高复现性面形检测支撑装置研制

王 辉 于 杰 周 烽 王丽萍

(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 为提高面形检测的复现性,研制了一套检测支撑装置,配合高重复性干涉仪实现高复现性的面形检测,对该装置的复现性效果进行了仿真计算和实验验证。利用 ANSYS 软件仿真分析确定了各向干扰力对面形的影响,同时推导确定不同支撑方案所能实现的复现性。仿真分析结果表明,检测支撑方案最高能够实现均方根(RMS)误差优于 30 pm 的面形复现性结果。确定了最终检测支撑装置的结构形式,并在高重复性干涉仪上进行了面形复现性测试,测试结果表明,由检测支撑装置引起的面形复现性指标 RMS 优于 70 pm,满足 RMS 为 0.1 nm 的复现性设计指标要求。

关键词 测量;极紫外光刻;高重复性干涉仪;有限元分析;检测支撑

中图分类号 TH122 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108008

Development of Mirror Mount for Ultra-High Reproducibility Metrology

Wang Hui Yu Jie Zhou Feng Wang Liping

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

Abstract In order to improve the reproducibility in mirror metrology, a mirror mount used in high repeatability interferometer is developed, and simulations and testing are undertaken to evaluate the device. The deformation of the mirror due to disturbance in the mount is analyzed with ANSYS and the reproducibility of different metrology mount is calculated. The calculation results indicate that root mean square (RMS) of the reproducibility that the mount can be achieved is better than 30 pm. The structure of the device is finally confirmed, and reproducibility testing is carried out on high repeatability interferometer, the testing result indicates that RMS of the reproducibility caused by the mount devise is better than 70 pm, which meet the 0.1-nm RMS requirement of the error budget.

Key words measurement; extreme ultraviolet lithography; high repeatability interferometer; finite-element analysis; mirror mount for metrology

OCIS codes 040.7480; 120.4640; 120.4800

1 引 言

随着光刻技术进入 32 nm 技术节点,极紫外光刻(EUVL)技术作为极大规模集成电路光刻工艺主流技术的地位日益显现[1,2]。荷兰 ASML 公司于 2005 年研制出世界首台产业化原型样机 ADT,并于 2010 年研制出产业化平台级系统 NXE3100,日本 Nikon 和 Canon 也紧随其后,相继进入了 EUVL 产业化评估阶段[3~5],由于起步较晚,我国目前还处于关键技术的积累阶段。

极紫外光刻系统对支撑条件下面形要求极端苛刻,重力、环境等因素对面形影响非常严重[6~8],一般采用的解决方案是光学元件带实际支撑进行原位面形检测,为面形加工提供参考数据,加工检测不断迭代收敛直至满足面形要求,以此来消除重力等因素的影响。该过程中被检测元件需要不断与支撑设备分离,所以由接触、摩擦等因素引起的面形不确定

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-13

基金项目: 国家科技重大专项基金资助课题。

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

性则成为影响干涉仪检测重复性的一个重要方面，特别是均方根(RMS)误差到了 0.25 nm 的面形量级，这些因素的影响不可忽略。因此在面形检测过程中，需要特殊设计的检测支撑结构，特别要保证支撑结构具有高重复性[9]。

本文针对于如何提高检测支撑结构复现性进行了具体的研究工作。建立了支撑结构的物理模型，利用 ANSYS 软件仿真分析确定了各向干扰力对面形的影响。分析不同支撑方案所能实现的复现性，确定最终检测支撑结构形式，并在高重复性干涉检测装置上进行了面形复现性测试。

2　高复现性检测支撑结构设计

支撑方法要保证镜体与支撑结构不断安装与分离过程中尽可能少地引入不可预测的面形变化，对于环境变化尤其是温度和振动不能过于敏感，并且光学元件相对于整体坐标系能够实现精确定位。运动学支撑方案能够很好地满足这些要求[10,11]。如图 1 所示，运动学支撑中镜体采用三点支撑，每点限制 2 个自由度分别为镜体轴向平动 F_z 和镜体切向平动 F_t，系统整体约束 6 个自由度，完成精确约束。对于单个支撑点局部来说，理想情况下每点都具有 4 个自由度沿三切向、轴向、径向转动 M_t、M_z、M_r 以及沿轴向平动 F_r，以实现局部无应力要求。理想情况下如图 1 约束方向完全刚性，非约束方向不存在干扰因素，该结构重复性无限高。

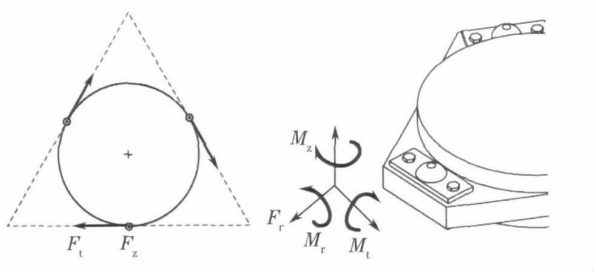

图 1　理想运动学支撑示意图

Fig. 1　Ideal kinematic mount

实际情况下，约束方向不可能完全刚性，非约束方向也存在一定的干扰因素，因此在支撑结构设计中必须提高约束方向的刚度，同时尽可能减小自由方向上干扰因素对面形的影响。根据上述要求和约束条件，得出三种类型的运动学支撑方案可供参考：如图 2(a)所示为传统的球头-V 架型运动学支撑，M_t，M_z，M_r，F_r 4 个自由度依靠接触副间低的摩擦系数和良好的润滑条件来实现，摩擦系数可以控制到 0.1 左右，对应的摩擦力范围较大，使得支撑过程中影响镜体面形的不确定性因素相对较大；如图 2(b)所示为球头-轴承型运动学支撑，用高精度轴承实现 V 架功能[12]，M_t，M_z，F_r 3 个自由度依靠接触低摩擦系数实现，M_r 自由度依靠滚动摩擦实现，其摩擦系数可以控制到 0.001～0.005 量级；如图 2(c)所示为球头-轴承轴套型运动学支撑，用高精度滚动和平动轴承实现 V 架功能，M_r，M_t，M_z，F_r 4 个自由度依靠滚动摩擦实现，由于摩擦系数极低，这些方向上影响镜体面形的不确定性因素变得极小，提高了检测过程中反复拆装镜体条件下面形的复现性。

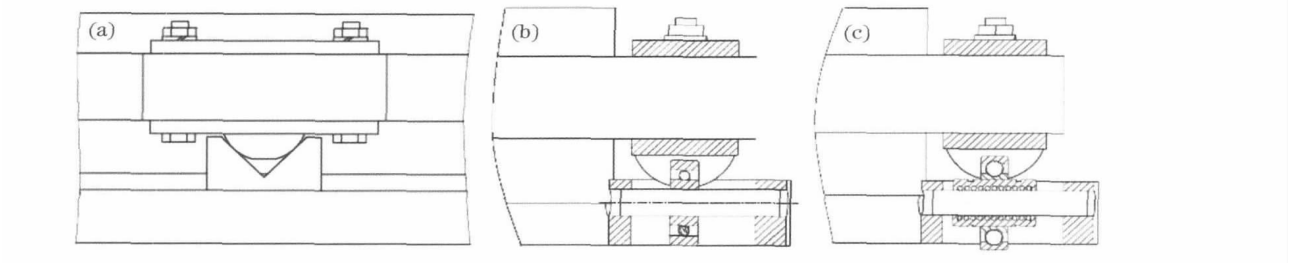

图 2　运动学检测支撑方案。(a)球头-V 架型；(b)球头-轴承型；(c)球头-轴承轴套型

Fig. 2　Type of kinematic mount for high reproducibility metrology. (a) Type of ball-V; (b) type of ball-bearing; (c) type of ball-roll and linear bearing

3　面形复现性影响因素分析

3.1　建立计算模型

针对于 EUVL 系统物镜中的一片反射镜及相关辅件，在 ANSYS 有限元分析(FEA)软件中建立了计算模型，如图 3 所示，分析镜体在支撑过程中各向干扰因素对面形的影响，进而确定检测支撑所能实现的面形复现性。

模型中光学元件基底材料选择微晶玻璃，支撑辅件材料选择铟钢，部件和基底间采用粘接和机械固定结合的方式，粘接层材料选择环氧树脂，厚度

0.1 mm，其物理属性如表 1 所示。

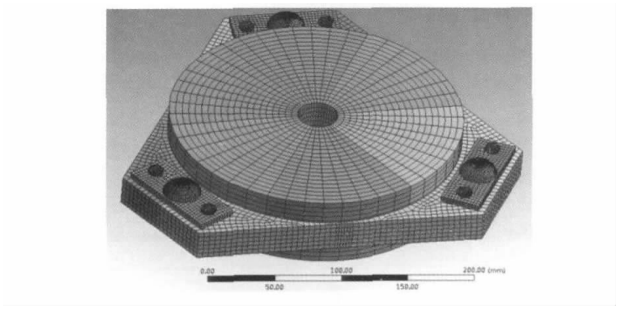

图 3　光学元件有限元模型

Fig. 3　FEA model of the optic mirror

表 1　材料物理属性表

Table 1　Material properties

Material	Density / (kg/m^3)	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio
Zerodur	2570	90.3	0.25
Invar	8130	148	0.29
Epoxy	1220	0.689	0.43

3.2　面形复现性影响因素灵敏度

面形复现性评价过程中，镜体与支撑结构不断安装与分离，干扰因素的大小和空间方向难以确定，因此在分析中选择单个球头处的 4 个自由度方向 M_r，M_t，M_z，F_r 分别引入干扰力（力矩），从而评价干扰因素对面形影响的灵敏度。仿真过程中，镜体处于 6 点接触运动学支撑状态，分别在 M_r，M_t，M_z 方向上引入 20 N·mm 的干扰扭矩，在 F_r 方向上引入 2N 的干扰力，计算由干扰力（力矩）引起的镜体面形变化，其结果如图 4 所示，其面形变化 RMS 分别为0.0298，0.0925，0.0193，0.0047 nm。

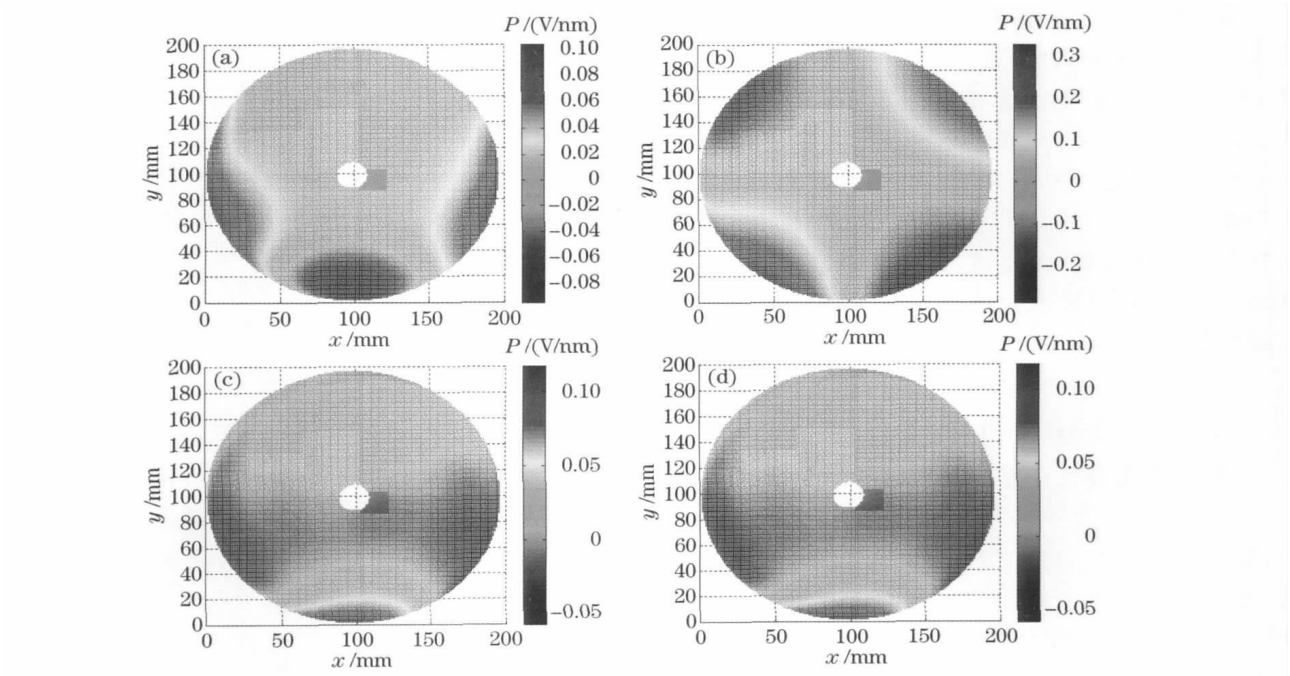

图 4　支撑干扰因素对光学元件面形影响。(a)径向干扰力的影响；(b)径向干扰扭矩的影响；(c)切向干扰扭矩的影响；(d)轴向干扰扭矩的影响

Fig. 4　Deformation of the mirrors due to disturbance in the mount. (a) Figure change of F_r influence; (b) figure change of M_r influence; (c) figure change of M_t influence; (d) figure change of M_z influence

3.3　检测支撑复现性误差

评价复现性误差时，首先分析单个支撑点处所有可能引入的干扰力（力矩）的类型以及对应量级，之后根据上述仿真得出灵敏度计算干扰因素对面形的综合影响效应，最后按照和的平方根（RSS）方法分析计算所有支撑点同时可能引入的干扰因素对面形的影响，最终作为复现性误差的评价指标。

对于球头-轴承轴套型检测支撑，如前述 M_t，M_z，M_r，F_r 4 个自由度均依靠滚动摩擦实现，对应的摩擦系数 k 可控制在 0.001～0.005 对应量级，因此分析中取 k 为 0.01，计算得到干扰因素以及复现性结果如表 2 所示。

其他两种方案按照相同的分析方法，计算中认为滑动摩擦接触副均处于良好润滑条件下，其摩擦系数假定为 0.1，滚动摩擦系数仍取 0.01，计算得到复现性结果如表 3 所示。

表 2　检测支撑方案 3 面形复现性分析

Table 2　Calculate of reproducibility of metrology mount type 3

Disturbance load	Sensitive RMS /nm	Figure RMS /nm	RSS error /nm
F_r=0.28 N	0.014900	0.00410	0.026
M_r=3.14 N·mm	0.004625	0.01400	
M_t=2.22 N·mm	0.000965	0.00210	
M_z=2.22 N·mm	0.000235	0.00052	

表 3　不同检测支撑方案对应面形复现性

Table 3　Reproducibility of different metrology mounts

Type of mount	Reproducibility RMS /nm
Ball-V	0.260
Ball-bearing	0.086
Ball-rotation and linear bearing	0.026

分析仿真结果，方案 1 各个自由度由于干扰力较大，无法实现 RMS 优于 0.1 nm 的面形复现性指标；方案 2 由于采用了摩擦系数极小的轴承支撑方式，大大减小了 M_r 方向对应的干扰力，该方向干扰对面形影响灵敏度相对较高，使得该方案基本满足使用要求；方案 3 中，滚动和滑动轴承的综合作用，替代 V 架功能，M_r，M_t，M_z，F_r 4 个自由度均可认为基本无干扰，使得该方案能够达到 RMS 为0.026 nm 的面形复现性结果。

4　检测支撑复现性实验

4.1　基于高重复性干涉仪的面形检测

按照方案 3 设计研制了高复现性检测支撑装置，如图 5 所示。并且进行了该装置的性能指标测试，测试中光学元件使用了一块面形精度达到 λ/20 [峰谷(PV)值]的球面镜，与支撑装置配合部分采用三块殷钢凸台等高、均布粘接于光学元件侧面，如图 6 所示。检测装置使用了自行研制的高重复性干涉仪，测试过程中温控条件优于 0.01 ℃，振动条件优于 VC-E 标准。

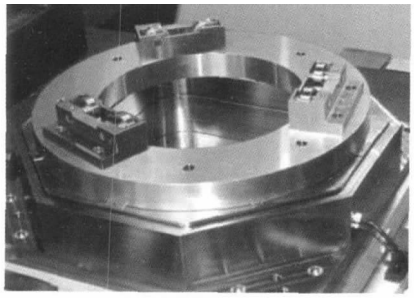

图 5　高复现性检测支撑装置

Fig. 5　Mirror mount for the ultra-high reproducibility metrology

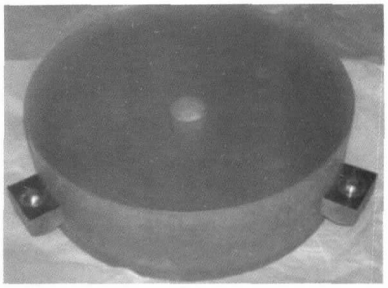

图 6　复现性实验用反射镜

Fig. 6　Mirror used in reproducibility test

首先，光学元件支撑状态下进行面形重复性检测，当 RMS 重复性优于 0.1 nm 时，则认为光学元件、环控以及支撑等条件已经达到稳定状态，此时进行首次面形检测作为复现性实验面形基准值；之后从检测支撑上取出光学元件，改变其原有的支撑状态并放置 12 h；最后重复进行面形基准值测试过程，测得的面形结果作为面形比较值。面形比较值和基准值的差异认为是检测支撑和检测装置共同的复现性结果，该结果扣除检测装置本身的重复性指标即为检测支撑装置所能实现的复现性指标。

4.2　复现性实验结果及分析

经过反复多次的测试实验，目前所能达到的最好的复现性测试结果如图 7 所示，其面形结果 RMS 为0.126 nm。

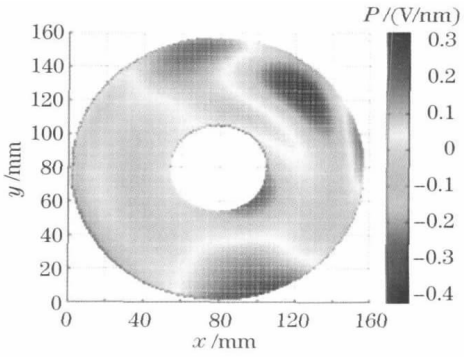

图 7　复现性测量实验结果

Fig. 7　Result of wavefront reproducibility measurement

分析复现性面形图，检测装置和支撑装置共同实现复现性 RMS 为 0.126 nm，其中像散项大小的 RMS 约为 82 pm，主要来自于环控条件，特别是温控条件对干涉测量的影响；三叶项大小的 RMS 约为 62 pm，主要是检测支撑复现性导致的该项误差，同时面形为 λ/20 的被测镜本身也包含一个较大的三叶像差，该因素也会引起复现性测试中的三叶像差。所以得出如下结论：

1）由检测支撑装置引起的面形复现性指标RMS优于70 pm，满足RMS为0.1 nm的复现性设计指标要求。

2）相对于RMS为26 pm的复现性仿真结果，实验结果RMS为62 pm显然较大，但是到了如此高的面形复现精度，被测镜体本身像差、测量环境以及数据处理方式等均会对最终结果产生影响，因此认为仿真和实验结果合理。

5　结　　论

本文为高重复性干涉仪研制了一套检测支撑装置，该装置配合高重复性干涉仪实现高复现性的面形检测。提出了支撑结构的设计方案，建立了支撑结构的物理模型，利用ANSYS软件仿真分析了各向干扰力对面形的影响以及不同支撑方案所能实现的复现性，仿真分析结果表明，设计方案能够实现优于30 pm RMS的面形复现性结果。确定了最终检测支撑结构形式，并在高重复性干涉仪装置上进行了面形复现性测试。测试结果表明，由检测支撑装置引起的面形复现性指标RMS优于70 pm，满足RMS为0.1 nm的复现性设计指标要求。

参　考　文　献

1 B. Wu, A. Kumar. Extreme ultraviolet lithography: a review [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2007, **B25**(6): 1743～1761

2 R. Hudyma. An overview of optical systems for 30 nm resolution lithography at EUV wavelengths [C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 137～148

3 M. Lowisch, P. Kuerz, H. J. Mann *et al*.. Optics for EUV production[C]. *SPIE*, 2010, **7636**: 763603

4 T. Miura, K. Murakami, K. Suzuki *et al*.. Nikon EUVL development progress summary[C]. *SPIE*, 2006, **6151**: 615105

5 T. Hasegawa, S. Uzawa, T. Honda *et al*.. Development status of Canon's full-field EUV tool[C]. *SPIE*, 2009, **7271**: 72711Y

6 Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin *et al*.. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112007
陈　华，史振广，隋永新 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. 光学学报，2011，**31**(1)：0112007

7 Yang Guanghua, Li Yanqiu. 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
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

8 Zhang Jian, Liu Weiqi, Wang Rudong *et al*.. Effect of gravity deformation on performance of super-accuracy Fizeau interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712001
张　健，刘伟奇，王汝冬 等. 自重变形对超高精度Fizeau干涉仪的光学性能影响[J]. 光学学报，2011，**31**(7)：0712001

9 P. Kurz. Optics for EUV lithography [C]. Burlingame: 2nd International Workshop on EUV Lithography, 2000. 1～14

10 Wang Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gui *et al*.. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1833～1840
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，2010，**18**(8)：1833～1840

11 D. L. Blanding. Principles of Exact Constraint Mechanical Design[M]. Rochester: Eastman Kodak Company, 1992. 68～74

12 L. C. Hale, R. M. Hudyma, J. S. Taylor *et al*.. High-NA camera for an EUVL microstepper[C]. Scottsdale: 15th Annual American Society for Precision Engineering, 2000. 1～4

栏目编辑：何卓铭