

支撑应力对光刻透镜透射波前畸变的影响

王平*, 田伟, 王汝冬, 王立朋

(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:为了设计光刻物镜的支撑结构,建立了支撑应力对透镜透射波前影响的模型,研究了该模型中支撑应力与折射率的关系及支撑应力对透镜透射波前畸变的影响。首先,根据晶体理论,建立了融石英透镜波前畸变与支撑应力之间关系的仿真模型。然后,分析了不同支撑结构下支撑应力与融石英透镜波前的关系。最后,分析了支撑应力造成的透射波前畸变的性质,并选择合适的物镜支撑结构。研究结果表明:光刻物镜支撑结构的支撑应力对透镜的透射波前有很大的影响;3点支撑的波前畸变PV值为3.69 nm;随着支撑点数量的增加,支撑应力造成的透射波前畸变逐渐减少;采用大于9点的支撑结构即可满足光刻投影物镜的元件支撑需求。

关键词:光学设计;光刻投影物镜;波前畸变;应力双折射;融石英;元件支撑

中图分类号:TH703; TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130601.0057

Influence of mounting stress on wavefront distortion of lithographic object lens

WANG Ping*, TIAN Wei, WANG Ru-dong, WANG Li-peng

(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: alex.wongp@gmail.com

Abstract: To design the mounting structure of a lithographic object lens, the influence model of mounting stress on the lens wavefront distortion was built. The relation between mounting stress and refractivity and the influence of mounting stress on the wavefront distortion of the lens were studied. First, based on the crystal theory, the relationship of lens mounting stress and wavefront distortion of a fused silica lens was established. Then, the influence of different lens mounting structures on the lens wavefront distortion was analyzed. Finally, the properties of lens mounting wavefront distortion were researched, and the fitted lens mounting structure was selected. Analysis results indicate that the lens mounting stress has a great influence on the lens wavefront distortion. The wavefront distortion of a 3-point mounting structure is 3.69 nm. However, the wavefront distortion induced by mounting stress decreases with the increasing mounting points. The above 9-point mounting

收稿日期:2012-09-13;修订日期:2012-11-15

基金项目:国家科技重大专项(02专项)资助项目(No. 2009ZX02205)

structure is fitted to the lithographic object lens.

Key words: optical design; lithographic object lens; wavefront distortion; stress birefringence; fused silica; lens mounting

1 引言

光刻投影物镜是集成电路(IC)制造业的核心设备,其系统波相差为2~3 nm(RMS),为了保证如此高的精度,必须综合考虑投影物镜的原料和加工、固定、装调过程,系统地对各项误差进行综合评定。其中对光学透镜的要求为:面形精度1~2 nm(RMS)、均匀性2~3 nm/cm(RMS)。影响光学透镜质量的因素包括:材料的均匀性、加工、支撑结构、装调过程、使用条件等,其中支撑结构会导致透镜表面变形和形成内部残余应力,从而影响透镜的面形精度和均匀性,为此,研究透镜支撑结构对光刻透镜的影响很受关注。

Charlene M. Smith^[1]和N. F. Borrelli^[2]研究了融石英材料的应力双折射与激光照射的关系。Yasuyuki Unno^[3]分析了旋转对称分布的应力对光刻投影物镜透射波前的影响,他认为应力造成的应力双折射对投影光刻物镜影响不大,但是其产生的像散会造成透射波前质量的严重降低。Lijuan Su^[4]等人用数值方法分析了压缩塑模玻璃元件的应力变化及其对波前畸变的影响,她认为有限元方法可以用于仿真计算玻璃元件的应力变化。杨光华^[5]、王平^[6]、齐文宗^[7]、冯志庆^[8]应用有限元仿真分析了热变形对光学系统质量的影响。章亚男^[9]研究了大口径透镜的支撑结构设计,并利用有限元方法优化了支撑结构。杜少军^[10]、徐新华^[11]、李熙斌^[12]研究了融石英的应力

对光学性能的影响,同时还研究了应力、应力双折射和透射波前的关系。袁文泉^[13]应用有限元仿真分析了投影物镜中主动液体透镜的像差。王辉^[14]研究了极紫外光刻物镜中元件的支撑技术。

本文应用有限元方法分析了透镜应力对透射波前质量的影响,分析了不同支撑情况下,支撑应力造成的透镜透射波前畸变值,模型建立在透镜和相应的支撑结构基础上,使分析结构更具有针对性,并为整体分析光刻物镜性能奠定了基础。

2 透射波前—应力的表征

各向同性的融石英受到外界机械应力作用时将成为各向异性材料,并产生应力双折射,从而影响透镜的光学性能。光刻物镜的应力分布只能通过融石英毛坯的质量予以保证,但是在后期加工、支撑、装调过程都会影响透镜的内部应力,所以,为了满足光刻透镜的要求,必须对外界作用和透镜应力之间的关系进行研究。

根据波恩的《光学原理》^[15],可以将折射率的变化 Δn 表示为:

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n_0^2\Delta\frac{1}{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中: n_0 为融石英材料无应力时的折射率, ε 为介电常数。

在外部应力作用下,融石英材料发生弹光效应,从而改变折射率。折射率变化 Δn 与透镜的应变 e 的关系^[16]由式(2)给出:

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{xx} \\ \Delta n_{yy} \\ \Delta n_{zz} \\ \Delta n_{yz} \\ \Delta n_{xz} \\ \Delta n_{xy} \end{bmatrix} = -\frac{n_0^3}{2} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{xz} \\ e_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: p_{11}, p_{12}, p_{44} 为应变-光学常数。

成:

对于融石英材料, $p_{44} = 0$,因此,式(2)可以写

$$\begin{bmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{bmatrix} = -\frac{n_0^3}{2} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据材料力学理论,材料的应力 σ 与应变 e 的关系如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -v & -v \\ -v & 1 & -v \\ -v & -v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),获得透镜内部折射率变化与应力之间的关系,如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{bmatrix} = -\frac{n_0^3}{2} \begin{bmatrix} \frac{p_{11} - 2vp_{12}}{E} & \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} & \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} \\ \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} & \frac{p_{11} - 2vp_{12}}{E} & \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} \\ \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} & \frac{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})}{E} & \frac{p_{11} - 2vp_{12}}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = -\frac{n_0^3}{2} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{12} \\ q_{12} & q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{12} & q_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, q_{11}, q_{12} 为应力-光学常数。

假设光线方向与 Z 轴方向平行,则由应力造成的融石英透镜内部应力双折射BR如式(6)所示。在产生应力双折射的同时,内部应力也使透

镜的真实折射率与设计折射率产生了差异,从而影响光线透过透镜后的透射波前质量,可以用式(7)、(8)来衡量透镜折射率变化 $\Delta \bar{n}$ 及其对透射波前质量光程差(OPD)的影响。

$$BR = \Delta n_x - \Delta n_y = -\frac{1}{2}n_0^3(q_{11} - q_{12})(\sigma_x - \sigma_y), \quad (6)$$

$$\Delta \bar{n} = (\Delta n_x + \Delta n_y)/2 = -\frac{1}{2}n_0^3[(q_{11} + q_{12})(\sigma_x + \sigma_y)/2 + q_{12}\sigma_z], \quad (7)$$

$$OPD = \int_{OP} \Delta \bar{n} dz = -\frac{1}{2}n_0^3 \int_{OP} \{(q_{11} + q_{12})[\sigma_x(z) + \sigma_y(z)]/2 + q_{12}\sigma_z(z)\} dz, \quad (8)$$

式中,OP表示光线在透镜中的路径。

3 支撑结构造成的透镜波前变化

光刻透镜内部的残余应力主要来源于材料的残余应力、加工过程的残余应力、支撑结构造成的残余应力、热应力等。支撑造成的残余应力主要是镜框结构在定位、固定透镜时,在重力和夹持力

的作用下产生的应力,这部分应力不可避免,故有必要分析支撑形式及其对透镜透射波前的影响。

支撑结构造成的内部应力可以通过有限元软件计算获得。有限元方法将透镜分割成若干个节点,然后根据施加的作用力和边界条件,计算获得每个节点的位置坐标 $p_j(x, y)$ 和应力 $\sigma_j(x, y)$,如图1所示。建立坐标系,其 Z 轴垂直于透镜表面,假设标准平面波 $W_0(x, y)$ 垂直于透镜入射,在

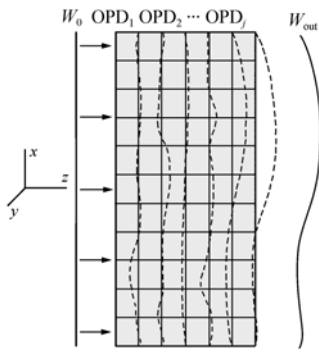


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element analysis model

迎向入射波的第一排单元上,其应力的变化表示为 $\Delta n_1(x,y)$ 。由于应力的变化 $\Delta n_1(x,y)$ 不同,导致光通过第一排单元后的光程不一致,从而形成光程差 $OPD_1(x,y)$ 。光线继续传播时,其通过各排单元后产生的光程差为 $OPD_2(x,y), OPD_3(x,y) \cdots OPD_j(x,y)$ 。

系统出射的光波 $W_{out}(x,y)$ 表示为:

$$W_{out}(x,y) = W_0(x,y) + \sum_{j=1}^N OPD_j(x,y) . \quad (9)$$

而平面波通过透镜的光程差 OPD 为:

$$OPD(x,y) = W_{out}(x,y) - W_0(x,y) = \sum_{j=1}^N OPD_j(x,y) = \sum_{j=1}^N \Delta \bar{n}_j(x,y) \cdot \Delta z_j(x,y) . \quad (10)$$

通过上述的理论模型,获得了透镜的波前畸变与支撑应力之间的关系。这一部分是通过仿真分析来量化各种支撑结构造成的透镜波前畸变的。

光刻物镜中对透镜支撑结构的要求近为苛刻,一种普遍采用的支撑方式是运动学支撑方式,即利用 3 个支撑点提供 6 个自由度的约束来确保透镜元件的面形精度不受过约束的影响。3 点支撑方式能够保证支撑结构的重复性。由结构支撑造成的透镜变形、应力状况可以通过有限元软件进行计算,建立有限元模型。平面镜材料为 Cor-

ning 公司的 7980,口径为 $\Phi 300$ mm,边界条件为多点支撑,作用力为重力和夹持力,方向垂直于平面,支撑点和夹持力分布在口径 290 mm 处,夹持力的和为 2 倍重力。图 2 所示为 3 点支撑下的透

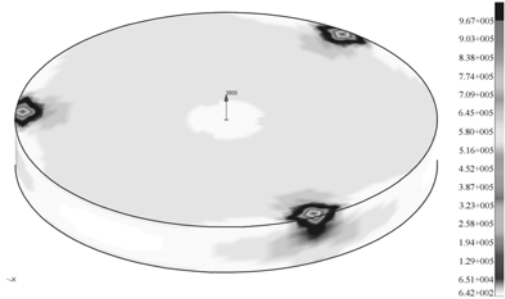


图 2 3 点支撑下透镜应力云图

Fig. 2 Stress figure of 3-point mounting lens

镜应力云图。从图中可以看出,在支撑点处存在 0.967 MPa 的应力,而在透镜的通光口径内的应力则为 kPa 水平,并且较为均匀。支撑应力远小于透镜材料的强度极限,并不能造成元件的破坏。

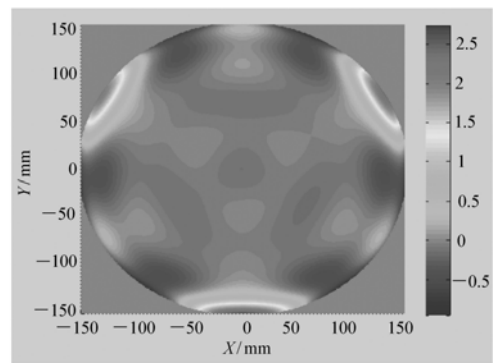


图 3 3 点支撑应力造成的波前畸变

Fig. 3 Wavefront distortion caused by 3-point mounting stress

对前述 3 点支撑情况的应力对透镜波前畸变的影响进行分析,得到的波前畸变云图如图 3 所示。从图中可以看出,波前畸变较大的部位为支撑点处,逐渐离开支撑点,波前畸变逐渐变小,但是仍然存在,其 PV 值为 3.689 nm。对于普通应用,这种影响可以忽略,但是对于光刻投影物镜,这种影响是非常严重的,必须予以克服。

增加支撑点数量可以克服 3 点运动学支撑造成的波前畸变,如图 4 所示,图中分别对比了 6

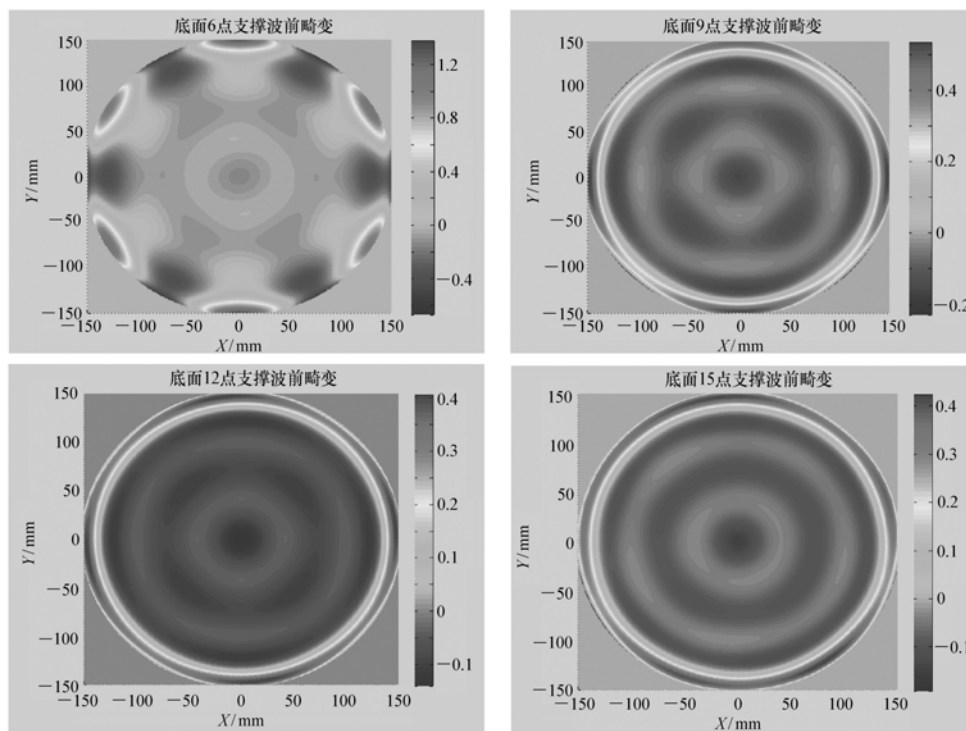


图 4 多点支撑应力造成的波前畸变

Fig. 4 Wavefront distortion caused by multi-point mounting stress

点、9 点、12 点、15 点支撑下的支撑应力造成的透射波前。从图中可以看出,随着支撑点数量的增加,由应力造成的透镜透射波前的 PV 值逐渐减小,并且逐渐均匀,减少了非对称波前误差项。

不同支撑情况下,透镜波前畸变的情况如表 1、图 5 所示,随着支撑点数的增加,波前畸变的 PV、RMS 逐渐减小,但是从图 5 中可以看出,支撑点数量达到 12 点以后,增加支撑点数量对改善透镜波前畸变的影响变得较为微弱,即在达到一定支撑点数量以后,增加支撑点数量对于改善透镜波前畸变的影响变得不敏感。因此,该透镜的支撑点数量应在 9 点以上。

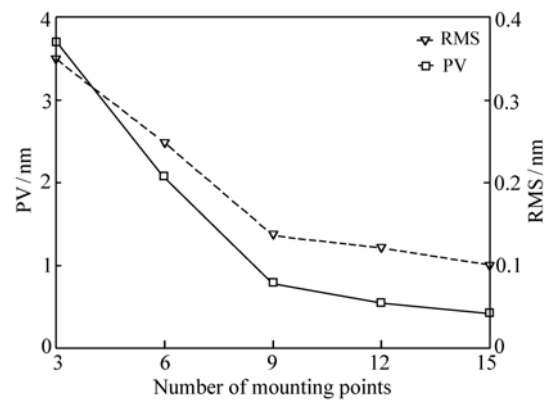


图 5 波前畸变与支撑形式的关系曲线

Fig. 5 Curves of wavefront distortion and mounting cases

表 1 支撑形式导致的波前畸变

Table 1 Wavefront distortion caused by mounting stress

	3 点支撑	6 点支撑	9 点支撑	12 点支撑	15 点支撑
PV/nm	3.689 1	2.042	0.760 9	0.545 6	0.414 5
RMS/nm	0.349 9	0.248 6	0.135 9	0.120 5	0.100 0

图6为不同支撑情况下,透镜波前畸变的Zernike多项式系数。从图中可以看出,3点支撑时,波前畸变含有很大的三叶像差(10项、19项、30项)。而随着支撑点数量的增加,波前畸变逐渐变成球差(4项、9项、16项),并且,非旋转对称

项误差逐渐减少,而非旋转对称项误差的减少对于光刻物镜的装调过程是非常有益的。与此同时,增加支撑点数量会产生高阶误差,这种误差通过装调过程不能予以消除,将最终影响光刻物镜的系统波前。

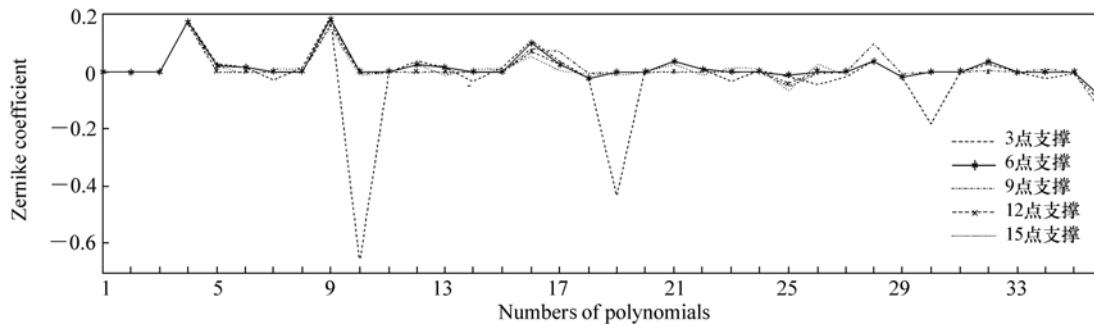


图6 支撑透镜透射波前的Zernike系数曲线

Fig. 6 Curves of Zernike coefficients of lens wavefront distortion

4 结 论

由支撑力造成的光刻透镜内部应力改变了材料的均匀性,使融石英产生应力双折射,并且会造成透射波前的改变,采用不同的支撑方式所造成的透射波前畸变是不同的。因此,在光机结构设计时,必须根据光学设计的要求,考虑结构造成的光学元件的质量变化所导致的系统性能的改变,并将其归为系统误差,从而降低产品制造的风险性。

采用底面支撑时,产生的应力对光学元件的

影响较为严重,支撑应力造成的光学元件的波前畸变带有支撑的形状特征,含有非旋转对称形状,从光学系统优化的角度来讲,这种非对称形状误差所产生的影响更为恶劣。为了降低支撑对光学元件的影响,应该尽量增加支撑点的数量,降低由于应力所产生的波前畸变的影响,并且支撑点应该尽量远离光学表面的工作区域。但是在增加支撑点的同时,会引入高阶非旋转对称误差,这种误差难以通过系统装调予以改善。因此,在选择合理的光学元件夹持结构时,应该充分考虑光学设计对各种误差的分配,选择合理、可行的结构形式。

参考文献:

- [1] NICHOLAS F B, CHARLENE S, DOUGLAS C A, *et al.*. Densification of fused silica under 193-nm excitation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, 14(7): 1606-1615.
- [2] CHARLENE M S, NICHOLAS F B. Behavior of 157 nm excimer-laser-induced refractive index changes in silica[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, 23(9): 1815-1821.
- [3] YASUYUKI U. Distorted wave front produced by a high-resolution projection optical system having rotationally symmetric birefringence[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(31): 7241-7247.
- [4] LIJUAN S, YANG C, ALLEN Y Y, *et al.*. Refractive index variation in compression molding of precision glass optical components[J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(10): 1662-1667.
- [5] 杨光华, 李艳秋. 22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322005.
YANG G H, LI Y Q. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322005. (in Chinese)
- [6] 王平, 王汝冬, 田伟, 等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2100-2107.
WANG P, WANG R D, TIAN W, *et al.*. Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2100-2107. (in Chinese)
- [7] 齐文宗, 黄伟, 张彬, 等. DF 强激光反射镜热畸变的检测及热吸收的有限元分析[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 379-383.
 QI W Z, HUANG W, ZHANG B, *et al.*. Thermal distortion measurements and absorption analysis by finite element method of high power DF laser reflectors[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(3): 379-383. (in Chinese)
- [8] 冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1781-1787.
 FENG ZH Q, BAI L, ZHANG Z B, *et al.*. Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1781-1787. (in Chinese)
- [9] 章亚男, 沈丽丽, 沈卫星, 等. 大口径透镜姿态调整机构的支撑分布设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2624-2632.
 ZHANG Y N, SHEN L L, SHEN W X, *et al.*. Design of support distribution for attitude-adjusting mechanism of large lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2624-2632. (in Chinese)
- [10] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 激光窗口热效应和应力双折射的分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 575-581.
 DU SH J, LU Q SH, SHU B H. Analysis on thermal effect and stress-birefringence of laser window[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2004, 16(5): 575-581. (in Chinese)
- [11] 徐新华, 王青, 宋波, 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412002.
 XU X H, WANG Q, SONG B, *et al.*. Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412002. (in Chinese)
- [12] 李熙斌, 王海军, 袁晓东, 等. CO₂ 激光辐照对融石英表面形貌与应力分布的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903002.
 LI X B, WANG H J, YUAN X D, *et al.*. Effects of CO₂ laser irradiation on surface morphology and stress distribution of fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(9): 0903002. (in Chinese)
- [13] 袁文泉, 巩岩. 光刻物镜中主动液体透镜的像差特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222003.
 YUAN W Q, GONG Y. Study on characteristics of Aberrations for an Active liquid lens in lithographic objective lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222003. (in Chinese)
- [14] 王辉. 极紫外光刻系统物镜光学元件的支撑与分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 598-604.
 WANG H. Objective optical mounts and analysis for EUVL[J]. *Chinese J. Optics and Appl. Optics*, 2010, 3(6): 598-604. (in Chinese)
- [15] 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 182-190.
 BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. YANG J S, Transl. Beijing: Science Press, 1978: 182-190. (in Chinese)
- [16] GRENINGER C E, NEEDHAM G A, JR J R. Optical distortions and birefringence in high power laser windows: model and computer code[J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(17): 2797-2803.

作者简介:



王平(1984—),男,辽宁鞍山人,硕士,研究实习员,2006年于大连理工大学获得学士学位,2009年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事光学仪器结构的研究。E-mail: alex.wongp@gmail.com



王汝冬(1982—),男,江苏徐州人,研究实习员,2006年于北京航空航天大学获得学士学位,2009年于上海航天设计研究所获得硕士学位,主要从事光学仪器结构的研究。E-mail: rudong1415@163.com



田伟(1983—),男,河北秦皇岛人,研究实习员,2006年于中国地质大学获得学士学位,2009年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事光学仪器结构的研究。E-mail: tw_919@163.com



王立朋(1954—),男,吉林长春人,高级工程师,主要从事光学仪器的设计和研制方面的研究。