

# 高精度光学元件支撑装置面形复现性分析与测量

王 辉 周 烽 王丽萍 于 杰 金春水

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了评价高精度光学元件支撑装置的面形复现性指标,进行了分析计算和实验验证。在 ANSYS 有限元分析软件中建立了元件支撑的物理模型,进行了支撑结构的残余应力分析以及元件面形对干扰载荷的灵敏度分析,据此计算得到了支撑结构面形复现性均方根(RMS)误差。分析结果表明,基于目前结构设计和装配精度,元件支撑装置设计的面形复现性 RMS 优于 0.14 nm。基于高重复性干涉检测装置构建了复现性测量平台,测量结果表明支撑装置面形复现性 RMS 优于 0.18 nm。复现性检测实验结果和仿真结果能较好吻合,所得结果满足高复现性元件支撑技术的要求。

**关键词** 光学设计;光刻技术;有限元分析;元件支撑装置;复现性测量

**中图分类号** TH122 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1208001

## Analysis and Metrology of Reproducibility of High-Precision Optic Mount

Wang Hui Zhou Feng Wang Liping Yu Jie Jin Chunshui

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

**Abstract** In order to evaluate the reproducibility of the high-precision optic mount, simulations and tests are undertaken. The model of the optic mount is built in ANSYS, and the residual stress in the mount and the deformation of the mirrors due to disturbance are analyzed, then the reproducibility root mean square (RMS) error of the optic mount is calculated. Calculation results indicate that based on the mount design and assembly accuracy, the reproducibility RMS that the optic mount achieves is better than 0.14 nm. The reproducibility metrology is carried out on the high repeatability interferometer device, and the result indicates that the reproducibility RMS of the optic mount device is better than 0.18 nm, which is in accord with the simulation, and meets the requirement of the reproducibility error budget.

**Key words** optical design; lithography technology; finite element analysis; optic mount; reproducibility measurement

**OCIS codes** 040.7480; 120.4640; 120.4800

## 1 引 言

集成电路制造水平是信息化时代衡量一个国家综合实力的重要指标,光学投影曝光技术是当今大规模集成电路研发中应用最广、技术进步最快、生命力最强的光刻技术。光学光刻技术的延伸是当前国内外的研究热点,如更短波长的深紫外甚至极紫外光源、更大数值孔径光学系统的设计加工以及提高分辨率的波前工程等国际前沿技术<sup>[1-4]</sup>。

随着光学系统成像质量及分辨率的提高,光学元件的面形精度要求越来越苛刻,尤其是在光刻系统中,为了达到衍射极限分辨率的要求,系统波像差设计值要小于 $\lambda/20$ ,这就对元件面形提出了极为严格的要求,目前主流光刻技术要求单个元件面形达到纳米甚至亚纳米量级水平。光学元件面形的超高精度要求对加工和检测技术、光学薄膜技术、波相差测量技术等关键技术提出了严峻的挑战<sup>[5-7]</sup>。目前

**收稿日期**: 2013-07-02; **收到修改稿日期**: 2013-07-30

**基金项目**: 国家科技重大专项资助项目

**作者简介**: 王 辉(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学元件精密支撑结构方面的研究。

E-mail: wangh-19850322@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

实现面形指标的最佳方案是加工、检测、应用或装调阶段都采用同一装卡方式<sup>[8]</sup>,但是在实际工程实现过程中,受空间及工位等因素的影响,支撑与元件在面形加工、检测及镀膜等过程中往往需要分离和重新装配。元件与支撑反复装配过程中,为了实现面形收敛,需要严格控制元件面形的变化量,这就对支撑装置的面形复现性提出了严格的要求,因此元件支撑结构的面形复现性是保证光学元件超高精度面形的重要指标。

高复现性元件支撑技术的研究为与其有相似研究平台的科学领域,如空间光学、X 射线显微镜、等离子体诊断等技术进步提供了支持。因此本文针对超高精度面形元件支撑装置的面形复现性指标进行了理论分析和具体的实验测量工作,建立了光学元件和支撑结构的物理模型,分析了支撑结构的最大残余应力以及元件面形与干扰载荷的关系,计算得

到了支撑结构复现性误差,并结合研制的元件支撑装置进行了面形重复性测量实验。

## 2 高精度光学元件支撑结构

作为高精度光学元件的支撑结构,元件支撑装置需要具有极高的元件面形复现性和元件位置稳定性。对支撑结构而言,面形复现性主要影响因素是装配过程中引入元件的内应力。为了最大限度降低内应力的影响,采用了符合运动学原理的支撑结构<sup>[9]</sup>,光学元件基于三点支撑形式,如图 1 所示每个支撑点处限制切向平动  $r_{fr}$ 、轴向平动  $r_{fz}$  两个自由度,三个支撑点组合实现六自由度精确约束;每个支撑点处具有四个自由度,分别是沿切向转动自由度  $r_{mt}$ 、轴向转动自由度  $r_{mz}$ 、径向转动自由度  $r_{mr}$  以及沿径向平动自由度  $r_{fr}$ ,以吸收元件中的内应力,实现元件的无应力支撑。

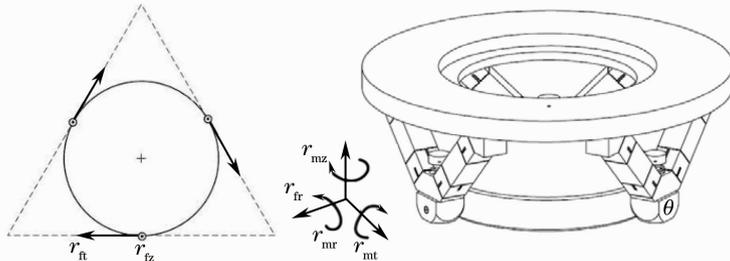


图 1 运动学支撑结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of kinematic mount

实际工程实现过程中,不可能做到在自由方向上完全的应力吸收,只能最大限度地降低内应力等干扰因素的影响,设计接近运动学支撑原理的光学元件支撑结构。如图 1 所示,元件支撑结构中,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。本文针对该元件支撑结构,进行元件面形复现性影响因素的理论分析和实验测量工作。

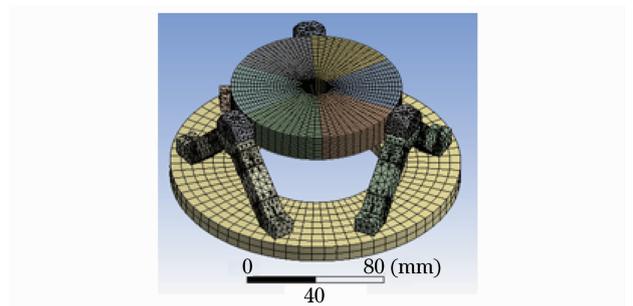


图 2 元件支撑有限元模型

Fig. 2 Finite element analysis model of the optic mount

## 3 支撑结构面形复现性分析

### 3.1 物理模型建立

用于分析仿真的光学元件支撑结构中,元件基底材料选择超低膨胀(ULE)玻璃,支撑结构及凸台材料选择超殷钢,部件和基底间采用粘接方式,粘接层材料选择环氧树脂,厚度 0.1 mm。如图 2 所示,利用有限元分析软件 ANSYS 建立了计算模型,研究元件支撑装置在干扰因素作用下反射镜面形的变化,分析计算支撑装置所能实现的面形复现性,有限元建模的各项物理属性如表 1 所示。

表 1 材料物理属性

Table 1 Material properties

Material	Density /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio
ULE glass	2210	67.6	0.17
Super invar	8150	144	0.23
Epoxy	1220	0.689	0.43

### 3.2 支撑结构残余应力分析

实现支撑装置的极高面形复现性,必须严格控制光学元件精密装配过程,以实现支撑结构本身的无应力状态,这里指的无应力状态并非完全零应力,而是实现支撑结构内应力接近某一恒定值。支撑结构残余应力即指装配后支撑应力偏离该恒定值的程度,控制装配过程即控制残余应力范围,保证支撑结构无应力状态。

面形复现性评价过程中,单次装配过程中产生残余应力的大小和空间方向难以确定,因此在分析中选择单个支撑的四个自由度方向分别引入干扰力(力矩):径向力矩  $M_r$ ,切向力矩  $M_t$ ,轴向力矩  $M_z$  以及径向力  $F_r$ ,从而评价干扰因素与支撑中各向内应力的关系。表 2 给出了运用有限元分析方法得到的单个支撑的各向刚度,结合目前检测和装配条件,则可以计算出各向最大干扰载荷。

表 2 支撑结构残余应力分析

Table 2 Calculation of the residual stress in the mount

Disturbance load	Stiffness	Deformation in mount / $\mu\text{m}$	Max disturbance load
$F_r=2\text{N}$	$0.00285\text{ N}/\mu\text{m}$	701.75439	$0.0057\text{ N}$
$M_r=5\text{ N}\cdot\text{mm}$	$1.7\text{ N}\cdot\text{mm}/\mu\text{m}$	2.9411765	$3.4\text{ N}\cdot\text{mm}$
$M_t=5\text{ N}\cdot\text{mm}$	$0.8\text{ N}\cdot\text{mm}/\mu\text{m}$	6.25	$1.6\text{ N}\cdot\text{mm}$
$M_z=5\text{ N}\cdot\text{mm}$	$0.8\text{ N}\cdot\text{mm}/\mu\text{m}$	6.25	$1.6\text{ N}\cdot\text{mm}$

### 3.3 元件面形复现性灵敏度分析

在干扰因素对面形影响的灵敏度评价过程中,为了便于分析计算,同样选择在元件中与支撑接触处的四个自由度方向上分别引入干扰力(力矩)<sup>[10]</sup>:在径向方向上引入 2N 的干扰力,在径向、切向、轴向方向上分别引入  $5\text{ N}\cdot\text{mm}$  的干扰扭矩。仿真分析采用三点支撑的方式保持镜体处于运动学支撑状态,计算由干扰因素引起的镜体面形变化,其结果如图 3 所示,PV 为峰谷值。

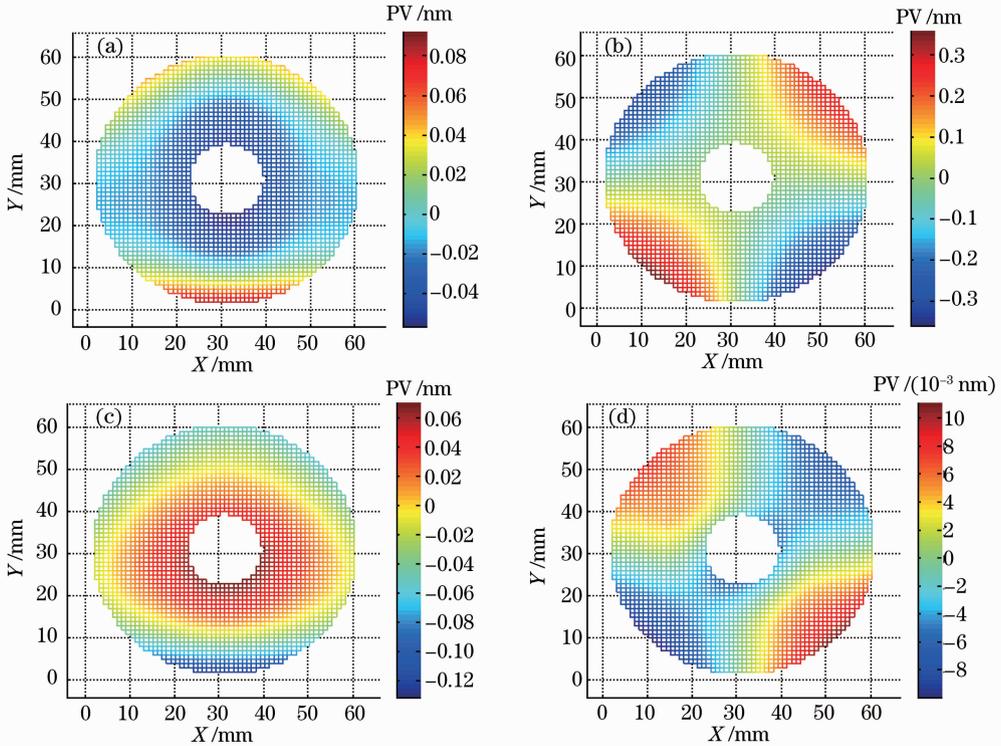


图 3 各向支撑干扰因素引起的元件面形变化。(a) 径向干扰力引起的元件面形变化;

(b) 径向干扰扭矩引起的元件面形变化; (c) 切向干扰扭矩引起的元件面形变化; (d) 轴向干扰扭矩引起的元件面形变化

Fig. 3 Deformation of the mirrors due to disturbance in the mount. (a) Figure change due to  $F_r$  influence; (b) figure change due to  $M_r$  influence; (c) figure change due to  $M_t$  influence; (d) figure change due to  $M_z$  influence

### 3.4 支撑结构实现复现性误差预测

支撑结构面形复现性误差的预测,根据支撑结构残余内应力分析得到装配过程中可能出现的各向最大干扰载荷,根据元件面形复现性灵敏度分析计算各向最大干扰载荷引起的元件面形变化,按照和

的平方根(RSS)方法综合预测所有支撑点对元件面形的影响,作为支撑结构复现性误差的评价指标。

评价结果如表 3 所示,基于目前支撑结构设计和支撑装配检测精度,支撑结构实现的面形复现性误差预测均方根(RMS)值优于  $0.14\text{ nm}$ 。

表 3 支撑结构复现性误差分析

Table 3 Calculation of reproducibility of the optic mount

Max disturbance load	Sensitive RMS / ( $10^{-3}$ nm)	Figure RMS / ( $10^{-4}$ nm)	RSS error / nm
$F_r = 0.0057$ N	11.00	0.627	0.14
$M_r = 3.4$ N · mm	24.02	816.68	
$M_l = 1.6$ N · mm	6.10	97.6	
$M_z = 1.6$ N · mm	0.74	11.84	

## 4 元件支撑结构面形复现性实验

### 4.1 基于高重复性干涉检测装置的支撑复现性实验

元件支撑装置精密装配及复现性评估实验中,光学元件采用面形精度为  $\lambda/20$ (PV 值)的 ULE 材料平面反射镜,光学元件侧面粘接有三块超殷钢凸台,元件支撑结构如图 4 所示;检测装置使用了自行研制的高重复性干涉检测装置,测试过程中温控条件优于  $0.01$  °C,振动条件优于 VC-E 标准,测量 RMS 重复性优于  $0.1$  nm,能够用于支撑复现性评价实验。



图 4 元件支撑装置  
Fig. 4 Optic mount

为了适应元件面形的加工检测迭代过程,制定了如下支撑复现性实验流程:按精密装配流程完成元件和支撑的装配,待测量系统稳定后进行面形检测作为面形基准值。重复进行元件和支撑的装配,待测量系统稳定后进行面形检测作为面形比较值。计算上述得到的元件面形基准值与比较值之差即得到基于现有检测装置和元件支撑结构所能实现的复现性指标。

### 4.2 复现性实验结果及分析

按照上述实验流程及实验条件,目前元件支撑结构所能实现的结果如图 5 所示,因为评价的目标是元件面形,所以结果中空间频率范围选择  $1$  mm 到通光孔径,此时面形复现性测量结果 RMS 值约为  $0.18$  nm。

从复现性测量结果中可明显看出,波面偏差中存在条纹状起伏,其密度为干涉条纹密度的 2 倍,这

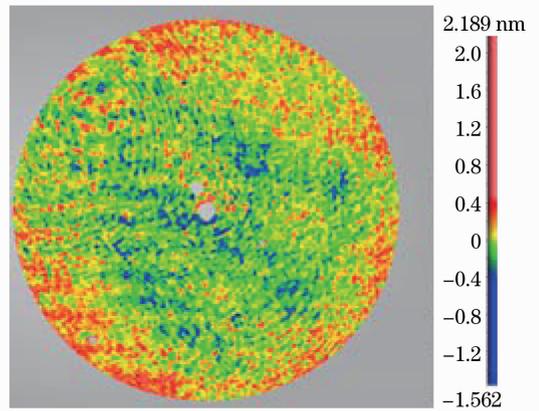


图 5 复现性测量实验结果

Fig. 5 Result of wavefront reproducibility measurement

是振动引起的测量误差。波面偏差中还存在环状条纹,这是由于干涉检测装置成像系统中存在灰点或瑕疵,干涉图中存在相干噪声从而引入的测量误差。这些误差因素的存在使得复现性实际测量结果相对于 RMS 为  $0.14$  nm 的复现性仿真结果而言偏大,因此认为仿真结果和实验结果符合。

## 5 结 论

针对高精度光学元件支撑装置,在 ANSYS 有限元分析软件中建立了对应的物理模型,分析了支撑结构的残余应力和元件面形对干扰元件支撑载荷的灵敏度,据此给出了支撑结构复现性误差预测。预测结果表明,基于目前结构设计和装配精度,该支撑结构实现的面形复现性误差 RMS 值优于  $0.14$  nm。

基于高重复性干涉检测装置构建了复现性测量平台,实现了元件支撑装置 RMS 值为  $0.18$  nm 的检测复现性。复现性检测实验结果和仿真结果能较好吻合,验证了装置设计合理性,所得结果对高复现性元件支撑技术的研究具有指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 T Miura, K Murakami, H Kawai, *et al.*. Nikon EUVL development progress update[C]. SPIE, 2010, 7636: 76361G.
- 2 M Lowisch, P Kuerz, H J Mann, *et al.*. Optics for EUV production[C]. SPIE, 2010, 7636: 763603.
- 3 H Meiling, V Banine, N Harned, *et al.*. Development of ASML EUV alpha demo tool[C]. SPIE, 2005, 5751: 90-101.
- 4 T Miura, K Murakami, K Suzuki, *et al.*. Nikon EUVL development progress summary[C]. SPIE, 2006, 6151: 615105.
- 5 R Hudyma. An overview of optical systems for 30 nm resolution lithography at EUV wavelengths [C]. SPIE, 2002, 4832: 137-148.
- 6 Yang Guanghua, Li Yanqiu. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22nm extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322005.

- 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.
- 7 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112001.
- 王汝冬, 田 伟, 王 平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112001.
- 8 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on  $\phi 1.8$  m lightweight reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322002.
- 钟显云, 范 斌, 曾志革, 等.  $\phi 1.8$  m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322002.
- 9 D A Tichenor, G D Kubiak, W C Replogle, *et al.*. EUV engineering test stand[C]. SPIE, 2000, 3997: 48—69.
- 10 Wang Hui, Yu Jie, Zhou Feng, *et al.*. Development of the mirror mount for the ultra-high reproducibility metrology[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108008.
- 王 辉, 于 杰, 周 烽, 等. 高复现性面形检测支撑装置研制[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108008.

栏目编辑:何卓铭