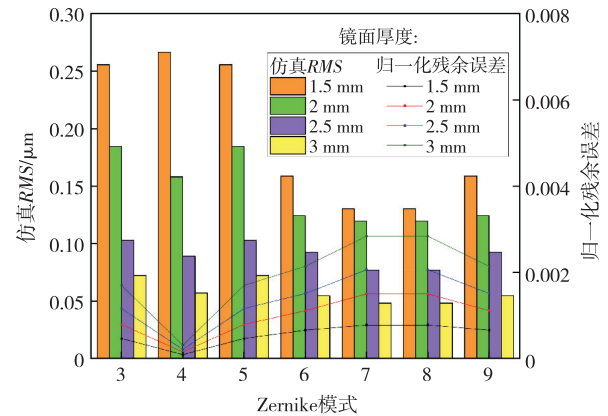


图 4 不同镜面厚度下的重构幅值及归一化残余误差

## 2.2 优化后校正性能分析

由仿真典型致动器得到的影响函数确定 Z3-Z9 项 Zernike 多项式的重构幅值以及归一化残余误差。图 5 为整体重构性能及残余误差。由图可见,重构像散像差(Z3 或 Z5)RMS 值为 184.6 nm,残余误差为 0.146 nm。重构离焦(Z4)RMS 值为 158.1 nm,残余误差为 0.024 nm。重构三叶草像差(Z6 或 Z9)RMS 值为 124.3 nm,残余误差为 0.187 nm。重构慧差(Z7 或 Z8)像差 RMS 值为 119.6 nm,残余误差为 0.246 nm。仿真 Z3-Z9 项归一化残余误差小于

0.2%,表明对3-9项Zernike像差具有较好重构能力,满足光刻机物镜校正低阶像差的要求。

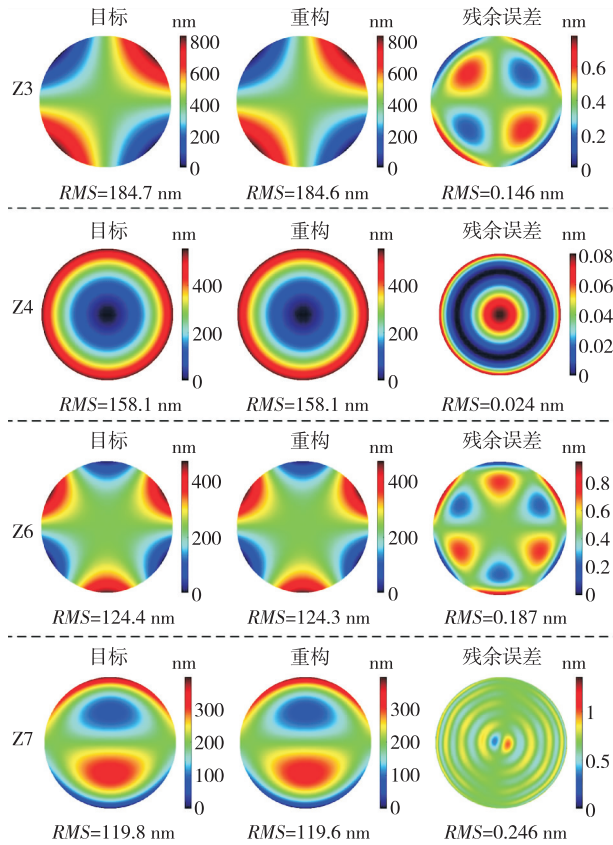


图5 整体重构性能及残余误差

### 3 重力场影响仿真

将可变形透镜横放时,腔内液体及厚玻璃自重使其产生变形,进而产生初始像差。采用 Ansys Workbench 软件进行仿真分析,步骤如下:

- 1) 建模。利用 SolidWorks 软件进行建模,确定流体高度为 9 mm。
- 2) 设置材料参数。参数包括固体材料的密度、杨氏模量及泊松比,流体材料的密度及黏度。
- 3) 选择物理场。变形镜横放时存在重力以及流体对下镜面的压力,所以选择多物理场为固体与流体。
- 4) 网格划分。对流体进行动网格处理,设置网格方法为光顺和网格重构。固体部分网格单元格大小为 2 000  $\mu\text{m}$ 。
- 5) 设置约束及添加重力场。对壳体底部进行固定支撑,对可变形透镜添加标准地球重力。
- 6) 使用瞬态求解器求解,时长为 0.4 s,步长为 0.1 s。

将变形镜横放 0.4 s 后,薄玻璃与厚玻璃通

光口径 50 mm 范围内变形结果如图 6(a)-(b)所示,薄玻璃镜面比下镜面更薄且直径更大,更易发生形变,导致薄玻璃变形比厚玻璃大。薄玻璃  $PV=20.555\text{ nm}$ ,  $RMS=6.446\text{ nm}$ ;厚玻璃  $PV=1.681\text{ nm}$ ,  $RMS=0.488\text{ nm}$ 。取前 35 项 Zernike 系数对变形镜像差分布进行分析,如图 6(c)所示,透镜在重力场影响下离焦像差最大,离焦大小为 5.94 nm,在可变形透镜的校正范围之内。

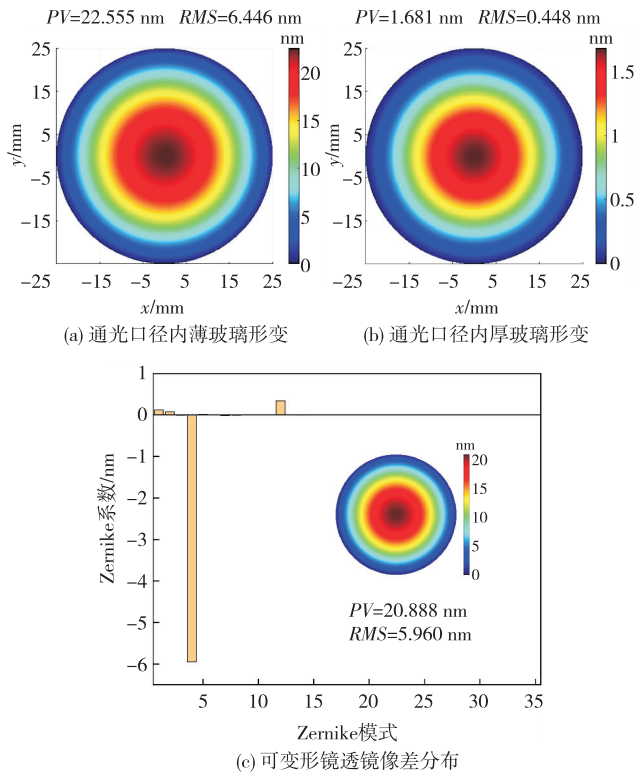


图6 液体重力及玻璃自重对透镜像差的影响

### 4 热仿真

当变形镜在长时间辐照下工作,变形镜上、下镜面会产生形变,从而引起像差。通过 COMSOL 软件对其进行热像差分析,各材料基本物理参数如表 2 所示。

表2 变形镜材料参数

| 参数  | 压电陶瓷片                | 融石英玻璃              | 液体石蜡               |
|---|----------------------|--------------------|--------------------|
| 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$                   | 7 500                | 2 200              | 900                |
| 导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 1.4                  | 1.3                | 0.2                |
| 比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 320                  | 800                | 2 000              |
| 杨氏模量/GPa  | 68                   | 90                 | -                  |
| 泊松比   | 0.3                  | 0.17               | -                  |
| 热膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$                                  | $1.9 \times 10^{-6}$ | $5 \times 10^{-7}$ | $5 \times 10^{-4}$ |

根据光刻机物镜工作环境,设置对流系数为  $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。透镜中的产热源主要有两个:光学薄膜导致的光能损耗和透镜本体材料对照明光的吸收。两者分别以表面热源及节点产热率的方式作用在透镜上。设某节点处的光强为  $I$ ,在曝光波长为  $193 \text{ nm}$  条件下,石英玻璃的吸光系数为  $0.4 \text{ m}^{-1}$ ,则此节点处的产热率可表示为

$$q = I \times [1 - \exp(-\alpha L)] \tag{1}$$

式中  $L$  为单位长度。考虑到  $\alpha$  极小,式(1)可近似表示为

$$q = I\alpha L \tag{2}$$

表面热流密度可表示为

$$Q = I\beta \tag{3}$$

式中  $\beta$  为膜层的光能损耗因子,根据薛春荣等<sup>[13]</sup>的研究成果,其可近似设置为 2%。在实际工作过程中,曝光一个硅片所需的平均时间为  $20 \text{ s}$ ,循环切换平均间隔时间为  $10 \text{ s}$ ,投影物镜属于冷却状态。在传统照明条件下,研究工作  $1\,000$  个工况后变形镜镜面的变形情况,工况如图 7 所示。

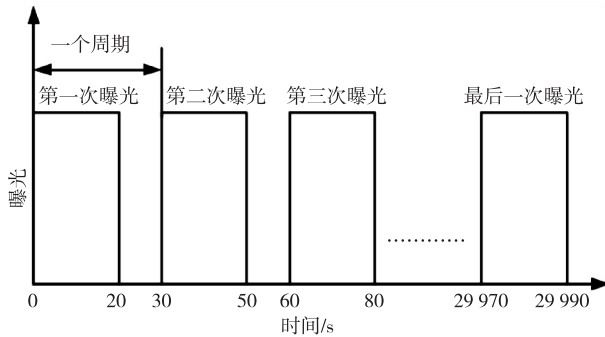


图 7 可变形透镜热加载-时间图

变形镜在工作  $500 \text{ min}$  后温度的整体变化曲线如图 8 所示,选取上、下透镜通光口径区域中心节点,研究透镜温度随时间的变化情况。

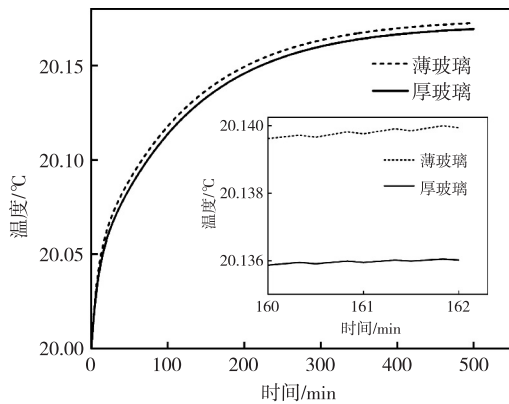


图 8 上、下镜面中心节点温度变化

由图 8 可看出,各面节点温度随时间的增加逐渐震荡增加,最后达到震荡平衡状态。当透镜温度升高到某一值时,透镜在一个热周期内吸收能量等于向外辐射的能量,透射镜温度达到平衡状态。

工作  $500 \text{ min}$  后变形镜整体形变如图 9(a)所示,薄玻璃和厚玻璃分别向外膨胀。在有效通光口径  $50 \text{ mm}$  范围内进行分析,如图 9(b)-(c)所示,薄玻璃变形比厚玻璃大。将薄玻璃与厚玻璃变形后的 Zernike 系数进行叠加,得到如图 9(d)所示变形镜像差分布,取前 35 项 Zernike 系数进行分析,由像差分布可知,像差离焦最大,离焦大小为  $1.13 \text{ nm}$ ,相对较小。通过光刻机物镜系统中波前传感器对变形镜像差进行探测,通过影响函数矩阵法得到重构出波前形貌与所需电压,使用最速下降法对变形镜进行实时闭环控制,由图 5 优化后变形镜的校正性能可知,变形镜可对其进行校正。

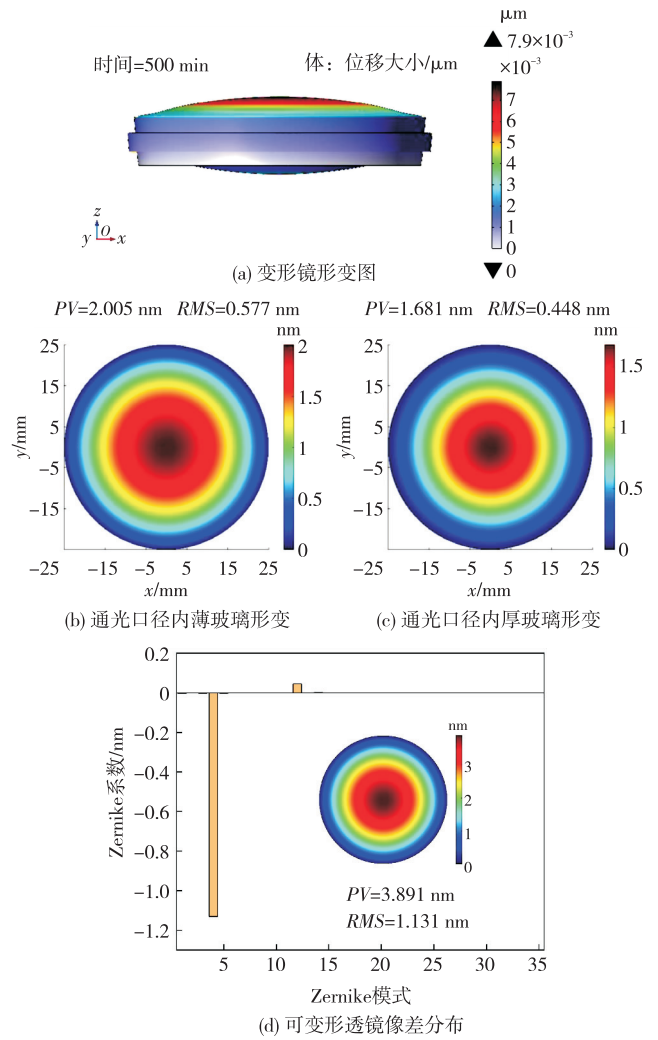


图 9 可变形透镜形变及像差分布

## 5 结束语

针对光刻机物镜存在的热像差,设计了一种大口径、小变形量的透射式变形镜。通过有限元对变形镜主要参数进行优化,优化后重构典型像差像散、离焦、三叶草像差、慧差幅值分别为 184.6 nm、158.1 nm、124.3 nm、119.6 nm, Z3-Z9 归一化残余误差小于 0.2%,满足光刻机物镜像差校正大口径、小变形量、高精度的设计要求。进一步研究了重力场及热对透镜的影响,仿真结果表明,当变形镜横放时,由于玻璃自重及液体对厚玻璃的压力会产生  $RMS = 5.94$  nm 的离焦像差;当变形镜工作 500 min 过后,变形镜受热产生  $RMS = 1.13$  nm 的离焦像差,但两者数值远小于变形镜的校正上限,可被变形镜校正。

### 参考文献:

- [1] LEVINSON H J. Extreme ultraviolet lithography [M]. Bellingham, Washington: SPIE, 2020.
- [2] LEVINSON H J. High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61: SD0803.
- [3] RAO Changhui, ZHONG Libo, GUO Youming, et al. Astronomical adaptive optics: A review[J]. Photonix, 2024, 5: 1-52.
- [4] 王青蓝, 全海洋, 胡松, 等. 光刻物镜波像差绝对检测技术综述[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 220001.
- [5] 骆聪. 深紫外光刻投影物镜热像差仿真研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [6] NAKASHIMA T, OHMURA Y, OGATA T, et al. Thermal aberration control in projection lens[C]//San Jose, California, USA: SPIE Advanced Lithography, Proceedings of SPIE, 2008, 6924(2): 69241V. 1-69241V. 9.
- [7] GUO K, NI M Y, CHEN H N, et al. A monolithic adjusting mechanism for optical element based on modified 6-PSS parallel mechanism[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2016, 251: 1-9.
- [8] OHMURA Y, TSUGE Y, HIRAYAMA T, et al. High-order aberration control during exposure for leading-edge lithography projection optics[C]//San Jose, California, USA: SPIE Advanced Lithography, Proceedings of SPIE, 2016, 9780: 97800Y. 1-97800Y. 8.
- [9] SAATHOF R, SCHUTTEN G J M, SPRONCK J W, et al. Actuation profiles to form Zernike shapes with a thermal active mirror[J]. Optics Letters, 2015, 40(2): 205-208.
- [10] Carl Zeiss SMT GmbH. Projection objective of a microlithographic projection exposure apparatus[P]. United States: US7982969B2, 2010.
- [11] PENG Tairan, CUI Yuguo, MA Jianqiang, et al. A low-cost deformable lens for correction of low-order aberrations[J]. Optics Communications, 2020, 460: 125209.
- [12] 代超宜. 基于压电驱动的可变形透镜设计与制备[D]. 宁波: 宁波大学, 2021.
- [13] 薛春荣, 易葵, 邵建达. 193 nm 氟化物高反膜研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2068-2072.