

# 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究

田 伟 王 平 王汝冬 王立朋 隋永新

(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** 光刻是大规模集成电路制造过程中最为关键的工艺,光刻的分辨力主要取决于光刻投影物镜的光学性能。光刻投影物镜光学元件面形精度为纳米量级,其对光学元件的加工及物镜单镜支撑提出了极高的要求。为 193 nm 光刻投影物镜高精度的单镜面形,设计了一种运动学单镜支撑结构。运用有限元法(FEM)分析光刻投影物镜单镜运动学支撑结构在重力下物镜镜片的面形变化量,经分析物镜镜片的峰值(PV)值为 15.46 nm,均方根(RMS)误差为 3.62 nm。为了验证有限元计算精度,建立了可去除参考面面形及被测面原始面形的方法。经过分析对比,仿真结果与实验结果面形的 PV 值为 2.356 nm,RMS 误差为 0.357 nm。研究结果表明,所设计的基于运动学 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑结构能够满足 193 nm 光刻投影物镜系统对于物镜机械支撑结构的要求。

**关键词** 应用光学;193 nm 光刻;运动学支撑;光学检测;有限元法

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0816002

## Simulation and Experimental Research of 193 nm Projection Lithography Lens Supporting

Tian Wei Wang Ping Wang Rudong Wang Lipeng Sui Yongxin

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

**Abstract** Lithography is the most important technology when manufacturing of large scale integrated circuit. Since the resolution of a lithographic tool is determined by the performance of the imaging optics. The surface accuracy of lithographic projection objectives is on nanometer scale. It is obvious that the fabrication of such high-quality optics and single lens supporting requires tremendous efforts. In order to design the structure of single lens supporting with high-precision, the surface form of single lens is studied, under gravitational condition. Then, the support structure is analyzed in detail by finite element method (FEM) and a new type of flexible support is presented. Analytical results indicate that the surface figure accuracy of the mirror reach peak valley (PV) of 15.4 nm and root mean square (RMS) of 3.62 nm under the load case of gravity. In order to accept high accuracy for optical surface form analyses by FEM, a new method which could remove the surface form of reference surface and the original surface form of tested surface is built. According to the method, the differences of PV magnitudes and RMS values are only 2.356 nm and 0.357 nm, respectively. The results show that the proposed kinematics mount structures satisfy the mechanical requirements of mounts for 193 nm projection lithographic lens.

**Key words** applied optics; 193 nm projection lithography; kinematics support; optical test; finite element method

**OCIS codes** 080.3620; 240.6700; 200.4560; 120.3620

## 1 引 言

由于不断增加集成电路器件的集成度和器件的工作速度,对制造光刻机的投影光刻投影物镜分辨力要求也不断提高。目前投影光刻投影物镜不仅应

用了大数值孔径和短波长技术,而且还应用了提高光刻分辨力的波前工程技术,使极限光刻分辨力进一步提高<sup>[1]</sup>。光刻投影物镜像差对光刻质量产生极大的影响<sup>[2]</sup>。根据光学设计结果,整个物镜由 20~

收稿日期: 2012-03-23; 收到修改稿日期: 2012-05-15

基金项目: 重大专项(2009ZX02205)资助课题。

作者简介: 田 伟(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学检测及光学仪器结构设计等方面的研究。

E-mail: tw\_919@163.com

30 片镜片组成,系统波前要求小于 10 nm。经过公差分配,要达到设计精度要求,部分镜片面形精度要求达 1~2 nm,其对光学元件的加工及物镜单镜支撑提出了极高的要求<sup>[3]</sup>。目前国内已经开展了 193 nm 光刻投影物镜的研制工作,超高精度的光刻投影物镜单镜支撑技术研究迫在眉睫。本文针对 193 nm 光刻投影物镜中单镜结构支撑进行设计,运用有限元方法(FEM)对物镜单镜支撑结构进行了分析计算,并针对设计的单镜支撑结构进行了对比实验研究。设计出了满足 193 nm 光刻投影物镜要求的单镜支撑结构。

## 2 高精度光刻投影物镜单镜支撑设计

对于光刻投影物镜系统而言,机械支撑结构极为重要,它决定着投影物镜的光学性能。光学系统中大多数是圆形光学元件,高精度高分辨力的 193 nm 光刻投影物镜中全部都是圆形光学镜片,镜片的口径在 120~270 mm 范围之内。实验镜选用口径 150 mm、厚度 25.4 mm 的进口熔石英平行平板。

在对光刻投影物镜单镜支撑进行设计时,支撑方法应尽可能少地引入不可预测的面形变化。单镜支撑结构设计基于精确约束设计理论。精确约束设计又称为运动学设计,其注重以理论最少的点接触来约束构件的运动,使运动副中构件接触点的数目与所需约束点数相等。遵循这一原则设计的结构具有运动确定、重复精度高和元件变形小的优点,在精密仪器及测量领域具有广泛应用<sup>[4,5]</sup>,能够很好地满足物镜系统对于支撑结构的苛刻要求。如图 1 所示,运动学支撑中镜子采用三点支撑,每点限制轴向  $C_R$  和切向  $C_T$  2 个自由度,系统整体约束 6 个自由度,实现了精确约束。运动学支撑具体实现过程中,各向自由度功能依靠各种形式的片体结构和柔性铰链结构来实现,元件定位功能依靠总体串并联结构整体刚度实现<sup>[6~8]</sup>。根据精确约束设计原理设计的物镜单镜支撑结构如图 2 所示。物镜单镜支撑结构采用 3 点支撑结构,用点接触精确约束刚体的自由度,消除了物镜单镜的支撑零件由于加工误差和环境因素对定位精度的影响。3 个支撑点采用 Hook 铰支撑脚结构,可以在较低的加工精度和低成本下达到微米级甚至更高的定位精度。单镜镜片通过低应力胶接接的方式与 Hook 铰支撑脚进行粘接。单镜支撑镜框采用线切割加工细长曲线狭缝构成径向挠性结构以减小物镜工作状态时镜片的热变形。

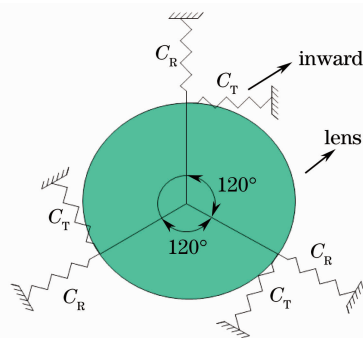


图 1 理想运动学支撑示意图

Fig. 1 Sketch map of ideal kinematics mount

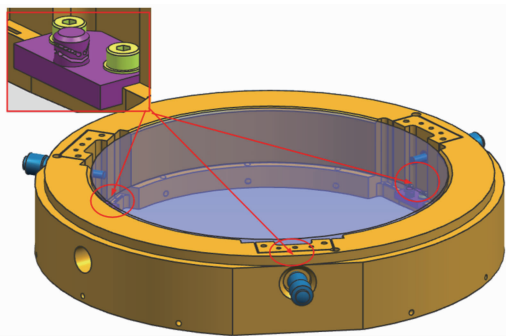


图 2 实际运动学支撑结构图

Fig. 2 Kinematics mount structures used in lithographic lens

## 3 光刻投影物镜单镜支撑结构性能分析

对于 193 nm 光刻投影物镜系统,支撑结构性能和支撑方案实现过程对最终面形精度实现均有直接影响。因此在设计光刻投影物镜单镜支撑时,利用有限元软件 NX Nastran 分析研究了光刻投影物镜单镜支撑结构性能。

### 3.1 有限元模型的建立

图 3 给出了高精度光刻投影物镜单镜支撑结构的有限元模型,有限元建模的各项参数如表 1 所示,

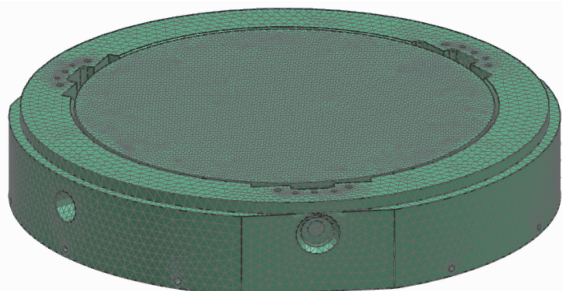


图 3 有限元模型

Fig. 3 FEM model

其中 2A12 是一种铝合金材料。

表 1 镜子、镜框材料参数表

Table 1 Material parameter of the lens and frame

Components	Material	Density / (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio
Lens	SiO <sub>2</sub>	2.201	72.7	0.16
Mount	2A12	2.700	70.6	0.33
Flexibility support	Beraloy	6.200	200.0	0.35

### 3.2 有限计算结果

镜子的变形主要引起光学性能的降低,因此应该采用光学性能的降低程度来作为评价标准。对于高精度、小像差系统通常计算变形引起的波面误差大小,其指标为峰谷(PV)值和均方根(RMS)值<sup>[9]</sup>。对于平面镜面形的描述:轴向变形的大小、PV值和RMS值,即表面各点相对于某一“最佳拟合平面”的轴向偏差的均方根值。

当采用三点挠性运动学支撑时,经有限元分析后,将有限元分析得到的镜面节点信息如图4所示,输入到自编(Matlab)程序中进行面形的计算。面形计算时,假设镜面变形量较小,变形后仍然是球面,采用最小二乘法进行球面拟合,求得镜子面形的Zernike系数,如表2所示。将求得Zernike系数,导入Metropro软件,结果如图5所示,PV值为

15.46 nm,RMS误差为 3.62 nm。

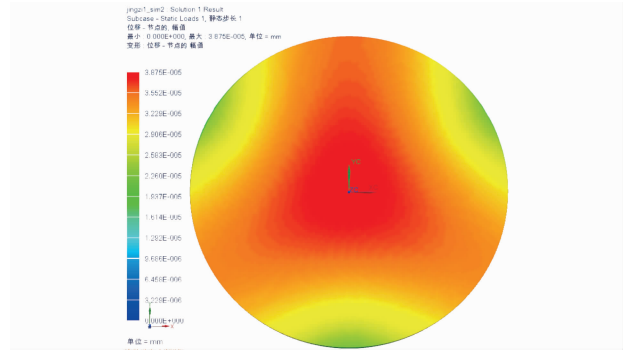


图 4 变形云图

Fig. 4 Deformation graph

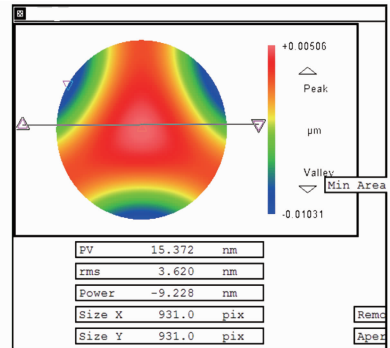


图 5 平面镜支撑状态下的面形

Fig. 5 Surface form of mounted flat

表 2 表面面形的 Zernike 系数

Table 2 Zernike coefficient of surface form

Term	Coefficient	Term	Coefficient	Term	Coefficient	Term	Coefficient
1	1.0733 × 10 <sup>-4</sup>	11	1.0903 × 10 <sup>-2</sup>	21	2.7857 × 10 <sup>-6</sup>	31	-1.0346 × 10 <sup>-4</sup>
2	5.0706 × 10 <sup>-5</sup>	12	2.6839 × 10 <sup>-6</sup>	22	2.1666 × 10 <sup>-6</sup>	32	-1.2218 × 10 <sup>-6</sup>
3	-8.7245 × 10 <sup>-8</sup>	13	1.3466 × 10 <sup>-6</sup>	23	-2.2503 × 10 <sup>-7</sup>	33	-6.8212 × 10 <sup>-7</sup>
4	-7.3005 × 10 <sup>-3</sup>	14	3.2811 × 10 <sup>-7</sup>	24	-1.9610 × 10 <sup>-6</sup>	34	0
5	1.5839 × 10 <sup>-5</sup>	15	-1.9674 × 10 <sup>-6</sup>	25	8.9737 × 10 <sup>-6</sup>	35	0
6	5.6952 × 10 <sup>-5</sup>	16	-5.9696 × 10 <sup>-5</sup>	26	-5.5561 × 10 <sup>-6</sup>	36	3.6973 × 10 <sup>-6</sup>
7	-1.2221 × 10 <sup>-5</sup>	17	2.8098 × 10 <sup>-6</sup>	27	-8.5030 × 10 <sup>-7</sup>	37	0
8	-5.7144 × 10 <sup>-7</sup>	18	-2.9464 × 10 <sup>-7</sup>	28	-2.8836 × 10 <sup>-6</sup>		
9	7.5363 × 10 <sup>-4</sup>	19	4.4736 × 10 <sup>-6</sup>	29	4.0935 × 10 <sup>-7</sup>		
10	3.5211 × 10 <sup>-6</sup>	20	8.9337 × 10 <sup>-4</sup>	30	1.6022 × 10 <sup>-6</sup>		

## 4 高精度单镜支撑实验对比分析

### 4.1 验证实验原理

Zygo 菲索干涉仪测量的目标是被测面与参考面之间的干涉腔的光程差,这部分光程差  $W$  包括待测面面形  $T$ 、参考面面形  $R$  及环境扰动  $E$ <sup>[10]</sup>,可表示为

$$W = R + T + E. \quad (1)$$

实面形用  $T_0$  表示,支撑造成的待测面面形变化用  $T_s$  表示,因此(1)式可改写为

$$W = R + T_0 + T_s + E. \quad (2)$$

初始状态下,三点支撑所造成的面形变化误差  $T_s$  可表示为

$$T_s^0(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_j Z_j(\rho, \theta + \alpha), \quad (3)$$

式中  $\rho, \theta$  为极坐标形式的光瞳坐标。干涉仪测量的

光程差  $W$  表示为

$$W^0(\rho, \theta) = T_o + T_s^0 = \sum_{j=0}^{36} W_j^0 Z_j(\rho, \theta). \quad (4)$$

保持透镜的位置不变,转动三个支撑点一个角度,由于支撑方式未变,其造成的待测面变形量也不发生变化,只是随着支撑点转动了一个角度,此时,三点支撑方式造成的面形变化可表示为

$$T_s^1(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{s_j} Z_j(\rho, \theta + \beta). \quad (5)$$

由于待测面、参考面都未发生移动,因此  $R$ 、 $T_o$  都不变,此时,干涉仪测得的光程差可表示为

$$W^1(\rho, \theta) = T_o + T_s^1 = \sum_{j=0}^{36} W_j^1 Z_j(\rho, \theta). \quad (6)$$

将干涉仪两次的测量结果作差,得到

$$W^1(\rho, \theta) - W^0(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} (W_j^1 - W_j^0) Z_j(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{s_j} [Z_j(\rho, \theta + \beta) - Z_j(\rho, \theta + \alpha)]. \quad (7)$$

通过上述的理论分析,采用两次旋转支撑结构的方法可以去除参考面和被测面的面形,两次测量的残余面形仅仅包含了支撑引起的面形变化量,因此可以通过该残余面形的大小来验证有限元计算物镜单镜支撑面形的精度,测量过程如图 6 所示。

#### 4.2 实验验证

根据验证实验原理,在 Zygo 立式 6 inch(1 inch=2.54 cm)干涉仪上进行测量,如图 7 所示。对实验镜一次装卡位置固定不变,支撑方式采用前面所述的运动学支撑方式。重复测量 10 次,每次 32 次相位

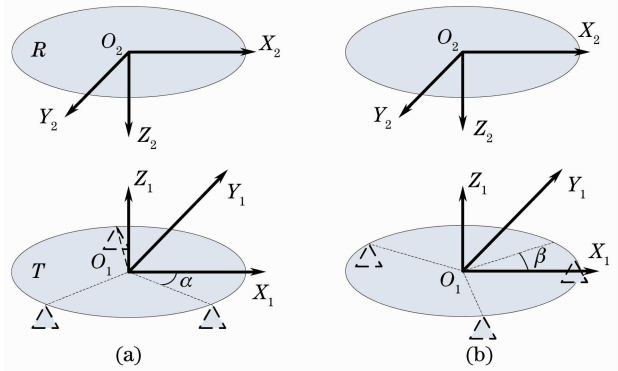


图 6 实验测量过程。(a)初始状态;(b)旋转状态  
Fig. 6 Test process of the experiment. (a) Original condition; (b) rotating condition

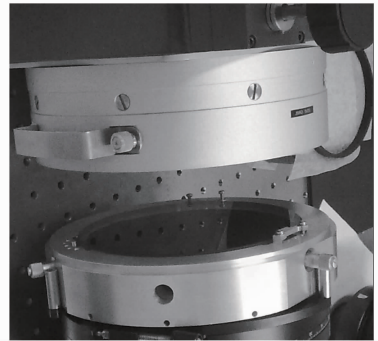


图 7 实验镜测试图

Fig. 7 Experimental lens in measurement

平均,测得结果如图 8(a)所示。第二次测量将单镜支撑结构旋转  $60^\circ$ ,实验镜在测试中通过标记点保持与参考镜的相对位置关系不变,重复测量 10 次,每次 32 次相位平均,测得结果如图 8(b)所示。图 8(c)为两次测量结果的点对点残差值。

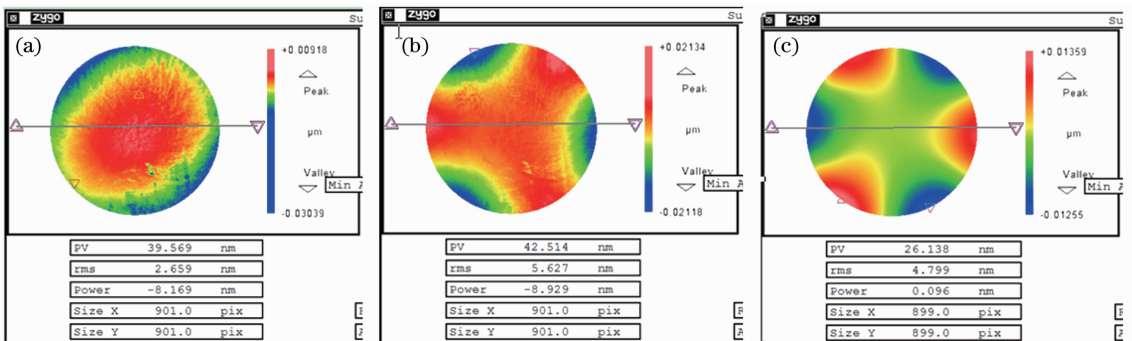


图 8 (a)初始状态测量结果;(b)旋转  $60^\circ$ 后测量结果;(c)旋转  $60^\circ$ 与初始状态差值

Fig. 8 (a) Measuring result on original condition; (b) measuring result on rotating  $60^\circ$  condition; (c) residual result between rotating  $60^\circ$  and original condition

根据验证实验原理分析,将有限元分析结果图 5 镜子面形旋转  $60^\circ$ 得到面形图即为将镜子支撑旋转  $60^\circ$ 后有限元分析结果,将该结果与初始分析面

形点对点求差,所得的残差面形图如图 9 所示。

将实验得到的两次测量的残差面形与有限元分析计算所得两次分析的残差面形,进行旋转对准点对

点求差,如图 10 所示。从图 10 可以得出按照 4.1 节的验证实验原理分析后计算结果与实验结果残余面形的 PV 值为 2.356 nm,RMS 误差为 0.357 nm。

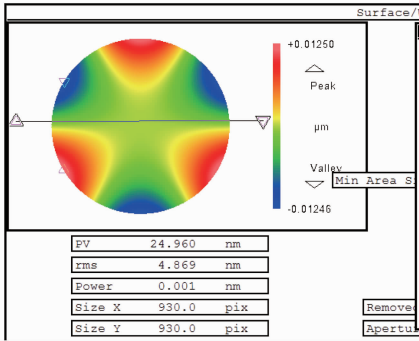


图 9 有限元计算旋转  $60^\circ$  与初始状态差值  
Fig. 9 Residual result between rotating  $60^\circ$  and original condition analyzed by FEM

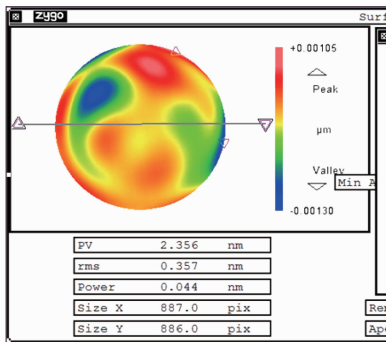


图 10 有限元与实验结果对比  
Fig. 10 Residual result of between FEM and measurement

根据 193 nm 光刻物镜对单镜支撑面形精度达  $1\sim 2$  nm 的要求,在设计物镜单镜支撑时运用有限元分析出的面形精度完全可以满足光刻投影物镜面形精度的要求。在物镜单镜片加工时,将设计的运动学单镜支撑结构的有限元面形分析结果,送给离子束面形精修(IBFFR)加工,预留加工“误差”补偿

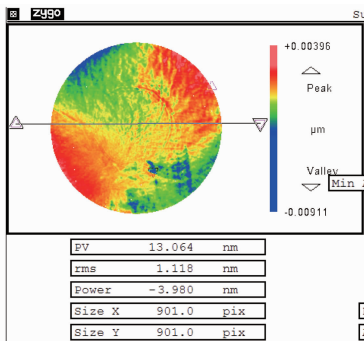


图 11 离子束面形精修加工后检测结果  
Fig. 11 Result of measurement after manufacture by IBFFR

镜片在所设计运动学单镜支撑结构下重力变形<sup>[11]</sup>,经离子束面形精修加工后测得面形如图 11 所示。

## 5 结 论

本文从工程实际出发,设计符合运动学支撑要求的高精度光刻投影物镜单镜支撑结构,建立了光刻投影物镜单镜支撑结构的有限元模型。分析光刻投影物镜单镜运动学支撑结构在重力下物镜镜片的的面形变化量,经分析物镜镜片的 PV 值为 15.46 nm,RMS 值为 3.62 nm。结合菲索干涉仪面形检测的原理,分析设计了合理的验证实验。有限元分析结果与实验测量面形的误差 PV 值为 2.356 nm,RMS 值为 0.357 nm。在物镜单镜片加工时,将设计的运动学单镜支撑结构的有限元面形分析结果,送给加工,预留加工“误差”补偿镜片在所设计运动学单镜支撑结构下重力变形。加工镜片经过面形检测、有限元计算预测及离子束面形精修在所设计的运动学单镜支撑下可以满足 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑面形精度纳米量级的要求。

## 参 考 文 献

- Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222003
- 刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222003
- B. W. Smith, R. Schlief. Understanding lens aberration and influences to lithographic imaging [C]. *SPIE*, 2000, **4000**: 294~306
- Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122003
- 许伟才, 黄 玮, 杨 旺. 投影光刻投影物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122003
- A. H. Slocum. Kinematics couplings: a review of design principles and application[J]. *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 2010, **50**(4): 310~327
- M. L. Culpepper, M. V. Kartik, C. Dibiasio. Design of integrated eccentric mechanisms and exact constraint fixtures for micro-level repeatability and accuracy[J]. *Precis. Engng.*, 2005, **29**(1): 65~80
- Xin Hongwei, Guan Yinjun, Li Jinglin *et al.*. Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1560~1568
- 辛宏伟, 关英俊, 李景林 等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1560~1568
- Wang Zhousu, Zhai Yan, Mei Gui *et al.*. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2573~2581
- 王忠素, 翟 岩, 梅 贵 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2573~2581
- Wang Hui. Objective optical mounts and analysis for EUVL[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(6): 598~604
- 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
- 9 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212002  
 陈 旭, 袁文全, 冯玉涛 等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0212002
- 10 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong *et al.*. Rotating chuck lest for removing chuck error of optical surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812004  
 王 平, 田 伟, 王汝冬 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0812004
- 11 M. Weiser. Ion beam figuring for lithography optics[J]. *Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. B*, 2009, **267** (8-9): 1390~1393

栏目编辑:何卓铭